

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**INVENTÁRIO DE MATERIAL PARTICULARADO EM MUNICÍPIOS COM
ATIVIDADES MINERAIS ESTABELECIDAS**

Coordenador do projeto: Dr. Ricardo Henrique Moreton Godoi

3º Relatório Técnico para Acompanhamento dos resultados obtidos
pelo projeto apresentado para supervisão e acompanhamento das
atividades pela **4ª Promotoria de Justiça do Foro Regional de Campo**

Largo da Comarca da Região Metropolitana de Curitiba/PR

CURITIBA

2024

Sumário

Equipe	3
Contexto da Pesquisa	4
Introdução	4
Objetivos.....	11
Objetivo Geral	11
Objetivos Específicos.....	11
MATERIAIS E MÉTODOS	13
Área de Estudo	13
Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar	14
Discriminação das Fontes de Emissão	23
Redes Neurais Artificiais.....	24
Obtenção, Processamento e Compartilhamento de Dados.....	25
RESULTADOS PRELIMINARES.....	27
Análise descritiva geral dos bancos de dados.....	27
Meteorologia e potenciais fontes de emissão	41
SÍNTESE.....	48
ANDAMENTO DO PROJETO	51
REFERÊNCIAS	54

Equipe

Prof. Ricardo Henrique Moreton Godoi, Dr.

Coordenador do Projeto.

Departamento de Engenharia Ambiental (UFPR)

Jéssica Caroline dos Santos Silva, Dra.

Pós-doutoranda do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental da UFPR.

Gabriel Bandeira de Lima

Bolsista de Iniciação Científica (CNPq).

Graduando do Departamento de Engenharia Ambiental (UFPR).

Igor Hernan Andrade Santos

Bolsista de Iniciação Científica (CNPq).

Graduando do Departamento de Engenharia Ambiental (UFPR).

Vanessa Abelaira dos Anjos.

Servidora da UFPR.

Laboratório de

CONTEXTO DA PESQUISA

Introdução

A população mundial atual é de aproximadamente 8 bilhões de pessoas, podendo atingir 10,4 bilhões em 2080 (UN, 2022). As cidades, em rápido crescimento, são severamente afetadas por problemas de poluição, visto que contém 55% da população e abrigam 85% da atividade econômica mundial (LANDRIGAN *et al.*, 2018). O avanço industrial e tecnológico vem sido favorecendo o crescimento exponencial da população mundial, fato que associado ao estilo de vida urbano e consumista fomentam a demanda por recursos naturais a fim de manter a circulação de capital e garantir o sustento dessa sociedade.

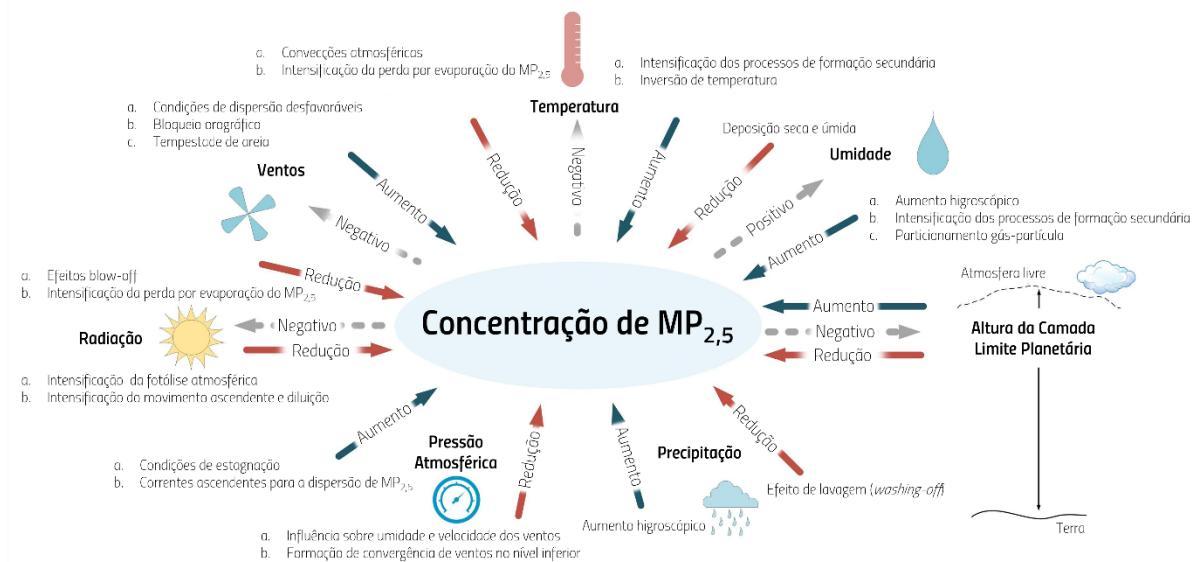
Os sistemas econômico, de produção e de transporte que sustentam o estilo de vida humano ainda são extremamente dependentes da exploração de recursos naturais limitados e não renováveis, tais como os minerais [cujas reservas, estima-se, possam ainda atender a demanda global apenas das próximas décadas (KESLER, 2007)] e combustíveis fósseis [que respondem por 80% da atual demanda global de energia (IEA, 2022)]. Sob todas essas circunstâncias, entre manter os hábitos da população e aumentar a produção de bens e

serviços, a demanda global de recursos materiais deve mais do que dobrar até 2050 (UN ENVIRONMENT, 2017).

Tal consumo intensivo é comprovadamente a principal fonte da emissão de substâncias que vêm alterando direta e indiretamente os limites planetários e provocando significativos danos ambientais, consistindo em um risco à qualidade de vida e à saúde humana (RÖCKSTROM *et al.*, 2009). A poluição atmosférica está associada a diversos problemas de saúde, que incluem desde uma simples irritação ocular e nasal até doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer (LELIEVELD *et al.*, 2015). De acordo com dados da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2023), a estimativa global de mortes associadas à poluição do ar é de quase 7 milhões de mortes prematuras, número significativamente superior àquelas relacionadas à outras poluições e ao risco ocupacional, sendo o material particulado fino MP_{2,5} um dos principais poluentes associados (LANDRIGAN *et al.*, 2018). No Brasil, a poluição do ar está associada à morte de aproximadamente 60 mil pessoas a cada ano, por doenças como câncer de pulmão, ataques cardíacos e derrames cerebrais (GBD, 2019).

A dinâmica atmosférica é complexa e envolve os processos de emissão, transporte, transformação química e deposição dos poluentes. Embora emissões antropogênicas de poluentes atmosféricos sejam o principal causador da poluição do ar, condições meteorológicas são reconhecidos fatores determinantes do agravamento ou mitigação da poluição atmosférica por poluentes como o MP_{2,5} (Figura 1) (HE *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2020). Quando na atmosfera, estas partículas são afetadas por processos ambientais complexos e evoluem em tamanho e composição de acordo com a especificidade dos processos atuantes naquela determinada condição espaço-temporal. Em qualquer cidade, portanto, a qualidade do ar é resultado de complexos processos de emissão e dispersão e dependerá de uma ampla gama de fatores, tais como a localização e característica das fontes de emissão, e as características do ambiente, em termos orográficos e meteorológicos.

Figura 1 – Principais mecanismos e influências de fatores meteorológicos sobre a concentração de MP_{2,5} na troposfera.



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2020)

Como resultado, a assinatura geoquímica do material particulado (MP) na atmosfera é similar àquela da litosfera, diferenciando-se principalmente conforme alterações decorrentes das características específicas de uso e ocupação do solo local/regional, visto que em áreas urbanas (CHAMBERS *et al.*, 2016): 1) o material de origem natural é química e fisicamente alterado em função das necessidades de infraestrutura e processos industriais; 2) misturas heterogêneas de materiais de origem natural e sintéticos coexistem; 3) materiais são constantemente realocados para novos ambientes (e.g., do subterrâneo para superfície) onde são expostos a processos naturais (e.g., erosão eólica, hídrica e à radiação solar) e antrópicos (e.g., combustão); 4) muitos elementos e compostos químicos são introduzidos no ambiente em concentrações muito acima da natural.

Sendo assim, do uso, exploração e ocupação do solo à dinâmica das atividades de tráfego e industriais, áreas urbanas concentram produção e consumo de bens e serviços que consomem recursos naturais realocados, alterando-os física e quimicamente, e por vezes emitidos na atmosfera, onde são subsequentemente dispersos e depositados na superfície de solos e corpos hídricos, impactando não só a qualidade do ar, mas também ecossistemas terrestres e marinhos.

Neste contexto, a mineração é uma atividade essencial às demandas da sociedade, pois permite o acesso aos insumos minerais necessários para, e.g., o desenvolvimento industrial, a produção de alimentos, e a construção de obras de infraestrutura domiciliar, energética, hospitalar e viária, ou seja, suprem os recursos base para o crescimento demográfico e desenvolvimento econômico que garantem o bem-estar e a qualidade de vida da população. Contudo, também é uma atividade humana que retrata diretamente a poluição ambiental decorrente da dinâmica entre exploração de recursos naturais e a realocação de recursos minerais (seja matéria-prima, de interesse, ou resíduos do processo) entre as esferas ambientais (atmosfera, litosfera, hidrosfera e biosfera), e por consequência, das alterações químicas no ambiente, resultantes desse processo.

Das interações entre o ambiente geológico e a atmosfera, ressaltam-se como significativos: (i) os aspectos mineral e litológico das formações rochosas, importantes por definirem a composição químico-mineralógica do material particulado oriundo desta fonte; (ii) os tipos de solos (e sedimentos), e suas formas de uso, principalmente no contexto agrícola e urbano, que por sua vez estão associados ao volume de material que como 'poeira' acessa a atmosfera, e; (iii) as características da exploração mineral e/ou atividade industrial de transformação desenvolvida na área.

O setor mineral se destaca como importante para a economia brasileira pelo fato de o país possuir vastas reservas e estar bem-posicionado no comércio mundial de *commodities* minerais, composto por indústrias extractivas e indústrias de transformação mineral, que contribuem com ~3,2% do PIB brasileiro em 2020 (SANTOS, 2021). Neste setor, os minerais de interesse são divididos entre aqueles metálicos, energéticos, e os não metálicos. Os minerais não metálicos, embora também atendam a demanda da indústria de transformação para a produção de bens de consumo, como os demais, têm como principal destino a indústria da construção civil e suprir insumos para fomento da produtividade agrícola. Frente à tamanha demanda, contudo, os prejuízos ambientais são comumente esquecidos ou negligenciados.

Entre os minerais estratégicos, destaca-se a autossuficiência brasileira na produção de calcário (IBRAM, 2020), um recurso não-renovável cuja exploração no país remonta ao início do século XX, especificadamente à imigração italiana no Estado do Paraná, em municípios da Região Metropolitana de Curitiba (RMC), especialmente Colombo, Almirante

Tamandaré e Rio Branco do Sul – por possuírem solos com características similares àqueles encontrados na Itália – que trouxe consigo a cultura de utilização do calcário na agricultura e de produção de cal, que culminou consolidando-se com o crescimento da construção civil a nível nacional (CARON; HOELLER, 2014). De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Calcário Agrícola (ABRACAL), em todo o território nacional há jazidas para extração de calcário, somando 237 fábricas no país, dentre as quais mais de 60 empresas estão no Paraná, Estado que oscila entre a segunda e terceira colocação na produção nacional, gerando cerca de 3 mil empregos diretos (AEN, 2020). O Brasil deve à sua riqueza mineral sua posição como uma das maiores potências agrícolas do mundo. E a produção em larga escala de calcário, elemento fundamental para correção do solo e desenvolvimento das raízes, garante mais de 35 milhões de toneladas anuais desse mineral (AEN, 2020).

Como resultado, o Estado do Paraná é um grande produtor de insumos minerais não metálicos para uso direto na construção civil, ou para a fabricação de produtos nesse setor, tais como cimento, cal (tratamento de água, indústria alimentícia, farmacêutica e veterinária) e fabricação de tijolos, revestimentos e louças sanitárias, de forma que praticamente toda a produção é industrializada no próprio estado. As rochas carbonáticas exploradas para a produção de cimento, corretivo agrícola e cal contribuíram, em 2019, com a maior arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) do Estado (36,3%), que abriga três indústrias cimenteiras e diversas indústrias de corretivo agrícola e cal, que atendem não só o mercado paranaense, mas também exportam parte da sua produção (correspondendo a mais de 10% da produção nacional) (IAT, 2023a).

De 10-15% das rochas sedimentares que cobrem a superfície terrestre são rochas carbonatadas, quimicamente formada por carbonato de cálcio ou magnésio, silício e outros minerais salinos, resulta de processos de precipitação de material por agentes biogênicos ou químicos, originando-se basicamente a partir de fragmentos de esqueletos de organismos marinhos (tais como corais, foraminíferos e moluscos), e de, quando o caso, alterações químicas de depósitos de carbonato de cálcio em águas ricas em magnésio, que contém um alto percentual do mineral (GSG, 2023; KING, 2023). Dessa forma, o calcário é definido como rochas carbonatadas compostas por calcita (CaCO_3) e/ou dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), por vezes contendo matéria orgânica e outras impurezas como silicatos, fosfatos, compostos de enxofre e óxidos (TOMAS, 2007). Sendo caracterizado por um teor de carbonatos superior a 50%, e

classificado de acordo com o percentual de óxido de magnésio (MgO) contido na rocha em: calcítico (< 5%), magnesiano (entre 5 e 12%) ou dolomítico (> 12%).

Tipicamente em lavra a céu aberto, a mineração do calcário envolve atividades de extração, manuseio, moagem e transporte de material (Figura 2) que não só ocasionam alterações na paisagem, mas compreendem etapas de processo, beneficiamento e aplicação industrial potencialmente degradadoras do ar, água e solo. Nas atividades da mineração, grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados e a poluição do ar se torna um sério problema visto que material particulado de ampla faixa granulométrica e gases (e.g., dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, e monóxido de carbono) são gerados tanto pela queima de combustíveis fósseis em equipamentos e veículos pesados para transporte de material, mas também por emissões fugitivas pelos processos de mineração e estocagem de calcário (SONI; NEMA, 2021). Além disso, quando o destino é a transformação do calcário na cal ou fabricação de cimento, por exemplo, o processamento envolve a queima em fornos movidos a combustíveis minerais ou vegetais (assim como a mistura com outros minerais e produtos químicos, no caso das cimenteiras), emitindo poluentes como MP (contendo não só Ca e Mg, mas também Al, Si, Fe, S, Cl e K) e gases (CO, CO₂, SO₂, NO_x) (CRUMP *et al.*, 2000).

Figura 2 –. Imagens aérea da mineração de calcário em uma mina em Colombo/PR durante diferentes etapas do processo de exploração do calcário.



Fonte: Imagens retiradas do vídeo institucional Cal Cem - Colombo/PR (HausDrone, 2020).

A silicose é considerada a mais antiga, mais grave e mais prevalente das doenças pulmonares relacionadas à inalação de poeiras minerais, podendo causar o óbito (WEAKLEY *et al.*, 2014), e tem as atividades da indústria extrativa como responsáveis pelo principal ambiente de exposição às partículas de sílica, sua agente causadora (HARRISON *et al.*, 2005; AZEVEDO; SCHUTZ, 2021; STACH *et al.*, 2020). A exposição de trabalhadores e da população à concentrações severas de partículas cristalinas de diâmetro inalável emitidas pelas atividades de mineração em minas de calcário e suas redondezas, têm sido associado a diversos efeitos adversos à saúde pública e de trabalhadores diretamente envolvidos (SALEM, 2020). Em áreas de mineração no Paquistão, (>70%) trabalhadores indicaram entre os principais problemas de saúde associados a irritação da pele e problemas respiratórios (KHAN *et al.*, 2016). A exposição ao material particulado originado em indústrias de transformação do calcário, como as cimenteiras, por exemplo, tem sido associada a problemas de saúde como irritação da pele, asma, doença pulmonar obstrutiva crônica, parto prematuro, infertilidade, câncer de pulmão e de estômago (YANG *et al.*, 1996; MEO, 2004; TOLINGGI *et al.*, 2014; ADEYANJU; OKEKE, 2019). Na Palestina, Sayara *et al.* (2016) observaram que áreas agrícolas impactadas por poluentes do ar oriundos de áreas de exploração mineral têm sofrido uma redução de mais de 30% no rendimento anual das colheitas, devido à alterações fisiológicas e metabólicas das plantas, e degradação do solo. Em Colombo, Godoi *et al.* (2008) observaram evidências quanto ao risco de exposição da população e trabalhadores ao material particulado emitido por atividades de mineração de calcário dolomítico causarem problemas respiratórios devido à elevada taxa de deposição pulmonar dessas partículas finas (~25%).

Atualmente, o Estado do Paraná não possui uma rede de monitoramento de emissão de material particulado fino ($MP_{2,5}$) consolidada, o que dificulta um estudo da relação exposição-efeitos sobre a saúde da população. Tendo, assim, em conta o impacto social e econômico das indústrias extractivas e de transformação mineral, especialmente, da exploração de calcário na RMC, este projeto visa investigar a geração e dispersão de poluentes atmosféricos associados à essa atividade de mineração consolidada, e estimar o impacto da qualidade do ar resultante sobre a saúde da população residente.

Com este objetivo, será implementada uma rede de sensores de medição de MP_{2,5}, que, somado ao monitoramento de outros parâmetros de qualidade do ar regulamentados pela Resolução CONAMA 491/2018 (MP₁₀, CO, SO₂, NO₂ e O₃), possibilitará a construção de um banco de dados robusto para: i) diagnóstico da qualidade do ar em áreas de exploração mineral consolidada; ii) mapeamento das fontes de poluição por MP_{2,5} e identificação do potencial poluidor das atividades de mineração; e iii) estimativa dos possíveis impactos da exposição a poluentes do ar sobre a qualidade de vida da população residente e ecossistemas.

Dessa maneira, espera-se que o conhecimento e informações produzidas por esta pesquisa possam orientar empreendedores desse setor e subsidiar políticas públicas quanto à necessidade de monitoramento ambiental e controle da emissão antrópica de poluentes atmosféricos para elaboração de diagnósticos e estabelecimento de diretrizes de exploração e uso adequados (na perspectiva científica, ética e prática) dos recursos naturais, priorizando a minimização da deterioração da qualidade ambiental e o desenvolvimento sustentável das cidades.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Implementação e consolidação de uma rede de monitoramento online de MP_{2,5} em municípios da região metropolitana de Curitiba que tenham atividade de extração mineral consolidada – em especial, de calcário – a fim de estimar a concentração do material particulado e seu impacto na saúde da população residente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar uma rede de monitoramento online de parâmetros de qualidade do ar regulamentados pela Resolução CONAMA 491/2018: MP₁₀, MP_{2,5}, CO, SO₂, NO₂ e O₃;

- Analisar o comportamento temporal da concentração de poluentes atmosféricos (material particulado e gases) associados ao padrão meteorológico local;
- Distinguir e estimar a contribuição das atividades de mineração de calcário como fontes de emissão de MP_{2,5} (e outros poluentes) no ar ambiente, integrando a caracterização do perfil geoquímico de fontes à análise da dispersão ambiental dos poluentes;
- Diagnosticar a qualidade do ar em áreas de mineração de calcário por meio da caracterização da concentração e composição do MP_{2,5} amostrado;
- Investigar se há relação entre número de internações hospitalares por doenças respiratórias e cardiovasculares da população e os níveis observados de exposição ao MP_{2,5}.

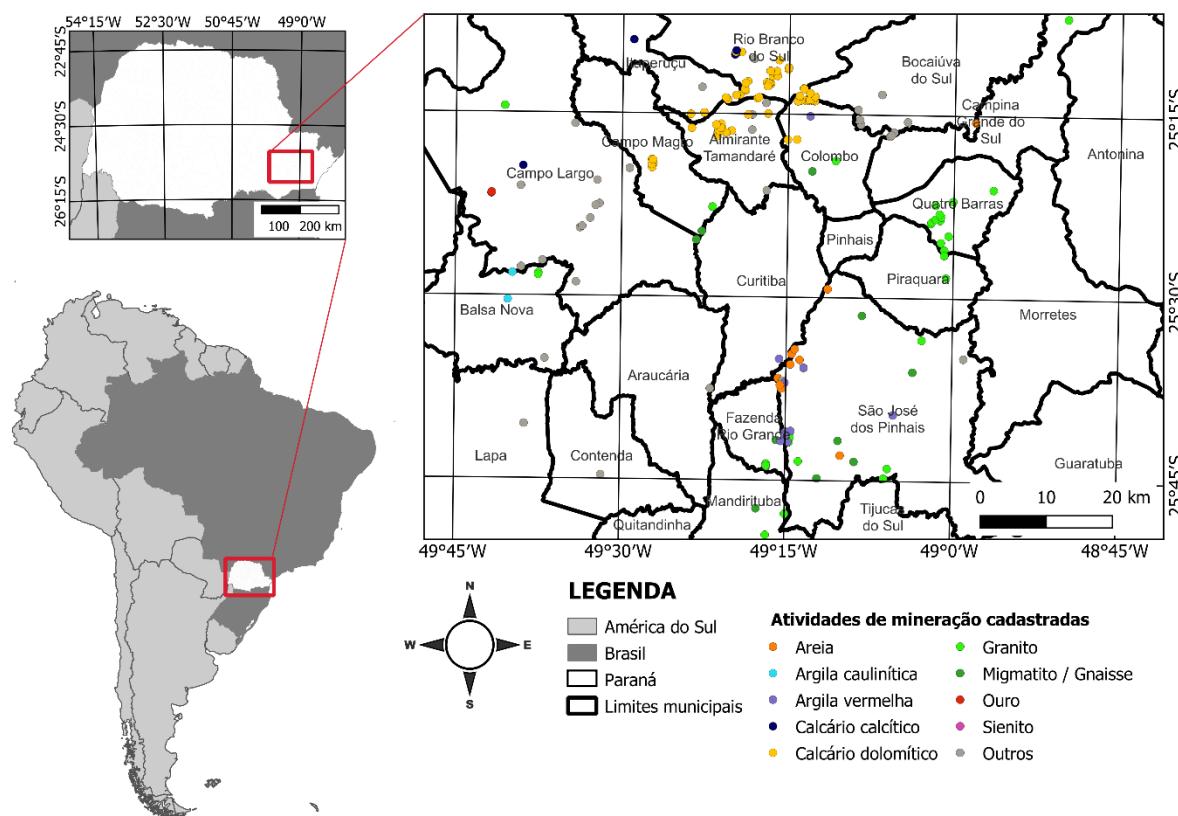
Materiais e Métodos

ÁREA DE ESTUDO

A presença de atividades de extração de calcário se destaca na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), que abriga mais de 70 minas ativas. Na Figura 3, são identificadas as localizações das principais minas ativas e substâncias lavradas de acordo com base de dados do Plano Diretor de Mineração (2004) disponibilizado pelo Instituto Água e Terra (IAT, 2023b).

Com o objetivo de investigar a geração e dispersão de poluentes atmosféricos pela mineração de calcário consolidada na Região Metropolitana de Curitiba, e estimar o impacto da qualidade do ar resultante sobre a saúde da população residente foi implementada uma rede de monitoramento de partículas e gases ($MP_{2,5}$, MP_{10} , CO, SO_2 , NO_2 e O_3). Sendo assim, neste estudo, locais estratégicos para instalação dos pontos de monitoramento foram selecionados conforme acessibilidade e potencial exposição aos poluentes do ar monitorados associados à mineração de calcário entre os municípios de Almirante Tamandaré, Campo Largo, Colombo, Itaperuçu e Rio Branco do Sul.

Figura 3 – Localização das principais minas ativas, classificadas pelas substâncias lavradas, na Região Metropolitana de Curitiba



REDE DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

O monitoramento da qualidade do ar está sendo realizado por uma rede de monitoramento composta por dois (2) monitores de gases e partículas em tempo real (Thermo Scientific GM-5000) em conjunto com 16 monitores de MP_{2,5} de baixo custo (PurpleAir PA-II-SD) (Figuras 4 e 5). Ambos os sensores permitem acesso online de dados em tempo real e de forma gratuita. Tanto os monitores quanto os sensores de baixo custo PurpleAir foram instalados em áreas potencialmente receptoras de poluentes atmosféricos (próximas ou à jusante de potenciais fontes de emissão) originado no processo de mineração e exploração de calcário (considerando como critério a direção dos ventos e a posição das fontes), tendo em conta que representem o risco de exposição da população residente. A distribuição da rede de sensores de monitoramento instalada é apresentada na Figuras 6.

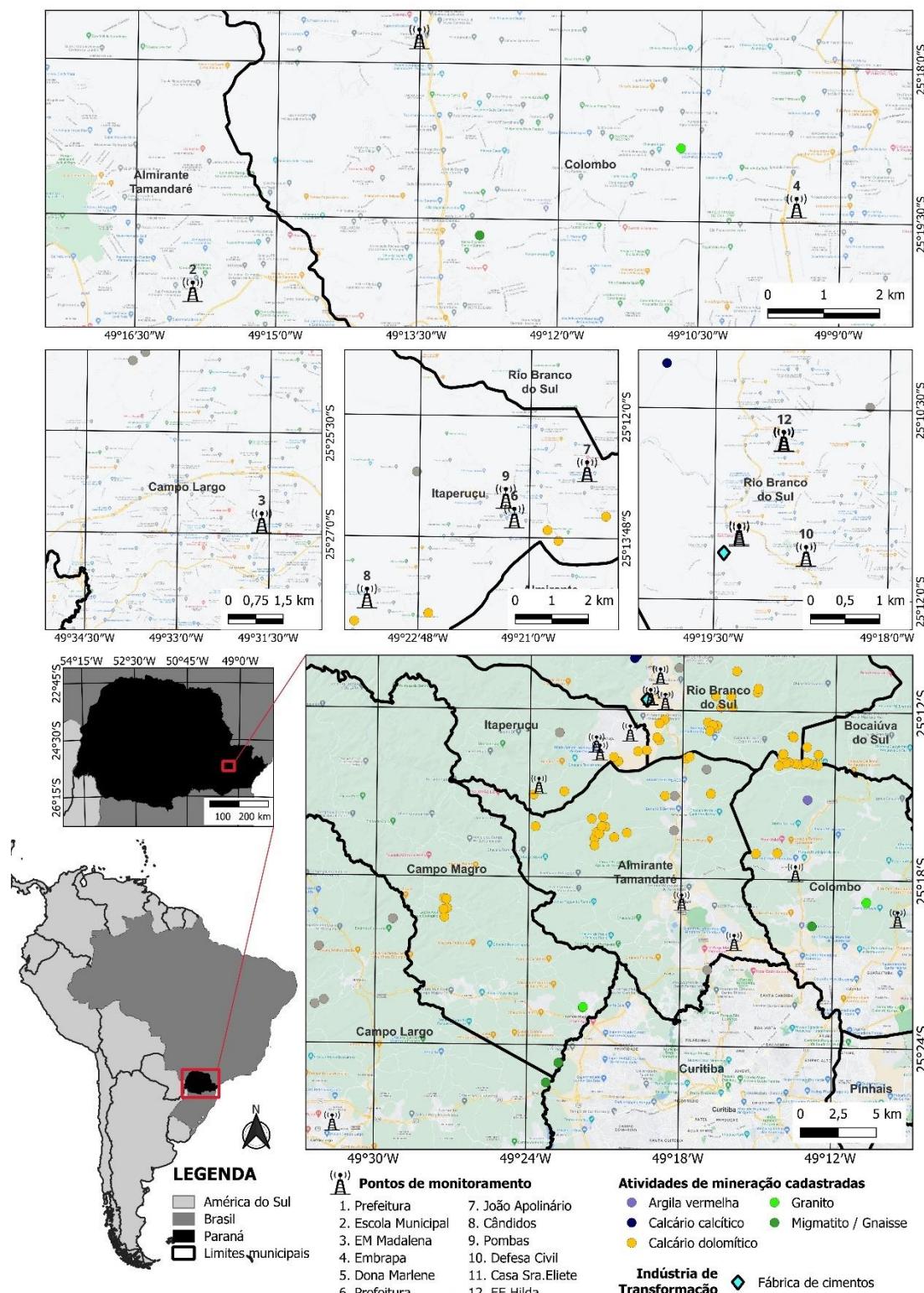
Figura 4 – Equipamentos de monitoramento utilizados no projeto



Figura 5 – Fotos dos locais onde estão instalados os sensores da rede de monitoramento implementada neste projeto



Figura 6 – Localização das principais minas ativas, classificadas pelas substâncias lavradas, na Região Metropolitana de Curitiba, e distribuição da rede de monitoramento de partículas (I – indoor e O – outdoor usando PurpleAir) e gases (T – Thermo GM-5000)



Fonte: Banco de dados disponibilizado no Plano Diretor de Mineração (2004) disponibilizado pelo Instituto Água e Terra (Disponível em <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Plano-Diretor-de-Mineração-para-Região-Metropolitana-de-Curitiba-2004>>).

O monitor GM-5000 de gases e partículas da Thermo Scientific utiliza um sensor óptico de alta sensibilidade (fotodiodo) que mede a quantidade de luz espalhada pelas partículas, após incidência de um laser “focalizado” e colimado, em função do seu diâmetro e formato. O sinal gerado é então enviado a um microprocessador para cálculo da concentração em número e distribuição granulométrica. As espécies gasosas, por sua vez, são medidas por um único sensor eletroquímico, que reduz ou oxida o gás de interesse, e gerando uma corrente que é diretamente proporcional à concentração da espécie gasosa. Esse equipamento é capaz identificar e quantificar sete dos parâmetros de qualidade do ar regulamentados pela Resolução CONAMA 491/2018: MP₁₀, MP_{2,5}, CO, SO₂, NO₂ e O₃. Tal monitor está instalado nas cidades de Rio Branco do Sul e Almirante Tamandaré (Figura 6).

O sensor PurpleAir PA-II-SD utiliza um contador de partículas (PMS5003) que usa dois lasers para detectar partículas com diâmetros de 0,3 a 10 µm a partir de sua refletividade, cujo valor é convertido em concentração mássica de MP_{1,0}, MP_{2,5} e MP₁₀ em µg·m⁻³. Esses sensores também registram dados de umidade e temperatura e serão instalados em pares para monitoramento interno/externo à prédios residenciais ou de prestadores de serviço a fim de estimar a potencial exposição diária tendo em consideração o tempo médio que o indivíduo permanece exposto em cada um dos ambientes.

Além disso, material particulado fino (MP_{2,5}) coletado em filtros de policarbonato nuclepore Whatman® (material inerte indicado por apresentar menor contaminação por metais, e menor risco de interferência nas análises de interesse deste estudo) (WATSON *et al.*, 2017; SIGMAALDRICH, 2020) usando um sistema que inclui um impactador inercial do tipo Harvard, à altura de ~1,8 m (zona de respiração humana, conforme Diretiva Europeia 2008/50/EC), conectado a uma bomba a vácuo, permitirá identificação e quantificação de metais marcadores de atividades minerais (tais como Ca, Mg, Al e Si) e discriminação de fontes. Tais amostras compreenderam coletas durante o verão e o inverno a fim de caracterizar a influência de condições ambientais na composição do MP_{2,5} durante o período mais seco e o mais chuvoso, respectivamente.

Uma primeira coleta de MP_{2,5}, representativa do verão, foi conduzida entre 16/jan e 20/fev de 2024 em uma escola de Rio Branco do Sul – tendo em conta critérios de viabilidade e exposição (Figura 7). Procedimentos de preparo, coleta e análise das amostras seguem procedimentos do Laboratório de Qualidade do Ar (Lab-Air/UFPR) considerando os

equipamentos utilizados e seguirão protocolos para controle, minimização e eliminação de contaminação que seguem padrões nacionais e internacionais já estabelecidos (NIOSH 0500, 1994; Diretiva Europeia 2008/50/EC; LPAE/LAPAt, 2009). A análise da composição elementar do MP_{2,5} será realizada por análise não destrutiva de fluorescência de Raios-X em Espectrômetro de Bancada EDXRF MiniPal 4 (PANalytical, Almelo, The Netherlands), enquanto a análise de fuligem (i.e., carbono negro) está sendo determinada com auxílio do transmissômetro SootScan™ Model OT21.

Figura 7 – Design da estrutura de amostragem de material particulado em filtros usando o impactador Harvard

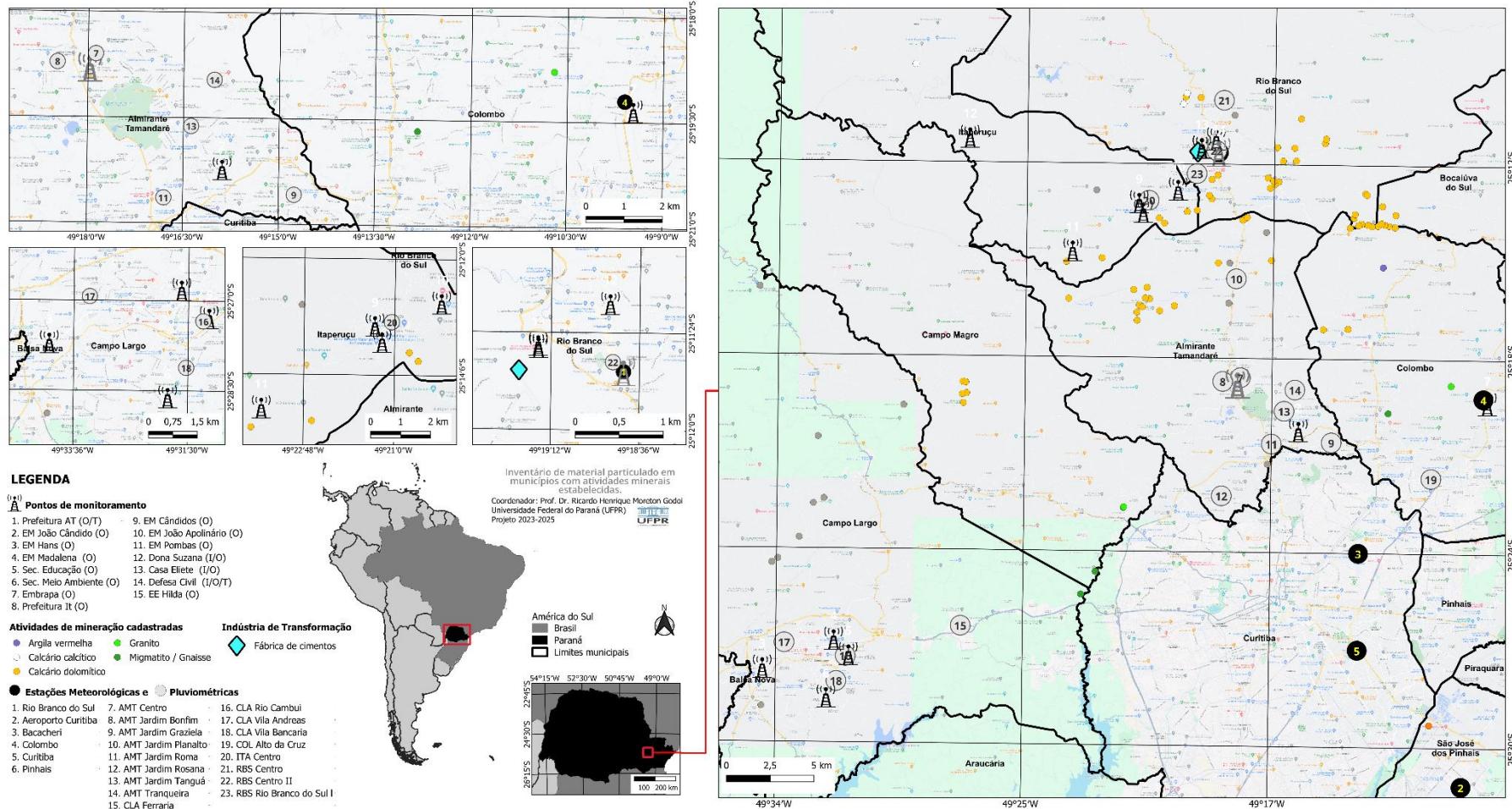


DADOS METEOROLÓGICOS

Meteorologia e orografia são fatores que regulam a capacidade assimilativa (i.e., o potencial de assimilação resultado da capacidade de diluição de determinada carga-

transporte de poluentes da atmosfera) de uma bacia área. Portanto, para melhor avaliar as condições ambientais que condicionam a qualidade do ar nos locais de estudo, dados meteorológicos de precipitação, direção e velocidade dos ventos, temperatura e umidade foram considerados. Os dados meteorológicos foram obtidos a partir do banco de dados das seguintes estações meteorológicas: i) da Secretaria Municipal de Meio Ambiente instalada na unidade da Defesa Civil; ii) dados históricos dos aeroportos em Curitiba e São José dos Pinhais [disponível no site do Iowa Environmental Mesonet (MESONET, 2024)]; e iii) dados do Instituto Nacional de Meterologia (INMET). Dados de precipitação foram também obtidos da rede de pluviômetros do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2020). A localização de tais estações estão indicadas na Figura 8.

Figura 8 – Localização das áreas de estudo em cidades da Região Metropolitana de Curitiba, Paraná. Em destaque (à esquerda), estão as cidades investigadas neste estudo: Almirante Tamandaré (AMT), Campo Largo (CLA), Colombo (COL), Itaperuçu (ITA) e Rio Branco do Sul (RBS). São indicados os locais de coleta de dados de monitoramento, localização das estações meteorológicas e pluviômetros e dos principais locais com estabelecida atividade de mineração e de transformação mineral



DETALHAMENTO DE DADOS

Dados dos sensores da Thermo: Os dados de material particulado ($MP_{2,5}$ e MP_{10}), de gases (CO, O₃, NO₂ e SO₂) e umidade relativa são coletados na Prefeitura de Almirante Tamandaré e na Defesa Civil de Rio Branco do Sul, com intervalo de leitura de 5 min. O banco de dados resulta da união dos dados 1) armazenados localmente e coletados *in situ* compreendem o período de 03/08/2023 a 21/12/2023, e 2) aqueles enviados à nuvem AWS, que inclui dados correspondentes ao período de 25/10/2023 a 28/03/2024.

Dados da rede de sensores de baixo custo, PurpleAir: Dados de material particulado (MP_1 , $MP_{2,5}$ e MP_{10}), umidade e temperatura internas ao sensor são monitorados por uma rede de sensores instalados nas cidades de Almirante Tamandaré, Campo Largo, Colombo, Itaperuçú e Rio Branco do Sul, com intervalo de leitura de 2 min. O banco de dados considerado na presente análise compreende o período entre apenas os dados disponibilizados online e que podem ser visualizados e obtidos abertamente por ferramentas da própria PurpleAir.

Além disso, orientações quanto ao download e preparação dos dados têm sido disponibilizados na página web do projeto (<<https://rmcqualidadedoar.netlify.app>>). Estes terão o caminho de acesso disponibilizados e atualizados periodicamente.

Dados meteorológicos: Dados de temperatura, umidade, precipitação, velocidade e direção do vento têm sido obtidos via i) uma estação meteorológica automática da Secretaria do Meio Ambiente de Rio Branco do Sul instalada na Defesa Civil, junto aos sensores utilizados neste projeto, com dados horários; ii) estações meteorológicas automáticas (dados horários, Colombo [B806], Curitiba [A807] e Pinhais [S827]) e convencionais (Aeroporto de Bacacheri (00H, 12H, 18H) [83011] e Aeroporto Internacional Afonso Pena em São José dos Pinhais (00H, 6H, 12H, 18H) [83840]) e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) <https://mapas.inmet.gov.br/>, Órgão Oficial de Meteorologia do Brasil. Os dados meteorológicos são coletados a partir dos protocolos estabelecidos pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM).

PREPARAÇÃO DE DADOS

Dados dos sensores de partículas e gases:

A remoção de outliers consistiu em remoção das leituras 'x' i) abaixo do 25º percentil e acima do 75º percentil de valores para os dados dos sensores Thermo; ou 2) abaixo do 5º percentil e acima do 95º percentil de valores para os dados dos sensores PurpleAir, tendo em consideração a regra expressa na Equação 1.

$$x > \text{Percentile3} + (\text{IPR} * 1.5) \mid x < \text{Percentile1} - (\text{IPR} * 1.5) \quad \text{Equação 1}$$

Os dados foram agregados em dados horários, sendo que foram considerados apenas os dias cujo número de leituras somou ao menos 50% do número total de leituras esperado para este intervalo de tempo.

Dados de dias com mais de 10h de dados faltantes foram desconsiderados. Os demais dias com valores faltantes tiveram os dados horários preenchidos com as respectivas médias horária para o período.

Dados meteorológicos:

Nesta fase da pesquisa, os dados meteorológicos são usados ainda em sua forma bruta. Futuramente, serão avaliados quanto à necessidade de homogeneização em caso de ausência de informações.

Para analisar as condições meteorológicas durante o período amostragem, os dados de monitoramento foram primeiramente agregados, respectivamente, com os dados das estações meteorológicas mais próximas – exceto alguns casos excepcionais – conforme indicado ao longo da discussão dos resultados. A seleção dessas estações de referência foi realizada tendo em conta: i) maior proximidade com os respectivos pontos de monitoramento; e ii) que apresentem dados meteorológicos que sofram provável menor influência de obstáculos físicos existentes entre a estação meteorológica e o ponto amostral que esta representa.

DISCRIMINAÇÃO DAS FONTES DE EMISSÃO

Para obtenção de perfis químicos quantitativos de fontes serão utilizados dois métodos de análise: a Análise de Componentes Principais Absoluta (ACPA) e o Modelo de Receptor *Positive Matrix Factorization* (PMF), pois têm sido satisfatoriamente aplicados em outros estudos envolvendo aerossóis (ECHALAR *et al.*, 1998; MAENHAUT *et al.*, 2002; POLEZER *et al.*, 2018).

O método de Análise de Componentes Principais Absoluta (ACPA) compreende a aplicação dos resultados da Análise de Componentes Principais (ACP) aplicada à matriz de dados original e outra ACP aplicada à matriz original com adição de uma linha nula, representando uma amostra de concentração zero ("caso zero"). Obtém-se uma matriz de *factor scores* para cada uma dessas ACPs. Subtrai-se da matriz de *factor scores* do conjunto original a última linha da matriz de *factor scores* do caso zero, e com isso obtém-se uma matriz de *factor scores* absoluta. Por fim, as concentrações absolutas para cada componente (fonte) são obtidas a partir de um ajuste entre a concentração medida da variável de interesse (variável dependente) e cada um dos *factor scores* da matriz de *factor scores* absoluta por regressão linear múltipla. A ACPA permite, assim, quantificar individualmente a contribuição de cada fonte identificada na ACP para cada amostra analisada no banco de dados (SWIETLICKI; KREJCI, 1996). Gerab (1996) e Pauliquevis (2007) demonstram com mais detalhes da aplicação desse método.

A identificação de potenciais fontes de material particulado na atmosfera pela aplicação do modelo de receptor *Positive Matrix Factorization* (PMF), por sua vez, baseia-se na caracterização química das partículas amostradas, resolvendo a Equação 2 com uso do software PMF5.0 da US EPA (PAATERO; TAPPER, 1994; US EPA, 2014).

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad \text{Equação 2}$$

em que: x_{ij} – é a concentração da espécie j na i-ésima amostra; g_{ik} – é a contribuição da k-ésima fonte na i-ésima amostra; f_{kj} – é a concentração da espécie j na fonte k; e_{ij} – é o erro.

O objetivo da abordagem por PMF é identificar o número de fatores p, o perfil de espécies f_{kj} de cada fator, e quantificar a massa da g_{ik} que contribuiu, para cada amostra,

para os diferentes fatores. Os valores de g_{ik} e f_{kj} são obtidos usando o Método do Mínimo Quadrado Ponderado minimizando o valor do parâmetro Q definido como indicado na Equação 3:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\left(x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \right)^2}{\sigma_{ij}^2} \quad \text{Equação 3}$$

em que: σ_{ij}^2 – é a incerteza da concentração da espécie j-ésima na amostra i.

Neste trabalho será aplicada a versão mais recente do modelo, no momento sendo a PMF5.0, em que certas especificidades foram adicionadas aos fatores dos perfis e/ou de contribuições para reduzir a ambiguidade rotacional. As variáveis de entrada serão classificadas usando o critério de Sinal-Ruído (Signal-to-Noise, S/N) (PAATERO; HOPKE, 2003). Soluções entre 3 e 7 fatores serão testadas, considerando-se 20 simulações. Aquela com menor valor de Q será então examinada para avaliar a identificabilidade das fontes. Incertezas na estimativa dos perfis e contribuições serão também consideradas usando o método de *bootstrap* (PAATERO *et al.*, 2014), um mapeamento em que a disposição dos fatores base de no mínimo 80% é exigida da solução com melhor número de fatores para esses valores de reamostragem *bootstrap*.

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A Rede Neural Artificial (RNA) é uma metodologia alternativa ao uso de regressão estatística para avaliar os impactos da qualidade do ar sobre a saúde humana, pois trata de relações não lineares e apresenta complexa capacidade de aprendizagem e ajuste (HAYKIN, 2009; BORGES, 2008; POLEZER *et al.*, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2020).

Sendo assim, baseando-se em estudos que aplicaram essa metodologia (TADANO; SIQUEIRA; ALVES *et al.*, 2016; POLEZER *et al.*, 2018, ARAÚJO *et al.*, 2020), a performance da RNA na predição da influência da qualidade do ar sobre a saúde humana da população residente nas regiões de estudo, serão comparados dados de admissão hospitalar da população devido à doenças respiratórias ou cardiovasculares (variáveis respostas) com concentração mássica de MP_{2,5} e variáveis climáticas (temperatura e umidade) (variáveis

explicativas), adotando defasagem temporal para avaliação do tempo de resposta à exposição, comparando quatro arquiteturas de rede: *Multilayer Perceptron* (MLP), *Extreme Learning Machines* (ELM), *Echo State Networks* (ESN) e *Radial Basis Function Networks* (RBF). O treinamento da RNA será conduzido para ajuste dos pesos de cada variável, seguido de validação e testes. Métricas de avaliação da performance do modelo e demais critérios de preparo do banco de dados e seleção de variáveis serão estabelecidos conforme literatura específica mais recente e análise da performance dos modelos testados com o banco de dados obtido no monitoramento.

Os dados de internações hospitalares serão obtidos utilizando o pacote “microdatasus” (no software R) elaborado por Saldanha, Bastos e Barcellos (2019), que permite fazer o download dos arquivos do DATASUS, o departamento de informática do Sistema Único de Saúde do Brasil.

OBTENÇÃO, PROCESSAMENTO E COMPARTILHAMENTO DE DADOS

A instalação, operação e manutenção dos equipamentos têm contado com o apoio das secretarias do meio ambiente e educação, moradores e outras instituições com os quais entramos em contato considerando: interesse no estudo, posição geográfica (em relação a fontes de emissão de poluentes, conforme dispostos nas Figuras 3 e 8), espaço e estrutura adequados à instalação dos sensores nas cidades de Almirante Tamandaré, Campo Largo, Colombo, Itaperuçu e Rio Branco do Sul.

O processamento e as análises descritivas e estatísticas dos dados são conduzidos usando a linguagem e software R e seus pacotes em RStudio. A elaboração de mapas é realizada usando QGis3. Ambos os softwares são gratuitos e de código aberto, e os bancos de dados e códigos a serem desenvolvidos durante esse projeto serão disponibilizados em repositórios online de acesso livre a fim de garantir a preservação dos dados, e a reproduzibilidade e replicabilidade da pesquisa a fim de contribuir com o fomento e capacitação de pesquisadores na produção do desenvolvimento científico e disponibilizar informações de caráter técnico aos profissionais do setor público.

Até o momento, dados da rede de sensores PurpleAir já podem ser acessados na página da própria empresa, conforme indicado na Figura 9. Uma página Web do projeto (Figura 10, <https://rmcqualidadedoar.netlify.app>) está sendo desenvolvida para tornar mais acessível os dados de todos os sensores, assim como mais informações do projeto, análise e resultados de estudos conduzidos pela equipe.

Figura 9 – Dados de monitoramento usando sensores PurpleAir. Dados abertos, e disponíveis em tempo real em: <<https://map.purpleair.com/>>

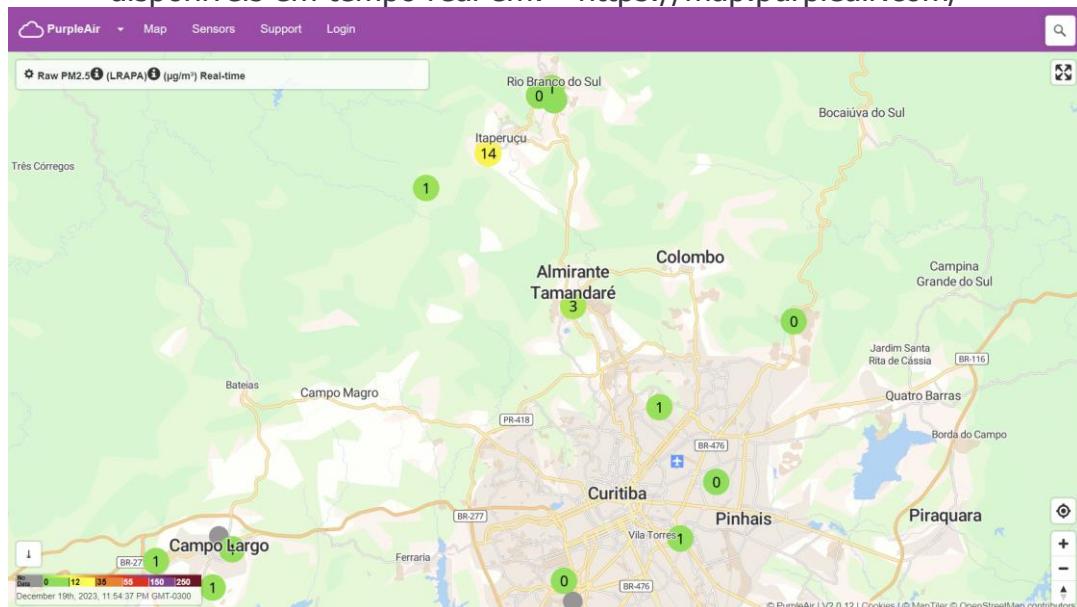


Figura 10 – Página Web do Projeto, onde dados, relatórios, códigos usados na análise de dados e outras informações sobre o projeto estão disponíveis online e abertamente. Acesso em: <<https://rmcqualidadedoar.netlify.app>>



Resultados preliminares

Análise descritiva geral dos bancos de dados

Nesta seção, são apresentados os resultados preliminares da análise de dados obtidos pela rede de monitoramento da qualidade do ar estabelecida pelo projeto “Inventário de material particulado em municípios com atividades minerais estabelecidas” para supervisão e acompanhamento pela 4^a Promotoria de Justiça do Foro Regional de Campo Largo da Comarca da Região Metropolitana de Curitiba/PR. Os dados compreendem o período de monitoramento de junho/23 a abril/24 coletados em cidades da Região Metropolitana de Curitiba.

“Caracterização Meteorológica”

Segundo a classificação de Köppen (1948), os municípios da Região Metropolitana de Curitiba compreendidos neste estudo possuem tipo climático Subtropical úmido com verões mais amenos (Cfb).

Histórico de dados das estações meteorológicas convencionais (i.e., Aeroporto Afonso Pena e Aeroporto de Bacacheri) foram selecionadas como representantes de padrões meteorológicos na região de estudo, visto sua aplicabilidade no cenário de aviação internacional, possuem um controle mais rigoroso quanto à manutenção dos equipamentos, exatidão e clareza dos metadados das estações meteorológicas e respeito aos padrões da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

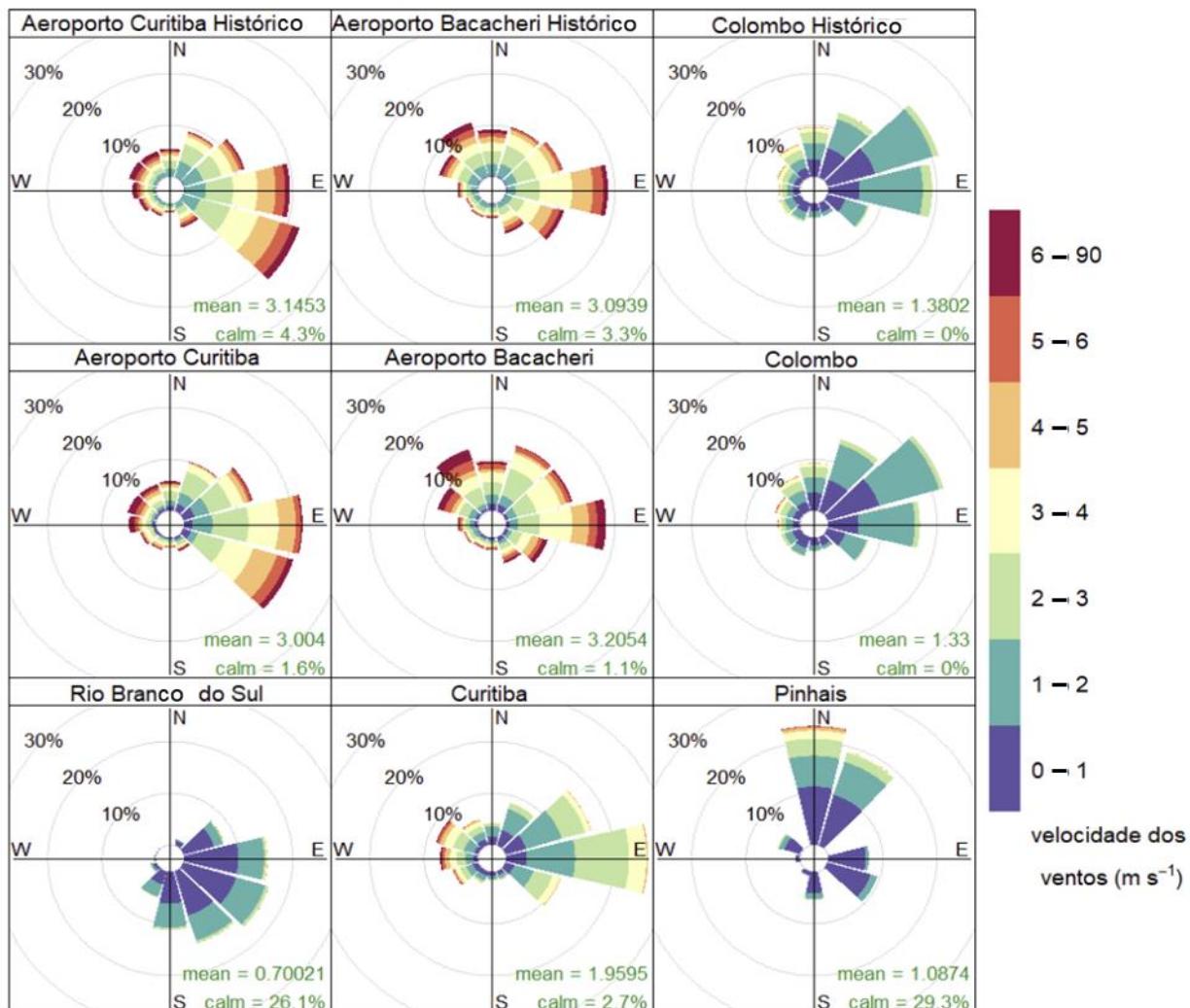
Considerando tais dados (Figura 11), um panorama geral dos dados meteorológicos do período de janeiro de 2010 a abril de 2024 disponibilizados no site da MESONET (2024) é apresentado a seguir:

- Aeroporto Afonso Pena (em *São José dos Pinais*, histórico): A temperatura média registrada foi de 17,4°C (mínima de 2,3 e máxima de 27°C), enquanto a umidade relativa variou entre 40 e 100%, com média de 84%. Ventos originam-se predominantemente do Sudeste (E, do 2º Quadrante. 4,3% de calmaria e velocidade média é de 3,1 m/s, com máximas de 10,3 m/s durante o período de estudo.
- Aeroporto Bacacheri (em *Curitiba*, histórico): Maiores valores de temperatura e menores de umidade foram observados. A temperatura média registrada foi de 19°C (mínima de 3,7 e máxima de 30°C), enquanto a umidade relativa variou entre 31 e 100%, com média de 76%. Ventos originam-se predominantemente do Leste (E, do 1º Quadrante. 3,3% de calmaria e velocidade média foi de 3,1 m/s.

Para fins de comparação, dados da estação meteorológica automática em *Colombo* (Figura 11), disponibilizados no site do INMET para o mesmo período histórico, registram valores similares: Temperatura média de 17,3 °C (com mínima de 3,5°C e máxima de 26°C), enquanto a umidade relativa variou entre 47 e 100% (com média de 85%). Ventos originam-se predominantemente do Nordeste (do 1º Quadrante). Não houve condições de calmaria e

a velocidade média observada foi de 1,4 m/s, aproximadamente metade daquela obtida pelas estações convencionais.

Figura 11 – Para o período de estudo, as rosas dos ventos ilustrativas da dinâmica dos ventos nas diferentes estações meteorológicas são apresentadas, com 'ws' indicando a velocidade do vento.



Durante o período de estudo, essas variáveis meteorológicas se mantiveram similares nestas estações, conforme pode ser observado na descrição da variabilidade de dados de temperatura, umidade relativa e precipitação apresentados na Tabela 1 e Figura 12, enquanto a variabilidade de direção e velocidade de vento é apresentada nas rosas do vento da Figura 11. A região apresenta-se caracterizada por médias mensais de umidade relativa superior a 70%, um limiar que quando excedido favorece a coalescência de partículas

suspensas na atmosfera, que se tornam pesadas o suficiente para serem sujeitas à deposição seca e úmida (LI et al., 2015; WANG; OGAWA, 2015; CHEN et al., 2020).

Além disso, para o período de estudo, foram considerados os dados meteorológicos registrados em outras estações meteorológicas automáticas situadas próximas à região de estudo (Curitiba e Pinhais) e em Rio Branco do Sul para fins de análise mais ampla da dinâmica regional dos ventos e seu impacto sobre a qualidade do ar à que a população está exposta. Essas informações são também apresentadas nas Figuras 11 e 12 e Tabelas 1 e 2, sendo importante destacar, para fins de comparação, que:

- *Curitiba*: Dados de maio/2023 a abril/2024. Temperatura e umidade relativa médias de 19°C e 81%, respectivamente. Ventos originam-se predominantemente do Norte (N, do 1º Quadrante. 25,3% de calmaria e velocidade média é de 1,2 m/s, com máximas de 7,0 m/s durante o período de estudo.
- *Pinhais*: Dados de maio/2023 a abril/2024. Temperatura e umidade relativa médias de 18°C e 87%, respectivamente. Ventos originam-se predominantemente do Leste (E, do 1º Quadrante. 1,9% de calmaria e velocidade média é de 2,1 m/s, com máximas de 10,3 m/s durante o período de estudo.
- *Rio Branco do Sul*: Dados de julho/23 a abril/24. Temperatura e umidade relativa médias de 20°C e 81%, respectivamente. Ventos predominantemente do Sudeste (SE, 2º quadrante), com calmaria 26% do tempo, velocidade média de 0,7 m/s, e de até 5,5 m/s. Diferença é observada somente durante os meses de inverno, quando ventos de Sul predominam ~40%.

Figura 12 – Dados diários de temperatura, umidade relativa e precipitação registrado nas estações meteorológicas automáticas do INMET na região de estudo. Gráficos de precipitação pluviométrica com nomes em caixa alta identificam estações pluviométricas do CEMADEN.

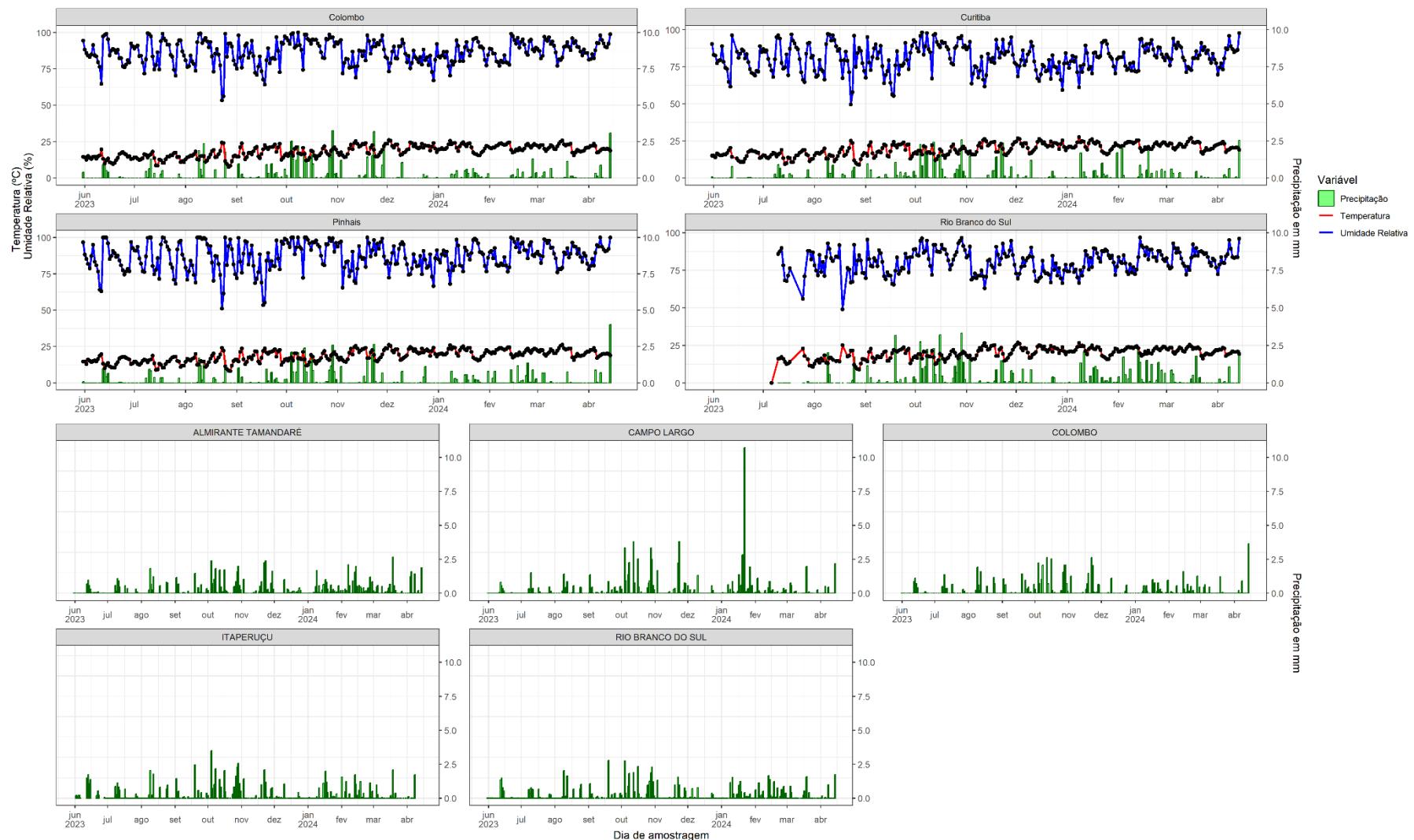


Tabela 1 – Análise descritiva de dados meteorológicos (temperatura, umidade e precipitação acumulada) de acordo com a média entre as estações pluviométricas da CEMADEN em cada município durante o período de estudo

Estação Meteorológica	Estatística	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Precipitação (mm)
Aeroporto, Curitiba (histórico)	Média	17,4	84	
	Desvio Padrão	3,8	8,2	-
	Máxima	27	100	-
	Mínima	2,3	40	
Aeroporto, Bacacheri (histórico)	Média	19	76	
	Desvio Padrão	4,1	12	-
	Máxima	30	100	-
	Mínima	3,7	31	
Colombo (histórico)	Média	17,3	85	4,1
	Desvio Padrão	3,8	7,7	9,9
	Máxima	26,1	100	89
	Mínima	3,5	47	0
Aeroporto, Curitiba	Média	18,2	84	2,6
	Desvio Padrão	3,9	7,5	6,3
	Máxima	27,0	98	41
	Mínima	8,0	54	0
Aeroporto, Bacacheri	Média	19,8	78	3,4
	Desvio Padrão	4,2	11	8,5
	Máxima	29,7	98	49
	Mínima	8,9	47	0
Colombo	Média	18,1	87	4,6
	Desvio Padrão	3,9	7,6	12
	Máxima	25,9	100	109
	Mínima	7,4	51	0
Rio Branco do Sul	Média	19,7	81	6,6
	Desvio Padrão	3,8	9,2	14
	Máxima	26,6	99	95
	Mínima	0,0	49	0
Curitiba	Média	19,0	81	4,4
	Desvio Padrão	3,9	8,5	11
	Máxima	27,1	98	83
	Mínima	8,9	51	0
Pinhais	Média	18,4	87	4,5
	Desvio Padrão	3,9	8,9	11
	Máxima	26,3	53	96
	Mínima	8,2	100	0

Dados de precipitação foram obtidos do banco de dados da rede de pluviômetros do CEMADEN (2024) para o período de junho de 2023 a abril de 2024 e são apresentados na Tabela 2. Níveis de precipitação diária acumulada foram similares entre os municípios, com níveis maiores em Itaperuçú e menores em Colombo e Rio Branco do Sul. Na comparação mensal: i) maiores índices pluviométricos foram observados em outubro em todos os municípios, com totais variando entre 404 mm (Almirante Tamandaré) e 570 mm (Campo Largo); e ii) mínimas em dezembro, entre 45 mm em Itaperuçú e 68 mm em Almirante Tamandaré. É importante notar, que durante esse período, Campo Largo apresentou sua mínima em Junho (72 mm), pouca coisa menor do que o índice observado em Dezembro (76 mm).

Tabela 2 – Análise descritiva de dados diários e mensal de precipitação acumulada (mm), calculados a partir da média entre as medidas dos (N) pluviômetros da CEMADEN instalados em cada município durante o período de estudo

Município	N	Média diária ± desvio padrão	Mínima	Máxima	Média mensal ± desvio padrão
ALMIRANTE TAMANDARÉ	8	5,5 ± 10	0	58	154 ±104
CAMPO LARGO	4	5,6 ± 16	0	166	158 ±104
COLOMBO	1	5,2 ± 12	0	87	146 ±119
ITAPERUÇÚ	1	6,0 ± 13	0	80	162 ±134
RIO BRANCO DO SUL	3	5,2 ± 11	0	66	145 ±117

“Qualidade do ar”

Variação de médio-prazo (diária) dos poluentes

Descrição dos dados médios diários de concentração de MP_{2,5} observadas nos locais de estudo que compreendem a rede de monitoramento implementada por este projeto nas cidades de *Almirante Tamandaré, Campo Largo, Colombo, Itaperuçú e Rio Branco do Sul* são apresentadas na Figura 13 e Tabela 3.

Figura 13 – Distribuição das médias diárias (médio-prazo) de concentração de MP_{2,5} (obtida com sensores PurpleAir) em todos os municípios investigados neste estudo. Como referência, são apresentados os valores de i) mediana geral (entre todos os municípios) da concentração de MP_{2,5}; ii) a concentração média anual de MP_{2,5} considerada segura pela Organização Mundial da Saúde (2021); e iii) a umidade relativa (%) média – entre os valores usados para correção dos dados brutos de concentração de MP_{2,5} do sensor – observada por cada um dos sensores.

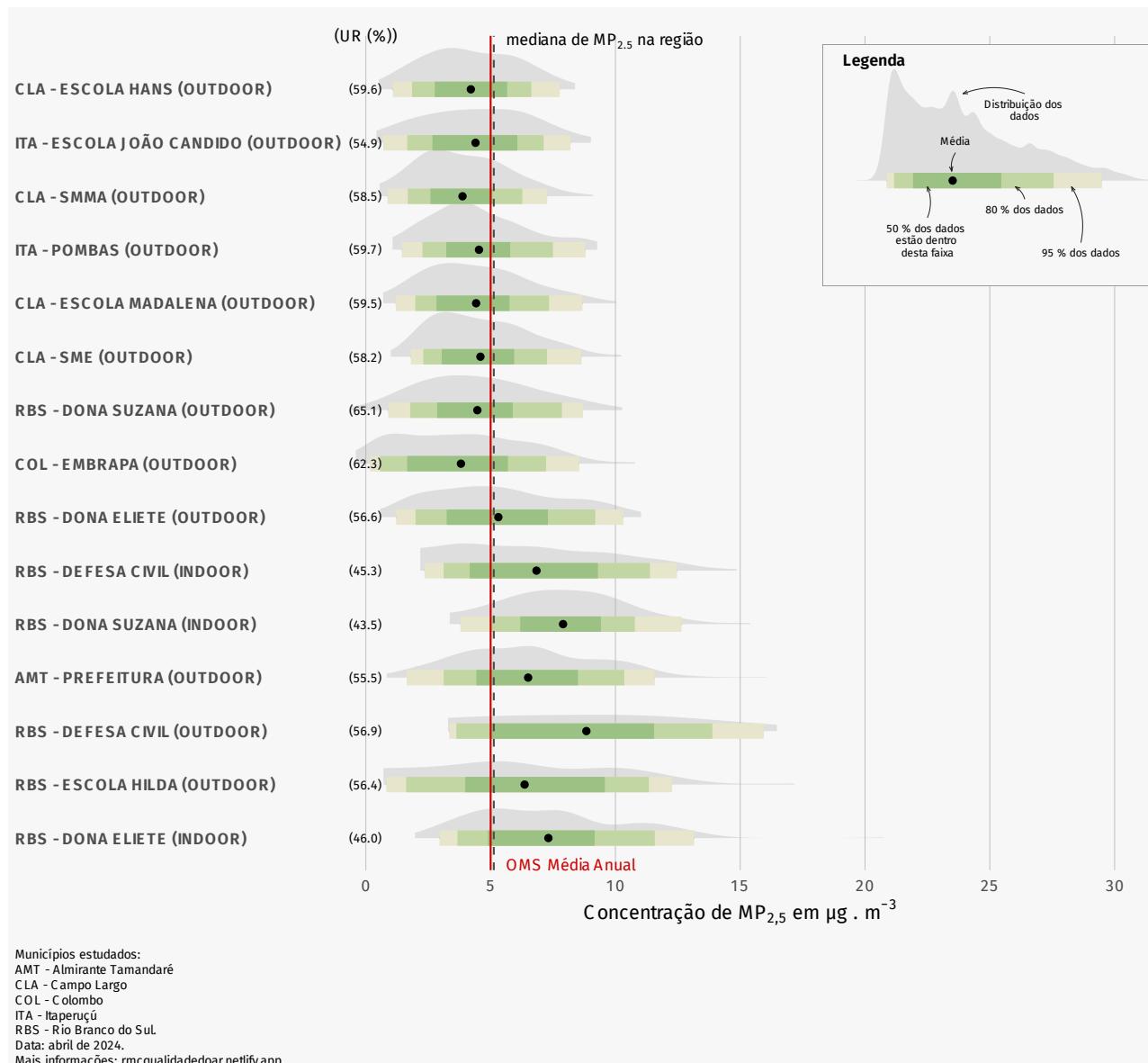


Tabela 3 – Estatística descritiva dos dados de concentração de MP_{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtidos pelos sensores PurpleAir instalados nos municípios da Região Metropolitana de Curitiba. Os valores apresentados correspondem aos valores mínimos e máximos observados entre os “N sensores” instalados em cada município

MP_{2,5}	Almirante Tamandaré	Campo Largo	Colombo	Itaperuçu	Rio Branco do Sul Indoor -Outdoor
N. sensores	2	4	1	3 (1 off)	4 O (1 off) e 3 I
N. dias registros	52 – 215	152 – 199	263	132 – 194	62 - 246
Mínimo	0,42 – 0,84	0,52 – 1,0	3,8	4,5 - 6,3	0,0 – 3,3 2,0 – 3,4
Mediana	4,2 – 6,8	3,8 – 4,3	3,7	4,1 – 6,3	4,3 – 8,8 6,4 – 7,6
99º Percentil	8,7 - 14	7,9 – 9,1	9,5	9,0 -11	9,3 – 16 14
Máxima	9,0 - 16	8,4 - 10	11	9,3 - 12	10 – 17 15 - 21

Os resultados preliminares já apontam para concentrações médias acima do valor médio anual limite de exposição seguro estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (Figura 13), com ambientes internos (indoor) atuando como concentradores de poluentes. Rio Branco do Sul e Almirante Tamandaré são os municípios que apresentaram concentrações médias para o período acima da média anual. Contudo, é importante ressaltar que os banco de dados ainda não comprehende muitos dados dos meses mais secos, tipicamente de inverno, que tendem a apresentar maiores concentrações de partículas suspensas na atmosfera.

Picos de concentração diária ultrapassaram os valores de referência da Organização Mundial da Saúde (OMS) frequentemente em Rio Branco do Sul (e.g., o 99º Percentil é usado como valor a ser comparado com o limite de concentrações de 24h da OMS indicativa de níveis seguros de exposição aguda, e traduz-se como concentração de poluente – daquele banco de dados – excedida de 3 a 4 vezes por ano). Foram observados cinco eventos com concentrações acima do limite diário de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, chegando em 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em ambientes internos. Além disso, dois eventos ultrapassaram esse limite em Almirante Tamandaré. Em ambos os locais, maiores concentrações foram observadas em agosto de 2023.

Os perfis de concentrações de gases (CO, NO₂, O₃ e SO₂) e partículas (MP₁₀ e MP_{2.5}) observadas usando o sensor GM-5000 em Almirante Tamandaré (AMT) e Rio Branco do Sul (RBS) são apresentados na Figura 14 e Tabela 4. De maneira geral, apontam para maiores concentrações de poluentes em RBS. Exceto por monóxido de carbono (CO) e ozônio troposférico (O₃), as médias de 24h e/ou a tendência de média anual observadas têm ultrapassado os limites seguros estabelecidos pelas diretrizes de qualidade do ar da OMS (indicados na Tabela 4).

Figura 14 – Variação diária (médio-prazo) da concentração de partículas e gases (via sensores Thermo) nos municípios de Almirante Tamandaré (AMT) e Rio Branco do Sul (RBS). Todos estão em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ exceto pelo *CO em mg/m^3 .

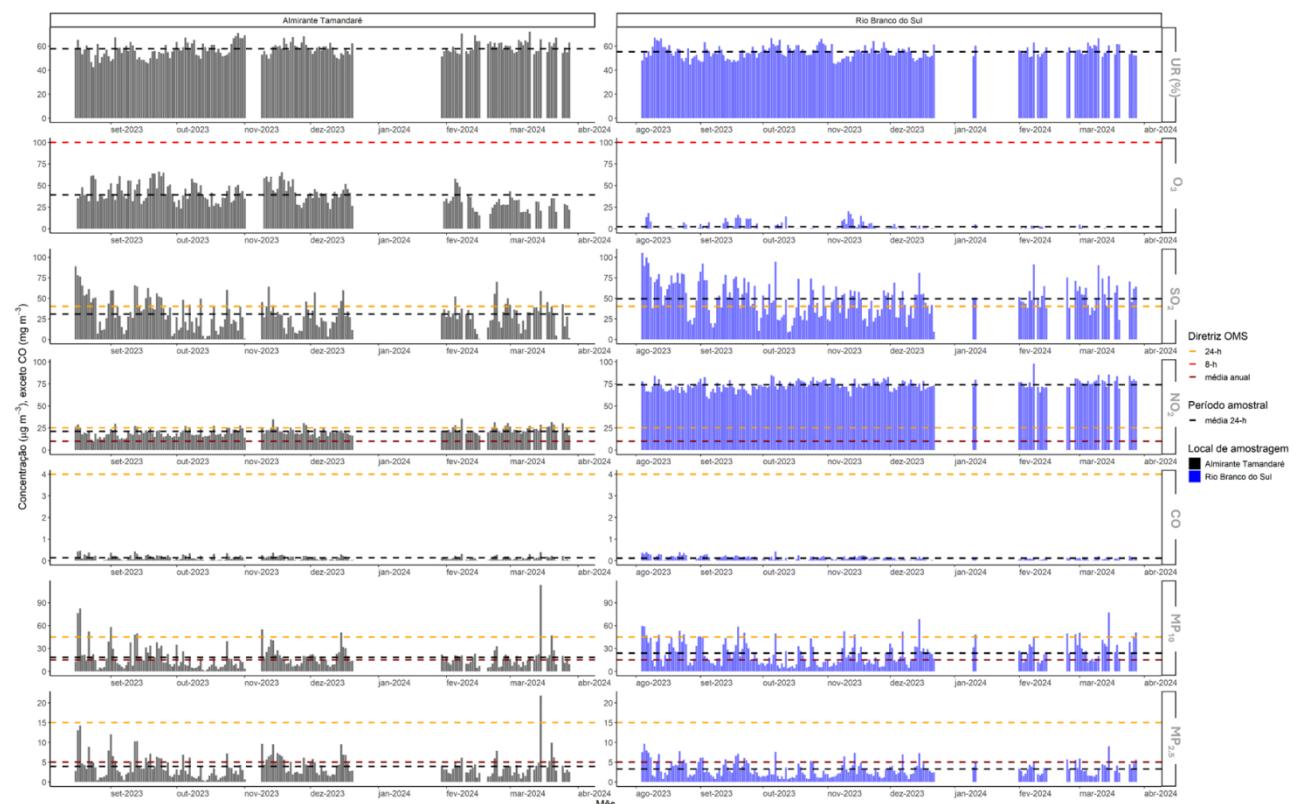


Tabela 4 – Estatística descritiva dos dados de concentração de partículas ($MP_{2,5}$ e MP_{10}) e gases (SO_2 , NO_2 , CO e O_3) obtidos pelas estações de monitoramento da Thermo instaladas nos municípios de Almirante Tamandaré (AMT) e Rio Branco do Sul (RBS). São indicadas as concentrações de referência, consideradas limites seguros, estabelecidas pelas diretrizes de qualidade do ar da Organização Mundial da Saúde (OMS AQG) em 2021. Todos estão em $\mu g/m^3$ exceto pelo *CO em mg/m^3 . Em negrito, valores acima do considerado seguro. Dados de 2023 e 2024, somam 170 dias de monitoramento em AMT (32% e 12% do total de dias dos respectivos anos) e 181 em RBS (38% e 8,7%, respectivamente)

Local	Valor	$MP_{2,5}$	MP_{10}	SO_2	NO_2	CO*	O_3
OMS AQG	Média anual	5	15	-	10	-	-
	24 h	15	45	40	25	4	-
	8 h	-	-	-	-	-	100
AMT	Mínimo (2023)	0,12	0,41	0,0	0,0	0,0	0,0
		0,25	1,32	0,0	0,0	0,0	0,0
		0,19	0,85	0,62	10	0,0	15,4
RBS	(período)	0,14	0,7	0,0	0,72	0,0	0,0
		0,55	2,15	0,0	3,96	0,0	0,0
		0,7	4,0	8,7	58	0,0	0,0
AMT	Mediana	2,82	12	8,8	17	0,09	30
		2,55	11	4,4	19	0,07	18
		3,23	15	29	20	0,12	38
RBS	Mediana	2,11	14	31	72	0,04	0,0
		2,64	21	38	74	0,03	0,0
		2,97	20	49	73	0,10	0,34
AMT	P99%	19	109	230	71	0,79	66
		19	92	261	87	0,66	55
		13	78	77	33	0,43	65
RBS	P99%	17	130	250	133	0,88	21
		14	130	285	147	0,47	9,1
		8,16	61	96	85	0,39	18
AMT	Máxima diária	14	80	85	33	0,44	67 ¹
		10	49	65	32	0,31	58 ¹
		22	113	89	36	0,45	66 ¹
RBS	¹ média 8 h	11	67	105	86	0,46	20 ¹
		6	55	71	84	0,21	7,8 ¹
		10	77	105	99	0,43	20 ¹

Em resumo:

- *Ozônio (O_3):* Não excedem os limites de referência da OMS. Concentrações foram significativamente superiores em AMT do que em RBS.

- *Dióxido de enxofre (SO_2):* Valores diários frequentemente excederam os limites considerados seguros. Médias de aproximadamente $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ foram observadas em AMT e de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em RBS.
- *Dióxido de nitrogênio (NO_2):* Concentrações foram significativamente superiores em RBS. Médias observadas de aprox. $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em AMT e de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em RBS durante este período de 7 meses. Concentrações de 24h frequentemente ultrapassam os limites seguros de exposição aguda.
- *Monóxido de carbono (CO):* Valores ínfimos de concentração, bem abaixo dos valores de segurança.
- *Material Particulado (MP):* Concentrações de MP_{10} superiores em RBS, enquanto de $MP_{2,5}$ foram superiores em AMT. Concentrações diárias de MP_{10} ultrapassaram os limites de referência da OMS alguns dias por mês em ambos os locais, contudo as concentrações médias de $MP_{2,5}$ estiveram em níveis seguros. Vale ressaltar aqui a discrepância entre os valores de $MP_{2,5}$ registrados pelos sensores da Thermo e aqueles da PurpleAir, à ser averiguada em futuras análises.

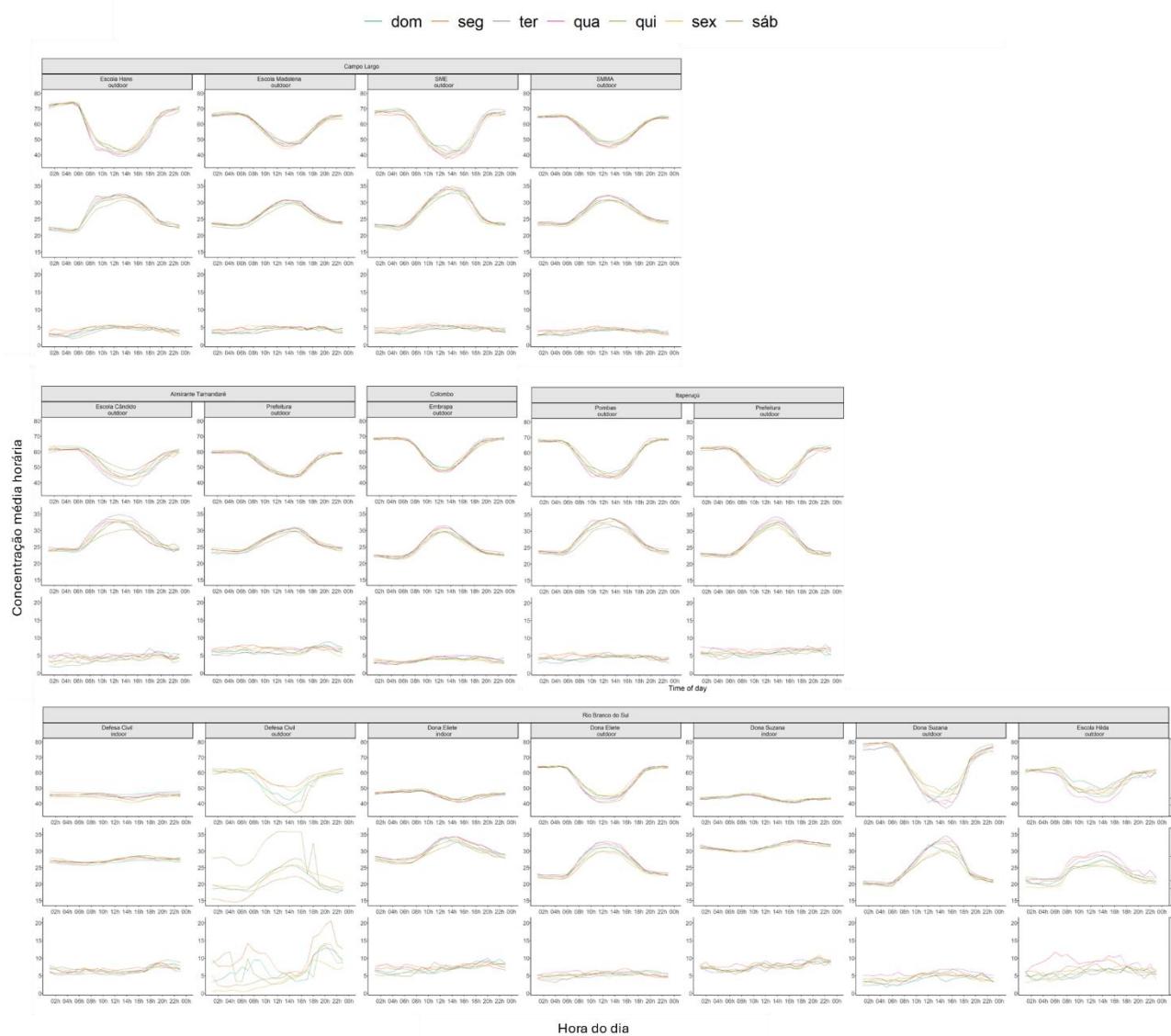
Variação de curto-prazo (horária por dia da semana) dos poluentes

É importante entender como os dados variam durante o dia e entre diferentes dias. Por exemplo, se dados horários que seguem um padrão regular durante um dia, mas seguem diferentes padrões na quarta-feira e sábado, a análise funcional é uma abordagem que permite detectar dias com concentrações anormais (outliers) na qualidade do ar.

Na Figura 15, pode-se visualizar os padrões diário ao longo das 24h de umidade relativa, temperatura e $MP_{2,5}$ nos diferentes dias da semana nos diferentes locais de monitoramento com sensores PurpleAir. Enquanto, na Figura 16, são apresentados estes padrões para os diferentes gases e partículas monitorados com os sensores da Thermo em Almirante Tamandaré e Rio Branco do Sul.

Entre os poluentes, não é possível distinguir claramente diferenças significativas entre os dias da semana. É possível notar, que locais cujo banco de dados é menor, é menos visível um padrão de concentração ao longo do dia (e.g., Escola Hilda e Defesa Civil, ambos outdoor, em Rio Branco do Sul – Figura 15).

Figura 15 – Variação horária por dia da semana (curto-prazo) da concentração de MP_{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), obtida com sensores PurpleAir) em todos os municípios de estudo.



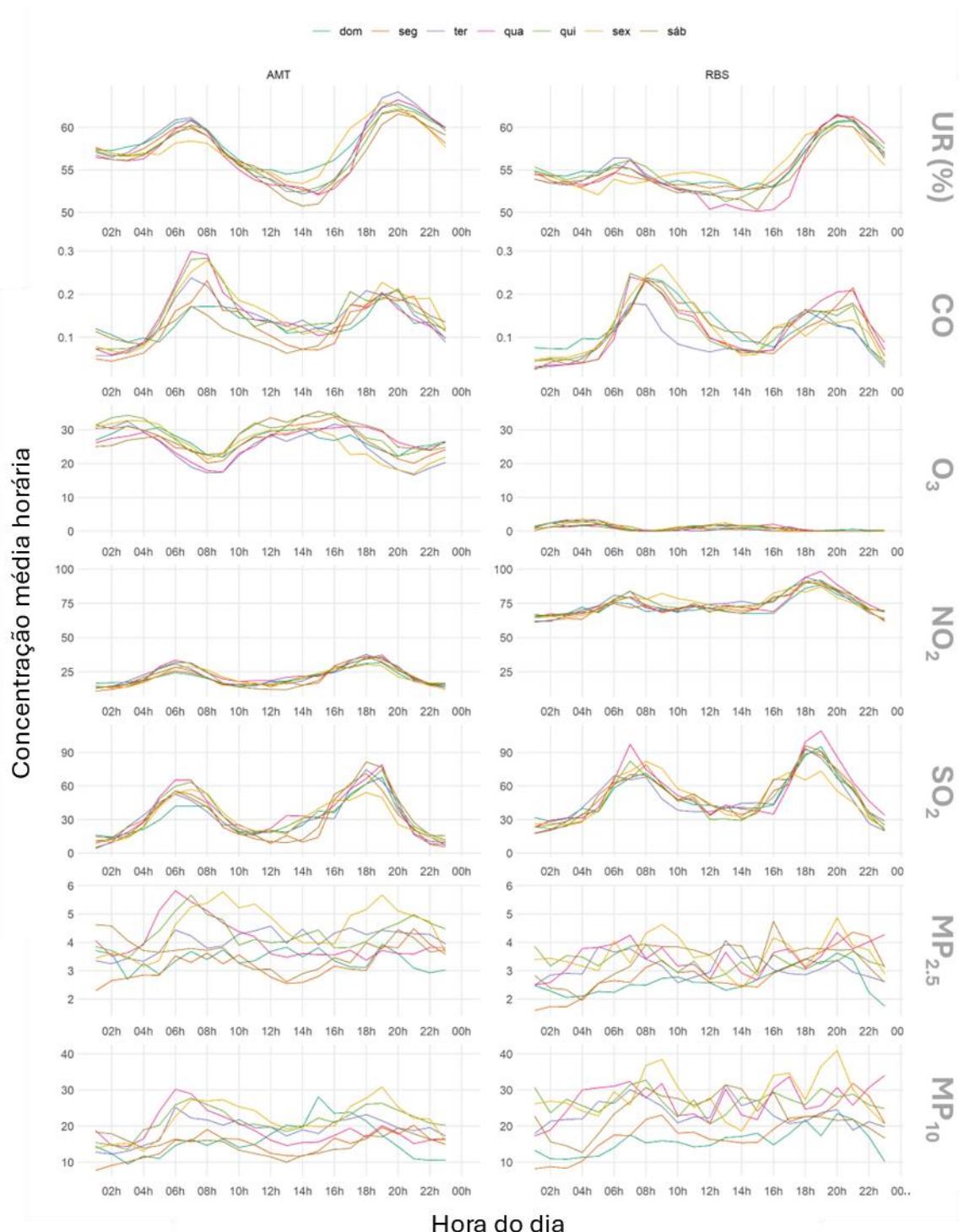
Internamente aos sensores PurpleAir, a umidade relativa variou entre 40% e 70% e a temperatura média variou entre 20 e 35º C em todos os municípios monitorados. Concomitantemente, valores de MP_{2,5} variaram entre 0 e 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nos sensores instalados em ambiente externo (outdoor), os mínimos de umidade e máximos de temperatura foram observados entre 12h e 16h, período em que MP_{2,5}. Contudo, MP_{2,5} não apresentou variação significativa.

Nos sensores instalados em ambiente interno (indoor), valores de amplitude (i.e., entre mínimos e máximos) foram reduzidos em comparação com os externos. Nestes sensores, entre 12h e 20 h, a umidade relativa reduziu enquanto a temperatura aumentou.

$\text{MP}_{2,5}$, por sua vez, foi superior em ambientes internos ($> 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Os valores também variaram mais entre os dias da semana em áreas internas.

Figura 16 – Variação horária por dia da semana (curto-prazo) da concentração de partículas e gases (via sensores Thermo) nos municípios de Almirante Tamandaré (AMT) e Rio Branco do Sul (RBS). Todos estão em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ exceto pelo *CO em mg/m^3 .



Meteorologia e potenciais fontes de emissão

Nesta seção, uma avaliação preliminar da qualidade do ar na região de estudo como resultado de condicionantes ambientais e agentes antrópicos alterando o ambiente local via uso e ocupação do solo, assim como geração de resíduos eliminados na atmosfera. Ressalta-se o caráter preliminar desta análise, visto que o banco de dados ainda é incompleto frente àquele que se pretende obter com este projeto e com a rede de monitoramento e que possibilitará uma visão mais ampla e consistente dos padrões e variações espaço-temporal da dinâmica ambiental de qualidade do ar na região.

“Quadro local de partículas e gases”

Para fins de descrição visual do uso e ocupação do solo na região de entorno das áreas de monitoramento de gases e partículas nos municípios de Almirante Tamandaré e Rio Branco do Sul, imagens de satélite das regiões são apresentadas na Figura 17.

Poluentes gasosos são de rápida transformação na atmosfera e, portanto, resultado das emissões características do perfil local de fontes e altamente suscetíveis às condições meteorológicas locais. Portanto, nesta fase do projeto, optou-se por analisar os dados obtidos pelos sensores da Thermo em confronto com os dados meteorológicos registrados pela estação meteorológica de Rio Branco do Sul, instalada na unidade da Defesa Civil, e mais próxima a ambos os locais de estudo. Sendo assim, na elaboração de gráficos polares bivariados do gradiente de concentração das partículas e gases monitorados em função da velocidade e direção ventos (Figura 18), assume-se que a dinâmica dos ventos é similar nos municípios para discriminação preliminar das fontes de emissão desses poluentes.

Figura 17 – Localização dos locais de monitoramento com sensores de partículas e gases da Themo: Almirante Tamandaré e Rio Branco do Sul. Em destaque, imagem de satélite da região de entorno, com localização das estações meteorológicas e pluviômetros e dos principais locais com estabelecida atividade de mineração e de transformação mineral

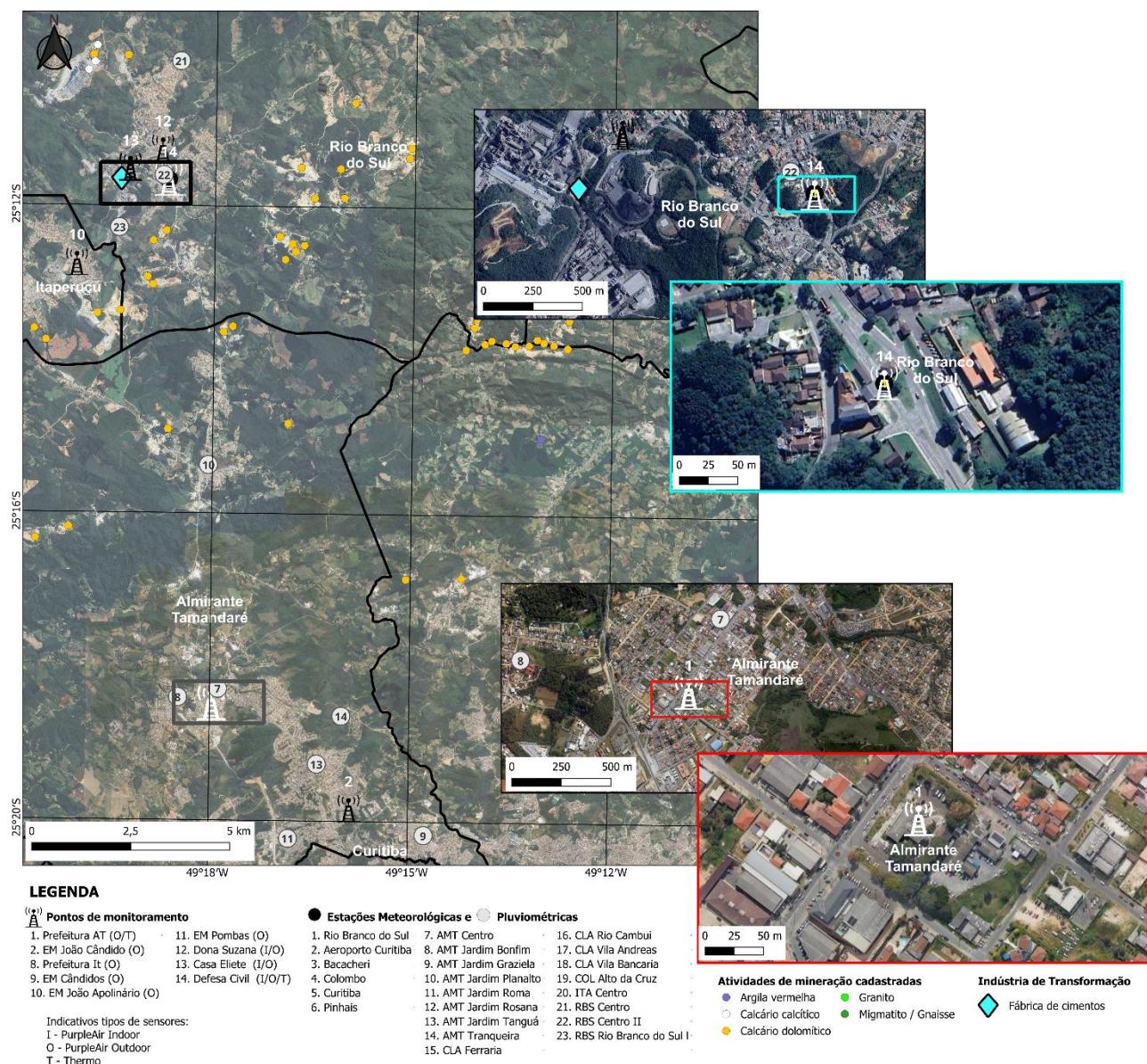
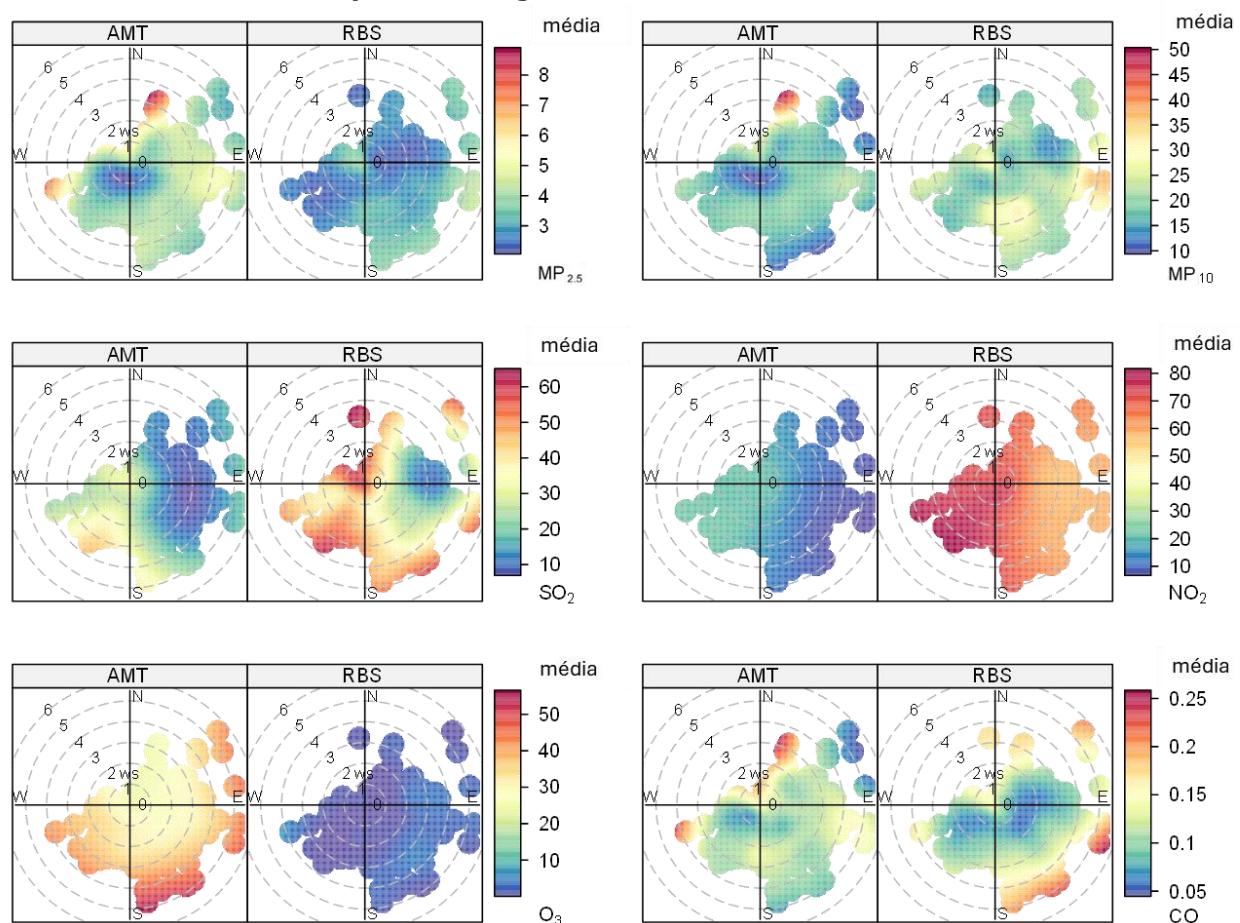


Figura 18 – Gráficos polares bivariados das concentrações de partículas e gases (gradiente de concentração) em função da direção e velocidade no vento (ws) durante o monitoramento com as estações da Thermo instaladas nos municípios de Almirante Tamandaré (AMT) e Rio Branco do Sul (RBS). Todos estão em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ exceto pelo *CO em mg/m^3 . Os dados meteorológicos considerados foram obtidos na estação meteorológica instalada na Defesa Civil em Rio Branco do Sul.



Os resultados obtidos até o momento, indicam, portanto:

- **Ozônio:** Concentrações em AMT >> RBS. Em **AMT**, o local de monitoramento encontra-se no centro da cidade, e assim, a combustão veicular intensa nas vias de contorno são potenciais locais de origem dos processos de formação de ozônio troposférico. Maiores concentrações ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sob ventos de 6 m/s, e menores ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sob $<3 \text{ m/s}$. Em **RBS**, as concentrações observadas foram inferiores a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Maiores concentrações sob velocidades de vento $>2 \text{ m/s}$. Concentrações próximas ao nulo quando sob calmaria. Portanto, provavelmente, por ser um local circundado por vias de baixo tráfego, a formação de ozônio troposférico parece ser menos favorecida.

- SO_2 : Concentrações em RBS >> AMT. Em **AMT**, maiores concentrações chegam via ventos de sudoeste, em sua maioria entre 30 – 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Em **RBS**, maiores concentrações chegam a 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de toda região Sudeste – Norte (sentido horário). Tal potencial origem indicada pelos ventos, provavelmente reflete o impacto do aporte mais direto de emissões da indústria de cimento em **RBS**, localizada neste sentido.
- NO_2 : Concentrações em RBS >> AMT. Em **AMT**, concentrações entre 20 – 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por ventos do 3 e 4º Quadrante. Em **RBS**, concentrações elevadas (acima de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) até 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indiferente de direção e velocidade dos ventos. Tal gradiente de concentração é provavelmente reflexo de sua origem primária e secundária em decorrência da diversidade de fontes (fixas e móveis) e suscetibilidade à condições meteorológicas.
- CO : Tanto em **AMT** quanto **RBS**, as concentrações variam de 0,05 a 0,25 mg/m^3 , máximas sob raros ventos do Norte (indiferente da velocidade dos ventos) em ambos os locais, e sob ventos de velocidade acima de 4 m/s originados no 1 e 2º quadrantes.
- *Material particulado*: maior frequência de ventos com concentrações intermediárias do 2ºQ ($MP_{2,5}$ entre 4 e 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e MP_{10} entre 20 e 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do 2ºQ) em ambos os locais.
- $MP_{2,5}$: maiores concentrações em **AMT**, carregadas por ventos de Noroeste (W – N, sentido horário), com máximas de 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De Leste, concentrações de até 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em **AMT** e de até 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em **RBS** são observadas com maior frequência.
- MP_{10} : Maiores concentrações são mais frequentes do 2º Quadrante em **RBS** (entre 25 e 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Em **AMT**, máximas de até 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ originam-se na porção Norte, enquanto valores de ~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ originam-se em área do 2º e 3º Q.

Partículas podem ser transportadas por longas distâncias, sendo assim, tendo em conta os dados das estações meteorológicas convencionais nos Aeroportos (São José dos Pinhais e Bacacheri), e o transporte a longa distância de material particulado, é possível observar a influência de ventos fortes (>8 m/s) vindos de NW com altas concentrações (até 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP_{10} e 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $MP_{2,5}$) de MP_{10} (>30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e $MP_{2,5}$ (>7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) em **AMT**, enquanto em **RBS** ventos de SW (todo 3 e 4ºQ) estão associados a altas concentrações de MP_{10} (>25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e $MP_{2,5}$ (4-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

“Quadro geral de MP_{2,5}”

Analisando o banco de dados de MP_{2,5} obtidos pela rede de sensores PurpleAir tendo em consideração duas hipóteses: 1) *Transporte a nível local* de material particulado em **i)** Itaperuçu e Almirante Tamandaré, municípios vizinhos a Rio Branco do Sul, sob condições de circulação de ventos similares às obtidas pela estação meteorológica localizada na Defesa Civil em Rio Branco do Sul, enquanto **ii)** a Estação Meteorológica em Colombo está instalada no mesmo local que o sensor; 2) *Transporte a nível regional* – i.e., para todos os municípios estudados: Almirante Tamandaré, Campo Largo, Colombo, Itaperuçu e Rio Branco do Sul – caracterizado por condições meteorológicas similares às obtidas pelas estações meteorológicas convencionais dos Aeroportos em Curitiba e São José dos Pinhais. Tendo-se tais considerações, analisou-se o gradiente de concentração de MP_{2,5} em função da dinâmica dos ventos (Figura 19), e observou-se que:

- A área urbana de **Rio Branco do Sul** tem sido caracterizada por material particulado oriundo predominantemente de fontes de emissão localizadas à Sudeste (i.e., de áreas localizadas no 2ºQ em relação à posição dos pontos de monitoramento). Na Figura 17, além das vias de tráfego central, podem ser observadas as posições das atividades de mineração de calcário localizadas nesta direção.

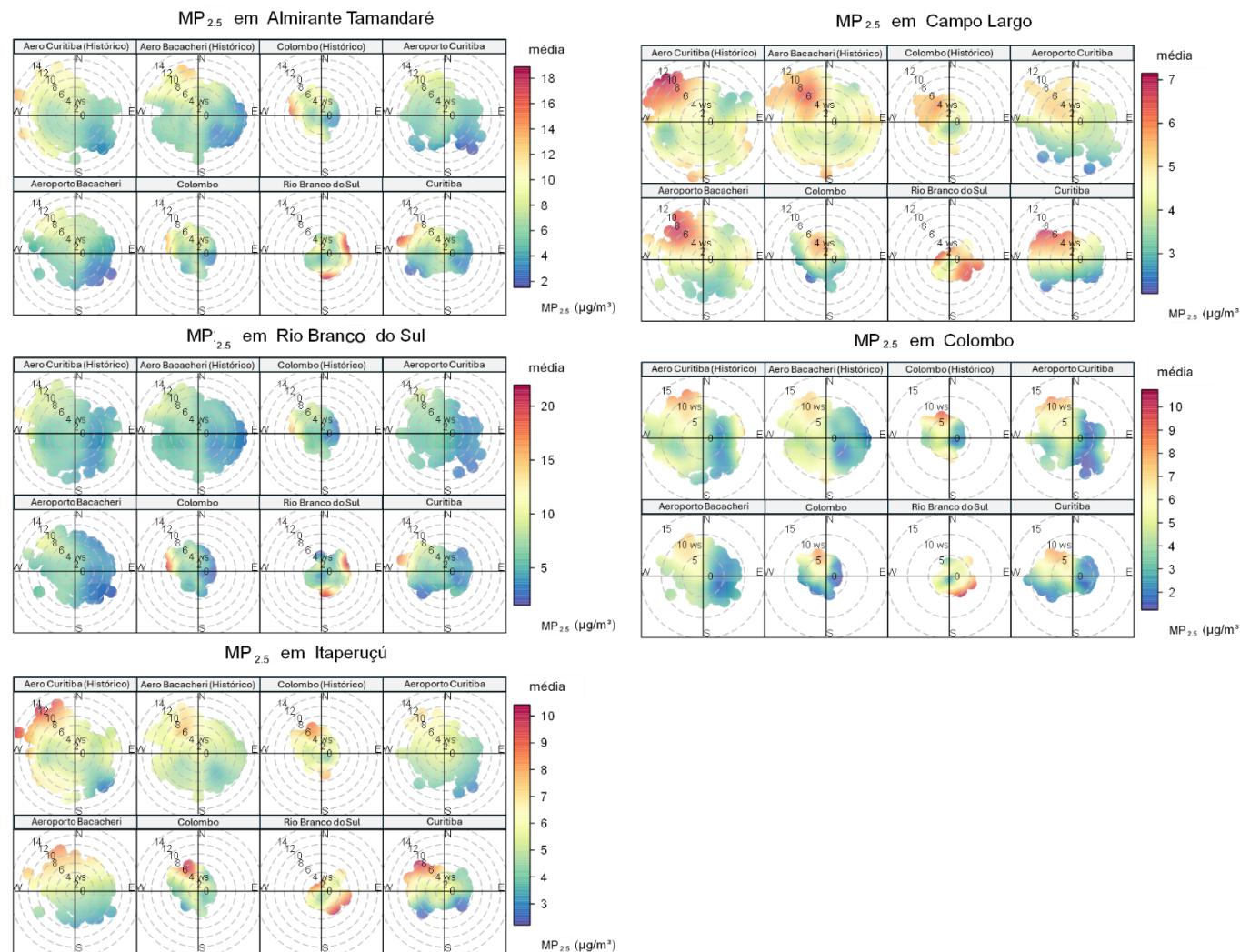
Considerando ambas as dinâmicas de ventos hipotetizadas, visto que as demais cidades não possuem estação meteorológica própria, e a posição dos locais de monitoramento em Itaperuçu (à oeste de Rio Branco do Sul) e Almirante Tamandaré (ao sul de Rio Branco do Sul, ambas ao Norte das estações meteorológicas convencionais:

- O município de **Itaperuçu** recebe a maior parte (i.e., visto que mais de 80% da frequência dos ventos são do 2ºQ) do aporte local de material particulado oriundo **i)** tanto das atividades de mineração de calcário dolomítico no próprio município, quanto daquelas instaladas nos municípios vizinhos (i.e., Rio Branco do Sul, Almirante Tamandaré e Colombo);

- Em **Colombo**, ambos as condições meteorológicas de transporte área de material particulado indicam uma baixa frequência de aporte de origem em áreas de exploração de calcário, mas maiores de áreas de atividade agrícola e outros usos de solo à Leste do ponto monitorado, visto que esta é a direção predominante dos ventos neste local.
- A exploração das áreas de calcário calcítico e dolomítico e atividades relacionadas à indústria cimenteira de transformação desse material instaladas na porção SW do município de Rio Branco do Sul (ao NE de Itaperucú e N de Almirante Tamandaré) caracterizam o aporte de caráter regional estimado tanto para a área urbana de Rio Branco do Sul, quanto para Almirante Tamandaré e Itaperucú.
- Em **Campo Largo**, a análise da dinâmica de ventos regional é a mais adequada, visto que o município não possui estação meteorológica. Ambas as estações convencionais indicam predominância de ventos da porção Leste (i.e., do 1 e 2ºQ), seguido por ventos de NW. Sendo assim, indicam predominância de aporte de material originário de atividades no grande centro urbano e rodovias da Região Metropolitana de Curitiba. Contudo, ainda apontam para o aporte de atividades de exploração e processamento de minerais presentes na porção NW do município.

Por fim, em **Rio Branco do Sul**, realizou-se um mês de coleta de material particulado em filtros de policarbonato durante o verão para análise química e testes de toxicidade. Tal amostragem será repetida durante o inverno a fim de se considerar na análise a influência de condições meteorológicas extremas na caracterização física e química do material particulado suspenso na atmosfera. Ao fim da análise desses resultados, será possível realizar uma discriminação mais específica de possíveis fontes de emissão via perfil químico neste ponto amostral e verificar parte das conclusões obtidas.

Figura 19 –Gráficos polares bivariados das concentrações de MP_{2,5} (gradiente de concentração) em função da direção e velocidade dos ventos (ws) durante o monitoramento com os sensores PurpleAir nos municípios de estudo da Região Metropolitana de Curitiba. Tal variação é comparada entre os dados meteorológicos obtidos nas diferentes estações instaladas na região de entorno, conforme indicado nos cabeçalhos



Síntese

O consumo intensivo e extensivo de recursos naturais limitados e não renováveis têm sido comprovadamente a principal fonte de emissões de poluentes para a atmosfera. As indústrias extractivas e de processamento mineral são diretamente responsáveis não só pelo declínio dos recursos naturais do planeta, mas também pela realocação de recursos minerais entre as esferas ambientais.

A posição consolidada do Brasil como grande produtor mundial de commodities agrícolas e produtos alimentícios correlatos se deve à sua riqueza mineral. O Estado do Paraná, no sul do Brasil, desempenha papel fundamental na exploração de minerais estratégicos, contribuindo notadamente para a autossuficiência brasileira na produção de calcário (essencial para atividades agrícolas e construção civil, por exemplo). Ao adicionar grandes quantidades de substâncias ao ambiente, a mineração de calcário e a indústria do cimento têm contribuído significativamente para a poluição atmosférica e para a desigualdade ambiental.

Desde junho de 2023, uma rede de sensores de monitoramento da qualidade do ar está operando em uma região cercada por uma mineração de

calcário estabelecida e uma das maiores fábricas de cimento do mundo. A rede inclui cinco cidades equipadas com monitores de partículas e gases ($MP_{2,5}$, MP_{10} , CO, SO_2 , NO_2 e O_3) de desempenho e custo-benefício variados (ou seja, PurpleAir e Thermo GM-5000).

Os resultados obtidos até o momento, indicam que apesar de estar situada a apenas 3 km da fábrica de cimento, as condições de vento predominantes tendem a favorecer o aporte de poluentes atmosféricos provenientes de áreas de mineração dentro de 5 a 10 km dos locais. Estas condições parecem promover efeitos de “transbordamento” da poluição, podendo resultar na exportação de custos ambientais entre cidades vizinhas. Além disso, as concentrações de MP, SO_2 e NO_2 , produzida principalmente pela elevada procura de energia, ultrapassou os padrões de qualidade do ar.

Recentemente, a busca por alternativas aos combustíveis fósseis tem promovido a prática de queima de resíduos sólidos urbanos em fornos de cimento. Isso traz à tona a preocupação quanto ao impacto da população à poluição do ar associada. Se uma quantidade suficiente de subprodutos venenosos da queima de resíduos escapar, eles podem ser perigosos para humanos e animais na área circundante.

Além disso, foram realizadas campanhas de medição para caracterizar completamente o ciclo de vida destes poluentes atmosféricos. Amostras diárias de aerossol $PM_{2,5}$ foram coletadas para análise futura de poluentes novos e emergentes, bem como sua citotoxicidade.

Por fim, combinados com diversas abordagens de modelagem, os dados obtidos permitirão a caracterização do perfil de emissões de poluentes atmosféricos da região e a avaliação dos riscos à saúde. Os resultados preliminares, sugerem, portanto, que a poluição atmosférica transfronteiriça local-específica deve ser considerada ao conceber o planeamento urbano e os

regulamentos de zoneamento de desenvolvimento a fim de salvaguardar o bem-estar das populações e do ambiente.

ANDAMENTO DO PROJETO

ETAPAS DO PROJETO

[ETAPA 1] Aquisição dos demais materiais necessários à manutenção operação do monitoramento;

[ETAPA 2] Implementação da rede de sensores. Disponibilização de dados, manutenção e controle operacional;

[ETAPA 3] Revisão bibliográfica e levantamento de dados. Análise de dados e estudo epidemiológico;

[ETAPA 4] Diagnóstico da Qualidade do Ar para subsidiar políticas públicas.

As Etapas iniciais [Etapas 1 e 2] do projeto apresentam-se praticamente concluídas. O controle operacional e manutenção dos equipamentos continuarão a ser atividades fundamentais à consolidação da rede de monitoramento e garantia da qualidade dos dados produzidos. Está sendo finalizado o processo de disponibilização aberta e online de todos os dados coletados.

ATIVIDADES EM ANDAMENTO

Nos próximos meses de projeto, dar-se-á continuidade às atividades de revisão bibliográfica e levantamento de dados para análise da variação espaço-temporal da concentração dos poluentes monitorados, e estudo epidemiológico que compreendem a Etapa 03 do projeto.

Resultados preliminares dessa análise foram apresentados neste relatório. Contudo, a coleta de dados nos próximos meses garantirá maior robustez dos dados e compreendendo uma série temporal e espacial mais longa, permitirá uma análise de padrões e tendências que melhor retrate a realidade. A influência das condições meteorológicas de temperatura, umidade, precipitação e ventos sobre a dinâmica química e física dos parâmetros de qualidade do ar monitorados será analisada mais profundamente conforme os bancos de dados se solidificarem. Além disso, este banco de dados mais completo possibilitará uma avaliação estatisticamente adequada dos riscos associados à exposição aos poluentes monitorados e da relação com a incidência de internações hospitalares da população por doenças cardiorrespiratórias na região.

Por fim, com a consolidação de um banco de dados robusto e de qualidade, será produzido o estudo final de Diagnóstico da Qualidade do Ar (Etapa 04) na região monitorada tendo como objetivo subsidiar políticas públicas de controle da exploração e uso dos recursos naturais, priorizando a saúde da população e o desenvolvimento sustentável dessas áreas.

Resultados esperados

A implementação desta rede de monitoramento, inédita no Estado do Paraná, gerará um banco de dados sólido para análise do impacto sobre a saúde da população residente da exposição à poluição por material particulado e outros gases oriundos da exploração do solo por atividades de mineração – em especial de calcário – consolidada na Região Metropolitana de Curitiba. Desta forma, esta pesquisa será conduzida de maneira a produzir informações

que possam ser úteis aos tomadores de decisão em agências ambientais de planejamento, regulação e fiscalização, assim como em órgãos públicos responsáveis pelo desenvolvimento urbano e pela gestão da saúde pública ao nível local e regional, objetivando a redução da poluição atmosférica e a melhora da qualidade do ar.

Contribuir com a ampliação da cobertura territorial nacional de monitoramento da qualidade do ar e da divulgação online pública – integrando a pesquisa da UFPR à sociedade civil – em tempo real de informações que auxiliem na definição e disseminação de critérios para o planejamento, implantação e expansão da rede de monitoramentos, assim como dar suporte técnico-científico à gestão e controle da poluição do ar, análise de riscos e revisão dos padrões nacional de qualidade do ar.

Compreender os efeitos da concentração de material particulado inalável fino ($MP_{2,5}$), sobre a saúde humana –i.e., a relação de causalidade entre poluente atmosférico e saúde humana – em áreas cuja qualidade do ar é potencialmente influenciada pela emissão de poluentes atmosféricos por atividades de mineração, de maneira que os resultados possam dar suporte às decisões de planejamento e gestão urbana e ambiental.

Produção técnico-científica significativa e participação em eventos nacionais e internacionais que promovam a divulgação dos resultados obtidos e auxiliem o desenvolvimento de pesquisas, instrumentos de modelagem, diagnósticos médicos, políticas públicas, análise e gestão socioeconômica e ambiental, objetivando o equilíbrio dos ecossistemas e o bem-estar da população.

REFERÊNCIAS

- ADEYANJU, E.; OKEKE, C. A. Exposure effect to cement dust pollution: a mini review. *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 12, p. 1572, 2019.
- AEN, 2020. Agência Estadual de Notícias. Estado do Paraná. Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Empresas-de-cal-e-calcario-geram-cerca-de-3-mil-empregos-diretos>>. Acesso em: 17/01/2023.
- ARAUJO, L. N.; BELOTTI, J. T.; ALVES, T. A.; TADANO, Y. DE S.; SIQUEIRA, H. Ensemble method based on Artificial Neural Networks to estimate air pollution health risks. *Environmental Modelling & Software*, v. 123, p. 104567, 2020.
- AZEVEDO, R. G.; SCHÜTZ, G. E. Silicose nas pedreiras: a sutil diferença entre conhecer e adoecer. *Intervenções em Saúde do Trabalhador na exploração de rochas ornamentais. Cadernos Saúde Coletiva*, v. 29, n. 1, p. 67–76, 2021.
- BORGES, A. S. Previsibilidade do ozônio troposférico pela técnica de rede neural artificial: estudo para a região metropolitana de São Paulo. 2008. 203 p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 491/2018 - "Dispõe sobre padrões de qualidade do ar." - Data da legislação: 19/11/2018 - Publicação DOU nº223, de 21/11/2018, seção 01, Página 155-156. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TzC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603> Acesso em: 16/01/2023.

CARON, R.; HOELLER, S. C. Os desafios da escola pública paranaense na perspectiva do professor PDE. CADERNOS, v.1. 2014.

CHAMBERS, L. G.; CHIN, Y.-P.; FILIPPELLI, G. M.; et al. Developing the scientific framework for urban geochemistry. *Applied Geochemistry*, v. 67, p. 1–20, 2016.

CHEN, Z.; CHEN, D.; ZHAO, C.; et al. Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations across China: A review of methodology and mechanism. *Environment International*, v. 139, p. 105558, 2020.

CRUMP, E. L.; ERIC, L. Lime production: Industry Profile. U.S. Environmental Protection Agency Air Quality Standards and Strategies Division Office of Air Quality Planning and Standards Innovative Strategies and Economics Group MD-15 Research Triangle Park, NC 27711, 2000.

ECHALAR, F. et al. Long-term monitoring of atmospheric aerosols in the Amazon Basin: Source identification and apportionment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 103, n. D24, p. 31849-31864, 1998.

EUROPEAN UNION. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. 2008.

GBD, 2019. Global Burden of Disease Study. Disponível em: < Collaborative Network Results. Disponível em: < <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare>>. Acesso em: 01/04/2022.

GERAB, F. Técnicas analíticas nucleares aplicadas à medida em larga escala de aerossóis atmosféricos na região Amazônica. 1996. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo.

GODOI, R. H. M.; BRAGA, D. M.; MAKAROVSKA, Y.; et al. Inhalable particulate matter from lime industries: Chemical composition and deposition in human respiratory tract. *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 30, p. 7027–7033, 2008.

GSG, 2023. Sedimentary Rocks. Disponível em: <<https://geologyglasgow.org.uk/local-rocks/sedimentary-rocks/>>. Acesso em: 17/01/2023.

HARRISON, J.; CHEN, J.-Q.; MILLER, W.; et al. Risk of silicosis in cohorts of Chinese tin and tungsten miners and pottery workers (II): Workplace-specific silica particle surface composition. *American Journal of Industrial Medicine*, v. 48, n. 1, p. 10–15, 2005.

HausDrone, 2020. Vídeo institucional Cal Cem - Colombo/PR. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=agVwO1GcI7A>>. Acesso em: 17/01/2023.

HAYKIN, S. Neural Networks and Learning Machines. 3o ed. Ontario, Canada: Pearson Education, 2009.

HE, L.I., WANG, D., 2017. Pollution characteristics and influencing factors of PM_{2.5} in Fuxin City. *Ecol. Sci.* 36 (1), 201–208.

HE, J. et al. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities. Environmental pollution, v. 223, p. 484-496, 2017.

IAT, 2023a. Instituto Água e Terra. Economia Mineral. Disponível em <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Economia-Mineral>>. Acesso em: 17/01/2023.

_____, 2023b. Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Curitiba – Mineropar, 2004. Disponível em <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Plano-Diretor-de-Mineracao-para-Regiao-Metropolitana-de-Curitiba-2004>>. Acesso em: 17/01/2023.

IBRAM, 2020. Disponível em: <<https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Economia-Mineral-Brasileira-IBRAM-2020.pdf>>. Acesso em: 17/01/2022.

IEA, 2022. International Energy Agency. World Energy Balances: Overview. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>>. Acesso: em: 24/03/2022.

KESLER, S. E. Mineral supply and demand into the 21st century. In: Proceedings for a Workshop on Deposit Modeling, Mineral Resource Assessment, and Their Role in Sustainable Development. Circular. v.1294, p. 55-62. 2007.

KHAN M. M., NAWAZ N., EHSAN N., AHMAD S., NAWAZ M. W., NAWAZ M. H.. Health hazards and socioeconomic effects of stone crushing industry on its workers: a case study of Sargodha, Pakistan. Journal of Environmental and Agricultural Sciences 6:40–46, 2016. <https://www.agropublishers.com/files/JEAS%206%206.PDF>

KING, H. M.. Dolomite. Disponível em: <<https://geology.com/rocks/dolomite.shtml>>. Acesso em: 17/01/2023.

LANDRIGAN, P. J.; FULLER, R.; ACOSTA, N. J. R.; et al. The Lancet Commission on pollution and health. The Lancet, v. 391, n. 10119, p. 462–512, 2018.

LELIEVELD, J.; EVANS, J. S.; FNAIS, M.; GIANNADAKI, D.; POZZER, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. Nature, v. 525, n. 7569, p. 367–371, 2015. Nature Publishing Group.

LI, H.; SHI, A.; ZHANG, X. Particle size distribution and characteristics of heavy metals in road-deposited sediments from Beijing Olympic Park. Journal of Environmental Sciences, v. 32, p. 228–237, 2015.

LPAE/LAPAt. Avaliação dos aspectos ambientais, de saúde e sócio-econômicos envolvidos com a implementação do PROCONVE em seis Regiões Metropolitanas – Relatório de Estudo: 2009.

MAENHAUT, W. et al. Two-year study of atmospheric aerosols in Alta Floresta, Brazil: Multielemental composition and source apportionment. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, v. 189, n. 1-4, p. 243-248, 2002.

MEO, S. A. (2004). Health hazards of cement dust. *Saudi Med. J.* 25, 1153–1159.
<https://europepmc.org/article/med/15448758>

MESONET. ASOS-AWOS-METAR Data Download. Disponível em:
<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml?network=BR_ASOS>. Acesso em: 2/05/2024.

NIOSH. NIOSH 0500 Manual of Analytical Methods (NMAM), Fourth Edition. Disponível em:
<<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/method-cas0.html>>. Acesso em: 2/3/2022.

OMS. Organização Mundial da Saúde. What are the WHO air quality guidelines. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>>. Acesso em: 10/04/2024.

PAATERO, P. et al. Methods for estimating uncertainty in factor analytic solutions. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 7, n. 3, p. 781, 2014.

PAATERO, P.; HOPKE, P. K. Discarding or downweighting high-noise variables in factor analytic models. *Analytica Chimica Acta*, v. 490, n. 1-2, p. 277-289, 2003.

PAATERO, P.; TAPPER, U. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics*, v. 5, n. 2, p. 111-126, 1994.

PAULIQUEVIS, T. et al. O papel das partículas de aerossol no funcionamento do ecossistema amazônico. *Ciência e Cultura*, v. 59, n. 3, p. 48-50, 2007.

POLEZER, G.; TADANO, Y. S.; SIQUEIRA, H. V.; et al. Assessing the impact of PM2.5 on respiratory disease using artificial neural networks. *Environmental Pollution*, v. 235, p. 394–403, 2018.

PURPLEAIR. PurpleAir PA-II-SD. Disponível em: <<https://www2.purpleair.com/products/purpleair-pa-ii>>. Acesso em: 17/01/2023.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; et al. A safe operating space for humanity. *Nature*, v. 461, n. 7263, p. 472–475, 2009.

RStudio Team (2022). RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA. Disponível em: <<http://www.rstudio.com/>>.

SALDANHA, R. DE F.; BASTOS, R. R.; BARCELLOS, C. Microdadosus: pacote para download e pré-processamento de microdados do Departamento de Informática do SUS (DATASUS). *Cadernos de Saúde Pública*, v. 35, n. 9, p. e00032419, 2019.

SALEM, H. S. Evaluation of the Stone and Marble Industry in Palestine: environmental, geological, health, socioeconomic, cultural, and legal perspectives, in view of sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 22, p. 28058–28080, 2021.

SANTOS, R. C. V.. Contribuição do setor mineral no Produto Interno Bruto brasileiro. 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/10606>>. Acesso em: 17/01/2023.

SAYARA T, HAMDAN Y, BASHEER-SALIMIA R (2016) Impact of air pollution from quarrying and stone cutting industries on agriculture and plant biodiversity. Resources and Environment 6(6):122–126. <https://doi.org/10.5923/j.re.20160606.04>

SIGMAALDRICH, 2020. Whatman® Nuclepore™ Track-Etched Membranes. Disponível em:<<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/wha10417309?lang=pt®ion=BR>>. Acesso em: 13/11/2020.

SONI, A. K.; NEMA, P. Limestone Mining in India. Singapore: Springer Singapore, 2021.

STACH, R.; BARONE, T.; CAUDA, E.; et al. Direct infrared spectroscopy for the size-independent identification and quantification of respirable particles relative mass in mine dusts. Analytical and Bioanalytical Chemistry, v. 412, n. 14, p. 3499–3508, 2020.

TADANO, Y. S.; SIQUEIRA, H. V.; ALVES, T. A. Unorganized machines to predict hospital admissions for respiratory diseases. In: Computational Intelligence (LA-CCI), 2016 IEEE Latin American Conference. p. 1-6. 2016.

THERMOFISHER. Thermo Scientific GM-5000. Disponível em: <<https://assets.thermofisher.com/TFS-Arts/CAD/Datasheets/gm5000-datasheet-en.pdf>>. Acesso em: 17/01/2023.

TOLINGGI, S., NAKOE, M.R., GOBEL, I.A., SENGKE, J., KEMAN, S., SUDIANA, I.K., YUDHASTUTI, R., AZIZAH, R. (2014). Effect inhaling of limestone dust exposure on increased level of IL-8 serum and pulmonary function decline to workers of limestone mining industry. Int. J. Eng. Sci. 3, 66–72. <https://repository.unair.ac.id/105374/>

TOMAS, 2007. Dossiê Técnico: Cal e calcário. TECPAR, Instituto de Tecnologia do Paraná. 2007. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MTgz>>. Acesso em: 17/01/2023.

UN ENVIRONMENT, 2017. With resource use expected to double by 2050, better natural resource use essential for a pollution-free planet. Disponível em: <<https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/resource-use-expected-double-2050-better-natural-resource-use>>. Acesso em: 24/03/2022.

UN. United Nations. World population hits 8 billion people. Disponível em: <<https://www.un.org/en/desa/world-population-hits-8-billion-people>>. Acesso em: 30/11/2022.

US EPA 2014. Receptor Modeling. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/scram001/receptorindex.htm>>. Acesso em: 19/03/2022.

WANG, J., OGAWA, S., 2015. Effects of Meteorological Conditions on PM2.5 Concentrations in Nagasaki, Japan. IJERPH 12, 9089–9101. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809089>

WATSON, J. G. et al. Filter processing and gravimetric analysis for suspended particulate matter samples. Aerosol Science and Engineering, v. 1, n. 2, p. 93-105, 2017.

WEAKLEY, A. T.; MILLER, A. L.; GRIFFITHS, P. R.; BAYMAN, S. J. Quantifying silica in filter-deposited mine dusts using infrared spectra and partial least squares regression. Analytical and Bioanalytical Chemistry, v. 406, n. 19, p. 4715–4724, 2014.

YANG, C. Y., HUANG, C. C., CHIU, H. F., CHIU, J. F., Lan, S.J., KO, Y.C. (1996). Effects of occupational dust exposure on the respiratory health of Portland cement workers. J. Toxicol. Envir