

## MODELAGEM DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS NO RIO DE JANEIRO E O PERFIL SOCIODEMOGRÁFICO ASSOCIADO

Heitor Soares de Farias<sup>1</sup>

Max Wendell Batista Dos Anjos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doutor em Geografia, Professor do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro-UFRRJ, heisofa@ufrjr.br

<sup>2</sup>Pós-Doutor em Geografia, Geógrafo, Universidade Tecnológica de Berlim, maxanjos@campus.ul.pt

### RESUMO

As emissões urbanas de CO<sub>2</sub> têm sido percebidas como um ponto central no Ciclo Global de Carbono, embora ainda compreendamos muito pouco sobre a emissão humana no espaço e tempo. O objetivo deste trabalho é identificar as áreas que mais emitem CO<sub>2</sub> de tráfego de veículos e explorar a relação com as características socioespaciais. Para isso, o modelo de mapeamento que quantifica o fluxo de CO<sub>2</sub> em alta resolução espacial (ao nível da rua) e temporal (frequência horária) foi aplicado ao Rio de Janeiro. Este modelo busca entender os padrões geográficos locais e as emissões ao longo do tempo utilizando algoritmos de Aprendizagem de Máquinas, dados de mobilidade, Sistema de Informação Geográfica e R. Para estudar as características socioespaciais das emissões urbanas de CO<sub>2</sub>, os valores modelados foram agregados aos setores censitários do IBGE e áreas de planejamento da cidade, que contém 480 variáveis socioeconômicas e demográficas. A técnica de redução de dimensionalidade com o método regressão parcial de mínimos quadrados (PLS) foi aplicada para selecionar as principais variáveis que explicam a variação das emissões. Os resultados mostram que as maiores emissões de CO<sub>2</sub> ocorrem nas vias expressas que conectam a cidade, pois possuem mais pistas de rolamento que concentram mais veículos, com maior velocidade em um percurso mais longo. Utilizando a Correlação de Pearson, as áreas que mais emitem CO<sub>2</sub>: 1 - possuem maior densidade de moradores nos domicílios ( $r = 0,9$ ); e 2 - têm mais pessoas residentes pardas ( $r = 0,78$ ) e com rendimento mensal per capita superior até 1/2 salário-mínimo ( $r = 0,76$ ), localizadas próximas às vias expressas; ou 3 - têm maior rendimento mensal ( $r = 0,85$ ), ocorrendo na orla da Zona Sul, área mais rica da cidade e mais arborizada ( $r = 0,63$ ), onde há maior oferta de trabalho. Em contrapartida, as menores concentrações de CO<sub>2</sub> ocorrem em áreas onde há mais pessoas com rendimento mensal per capita de até 1/8 salário-mínimo ( $r = 0,82$ ), com pessoas residentes pretas ( $r = 0,66$ ), que estão localizadas em áreas com dificuldade para mobilidade, distantes das áreas que oferecem postos de trabalho e distante das vias de circulação. Este estudo salienta a importância da segregação socioespacial na formulação de ações climáticas setoriais e inventários de gases de efeito de estufa mais detalhados.

Palavras-chave: Emissões de Carbono. Mudanças climáticas. Tráfego de veículos. Indicadores sociais. Machine Learning.

### ABSTRACT

Urban CO<sub>2</sub> emissions have been perceived as a central point in the Global Carbon Cycle, although we still understand very little about human emissions in space and time. This work aims to identify the areas that emit the most CO<sub>2</sub> from vehicle traffic and explore the relationship with socio-spatial characteristics. For this, the mapping model that quantifies the CO<sub>2</sub> flow in high spatial resolution (at street level) and temporal (hourly frequency) was applied to Rio de Janeiro. This model seeks to understand local geographic patterns and emissions over time using Machine Learning algorithms, mobility data, Geographic Information Systems and R. To study the socio-spatial characteristics of urban CO<sub>2</sub> emissions, the modeled values were added to the IBGE census tracts and city planning areas, which contain 487 socioeconomic and demographic variables. The dimensionality reduction technique with

the partial least squares regression (PLS) method was applied to select the main variables that explain the variation in emissions. The results show that the highest CO<sub>2</sub> emissions occur on the city's expressways, as they have more lanes that concentrate more vehicles, with higher speed over a longer route. Using the Pearson Correlation, the areas that emit the most CO<sub>2</sub>: 1 - have a higher density of residents in households ( $r = 0.9$ ); and 2 - have more mixed-race residents ( $r = 0.78$ ) and with a per capita monthly income of up to 1/2 the minimum wage ( $r = 0.76$ ), located close to expressways; or 3 - have a higher monthly income ( $r = 0.85$ ), occurring on the edge of the South Zone, the richest and most wooded area in the city ( $r = 0.63$ ), where there is a greater supply of jobs. On the other hand, the lowest concentrations of CO<sub>2</sub> occur in areas where there are more people with monthly income per capita of up to 1/8 of the minimum wage ( $r = 0.82$ ), with black resident people ( $r = 0.66$ ), who are located in areas with difficult mobility, far from areas that offer jobs and far from traffic routes. This study highlights the importance of socio-spatial segregation in formulating sectoral climate actions and more detailed greenhouse gas inventories.

Keywords: Carbon emissions. Climate changes. Vehicle traffic. Social indicators. Machine Learning.

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, apesar de grande parte das emissões de CO<sub>2</sub> serem originadas pelas queimadas, em consequência das mudanças no uso da terra, áreas florestadas transformadas em pasto, o setor de transportes tem importante contribuição (Veiga, 2010). No país, os caminhões são amplamente utilizados no transporte de carga e os ônibus no transporte de passageiros, ambos com padrão energético baseado em combustíveis fósseis, que podem ser ainda mais poluidores a depender da idade dos veículos (Cruvinel et al., 2012). Além desses, o transporte individual motorizado, muito comum nos centros urbanos, no Brasil corresponde por cerca de 35% das viagens, mas, em média, é responsável por quase 60% das emissões de dióxido de carbono nos centros urbanos (Carvalho, 2011).

Estudos mostram que as áreas urbanas são fontes de CO<sub>2</sub>, com exaustão de veículos e aquecimento doméstico como os principais contribuintes, pois a vegetação urbana não consegue absorver as emissões antrópicas o suficiente para compensar essa troca (Velasco e Roth, 2010; Pataki et al., 2011). Desta maneira, com grande contribuição do sistema de transportes, mais de 70% das emissões globais de CO<sub>2</sub> são originadas nas áreas urbanas (Iea, 2012; Seto et al., 2014).

Em virtude disto, muitos estudos têm se dedicado a caracterizar melhor as concentrações de CO<sub>2</sub> desses espaços, especialmente dióxido de carbono de combustível fóssil. No sul da Inglaterra, foi observado que, apesar de no inverno a contribuição das edificações aumentar o fluxo de CO<sub>2</sub>, o tráfego de veículos automotores é um componente importante das emissões durante todo o ano, com forte emissão ao longo de todo o dia (urbano) e picos nas horas de rush (suburbano). A vegetação suburbana compensa algumas emissões antrópicas, mas os fluxos de CO<sub>2</sub> são positivos mesmo durante o verão, demonstrando os impactos do aumento da densidade urbana no fluxo de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Ward et al., 2015).

Nas revisões de Velasco e Roth (2010), o método de covariância de vórtices turbulentos (eddy covariance-EC), aplicado para quantificar os fluxos de CO<sub>2</sub> em ambientes urbanos, foi implantado em 30 cidades de latitudes médias. Os maiores fluxos de CO<sub>2</sub> foram observados em locais densamente construídos nos centros das cidades, seguidos por locais dentro do núcleo urbano, enquanto os fluxos mais baixos são encontrados em bairros suburbanos. No entanto, a troca líquida diária de CO<sub>2</sub> mostra uma forte relação com a fração de vegetação, mas não com a densidade populacional.

Na pesquisa em Salt Lake County, Utah, EUA, com dados de uma década de cinco locais na área metropolitana, três tendências contrastantes de CO<sub>2</sub> surgiram nos diferentes tipos urbanos: negativas em um local residencial-industrial, positivas em um local de rápido crescimento suburbano e constante ao longo do tempo em vários locais no núcleo urbano consolidado. Assim, as medições de CO<sub>2</sub> mostram que grandes aumentos foram atribuídos ao crescimento populacional, mas não foram tão lineares quanto esperado (Mitchell et al., 2018).

As grandes cidades possuem paisagens muito complexas e as elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera são resultado da composição de várias plumas, por isso é necessário o uso de modelagem em alta resolução das fontes emissoras (Feng et al., 2015). Park et al. (2022) em um estudo de alta resolução temporal e espacial comparou 9 localidades em Seul. Identificaram que a emissão de CO<sub>2</sub> tem íntima relação com o uso do solo, pois fatores como arborização, o uso da edificação residencial ou comercial, mas, principalmente, o fluxo de veículos determinam os totais emitidos. A arborização urbana, apesar de ser importante na absorção do CO<sub>2</sub>, não consegue compensar os fluxos biogênicos. Isso acontece porque a própria área arborizada emite carbono, e assim o paisagismo tem papel fundamental na otimização dos efeitos de absorção nas áreas verdes (Hundertmark et al, 2021), destacando a importância da alta resolução espacial para o entendimento dos fluxos de CO<sub>2</sub>.

A alta resolução espacial e temporal podem ser alcançados com o aumento na densidade de estações de monitoramento (Lauvaux et al., 2016), com a realização de inventário de fontes emissoras (Gately et al., 2015; Sargent et al., 2018) ou também combinando conjuntos de dados e ferramentas de simulação para gerar um modelo que possa ser reaplicado em qualquer grande cidade (Gurney et al., 2012; Hardiman et al., 2017), juntamente com *Machine Learning* (Menzer et al., 2015; Wu et al., 2021) que é capaz de ser treinado com dados existentes para estimar em áreas onde não há dados.

No Rio de Janeiro, Chiquetto et al. (2022) mapearam o FFCO<sub>2</sub> baseado nas folhas de Ipê, relacionando diferentes indicadores sociais com as emissões de CO<sub>2</sub>. Áreas com altas proporções de analfabetos ou áreas sem infraestrutura básica apresentaram concentrações menores de CO<sub>2</sub>, mostrando que moradores com essas características tendem a ficar longe dos negócios e das áreas de alta renda. Por fim, descobriram que para cada 1% de aumento na densidade demográfica, o CO<sub>2</sub> deve aumentar aproximadamente 0,2%. Esse achado vai de encontro com as expectativas gerais (Seto et al., 2014), mas pelas características de ocupação da cidade não ajuda a determinar as contribuições locais do CO<sub>2</sub>.

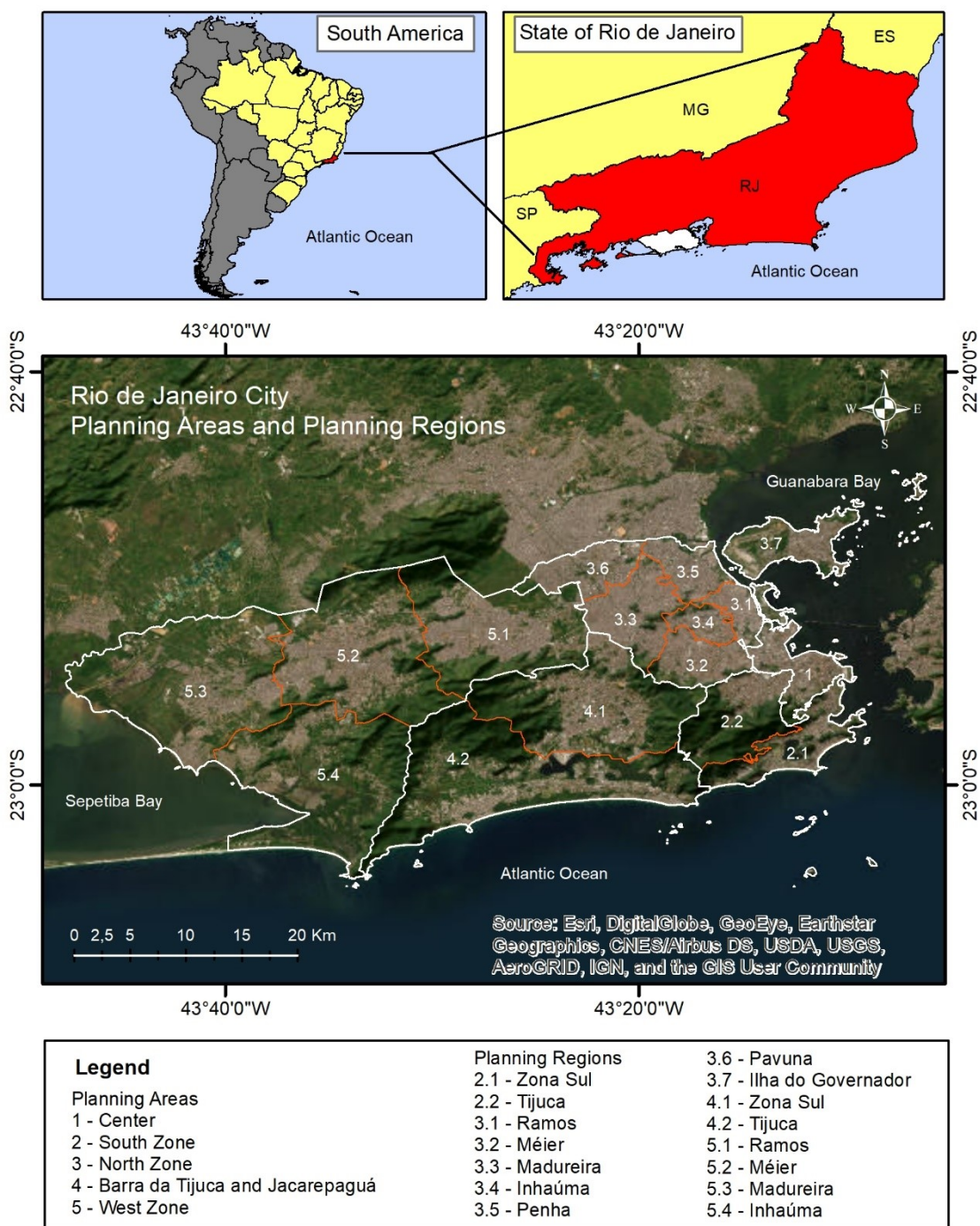
A topografia local canaliza o fluxo de veículos para eixos principais de circulação na cidade, que possuem distintas infraestruturas nas diferentes áreas de planejamento do município do Rio de Janeiro. As melhores condições de transporte estão ao longo da costa, onde se concentra a maior parte da atividade econômica. Os grandes investimentos em infraestrutura e a reorganização no sistema de transportes realizados em decorrência dos Jogos Olímpicos de Verão de 2016, resultaram em aumento da acessibilidade da população ao mercado de trabalho. No entanto, isto ocorreu principalmente nas áreas mais ricas, enquanto que na maioria das áreas identificadas com perda de acessibilidade eram mais pobres (Pereira et al., 2019).

Desta maneira, a partir da análise do fluxo de veículos e das características das vias da cidade do Rio de Janeiro, este trabalho tem como objetivo identificar as áreas que mais emitem CO<sub>2</sub> em alta resolução espacial e temporal, relacionando os totais emitidos com as características sociais dessas áreas.

## 2.ÁREA DE ESTUDO

A cidade do Rio de Janeiro localiza-se em uma planície litorânea banhada pelo Oceano Atlântico, entre as baías de Guanabara e Sepetiba, e ao fundo cercada pela Serra do Mar, que se eleva a uma altitude média de 900 metros (Figura 1). Nesta planície encontram-se três maciços rochosos - Tijuca, Pedra Branca e Gericinó-Mendanha -, com altitudes em torno de 1000 metros, que impõem resistência ao fluxo atmosférico, reduzindo a velocidade do vento, impedindo que a brisa do mar atinja os bairros e municípios localizados dentro da MARJ, contribuindo para a estagnação dos poluentes (Farias, 2013).

FIGURA 1 – Emissões de CO<sub>2</sub> pelo tráfego de veículos na cidade do Rio de Janeiro.



Fonte: Os autores (2022).

O sítio foi escolhido por suas características defensivas e, ao longo da história de expansão da cidade, muitos foram os desafios que mostraram sua inadequação para a formação de uma metrópole (Bernardes, 1990). O suporte físico facilitou o desenvolvimento de um conjunto urbano compartimentado, onde se concretizam as estratificações sociais projetadas no território (Abreu, 1987). Assim, esses maciços rochosos dividem a cidade em cinco áreas de planejamento com conteúdos sociais muito distintos.

A Área de Planejamento 1 (AP1), ou Centro, é onde se localiza o centro histórico, com perfil comercial e baixa densidade de residências, com 3% do território e 5% da população.

Recebe um grande público flutuante devido às grandes concentrações de atividades comerciais e de serviços. Nessa área, a Prefeitura do Rio de Janeiro está implementando o Bairro de Baixa Emissão com ações para reduzir a emissão de gases de efeito estufa, como incentivo ao uso da bicicleta com a implantação de ciclovias, elaboração de um plano de mobilidade limpa com a proibição de circulação em importantes vias, transformadas em avenidas compartilhadas por pedestres e veículos leves elétricos sobre trilhos e aumento de áreas verdes (Rio de Janeiro, 2011).

A partir do Centro, para o sul, pelo litoral ocorreu a ocupação por famílias que tinham condições de se locomover para fora do núcleo urbano, o que era privilégio para poucos (Abreu, 1987). Assim foi formada a Área de Planejamento 2 (AP2), subdividida em 2.1 Zona Sul e 2.2 Tijuca, que apresenta os melhores padrões de infraestrutura urbana e equipamentos sociais, sendo densamente ocupada, com 8% do território e 16% da população. É a mais nobre da cidade, com prédios de luxo e representantes das classes média e alta, mas também com população de baixa renda, devido à ocupação irregular nas encostas, desvalorizadas pelos riscos ambientais associados. A Zona Sul é a principal área turística pela proximidade com o mar e a presença de belezas cênicas naturais.

Saindo do Centro, contornando o maciço da Tijuca para a Zona Norte, está a Área de Planejamento 3 (AP3). Subdividida em 3.1 Ramos, 3.2 Méier, 3.3 Madureira, 3.4 Inhaúma, 3.5 Penha, 3.6 Pavuna e 3.7 Ilha do Governador, se desenvolveu a partir da instalação das ferrovias, principal indutor de ocupação das periferias devido ao baixo custo. Assim, essas áreas foram sendo ocupadas por pessoas de baixa renda e atividades menos nobres, como indústrias, atraindo cada vez mais moradores (Abreu, 1987). Hoje é a área mais densamente ocupada, com 17% do território e 38% da população da cidade, conurbando-se aos municípios da periferia imediata da Baixada Fluminense (Souza, 2003).

A Área de Planejamento 4 (AP4), subdividida em 4.1 Jacarepaguá e 4.2 Barra da Tijuca, manteve-se conservada por muito tempo sem ocupação devido às dificuldades de acesso, pelas próprias características geográficas. Manteve-se com base rural até a década de 1960 quando passou a ser ocupada por condomínios residenciais de alto padrão, pelo processo de expansão urbana da Zona Sul, para uma população economicamente emergente nas décadas seguintes. Com áreas naturais de grande beleza cênica e com amplas áreas disponíveis disputadas pelo mercado imobiliário - com 24% do território e 14% da população - foi o local escolhido para receber os principais equipamentos para os Jogos Olímpicos de 2016 (Novais, 2014; Mascarenhas, 2016).

A Área de Planejamento 5 (AP5), ou Zona Oeste, subdividida em 5.1 Bangu, 5.2 Campo Grande, 5.3 Santa Cruz e 5.4 Guaratiba, foi a última área a ser urbanizada, principalmente devido à grande distância do Centro. Manteve o uso agrícola até a década de 1950, quando, devido à abertura da Avenida Brasil para expansão das atividades industriais, surgiram os primeiros centros urbanos. Junto com a atividade industrial, muitas terras foram invadidas por populações de baixa renda que constituíram as favelas, um grande reservatório de “mão-de-obra farta, barata e espacialmente concentrada” (Abreu, 1987, p.103). Hoje é mais uma periferia urbana da capital com baixa densidade populacional, com 48% do território e 27% da população, que se conecta com a periferia distante da metrópole (Souza, 2003).

Pelo exposto, o Rio de Janeiro é um exemplo de fortes desigualdades socioespaciais, consequência do histórico desenvolvimento urbano desigual marcado pela segregação espacial. Parte desse quadro foi construído nos últimos dez anos, quando o Rio de Janeiro passou por profundas transformações espaciais como resultado da implementação de uma reestruturação

produtiva, consequência da mudança no cenário econômico mundial, com reflexos no Brasil a partir do surgimento de um novo projeto político e desenvolvimentista, iniciado nos primeiros anos deste século (Oliveira e Oliveira, 2020). As mudanças ocorreram em todo o estado, mas tornaram-se inteligíveis à medida que se aproximavam da região metropolitana do Rio de Janeiro (MARJ), com a instalação de grandes projetos de investimento.

Ainda associada ao projeto político e de desenvolvimento, ocorreram mudanças significativas consequência da preparação da cidade para sediar os megaeventos esportivos de repercussão mundial, como a Copa do Mundo de Futebol Masculino de 2014, mas principalmente os Jogos Olímpicos de Verão de 2016, com grande impacto nas cidades onde são realizados (Mascarenhas, 2014). Este último fez com que o Rio de Janeiro vivesse um período de transformações materiais e simbólicas aparentemente sem paralelo em sua história (Mascarenhas, 2016). A intensa mobilização de recursos financeiros promoveu profunda e acelerada reorganização do espaço urbano, deixando como legado importantes infraestruturas de transporte, criadas para interligar centros de eventos nos Jogos Olímpicos, mas que estão desigualmente distribuídas pelas áreas de planejamento.

Assim, com o projeto desenvolvimentista foram realizados grandes investimentos em infraestrutura no extremo oeste metropolitano, com a instalação de complexos industriais que tornaram a Área de Planejamento 5 uma área de expansão da cidade, com crescimento populacional significativo desta periferia (Oliveira e Oliveira, 2020). Já com a infraestrutura para os Jogos Olímpicos, houve desprezo pelas periferias e a concentração de equipamentos esportivos na Barra da Tijuca, tornando-a a nova centralidade no Rio de Janeiro a partir das instalações de corredores de transporte ligando-a intensamente ao restante da cidade - TransOeste e TransOlímpica, ligando à AP 5, TransCarioca, ligando à AP 3, e extensão linha 1 do Metrô, ligando à AP 2 (Mascarenhas, 2016).

As novas vias expressas citadas complementam o sistema já existente, melhorando a circulação na cidade do Rio de Janeiro, que sofre com muitos congestionamentos devido ao grande número de veículos particulares, consequência do transporte público ineficiente. A taxa de motorização (veículos particulares/100 habitantes) apresentou crescimento contínuo desde a década de 1990, passando de 16,9, em 1994, para 45,8 em 2021. Já a taxa de motorização dos ônibus apresenta queda nos últimos 5 anos (Pcrj, 2022).

## PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 3.1 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

As emissões de tráfego de veículos foram calculadas com base no modelo de mapeamento, que utiliza algoritmos de Aprendizado de Máquina (em inglês *Machine Learning* - ML), Sistema de Informação Geográfica e dados espaciais e contagem de veículos. O modelo ML estima o volume de veículos e a velocidade média horários, que são as duas variáveis mais importantes para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>, ao nível da rua.

A ideia é extrapolar o perfil de tráfego médio das vias que têm medições de contagem de veículos (categorizadas como amostradas) em um determinado tempo, para aquelas vias onde as medições estão indisponíveis (não amostradas), baseado nas características geoespaciais e temporais semelhantes. Os dados horários de volume de veículos e velocidade média medidos em 960 estações de contagem no período de Janeiro de 2021 foram disponibilizado pela CET-Rio. 56 variáveis explicativas (preditores) tais como uso do solo, configuração da via, densidade populacional, bem como informações sobre hora, dias de

semana, fins de semana, e indicadores para os feriados foram agregadas às ruas categorizadas como amostradas e não amostradas, baseando-se na localização geográfica da estação de contagem de veículos.

As emissões de CO<sub>2</sub> originárias do tráfego de veículos foram calculadas conforme a seguinte equação:  $ET = q * l * EF$ , onde  $q$  é o número de veículos por hora estimado pelo modelo de ML,  $l$  é o comprimento da via em km e  $EF$  é o fator de emissão em g/km.  $EF$  foi obtido em função dos limites médios de velocidade média em km/hora, com base na velocidade média de viagem dos ciclos (NOTTER et al., 2019). Para calcular os valores de  $EF$  ( $y$ ), aplicamos os seguintes modelos de regressão polinomial:  $y=0,0928x^2 - 9,2601x, 358,7$  para velocidade média  $< 50$ km/h;  $y=130$  para a faixa de velocidade média  $\geq 50$  km/h &  $< 80$  km/h; e  $y=0,0165x^2 - 2,34811x, 211,68$  para a faixa de velocidade média  $\geq 80$  km/h, onde  $x$  representa a velocidade média estimada pelo modelo de ML. Portanto, assumimos que o fluxo horário de CO<sub>2</sub> em uma via rodoviária é proporcional ao seu comprimento, volume de veículos e mudanças de  $EF$ .

### 3.2 BANCO DE DADOS SOCIOESPACIAL E ÁREAS DE PLANEJAMENTO

O *shapefile* ESRI do IBGE que contém, por área de censo, 480 variáveis categorizadas em função da renda, população, escolaridade, raça e cor, gênero e condições dos domicílios referentes ao último censo de 2010 foi usado para analisar as características socioespaciais no Rio de Janeiro. A descrição detalhada das variáveis censitárias pode ser obtida no site <https://www.ibge.gov.br/>. Os *shapefiles* das Áreas de Planejamento foram conseguidos no portal da Prefeitura do Rio de Janeiro <https://www.data.rio/>. A cidade é zoneada em cinco Áreas de Planejamento, cada uma subdividida em Regiões de Planejamento, para às quais são destinadas políticas públicas e privadas setoriais tais como as de mobilidade e ambiental.

### 3.3 ANÁLISES DOS DADOS

Para explorar as características socioespaciais das emissões urbanas de CO<sub>2</sub>, a soma dos valores modelados de CO<sub>2</sub> em janeiro de 2021 foi agregada às áreas dos setores censitários do IBGE e às áreas de planejamento da Prefeitura do Rio de Janeiro. Dado o grande volume de variáveis socioespaciais, a técnica de redução de dimensionalidade foi aplicada. Ela reduz o número de colunas no banco de dados analisado baseado nos métodos lineares. A regressão parcial de mínimos quadrados (PLS) foi usada para selecionar as principais variáveis socioespaciais que impactam na variação das emissões. PLS cria componentes que maximizam a variação nas variáveis explicativas, mas também, simultaneamente, maximizam a correlação entre as variáveis explicativas e a variável dependente (GELADI e KOWALSKI, 1986). A força das correlações do PLS pode ser positiva, quando uma variável impacta nos maiores valores das emissões, ou negativa quando indica uma correlação com menores valores das emissões.

Cada categoria, renda, população, escolaridade, domicílios, raça e cor - possui múltiplas variáveis. O processo de redução de dimensionalidade consistiu de aplicar individualmente o PLS às variáveis que compõem cada categoria e selecionar as variáveis de média a altamente correlacionáveis com valores de coeficiente maiores que 0.6. Essas variáveis são usadas para determinar a segregação socioespacial na variação das emissões de CO<sub>2</sub> na cidade.

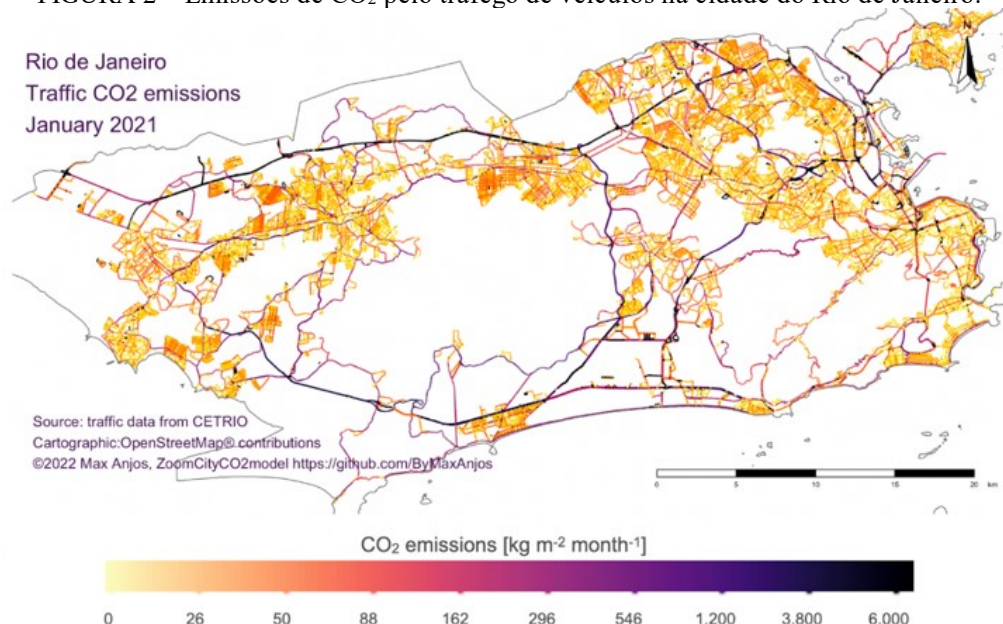


## 4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIOTEMPORAL DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

A Figura 2 mostra que as maiores emissões de CO<sub>2</sub> ocorrem nas vias expressas que conectam a cidade, funcionando como grandes corredores de transporte rodoviário. O máximo de 6.000 kgCO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> em Janeiro de 2021 foi modelado na Avenida Brasil. A maior emissão de CO<sub>2</sub> justifica-se pelo fato destas vias possuírem mais pistas de rolamento e, por isso, concentrarem um número maior de veículos. Além disso, permitem que os mesmos desenvolvam maior velocidade em um percurso mais longo, o que possibilita maior emissão de CO<sub>2</sub>.

FIGURA 2 – Emissões de CO<sub>2</sub> pelo tráfego de veículos na cidade do Rio de Janeiro.

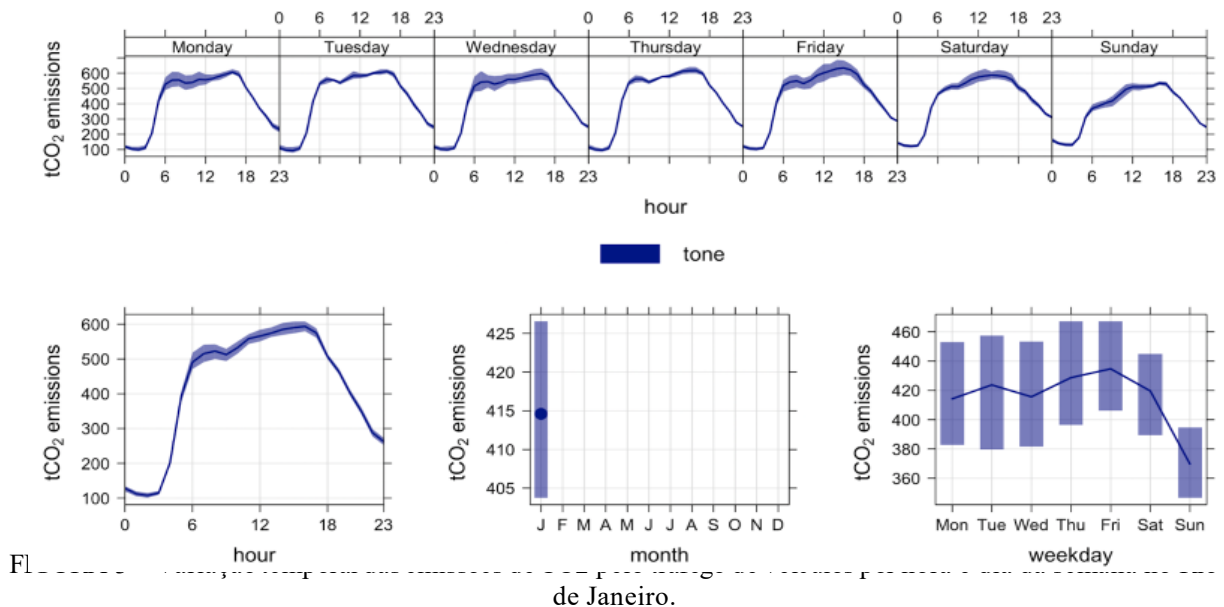


Fonte: Os autores (2022).

Alguns desses corredores são rodovias federais que permitem o deslocamento de moradores da periferia da metrópole para a cidade do Rio de Janeiro, já que esta concentra 74,2% dos postos de trabalho disponíveis na região metropolitana (Rodrigues, 2015). São exemplos o entroncamento da BR-465 e da BR-101 com a Avenida Brasil na periferia distante com Santa Cruz (AP 5.2) e Campo Grande (AP 5.3), e os entroncamentos da BR-116 com a Avenida Brasil e a Linha Vermelha na periferia imediata, na Pavuna (AP 3.6), Penha (AP 3.5) e Madureira (AP 3.3).

Outros corredores de transporte rodoviário são vias expressas de circulação dentro da própria cidade. Estes possuem de duas a quatro faixas de rolamento e permitem a livre circulação de veículos em alta velocidade. No entanto, devido à grande concentração de veículos no início da manhã e final da tarde, apresentam congestionamentos cotidianamente. São exemplos a Linha Vermelha, Linha Amarela, Avenida Brasil, Autoestrada Lagoa-Barra, Transolímpica, Transoeste, TransCarioca que direcionam fluxos para o Centro e a Zona Sul, e mais recentemente para a Barra da Tijuca, os grandes polos concentradores de emprego na cidade. Somente o Centro, concentra cerca de 35% dos empregos da cidade do Rio de Janeiro e 26% da região metropolitana, mas, ao mesmo tempo, tem apenas 5% dos moradores da cidade (Rodrigues, 2015).

Apesar de serem vias expressas, também apresentam trânsito intenso, o que ocorre regularmente nos dias de semana, no início das manhãs e final das tardes, principalmente, o movimento de andar e parar faz com que também seja emitida grande quantidade de CO<sub>2</sub>. Foi observado que há um aumento nas emissões ao longo dos dias da semana. Menor quantidade no domingo e vai aumentando gradativamente a partir de segunda-feira até alcançar um ápice na sexta-feira, reduzindo no sábado e mais ainda no domingo (Figura 3).



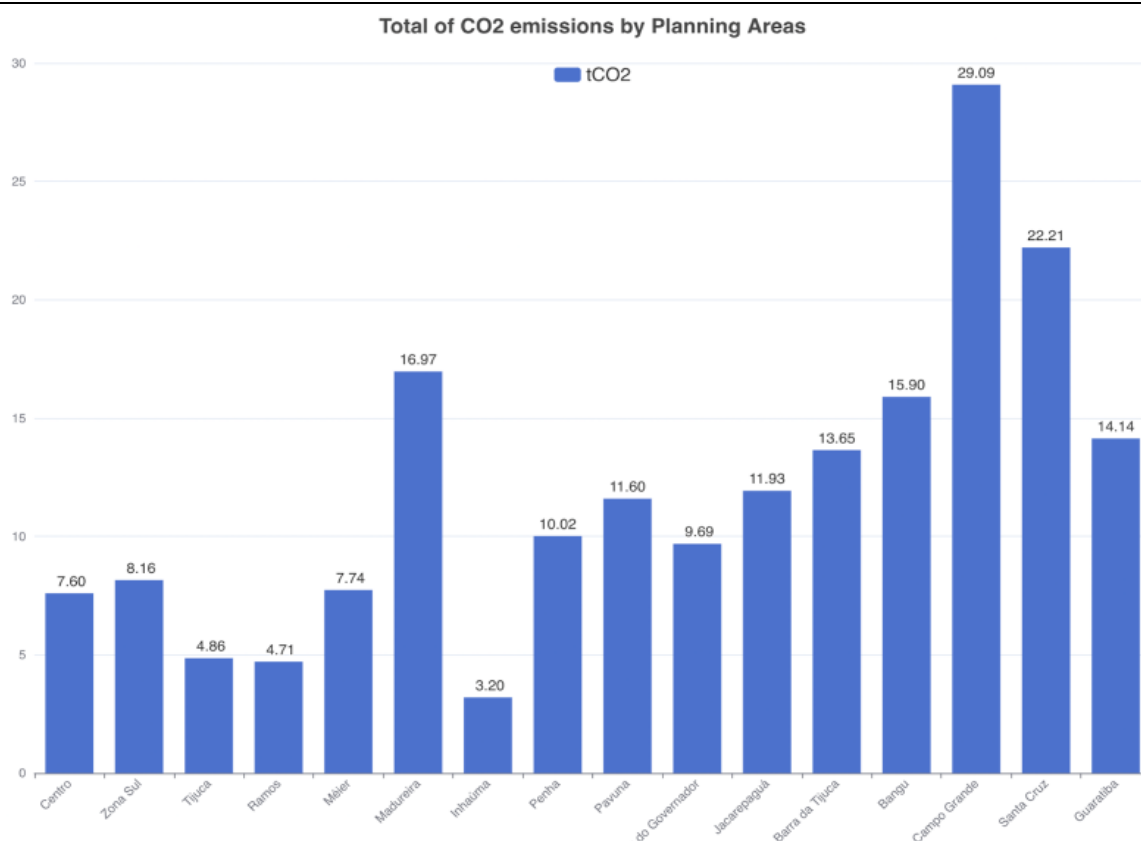
Fonte: Os autores (2022).

#### 4.2 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> E ÁREAS DE PLANEJAMENTO

A maior quantidade de CO<sub>2</sub> emitido foi na Área de Planejamento 5. Entre as cinco regiões de planejamento com maior emissão, quatro são da AP 5, sendo 1º Campo Grande (AP 5.2), com 29,09 toneladas; 2º Santa Cruz (AP 5.3), com 22,21 toneladas; 3º Madureira (AP 3.3), com 16,97 toneladas; 4º Bangu (AP 5.1), com 15,90 toneladas; 5º Guaratiba (AP 5.4), com 14,14 toneladas. Na sequência vêm a Área de Planejamento 4, com 6º Barra da Tijuca (AP 4.2), com 13,65 toneladas e 7º Jacarepaguá (AP 4.1), com 11,63 toneladas (Gráfico 1).

Com a exceção de Madureira, na Zona Norte, por onde chegam à cidade do Rio de Janeiro os veículos vindos dos municípios da periferia imediata da metrópole, na Baixada Fluminense, concentrados na rodovia BR-116, as demais áreas de planejamento são de expansão da cidade, onde houve investimentos para a realização dos Jogos Olímpicos de 2016. A maior emissão pode ser explicada pela dimensão dessas áreas de planejamento.

GRÁFICO 1 – Emissões de CO<sub>2</sub> pelo tráfego de veículos por Regiões de Planejamento.



Fonte: Os autores (2022).

### 4.3 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> E SEGREGAÇÃO SOCIOESPACIAL

Os Jogos Olímpicos transformaram a Barra da Tijuca em uma nova centralidade, e hoje, principalmente, após um período pandêmico que junto à crise econômica fizeram com que muitos escritórios e estabelecimentos comerciais fossem fechados, observa-se empiricamente uma diminuição dos postos de trabalho na área central da cidade (AP1). O que, entretanto, não altera essa configuração caracterizada pela distinção marcante entre o local de moradia e o de trabalho no Rio de Janeiro. Esta determina os padrões de mobilidade metropolitana, possibilitando a busca de correlações entre os indicadores sociais da população residente nos setores censitários e a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida nele. A aplicação da PLS nas variáveis sociais permitiu identificar uma correlação forte e muito forte entre o CO<sub>2</sub> emitido e a densidade populacional domiciliar, a renda e o alfabetismo.

As maiores concentrações de CO<sub>2</sub> foram observadas em áreas onde: 1 - é maior a média do número de moradores nos domicílios, correlação muito forte positiva ( $r = 0,9$ ) e 2 - há mais pessoas residentes de cor ou raça parda e com rendimento nominal mensal domiciliar per capita de até 1/2 salário-mínimo, correlação forte positiva ( $r = 0,78$  e  $0,76$ , respectivamente), localizadas próximas às vias expressas citadas, sobretudo na AP 5; e 3 - é maior o valor médio do rendimento dos responsáveis pelo domicílio e o total do rendimento nominal mensal dos domicílios, correlação forte positiva ( $r = 0,85$  e  $0,80$ , respectivamente), distintamente da anterior, ocorrendo em toda a orla da Zona Sul e, principalmente, Barra da Tijuca, as áreas mais ricas. Estas são também as mais arborizadas, por isso, no contexto geral aparecem como sendo uma correlação moderada positiva ( $r = 0,63$ ) (Figura 4).

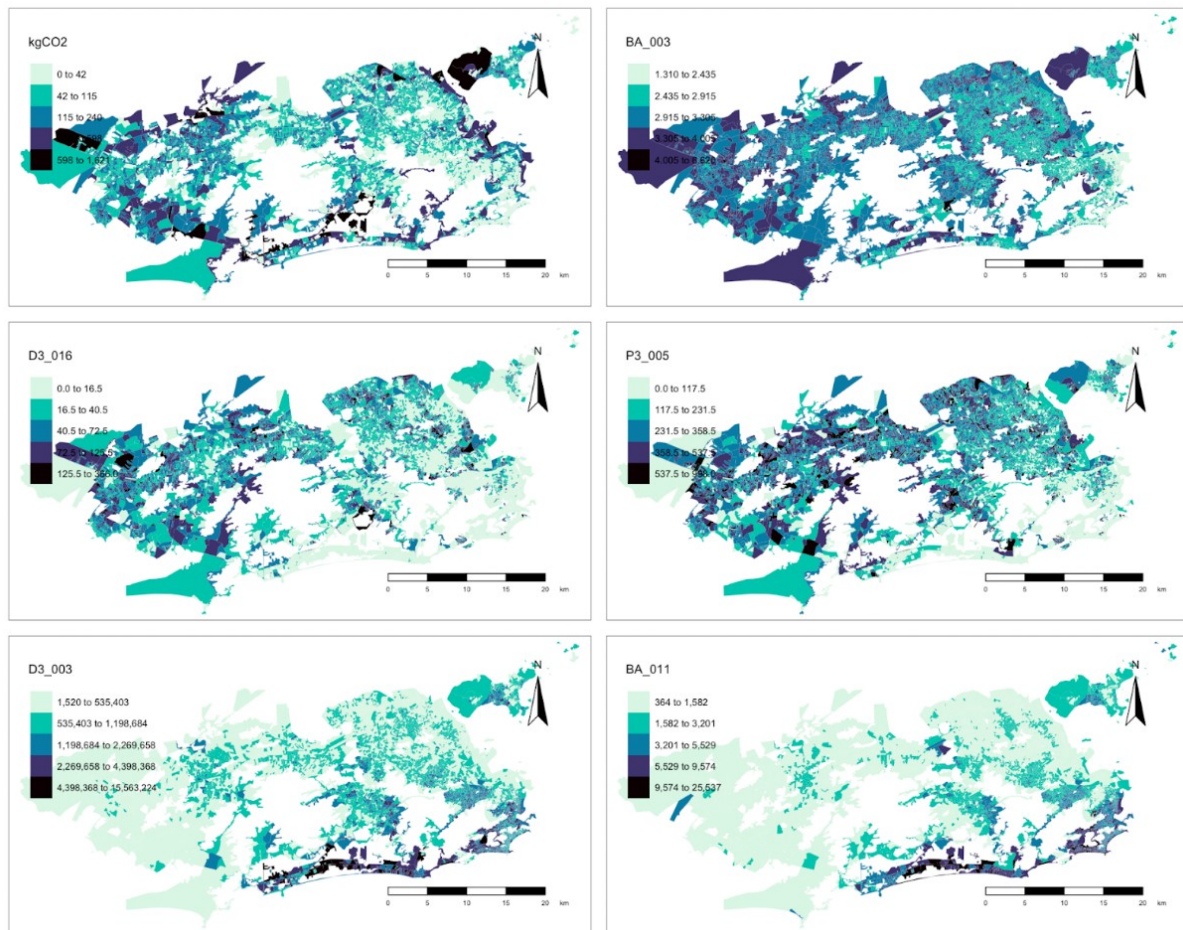


FIGURA 4 – Variáveis socioespaciais com correlação positiva com as emissões de CO<sub>2</sub>.

Fonte: Os autores (2023).

Em contrapartida, as menores concentrações de CO<sub>2</sub> ocorrem em áreas onde há mais pessoas com rendimento nominal mensal domiciliar per capita de até 1/8 salário-mínimo, correlação forte negativa ( $r=0,82$ ). Importante destacar que também foi identificado que nessas áreas de menor emissão de CO<sub>2</sub> existem mais pessoas residentes de cor ou raça preta, embora a correlação negativa seja moderada ( $r = 0,66$ ) (Figura 5).

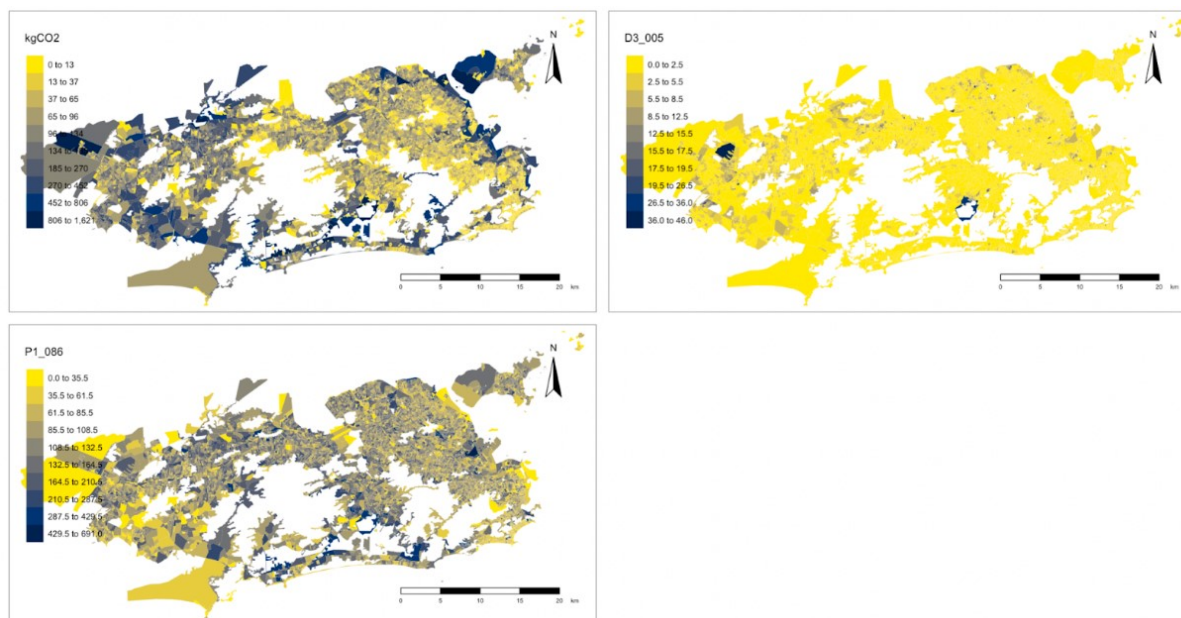


FIGURA 5 – Variáveis socioespaciais com correlação negativa com as emissões de CO<sub>2</sub>.

Fonte: Os autores (2022).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vias expressas, utilizadas como modelo de transporte para deslocamento rápido pela cidade, concentram um número maior de veículos que conseguem desenvolver maior velocidade por um percurso mais longo, emitindo mais CO<sub>2</sub>. No entanto, como a taxa de motorização dos veículos particulares quase triplicou nas últimas décadas, mesmo as vias expressas apresentam congestionamento cotidianamente, o que também contribui com mais emissão de CO<sub>2</sub>. Esse é o resultado de um modelo que privilegia o transporte individual em detrimento do uso de transporte coletivo que, opostamente, vem apresentando redução da taxa de motorização para veículos coletivos nos últimos anos.

Os resultados alcançados com os indicadores sociais reforçam conclusões verificadas nos referenciais teóricos. Um deles foi a influência da densidade populacional, neste caso o número de moradores por domicílio, na maior emissão de CO<sub>2</sub>. Na cidade do Rio de Janeiro, onde a oferta de trabalho tem concentração espacial em áreas onde há menos população residindo, como é o caso da AP1, e mais recentemente a AP4, o que exige a necessidade da mobilidade. Então, mais moradores significa maior necessidade de mobilidade.

O outro foi a influência da renda elevada do responsável pelo domicílio ou a renda total do domicílio na maior emissão de CO<sub>2</sub>. A área mais nobre da cidade está próxima da área central, e juntas concentram a maioria dos postos de trabalho, para onde destinam-se os fluxos de veículos. Então, quanto maior o rendimento no domicílio maior a emissão de CO<sub>2</sub>. Soma-se a isso os investimentos em mobilidade urbana feitos na Barra da Tijuca, por conta dos Jogos Olímpicos, que apesar de não estarem próximos da área central histórica da cidade, foram criadas vias expressas que melhoraram a conexão desta área economicamente emergente com as demais áreas de planejamento, tornando-a uma nova centralidade de fluxos, concentrando as

emissões de CO<sub>2</sub>. No entanto, esta área apresenta melhor arborização que serve como estoque de CO<sub>2</sub> que pode colaborar no equilíbrio do sistema das emissões.

Em contrapartida, há também elevadas emissões em áreas com rendimento per capita de até 1/2 salário-mínimo com elevada concentração de CO<sub>2</sub>, indicando o contrário do que foi afirmado anteriormente, ou seja, há também mais emissões em áreas de baixa renda. O que parece um paradoxo pode ser explicado por diferentes fatores. A cidade do Rio de Janeiro é grande, com mais de 6,5 milhões de habitantes em uma paisagem complexa - do ponto de vista natural, mas sobretudo social -, conectada por vias expressas que atravessam áreas com diferentes perfis socioeconômicos. Além disso, mesmo nas áreas mais ricas, como na Zona Sul, residem população de baixa renda em ocupações irregulares nas encostas, chamadas de “favelas”.

Por outro lado, verificou-se que há baixas concentrações de CO<sub>2</sub> em áreas onde é mais numerosa a população com rendimento per capita de até 1/8 salário-mínimo. Assim, mesmo que as vias expressas atravessem áreas com perfil de população de baixa renda, aqueles com a renda ainda mais baixa residem distantes dessas vias de circulação, e por isso com menor concentração de CO<sub>2</sub>. Além disso, por mais que nas áreas ricas da cidade existam população de baixa renda, como o custo de vida é elevado, aqueles que têm a renda ainda mais baixa são obrigados a residirem nas áreas mais distantes daquela onde há oferta de trabalho. Os mais pobres têm maior dificuldade para a mobilidade na cidade do Rio de Janeiro.

## AGRADECIMENTOS

À CET-Rio pela disponibilização dos dados de fluxos de veículos. À Faperj pelo financiamento da pesquisa através do Edital para Grupos Emergentes.

## REFERÊNCIAS

ABREU, M. A. **Evolução urbana no Rio de Janeiro**. 1987.

CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Texto para Discussão, No. 1606, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, 2011.

PCRJ. **Instituto Pereira Passos. População e taxa de motorização por tipo de veículo no Município do Rio de Janeiro entre 1994-2021**. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/PCRJ::população-e-taxa-de-motorização-por-tipo-de-veículo-no-município-do-rio-de-janeiro-entre-1994-2021/about>. Acesso em: 11 dez 2022.

CHIQUETTO, J. B. et al. Socioeconomic conditions and fossil fuel CO<sub>2</sub> in the Metropolitan Area of Rio de Janeiro. *Urban Climate* 43 (2022) 101176. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101176>. Acesso em: 16 out 2022.

Sores de Farias, H. y Batista Dos Anjos, M. (2024). *Tekoporá*. ISSN 2697-2719, 10(Especial). <https://doi.org/10.36225/tekopora.v10iEspecial.223>

FENG S, et al. LA megacity: A high-resolution land-atmosphere modelling system for urban CO<sub>2</sub> emissions. **Atmos Chem Phys**. 16:9019–9045, 2016. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/16/9019/2016/>. Acesso em: 01 dez. 2022.

GATELY, C.K. et al. Cities, traffic, and CO<sub>2</sub>: A multidecadal assessment of trends, drivers, and scaling relationships. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 16, p. 4999-5004, 2015. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1421723112>. Acesso em: 03 dez. 2022.

GELADI, P., KOWALSKI B. R. Partial least-squares regression: a tutorial. **Analytica chimica acta**, 185, 1-17, 1986. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0003267086800289>. Acesso em: 22 jun. 2022.

GUIMARÃES, R. C. V. **Barra da Tijuca e o Projeto Olímpico: a cidade do capital**. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. IPPUR. UFRJ. 153 p, 2015.

GURNEY, K. R. et al. Quantification of fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions on the building/street scale for a large US city. **Environmental science & technology**, v. 46, n. 21, p. 12194-12202, 2012. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es3011282>. Acesso em: 02 dez. 2022.

HARDIMAN, B. S. et al. Accounting for urban biogenic fluxes in regional carbon budgets. **Science of the Total Environment**, v. 592, p. 366-372, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717305326>. Acesso em: 02 dez. 2022.

HUNDERTMARK, W.J. et al. Influence of landscape management practices on urban greenhouse gas budgets. **Carbon Balance Manage**, 16:1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13021-020-00160-5>. Acesso em: 17 dez 2022.

LAUVAUX, T. et al. High-resolution atmospheric inversion of urban CO<sub>2</sub> emissions during the dormant season of the Indianapolis Flux Experiment (INFLUX). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 10, p. 5213-5236, 2016. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JD024473>. Acesso em: 03 dez. 2022.

MASCARENHAS, G. Cidade mercadoria, cidade-vitrine, cidade turística: a espetacularização do urbano nos megaeventos esportivos. **Caderno Virtual de Turismo**, vol. 14, núm. 1, pp. 52-65, 2014.

MASCARENHAS, G. Rio de Janeiro 2016: a cidade em movimento. **Revista USP**, n. 108, p. 49-56, 2016.

MENZER, O. et al. Annual sums of carbon dioxide exchange over a heterogeneous urban landscape through machine learning based gap-filling. **Atmospheric Environment**, v. 101, p. 312-327, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231014008644>. Acesso em: 01 dez 2022.

MITCHELL, L.E. et al. Long-term urban carbon dioxide observations reveal spatial and temporal dynamics related to urban characteristics and growth. **Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.** 115 (12), 2912–2917, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1702393115>. Acesso em: 03 dez 2022.

NOTTER, B., et al. "HBEFA 4.1." **INFRAS**, 2019. Disponível em: [https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA41\\_Development\\_Report.pdf](https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA41_Development_Report.pdf). Acesso em: 22 jun. 2022.

NOVAIS, P. Urbanismo na cidade desigual: o Rio de Janeiro e os megaeventos. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais** – v.16, n.1, pp. 11-34, 2014.

OLIVEIRA, F.G. e OLIVEIRA, L.D. Espaço metropolitano, regionalização da economia e reestruturação produtiva no estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Cuyonomics. Investigaciones en Economía Regional**. Año 3, número 5, pp. 39-65, 2020.

PARK, C. et al. Spatiotemporal variations in urban CO2 flux with land-use types in Seoul. **Carbon Balance and Management**. 17:3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00206-w>. Acesso em: 16 dez 2022.

PATAKI, D.E. et al. Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions. **Front. Ecol. Environ.** 9, 27e36, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1890/090220>. Acesso em: 03 dez 2022.

PEREIRA, R.H. et al. Distributional effects of transport policies on inequalities in access to opportunities in Rio de Janeiro. **J. Transp. Land Use** 12 (1), 741–764, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2019.1523>. Acesso em: 01 dez 2022.

RIO DE JANEIRO (Município). **Lei Complementar nº111. 2011**. Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Sustentável do Município do Rio de Janeiro. 2011. 188 p.

RODRIGUES, J. M. Condições de mobilidade urbana e organização social do território. Em: Ribeiro, L.C.Q. **Rio de Janeiro: transformações na ordem urbana**. Letra Capital/Observatório das Metrôpoles: Rio de Janeiro, 2015.



SARGENT, M. et al. Anthropogenic and biogenic CO<sub>2</sub> fluxes in the Boston urban region. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 29, p. 7491-7496, 2018. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1803715115>. Acesso em: 02 dez. 2022.

SOUZA M. L. **ABC do Desenvolvimento Urbano**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 222 p., 2003.

VELASCO, E., ROTH, M.. Cities as net sources of CO<sub>2</sub>: review of atmospheric CO<sub>2</sub> exchange in urban environments measured by eddy covariance technique. **Geogr. Compass** 4, 1238e1259. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-%208198.2010.00384.x>. Acesso em: 01 dez 2022.

WARD, H.C. et al. Effects of urban density on carbon dioxide exchanges: Observations of dense urban, suburban and woodland areas of southern England. **Environmental Pollution**. Volume 198, pp 186-200, March 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.031>. Acesso em: 02 dez 2022.

WU, D. et al. A model for urban biogenic CO<sub>2</sub> fluxes: Solar-Induced Fluorescence for Modeling Urban biogenic Fluxes (SMUrF v1), **Geosci. Model Dev.**, 14, 3633–3661, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3633-2021,%202021>. Acesso em: 01 dez 2022.