O IMPACTO DA MOBILIDADE ATIVA NA SAÚDE HUMANA: UMA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS TRANSPORTES URBANOS

THE IMPACT OF ACTIVE MOBILITY ON HUMAN HEALTH: A LIFE CYCLE ASSESSMENT OF URBAN TRANSPORTATION

Maria Cynthia de Araújo Urbano[1]; Lucas Rosse Caldas[2].

[1]Doutoranda | maria.urbano@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; [2]Doutor D.Sc. | lucas.caldas@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo:
A mobilidade sustentável, por meio da mobilidade elétrica e mobilidade ativa, surge como uma alternativa ao promover transportes com menor ou até zero emissão de alguns poluentes na atmosfera. No entanto, com base na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ainda há lacunas quanto as concentrações atmosféricas geradas pela vida útil dos veículos elétricos, em específico, nas etapas de produção e descarte das baterias utilizadas por estes veículos. Enquanto a mobilidade ativa, um conceito pouco estudado como agregador e um desafio à mobilidade urbana, além do seu impacto ambiental ainda não está claro. O objetivo do artigo é avaliar e analisar o impacto da saúde humana vindos dos transportes motorizados e elétricos em comparação à mobilidade ativa. São propostos quatro cenários modelos que utilizam dados de estudos em ACV com métricas nas concentrações atmosféricas em NO_x-eq, $PM_{2.5}$-eq e SO_2-eq em referência à mobilidade urbana. Como resultado, um inventário de emissões de cada tipo de transporte urbano em um percurso de 1km por dia, onde, dos cenários avaliados, a introdução da mobilidade ativa reduziu em até 40% das métricas das concentrações atmosféricas. O estudo mostra a mobilidade ativa como estratégia-chave mais eficaz para diminuir os impactos à saúde humana.

Palavras-chave:
Mobilidade Sustentável; Mobilidade Urbana; Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Concentração Atmosférica.

Abstract:
Sustainable mobility, through electric mobility and active mobility, emerges as an alternative to promote transport with lower or even zero emissions of some pollutants into the atmosphere. However, based on the Life Cycle Assessment (LCA), there are still gaps regarding the atmospheric concentrations generated by the useful life of electric vehicles, specifically in the production and disposal stages of the batteries used by these vehicles. While active mobility, a concept little studied as an aggregator and a challenge to urban mobility, in addition to its environmental impact is still unclear. The objective of the article is to evaluate and analyze the impact on human health from motorized and electric transport in comparison to active mobility. Four model scenarios are proposed that use data from LCA studies with metrics on atmospheric concentrations in NOx-eq, PM2.5-eq and SO2-eq in reference to urban mobility. As a result, an inventory of emissions from each type of urban transport in a 1km per day route, where, of the scenarios evaluated, the introduction of active mobility reduced the metrics of atmospheric concentrations by up to 40%. The study shows active mobility as the most effective key strategy for reducing impacts on human health.

Keywords:
Sustainable Mobility; Urban Mobility; Life Cycle Assessment (LCA); Atmospheric Concentration.

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica gerada pelos transportes urbanos motorizados está associada diretamente à saúde humana devido a queima de combustíveis fósseis ao emitir poluentes, tais quais, o material particulado ($PM_{2,5}$), os óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) entre outros poluentes, responsáveis por doenças respiratórias, cardiovasculares e até mortes prematuras. Com a grande apreensão diante deste cenário, surgem propostas de mobilidade sustentável, como a mobilidade elétrica e a mobilidade ativa, onde ambas são consideradas estratégicas para a redução em quase zero nas emissões de poluentes na atmosfera.

A adoção da mobilidade elétrica é vista como uma mudança positiva de mobilidade sustentável com veículos com zero emissão de poluentes na etapa de operação, quando há recarga em uma matriz energética renovável. No entanto, as emissões totais geradas nas etapas de produção e descarte, em específico nas etapas relacionadas as baterias, apresentam lacunas conforme um inventário de emissões do ciclo de vida completo dos veículos elétricos. Como alternativa, surge o conceito da mobilidade ativa, no qual, sempre foi considerada como uma mobilidade de lazer, por consistir no uso de transportes não motorizados (bicicletas, patinetes, etc.) e do modo a pé (caminhabilidade). Entretanto, enquanto conhecida por seus benefícios à saúde e bem-estar, ainda é pouco estudada como agregadora à mobilidade urbana.

A redução do uso do transporte motorizado é um requisito cada vez mais importante ao impacto da saúde humana, onde, os níveis de poluição atmosféricas são facilitadores a doenças respiratórias, direcionadas, principalmente, aos mais vulneráveis (idosos, crianças, pedestres etc.). Uma análise entre a mobilidade elétrica e a mobilidade ativa como estratégias de uma mobilidade sustentável é essencial, não apenas na diminuição das emissões de poluentes, mas também na melhoria da qualidade de vida nas cidades, reduzindo desigualdades e fortalecendo a resiliência ambiental.

Neste contexto, a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), muito utilizada para quantificar as emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEEs) e outros poluentes atmosféricos, promove a elaboração de um inventário de emissões da mobilidade urbana e seus impactos ambientais relacionados as diferentes etapas do ciclo de vida dos transportes urbanos. A precariedade dos dados que detalhem informações, tais quais, categorias dos veículos (à combustão, elétrico, etc.), o tipo de transporte (carros, ônibus, motos, etc.) e, principalmente, o comportamento do usuário na sua mobilidade diária, dificulta a elaboração dos inventários de emissões mais precisos e coesos. Em um comparativo de estudos com ACV, por serem limitados, dificultam não só o entendimento amplo do ciclo de vida do veículo, mas também a relevância em avaliar o alcance dos impactos ambientais.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo do artigo é realizar uma análise quantitativa e uma avaliação qualitativa relacionado ao impacto na saúde humana em relação aos níveis de poluição atmosférica vinda dos principais transportes motorizados e elétricos em comparação à introdução da mobilidade ativa em um estudo do ciclo de vida de cada tipo de transporte urbano.

Como objetivos específicos tem-se:

a) Apresentar cenários modelos para qualificar e quantificar o impacto na saúde humana em métricas de concentrações atmosféricas de NO_x-eq, $PM_{2,5}$-eq e SO_2-eq;

b) Propor diretrizes ambientais para uma mobilidade urbana mais sustentável considerando a mobilidade ativa como estratégia-chave.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A poluição atmosférica se resume a qualquer evento que possa alterar a condição natural do ar, tornando-o impróprio à saúde humana e nocivo a biodiversidade. Estes eventos são causados pelas concentrações de poluentes sólidos, líquidos ou gasosos, sendo eles visíveis ou invisíveis; apresentando odor ou não; de forma natural (vulcanismo, poeira, incêndios etc.) ou resultante das atividades antropogênicas.

Dentre os poluentes emitidos na atmosfera, tem-se o dióxido de enxofre (SO_2), vindos da combustão de combustíveis fósseis, carvão e petróleo (na geração de energia) ou pela produção industrial; os óxidos de nitrogênio (NO_x) provenientes da combustão em alta temperatura oriundos do transporte e da produção de energia. Ao mesmo tempo que, tanto o SO_2 quanto o NO_x, são resultantes dos eventos externos assim como os eventos naturais, onde afetam diretamente a saúde humana por meio de doenças respiratórias e induzem a redução do crescimento natural da vegetação.

Outro poluente, o monóxido de carbono (CO), é um gás incolor, inodoro e tóxico vindos da combustão incompleta[1] de combustíveis, gás natural, carvão ou madeira. Enquanto o material particulado (em inglês particulate matter - PM) ou carbono negro (fuligem), é formado pela combustão incompleta de combustíveis fósseis provenientes das atividades habitacionais relacionados ao ato de cozinhar (bioenergia), aquecimento (bioenergia e carvão), iluminação e, como principal emissor de PM, o transporte motorizado.

Em relação ao PM gerados pelo processo de combustão incompleta dos combustíveis fósseis, as partículas são classificadas em inaláveis grossas (PM_{10}) e em partículas respiráveis finas ($PM_{2,5}$), onde, esta última, com um menor diâmetro aerodinâmico[2], tem a capacidade de penetrar profundamente nos pulmões e na corrente sanguínea. Ou seja, o PM tem em suas características de partículas sólidas ou gotículas suspensas no ar, com dimensões em μm (micrometros), emitidas por atividades antropogênicas ou atividades naturais tem em seus termos de “inaláveis” e “respiráveis” em referência ao seu ingresso no sistema respiratório.

O comportamento do usuário na escolha por transportes motorizados e poluentes em sua mobilidade diária, colocado por Xu, Taylor e Tien (2022), se torna um dos principais contribuintes para a insalubridade do ar e os riscos que correspondem à alta exposição, cerca de 21% da exposição e 30% do carbono negro inalado. Segundo a World Health Organization – WHO (2017), mais de 90% da população mundial está exposta aos riscos de poluição do ar externo todos os dias, resultando cerca de uma morte a cada dez (11,6% de todas as mortes à nível global).

A poluição atmosférica não afeta só a saúde humana, mas também tem efeito visível sobre os materiais das edificações, na qual, o contato direto com os poluentes resulta na descoloração, erosão, corrosão, enfraquecimento das estruturas e decomposição dos materiais, descaracterizando até as edificações patrimoniais. A rápida urbanização foi a maior responsável pelo agravamento dos níveis de poluentes na atmosfera, transformando o ambiente construído na principal fontes emissora de gases e poluentes, onde, ações ou ferramentas são necessárias para inverter o quadro dos impactos ambientais.

2.2. MOBILIDADE ELÉTRICA

Muitos estudos destacam a mobilidade elétrica como uma inovação tecnológica para redução da emissão de poluentes na etapa de operação, além disso, os veículos elétricos se tornaram atrativos por serem mais leves e rápidos, reduzindo a dependência por combustíveis fósseis, ao utilizar uma matriz energética renovável nas recargas. No entanto, a etapa de produção dos veículos elétricos

[1] A combustão ocorre quando um combustível reage com oxigênio e produz calor, gás carbônico e água (quando completa) e monóxido de carbono ou fuligem (se for incompleta) (Toledo, La Rovere, 2018).
[2] O material particulado se classifica pelo tamanho médio do diâmetro das suas partículas (Ibid., adaptação dos autores, 2024).

gera mais emissões do que na etapa operação dos transportes motorizados devido às quantidades matérias-primas utilizadas na fabricação, principalmente, dos diferentes tamanhos das baterias.

Devido a estas variações de tamanhos, quanto mais pesadas as baterias, mais são absorvidas a principal matéria-prima, o metal lítio. Este metal, por ser um elemento de reserva limitada no planeta, também é altamente poluente na etapa do fim de vida (descartado) e ser de combustão instantânea ou explosiva. Em contrapartida, a micromobilidade pode atender as necessidades dos usuários com transportes leves (scooter, bicicleta, patins, etc.), sendo eles elétricos, próprios ou compartilhados como uma solução flexível e eficiente. A ascensão da micromobilidade e mobilidade elétrica enfatiza uma mudança de demanda por um produto que o consumo de energia e matérias-primas aumenta em função de uma produção industrial e, como consequência, em um maior impacto ambiental.

Com a aplicação da metodologia da ACV, os dados referentes as emissões totais dos veículos elétricos em sua vida útil são significantes, ainda que, as recargas dos veículos elétricos sejam por uma matriz energética renovável. Mesmo assim, muitos estudos não levam em consideração as etapas de produção e fim de vida dos veículos elétricos como grandes percursoras dos impactos ambientais, mas ainda há uma limitação que dificulta a elaboração de um inventário de emissões e a compreensão dos reais impactos ambientais dos veículos elétricos. Embora a eletrificação dos transportes seja positiva em relação a etapa de operação, a necessidade de uma maior abordagem que considere todo o ciclo de vida é essencial para garantir estratégias de redução nas emissões em uma perspectiva de média a longo prazo.

2.3. MOBILIDADE ATIVA

O conceito da mobilidade ativa surge como princípio de uma mobilidade sustentável diretamente relacionada aos transportes leves e não motorizados (bicicleta, patinete, etc.) e a caminhabilidade (em inglês *walkability*). Uma mobilidade sustentável, eficiente energeticamente e ambientalmente por não emitir poluentes na atmosfera e não gerar ruídos. Um conceito pouco estudado com agregadora à mobilidade urbana, como exemplo uma caminhada ou pedalada até a estação de metrô, ponto de ônibus etc., devido a carência de infraestruturas de acessos adequadas, tais quais, calçadas e ciclovias.

Aydin, Seker e Özkan (2022), comentam que inspirar o uso de diversos meios de transporte com menor influência no meio ambiente é uma das principais políticas a serem implementadas a nível local para diminuir as emissões. Embora que a investigação sobre sistemas de transporte ambientalmente sustentáveis se tornou mais importante do que nas últimas décadas, alcançar e gerenciar a mobilidade sustentável continua a representar desafios significativos em todo o mundo.

As infraestruturas de acessos não são atrativas à mobilidade ativa devido às suas características físicas que sempre privilegiam o grande volume de transportes poluentes e rápidos, desfavorecendo ter opções de uma mobilidade sustentável. Em um modelo onde as infraestruturas de acessos são associadas a longos deslocamentos para atender às necessidades da população, há um aumento pelo consumo de transportes individuais, motorizados e poluentes. Assim, o usuário obtém um aumento de custo (gasto com transporte) e de tempo (congestionamentos), tornando este tempo perdido nos congestionamentos, sendo improdutivo e visto como custoso.

Em estudos que destacam a mobilidade ativa como agregadora da mobilidade urbana em áreas urbanizadas, há uma adaptação nas infraestruturas de acessos (calçadas, ciclovias e áreas de convivência) que são cruciais para a introdução da mobilidade ativa, tornando as áreas mais propícias a redução da poluição atmosférica, pois além da diminuição por transportes poluentes, há uma nova percepção de conforto e segurança para os usuários, em específico, aos mais vulneráveis (idosos, criança, ciclistas, etc.). Quando implementada, a mobilidade ativa incorpora desde uma diversificação de transportes de zero emissão quanto uma integração social e funcional em relação aos transportes urbanos.

3. MÉTODO

No contexto do consumo excessivo de combustíveis fósseis, identificar ferramentas e metodologias (nacionais e/ou internacionais) com inventários de emissões provenientes do comportamento dos usuários em sua mobilidade diária, são essenciais para introduzir diretrizes a redução da poluição atmosférica. Conforme a revisão da literatura, surgiram desafios metodológicos, na qual, não foram encontrados estudos com qualquer ferramenta que defina um inventário para qualificar o impacto da saúde humana e quantificar seus indicadores NO_x-eq, $PM_{2.5}$-eq e SO_2-eq, em referência à mobilidade urbana.

Portanto, para a quantificar os impactos ambientais da saúde humana, foram utilizados dados consolidados do IPCC (2014), IEA (2023), estudos de ACV e o banco de dados Ecoinvent v. 3.8, utilizando o método do AICV ReCiPe pelo *software* SimaPro, adaptados à realidade brasileira, a partir do ciclo de vida de cada tipo de transporte urbano. A base metodológica, então, apresenta as concentrações atmosféricas de NO_x-eq, $PM_{2.5}$-eq e SO_2-eq pela Equação 1 que apresenta o total de emissão do ciclo de vida do veículo em relação a sua eficiência conforme a capacidade média de passageiro transportado em um quilômetro (pkm) percorrido, de acordo com a Tabela 1, sendo:

Emissão Total (pkm) = Emissão Total do Veículo (kg/km) / Capacidade (passageiros)
(Equação 1)

Tipo de Transporte	Unidade de Medida	Capacidade (média/veículo)	Vida Útil (anos)	Saúde Humana		
				kg NO_x-eq/pkm	kg $PM_{2.5}$-eq/pkm	kg SO2-eq/pkm
Carro (gasolina)	pkm	1,5	10 a 15	0,000713	0,000293	0,000473
Carro (elétrico)	pkm	1,5	10 a 15	0,000153	0,000047	0,000107
Ônibus (diesel)	pkm	20	12 a 20	0,000402	0,000026	0,000051
Ônibus (elétrico)	pkm	20	12 a 20	0,000009	0,000002	0,000004
Moto/Scooter (gasolina)	pkm	1,2	5 a 10	0,000792	0,000317	0,000467
Moto/Scooter (elétrica)	pkm	1,2	6 a 10	0,000150	0,000067	0,000075
Bicicleta (elétrica)	pkm	1	5 a 8	0,000100	0,000100	0,000100
Bicicleta	pkm	1	5 a 10	0,000000	0.000000	0,000000

Tabela 1: Concentração atmosférica por tipo de transporte.
Fonte: IPCC (2014), IEA (2023) e Ecoinvent 3.8, adaptação dos autores (2025).

Para apresentar uma análise comparativa das concentrações atmosféricas e avaliar o impacto saúde humana em cada tipo de transporte, foi desenvolvido cenários modelos com infraestruturas de acessos para o fluxo dos transportes mais utilizados na mobilidade urbana e, para calcular a quantidade de veículo que realiza o percurso de um quilometro por dia, tem-se o seguinte resultado: carros (combustão e elétrico) (60 km/h), 1.440 veículos/dia; ônibus (combustão e elétrico) (40 km/h), 960 veículos/dia; scooter (combustão) (45 km/h), 1.080 veículos/dia; scooter (elétrica) (25 km/h), 600 veículos/dia; bicicleta (convencional) (15 km/h), 360 bicicletas/dia; e bicicleta (elétrica) (25 km/h), 600 bicicletas/dia.

Portanto, a concentração total atmosférica por cada tipo de transporte em uma padronização do cenário modelo, a Equação 2 facilita o entendimento dos resultados a serem apresentados das emissões totais das métricas do impacto ambiental da saúde humana, sendo:

Emissão Total(kg/dia)= Volume de Veículos(i) x Ocupação Média(i) x Fator de Impacto(i)
(Equação 2)

Onde:

- Volume de Veículos$_{(i)}$: O número total de tipo e categoria (*i*) (exemplo, carro elétrico ou carro à combustão etc.) que circularam em km/dia;
- Ocupação Média$_{(i)}$: Número médio de passageiros por veículo (exemplo, carro tem 1,5 passageiros-veículo; ônibus em 20 passageiros-veículo etc.);

- Fator de Impacto$_{(i)}$: Concentração atmosférica por métricas em $PM_{2,5}$-eq, NO_x-eq e SO_2-eq, geradas por cada tipo de transporte ao impacto da saúde humana.

3.1. CENÁRIO “A”

Em um modelo expansionista, onde as vias são conexões de fluxos contínuos para atender uma predominância de transportes motorizados em uma mobilidade urbana cada vez mais poluente, elevando a concentração atmosférica, impactando diretamente a qualidade do ar e, consequentemente, à saúde humana. Exposto na Figura 1, o cenário “A”, ao estabelecer a padronização com três vias para abranger o volume total diário de veículos, propõe-se uma via exclusiva para ônibus à combustão e duas vias que são utilizadas para o carro e a scooter à combustão.

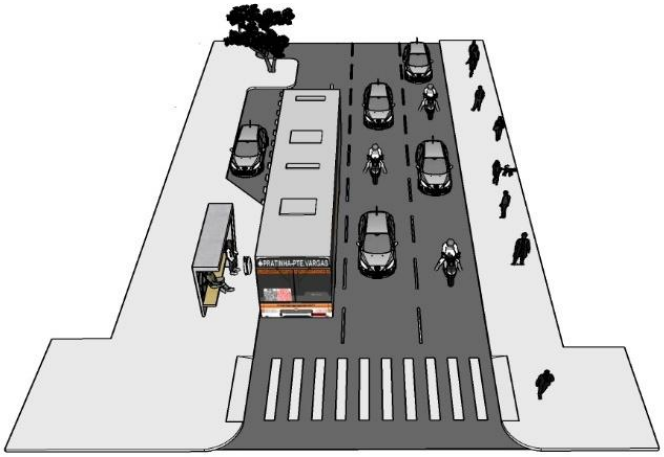


Figura 1: Cenário “A”.
Fonte: Os autores (2025).

O cenário “A” abrange o volume total diário de 6.000 veículos/dia, tendo assim: uma via exclusiva para o ônibus à combustão com um total de 960 veículos/dia; duas vias com fluxos para carro à combustão, totalizando 2.880 veículos/dia; e, utilizando as mesmas vias dos carros, a scooter à combustão que corresponde a 2.160 veículos/dia. Por fim, o total da concentração atmosférica tem 12,84kg NO_x-eq/dia, 2,59kg $PM_{2.5}$-eq/dia e 4,23kg SO_2-eq/dia conforme a Tabela 2.

Tipo de Transporte	Volume (veículos/dia)	Saúde Humana		
		kg NO_x-eq/dia	kg $PM_{2.5}$-eq/dia	kg SO2-eq/dia
Carro (gasolina)	2.880	3,08	1,27	2,04
Ônibus (diesel)	960	7,71	0,50	0,98
Moto/Scooter (gasolina)	2.160	2,05	0,82	1,21
Total	**6.000**	**12,84**	**2,59**	**4,23**

Tabela 2: Concentração atmosférica por tipo de transporte cenário “A”.
Fonte: Os autores (2025).

3.2. CENÁRIO “B”

No cenário “B”, as vias comportam os tipos de transportes individuais (carro e scooter) e coletivo (ônibus) nas categorias de veículos à combustão e elétrico, sendo o carro à combustão (cor cinza) e o carro elétrico (cor vermelha), enquanto a scooter à combustão (cor branca) com 45km/h que diferente em velocidade da scooter elétrica (cor azul) com 25km/h, nos quais, utilizam as duas faixas para fluxo contínuo neste cenário modelo conforme a Figura 2.

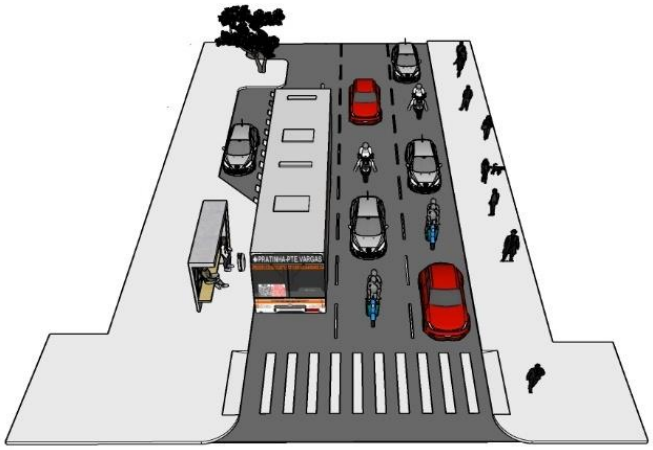


Figura 2: Cenário “B”.
Fonte: Adaptação dos autores (2025).

Em um volume total de 10.080, veículos/dia, o carro à combustão e o carro elétrico tem um volume de 2.880 veículos/dia cada com fluxo em duas vias, enquanto, a scooter à combustão, por ter uma velocidade diferente da scooter elétrica, tem em seu volume um total de 2.160 veículos/dia e a scooter elétrica com 1.200 veículos/dia. Neste cenário “B” o total da concentração atmosférica tem 13,72kg NO_x-eq/dia, 2,88kg $PM_{2.5}$-eq/dia e 4,8kg SO_2-eq/dia expostos na Tabela 3.

Tipo de Transporte	Volume (veículos/dia)	Saúde Humana		
		kg NO_x-eq/dia	kg $PM_{2.5}$-eq/dia	kg SO2-eq/dia
Carro (gasolina)	2.880	3,08	1,27	2,04
Carro (elétrico)	2.880	0,66	0,20	0,46
Ônibus (diesel)	960	7,71	0,50	0,98
Moto/Scooter (gasolina)	2.160	2,05	0,82	1,21
Moto/Scooter (elétrica)	1.200	0,22	0,10	0,11
Total	**10.080**	**13,72**	**2,88**	**4,80**

Tabela 3: Concentração atmosférica por tipo de transporte cenário “B”.
Fonte: Os autores (2025).

3.3. CENÁRIO “C”

Neste cenário “C”, exposto na Figura 3, mantêm-se a via exclusiva para o transporte coletivo, uma via destinada ao fluxo contínuo do carro (cor cinza) e da scooter (cor branca) na categoria de veículo à combustão e, implementando infraestruturas de acessos para a mobilidade ativa, uma via com faixas duplas proporcionais ao deslocamento da bicicleta convencional.

Por ser um cenário modelo, não condiz com a realidade, pois, em muitos casos, as vias exclusivas para os ciclistas têm interferência constante dos transportes motorizados, enquanto os pedestres enfrentam calçadas com obstáculos ou degradas devido à falta de manutenção, dificultando a sua mobilidade. Da mesma forma, os ciclistas acabam interferindo nas vias destinadas aos pedestres (calçadas) por não disporem de uma infraestrutura de acesso adequada ou própria para seu deslocamento. Portanto, a adaptação das infraestruturas de acessos explora ao máximo o potencial de mitigação em proporcionar mudanças nas escolhas do usuário pelo tipo de transporte a ser utilizado na sua mobilidade diária.

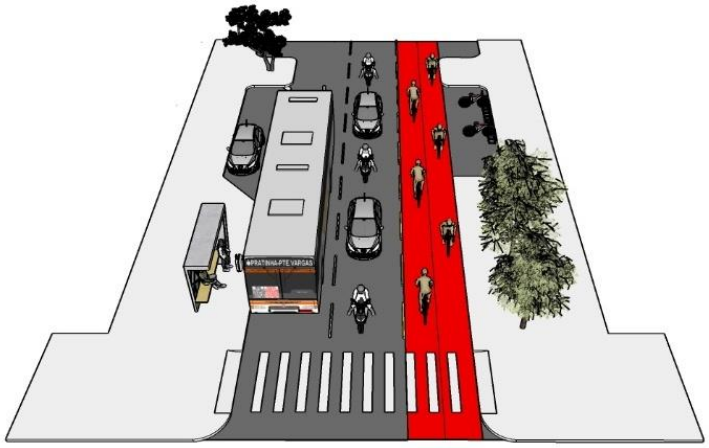


Figura 3: Cenário “C”.
Fonte: Os autores (2025).

Neste cenário, tem-se o volume total de 3.840 veículos/dia, onde, o carro à combustão tem o total de 4.200 veículos/dia; 960 veículos dias em relação ao ônibus à combustão; a scooter à combustão com 1.080 veículos/dia; e, em relação as bicicletas convencionais têm um total de 720 veículos/dia. Ao final, o total da concentração atmosférica tem 10,28kg NO_x-eq/dia, 1,54kg $PM_{2.5}$-eq/dia e 2,61kg SO_2-eq/dia de acordo com a Tabela 4.

Tipo de Transporte	Volume (veículos/dia)	Saúde Humana		
		kg NO_x-eq/dia	kg $PM_{2.5}$-eq/dia	kg SO2-eq/dia
Carro (gasolina)	1.440	1,54	0,63	1,02
Ônibus (diesel)	960	7,71	0,50	0,98
Moto/Scooter (gasolina)	1.080	1,03	0,41	0,60
Bicicleta	720	0,00	0,00	0,00
TOTAL	**4.200**	**10,28**	**1,54**	**2,61**

Tabela 4: Concentração atmosférica por tipo de transporte cenário “C”.
Fonte: Os autores (2025).

3.4. CENÁRIO “D”

O cenário “D” busca apresentar metas redução concentração atmosférica ao ambiente construído da Figura 4, a mobilidade ativa (caminhabilidade e bicicleta) se torna uma opção de mobilidade urbana, com infraestruturas de acessos propícias, incentivando a mudança do comportamento do usuário por transportes menos poluentes em seu deslocamento. Ao mesmo tempo, uma conectora dos diferentes tipos de transportes, em especial dos transportes coletivos (ônibus), levando a mobilidade urbana a ser mais inclusiva, eficiente e menos poluente no ambiente construído.

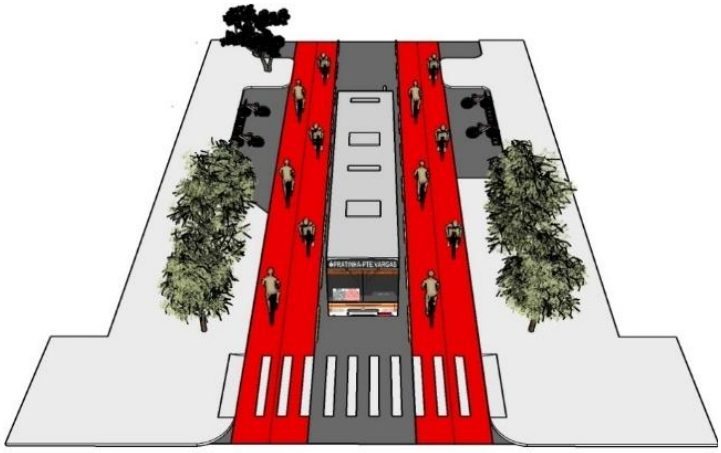


Figura 4: Cenário “D”.
Fonte: Os autores (2025).

Neste cenário, com vias exclusivas para mobilidade ativa e transporte coletivo, o volume total de 2.280 veículos/dia. Em um contexto de um cenário ideal, as estratégias de adaptação das infraestruturas de acessos são àquelas que provê baixas emissões de poluentes atmosféricos, onde, o maior emissor será um transporte coletivo. Em relação ao cenário "D", o total da concentração atmosférica tem 0,22kg NO_x-eq/dia, 0,09kg $PM_{2.5}$-eq/dia e 0,13kg SO_2-eq/dia demonstrado na Tabela 5.

Tipo de Transporte	Volume (veículos/dia)	Saúde Humana		
		kg NO_x-eq/dia	kg $PM_{2.5}$-eq/dia	kg SO2-eq/dia
Ônibus (elétrico)	960	0,16	0,03	0,07
Bicicleta (elétrica)	600	0,06	0,06	0,06
Bicicleta	720	0,00	0,00	0,00
TOTAL	**2.280**	**0,22**	**0,09**	**0,13**

Tabela 5: Concentração atmosférica por tipo de transporte cenário "D".
Fonte: Os autores (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em uma comparação empírica onde o cenário "A" como principal modelo de concentração atmosférico dos indicadores do NO_x-eq/dia, $PM_{2.5}$-eq/dia e SO_2-eq/dia, o cenário "D" em sua padronização de vias exclusivas para a mobilidade ativa e transporte coletivo detêm a menor taxa de concentração direta ao impacto da saúde humana. No cenário "B", em uma modelagem com transportes motorizados e elétricos, fica claro que, eletrificar os transportes, muitas vezes pensados como uma solução sustentável se torna uma tarefa complexa numa perspectiva de curto e médio prazo. Em uma avaliação, as concentrações do NOx-eq/dia (107%), $PM_{2.5}$-eq/dia (112%) e SO_2-eq/dia (113%) são maiores que o cenário "A" e ao cenário "C" que, ao introduzir a mobilidade ativa (bicicleta) com adaptações das infraestruturas de acessos, nota-se uma redução de 20% no NOx-eq/dia, 40% do $PM_{2.5}$-eq/dia e 38% em SO_2-eq/dia, detalhado na Figura 6.

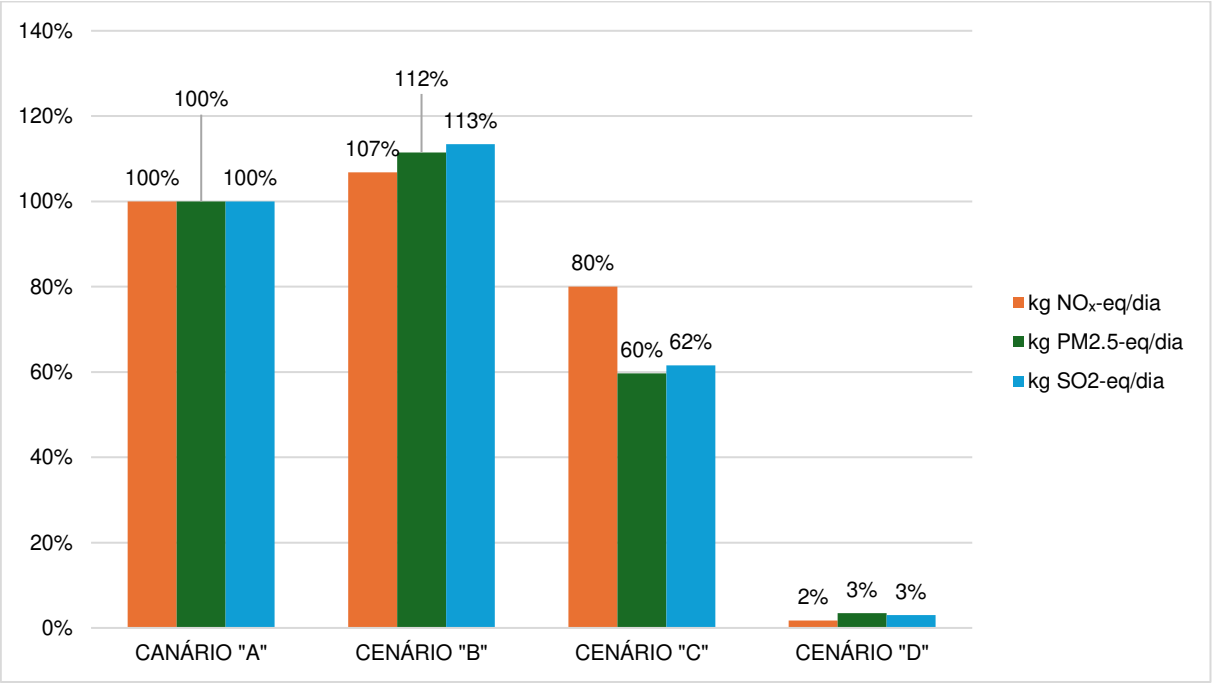


Figura 5: Comparativo dos cenários modelos em relação aos diferentes indicadores.
Fonte: Os autores (2025).

5. CONCLUSÕES

Em uma comparação dos quatros cenários modelos, o cenário “D” tem a menor porcentagem das concentrações atmosféricas, entre 2-3% nas métricas NOx-eq/dia, PM2.5-eq/dia e SO2-eq/dia ao impacto da saúde humana em relação ao cenário “A”, onde prioriza os transportes motorizados com uso de combustíveis fósseis (poluentes). No cenário “B”, em sua distribuição de veículos à combustão e elétricos, apresentou um aumento de 7-13% em todas as métricas ao comparar com o cenário “A”, onde, neste parâmetro, a eletrificação dos transportes não reduz as concentrações atmosféricas em um ciclo de vida útil dos transportes urbanos. Em contrapartida, com a implementação das vias exclusivas para a bicicleta convencional, principal transporte da mobilidade ativa, obteve uma redução entre 20-40% dos totais das concentrações atmosféricas aos indicadores ao impacto da saúde humana.

Ao analisar dos quatro cenários, percebe-se a importância da mobilidade ativa para a redução dos impactos, em específico em relação à saúde humana devido à ausência do consumo de combustíveis fosseis, reforçando a sua importância como uma mobilidade sustentável. Enquanto a mobilidade elétrica pode aumentar alguns indicadores de impacto, equiparando até os transportes motorizados, além de depender principalmente da matriz de eletricidade considerada na modelagem.

O artigo apresenta a etapa inicial da pesquisa de doutorado, onde, os cenários modelos para redução dos indicados dos impactos ambientais precisam ser completados com dados em outras etapas do ciclo de vida, onde serão avaliados com novas unidades de medidas, incluindo a quantificação dos GEEs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYDIN, N.; SEKER, S.; ÖZKAN, B. Planning location of mobility hub for sustainable urban mobility. **Sustainable Cities and Society**, v. 81, p. 103843, 2022.

ECOINVENT. **Ecoinvent Data Base Version 3.8**. Data Cut: Ecoinvent 3.8, 2021. Disponível em: https://ecoinvent.org/ecoinvent.org Acesso: 12 ago. 2024

IEA - Internacional Energy Agency. **World Energy Outlook**. Paris, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023. Acesso em: 20 abr. 2025.

IPCC WORKING GROUP III. **Climate change 2014: mitigation of climate change: working group III contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge University Press, 2014.

TOLEDO, A. L. L.; LA ROVERE, E. L. Urban Mobility and Greenhouse Gas Emissions: Status, Public Policies, and Scenarios in a Developing Economy City, Natal, Brazil. **Sustainability**, v. 10, n. 11, p. 3995, 2018.

XU, L.; TAYLOR, J. E.; TIEN, I. Assessing the impacts of air quality alerts on micromobility transportation usage behaviors. **Sustainable Cities and Society**, v. 84, p. 104025, 2022.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Inheriting a sustainable world? Atlas on children’s health and the environment**. World Health Organization, 2017.

AGRADECIMENTOS

Este artigo foi produzido com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.