

# Avaliação da dispersão de monóxido de carbono (CO) proveniente de veículos automotivos em região de alto fluxo veicular no Recife, Brasil

Fernando Leite Nunes da Costa<sup>1\*</sup> , Glauber Lopes Mariano<sup>2</sup> , Marilda Nascimento Carvalho<sup>1</sup> , Regina Coeli Lima<sup>1</sup> 

1 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Recife-PE. Av. Dom Manuel de Medeiros, S/N – Dois Irmãos – CEP: 52171-900 – Recife-PE.

2 Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – Maceió - AL. Av. Lourival Melo Mota, S/N – Tabuleiro do Martins – CEP: 57072-900 – Maceió – AL.

\*Autor para correspondência: [nandoleite28@hotmail.com](mailto:nandoleite28@hotmail.com)

Recebido em 22 de agosto de 2023.

Aceito em 12 de fevereiro de 2024.

Publicado em 8 de março de 2024.

**Resumo** - A poluição do ar, decorrente da combustão de matrizes fósseis, representa uma ameaça global à saúde pública, sendo os veículos motorizados destacados como principais emissores em áreas urbanas. O monóxido de carbono (CO), resultante da queima incompleta desses combustíveis, é inodoro e incolor, apresentando riscos à saúde e ao meio ambiente. A exposição a níveis elevados de CO pode causar sintomas de envenenamento e levar à morte. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo investigar, por meio de simulações com o modelo HYSPLIT, a dispersão das emissões veiculares de CO e as trajetórias (*forward trajectories*) do vento em um trecho urbano de alto fluxo veicular em Recife no mês de outubro de 2021. Os resultados indicam altas concentrações de CO próximas ao local investigado, especialmente durante a madrugada (0h às 8h), com menor dispersão nesse período, mas dentro dos limites estabelecidos pelo Conama 491/2018. Notavelmente, 83% dos ventos possuem direção predominante de sudeste, contribuindo para uma dispersão maior durante o horário diurno e afetando áreas mais extensas.

**Palavras-chave:** Poluição do ar. Emissões veiculares. HYSPLIT. Ambiente urbano.

## Evaluation of the dispersion of carbon monoxide (CO) emitted from automotive vehicles in a high-traffic region in Recife, Brazil

**Abstract** - Air pollution resulting from the combustion of fossil fuels poses a global threat to public health, with motorized vehicles identified as major contributors in urban areas. Carbon monoxide (CO), a byproduct of incomplete combustion of these fuels, is odorless and colorless, posing risks to both health and the environment. Exposure to elevated levels of CO can lead to symptoms of poisoning and even death. In this context, the present study aimed to investigate, through simulations

using the HYSPLIT model, the dispersion of vehicular CO emissions and the trajectories (forward trajectories) of wind in a high-traffic urban section in Recife during October 2021. The results indicate high concentrations of CO near the investigated site, especially during the early morning hours (0h to 8h), with lower dispersion during this period but within the limits established by Conama 491/2018. Remarkably, 83% of the winds exhibit a predominant southeast direction, contributing to greater dispersion during daylight hours and affecting larger areas.

**Keywords:** Air pollution. Vehicle emissions. HYSPLIT. Urban environment.

## **Evaluación de la dispersión de monóxido de carbono (CO) proveniente de vehículos automotores en una región de alto flujo vehicular en Recife, Brasil**

**Resumen** - La contaminación del aire resultante de la combustión de combustibles fósiles representa una amenaza global para la salud pública, siendo los vehículos motorizados identificados como principales emisores en áreas urbanas. El monóxido de carbono (CO), un subproducto de la combustión incompleta de estos combustibles, es inodoro e incoloro, presentando riesgos tanto para la salud como para el medio ambiente. La exposición a niveles elevados de CO puede causar síntomas de envenenamiento e incluso la muerte. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo investigar, mediante simulaciones con el modelo HYSPLIT, la dispersión de las emisiones vehiculares de CO y las trayectorias (forward trajectories) del viento en un tramo urbano de alto flujo vehicular en Recife durante octubre de 2021. Los resultados indican altas concentraciones de CO cerca del sitio investigado, especialmente durante las primeras horas de la mañana (de 0h a 8h), con una menor dispersión durante este período pero dentro de los límites establecidos por el Conama 491/2018. Notablemente, el 83% de los vientos tienen una dirección predominante del sureste, contribuyendo a una mayor dispersión durante las horas diurnas y afectando áreas más extensas.

**Palabras clave:** Contaminación del aire. Emisiones vehiculares. HYSPLIT. Entorno urbano.

## **Introdução**

A poluição do ar é um assunto de relevância global, devido aos impactos adversos que podem causar nos receptores, seres humanos, ecossistemas, fauna, flora etc. (Ceratti *et al.* 2018). Dessa forma, com a urbanização das cidades, as emissões veiculares tornaram-se uma fonte crítica de poluição do ar nas áreas metropolitanas. Além disso, as emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis dos veículos são reconhecidos como os principais precursores do ozônio e dos aerossóis orgânicos secundários em áreas metropolitanas (Tsai *et al.* 2021).

Dentre os poluentes atmosféricos mais estudados, destaca-se o monóxido de carbono (CO), que possui origem tanto pelas fontes naturais, como atividades vulcânicas e emissões de gás natural, quanto por fontes antropogênicas, como resultado da queima incompleta de combustíveis fósseis, emissões veiculares e industriais, queima de biomassa e tabaco (cigarro) (CETESB 2022). Esse poluente é tóxico para os seres humanos porque sua molécula é relativamente pequena e facilmente disposta a entrar

nos sistemas respiratórios, forçando o oxigênio fora dos glóbulos vermelhos e impedir a oxigenação dos tecidos (Reichert 2017).

A exposição prolongada a altos níveis de concentração de CO pode causar problemas respiratórios e cardíacos, disfunção cerebral e até a morte (Reichert 2017). Assim, o monóxido de carbono também é um poluente que pode ser tanto nocivo para o meio ambiente quanto para a saúde pública, pois sua presença pode afetar a qualidade do ar e agravar os casos de doenças respiratórias.

O monitoramento das concentrações das emissões atmosféricas de poluentes, principalmente de fonte veicular, é imprescindível, uma vez que coleta e gera informações das concentrações dos poluentes atmosféricos, habilita tomadas de decisões com vistas ao planejamento de ações, além de fornecer informações para propostas de políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar (WHO 2016).

Segundo Vormittag *et al* (2021), o Brasil tem 430 estações de monitoramento. Dessas, apenas 371 estão em atividade. Nos Estados Unidos, contudo, a quantificação do Sistema de Qualidade do Ar chega ao número de 5.000 estações ativas (EPA 2020). Isso representa 1247% de estações de monitoramento a mais em comparação com a realidade brasileira. Além disso, a grande maioria das estações brasileiras concentra-se na Região Sudeste (80,3%) e, a menor parte, na Região Nordeste (1,1%) (Vormittag *et al*. 2021).

No Estado de Pernambuco, em 2023 existem listadas seis estações de monitoramento da qualidade do ar e nenhuma delas se localiza no Município do Recife, capital do Estado. No mais, dessas seis estações de monitoramento existentes, somente cinco estão atualmente ativas. Quatro delas instaladas no Município de Ipojuca (estações de Ipojuca, Ed. Cupe, SUAPE, IFPE), e uma no Município de Cabo de Santo Agostinho (Estação CPRH) (CPRH 2023).

No Estado de Pernambuco, mais precisamente em sua capital, Recife, de acordo com o Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco - DETRAN-PE (2021), a frota veicular passou de 199.398 veículos em 1990 para 717.619 em 2021, resultando em 518.221 veículos a mais na cidade no período de 31 anos, um aumento de 259,89%. Assim, de acordo com Nascimento-Silva e Souza (2019), o aumento anual de veículos acarreta crescimento nas concentrações de poluentes, contribuindo para a injeção de gases tóxicos na cidade e acarretando no comprometimento da qualidade do ar da região.

Diante disso, surge a problemática da busca por determinar os níveis de poluição, principalmente quando há ausência de estação de monitoramento de qualidade do ar. Nesse aspecto, uma das alternativas que podem ser usadas para investigar se a concentração de poluentes está dentro dos limites permitidos por lei é a modelagem da dispersão atmosférica, ferramenta amplamente utilizada na gestão de efluentes gasosos e de qualidade do ar. O seu uso tem sido muito útil para avaliar a forma como as emissões afetam a qualidade do ar, a fim de determinar se mais medidas de controle devem ser implementadas, notabilizando-se como uma ferramenta importante para as entidades reguladoras e constituindo-se como uma das melhores técnicas de avaliação da qualidade do ar (Silva 2013).

A modelagem é um mecanismo amplamente utilizado na elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e nos Relatórios de Impacto de Ambiental (RIMA), conforme prevê a legislação ambiental brasileira (Derisio 2016).

O modelo HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) é um sistema de modelagem de cálculo em tempo real e análise de fontes de transporte em relação a uma variedade de poluentes físicos atmosféricos. É um modelo capaz de calcular trajetórias simples, bem como simulações complexas de transporte, dispersão, transformação química e deposição de poluentes atmosféricos, podendo tratar simultaneamente processos múltiplos de transportes atmosféricos e

físicos, campos de entrada meteorológicos variados e fontes de emissão com diferentes categorias (Ma *et al.* 2021).

Algumas das aplicações do HYSPLIT incluem análise de trajetória para determinar a origem das massas de ar e estabelecer relações fonte-receptor. Ele lida também com rastreamento e previsão da liberação de material radioativo, fumaça de incêndio florestal, poeira soprada pelo vento, poluentes de várias fontes de emissão estacionárias e móveis, alérgenos e cinzas vulcânicas (Cheol *et al.* 2020).

Iriart e Fisch (2016), por exemplo, usaram o HYSPLIT para simular a dispersão do monóxido de carbono (CO) de um Veículo Lançador de Satélite (VLS) emitido do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) no Estado do Maranhão. Os resultados mostraram que as concentrações eram mais intensas próximas das localidades da fonte simulada e, assim, concluíram que o funcionamento desse veículo deveria ocorrer em períodos com maiores intensidades de ventos, para uma maior eficácia da dispersão dos poluentes. Outra observação dessa pesquisa diz respeito ao fato de que, nos períodos noturno e chuvoso, a dispersão demorava mais em comparação ao período diurno e seco.

Chulde Llive (2019) também fez uso do HYSPLIT para simular a dispersão do monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênios (NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP) na cidade de San Gabriel, Província de Carchi, Equador. A fonte das emissões foram veículos automotores investigados em zonas como norte, centro e sul da cidade. Por meio das simulações foi possível observar a diminuição da concentração dos poluentes com o distanciamento da fonte de emissão. Outra parte dessa pesquisa inquiriu pessoas que sofrem com possíveis doenças ocasionadas pela poluição, correlacionando os resultados encontrados à população atingida pelas plumas dos poluentes. Assim, nesses grupos pesquisados, dentro dos limites da área total investigada, 18% das pessoas são acometidas por faringite, 33% por pneumonia, 41% por amigdalite e 8% não sofrem de nenhuma doença.

Desse modo, devido à diversidade de utilização e constante atualização, o HYSPLIT foi o modelo de dispersão de transporte atmosférico empregado nesta pesquisa, que teve como objetivo analisar, por meio de simulações, a dispersão das emissões veiculares de CO (monóxido de carbono) e a trajetória (*forward trajectories*) do vento em um ponto de alto tráfego veicular na Avenida Agamenon Magalhães, região urbana na cidade do Recife. Para isso, além do uso do modelo HYSPLIT, foram utilizados dados meteorológicos do INMET (2021), do inventário de emissões veiculares e dos padrões estabelecido pelo CONAMA nº 491 (2018).

## Material e métodos

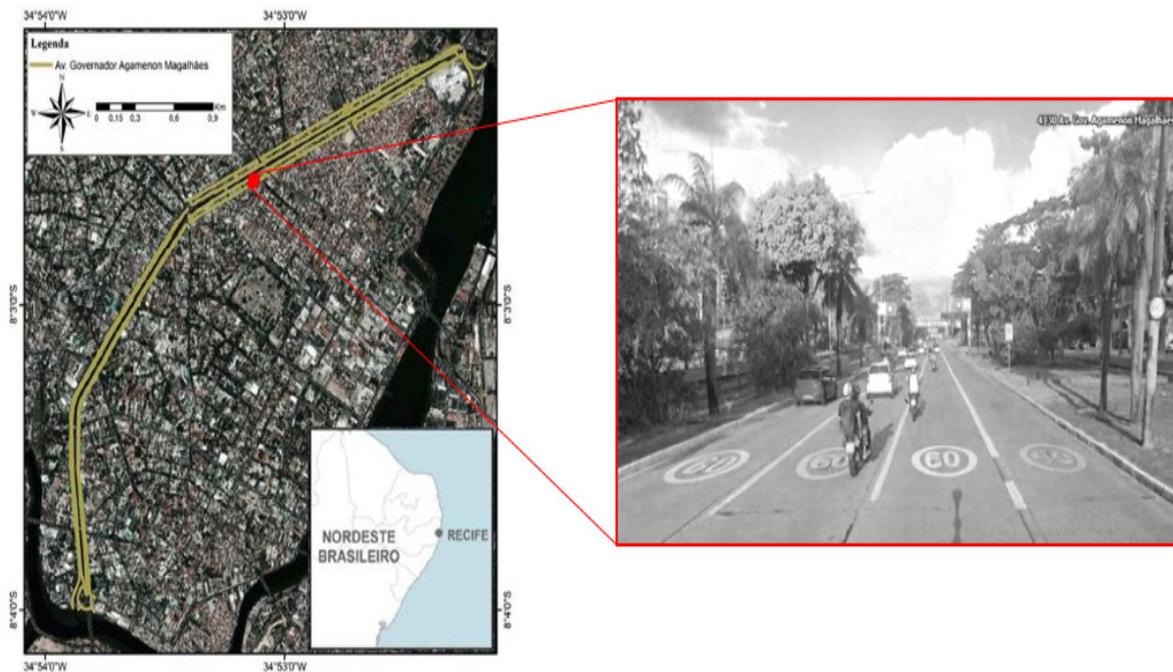
### Área de estudo

Recife está localizada na latitude 8°03'19" sul e na longitude 34°52'15" oeste. Possui altitude média de 7 metros em relação ao nível do mar (Nascimento *et al.* 2013). De acordo com dados obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2021), da estação automática (código - A301), a média anual de 2021 para a precipitação, a velocidade do vento e a temperatura foram, respectivamente, de 221,58 mm, 1,37 m/s e 25,67 °C.

O local adotado na simulação das emissões do monóxido de carbono (CO) fica no trecho de alto fluxo veicular na Avenida Agamenon Magalhães, latitude 8°02'35,47" sul e longitude 34°53'9,13" oeste (Figura 1). Essa avenida urbana é uma das mais importantes da cidade, já que serve de eixo de ligação entre os bairros do Recife e a cidade de Olinda, facilitando o acesso para o aeroporto da cidade (Cabral *et al.* 2021). Além disso, os dados quantitativos de veículos circulantes monitorados pelos radares

eletrônicos na Avenida Agamenon Magalhães mostram ser esse o trecho com maior fluxo veicular da via, pois ali transitaram 12.859.103 veículos no ano de 2021 (DETRAN 2021).

**Figura 1.** Localização do trecho de estudo.



**Fonte:** Adaptada de NE 10 (2018) apud Cabral et al. (2021); Google Earth (2023).

## Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de 2021 e utilizados para dois momentos. O primeiro, com vistas a observar os meses de 2021 (Tabela 1), mais favoráveis à concentração da poluição, e o segundo, para análise das condições do tempo durante as simulações e também como comparativo das simulações da dispersão no HYSPLIT.

**Tabela 1.** Precipitação, velocidade média do vento e temperatura média (mensais em 2021).

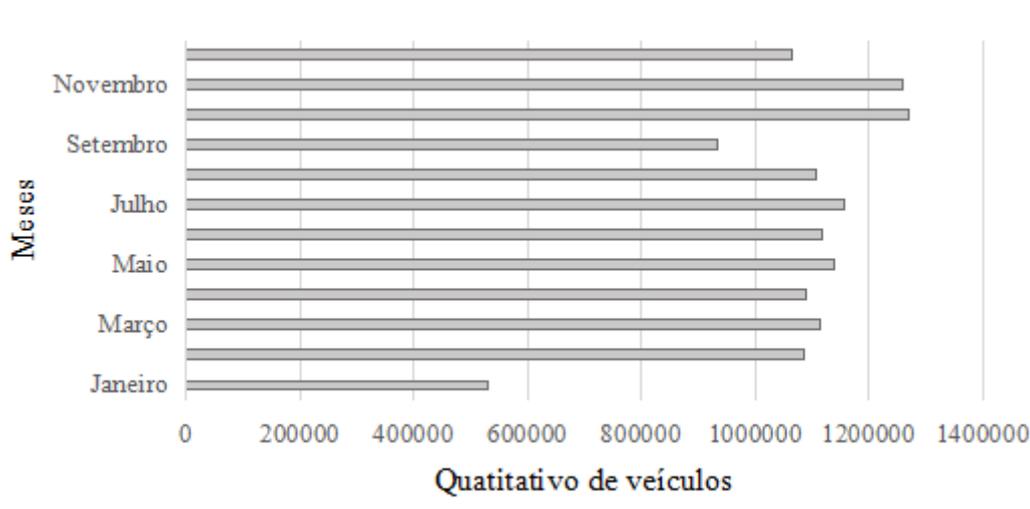
Mês (do ano 2021)	Precipitação total (mm)	Velocidade média (vento)(m/s)	Temperatura média (°C)
Janeiro	54,80	1,72	27,16
Fevereiro	119,80	1,58	27,32
Março	222,20	1,31	26,69
Abril	420,00	1,08	26,03
Mai	535,40	1,08	25,11
Junho	193,80	1,08	24,22
Julho	264,60	1,19	24,13
Agosto	309,00	1,52	24,02

Setembro	50,00	1,56	25,48
Outubro	46,20	1,55	26,55
Novembro	Null <sup>1</sup>	Null <sup>1</sup>	Null <sup>1</sup>
Dezembro	Null <sup>1</sup>	Null <sup>1</sup>	Null <sup>1</sup>
Média anual <sup>2</sup>	221,58	1,37	25,67

**Fonte:** Adaptado de INMET (2021). <sup>1</sup>Sem dados disponíveis. <sup>2</sup>A média anual foi calculada excluídos os meses que não tiveram dados.

No primeiro momento, a escolha do mês de outubro para as simulações realizadas ocorreu em razão deste possuir maior fluxo de veículos (Figura 2) e ter situação meteorológica que contribui para o aumento das concentrações, ou seja, menor precipitação total mensal e temperatura média acima da média anual (Tabela 1), o período mais seco.

**Figura 2.** Total de veículos circulante na Av. Agamenon Magalhães no sentido Olinda - 2021.



Já no segundo momento, para efeito de comparativo com o modelo HYSPLIT, elaborou-se a rosa dos ventos com auxílios da base meteorológica do INMET e do software WRPLOT. Os dados meteorológicos, do mês de outubro 2021, necessários para a construção da rosa dos ventos tiveram a velocidade ( $m.s^{-1}$ ) e a direção do vento ( $^{\circ}$ ) como parâmetros. Esses dados foram fornecidos pela estação meteorológica automática de Recife (A301), que se encontra a uma latitude de  $-8^{\circ} 03' 32,93''$  Sul, longitude  $-34^{\circ} 57' 32,97''$  Oeste, altitude de 11,3 metros e a cerca de 8,3 km de distância em linha reta do ponto investigado. Para este estudo, foram utilizados cálculos de medição horária para cada parâmetro meteorológicos INMET (2021).

No mais, os dados referentes a velocidade ( $m.s^{-1}$ ) e a direção do vento ( $^{\circ}$ ) foram aplicados no programa WRPLOT, o qual resultou na rosa dos ventos e no histograma das velocidades do vento.

### Estimativas das emissões veiculares

Para a estimativa das emissões veiculares, usou-se o trabalho do inventário de emissões veiculares realizado por Costa *et al.* (2023). Nesse trabalho, estimou-se o quantitativo de alguns poluentes emitidos

por veículos que circularam no ponto de alto tráfego veicular na Avenida Agamenon Magalhães, Recife -PE. A metodologia empregada foi a do tipo *bottom-up*, a qual se utilizou da quantidade da frota veicular (distribuída por categorias), distância percorrida e fatores de emissões dos veículos.

A estimativa da quantidade de poluentes emitidos, conforme equação (1), foi obtida utilizando informações locais, requerendo dados específicos como frotas registradas de veículos no Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (DETRAN 2021) e dados de radares eletrônicos (Recife 2021), com vistas à obtenção da quantidade de carros circulantes, distância percorrida no local do estudo (Google 2023) e fatores de emissões (Cancelli; Dias 2014). Dessa forma, de posse dos dados, foi possível aplicá-los matematicamente e gerar os resultados da quantidade de poluentes emitidos, conforme a equação (1) abaixo:

$$E_{linha,i} = Fr_{,j} \times (F_{,e} i/1000) \times L \quad (1)$$

Ademais, representa a emissão veicular do trecho de interesse para o poluente fator de emissão do poluente ( $g.km^{-1}$ ); número total de veículos da classe que circulam na via de interesse durante um período de tempo; comprimento total da via (km) e corresponde ao fator de conversão de g para kg.

## Modelo HYSPLIT

O modelo HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) foi utilizado para simular as dispersões de emissões veiculares e as trajetórias dos ventos. Esse modelo é um dos mais utilizados e citados em ciências atmosféricas (Stein et al. 2015). Conforme Zhou et al. (2017), o modelo funciona como cálculo em tempo real, fazendo uma análise razoável de fontes de transporte relativas a uma variedade de poluentes físicos na atmosfera que, no caso da pesquisa, centrou-se no monóxido de carbono (CO). O HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) foi desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) em conjunto com a *Australia Weather Bureau* (Draxler e Hess 1998; Duarte 2016 e Ma et al. 2021).

Para a simulação da dispersão do poluente (CO), usou-se a versão *online*, acessada em <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/dispsrvc.pl>. Já para as trajetórias, utilizou-se a versão disponibilizada para *download*, que melhor se aplicou para demonstrar o resultado das simulações com os agrupamentos proporcional das trajetórias dos ventos. Contudo, a versão *online*, segundo Stein et al. (2015), só difere da disponibilizada para *download* em relação as interfaces disponíveis. Os executáveis são os mesmos.

## Dispersão de emissões veiculares

Para as simulações de dispersão do monóxido de carbono (CO) no ponto da via da Agamenon Magalhães com intenso fluxo veicular, nos dados de entrada, para o tipo de lançamento, utilizou-se a opção (massa genérica menor de 24h), já que as simulações da dispersão foram desenvolvidas de forma diária. Nesse sentido, a quantidade de emissões inventariada (em massa) foi acrescentada diariamente ao modelo. Já para a meteorologia, usou-se os dados globais (GFS) com resolução de 0,25 grau para o mês de outubro de 2021.

No que confere aos locais de partida das emissões, usou-se as coordenadas do local de alto fluxo veicular da Av. Agamenon Magalhães, certificadas por radar de aferição de velocidades de veículos circulantes (latitude 8°02'35,47" sul e longitude 34°53'9,13" oeste).

Para o detalhamento das execuções do HYSPLIT, os parâmetros, utilizados de forma igual em todas as simulações a serem inseridos no programa (termo de origem), são: direção da dispersão (para frente) e intervalo de emissão dos poluentes (na parte inferior, adotou-se a medida de 7m (Nascimento *et al.*, 2013) que correspondente a altitude média de Recife em relação ao nível do mar). Na parte superior de lançamento, somou-se essa altitude média com 2,3m, que é a altura média dos carros (Brandão 2021), totalizando 9,3m. A duração de lançamento foi de 24h, ou seja, observou-se diariamente as emissões.

Ainda no que se refere à execução, a duração total foi de 24h (simulada diariamente), subdividida em 3 períodos de 8 horas de intervalo de saída para cada um dos 31 dias de outubro (de 0:00 h até 8:00h, de 8h até 16h e de 16h até 0h). A partir desse intervalo, foi possível comparar os resultados com padrões para a média de 8h do CONAMA nº 491/2018. Nesse sentido, a Resolução nº 491 (2018) estabelece o padrão final para o CO que, numa análise média de 8h, não pode exceder concentração de 9 ppm (partes por milhão) por mais de uma vez no período máximo de um ano, sendo esta equivalente a 10,31 mg/m<sup>3</sup>.

Além disso, para o topo da camada média, utilizou-se o padrão sugerido pelo HYSPLIT (100 metros). Ademais, as horas no modelo HYSPLIT seguem o sistema UTC (*Coordinated Universal Time*) que, no caso das simulações em Recife, para a conversão do horário local, precisou-se diminuir 3h do horário no modelo.

No que confere aos parâmetros utilizados para cada uma modelagem, ou seja, variáveis dos dados a serem inseridos no HYSPLIT, foram utilizados os arquivos meteorológicos (de 01 a 31 de outubro de 2021) e a quantidade de liberação (dados das estimativas de emissões veiculares de CO em quilograma).

## Trajetórias do vento

As simulações realizadas para verificação da trajetória dos ventos foram feitas com simulações de trajetórias para frente (*forward trajectories*). O local das simulações foi o das coordenadas: latitude -8,043186 sul, longitude -34,885869 oeste e altitude de 9,3 metros.

Ademais, foram utilizados os dados meteorológicos globais (GDAS) do mês de outubro de 2021, com resolução de 1 grau. Esses arquivos meteorológicos dispõem de dados em formato semanal, que vão do ano de 2005 até os dias mais recentes. Além disso, para o modelo das trajetórias, utilizou-se o tempo de execução de 4h a partir da hora simulada. O agrupamento dos dados de trajetória a cada 4 horas foi obtido para identificação das principais áreas afetadas pela dispersão a partir do ponto analisado.

Com o intuito de facilitar a análise das trajetórias do fluxo aéreo, fez-se uma análise de todas as faixas que afetam o local, agrupando-as e dividindo-as em 5 trajetórias únicas (*cluster*). Assim, essas cinco trajetórias (*cluster*) funcionam como vetores resultantes das direções dos ventos.

De acordo com Tian *et al.* (2020), nas simulações, as trajetórias com maior similaridade espacial são fundidas conforme a direção de transmissão e a velocidade de cada fluxo de ar. Assim, a escolha dos parâmetros de agrupamentos para as simulações foi feita a fim de facilitar a análise da trajetória dos ventos, de modo a não causar a saturação visual pela sobreposição de trajetórias.

## Resultados e Discussão

### Inventário do monóxido de carbono (CO)

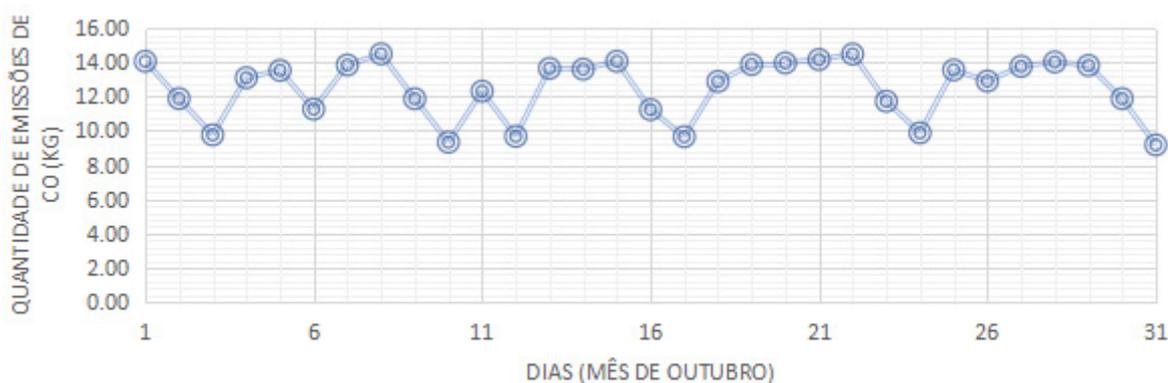
Os dados do inventário de Costa *et al.* (2023) (submetido à publicação) mostraram que a quantidade de emissões no ano de 2021, no trecho analisado, foi de cerca de 3.922,03 kg de CO, 831,98 kg de NO<sub>x</sub>, 14,66kg de RCHO, 2.913,87 kg de NMHC, 279,04 kg de CH<sub>4</sub>, 87,06kg de MP e de 603.743,89 kg de CO<sub>2</sub>. Contudo, outubro foi o mês com maiores emissões veiculares no trecho de maior fluxo veicular da Av. Agamenon Magalhães (via urbana), com valores próximos a 387,43 kg de CO, 82,12 kg de NO<sub>x</sub>, 1,45 kg de RCHO, 287,84 kg de NMHC, 27,56 kg de CH<sub>4</sub>, 8,60 kg de MP e 59.638,52 kg de CO<sub>2</sub>.

Dentre esses poluentes, o monóxido de carbono (CO), objeto da investigação, é um dos importantes precursores do *smog* fotoquímico, quando em condições meteorológicas favoráveis como maiores radiações solares e temperatura. No mais, ele é um dos poluentes principais em ambiente urbano, gerado por combustão incompleta de veículos automotores (Ma *et al.* 2021).

Os resultados do inventário de emissões veiculares pelos veículos automotores para o ano de 2021 mostraram ainda que o monóxido de carbono foi um dos poluentes mais emitidos. Esse resultado converge com os dados divulgados pela CETESB (2021), os quais afirmam que os veículos na Região Metropolitana de São Paulo foram responsáveis por 95% das emissões de monóxido de carbono (CO).

Nesse sentido, os dados quantitativos das emissões de monóxido de carbono (CO) nas modelagens das dispersões foram os diários do mês de outubro de 2021, conforme Figura 3.

**Figura 3.** Quantidades de emissões veiculares inventariada de monóxido de carbono (CO) no trecho de alto fluxo veicular em outubro de 2021.

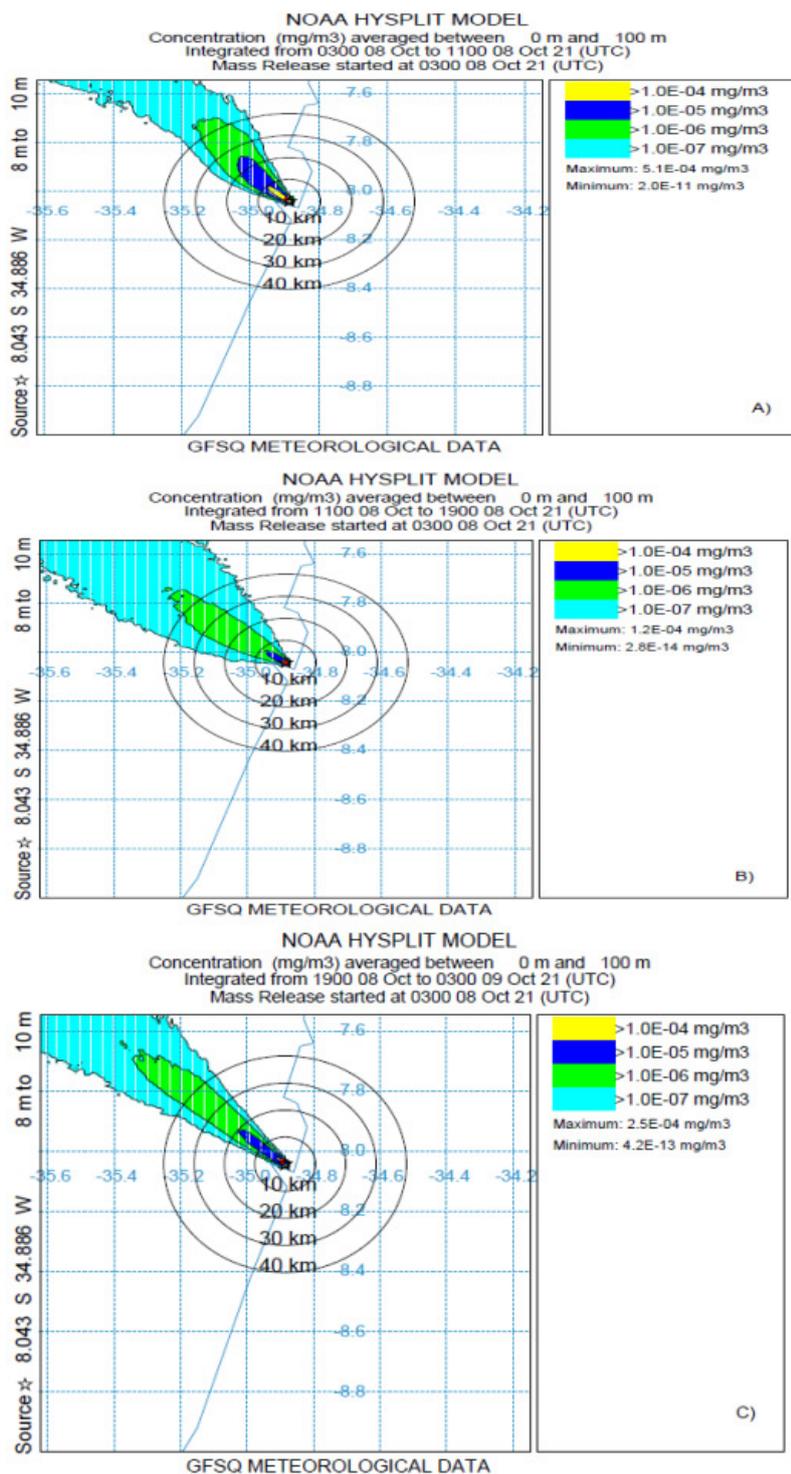


### Modelagem da dispersão do monóxido de carbono

As simulações realizadas para verificação das dispersões do monóxido de carbono que são emitidas do ponto de alto tráfego veicular na Av. Agamenon Magalhães em outubro de 2021 foram realizadas diariamente. A partir das informações geradas, foi possível depreender que, em relação as plumas, as áreas com maiores concentrações podem ser visualizadas na região a noroeste do ponto selecionado como fonte de emissão (figura 4). As concentrações máximas obtidas, conforme a legenda das figuras apresentadas, podem ser visualizadas sempre como plumas amarelas. O pico ocorreu no dia 08 (Figura 4a), em que a máxima concentração para essa pluma foi de  $5,1 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3$ , observado no período de referência de 0h às 8h.

Já as plumas azuis mostram uma dispersão maior da poluição em comparação às amarelas. Com isso, os valores da poluição tendem a diminuir de concentração. Nesse sentido, no dia 08, nas 24h, as concentrações mostraram valores próximos a  $1,0 \times 10^{-5} \text{ mg/m}^3$ . Conseqüentemente, as demais plumas (verde e azul-claro) sofreram o mesmo processo de dispersão e diminuição das concentrações. Nesse aspecto, a menor concentração foi observada nas plumas azul-claro, ocorrida no período das 8h às 16h.

**Figura 4.** Simulação da dispersão/concentração num período de 24h do dia (08-10-2021), pelo modelo HYSPLIT do metano (CO) em  $\text{mg/m}^3$  dividido em três períodos de 8h. a) período de 3 à 11 UTC (0h - 8h); b) período de 11 à 19 UTC (8h -16h); c) período de 19 à 3 UTC (16h -0h).

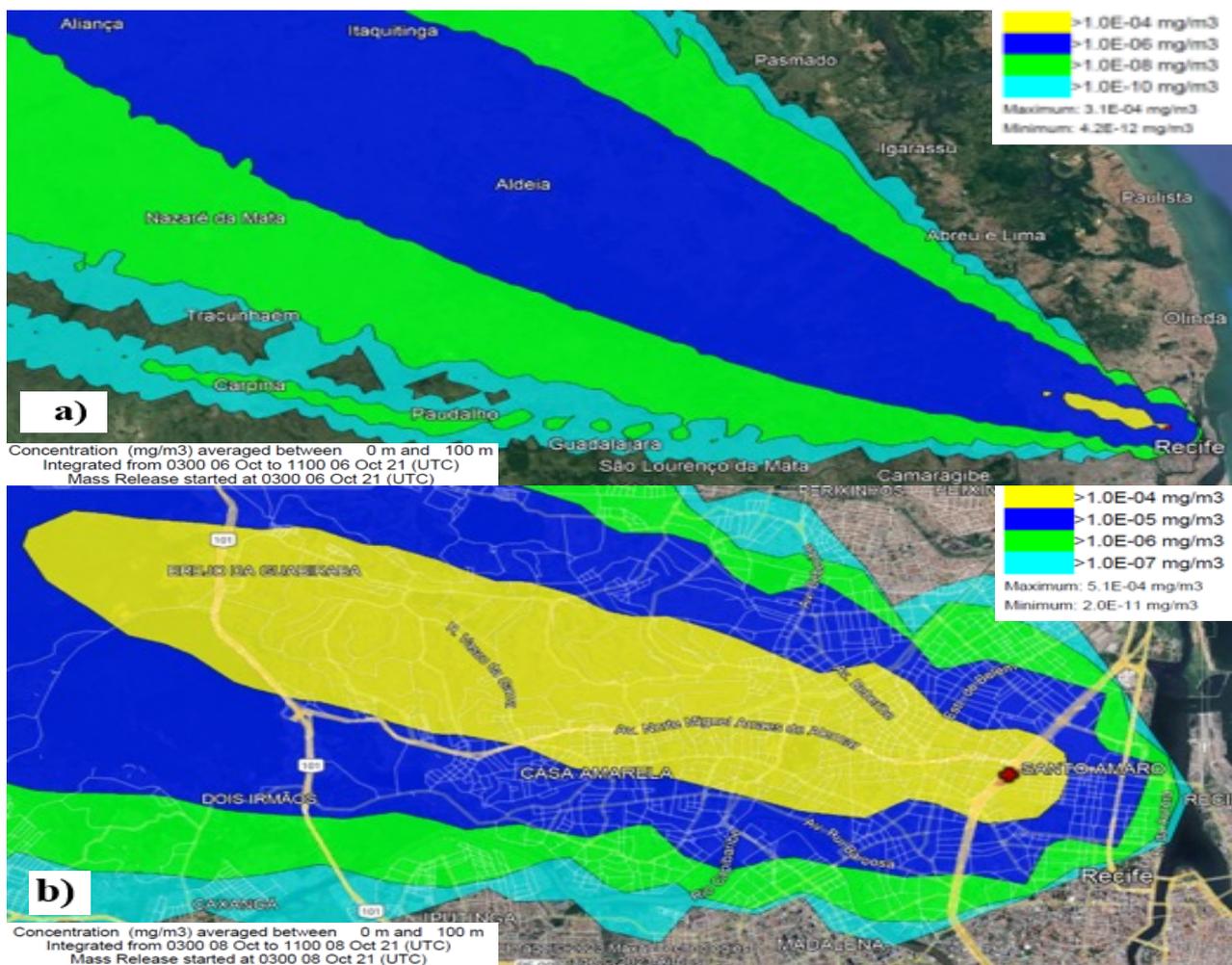


Ainda no que confere ao caso das plumas, é importante salientar que as amarelas, indicativas de maiores concentrações de poluentes, tiveram seus maiores alcances sempre abaixo ou igual ao raio de 10 km de distância da emissão nos períodos de 0h às 8h. Elas chegaram a atingir bairros, como Brejo da Guabiraba, Macaxeira, entre outros bairros mais próximos da fonte de emissão (Figura 5).

No que se refere ao alcance das plumas azuis, que indicam concentrações intermediárias entre a amarela e a verde, a maior parte ficou abaixo de 30km independentemente do horário. No entanto, nos dias 6 e 17, elas atingiram mais de 40km, tanto no período de 0h às 8h quanto de 8h às 16h. O alcance maior dessas plumas chega a ultrapassar cidades da Região Metropolitana, como Camaragibe e São Lourenço da Mata. Elas perpassam pelos interiores da Zona da Mata pernambucana, como no caso dos municípios de Itaquianga e Aliança (Figura 5).

No caso das plumas verdes, que apresentam as menores concentrações de poluentes, quase a totalidade do seu alcance ficou acima de 40km, acompanhando as mesmas dispersões das plumas azuis, porém com distâncias ainda maiores.

**Figura 5.** Simulação do monóxido de carbono (CO) e observação do alcance das plumas (outubro de 2021). a) maior alcance da pluma azul - dia 06. b) maior alcance da pluma amarela - dia 08.

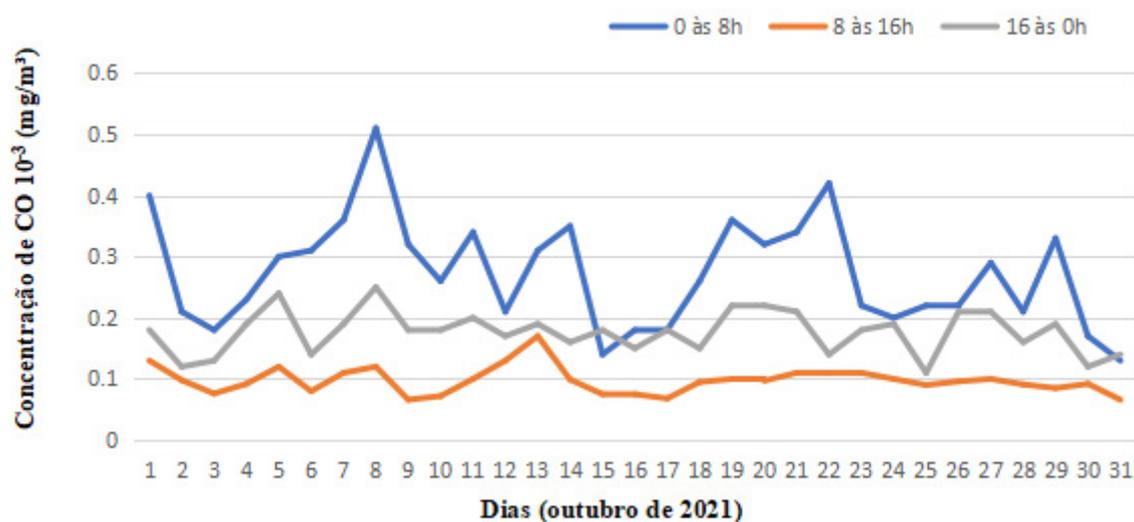


Ademais, no que confere às máximas concentrações do monóxido de carbono (CO) da modelagem da dispersão obtidas no mês de outubro, para fins de comparação da qualidade do ar, utilizou-se os padrões estabelecidos pelo CONAMA nº 491 (2018).

Nesse sentido, o CONAMA nº 491 (2018) estabelece como padrão final para o CO 9 ppm (equivalente a 10,31 mg/m<sup>3</sup>). Sobre o padrão final do CO, a CETESB (2021) acrescenta que ele é definido por estudo científico, visando à preservação da saúde da sociedade em associação aos possíveis transtornos causados pela poluição do ar.

Nesse viés, a Figura 6 apresenta as concentrações máximas das simuladas do poluente CO em mg/m<sup>3</sup> nos dias do mês de outubro (ano 2021), agrupadas em três períodos do dia (de 8 horas cada). Portanto, os maiores picos de concentrações aconteceram nos dias 01, 08 e 22 de 0 às 8h. No caso do horário das 8 às 16h, ocorreu um pico divergente dos demais somente no dia 13. Já no horário das 16 às 0h, as concentrações maiores ocorreram nos dias 5 e 8 (Figura 6). Contudo, em nenhum momento simulado, o CO apresentou concentrações acima do máximo permitido. Todas elas ficaram abaixo dos padrões 10,31 mg/m<sup>3</sup>, ou seja, quando analisados isoladamente, os padrões de CO e a qualidade do ar podem ser classificados como bons.

**Figura 6.** Concentrações máximas de monóxido de carbono (CO) observada nas simulações de dispersão do HYSPLIT para o mês de outubro (dividido em três períodos do dia).



Esses resultados podem ser explicados, em parte, pelo uso de melhores tecnologias automotivas e pela velocidade de tráfego na via. Desde 1975, o Governo tem incentivado a adoção de tecnologias mais limpas, como a implantação do Programa Nacional do Etanol, chamado de “Proálcool”, que fez diminuir o composto monóxido de carbono (CO) pelos veículos. Esse programa buscou estimular o uso do etanol como combustível, obrigando a sua mistura à gasolina. Assim, criou-se o “gasohol” e, a partir dessas medidas, foi possível observar mudanças consideráveis ao longo do tempo (Andrade *et al.* 2017). A CETESB (2021) também faz observação parecida em relação ao avanço da tecnologia e a incorporação de controle de emissões para a diminuição das concentrações desse poluente.

Outra explicação para esse resultado pode derivar-se da redução da velocidade das vias, decorrentes do uso de lombadas eletrônicas. A diminuição das rotações veiculares acontece, geralmente, quando se tem redução das velocidades por meio desses radares de sinalização eletrônica. O estudo de

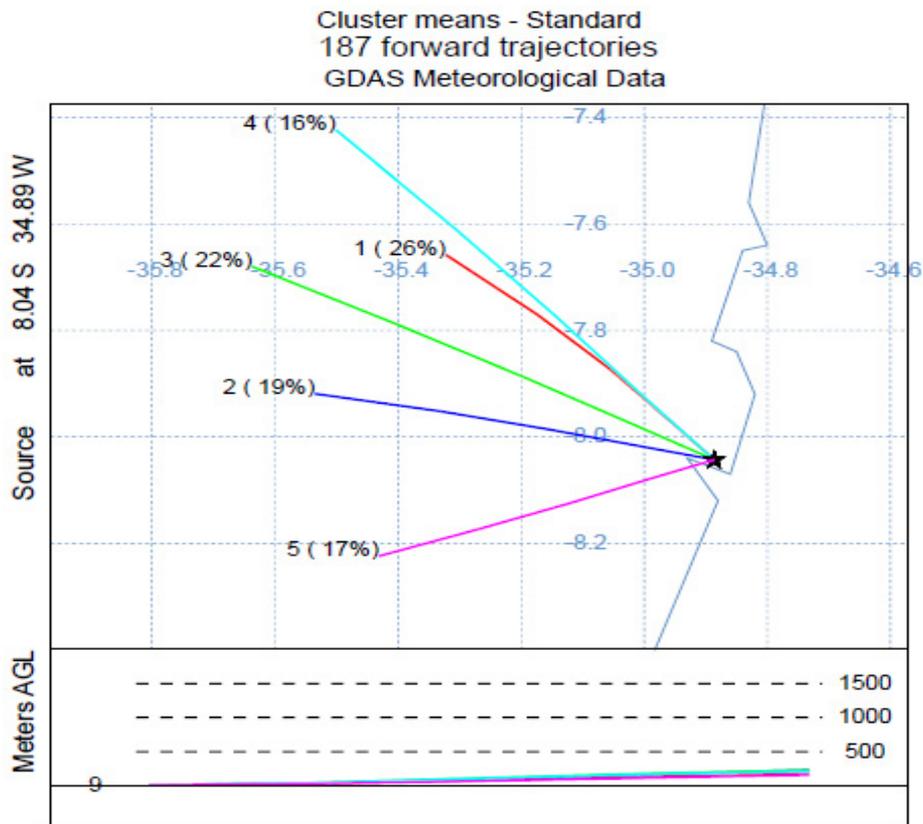
Nascimento-Silva e Souza (2019), por exemplo, mostra que o monóxido de carbono apresenta menores emissões para baixas rotações. Eles afirmam que menores velocidades acarretam menores emissões.

### Modelagem da trajetória dos ventos

O agrupamento das trajetórias simuladas a partir das emissões na Av. Agamenon Magalhães (via urbana) para o mês de outubro (2021) pode ser visualizado na Figura 7, indicando as cinco trajetórias médias (5 grupos) preferenciais a partir do ponto de emissão. Essa figura apresenta também a porcentagem correspondente de trajetórias de cada grupo.

Esse agrupamento foi compilado por meio de 187 dados de trajetórias simuladas, tendo como trajetórias resultantes 5 *cluster*. Assim, para Tian et al. (2020), um fluxo de ar agrupado com uma porcentagem maior da trajetória total tem uma grande influência na qualidade do ar.

**Figura 7.** Simulação das trajetórias dos ventos e agrupamento em 5 *cluster forward trajectories* (trajetórias para frente).

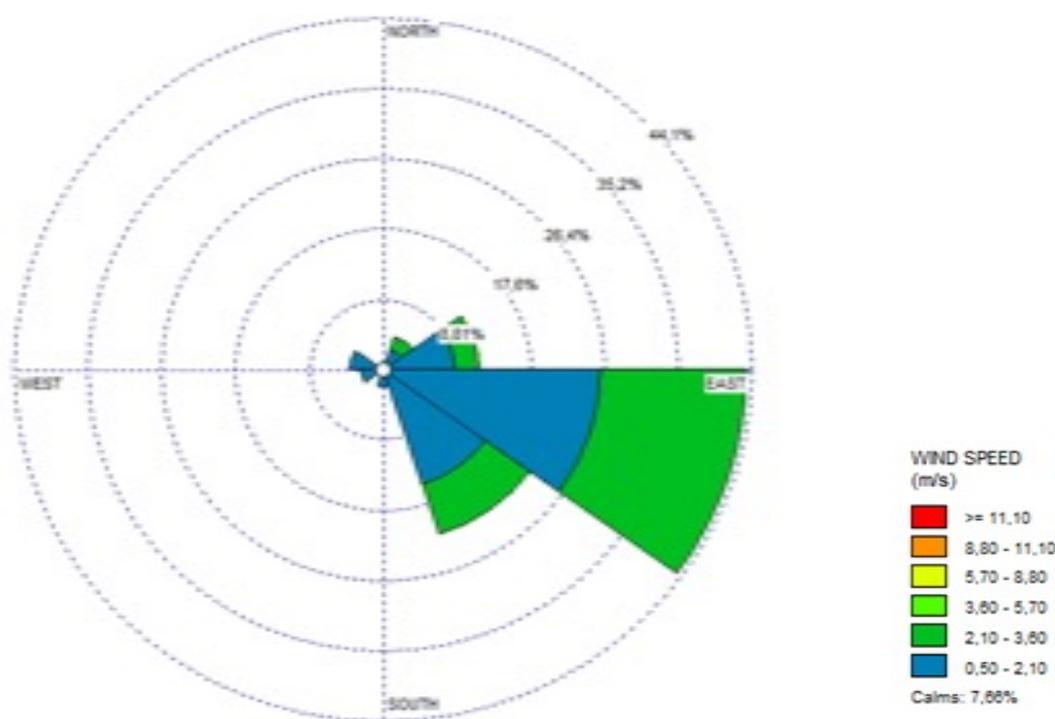


A Figura 7 mostra ainda que as trajetórias médias das massas de ar indicam diferentes zonas urbanas atingidas pela simulação da liberação dos poluentes a partir do ponto referente da via escolhido. A correspondente proporção da trajetória de transporte foi de 26%, 19%, 22%, 16% e 17%, respectivamente. As trajetórias médias dos grupos 1, 2, 3 e 4 indicam direção predominante do vento de Sudeste e juntos somaram em proporção 83% das trajetórias. Contudo, somente 17% das trajetórias dos ventos são de Nordeste. Isso mostra que as possíveis áreas mais afetadas pelas emissões de poluição, no trecho de alto fluxo veicular, encontram-se a Noroeste do ponto investigado.

Ademais, a fim de comprovar a modelagem do HYSPLIT em relação as trajetórias simuladas, fez-se a comparação com dados provenientes da estação do INMET, apresentadas na figura 8. Dessa forma, os dados utilizados foram relativos a 744 horas totais dos 31 dias de outubro. Desses dados, foram aproveitadas 741 horas totais, ou seja, 99,6%. 3 horas não foram aproveitadas devido à ausência de dados. Com isso, os resultados mostraram que a velocidade média do vento foi de 1,53m/s, com 57 registros de calmaria (7,66%).

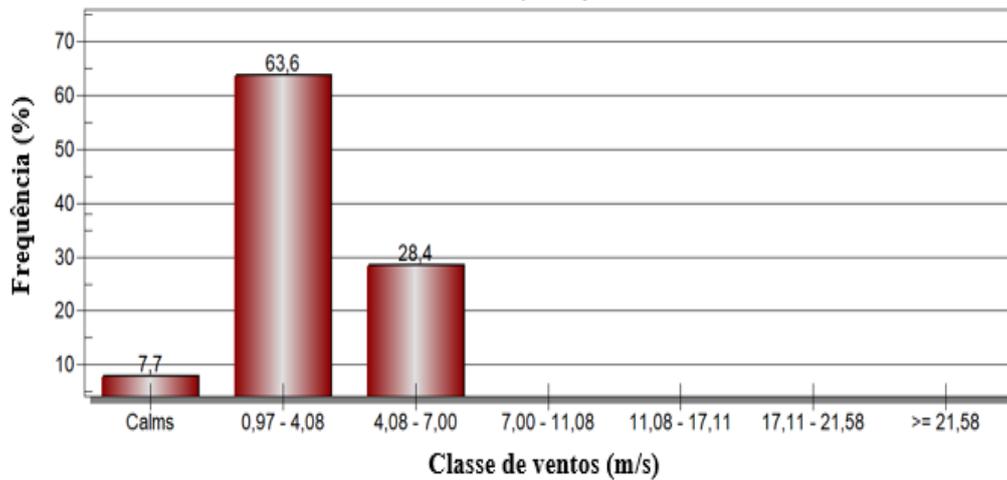
Assim, a análise do regime de vento mostrou direção predominante do vento de Sudeste, seguido pelo vento de Nordeste como direção secundária (Figura 8). O resultado da direção dos ventos foi similar aos observados no HYSPLIT (Figura 7).

**Figura 8.** Direção e velocidade do vento (outubro de 2021).



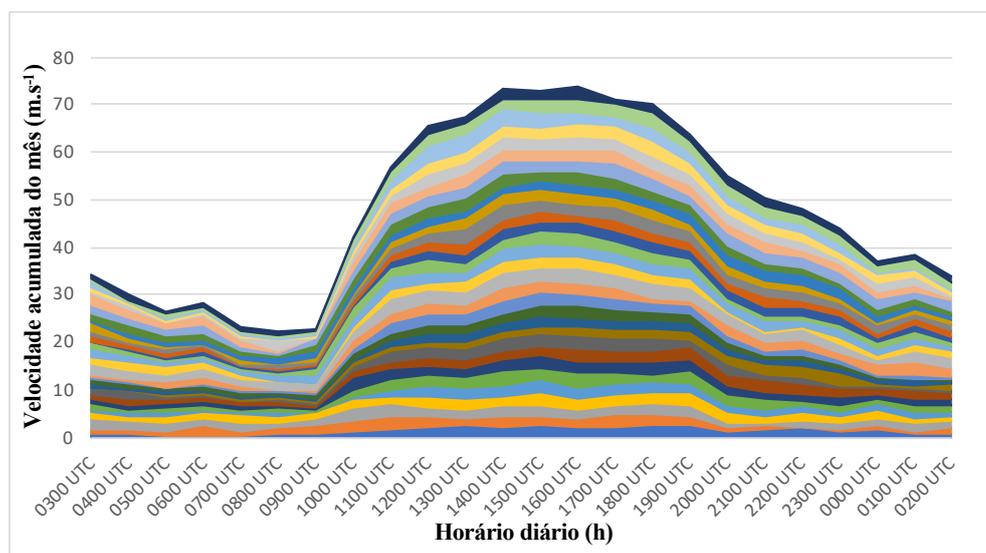
Pode-se observar que as maiores velocidades do vento ficaram entre 2,10 m/s a 3,6 m/s, valores esses que, de acordo com a escala de Beaufort, são classificados entre brisa leve (0,3m/s a 1,5m/s) e brisa suave (1,6m/s a 3,3m/s). Contudo, as maiores frequências de velocidade aconteceram com as classes de vento nas velocidades de 0,5m/s a 2,1 m/s (Figura 9).

Segundo Ceratti *et al.* (2018) as brisas leves podem dificultar as dispersões dos poluentes, possibilitando o acúmulo de poluente na atmosfera. Além disso, advertem sobre a possível contribuição para a formação do ozônio em conjunto com nitrogênio e monóxido de carbono das emissões veiculares.

**Figura 9.** Distribuição das frequências das classes dos ventos (outubro de 2021).

Além disso, a partir dos dados do INMET (2021), pode-se observar, conforme a Figura 10, a frequência diária das velocidades dos ventos em Recife no mês de outubro de 2021 de forma acumulada, resultando no período com menor velocidade do vento de 7 UTC a 9 UTC (ou seja, de 4h às 6h). Ademais, levando em consideração que a dispersão do poluente no HYSPLIT foi dividida em três partes, de 8 em 8 horas e, ao investigar os períodos simulados e a velocidade do INMET, percebeu-se que o período com velocidades mínimas do vento ocorreu de 0 às 8h (intervalo UTC de 3 a 11). Já as velocidades máximas do vento ocorreram no intervalo de 8h às 16h (11UTC a 19 UTC).

Isso mostra que a velocidade do vento se torna maior durante o dia e menor no período noturno (Costa 2022). Em paralelo, observou-se que as concentrações maiores de monóxido de carbono (CO) ocorreram no período de 0h às 8h e as menores no período de 8h às 16h (Figura 6). Assim, as velocidades dos ventos foram em quase sua totalidade mais baixas nos períodos da madrugada e início da manhã, possibilitando a baixa dispersão de poluentes atmosféricos e concentrações mais acentuadas dos poluentes.

**Figura 10.** Frequência acumulada da velocidade vento distribuída por hora (outubro - 2021).

**Fonte:** Adaptado dos dados do INMET (2021).

## Considerações finais

Os resultados do inventário de emissões veiculares na Av. Agamenon Magalhães (via urbana), para o ano de 2021, demonstraram que o monóxido de carbono foi um dos poluentes mais emitidos no trecho de alto fluxo veicular no mês de outubro.

Nesse sentido, ao analisar a dispersão nesse trecho, verificou-se que a concentração máxima da simulação aconteceu no dia 08 e teve  $5,1 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3$ , no período de 0h às 8h. Ademais, as simulações foram divididas em três períodos de 8 horas, esses períodos foram de 0h - 8h, 8h - 16h e 16h - 0h. Com isso, observou-se que os horários de maiores concentrações e consequente poluição aconteceram predominantemente nos períodos da madrugada (0h-8h), seguido pelo período da noite (16h-0h) e, por último, da manhã (0h-8h).

Além disso, o poluente CO atingiu maiores concentrações até a distância máxima de 10 km a partir da fonte de emissão. Assim, tiveram como receptores da poluição diversos bairros de Recife e, preponderantemente, aqueles que se localizam na direção noroeste, como Espinheiro, Jaqueira, Encruzilhada, Rosarinho, Tamarineira, Alto José Bonifácio, Vasco da Gama, Macaxeira, Córrego do Jenipapo, Nova descoberta e Brejo da Guabiraba. No caso das plumas de concentração intermediária, em dois casos elas ultrapassaram mais de 40 km de raio, chegando a atingir alguns interiores da Mata Norte do Estado de Pernambuco, como Itaquitanga, Nazaré da Mata, Aliança e Vicência.

Contudo, caracterizou-se como limpa a qualidade do ar nessas regiões, já que os limites ficaram abaixo daqueles impostos pelo padrão estabelecido pelo CONAMA Nº 491 (2018). Há de se observar ainda que o produto das modelagens correspondeu apenas às emissões veiculares do trecho de alto fluxo veicular. Nesse sentido, para futuros trabalhos, aconselha-se a quantificação de outras fontes possíveis de poluição do ar, como as fixas (industriais) e as móveis (de navios, avião, entre outras), assim como, a inclusão de outros tipos de poluentes como  $\text{NO}_2$ , MP,  $\text{O}_3$ , entre outros.

O uso do modelo computacional de simulação de trajetórias de dispersão permitiu verificar as direções preferenciais de dispersão dos poluentes emitidos no ponto selecionado da via urbana. Nesse viés, no trecho simulado, 83% das trajetórias estão relacionadas com ventos saindo de Sudeste e apenas 17% de sentido Nordeste. Ademais, pôde-se comprovar os resultados do modelo HYSPLIT com outros resultados obtidos através de dados medidos em estação meteorológica próxima ao local da simulação. Foi possível também demonstrar que, no período investigado, só ocorreram brisas leves a suaves. Nesse sentido, esses resultados possibilitam, também, a reflexão acerca da localização mais adequada para uma possível estação de monitoramento da qualidade do ar em Recife.

Além disso, com essa investigação foi possível compreender a íntima relação entre a poluição atmosférica e a qualidade do ar, assim como é factível vislumbrar os meios para minimizar ou estabilizar o problema da poluição atmosférica. Por isso, sugere-se a adoção de medidas mais sustentáveis, como o programa “Proálcool”, para o uso dos veículos automotores; a limitação do uso de veículos com tecnologias mais antigas; os incentivos monetários (fiscais ou não fiscais) na ampliação do consumo de carros elétricos; o melhoramento do combustível usado nos veículos e a ampliação das regiões que monitoram a qualidade do ar.

## Agradecimento

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pelo apoio financeiro. Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilidade dos dados. À Administração

Oceânica e Atmosférica Nacional (NOOA) pelo modelo HYSPLIT, essencial para a realização deste estudo. À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPAMB/PE pelo suporte à pesquisa.

**Participação dos autores:** FLNC - conceitualização, curadoria de dados, análise de dados, recebimento de financiamento, pesquisa, metodologia, administração do projeto, validação de dados e experimentos, design da apresentação de dados, escrita – rascunho original e escrita – revisão e edição; MNC - conceitualização, curadoria de dados, administração do projeto, supervisão, escrita – revisão e edição; GLM - conceitualização, curadoria de dados, administração do projeto, supervisão, escrita – revisão e edição; RCL - análise de dados, validação de dados e experimentos.

**Aprovação ética ou licenças de pesquisa:** Não se aplica.

**Disponibilidade dos dados:** Dados da quantidade de CO - monóxido de carbono e simulações de dispersão podem ser acessados em <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede/> (dissertação: modelagem e simulação da dispersão de poluentes atmosféricos aplicadas a uma via urbana, utilizando o modelo HYSPLIT). Dados meteorológicos: INMET - Rede de Estações Meteorológicas Automáticas Recife (Downloads dos dados 2021) acessados em <https://bdmep.inmet.gov.br/>.

**Fomento:** FACEPE (IBPG-1112-3.07/21); UFRPE e UFAL.

**Conflito de Interesses:** Não há conflito de interesse.

## Referências

Andrade MF, Kumar P, De Freitas ED, Ynoue RY, Martins J, Martins LD, Nogueira T, Perez-Martinez P, Miranda RM, Albuquerque T, Gonçalves FLT, Oyama B, Zhang Y. 2017. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. *Atmospheric environment* 159: 66-82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.051>

Brandão PVR. 2021. Estudo da dispersão atmosférica de poluentes originários da frota veicular em Salvador–BA. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – UFBA, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

Cancelli DM, Dias NL. 2014. BRevê: uma metodologia objetiva de cálculo de emissões para a frota brasileira de veículos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 19: 13-20. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019010000284>

Cabral JJSP, Gusmão AD, Da Silva Junior MAB, Barros EN. 2021. Mudanças climáticas e subsidência do terreno como dificuldades para a gestão urbana de uma avenida marginal de curso d'água em cidade costeira. *Revista de Geografia (Recife)* 38(2):436-460. DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.51359/2238-6211.2021.249051>

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Ficha de Informação Toxicológica, monóxido de carbono. 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Monoxido-de-Carbono.pdf> . Acesso em: 01 jun. 2023.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de Qualidade do Ar no estado de São Paulo. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo/Secretaria do Meio Ambiente/Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2022/10/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2021.pdf> Acesso em: 08 mai. 2023

Cheol HK, Chai T, Stein A, Kondragunta S. 2020. Modelagem inversa de emissões de incêndio restritas pelo transporte de pluma de fumaça usando modelo de dispersão HYSPLIT e observações geoestacionárias de satélite. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20(17) : 10259–10277.

Chulde Llive DF. 2019. Evaluación de la contaminación del aire causada por las emisiones de gases producida por la circulación vehicular, en la ciudad de San Gabriel, provincia del Carchi. 157 f. Tese de Doutorado. Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Resolução n.491, de 19 de novembro de 2018. Diário Oficial da União, nº223, de 21/ 11/ 2018, Seção 01:155-156.

Costa PC de S. 2022. Tendências e ciclos médios da velocidade do vento e complementaridade energética em regiões próximas a empreendimentos eólicos no Nordeste do Brasil. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Costa FLN, Carvalho MN, Mariano GL, Da Silva AJG, Lima RC. Avaliação das emissões veiculares em uma região metropolitana de alto fluxo veicular. ACTA Geográfica. No prelo 2023.

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Qualidade do Ar - rede de monitoramento. Pernambuco. 2023. Disponível em: <http://www2.cprh.pe.gov.br/monitoramento-ambiental/qualidade-do-ar-2/rede-de-monitoramento/>. Acesso em: 20 mai. 2023.

Derisio, JC. Introdução ao controle de poluição ambiental. Oficina de textos, 2016.

DETRAN. Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco. Serviço de Informações ao Cidadão do Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (SIC/DETRAN-PE), [Pernambuco]: DETRAN, [2021]. Disponível em: <https://www.detran.pe.gov.br/institucional-detran/portal-da-transparencia>. Acesso em: 10 fev. 2022.

Draxler RR, Hess GD. 1998. An overview of the Hysplit\_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition, Australian Meteorological Magazine 47: 295-308.

Duarte ESF. 2016. Análise e caracterização do material particulado atmosférico fino em uma região metropolitana de Natal-RN. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

EPA. Environmental Protection Agency. 2020. Air Quality System (AQS). Disponível em: <https://www.epa.gov/aqs> . Acesso em: 4 maio 2020.

Google. Google Earth website. <http://earth.google.com/> , 2023. Acesso em: 02 fev. 2023.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP. Rede de Estações Meteorológicas Automáticas. Downloads dos dados [2021]. Recife, PE, Brasil, 2021. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 29 mai. 2023.

Iriart PG, Fisch G. 2016. Uso do Modelo WRF-CHEM para a Simulação da Dispersão de Gases no Centro de Lançamento de Alcântara. Revista Brasileira de Meteorologia 31: 610-625. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150105>

Ma Y, Wang M, Wang S, Wang Y, Feng L, Wu K. 2021. Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China. Environmental Monitoring and Assessment 193: 1- 14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08767-4>

Ceratti AM, Alves DD, Meincke L, Rabelo FL, Osório DMM. 2018. Relação do monitoramento atmosférico de NO<sub>2</sub>, CO e O<sub>3</sub> obtidos pela estação de monitoramento automática da qualidade do ar da universidade FEEVALE/RS com variáveis meteorológicas. Revista Conhecimento Online (3): 57-78. DOI: <https://doi.org/10.25112/rco.v3i0.1607>

Nascimento-Silva AVDo, Souza WM. 2019. Evolução das emissões dos gases automotivos de veículos do ciclo Otto em Recife (Pernambuco). Revista Geama, [S. l.] 5(2): 20–29. Disponível em: <https://journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/2543> . Acesso em: 25 jun. 2023.

Nascimento RC, Silva JBS, Franca RS, Vasconcelos TL. 2013. Estudo microclimático da Praça do Derby e entorno, Recife-PE. In: Arminda Saconi Messias. (Org.). Gestão da Água: água, meio ambiente e saúde. 1(7):1179-1186.

Recife. Autarquia de Trânsito Urbano do Recife (CTTU). Velocidade das Vias – Quantitativo por Velocidade Média (2021). Recife, 2021. Disponível em: <http://dados.recife.pe.gov.br/dataset/velocidade-das-vias-quantitativo-por-velocidade-media-2021> . Acesso em: 10 jan. 2021.

Reichert J. 2017. Tabagismo passivo–implicações genéticas em gerações. Associação médica do Paraná (75): 103.

Silva C. 2013. Modelagem Lagrangeana Da Dispersão Atmosférica De Radionuclídeos E Sistemas De Informação Geográfica Como Ferramentas De Suporte Ao Planejamento De Emergência Na Área De Influência Do Complexo Nuclear De Angra Dos Reis – Rj. Tese Submetida Ao Corpo Docente Do Instituto Alberto Luiz Coimbra De Pós-Graduação E Pesquisa De Engenharia (Coppe) Da Universidade Federal Do Rio De Janeiro Como Parte Dos Requisitos Necessários Para A Obtenção Do Grau De Doutor Em Ciências Em Engenharia Civil.

Stein AF, Draxler RR, Rolph GD, Stunder BJB, Cohen MD, Ngan F. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. Bulletin of the American Meteorological Society 96 (12): 2059-2077. DOI: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-14-00110.1>

Tian J, Fang C, Qiu J, Wang J. 2020. Analysis of pollution characteristics and influencing factors of main pollutants in the atmosphere of Shenyang city. Atmosphere 11(7) : 766. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11070766>

Tsai I-C, Lee CY, Lung SCC, Su CW. 2021. Characterization of the vehicle emissions in the Greater Taipei Area through vision-based traffic analysis system and its impacts on urban air quality. Science of the Total Environment 782:146571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146571>

Vormittag EDM, De Araújo PA, Cirqueira SSR, Wicher Neto H, Saldiva PHN. 2021. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. Estudos Avançados 35:7-30. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.002>

Zhou S, Liu N, Liu CS. 2017. Identification for potential sources for haze events in Shanghai from 2013 to 2015. Acta Scientiae Circumstantiae 37(05): 1835-1842.

WHO. World Health Organization. Ambient Air Pollutin: a Global Assessment of Exposure Burden. World Health Organization, 2016. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .Acesso em: 16 dez. 2022.



Esta obra está licenciada com uma *Licença Creative Commons Atribuição Não-Comercial 4.0 Internacional*.