

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO SOCIOECONÔMICO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

Ricardo Augusto D. G. Souza

**Diretrizes urbanísticas, densidade populacional e emissões de carbono nos
municípios brasileiros**

Florianópolis

2023

Ricardo Augusto D. G. Souza

Diretrizes urbanísticas, densidade populacional e emissões de carbono nos municípios brasileiros

Projeto de monografia submetido ao curso de ciências econômicas do Centro Socioeconômico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em ciências econômicas.

Orientador(a): Prof. Dominik Hartmann, Dr.

Florianópolis

2023

Souza, Ricardo Augusto

Diretrizes urbanísticas, densidade populacional e emissões de carbono nos municípios brasileiros / Ricardo Augusto Souza ; orientador, Dominik Hartmann, 2023.

26 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) –
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Socioeconômico, Graduação em Ciências Econômicas,
Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Ciências Econômicas. 2. Ciências Econômicas. 3. Externalidades. 4. Emissões de dióxido de carbono. 5. Urbanismo. I. Hartmann, Dominik. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Ciências Econômicas. III. Título.

Ricardo Augusto Dias Gonçalves Souza

Diretrizes urbanísticas, densidade populacional e emissões de carbono nos municípios brasileiros

Florianópolis, 21 de novembro de 2023.

O presente trabalho em nível de graduação foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dominik Hartmann, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Francis Carlo Petterini Lourenço, Dr
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Helberte João França Almeida, Dr
Universidade Federal de Santa Catarina

Certifico que esta é a **versão original e final** do Trabalho de Conclusão de Curso que foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas por mim e pelos demais membros da banca examinadora.

Prof. Dominik Hartmann, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha mais profunda gratidão aos professores e técnicos do departamento, cuja solicitude e apoio foram fundamentais ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Desde o início, senti-me acolhido e sempre recebi a atenção necessária para o meu desenvolvimento e aprendizado.

Também gostaria de agradecer aos meus pais e à Viviane pelo apoio contínuo durante meus estudos. Sem sombra dúvidas, seu incentivo e torcida foram fundamentais para a minha graduação.

E por último meus colegas de turma, com quem fiz amizades das quais levarei comigo para o resto da vida.

RESUMO

O presente trabalho se propõe a aprofundar o entendimento sobre as externalidades causadas pelas diretrizes urbanísticas nos municípios brasileiros. Para isso se baseia nos modelos teóricos de Bertaud/Brueckner, e Ribeiro/Rybski/Kropp. Além disso, para ilustrar os argumentos, faz-se um breve estudo de caso do município de Florianópolis. Para tal foram utilizados os dados dos últimos dois censos demográficos, somados a dados de emissões líquidas de carbono. Quanto às emissões de carbono proporcionais, observou-se uma elasticidade de -0,659 entre as emissões per capita e a densidade populacional. Dados os devidos controles e ponderações, esse é um indicativo que diretrizes urbanísticas menos avessas ao adensamento podem vir a ser mais sustentáveis, ajudando a mitigar os efeitos negativos de emissões de carbono.

Palavras-chave: Demografia, densidade populacional, urbanismo, ordenamento urbano.

ABSTRACT

This study aims to deepen the understanding of the emissions externalities caused by urban planning guidelines in Brazilian municipalities. It is based on the theoretical models of Bertaud/Brueckner and Ribeiro/Rybski/Kropp. Additionally, a brief case study of the municipality of Florianópolis is presented to illustrate the arguments. The study utilizes data from the last two demographic censuses, combined with data on net carbon emissions. Regarding proportional carbon emissions, a elasticity of -0.659 was observed between per capita emissions and population density. With appropriate controls and considerations, this indicates that urban planning guidelines less averse to densification could be more sustainable, helping mitigate the negative effects of carbon emissions.

Keywords: Demographics, population density, urbanism, urban planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Áreas com gabarito máximo maior ou igual a 10 andares em Florianópolis.....	23
Figura 2: Tempo médio de deslocamento na mesorregião de Florianópolis.	24
Figura 3: Emissões de CO2 totais x população.....	30
Figura 4: Emissões de CO2 per capita x densidade populacional.....	32
Figura 5: Q-Q plot dos resíduos do modelo (3).....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estatísticas da regressão do modelo (1).....	31
Tabela 2: Estatísticas da regressão do modelo (2).....	32
Tabela 3: Estatística da regressão do modelo (3) x modelo (2).....	33
Tabela 4: Bootstrap dos resultados.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
	O CONCEITO DE EXTERNALIDADE.....	16
2.1.1	A internalização de externalidades e o imposto pigouviano.....	16
	ORDENAMENTO URBANO.....	19
2.1.2	Planos diretores.....	19
2.1.3	Zoneamento.....	19
	A RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE APROVEITAMENTO E A ÁREA URBANA.....	20
2.1.4	Efeitos indesejados.....	21
3	METODOLOGIA.....	26
	DADOS.....	26
3.1.1	Densidade Populacional.....	26
3.1.2	Emissões per capita.....	27
3.1.3	Estimativas populacionais.....	27
	MODELOS.....	28
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	30
5	LIMITAÇÕES.....	36
6	IMPLICAÇÕES POLÍTICAS.....	37
7	CONCLUSÃO.....	40
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho busca aprofundar o entendimento sobre as externalidades, em especial quanto às emissões de carbono causadas pelo escalonamento urbano e a concentração demográfica nos municípios brasileiros, discutidos à luz da teoria econômica e de possíveis políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável. Alinhar o crescimento à sustentabilidade é um grande e relevante desafio aos municípios brasileiros, principalmente municípios como Florianópolis.

Para familiarizar o leitor ao tema, é realizada uma breve introdução sobre como é organizado o ordenamento urbano no Brasil e externalidades causadas ou exacerbadas pelo mesmo.

O ponto fundamental desse trabalho busca mensurar e identificar a relação entre a densidade demográfica, o escalonamento urbano e a emissão de dióxido de carbono nos municípios brasileiros, de acordo com o modelo teórico proposto por Ribeiro, Rybski e Kropp (2019), que apontou com grande robustez uma relação negativa entre a densidade populacional e as emissões de gases poluentes. Tal relação está de acordo com o modelo monocêntrico de Bertaud e Brueckner (2005) que indica que diretrizes urbanísticas mais restritivas em relação ao potencial construtivo geram aumento na mancha urbana. Essa relação foi observada nos municípios brasileiros, também com grande robustez por Lima e Monasterio (2023).

Com base nesse referencial teórico, esta monografia busca preencher essa lacuna na literatura, acrescentando análises sobre o impacto do escalonamento e densidade urbana nos municípios brasileiros. Para averiguar se há comportamento similar, busca-se inicialmente replicar a mesma metodologia utilizando dados espaciais e populacionais brasileiros.

Além disso, este trabalho busca entender melhor essa relação, adicionando variáveis controles para atividade econômica buscando isolar melhor o efeito, aumentando o grau de comparação.

O projeto tem como principal objetivo identificar quantitativamente os efeitos relacionados à densidade populacional nos municípios brasileiros para subsidiar

informações e auxiliar no debate dessas diretrizes urbanísticas no país, contribuindo para o aprimoramento das estratégias de planejamento urbano e ambiental, mitigando efeitos indesejados.

Além da análise teórica e quantitativa sobre a relação entre diretrizes urbanísticas, densidade populacional e emissões de carbono em municípios brasileiros, este trabalho incorpora um breve estudo de caso focado em Florianópolis. A escolha de Florianópolis não é aleatória, por se tratar de uma capital situada numa ilha, ela é representativa de cidades com maiores populações e espaço para crescimento urbano restrito. Com uma dinâmica complexa entre sua mancha urbana e a preservação ambiental, torna-se interessante a análise sob luz da teoria de como as políticas urbanísticas podem influenciar a qualidade de vida, a mobilidade e a sustentabilidade em um contexto onde o equilíbrio entre crescimento urbano e preservação ambiental é particularmente desafiador, caso de muitos municípios brasileiros, em especial os presentes na região litorânea. Este estudo de caso proporciona uma visão aprofundada sobre como as teorias e modelos discutidos podem se manifestar na realidade de uma cidade brasileira, oferecendo assim um ponto de ancoragem concreto para os conceitos e análises abordados ao longo deste trabalho.

JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

As diretrizes urbanísticas, definidas por lei pelo plano diretor de todos os municípios com mais de 20 mil habitantes no país, são revistas de 10 em 10 anos, de acordo com a Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001, conhecida como Estatuto da Cidade. Destes muitos estão em fase de revisão ou entrarão nos próximos anos.

A forma como nossas cidades são moldadas por essas legislações trazem impactos na renda, mobilidade, sustentabilidade e qualidade de vida dessas cidades.

Sabemos da microeconomia que os indivíduos respondem a incentivos, buscando maximizar sua utilidade pessoal (MANKIWI, 2014). Essa premissa é crucial

para entender o comportamento humano em contextos urbanos, onde decisões individuais sobre habitação, transporte e consumo têm implicações significativas para o crescimento e ordenamento urbano, além da sustentabilidade ambiental.

Moldar nossas cidades de modo a alinhar esses incentivos à objetivos como uma melhora nos indicadores de qualidade de vida e meio ambiente é algo desejável, principalmente para mitigar externalidades causadas por conta das regulamentações ordenamento urbano.

Este trabalho tem como principal objetivo identificar quantitativamente os efeitos nas emissões de dióxido de carbono relacionados à densidade populacional nos municípios brasileiros para subsidiar informações e auxiliar no debate dessas diretrizes urbanísticas no país.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O CONCEITO DE EXTERNALIDADE

O conceito de externalidade, muito conhecido pelos estudantes de economia e amplamente estudado nesse campo, consiste em uma falha de mercado.

A externalidade descreve uma situação em que a atividade realizada por algum agente (indivíduo, empresa ou setor público) impõe custos ou benefícios difusos à terceiros não envolvidos. (MANKIWI, 2014)

Tal externalidade pode ser positiva, quando geram benefícios, como o fato de um indivíduo que, ao se vacinar, aumenta o nível de proteção naquela população contra uma determinada doença. Ou, pode ser negativa, como por exemplo a emissão de gases poluentes pelo escapamento de um carro, ou o barulho excessivo gerado por alguma atividade como construção ou mineração.

O principal ponto de interesse e aspecto a ser levado em conta quando falamos de externalidades é avaliar o não apenas o custo privado daquela atividade, mas também o custo social da mesma.

Ao levarmos em conta esse custo em um mercado gerador de externalidades, é costumeiro buscar o ótimo social, diferente do equilíbrio de mercado quando considerado apenas o custo privado.

2.1.1 A internalização de externalidades e o imposto pigouviano

Uma das principais estratégias para se lidar com externalidades é a do imposto pigouviano, que consiste em internalizar o custo social causado pela atividade em um tributo cobrado pelo gerador da mesma.

Para computo do ótimo social, deve ser satisfeita a relação:

$$P = CMg_p + CMg_e$$

Que indica que o preço P deve ser igual não apenas ao Custo Marginal (CMg), como no equilíbrio de mercado em concorrência perfeita usual.

Deve ser levado em conta também o custo social, para isso separamos o custo marginal em Custo Marginal Privado (CMg_p) e o Custo Marginal Social, ou Custo Marginal Gerado pela Externalidade (CMg_e).

Um dos exemplos mais comuns de internalização das externalidades mediante taxaço são os créditos de carbono. Onde empresas em setores que emitem poluentes são tributadas proporcionalmente de acordo com o montante de poluente emitido. (GODOY, 2016)

Esse design de taxaço induz o custo social na tomada de decisão dos agentes privados, levando em consideraço os efeitos externos sobre a sociedade e cria incentivos para a reduço.

No mesmo raciocínio, setores benéficos, como o de produço de medicamentos e vacinas, soluço sustentáveis de geraço e armazenamento de energia, por apresentar externalidades positivas, trazendo benefícios ao público podem receber subsídios.

Isso pode ser identificado em uma situaço onde o custo marginal da externalidade é negativo.

$$(CMg_e < 0) \rightarrow \text{Externalidade positiva} \quad (CMg_e > 0) \rightarrow \text{Externalidade negativa}$$

Porém, e quando a externalidade é causada diretamente pelas diretrizes urbanísticas que regulam o uso do solo e o ordenamento? Como internalizar essa externalidade e mitigar os efeitos negativos?

Conforme o trabalho de Bertaud e Brueckner (2005), uma restriço no coeficiente de aproveitamento máximo em uma dada cidade, implica em uma relaço causal no aumento dos custos de transporte já que torna-se mais atrativo a migraço da populaço das centralidades às áreas periféricas.

Podemos aqui ver um paralelo com o conceito de custos sociais: as diretrizes urbanísticas que limitam o desenvolvimento vertical nas áreas centrais, inadvertidamente, contribuem para o aumento dos custos de transporte e, conseqüentemente, para a elevaço dos custos sociais. Esses custos financeiros

também vêm acompanhados de outros efeitos negativos em relação à sustentabilidade e mobilidade.

Além disso, se considerarmos, como de acordo com a teoria, que as horas trabalhadas podem ser modeladas como uma desutilidade. Faz sentido considerar que horas gastas em comutas diárias também sejam vistas como desutilidade.

ORDENAMENTO URBANO

2.1.2 Planos diretores

As diretrizes urbanísticas são, em sua maioria, definidas por lei, formalizada pelo plano diretor, um documento normativo que estabelece diretrizes para o desenvolvimento urbano. Todos os municípios brasileiros com mais de 20 mil habitantes têm, por obrigação, um plano diretor, que deve ser revisto de 10 em 10 anos, de acordo com a Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001, conhecida como Estatuto da Cidade.

Um plano diretor, em sua essência, define o planejamento urbano que irá orientar o desenvolvimento e organização das cidades, buscando definir algum tipo de ordem. Nessa legislação onde são descritas as regulações de uso e aproveitamento do solo, como as atividades a serem exercidas e determinados pontos da cidade (residencial ou comercial), além do zoneamento construções.

2.1.3 Zoneamento

O zoneamento define a divisão do território urbano em áreas com diferentes usos, com regras específicas de uso e ocupação do solo. Cada uma dessas áreas conta com regras específicas de uso e ocupação do solo.

Sua função é determinar onde serão as áreas destinadas ao uso residencial, comercial, industrial e/ou áreas de uso misto, além dos usos permitidos em cada ponto da cidade. Mesmo sendo consideradas áreas de uso comercial, não significa que todas as atividades serão permitidas naquele ponto. Polos geradores de tráfego ou ruído são menos propensos a serem localizados próximo de áreas residenciais.

Por definir o uso do solo, o zoneamento também acaba por determinar a densidade de desenvolvimento permitida, a altura dos edifícios, o recuo da construção em relação à rua e aos limites do lote, e outras características do

ambiente construído. Isso ajuda a preservar o caráter de bairros específicos e a manter a qualidade de vida urbana.

Um zoneamento rígido pode limitar a flexibilidade necessária para acomodar o crescimento dinâmico das cidades e as mudanças nas necessidades da população. Os principais parâmetros construtivos definidos pelo zoneamento para modelar a cidade são o coeficiente de aproveitamento e o gabarito.

O coeficiente de aproveitamento é uma referência que estabelece limites e define o potencial construtivo das propriedades. É calculado dividindo-se a área total construída pelo tamanho do terreno, resultando em um valor que indica quantas vezes a área total pode ser maior que o terreno. Já o gabarito refere-se à altura máxima que uma construção pode atingir em uma determinada zona da cidade, podendo ser expresso em metros ou em número de andares de acordo com cada legislação específica.

Os planos diretores são cruciais no contexto deste estudo, por definirem os parâmetros que ditarão o potencial construtivo em cada região da cidade, de forma a moldar o crescimento urbano e demográfico, ao menos pela próxima década.

Parâmetros como o coeficiente de aproveitamento e o gabarito moldam a estrutura física das cidades, influenciando diretamente na densidade de cada região e o tipo de desenvolvimento urbano dos municípios em questão. A definição desses parâmetros determina como e onde as cidades crescerão.

A RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE APROVEITAMENTO E A ÁREA URBANA

Há uma relação muito clara entre o coeficiente de aproveitamento e a área urbana. A imposição de coeficientes de aproveitamento mais restritos no centro da cidade desencoraja a ocupação do mesmo, fazendo com que os indivíduos se desloquem aos subúrbios em busca de moradia. (BERTAUD, BRUECKNER, 2005).

Municípios que adotam coeficientes de aproveitamento mais restritos acabam por espriar o desenvolvimento urbano, apresentando maiores áreas urbanas em relação aos demais.

2.1.4 Efeitos indesejados

Tal espraiamento é acompanhado de diversas externalidades negativas, como o aumento no custo agregado com transporte. Acompanhadas às perdas econômicas também estão associados ao espraiamento urbano o aumento de nos tempos de comuta, o que podem acarretar um aumento de emissões de gases poluentes.

Medidas que estimulem o espraiamento e o afastamento da população das centralidades aos subúrbios também vão na contramão do princípio da eficiência da administração pública, já que a literatura aponta que um aumento na densidade urbana trazer consigo, em certa medida, ganhos de eficiência de escala. Uma diminuição no número de centralidades (ou clusters) pode ser uma forma eficiente de diminuir os custos per capita com infraestrutura urbana (ÁLVAREZ; PRIETO; ZOFÍO, 2013).

A imposição de limites no potencial construtivo urbano, mediante um coeficiente de aproveitamento máximo mais restritivo, traz também consigo impactos negativos na oferta de moradias e um desequilíbrio no mercado imobiliário.

Ao limitar a quantidade de espaço construído que pode ser legalmente produzido, as cidades impõem uma barreira artificial à oferta de moradia, o que pode ser particularmente problemático em áreas com alta demanda habitacional, pressionando o preço por metro quadrado das habitações naquela localização para cima. (BERTAUD, BRUECKNER, 2005).

Essa restrição pode resultar em um aumento significativo dos preços das moradias existentes, exacerbando problemas de acessibilidade habitacional, ao

fazer com que a população de menor renda se dirija à regiões mais periféricas da cidade, se distanciando das centralidades.

Essa migração ocorre por conta do fato de que moradias em regiões periféricas são, no geral, mais acessíveis. Os menores preços pelo m² de moradia acabam por tonar aumento nos custos com transporte, acompanhados a essa troca, justificáveis dado o aumento nos preços centrais.

A migração de residentes para áreas periféricas, traz consigo custos de bem-estar adicionais que muitas vezes são subestimados. O aumento nos custos de transporte, embora altamente relevantes, não devem ser o único fator a ser considerado. Há também impacto na qualidade de vida dos residentes por conta da menor proximidade a serviços, empregos e amenidades urbanas.

A longo prazo, esses efeitos podem auxiliar na criação de uma cidade mais segregada, com desigualdades mais acentuadas entre o centro e a periferia.

O custo social da restrição no coeficiente de aproveitamento máximo pode ser mensurado, em parte, pelo aumento nos custos de transporte. Os resultados das simulações realizadas por Bertaud e Brueckner para uma cidade hipotética revelam que o custo de bem-estar associado a essas restrições de coeficiente de aproveitamento máximo é aproximadamente 2% da renda das famílias. Já, um estudo de caso específico para Bangalore aponta que o custo de bem-estar para as famílias pode variar entre 1,5% e 4,5% da renda familiar (BERTAUD, BRUECKNER, 2005).

Quanto ao Brasil, utilizando metodologia análoga, o custo social por conta do aumento das comutas diárias é de aproximadamente US\$ 9,56 milhões para uma cidade média brasileira. O que corresponde a 23,14% da receita média obtida com impostos de propriedades territoriais como o Imposto Predial Territorial Urbano (IPTU) e o Imposto de Transmissão de Bens Imóveis (ITBI). Já uma redução de um desvio padrão no coeficiente de aproveitamento máximo permitido aumenta a área espacial da cidade em 12,4% (CARVALHO, MONASTERIO, 2022).

Dadas as noções partem do modelo monocêntrico de Bertaud e Brueckner, no qual considera uma cidade hipotética de uma única centralidade situada no centro e cresce de forma radial. Podemos identificar que o modelo de cidade monocêntrica, traz uma cadeia de causalidade clara:

A imposição de coeficientes de aproveitamento mais restritos nas centralidades leva a um aumento no custo de moradias nessas áreas centrais, seguido de deslocamento da população em direção às regiões periféricas, em busca de moradia mais acessível.

O deslocamento para as regiões periféricas causa o aumento da área urbana, e um aumento nos custos de transporte no agregado e no tempo e distância no que tangem as comutas diárias, trazendo impactos negativos diretos na qualidade de vida e renda da população que se afasta do centro.

De modo apenas a ilustrar esses argumentos, tomemos como exemplo a cidade de Florianópolis:

O plano diretor da capital catarinense conta com coeficientes de aproveitamento restritivos, que limitam o potencial construtivo na cidade. A figura abaixo demonstra todas as áreas onde podem ser construídos 10 ou mais andares na cidade.

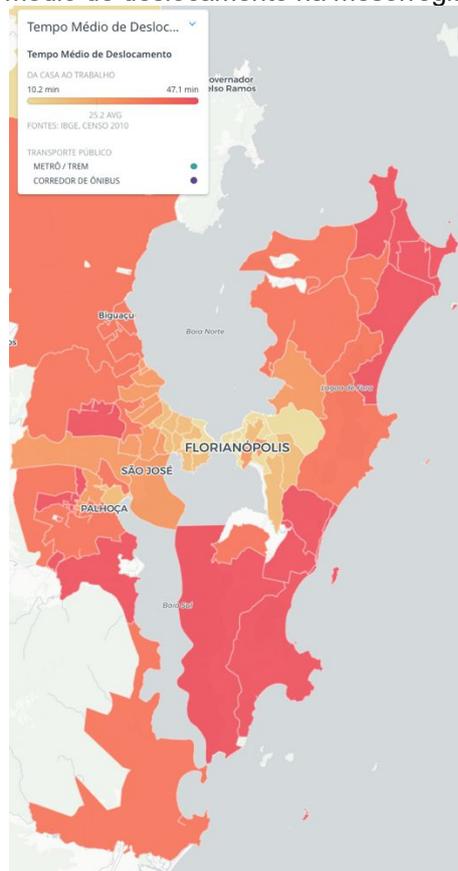
Figura 1: Áreas com gabarito máximo maior ou igual a 10 andares em Florianópolis



Fonte: Elaboração própria (2023)

Dada a restrição no potencial construtivo, seguindo as noções anteriormente citadas, esperamos um crescimento de forma radial da mancha urbana e dos tempos de deslocamento em relação à centralidade, uma vez que a maior parte dos empregos está ali situada.

Figura 2: Tempo médio de deslocamento na mesorregião de Florianópolis



Fonte: Guedes, Loureiro e Maia, 2022

No entanto, em desacordo com esse argumento, as diretrizes urbanísticas de Florianópolis são bastante restritivas. O que, de acordo com o modelo monocêntrico de Bertaud pode ser um dos fatores explicativos do aumento da mancha urbana e o espraiamento urbano.

Mudanças na densidade populacional trazem também consigo efeitos sob as economias de escala e os custos de construção e manutenção no que tange ao equipamento público e a infraestrutura urbana.

Conforme apontado por Álvarez (2014), essa tendência é amplamente observada em cidades europeias.

As economias de custos advindas do aumento da densidade urbana, especialmente através da redução da dispersão urbana e do número de aglomerados (clusters), são superiores às economias obtidas pelo aumento da densidade populacional dentro dos aglomerados já existentes. (ÁLVAREZ, 2014)

Isso é um indicativo de que estimular o crescimento urbano dentro dos clusters já existentes, aumentando a densidade nos mesmos, evitando a formação de novos clusters isolados ou o aumento na área é bem vindo sob a ótica da eficiência dos recursos da administração pública.

Ainda segundo Álvarez, as diretrizes urbanísticas que tangem sobre o crescimento urbano futuro devem desencorajar a expansão da área urbana dispersa e desconexa.

Quanto aos benefícios relacionados à escala, áreas com densidades populacionais maiores têm maior potencial para sustentar sistemas de transporte público eficientes, como metrô e trens. Esses sistemas tendem a ser menos viáveis em regiões menos densas devido aos altos custos de implementação, manutenção e operação, contrastando com a receita relativamente baixa por passageiro, inviabilizando sua implementação na grande maioria dos municípios brasileiros. Para que tais sistemas de transporte sejam economicamente viáveis, é necessário um volume significativo de passageiros em trânsito regularmente.

Dada a cadeia de causalidade do modelo de cidade monocêntrica, que leva ao aumento das distâncias percorridas e dos custos de transporte, torna-se natural esperar também um aumento nas emissões de gases poluentes, considerando que grande parte dos centros urbanos ainda depende majoritariamente de transporte via veículos de combustão, sejam eles públicos ou individuais, contribuindo para a poluição atmosférica e acelerando o processo de mudanças climáticas. É justamente essa última afirmação que esse trabalho busca explorar.

3 METODOLOGIA

DADOS

Para realizar as análises, se faria necessário obter dados quanto às emissões de dióxido de carbono por município, além de dados e espaciais de cada município, além dos dados de IDHM. Foram então utilizadas três bases de dados distintas.

Para obter os dados territoriais e demográficos de cada município foram utilizados os dados tanto do censo de 2010 quanto do censo de 2022, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foram obtidos os dados geográficos da divisão-político administrativa brasileira, obtendo a área total (km²) de cada município nos dois períodos, juntamente à suas populações.

Para obtenção dos dados referentes às emissões de dióxido de carbono (CO₂), foi utilizada a base de dados disponibilizada livremente pelo Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa (SEEG), que contém as estimativas de emissões em toneladas por município brasileiro.

Note que essa base de dados só contém informações de 2010 à 2019. De modo a adequar os dados para realizar uma análise mais recente da situação, faz-se necessário estimar a população em 2019, utilizando a média geométrica do incremento anual da população.

3.1.1 Densidade Populacional

Obtidos os dados de população e área, podemos calcular a densidade populacional de cada município brasileiro. Para isso foram utilizados os dados espaciais e de projeção populacional para o ano de 2021, dada a falta de dados censitários atualizados, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Densidade populacional \hat{D}

3.1.2 Emissões per capita

Para cálculo das emissões per capita, foram utilizados os dados de emissões totais de CO₂ por município disponibilizados pelo Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) em conjunto com as projeções populacionais do IBGE, já mencionadas acima.

O cálculo das emissões per capita se dá da seguinte forma:

$$Emissões\ de\ CO_2\ per\ capita\ i$$

3.1.3 Estimativas populacionais

Como os últimos dados de emissões disponíveis datam em 2019, para melhor precisão das estimativas populacionais(i), utilizou-se a média geométrica de incremento anual, seguindo a própria definição do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

$$Taxa\ Geométrica\ de\ Incremento\ Anual\ (i) = \left(\left(\frac{População_{2022}}{População_{2010}} \right)^{1/12} - 1 \right) \times 100$$

Com a obtenção dessa taxa, podemos realizar estimativas com relativa precisão quando estamos tratando de períodos curtos. Como o nosso caso tratam-se de apenas três anos podemos realizar tal inferência sem maiores problemas.

Para calcular a estimativa da população em cada um dos municípios em 2019 foi realizada a seguinte operação, partindo das populações em 2022:

$$População_{2019} = População_{2022} \times (1-i)^3$$

MODELOS

Para elucidar de forma adequada o tema, serão especificados alguns modelos estatísticos.

Os primeiros dois modelos buscam replicar a metodologia proposta por Ribeiro, Rybski e Kropp, que verifica a elasticidade entre as emissões de carbono e a densidade populacional, aplicando-a aos dados de municípios brasileiros. Faremos isso para verificar se o comportamento das variáveis de interesse se replica da mesma forma nos municípios brasileiros em relação às cidades americanas, originalmente analisadas pelos proponentes da metodologia..

Após isso, esse trabalho se propõe a apresentar uma nova especificação, que além de trazer melhor ajuste aos dados brasileiros, também controla para atividade econômica.

O modelo (1), almeja estimar a relação entre as emissões totais de CO₂ (em toneladas) com o número bruto de habitantes. O modelo, proposto por Ribeiro, Rybski e Kropp parte da noção de elasticidade entre emissões e população, tendo especificação inspirada em uma função de produção do tipo Cobb-Douglas:

$$\ln(\widehat{Emissões\ de\ CO_2\ totais}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(População) + e$$

É esperado uma relação positiva, visto que um maior número de pessoas tende a emitir uma quantidade maior de CO₂ no agregado.

Já o segundo modelo visa verificar a relação entre as emissões per capita de CO₂ e a densidade populacional, mantendo o mesmo raciocínio, porém de forma proporcional:

$$\ln(\widehat{CO_2\ capita}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Densidade\ Populacional) + e$$

O modelo (2), da forma como está especificado, irá medir a elasticidade entre uma variável e outra, ou seja, estamos estimando o impacto de uma variação percentual da densidade populacional nas emissões de CO₂ per capita.

Ambas as especificações medem a elasticidade entre emissões e população, sendo o modelo (1) de forma agregada e o modelo (2) de forma proporcional. Dados os resultados obtidos por Ribeiro, Rybski e Kropp ao analisarem dados de cidades norte-americanas, a expectativa é de que se obtenha uma relação negativa entre as variáveis também no Brasil.

Após replicar a metodologia do paper citado, o terceiro modelo visa aprofundar a análise, adicionando variáveis controle. Mantêm-se a noção de função de produção, porém agora controlado para atividade econômica e população.

O modelo (3) está especificado da seguinte forma:

$$\widehat{\ln(CO2_{capita})} = \beta_0 + \beta_1 \ln(Densidade\ Populacional) + \beta_2 \ln(PIB_{capita}) + \beta_3 \ln(População) + e$$

Para interpretar esse modelo usaremos a noção de elasticidade. O coeficiente β_1 deve ser interpretado como o impacto, em variação percentual nas emissões, dado a variação de uma unidade percentual na densidade populacional, *ceteris paribus*.

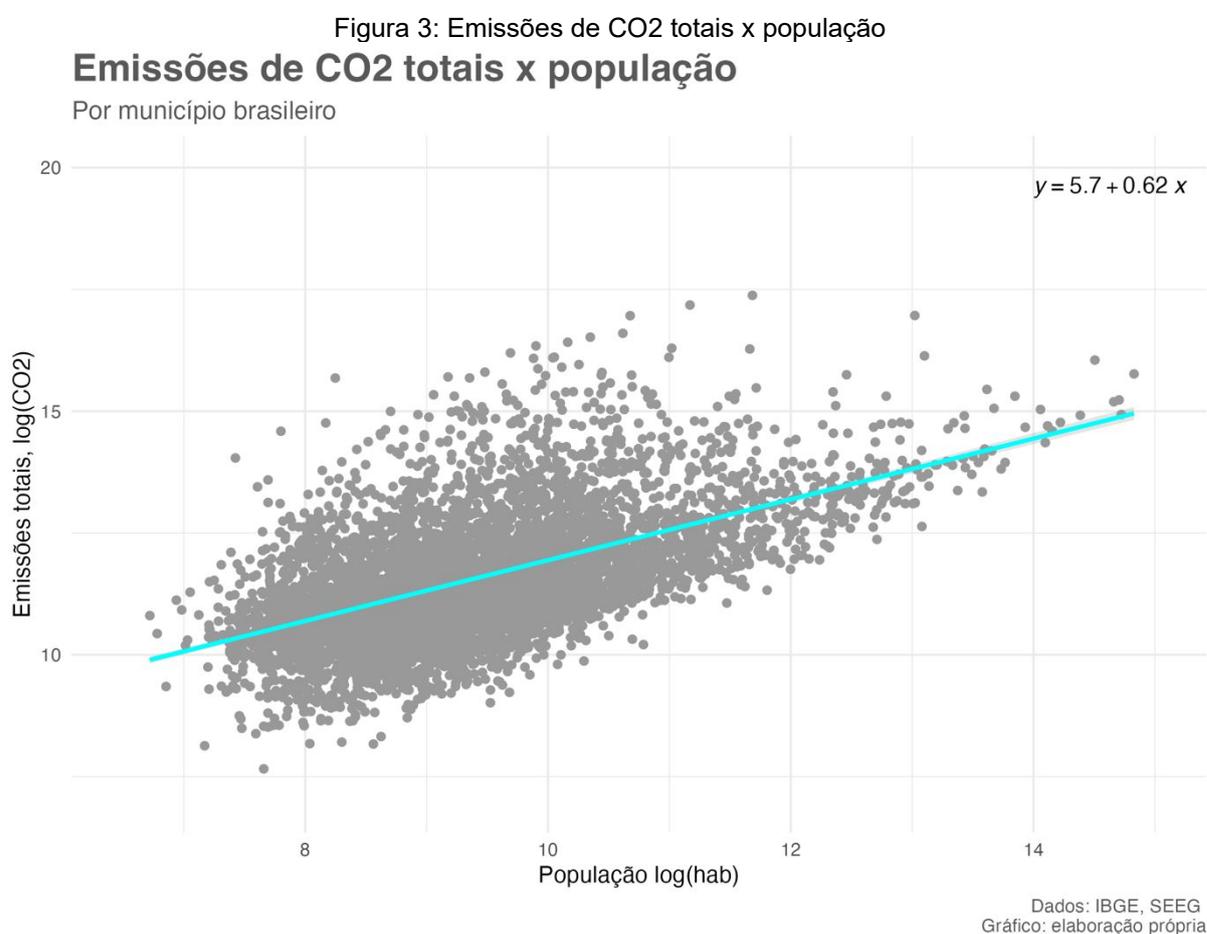
O objetivo aqui seria analisarmos o comportamento de variações na densidade populacional em cidades com mesmo nível de atividade e mesma população. Trata-se de uma tentativa de isolar o efeito analisado.

Uma limitação nessa especificação é que haveria grande multicolinearidade, dado que as variáveis apresentam correlações consideráveis entre si. A presença de multicolinearidade no modelo traz consigo preocupações, visto que não podemos confiar diretamente nos coeficientes estimados.

Para contornar esse problema, e dar maior robustez à análise realizaremos o método de bootstrap, obtendo assim maior confiança nos resultados. Em todos os modelos houve baixo viés quando comparados os resultados do bootstrap com o resultado por mínimos quadrados ordinários.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em relação ao primeiro modelo, de especificação mais simples que visa medir a elasticidade entre variações na população e variações nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) totais, os resultados indicam que a cada 1% de aumento na densidade populacional, se observa 0,62% de aumento das emissões de CO₂ no agregado.



Fonte: Elaboração própria

Os resultados aqui obtidos são consistentes com os resultados de Ribeiro, Rybski e Kropp e indicam que há similaridade no comportamento entre municípios brasileiros e norte-americanos em relação às emissões de dióxido de carbono no agregado.

Quando aos dados da regressão há significância estatística em todos os regressores, também havendo significância estatística global.

Tabela 1: Estatísticas da regressão do modelo (1)

log (CO2 total)	
	(1)
Constante	5,688*** (0,117)
log (pop_2019)	0,625*** (0,012)
Observações	5.554
R2	0,537
R2 ajustado	0,537
Erro padrão residual	0,788
Estatística F	6.441,770***

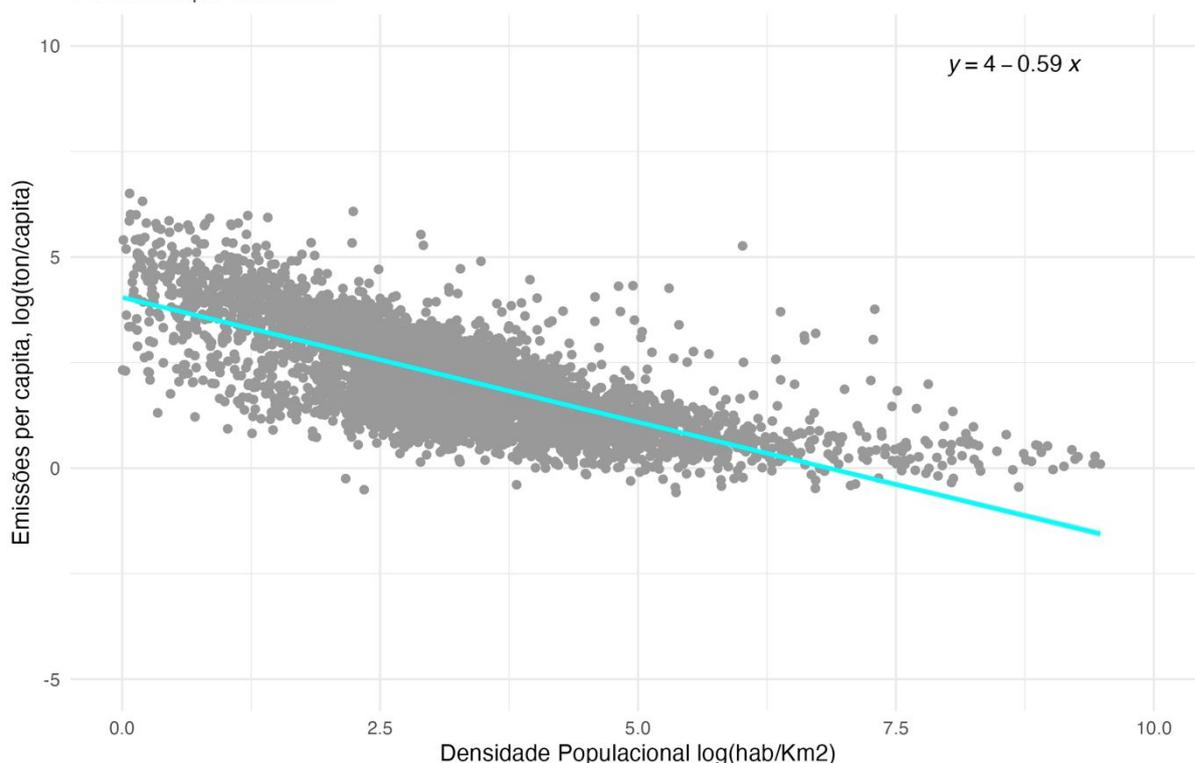
Fonte: Elaboração própria

Em relação ao segundo modelo, que analisa os resultados de forma proporcional, ou seja, considera as emissões per capita em relação a densidade populacional, podemos ver o efeito inverso.

Tais resultados também estão consistentes com os resultados de Ribeiro, Rybski e Kropp. Pode-se observar no gráfico abaixo uma sequência de valores negativos de emissões, em especial às observações de maior densidade. Esse fato se dá por conta de que as emissões líquidas de gases poluentes per capita se colocam entre 0 e 1 tonelada per capita. Como estamos tratando com dados em log, ao aplicar o logaritmo nesses valores, o resultado obtido é negativo.

Figura 4: Emissões de CO2 per capita x densidade populacional
Emissões de CO2 per capita x densidade populacional

Por município brasileiro



Dados: IBGE, SEEG
 Gráfico: elaboração própria

Fonte: Elaboração própria

Quanto as estatísticas da regressão, também á significância estatística em todos os regressores e significância global. O viés apontado pelo bootstrap também é baixo.

Tabela 2: Estatísticas da regressão do modelo (2)

log (CO2 per capita)	
	(2)
Constante	4,073*** (0,026)
log(densidade_2019)	-0,598*** (0.007)
Observações	5.554
R2	0,537
R2 ajustado	0,537
Erro padrão residual	0,788
Estatística F	6.441,770***

Fonte: Elaboração própria

O modelo (3) adiciona variáveis controle ao modelo (2). As estatísticas da regressão em comparação ao modelo (2) são as seguintes:

Tabela 3: Estatística da regressão do modelo (3) x modelo (2)

	log (CO2 per capita)	
	(2)	(3)
Constante	4,073*** (0,026)	-1,872***
log(densidade_2019)	-0,598*** (0,007)	-0,659*** (0,008)
Variáveis controle		
log(pib_capita)	-	0,662*** (0,015)
log(população)	-	-0,044*** (0,010)
Observações	5.554	5,105
R2	0,537	0,679
R2 ajustado	0,537	0,679
Erro padrão residual	0,788	0,649
Estatística F	6.441,770***	3.597,092***

Fonte: Elaboração própria

O modelo (3) busca melhor isolar o efeito da variável densidade demográfica nas emissões per capita. Com a adição dos controles de atividade econômica e população bruta, pode-se interpretar que, ao comparar cidades de mesmo PIB e mesmo tamanho populacional, a cada 1% de aumento na densidade populacional se observa uma diminuição de -0,659% nas emissões per capita.

Nota-se que a elasticidade obtida com essa nova especificação é mais expressiva frente ao modelo (2) que não contava com variáveis controle. Isso pode ser interpretado como um indicativo de que o efeito nas emissões é ainda mais expressivo.

Uma das possíveis explicações para essa relação talvez seja nos meios de transporte e padrões de mobilidade urbana. Em áreas mais densas, é possível que haja uma redução no uso de veículos a combustão individuais devido à proximidade de serviços e amenidades, ou até mesmo o uso desses veículos para percorrer menores distâncias. Ainda podemos considerar uma maior eficiência e disponibilidade de transporte público.

O novo modelo apresenta um maior ajuste no geral aos dados em relação ao modelo (2), com um R2 de 0,679 frente a um R2 de 0,537, além de um menor erro padrão residual. Quanto à significância dos coeficientes e significância global, os resultados são adequados em ambos.

Já quanto à normalidade dos resíduos, os resultados são adequados, porém há afastamento da distribuição normal nas extremidades., como podemos ver no gráfico abaixo.

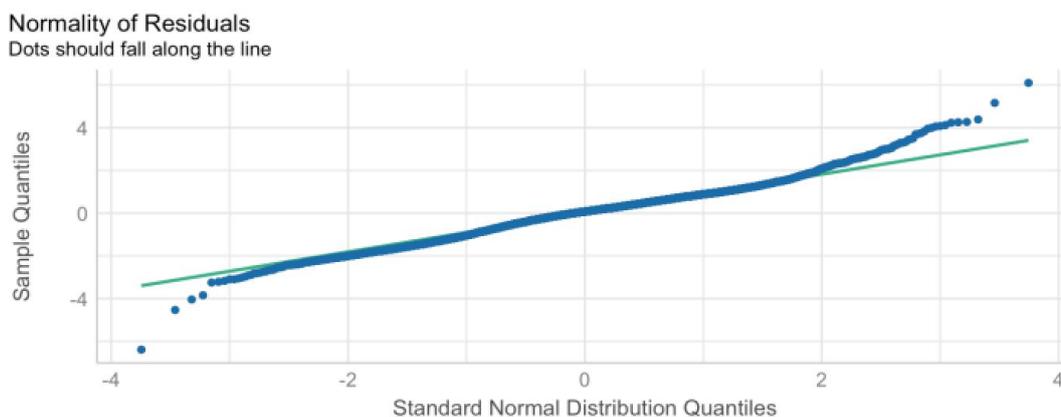


Figura 5: Q-Q plot dos resíduos do modelo (3)

Essa divergência nas caudas pode ser causada por conta de valores extremos e é, em certa forma, esperada dado os scatterplots produzidos anteriormente nesse trabalho. Esses desvios, embora não comprometam a integridade do modelo como um todo, dado que há bom ajuste em relação à média,

no entanto, apontam para a complexidade das dinâmicas urbanas que podem não ser totalmente capturadas por modelos estatísticos lineares.

Por conta da presença de multicolinearidade no modelo foi-se utilizado o método de bootstrap para avaliar a confiabilidade dos coeficientes obtidos.

Tabela 4: Bootstrap dos resultados

Bootstrap, Rep = 1000			
original	bootBias	bootSE	bootMed
1 -1,872441	-0,0124851	0,200356	-1,87986
2 -0,658821	-0,0007347	0,011595	-0,65973
3 0,661938	0,00080047	0,017529	0,66262
4 -0,043652	0,00072663	0,011285	-0,04299

Fonte: Elaboração própria

Os resultados do bootstrap trazem confiabilidade quanto aos resultados anteriores obtidos pelo modelo. Observou-se baixo viés e baixa variabilidade em relação aos estimadores obtidos anteriormente.

O Modelo 3 corrobora a relação inversamente proporcional entre a densidade populacional e as emissões de CO₂ per capita esperada, isola melhor o efeito por conta das variáveis controle e demonstra um ajuste estatístico confiável.

Com uma elasticidade de -0,658 obtida via bootstrap, pode-se afirmar com relativa certeza que o modelo 3 aprimora o entendimento da relação de elasticidade entre a densidade populacional e as emissões de dióxido de carbono per capita.

5 LIMITAÇÕES

É importante salientar as limitações quanto às projeções populacionais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Tais projeções se baseiam nos dados dos censos demográficos realizados a cada 10 anos, sendo o último realizado em 2010, dado que em 2020 a realização foi cancelada por motivos de orçamento e pandemia de COVID-19. Além dos dados dos censos antigos, as projeções também se baseiam em pesquisas domiciliares por amostragem como a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) e registros de óbitos e nascimentos dos estados e municípios.

Quanto aos dados espaciais, há também grandes limitações visto que há poucos e antigos dados disponíveis sobre as proporções de áreas urbanizadas e rurais dos municípios, o que pode gerar algumas distorções nos resultados que tentamos extrair. Dou como exemplo as cidades de Alegrete Sant'Ana do Livramento e Uruguaiana, localizadas no interior da unidade federativa do Rio Grande do Sul. As cidades são, respectivamente as primeira, segunda e terceira maiores em área (km²) do estado, porém a maioria dessa área se encontra na parcela rural dos municípios.

Como há uma grande área rural nos limites desses municípios, a maior parte da população se encontra numa pequena parcela dessa área, na porção urbana. Com isso, calculamos corretamente a densidade populacional daquela área, mas passando uma impressão errônea de que a densidade urbana de tais municípios seria menor do que na realidade.

Também há limitações na estimativa dos dados de emissões de dióxido de carbono (CO₂) do Sistema de Estimativa de Gases e Efeito Estufa (SEEG), o qual segundo o organizador ainda passa por correções, aprimoramentos e refinamentos.

Quanto aos métodos, é necessário acrescentar que os modelos especificados não permitem inferir causalidade, e sim apenas verifica a relação esperada dado a cadeia referencial teórico. Além da não inferência de causalidade o modelo aqui pode enfrentar ainda viés de variáveis omitidas e confusores.

6 IMPLICAÇÕES POLÍTICAS

As diretrizes urbanísticas, definidas por lei pelo plano diretor de todos os municípios com mais de 20 mil habitantes no país, são revistas de 10 em 10 anos. Em 2022, na data que este artigo foi escrito, o plano diretor de várias cidades no país se encontra em revisão pelas respectivas casas. Legislativas. São Paulo, Rio de Janeiro e Florianópolis são alguns desses exemplos.

A diminuição apontada nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) sabemos pela literatura que uma maior densidade populacional traz consigo outros ganhos relevantes e que não devem ser subestimados como a redução nos custos de transportes, evitando perdas econômico-financeiras.

Identificar a elasticidade a densidade populacional e emissões, relacionada com o aumento das distâncias e tempos de comuta é uma informação muito bem-vinda para que possamos planejar um futuro crescimento urbano mais sustentável e para que possamos mitigar esses efeitos seja com um maior adensamento ou soluções de transporte mais adequadas.

Sabemos também que uma maior densidade populacional traz ganhos de escala ao avaliarmos os custos com construção e manutenção de infraestrutura urbana nas cidades Europeias. (ALVAREZ, 2014) Além disso, regiões com maior densidade viabilizam estruturas de transporte público como metrô e trens, dificilmente visto em regiões com menor densidade dado seu alto custo de implementação, manutenção e operação e baixo ticket recebido por passageiro. Se fazem necessárias grandes números de viagens diárias para viabilizar a operação.

Um exemplo a ser citado, o metrô de São Paulo, composto por seis linhas, que percorrem a cidade de norte a sul e de leste a oeste, e atendem a 86 estações distribuídas por toda a cidade (além de realizar integração com as 7 estações de trem da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM)). Considerando dados de 2019, são mais de 5 milhões de passageiros transportados por dia, o que equivale a 15% da população da cidade.

O impacto positivo tanto na mobilidade urbana e intermunicipal e nas emissões é imenso, mas para a implementação desse tipo de infraestrutura de transporte público mais robusta, é necessário a escalabilidade para viabilizar financeiramente a operação.

No entanto também é necessário que há possíveis efeitos negativos. Apesar o ganho de escala que pode vir a permitir melhores serviços públicos a um menor custo per capita, o adensamento pode também vir a trazer uma sobrecarga sobre esses serviços e sobre a infraestrutura existente. Quando uma área se torna muito densa, pode haver uma sobrecarga nos sistemas de transporte, saúde, educação e outros serviços essenciais, levando a uma diminuição na qualidade e acessibilidade desses serviços para os residentes.

Ao evitar grandes deslocamentos da população para acesso aos equipamentos públicos, também pode se obter um grande ganho de escala, obtendo um menor custo per capita para sua manutenção. Além disso a focalização de recursos faria com que esses equipamentos fossem de maior qualidade. Em outras palavras, mais vale um centro de saúde com equipamentos e atendimento de ponta em uma cidade onde o deslocamento dos moradores até ele seja relativamente fácil, do que vários centros de saúde menores espalhados por uma cidade de baixa densidade populacional. A segunda opção é a atualmente utilizada em Florianópolis devido ao seu espraiamento urbano elevado, múltiplos centros de saúde, mas com grandes dificuldades do setor público de ofertar profissionais e atendimento adequado em todos.

Analisando o caso de Florianópolis com os resultados encontrados nesse artigo, podemos afirmar com relativa certeza de que diretrizes urbanísticas mais inclinadas ao adensamento populacional futuro na cidade fariam com que tivéssemos resultados positivos de redução na sua pegada de carbono.

Outro ponto extremamente importante que foge do escopo desse artigo e é um grande problema de Florianópolis é a mobilidade urbana. Cidades mais espraiadas, com baixo potencial construtivo em suas centralidades fazem com que

sejam necessários grandes deslocamentos nas comutas diárias da população. Comutas diárias de mais de 20km não são incomuns no município.

Um exemplo de cidade que passou por esse tipo de mudança é Amsterdam, na Holanda. Antigamente, Amsterdam era um centro urbano centrado no uso do carro, com grandes avenidas e ruas largas e poucas áreas pedonais ou cicloviárias. Nos últimos anos, no entanto, a cidade vem implementando uma série de medidas para tornar-se mais caminhável e com micromobilidade.

Essas medidas incluem a construção de novas ciclovias e calçadas, a criação de áreas pedonais e de lazer, a instalação de sistemas de bicicletas compartilhadas e outras soluções de micromobilidade.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou aprofundar o entendimento das externalidades urbanas, com foco especial nas diretrizes urbanísticas e seus impactos na densidade populacional e emissões de carbono em municípios brasileiros. Utilizando as noções do modelo teórico de Bertaud e Brueckner, aliadas ao modelo teórico de mensuração de emissões de Ribeiro Rybski e Kropp, complementado por um estudo de caso detalhado em Florianópolis.

Quanto às emissões no agregado, foi observada uma elasticidade de +0,62 em relação ao tamanho da população. Já a relação quanto às emissões proporcionais, quando controladas para atividade e tamanho da população, observou-se uma elasticidade de -0,659 entre a densidade populacional e as emissões per capita. Os resultados estão de acordo com o esperado pela literatura.

Destaca-se a importância de considerar as externalidades urbanas no planejamento das cidades não apenas no aumento do custo de deslocamento, mas também nas emissões de gases poluentes geradas pelo mesmo. Ao mensurar a elasticidade entre emissões e densidade, em conjunto com as noções de que isso está relacionado com o aumento das distâncias de comutas diárias ressalta a necessidade de integrar políticas de uso do solo e transporte que promovam uma menor emissão de poluentes, reforçando a ideia de cidades mais compactas e com melhor eficiência em termos de mobilidade e sustentabilidade.

Os resultados deste trabalho reforçam a ideia de que as políticas de planejamento urbano devem ser elaboradas com uma visão de longo prazo, considerando os efeitos cumulativos de decisões de planejamento sobre a qualidade de vida urbana e a sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ, Inmaculada C.; PRIETO, Ángel M.; ZOFÍO, José L.. Cost Efficiency, Urban Patterns and Population Density When Providing Public Infrastructure: a stochastic frontier approach. **European Planning Studies**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 1235-1258, 15 mar. 2013. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1080/09654313.2013.778957>.

Bertaud, Alain; Brueckner, Jan K. Analyzing Building Height Restrictions: Predicted Impacts, Welfare Costs, and a Case Study of Bangalore, India. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=610334>. Acesso em: [30 set. 2023].

GUEDES, Pedro Lucas, LOUREIRO, Bernardo Pacheco, MAIA, Romero Galvão. Tempo médio de deslocamento segundo o IBGE: uma plataforma interativa. ANTP. 2017. Disponível em: <https://medidasp.com/tempo-deslocamento>. Acesso em: 29 de outubro de 2023.

Godoy, S. G. M. D., & Saes, M. S. M. (2016). A solution for an externality, greenhouse gases: carbon market. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 15(4), 369. doi:10.1504/IJESD.2016.079480. Acesso em 02 de julho de 2023

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Área territorial - Brasil, Grandes Regiões, Unidades da Federação e Municípios. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 23 de setembro de 2023.

LIMA, Ricardo Carvalho de Andrade; MONASTERIO, Leonardo M. Far Regulations and the Spatial Size of Brazilian Cities. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=4331265> ou <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4331265>. Acesso em: 29 de outubro de 2023.

MANKIW, Gregory N. Principles of Microeconomics. 6. ed. Cengage Learning, 2011.

RIBEIRO, Haroldo V.; RYBSKI, Diego; KROPP, Jürgen P.. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions. **Nature Communications**, [S.L.], v. 10, n. 1, p., 19 jul. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-11184-y>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-11184-y#Equ1>. Acesso em: 05 abr. 2023.

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Observatório do Clima. Disponível em: <http://seeg.eco.br/download>. Acesso em: 11/22.