

Artigo

Estudo da Dispersão do Monóxido de Carbono Associado a Emissão Veicular na Região Metropolitana de Porto Alegre com o Sistema de Modelagem Numérica CCATT - BRAMS

Karen Leandra Ávila da Silva¹ , Marcelo Félix Alonso¹ , Sabrina Feltes de Moura²,
Túlio Felipe Verdi Filho³

¹*Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Pelotas, RS, Brasil.*

²*Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler, Porto Alegre, RS, Brasil.*

³*Departamento Nacional de Trânsito, Porto Alegre, RS, Brasil.*

Recebido em: 30 de Agosto de 2019 - Aceito em: 27 de Março de 2020

Resumo

O monitoramento contínuo da qualidade do ar local é extremamente importante para a gestão ambiental de uma cidade, mas nem sempre viável pelo alto custo dos equipamentos. Por conta disso, investe-se muito na utilização da modelagem numérica no estudo da qualidade do ar, que é altamente dependente de inventários de emissões dos poluentes e seus precursores. Nesse contexto o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo da dispersão do monóxido de carbono (CO) na Região Metropolitana de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, utilizando o sistema de modelagem numérica CCATT-BRAMS, com ênfase nas fontes veiculares. Foram analisados dois períodos - janeiro de 2009 e janeiro de 2016 - utilizando-se as informações dos inventários de gases precursores elaborados pela FEPAM para os anos base de 2009 e 2013, respectivamente, distribuídos espacialmente com o auxílio do pré-processador de emissões PREP-CHEM-SRC utilizado pelo CCATT-BRAMS. No geral, as simulações representaram coerentemente os dados observados pela rede de monitoramento, com RMSE abaixo de 0,3 na maioria das estações avaliadas. Análises de sensibilidade também revelaram que, para o período avaliado, aproximadamente 40% da concentração de CO sobre a cidade de Porto Alegre foi devido ao transporte de larga escala, proveniente das cidades localizadas ao norte, dentro da Região Metropolitana.

Palavras-chave: monóxido de carbono, poluição atmosférica e modelagem numérica.

Study of the Dispersion of Carbon Monoxide Associated with Vehicular Emission in the Metropolitan Region of Porto Alegre with the Numerical Modeling System CCATT - BRAMS

Abstract

Air pollution directly affects the urban areas inhabitants, with a potential impact on health, especially when associated with respiratory diseases. The mobile sources are the main pollutants responsible for the primary emission and secondary formation of chemical compounds in the atmosphere, such as carbon monoxide, nitrogen oxides, particulate matter, and ozone. The local air quality continuous monitoring is extremely important for the municipal environmental policies but is not feasible due to the high cost of equipment. An alternative is the use of numerical modeling to air quality forecast at the local and regional scales. But the numerical models have a number of uncertainties and are dependent on emission inventories for good accuracy of dispersion and chemistry simulations. However, Brazil lacks local inventories, especially in high spatial resolution, which makes local modeling difficult to use in the control and mitigation of air pollution. In this context, this work aims the study of carbon monoxide dispersion in the Metropolitan Region of Porto Alegre (MRPA), in the Rio Grande do Sul state, using the CCATT-BRAMS system, with emphasis on vehicular

sources. Two periods - January 2009 and January 2016 - were analyzed using the FEPAM precursor gas inventory information for the 2009 and 2013 base years respectively, spatially distributed in the PREP-CHEM-SRC emissions preprocessor. In general, the simulations consistently represented the data observed by the monitoring network, with RMSE below 0.3 in most stations evaluated. Sensitivity analyses also revealed that approximately 40% of the concentration of carbon monoxide over the municipality of Porto Alegre (Main city of MRPA) occurs due to large-scale transport.

Keywords: carbon monoxide, atmospheric pollution and numerical modeling.

1. Introdução

O crescimento populacional nas grandes e médias cidades do Brasil intensificou-se na década de 70 com o desenvolvimento industrial e econômico desses núcleos urbanos. No entanto, esse aumento demográfico sempre esteve acompanhado por condições precárias de saúde e degradação ambiental, devido a falta de infraestrutura e planejamento urbano (IPEA, 2016).

A poluição do ar vem sendo considerada pela Organização Mundial de Saúde como um dos principais agentes de degradação ambiental do planeta, sobretudo com potencial impacto em crianças (WHO, 2018).

No que concerne às emissões antrópicas de poluentes atmosféricos em áreas urbanas, as fontes móveis são de particular preocupação, uma vez que as emissões veiculares são as principais responsáveis pela presença de diversos compostos químicos na atmosfera (Alonso *et al.*, 2010). Dentro das áreas urbanizadas, os poluentes mais relevantes são: monóxido de carbono (CO); óxidos de nitrogênio (NO_x); dióxido de enxofre (SO_2); ozônio (O_3); material particulado (MP) dividindo-se em Partículas Inaláveis (MP_{10}), Partículas Inaláveis Finas ($\text{MP}_{2,5}$), Partículas Totais em Suspensão (PTS) e Fumaça (FMC).

Vários estudos científicos mostraram os efeitos desses poluentes sobre a saúde humana, podendo provocar sérios problemas relacionados com doenças respiratórias, pulmonares e cardiovasculares, portanto, entender as emissões, a formação e a dispersão dos referidos poluentes é fundamental para a elaboração de políticas de planejamento e controle no que tange a qualidade do ar nas cidades (Braga *et al.*, 2001; Freitas *et al.*, 2004; Lacerda *et al.*, 2005).

Atualmente, poucas instituições governamentais ligadas ao meio ambiente no Brasil estão investindo na elaboração de inventários atualizados de fontes fixas e móveis, com o intuito de encontrar possíveis soluções para a diminuição dos níveis de poluição do ar nas grandes capitais e em seu entorno. Citam-se comumente a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). Um inventário consiste numa estimativa das emissões para a atmosfera de vários tipos de fontes poluentes geralmente através de metodologias propostas pela Agência de Proteção Ambiental Norte-americana (EPA), fornecendo base científica para tomadas de decisão no que diz respeito à mitigação da poluição local e consequente redução do seu impacto na população. Mas tal iniciativa ainda é incipiente

e muito voltada às fontes veiculares. No Rio Grande do Sul, por exemplo, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM) desenvolveu o primeiro inventário de emissões atmosféricas para as fontes móveis no ano de 2009 (FEPAM, 2010).

Além do monitoramento e da estimativa das fontes emissoras, pode-se estudar o comportamento da dispersão desses poluentes com a modelagem numérica. Atualmente, existem vários modelos numéricos que são utilizados para a previsão do tempo químico em escala global e regional.

Particularmente na América do Sul, cita-se o modelo CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) - Longo *et al.* (2013); cujo módulo de química e dispersão de poluentes (CCATT) foi desenvolvido no Brasil, acompanhando os significativos avanços que a comunidade científica brasileira alcançou a partir do modelo norte-americano RAMS.

No entanto, a boa representatividade do transporte dos poluentes e dos processos químicos a eles associados na atmosfera em modelos regionais depende de vários fatores, sendo o nível de detalhamento e distribuição das emissões um dos mais importantes. Por isso, caracterizar a contribuição de diferentes fontes de emissão em áreas metropolitanas de significativa densidade populacional torna-se cada vez mais imprescindível e desafiador.

Nesse contexto analisou-se a distribuição e transporte do poluente Monóxido de Carbono (CO) na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA). O CO foi escolhido por ser um traçador urbano muito sensível ao tráfego veicular e por possuir amplo monitoramento contínuo na RMPA, com aproximadamente seis estações.

Mais especificamente, as informações dos inventários de emissão veicular para a Região Metropolitana de Porto Alegre, anos base 2009 (FEPAM, 2010) e 2013 (comunicação pessoal) foram discretizadas. Além disso, estimou-se o volume do tráfego de veículos para a BR 116, que atravessa boa parte da zona urbana pertencente a RMPA, e validou-se essa nova plataforma, com os dados de monitoramento contínuo de qualidade do ar.

2. Materiais e Métodos

2.1. Descrição da área de estudo

A Região Metropolitana de Porto Alegre é composta por 34 municípios, sendo a cidade de Porto Alegre (capital

do Rio Grande do Sul) o município sede, possui uma área territorial de 10.345,45 km², ocupando 3,67% da superfície total do estado, concentrando 4.032.062 de habitantes, conforme Censo Demográfico 2010 do IBGE (Fig. 1).

Outro ponto importante são as duas rodovias federais que atravessam a RMPA, a BR-116 e a BR-290 devido ao seu grande fluxo de veículos automotores na região. Segundo os dados do Departamento de Trânsito do Rio Grande Do Sul (DETRAN-RS, 2019), a frota de veículos no estado teve um crescimento de 75,6% nos últimos 10 anos e existe atualmente uma proporção de 1,9 pessoas por veículo. O total da frota de veículos licenciados em circulação, registrada pelo mesmo órgão em fevereiro de 2015 (ano anterior ao ano base escolhido para esse estudo) na RMPA era de 2.203.911 veículos, sendo os automóveis a categoria de maior presença (em torno de 69% da frota total) e os maiores contribuintes para a poluição veicular.

2.2. Sistema de modelagem CCATT - BRAMS

O CCATT-BRAMS (*Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System*) é um modelo euleriano de transporte químico atmosférico acoplado (*on-line*) com um modelo atmosférico de área limitada. O sistema está projetado para estudos locais e regionais de química atmosférica dentro da troposfera e para baixa estratosfera, tanto para fins operacionais quanto de pesquisa (Longo *et al.*, 2013). Atualmente o modelo se encontra na versão 5.2 (BRAMS 5.2 - Freitas *et al.*, 2017).

O sistema de modelagem possui três pré - processadores: a) ferramenta *Simplified Preprocessor for Atmospheric Chemical Kinetics* (SPACK) que permite a escolha do mecanismo químico. b) *Preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models* (PREP-CHEM-SRC - Freitas

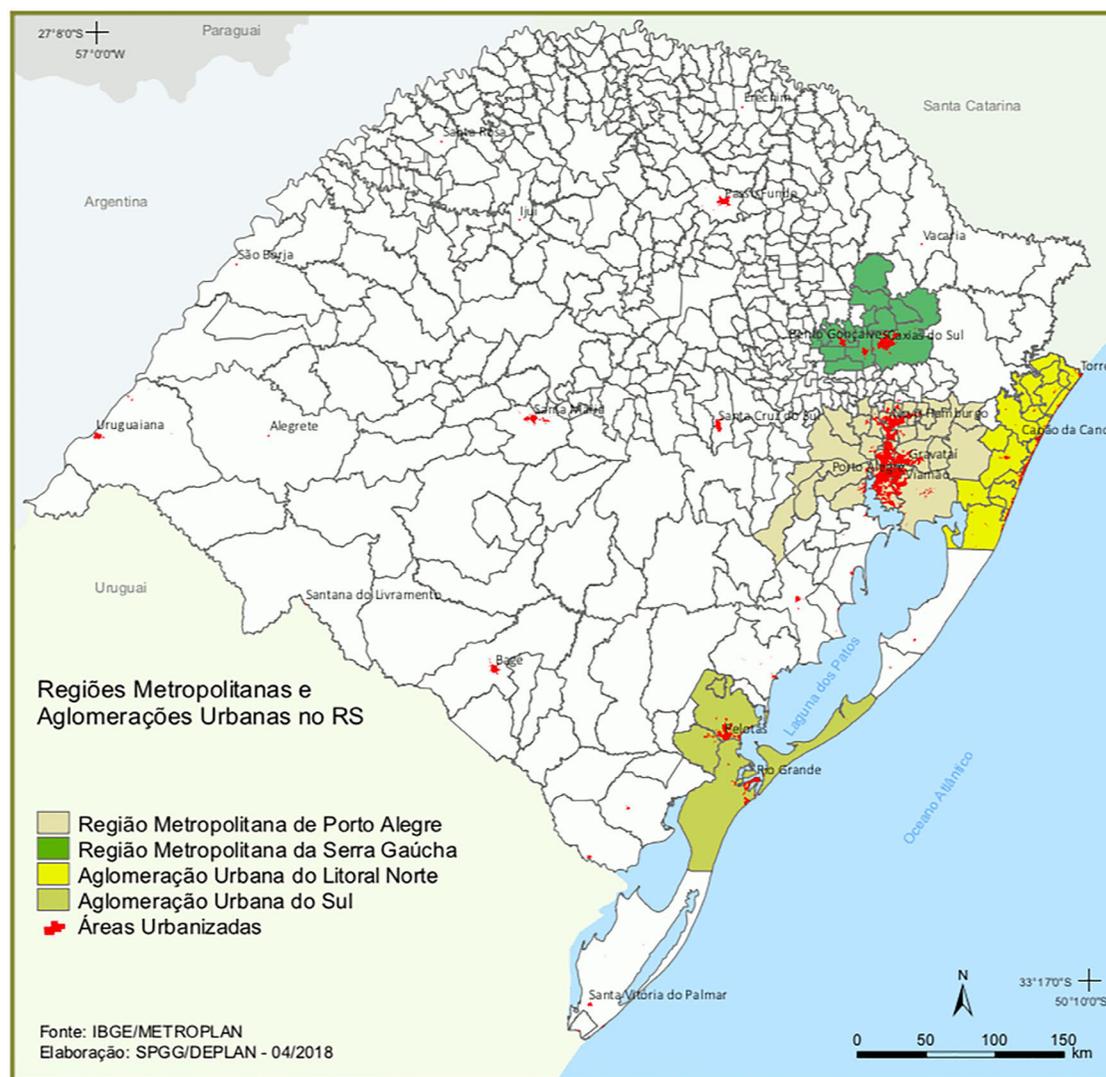


Figura 1 - Regiões Metropolitanas e Aglomerações urbanas no RS. Fonte: Departamento de Planejamento Governamental da Seplan/RS.

et al., 2011), que tem a função de compilar os dados de emissões de poluentes para a atmosfera. c) o DPREP-CHEM gera as condições iniciais e de contorno atmosféricas para as espécies químicas a serem utilizadas na simulação do modelo.

Mais especificamente, o pré-processador PREP-CHEM-SRC é uma ferramenta desenvolvida para fornecer informações sobre as emissões dos gases traços e aerossóis em qualquer resolução espacial tornando-as adequadas para uso tanto em modelos globais quanto regionais no que concerne à dispersão e química de poluentes. Atualmente a ferramenta trabalha com as emissões de fontes urbanas/industriais, biogênicas, por queima de biomassa e vulcânicas.

O BRAMS 5.2 inclui um grande número de opções físicas, as quais podem ser selecionadas pelo usuário. Todos os processos físicos associados à formação de nuvens, precipitação, transferência de radiação, transporte turbulento de calor, umidade e momentum, e interação com a superfície podem ser ativados. Muitos processos foram desenvolvidos no Brasil e tornam o sistema de modelagem adequado à América do Sul, cita-se: a iniciação de umidade do solo utilizando uma estimativa a partir de um modelo hidrológico off-line (Gevaerd e Freitas, 2006), inclusão do esquema de superfície JULES para processos de superfície (Moreira et al., 2013), esquema de radiação acoplada com hidrometeoros e aerossóis (Longo et al., 2006), parametrização de cumulus rasos (Souza, 1999, Souza et al., 2000), modelo de solo urbano (Freitas E.D. et al., 2007), novas parametrizações de turbulência (Barbosa et al., 2007), inventários de poluentes urbanos para os principais centros urbanos do Brasil (Alonso et al., 2010), treinamento da parametrização convectiva (dos Santos et al., 2013), parametrização convectiva com dependência de escala espacial e interação com aerossóis (Grell e Freitas, 2014), dentre outras parametrizações.

2.3. Inventários de emissões veiculares para a Região Metropolitana de Porto Alegre

Foram utilizados os inventários desenvolvidos pela FEPAM para os anos base de 2009 e 2013. A metodologia adotada no desenvolvimento dos inventários segue a Agência de Proteção Ambiental Norte-americana (EPA) e a obtenção dos dados seguiu a alternativa “Bottom-Up” (de baixo para cima), uma abordagem que utiliza um maior número de informações locais cuja especificidade é importante na caracterização do comportamento da frota dentro de uma área urbana. Os fatores de emissão veicular utilizados foram obtidos da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), corrigidos pelo fator de deterioração, conforme proposto pela EPA e utilizado no segundo inventário nacional de emissões por veículos automotores (MMA, 2014). O levantamento da frota veicular para o inventário de fontes móveis foi obtido com os dados do Departamento Nacional de Trânsito (DENA-

TRAN-RS), dividindo-a em sete categorias veiculares - automóveis, micro-ônibus, caminhonetes, camionetes, caminhões, motocicleta e ônibus. A quilometragem média rodada por veículo foi ajustada através do consumo anual de combustível.

A categorização pelo combustível consumido (gasolina, álcool, bicomcombustível, diesel e Gás Natural Veicular) segue a distribuição obtida pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) e a emissão total é calculada através da Eq. (1).

$$E = F_e * km * N * 10^{-6} \quad (1)$$

onde E = taxa de emissão (t/ano); F_e = fator de emissão (g/km); km = quilometragem média rodada por veículo (km/dia); N = número de veículos.

2.4. Inventário de Emissões veiculares para a BR 116

Foi realizado um levantamento das emissões veiculares para o poluente monóxido de carbono (CO) na rodovia BR 116/RS, não inventariada pela FEPAM. Para a elaboração deste inventário também foi aplicada a metodologia “Bottom-Up” proposta pela Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (EPA).

Os fatores de emissão utilizados foram obtidos na CETESB e posteriormente corrigidos por um fator de deterioração (Silva et al., 2016). O levantamento da frota veicular para a BR 116 km (Lat -29,75; Lon -51,15) foi realizado extraindo-se as informações fornecidas pelo Plano Nacional de Contagem de Trânsito (PNCT - DNIT) para o pedágio localizado no município de São Leopoldo, pertencente à Região Metropolitana de Porto Alegre e distante aproximadamente 52 km da capital.

A partir destas informações, foi possível traçar o perfil da frota veicular circulante na BR 116. A distribuição da frota por idade, proposta para os veículos circulantes na autoestrada, baseou-se nos inventários da FEPAM (veículos com ano de fabricação anterior a 1980 até 2008). Para calcular a intensidade de uso do veículo circulante naquela região, considerou-se que o trecho da BR 116 que atravessa a RMPA é de aproximadamente 35 km.

Além disso, a frota veicular foi dividida em veículos leves, veículos comerciais leves, caminhões, motocicleta e ônibus e a categorização pelo combustível consumido (gasolina, álcool, bicomcombustível e diesel) foi estimada a partir das informações nacionais disponibilizadas pela ANFAVEA (Agência Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores). A emissão total é calculada através da Eq. (2).

$$E_t = \sum (VMD_{i,t} * DT_{i,t} * Fec_{i,p,c})_{c,p} \quad (2)$$

onde E = emissões (t/ano); VMD = volume médio diário; DT = distância do trecho analisado (km) e Fec = Fator de emissões corrigidas [i] ano de fabricação do veículo; (p)

tipo de poluente; (*t*) ano de estudo e (*c*) consumo de combustível] em (g/km).

2.5. Distribuição das emissões e caracterização das simulações

As emissões das fontes móveis para as cidades de Esteio, Sapucaia do Sul, Canoas e Porto Alegre foram obtidas dos inventários de emissões veiculares supracitados (item 2.3).

A partir do levantamento destes dados, foi possível estimar o perfil da frota veicular para as cidades de Esteio, Sapucaia do Sul e Canoas, permitindo assim uma melhor representação espacial das emissões. Para obter essa distribuição considerou-se que a maior emissão veicular se encontra na região central desses municípios (bairro centro e arredores), com uma contribuição de 60 por cento da emissão total estimada pelo inventário da FEPAM, e o restante seria distribuído entre os demais bairros. Já para a cidade de Porto Alegre, que possui um mapa detalhado de classificação das vias, considerou-se que 60% da emissão total estimada pelo inventário da FEPAM está concentrada nas vias primárias e avenidas e o restante nas vias secundárias (Fig. 2).

Para a distribuição espacial, utilizou-se o sistema ArcGIS, conjunto de integrado de softwares de Sistema de Informação Geográfica, produzido pela empresa *Environmental Systems Research Institute* - ESRI. As informações obtidas foram inseridas no pré - processador PREP - CHEM - SRC seguindo a metodologia proposta por [Alonso et al., 2010](#).

As datas escolhidas para as simulações no ano de 2009 (simulação realizada para a calibração do modelo CATT - BRAMS) e no ano de 2016 (simulação com o

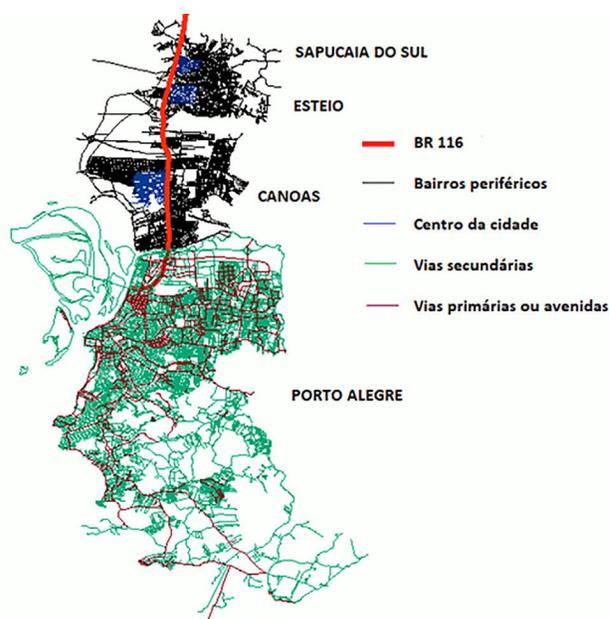


Figura 2 - Mapa das vias de tráfego veicular mostrando disposição utilizada para a distribuição das emissões.

intuito de validar o inventário veicular elaborado pela FEPAM, ano base 2011) estão compreendidas entre os períodos de 00UTC de 01 de janeiro e 00 UTC do dia 25 de janeiro. O mês de janeiro foi escolhido por apresentar pouca contribuição da queima de biomassa para a poluição atmosférica regional. Optou-se também em realizar uma simulação *footprint* para ambos os anos, na qual exclui-se a emissão da cidade de Porto Alegre, com intuito de investigar sua contribuição regional. As [Tabelas 1 e 2](#) trazem um resumo e a caracterização de todas as simulações propostas.

Tabela 1 - Resumo das simulações realizadas.

Simulação	Período	Emissões
Simulação 2009 (Sim.09)	Janeiro 2009	Inventário da FEPAM com ano base 2009. Inclui as municipalidades de Porto Alegre, Esteio, Canoas e Sapucaia do Sul
Simulação 2016 (Sim.16)	Janeiro 2016	Inventário da FEPAM com ano base 2011. Inclui as municipalidades de Porto Alegre, Esteio, Canoas e Sapucaia do Sul
<i>Footprint</i>	Janeiro 2009/2016	Inventário da FEPAM com os anos base 2009/2011, respectivamente. Inclui somente as municipalidades Esteio, Canoas e Sapucaia do Sul

Tabela 2 - Caracterização das grades que conformam o domínio das simulações.

Características	Grade 1 (Grossa)	Grade 2 (Fina)
Resolução horizontal (km)	20 × 20 km	2 × 2 km
Passo de tempo meteorológico (segundos)	60 s	12 s
Níveis verticais	33 níveis; 60 m de espessura da primeira camada com uma razão de aumento de 1,2 vezes (progressão geométrica) e um máximo de separação de 950 m.	
Condição de Contorno Químico	Utilizou-se a Rodada de 20 km como condição de contorno para a grade mais fina (2 km)	
Condição de contorno atmosférica	Global Forecast System (GFS) com 50 km de resolução espacial	
Topografia	Base de dados do <i>USGS</i> topographic maps	

Ao domínio de estudo escolhido aplicaram-se duas grades aninhadas (Fig. 3), sendo uma grade grosseira com resolução na horizontal de 20×20 km, (utilizada como condições de contorno) entre as coordenadas $26,76^\circ$ S e $34,5^\circ$ S de latitude e $58,48^\circ$ W e $49,76^\circ$ W de longitude cobrindo uma área sobre o Estado do RS. A segunda grade adotada foi menor e mais fina (de onde foram extraídas as informações para os resultados deste trabalho) apresentando uma resolução horizontal de 2×2 km, delimitada pelas coordenadas $29,7^\circ$ S e $30,15^\circ$ S de latitude e $51,4^\circ$ W e $50,9^\circ$ W de longitude cobrindo toda a RMPA.

A razão de mistura de monóxido de carbono simulada no conjunto proposto de experimentos foi validada com as observações de algumas estações mantidas pela Central de Monitoramento Automático da Qualidade do Ar/PROAR da FEPAM. As estações utilizadas e sua respectiva localização estão explicitadas na Tabela 3. A rede apresenta 6 estações com monitoramento contínuo de monóxido de carbono na RMPA, mas somente 5 com os dados disponíveis e validados para o período de 2009 e apenas uma estação para o período de 2016.

Para a validação da meteorologia foram utilizados dados da estação em superfície localizada no 8° DISME/INMET no município de Porto Alegre ($-30,05^\circ$ S; $-51,16^\circ$ W).



Figura 3 - Domínio maior referente a grade sobre o Rio Grande do Sul (grade grossa - 20×20 km) e domínio menor sobre a RMPA (grade fina - 2×2 km).

Tabela 3 - Informação sobre as estações automáticas de monitoramento utilizadas no trabalho.

Cidade	Estação	Endereço
Porto Alegre	Centro/Rodoviária	Largo Edgar Koëtz
Porto Alegre	Jardim Botânico/ESEF	Rua Felizardo, 750
Sapucaia do Sul	Sapucaia do Sul	Rua Lúcio Bittencourt, 1080
Esteio	Vila Ezequiel	Rua Ezequiel Nunes Filho, 3
Canoas	Parque Universitário	Rua Viana Moog, 101

Utilizou-se o Erro médio (ME), que avalia a superestimação (ME positivo) ou subestimação (ME negativo) dos dados simulados.

$$ME = \frac{1}{n} * \sum_1^n (Sim(i) - Obs(e)) \quad (3)$$

Também se utilizou a Raiz Quadrática do Erro Médio (RMSE) que é uma medida de precisão. O valor zero indica uma simulação perfeita e este valor aumenta conforme aumenta a diferença entre valores da simulação e observação (Wilks, 2006).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_1^n (Sim(i) - Obs(e))^2} \quad (4)$$

Por fim, optou-se pelo Índice de Concordância (d), que oferece informação sobre o tamanho relativo das diferenças entre as séries de dados simulados e os observados e toma valores entre zero e 1 (Willmot, 1982), o valor 1 indica concordância perfeita e o valor zero indica não concordância.

$$d = 1 - \frac{\sum_1^n (Sim(i) - Obs(e))^2}{\sum_1^n (|Sim(i) - \overline{Obs}| + |Obs(e) - \overline{Obs}|)^2} \quad (5)$$

onde $Sim(i)$ são os valores da simulação i , $Obs(i)$ são os valores reais medidos nas estações e , n é o número total de dados, e \overline{Obs} é a média dos valores reais observados nas estações.

3. Resultados e Discussões

3.1. Elaboração do inventário de emissões veiculares em alta resolução espacial

Utilizando a ferramenta PREP-CHEM-SRC e aplicando a metodologia descrita no item 2.5, foi possível obter a distribuição espacial das emissões veiculares para o poluente CO nos domínios utilizados nas simulações (Fig. 4). As emissões geradas foram utilizadas nos experimentos descritos na Tabela 1 do item 2.5.

3.2. Comparação com os dados simulados e observados

3.2.1. Meteorologia

No período de janeiro de 2009, somente três sistemas frontais atuaram sobre o estado do Rio Grande do Sul, um número abaixo da média histórica, conforme boletim climanalise do CPTEC/INPE (Climanalise, 2019). No mês de janeiro de 2016, as precipitações também ficaram abaixo da média histórica, em praticamente todo o estado gaúcho, conforme o INMET. O modelo simulou de forma satisfatória o ciclo diurno da temperatura, mas subestimou os valores para a temperatura mínima em alguns períodos da simulação, para o mês de janeiro de 2009 (Fig. 5).

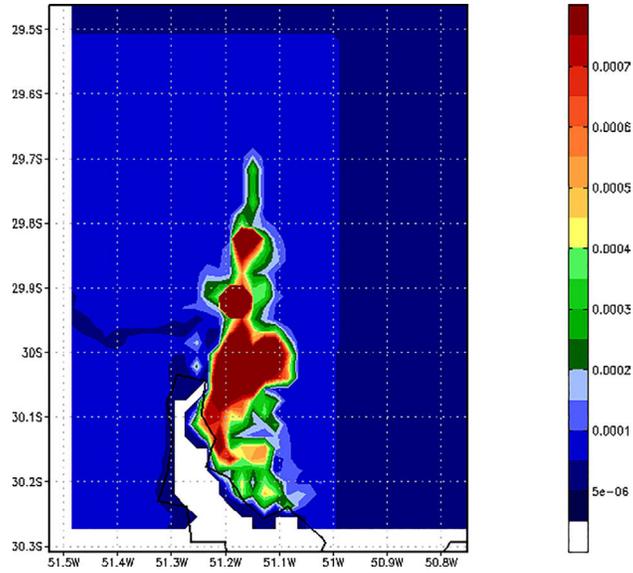


Figura 4 - Valores (em kg/m² dia) e distribuição espacial das emissões de monóxido de carbono para a simulação de 2009 na RMPA para o domínio de 2 km aplicado a ferramenta PREP-CHEM-SRC.

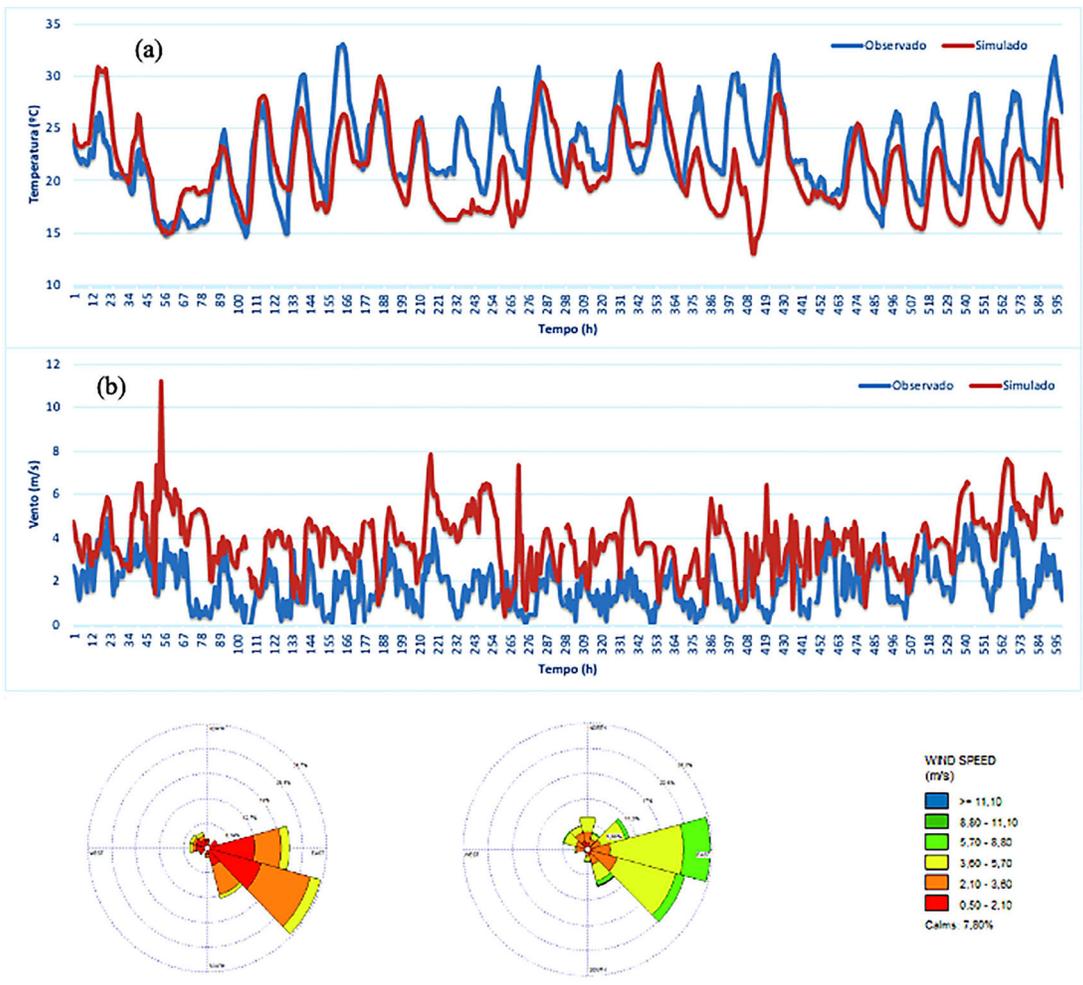


Figura 5 - Temperatura (°C) (a), intensidade do vento (em m/s) (b) e direção dos ventos (c) simulados e observados para janeiro de 2009.

Pode-se notar uma predominância dos ventos de quadrante leste - sudeste, sobre a RMPA, o que já é esperado, em função das influências diretas das circulações locais de brisa (marítimas e lacustres) experimentadas na região. A direção dos ventos foi bem representada pelo modelo CCATT-BRAMS, na comparação com a estação do INMET, no entanto, o modelo tende a superestimar sua intensidade. No período de 2016 (Fig. 6), destaca-se a subestimação da temperatura simulada pelo modelo, principalmente nos dias onde sistemas de alta pressão atuavam sobre o RS (no período de 359 h a 540 h).

3.2.1. Simulação 2009

Observando as séries temporais de concentrações de CO das estações localizadas na região de Porto Alegre, estação rodoviária e ESEF, respectivamente, com relação aos valores simulados pelo modelo CCATT - BRAMS (Fig. 7 e Fig. 8), juntamente com a análise estatística mostrada na Tabela 4, pode-se avaliar que, a despeito do desafio que é efetuar uma adequada representação espacial das emissões de dos processos de dispersão, a ordem de grandeza e a variabilidade das concentrações de CO prognosticadas estão coerentes com os valores medidos.

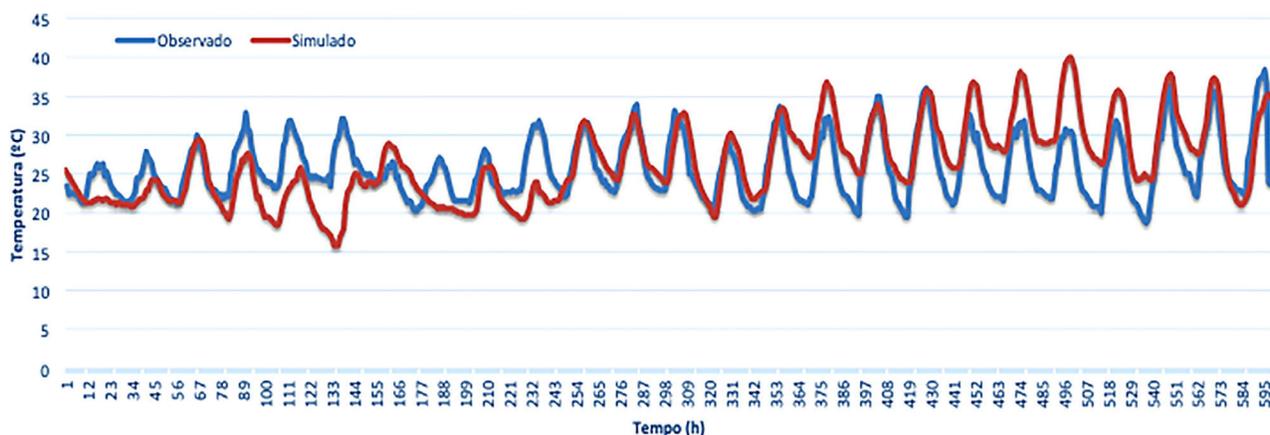


Figura 6 - Temperatura (°C) simulados e observados para janeiro de 2016.

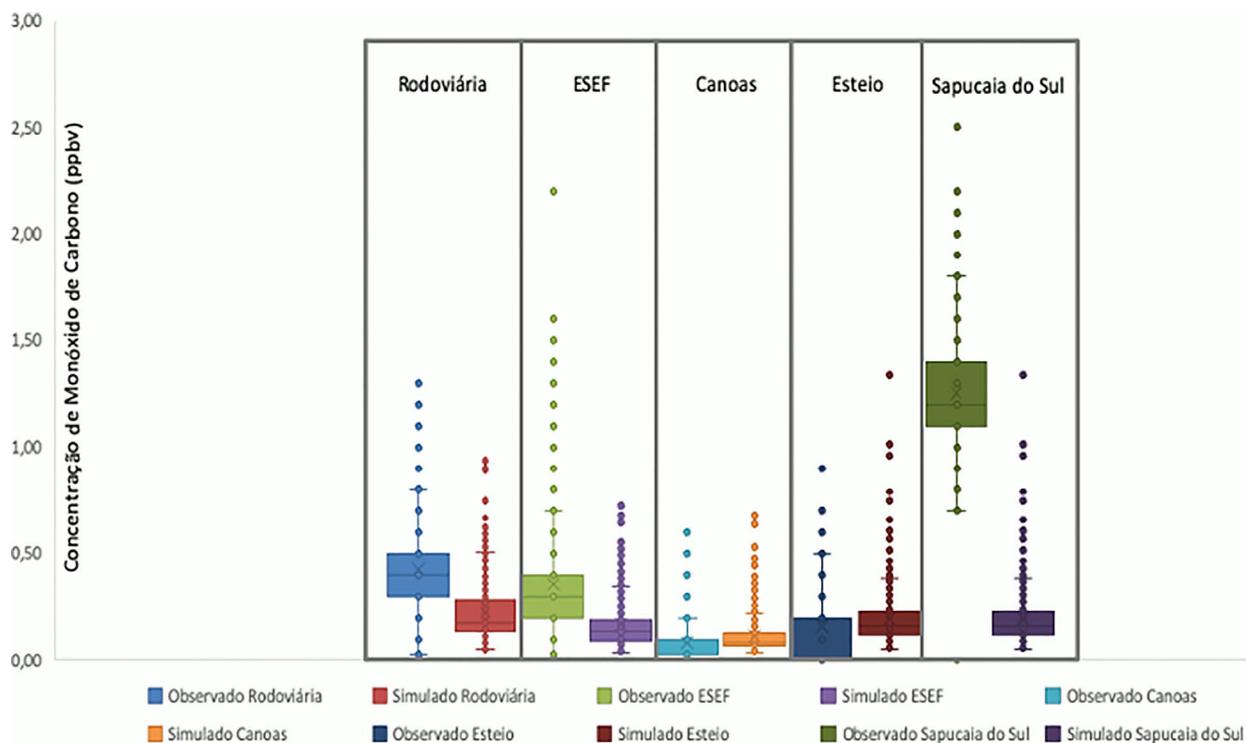


Figura 7 - Diagrama de caixas da concentração de CO observada e simulada nas estações Rodoviária, ESEF, Canoas, Esteio e Sapucaia do Sul.

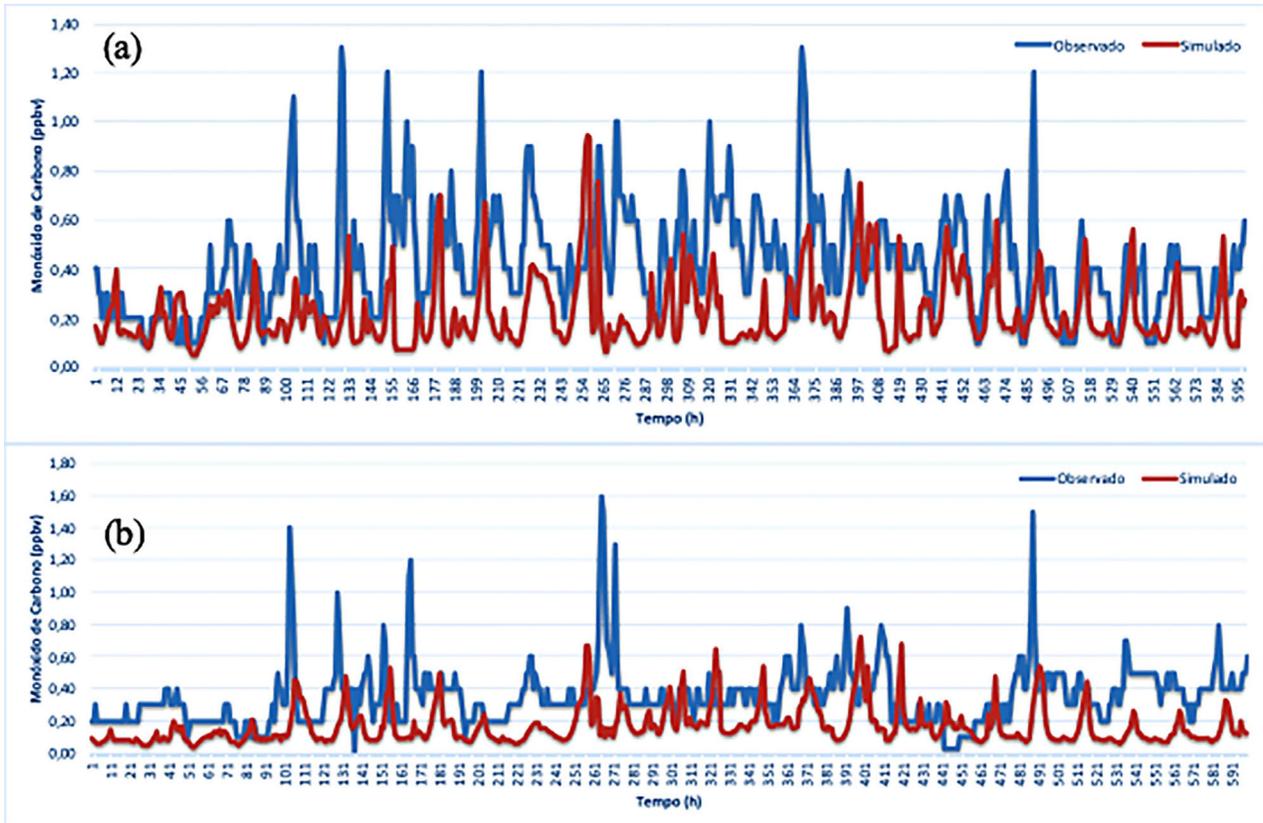


Figura 8 - Concentração de monóxido de carbono (em ppbv) simulado pelo modelo CCATT-BRAMS (vermelho) e dados observados (azul) nas estações de Porto Alegre - Rodoviária (a) e ESEF (b) no ano de 2009.

Tabela 4 - Análise estatística da comparação entre os resultados da simulação 2009 e os dados observados para o poluente CO.

Estações	ME*	RMSE**	d***
Estação Rodoviária	-0,2	0,3	0,5
Estação ESEF	-0,19	0,28	0,42
Estação Canoas	0,03	0,1	0,2
Estação Esteio	-0,06	0,13	0,82
Estação Sapucaia do Sul	-0,1	1	0,2

*Erro médio;

**Raiz do Erro médio;

***Índice de concordância de Willmott.

Para as estações localizadas no Parque Universitário (cidade de Canoas) e Esteio (Vila Ezequiel) nota-se que o modelo superestimou os valores de concentração de CO. Já em Sapucaia do Sul (estação SESI), o modelo subestima as concentrações do CO apresentando valores muito abaixo do esperado (Figs. 7 e 9), possivelmente por conta da espacialização das emissões que não foi suficientemente acurada para diagnosticar a especificidade das emissões na área dessa estação de monitoramento.

Analisando a média horária da concentração de CO em todo o período simulado, no domínio utilizado nas simulações, evidencia-se a influência das brisas marítimas

e lacustre no transporte de poluentes na RMPA. A Fig. 10 mostra os valores médios simulados às 09 e 21 UTC, respectivamente.

3.2.2 Simulação 2016

No ano de 2016 pode-se avaliar apenas a estação de Esteio, pela disponibilidade dos dados. Observando a série temporal de concentrações de CO, com relação aos valores simulados pelo modelo CCATT - BRAMS (Fig. 11), juntamente com a análise estatística mostrada na Tabela 5, verifica-se que o modelo subestima a concentração observada principalmente nos períodos nos quais registraram-se

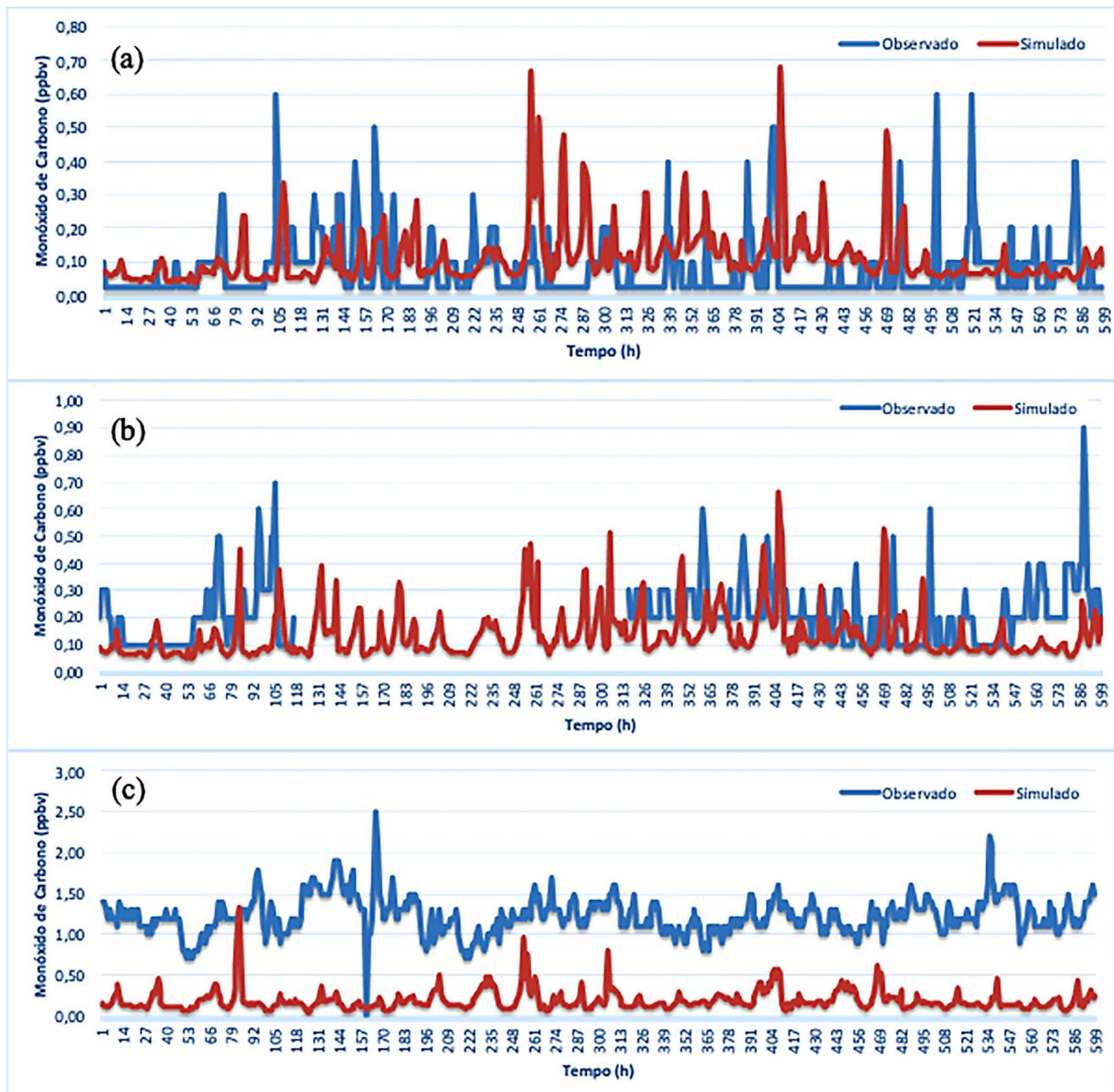


Figura 9 - Concentração de monóxido de carbono simulado pelo modelo CCATT-BRAMS (vermelho) e dados observados (azul) na estação de Canoas - Parque Universitário (a), Esteio - Vila Ezequiel (b) e Sapucaia do Sul - Sesi (c) no ano de 2009.

centros de alta pressão sobre o estado. Provavelmente, a dificuldade em simular coerentemente variáveis meteorológicas importantes como temperatura e umidade tenha afetado o processo de mistura parametrizado no modelo e consequentemente a concentração do poluente.

Como nas simulações de 2009, as concentrações médias horárias para o período analisado em 2016 também corroboram o impacto das brisas lacustres e marítimas na dispersão de poluentes sobre a RMPA (Fig. 12).

3.3. Contribuição do transporte de longa distância na poluição atmosférica experimentada na RMPA

Para verificar a contribuição do transporte de longa distância na RMPA na concentração de monóxido de carbono, foi realizada a comparação entre as simulações sim.09, Sim.16 e *footprint* e uma análise da circulação do vento na região. Como pode-se observar nas Fig. 13 e Fig. 14, o vento médio predominante para o período de janeiro de 2009 e 2016 é de Leste (L), evidenciando que

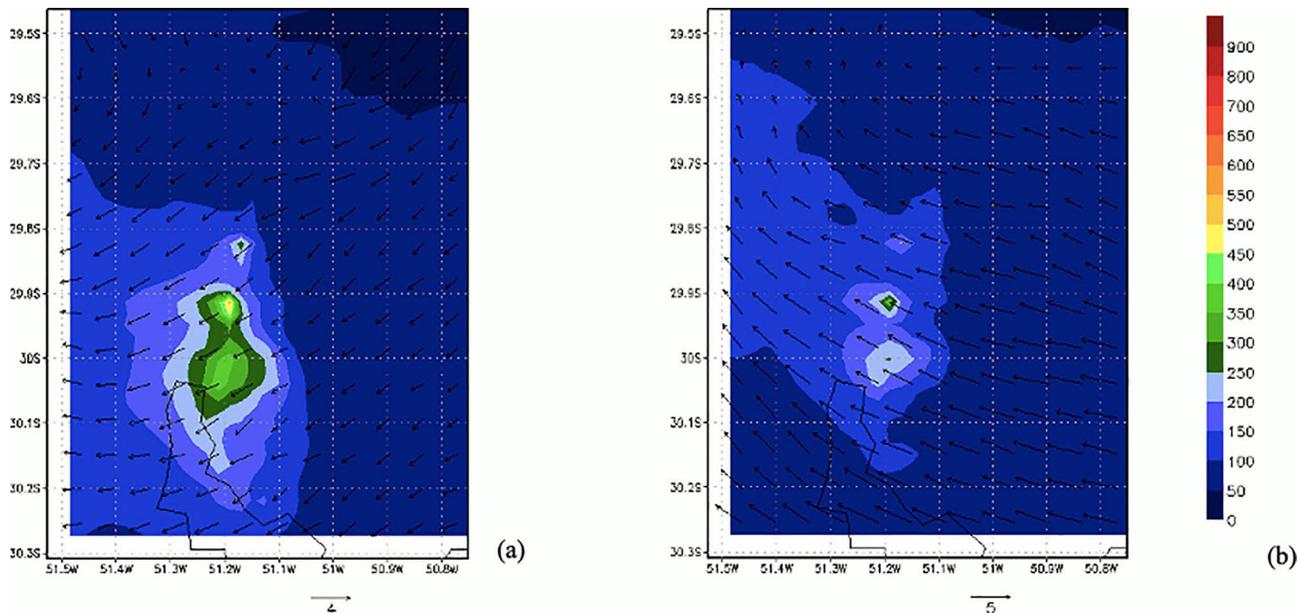


Figura 10 - Média horária das concentrações de CO (em ppbv) e vento (em m/s) simulados no período de 01/01/2009 a 25/01/2009 às 09 UTC (a) e 21 UTC (b).

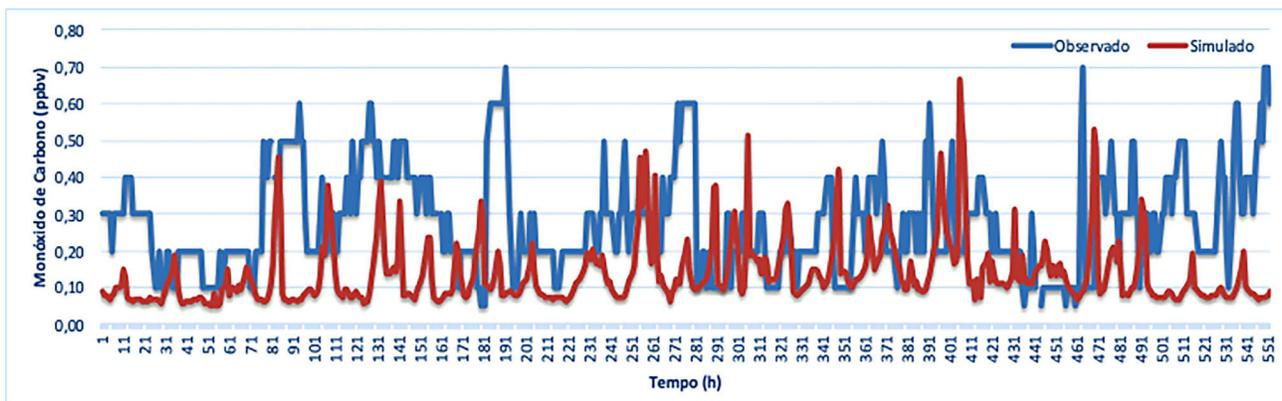


Figura 11 - Concentração de monóxido de carbono simulado pelo modelo CCATT-BRAMS (vermelho) e dados observados (azul) na estação de Esteio - ano 2016.

Tabela 5 - Análise estatística da Simulação 2016 com os dados observados para o poluente CO.

Estação	ME*	RMSE**	d***
Estação Esteio	-0,12	0,22	0,50

*Erro médio;

**Raiz do Erro médio;

***Índice de concordância de Willmot.

boa parte da pluma de poluentes emitida pelas cidades de Esteio, Canoas e Sapucaia do Sul é transportada para as cidades localizadas mais ao centro do estado do RS. De fato, se analisarmos somente a cidade de Porto Ale-

gre (capital), a emissão local responde somente por aproximadamente 60% da concentração de CO na Sim.09 e 55% na Sim.16, o que evidencia uma contribuição regional significativa das cidades localizadas

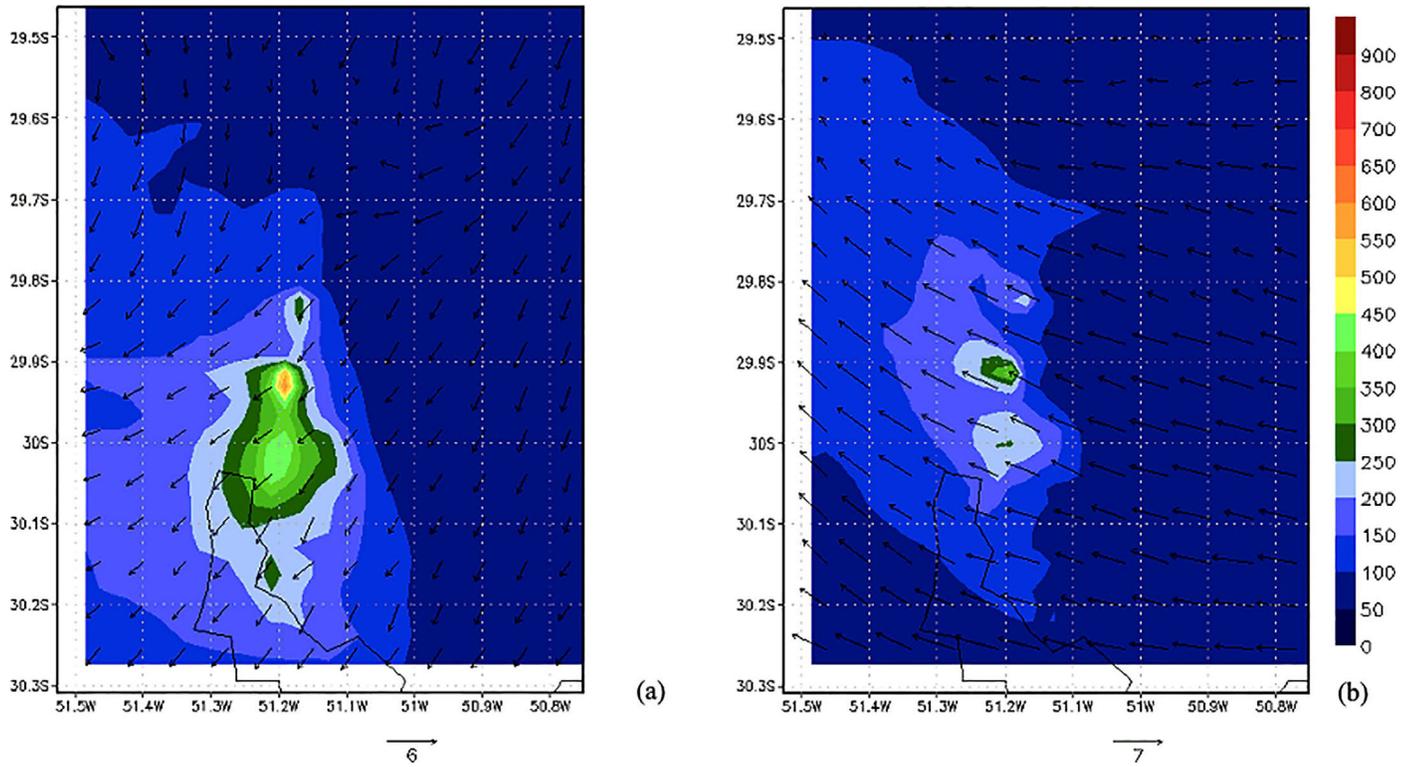


Figura 12 - Média horária das concentrações de CO (em ppmv) e vento (em m/s) simulados no período de 01/01/2016 a 25/01/2016 às 09 UTC (a) e 21 UTC (b).

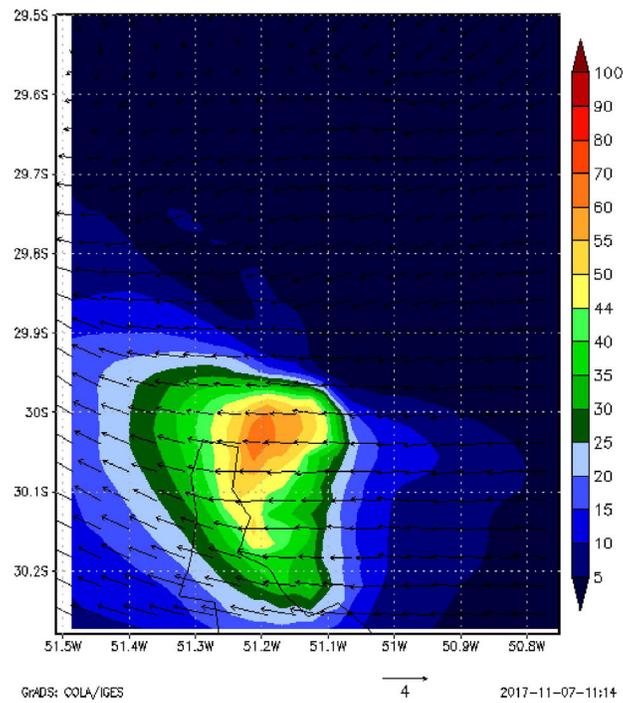


Figura 13 - Porcentagem de contribuição relativa média (%) da cidade de Porto Alegre para a concentração regional de CO, entre o dia 01/01/2009 (21:00 hora local) até o dia 25/01/2009 (00:00 hora local) $[\text{CO}(\text{Sim.09}) - \text{CO}(\text{footprint})/\text{CO}(\text{Sim.09}) \times 100]$.

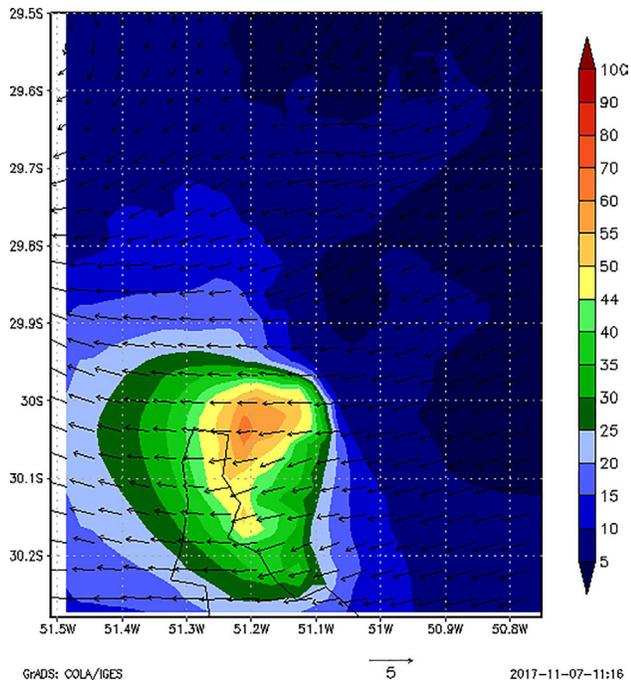


Figura 14 - Porcentagem de contribuição relativa média (%) da cidade de Porto Alegre para a concentração regional de CO, entre o dia 01/01/2016 (21:00 hora local) até o dia 25/01/2016 (00:00 hora local) [CO (Sim.16) – CO (*footprint*)/CO(Sim.16) × 100].

mais ao norte da RMPA na capital, para os períodos analisados.

4. Discussão e Conclusões

Quando se comparam a série temporal e ciclo diurno das estações analisadas no ano de 2009, percebe-se boa representatividade do modelo para as estações localizadas nos municípios de Porto Alegre, Esteio e Canoas. Com relação à cidade de Sapucaia do Sul, os valores simulados de concentração de CO subestimaram consideravelmente a observação. Uma provável causa é a localização da estação, que encontra-se fora da região central (área com 30% da emissão veicular total na distribuição espacial sugerida), no entanto, a hipótese mais plausível é que essa estação sofra influência de outras fontes emissoras locais e oriundas das cidades de Novo Hamburgo e adjacências, que não foram contabilizadas nas rodadas. Na simulação realizada para 2016, para a cidade de Esteio, houve uma subestimação, possivelmente vinculada aos campos atmosféricos simulados, principalmente em ambientes sinóticos com presença de centros de alta pressão. As médias horárias da concentração de CO no domínio escolhido, em ambas os anos, evidenciam a influência das brisas marítimas e lacustres na dispersão desse poluente sobre a RMPA.

Outro ponto importante neste trabalho é o transporte regional do monóxido de carbono na Grande Porto Alegre,

estudado através das simulações *footprint*. Quando se simula somente as emissões da Grande Porto Alegre, comparado com o experimento incluindo todas as contribuições (Canoas, Esteio e Sapucaia do Sul), foi possível verificar que as cidades ao norte da capital influenciaram significativamente a concentração de CO simulada sobre a Grande Porto Alegre (40%). Esse é um contraponto à premissa de que somente a cidade de Porto Alegre influencia as concentrações de poluentes nas cidades vizinhas da RMPA.

Esse trabalho traz uma proposta de distribuir espacialmente as emissões dos inventários da FEPAM num domínio de alta resolução espacial para a RMPA, além de incluir a influência da rodovia BR-116 na poluição registrada nessas cidades. Salienta-se que esse estudo apresentou uma proposta pioneira em georreferenciamento em mapas de vias para a região. No entanto, sendo os resultados promissores nessa primeira aproximação, sugere-se melhorar o inventário com o levantamento do volume de tráfego nas vias principais e com a inclusão de outras fontes de emissão, principalmente as industriais.

Referências

- ALONSO, M.F.; LONGO, K.; FREITAS, S.; FONSECA, R.; MARÉCAL, V.; PIRRE, M.; KLENNER, L. An urban emission inventory for South America and its application in numerical modeling of atmospheric chemical composition at local and regional scales. *Atmos. Environ.*, v. 44, n. 39, p. 5072-5083, 2010.
- BARBOSA, J.P.S.; VELHO, H.F.C.; FREITAS, S.R. Implementação de novas parametrizações de turbulência no BRAMS. *Ciência e Natura*, v. 111, Special Editial, p. 301-305, 2007.
- BRAGA, A.; BÖHM, M.G.; PEREIRA, A.A.L.; SALDIVA, P. Poluição atmosférica e saúde humana. *Revista USP*, n. 51, p. 58-71, 2001.
- CLIMANÁLISE. *Boletim de Monitoramento e Análise Climática*. São José dos Campos: CLIMANÁLISE, 2019. Disponível em <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman/> boletim, acesso em 17 jan. 2019.
- DETRAN-RS - Departamento Estadual de Trânsito. **Frota em Circulação no Rio Grande do Sul**. Relatório, DETRAN/RS, Porto Alegre, 2019. Disponível em <https://detran-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/202008/20135057-01-frota-do-rs.pdf>, acesso em 22 out. 2019.
- DOS SANTOS, A.F.; FREITAS, S.R.; DE MATTOS, J.G.Z.; DE CAMPOS VELHO, H.F.; GAM, M.A. *et al.* Using the Firefly optimization method to weight an ensemble of rainfall forecasts from the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS). *Advances in Geosciences*, v. 35, p. 123-136, 2013.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Plano Nacional de Contagem de Tráfego**. Disponível em <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/DadosTrafego>, acesso em: 26 out. 2020.
- FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. **1º Inventário de Emissões Atmosféricas**

- das Fontes Moveis do Estado do Rio Grande do Sul - Ano Base 2009.** Porto Alegre, FEPAM, 79 p, 2010.
- FREITAS, C.; BREMNER, S.A.; GOUVEIA, N.; PEREIRA, L.A.A.; SALDIVA, P. Interações e órbitos e sua relação com a poluição atmosférica em São Paulo, 1993 a 1997. **Competência: Revista Saúde Pública**, v. 38, n. 6, p. 751-757, 2004.
- FREITAS, E.D.; ROZOFF, C.M.; COTTON, W.R.; SILVA DIAS, P.L. Interactions of an urban heat island and sea breeze circulations during winter over the Metropolitan Area of São Paulo - Brazil. **Boundary - Layer Meteorology**, v. 122, n. 1, p. 43-65, 2007.
- FREITAS, S.R.; LONGO, K.M.; ALONSO, M.F.; PIRRE, M.; MARECAL, V *et al.* PREP-CHEM-SRC - 1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models, **Geosci. Model Dev.**, v. 4, p. 419-433, 2011.
- FREITAS, S.R.; PANETTA, J.; LONGO, K.M.; RODRIGUES, L.F.; MOREIRA, D.S. *et al.* The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas, **Geosci. Model Dev.**, v. 10, p. 189-222, 2017.
- GEVAERD, R.; FREITAS, S.R. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte I: Descrição da metodologia e validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 1-15, 2006.
- GRELL, G.A.; FREITAS, S. R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussion**, v. 14, p. 5233-5250, 2014.
- IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Relatório Brasileiro para a Habitat III.** Brasília: ConCidades, 139 p., 2016.
- LACERDA, A.; LEROUX, T.; MORATA, T. Efeitos tóxicos da exposição ao monóxido de carbono: uma revisão. **Revista de Atualização Científica**, v. 17, n. 3, p. 403-412, 2005.
- LONGO, K.M.; FREITAS, S.R.; DIAS, M.A.S.; DIAS, P.L.S. Numerical modelling of the biomass-burning aerosol direct radiative effects on the thermodynamics structure of the atmosphere and convective precipitation. In: **Proceedings International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (ICSHMO)**, Foz do Iguaçu, v. 1, n. 1, p. 283-289, 2006.
- LONGO, K.M.; FREITAS, S.R.; PIRRE, M.; MARÉCAL, V.; RODRIGUES, L.F.; *et al.* The Chemistry CATT-BRAMS model (CCATT-BRAMS 4.5): a regional atmospheric model system for integrated air quality and weather forecasting and research. **Geoscientific Model Development**, v. 6, p. 1389-1405, 2013.
- MOREIRA, D.S.; FREITAS, S.R.; BONATTI, J.P.; *et al.* Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): applications to numerical weather forecasting and the CO₂ budget in South America. **Geoscientific Model Development**, v. 6, p. 1243-1259, 2013.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Relatório Final.** Brasília, MMA, 114 p., 2014.
- SILVA, K.L.A.; ALONSO, M.F.; OLIVEIRA, L.P. Análise das Emissões Atmosféricas de Fontes Móveis para a cidade Pelotas -RS. **Ciência e Natura**. v. 38, Special Edition, p. 347-353, 2016.
- SOUZA, E.P. **Estudo Teórico e Numérico da Relação entre Convecção e Superfícies Heterogêneas na Região Amazônica.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 121 p., 1999.
- SOUZA, E.P.; RENNÓ, N.O.; DIAS, M.A.F.S. Convective circulations induced by surface heterogeneities. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 57, n. 17, p. 2915-2922, 2000.
- WILKS, D.S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. **International Geophysics Series.** 2^a ed., Cambridge: Academic Press, v. 91, 627 p., 2006.
- WILLMOT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, p. 1309-1313, 1982.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air Pollution and Child Health: Prescribing Clean Air.** Disponível em https://www.who.int/ceh/publications/Advance-copy-Oct24_18150_Air-Pollution-and-Child-Health-merged-compressed.pdf?ua=1, acesso em 27 mai. 2019.

Endereços de Internet

- CETESB: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>.
- IEMA: <http://energiaambiente.org.br/inventarios-de-poluentes-e-gee>.
- EPA: <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/air-emissions-inventory-guidance-documents>.
- Global Forecast System (GFS): <https://www.ncdc.noaa.gov/>.
- USGS topographic maps: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/national-geospatial-program/topographic-maps>.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.