

PKS

PUBLIC
KNOWLEDGE
PROJECT

**REVISTA DE GEOGRAFIA
(RECIFE)**

<http://www.revista.ufpe.br/revistageografia>

OJS

OPEN
JOURNAL
SYSTEMS

ANÁLISE RÍTMICA APLICADA AO ESTUDO DA QUALIDADE DO AR EM REGIÕES METROPOLITANAS

Rafael Figueiredo Duarte Heiber¹ e João Afonso Zavattini²

1 - Doutor em Estudos Avançados em Sociologia, Mestre em Organização do Espaço. Departamento de Sociologia V da Universidad Complutense de Madrid, endereço Email: rafaelfdh@gmail.com.

2 - Livre-docente em Climatologia pela Unesp - IGCE. Programa de Pós-graduação em Geografia (UNESP-IGCE-RC). Email: zavattini@rc.unesp.br

Artigo convite - 40 anos do lançamento da obra Teoria e Clima Urbano do Professor Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro

RESUMO

Há quatro décadas o estudo do clima urbano foi sistematizado no Brasil por Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. No interior desta sistematização, a qualidade do ar corresponde a uma das dimensões analíticas que compõem uma abordagem simultaneamente dinâmica e de síntese. Baseados nestas premissas teóricas, na noção de clima como sucessão habitual de tipos de tempo e na técnica de análise rítmica, oferecemos uma proposta metodológica para o estudo da poluição do ar por veículos automotores em zonas metropolitanas. Além dos resultados apresentados para o caso que serve de exemplo na Região Metropolitana de São Paulo, cremos ser esta uma atividade de potencial pedagógico orientada aos recém e futuros geógrafos para exercitar uma visão vinculante, processual e sintética aplicada ao entendimento de eventos complexos, tais como episódios de elevada poluição do ar.

Palavras-chave: análise rítmica, sistema clima urbano, poluição do ar, carros, Monteiro.

RHYTHM ANALYSIS APPLIED TO AIR QUALITY STUDIES IN METROPOLITAN AREAS

ABSTRACT

Four decades ago Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro systematized the study of the urban climate in Brazil. One of the main dimensions of this theoretical approach comprising both dynamic and synthesis was the quality of the air in the cities. Based on these theoretical premises, the notion of climate as typical successions of weather types and the technique defined as rhythmic analysis, we propose a methodology for the study of the air pollution produced by automobiles in metropolitan areas. Besides the results presented as an example of a case study at São Paulo Metropolitan Region, we believe this guide has a pedagogic efficacy within academic activities in order to exercise a relational, processual and synthetic vision applied to the understanding of complex events such as episodes of high levels of air pollution.

Keywords: rhythm analysis, urban climate system, air pollution, cars, Monteiro.

INTRODUÇÃO

O Serviço de Saúde Pública da França recém publica um estudo onde se atribui à poluição do ar uma estimativa de morte prematura de 48.000 pessoas a cada ano no país¹. Diz respeito especificamente ao efeito colateral causado pelo material particulado (PM) emitido sobretudo por veículos automotores em grandes cidades, o que deve repercutir diretamente em novas políticas públicas para regular ainda mais a circulação de tais veículos nestas zonas.

Qual a relevância desta informação, além de sua dimensão anônima de tragédia, em um artigo que versa sobre teoria e métodos aplicados ao estudo da qualidade do ar? Bem, sabemos que culturalmente o hábito de dar a partida e acelerar um carro não desperta a vergonha do fumante distraído em um ambiente proibido ao cigarro. Porém, como alude Isabelle Stengers (2005), o problema não reside na condição dos nossos estilos de vida ignorarem a atmosfera, mas sim no fato da atmosfera ignorar nossos estilos de vida.

Quando nos propomos a analisar aquilo que conhecemos por clima numa escala urbana, estamos abordando uma escala fenomênica que, como poucas, permite verificar o grau de complexidade que envolve elementos e processos de naturezas distintas em constantes inter-relações. Não importa se Paris, Milão, Shangai ou São Paulo: analisar de maneira apropriada, por exemplo, o fenômeno da baixa qualidade do ar em áreas urbanas, permite desconstruir o discurso reducionista hoje predominante de que, a poluição do ar é um estado contingente gerado por condições meteorológicas desfavoráveis. Como exemplificaremos a seguir com o caso específico da capital paulista e sua região metropolitana, episódios de intensa poluição correspondem, antes de tudo, à interação entre atividades antrópicas normalizadas e a sucessão habitual de determinados tipos atmosféricos.

Vale lembrar que Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro publicava em 1976 a primeira e mais importante sistematização do clima urbano no Brasil, que deu origem a diversos planos de ação em cidades diversas: Plano Diretor de Teresina (1973), Plano de Desenvolvimento Urbano de Marabá (1973) etc. Através da evolução da abordagem ambiental em geografia, destacou-se a importância de uma teoria geográfica válida, baseada nas regularidades e universalidades, para aplicação às consequências da urbanização e degradação ambiental, dando importância às formas perceptivas da

¹ << <http://www.santepubliquefrance.fr/Accueil-Presses/Tous-les-communicues/Impacts-sanitaires-de-la-pollution-de-l-air-en-France-nouvelles-donnees-et-perspectives> >> Acesso em 21 de Junho de 2016

qualidade ambiente, mais especificamente em relação à atmosfera urbana. O mesmo autor escreveria posteriormente que “os geógrafos dedicados aos aspectos naturais não deixem de considerar o homem no centro deste jogo de relações, e que aqueles dedicados às desigualdades sociais não as vissem fora dos lugares” (MONTEIRO, 1984. p.24-25)

Quarenta anos depois da publicação da obra *Teoria e Clima Urbano*, esta é uma oportunidade de manter ativa uma correta abordagem da produção científica de seu autor, até hoje capaz de vincular-se ao que há de mais fresco no campo da epistemologia - admitindo-se de antemão a superação dicotômica entre geografias física e humana – e de, simultaneamente, gerar uma espécie de nostalgia que habita a compreensão analógica dos processos, em contraste com muitas das práticas automatizadas da atualidade que presumem da imaginação holística do cientista em detrimento da praticidade algorítmica.

Não se trata aqui de qualquer desqualificação tecnofóbica. Muito pelo contrário, pois reconhecemos a indubitável utilidade das novas tecnologias que, desde os laboratórios especializados, até os espaços abertos do conhecer, paulatinamente transformam as práticas do saber. Projetos como “Google Earth Outreach”, por exemplo, prometem levar a climatologia urbana ao mundo do “big data”, a partir do mapeamento da qualidade do ar nas cidades. Num futuro próximo, cada aparelho celular poderia se tornar um instrumento de medição constante.

Entretanto, nossa proposta aqui vai encaminhada ao aspecto pedagógico que a presente metodologia baseada nos antecedentes da obra *Teoria e Clima Urbano* representa para compreender a interação processual entre os elementos que se concatenam no clima urbano. Uma perspectiva que guarda perfeitas similitudes com o caráter transdisciplinar de outra teoria denominada ator-rede (LATOUR, 2004; 2008), que define a invisibilidade de agentes e processos organizados em redes de ações quando este conjunto funciona perfeitamente. Mas basta uma falha ou contradição emergente para que todos estes elementos conformados na rede de ações apareçam. É assim que, por exemplo, um centro de alta pressão encadeado em certos estados atmosféricos, ao produzir calmarias duradouras, certamente fará recordar aos residentes metropolitanos a existência dos poluentes que resultam da queima incompleta dos combustíveis fósseis usados para empurrar latas de uma tonelada sobre rodas.

A TRANSCENDÊNCIA DO RITMO PARA ENLAÇAR SÍNTESES

Talvez, a grande problemática na busca por uma leitura factual, seja nas forças que se concatenam no clima ou mesmo aquelas que geram as coerções no interior de uma sociedade, resida na tendência de estabilizar processos para gerar uma ordem capaz de ser transformada em categorias estruturais quase imutáveis. Ou seja, a busca incessante de categorias artificiais capazes de servir como catálogo permanente para abarcar a diversidade de um mundo que, ao contrário de estável, é dinâmico.

Na climatologia, esta condição se viu praticada através dos usos de médias históricas para categorizar climas ao redor do globo e no interior de países ou regiões. Uma opção sem dúvidas capaz de oferecer mapas e tabelas de fácil consulta, justificados por dados que nunca se expressam de tal modo na realidade dos fatos.

Partiu de Maximilien Sorre (1943) a crítica desta análise separativa e reducionista que ignora a intensidade dos elementos e suas interações nos momentos em que se expressam, condição que mais tarde influenciou o estudo de Pédelaborde (1970) sobre tipos de tempo na Bacia Parisiense. Sorre questionou as médias aritméticas quanto à sua incapacidade de gerar uma síntese verídica daquilo que se observava fisiologicamente na paisagem e atuava sobre todos os elementos que ela compõem. Em seu novo conceito de clima, passou a defini-lo como sucessões habituais de estados atmosféricos. Tal definição fundamentou um referencial que levou Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro à proposta metodológica da “análise rítmica” e o inspirou a conceituar um novo “paradigma do ritmo”, ambos que até hoje sustentam uma Escola Brasileira de Climatologia Geográfica (ZAVATTINI, 2004).

A partir deste novo marco, Monteiro (1962; 1963; 1964) passou a considerar “anos-padrão” nas sucessões habituais ou excepcionais de tipos de tempo para dar início a um novo sistema sintético e vinculante de representação geográfica dos elementos atmosféricos, integrando índices de participação das massas de ar e mecanismos frontológicos aos volumes e índices de chuva por eles causados (ZAVATTINI, 2004).

Trata-se, sobretudo, de uma abordagem atenta às especificidades regionais, relativizando a importância de elementos de acordo com ordem e intensidade de vínculos. É o que se pode apreciar a seguir para o caso das regiões brasileiras:

[No Brasil] quando se pensa na gênese dos climas, é preciso dar particular atenção à distribuição (temporal e espacial) das chuvas. [O país] apresenta uma diversidade

pluvial bastante considerável, geneticamente ligada ao ritmo de sucessão dos tipos de tempo (habitual e excepcional), mas que também pode refletir – e reflete – traços específicos de nossa variada morfologia (“serras” litorâneas, chapadas interioranas, “cuestas” basálticas, etc.). E não se deve esquecer, jamais, da capacidade de penetração, até latitudes muito baixas, da massa polar atlântica, nem também do papel representado pelos vales dos rios Paraná, Paraguai e Uruguai, no fenômeno da “friagem” da Amazônia. Suas calhas, que se alinham, “grosso modo”, no sentido dos meridianos, funcionam como “corredores” para as trocas de energia entre as massas polares, tropicais e equatoriais, facilitando, assim, a ocorrência daquele fenômeno, típico dos invernos mais rigorosos. Isso para não falar da estabilidade atmosférica, e consequente estiagem, que a massa polar “velha” (tropicalizada) promove sobre vasta porção do território nacional, no decorrer de certas primaveras austrais; ou, ainda, do papel exercido pela massa equatorial continental, e por seu “canal de umidade” que, rumo ao centro-sul do Brasil, distribui volumes de chuva além dos habitualmente esperados, cujos impactos costumam ser de grande monta. (ZAVATTINI, 2014)

QUALIDADE DO AR E SISTEMA CLIMA URBANO (SCU)

Desde a obra *Teoria e Clima Urbano*, Monteiro (1976) já mostrava especial preocupação com a qualidade do ar e alertava para casos como o da metrópole paulista, onde o processo de antropização mostrava seu lado perverso enquanto aos danos ambientais.

Para abordar o clima das cidades, Monteiro (1976) se apoia em alguns precedentes teóricos. Fundamentalmente se nota a inspiração em Ludwig von Bertalanffy e sua conhecida Teoria Geral de Sistemas, orientada a contestar o reducionismo e entender a organização de elementos que, vinculados, geram um funcionamento que a simples soma das partes não é capaz de explicar. Logo, aparece também a influência da cibernética de Norbert Wiener e seus conceitos de feedback ou retroalimentações. Finalmente, o viés mais geográfico se dá pelas ideias de Viktor Sochava e Georges Bertrand sobre os “geossistemas” como uma porção espacial onde os elementos terrestres se conectam de maneira sistêmica e interagem com elementos antrópicos.

Assim, Monteiro (1976) passa a definir o Sistema Clima Urbano (SCU) em um conjunto de elementos que se manifestam na atmosfera sobre zonas urbanas, organizado em três subsistemas inter-relacionais: termodinâmico, físico-químico e hidrometeorológico. Estes subsistemas se representam por “canais de percepção”, definidos como canais abstratos que se iniciam na essência da atmosfera e desembocam na percepção humana, estando sempre em conjunto de afinidade e de interação. Para cada um dos subsistemas citados (termodinâmico, físico-químico e hidrometeorológico) aparecem implicados respectivamente os seguintes canais de percepção: o conforto térmico, a qualidade do ar

e o impacto meteórico. Fazendo referência ao canal de percepção qualidade do ar, o autor esclarece:

[Canais de Percepção] podem atravessar toda a organização desde o nível insumidor, pelo transformador ao produtor; possibilitam a orientação no sentido contrário, como é o caso do Canal II [qualidade do ar]; procuram definir, através do nível de resolução dos fenômenos climáticos, os subsistemas fundamentais ao Sistema Clima Urbano; deixam margem à avaliação de suas transformações em sua passagem pelo interior da estrutura interna do sistema; possibilitam, por fim, a avaliação das relações entre o núcleo e o ambiente do sistema (MONTEIRO, 1976. p.125).

As articulações no interior do SCU acontecem e detrimento de alguns fatores que diferenciam os próprios subsistemas. Eles seriam: fonte, trânsito no sistema, mecanismos de ação, projeção, desenvolvimento, observação, correlações interdisciplinares, produtos, efeitos diretos, reciclagem adaptativa e responsabilidade. A *Figura 1* a seguir detalha cada um destes fatores no “canal de percepção” de qualidade do ar.

PROPOSTA DE UM ROTEIRO METODOLÓGICO PARA O CANAL QUALIDADE DO AR²

A partir dos referenciais teóricos em climatologia dinâmica e clima urbano supracitados, cremos que se pode levar a cabo estudos da qualidade do ar em zonas urbanas de maneira simultaneamente modesta e pedagógica. Modesta porque, geralmente, os dados necessários podem ser acessados junto a entidades públicas, que por princípios, deveriam colaborar com tais iniciativas científicas. E pedagógica, porque se atém aos processos dinâmicos dos elementos que se concatenam num determinado fenômeno, como por exemplo, episódios de elevada poluição atmosférica.

O roteiro metodológico que apresentamos está dirigido ao estudo da relação entre poluição atmosférica por veículos automotores e sucessão de tipos de tempo em áreas metropolitanas. Ou seja, além da dimensão teórica aplicada, o primeiro passo se constitui de uma problematização que revela os veículos a combustão – focos dispersos e constantes no interior da mancha metropolitana –, os principais vilões da poluição do ar.

² Trata-se aqui de um sumário conclusivo baseado em um estudo que realizamos na Região Metropolitana de São Paulo e que pode ser acessado em estado completo em Heiber (2006), portanto reorganizaremos as etapas citadas no presente capítulo para que cumpra com seus requisitos de extensão.

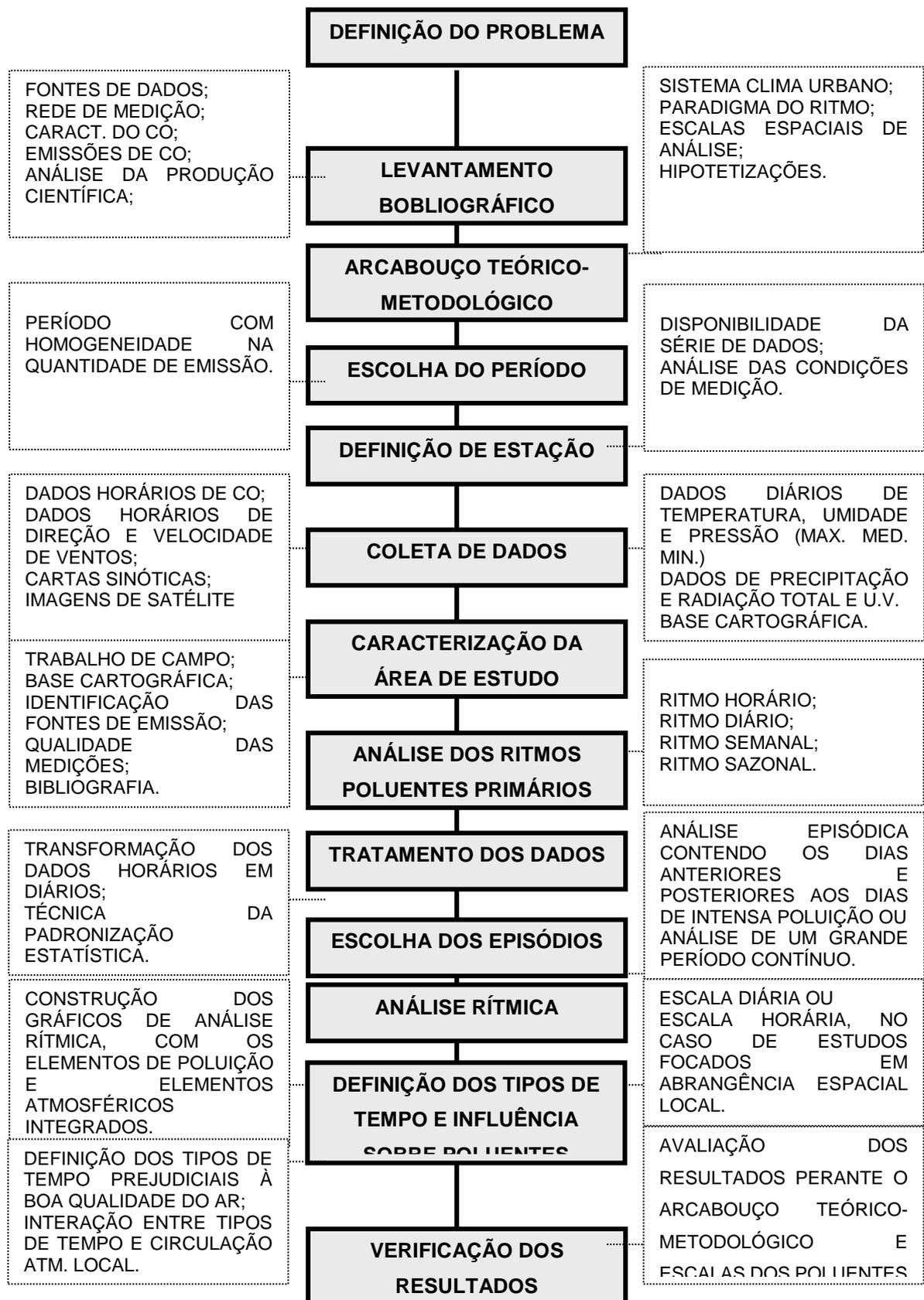


Figura 1- Proposta metodológica ao estudo da poluição por veículos automotores na RMSP

A *Figura 1* ilustra passos, técnicas e dimensões analíticas que compõem o roteiro proposto, desde a definição dos problemas e arcabouço teórico, passando pela caracterização da área de estudos, técnicas e materiais empregados na pesquisa, e logo terminando com as análises e resultados.

Assim, as etapas se propõem da seguinte forma: a) definição do problema; b) levantamento bibliográfico; c) arcabouço teórico-metodológico; d) escolha do período; e) escolha da estação; f) coleta de dados; g) caracterização da área de estudo; h) análise do ritmo dos poluentes; i) tratamento dos dados; j) escolha dos episódios; l) análise rítmica; m) definição dos tipos de tempo e influência sobre a poluição por veículos automotores; n) validação dos resultados de acordo com arcabouço teórico e/ou alguma nova hipótese estabelecida após exploração de resultados parciais.

Reiteramos que esta proposta está respaldada por um estudo que, apesar de minucioso, ainda é incomum. Mas seu potencial pedagógico poderia perfeitamente permitir um uso estendido nas práticas docentes o que, conseqüentemente, funcionaria como um processo de calibragem em benefício desta mesma proposta.

Contaminação por veículos automotores

A poluição atmosférica, desde a década de 70, é um dos maiores impactos ambientais causados pela urbanização e pela industrialização na Região Metropolitana de São Paulo e quatro décadas mais tarde, o problema apenas se vê intensificada, principalmente graças ao predomínio de uma cultura de transporte baseada no automóvel e um sistema praticamente integral de mobilidade assentado sobre o uso de motores a combustão.

O processo gerador de energia para a locomoção, além de ser ineficiente porque se converte majoritariamente em energia térmica e não cinética, também ocorre de maneira incompleta, gerando os resíduos que chamamos de poluentes. É o que se pode observar na *Figura 2* abaixo, que representa o processo de combustão da gasolina.

O que se vê são resíduos químicos resultantes da queima incompleta, chamados também de poluentes primários: CO, NO_x e HC. Os dois últimos são ainda precursores do ozônio troposférico (O₃), poluente secundário formado por fotólise, reação química ativada por raios UV. O ciclo fotolítico de dióxido de nitrogênio é o maior responsável pelo ozônio (O₃) troposférico em áreas urbanas. Nas reações deste ciclo o O₃ é formado

pela disponibilidade de oxigênio molecular proveniente da fotólise do NO₂ e consumido pela reação com o NO.

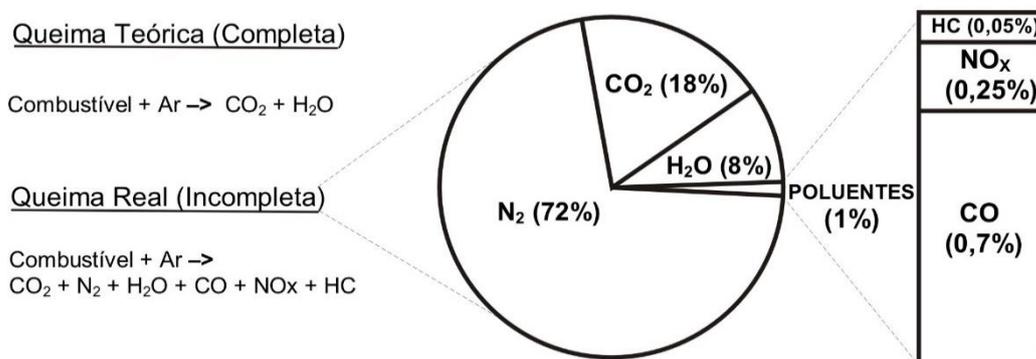


Figura 2 - Queima real e queima ideal da gasolina em processo de combustão nos automóveis (Fonte: ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores).

O CO é o poluente mais ligado ao uso dos veículos leves, sendo o que melhor representa os danos causados pela falta de um sistema de transporte público eficiente. Além do CO causar prejuízos de reflexos, de aprendizado, de visão e de trabalho, está sendo associado à hipertensão. Em dias poluídos, os atendimentos hospitalares em decorrência da hipertensão aumentam em até 200%³ na cidade de São Paulo.

Além destes contaminantes químicos, somam-se os materiais particulados, caracterizados por resíduos de material sólido ou líquido que ficam suspensão no ar em forma de poeira ou neblina com tamanho inferior a 10 µm e afetam diretamente a saúde respiratória de quem esteja sujeito a altas concentrações no ar.

Como se aprecia no SCU e seu subsistema físico-químico, a atmosfera recebe input de substâncias – os poluentes – de fontes fixas ou móveis das atividades antrópicas. Estes, por sua vez, transitam no sistema aberto do clima urbano, onde há troca de matéria e energia, no sentido de operando a operador, difundindo-se do núcleo ao ambiente, misturando-se na troposfera inferior sobre a área urbana, onde se localizam as fontes poluidoras. A remoção dos poluentes acumulados depende dos estados atmosféricos, que podem ser favoráveis à dispersão da poluição quando há intensos movimentos advectivos (dinâmica horizontal) e convectivos (dinâmica vertical), ou desfavoráveis quando há estabilidade atmosférica. Além da remoção dos poluentes, a qualidade do ar é beneficiada

³ LOPES, A. D. Estudo alerta que poluição pode causar hipertensão. **O ESTADO DE SÃO PAULO**. São Paulo, 30 de setembro de 2005, Vida &, p.A22.

ou prejudicada por situações em que há expansão ou retração da troposfera inferior, um processo no SCU que envolve basicamente trocas de energia e não de matéria.

Os mecanismos de sucessão característicos do ritmo habitual de tipos de tempo são extremamente importantes à previsão e avaliação da gravidade do fenômeno de poluição do ar (MONTEIRO 1976). A ideia é que, a partir da técnica de análise rítmica, pode-se reconstituir os tipos de tempo atuantes em escala diária e classificá-los de acordo com sua gênese e dinâmica, incluindo os poluentes como uma variável integrada aos elementos meteorológicos e à situação geográfica do lugar estudado.

Caracterização de área de estudo: Região Metropolitana de São Paulo

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) se constitui na zona mais industrializada e “automobilizada” do Brasil. Está localizada na latitude do Trópico de Capricórnio, na porção oriental do Estado de São Paulo. Possui área de 8.051km² (0,1% do território nacional), população de aproximadamente 20 milhões de habitantes (10% da população brasileira) e PIB superior que representa 20% do total nacional.

No centro-sul da grande mancha urbana metropolitana, encontra-se o município de São Paulo, o mais importante da RMSP, com maior extensão e maior densidade de urbanização. No município paulistano estão os locais de maior circulação de pessoas e veículos de toda RMSP, resultado de variáveis econômicas, demográficas, históricas e urbanas que exercem força de atração à população que vive nas periferias. A população do município concentra mais da metade do total da RMSP.

O sítio urbano da RMSP se encontra na Bacia Sedimentar de São Paulo e no Planalto Paulistano, cujo principal vale é o do Rio Tietê, orientado no sentido Leste-Oeste, com altitudes que variam entre 720m a 850m e uma extensa planície de inundação. O entorno da bacia tem a Serra da Cantareira ao norte, cujas altitudes atingem 1.200m, e o reverso da Serra do Mar ao leste e ao sul, com altitude sem geral a 800 metros e o Atlântico distante a 45km.

As feições geomorfológicas da área mais verticalizada e urbanizada, que corresponde à cidade de São Paulo, são caracterizadas pelo grande espigão da Avenida Paulista que se lança até a porção sul do município paulistano e divide colinas e terraços (AB’SABER, 1956 apud TARIFA 1977).

As situações latitudinal e topográfica da Bacia Paulistana junto ao Planalto Atlântico, definem um cenário de transição entre dominância das massas Tropicais (Atlântica e Continental) e Polar Atlântica e conseqüentemente duas estações predominantes: seca e chuvosa (MONTEIRO, 2000). A estação chuvosa é influenciada pelo aquecimento continental associado à convecção tropical, sistemas extratropicais formadores de frentes frias e áreas de instabilidade continental, favorecendo a ocorrência de chuvas abundantes. Na estação seca, o clima é predominantemente influenciado pela passagem rápida de frentes frias geradas pelo avanço dos sistemas anticiclônicos polares. Essa estação é caracterizada não só pela diminuição da precipitação, mas também pela diminuição das temperaturas no continente e no oceano que propiciam a ocorrência de períodos de grande estabilidade atmosférica, condições prejudiciais à dispersão de poluentes na RMSP.

O fenômeno metropolitano extravasa o nível local envolvendo e transportando energia e poluentes de sua atmosfera urbana para outras áreas da Bacia do Alto Tietê. Segundo Monteiro (1976), a flexibilidade espacial é um dos principais critérios no estudo do SCU.

Além da caracterização da área de estudo em si, no caso do levantamento de dados estar condicionado por pontos fixos de medição, faz-se imprescindível adicioná-los ao espectro analítico da área caracterizada (*Figura 3*). No caso da RMSP, a CETESB é o órgão responsável por medir os dados de qualidade do ar, ao passo que dados meteorológicos podem ser complementados por outras entidades.

A estação Ibirapuera (*Figura 4*), ponto de medição dos poluentes, está localizada no Parque do Ibirapuera, que por sua vez se encontra na área mais urbanizada da capital paulista, caracterizada pelo grande volume de automóveis que circulam por grandes avenidas (dos Bandeirantes, do Estado, Marginais etc.): um volume diário de aproximadamente 1.200.000 veículos. As vias internas e avenidas costumam apresentar tráfego intenso e lento. Outra característica dessa área altamente urbanizada é a presença de bairros verdes (Pacaembu, Alto da Lapa, Pinheiros, Jardins, Moema, Parque do Ibirapuera e Brooklin) e bairros extremamente verticalizados (Centro, Liberdade, Vergueiro, Consolação, Santa Cecília, Perdizes, Vila Mariana, Jabaquara, parte de Moema etc.).

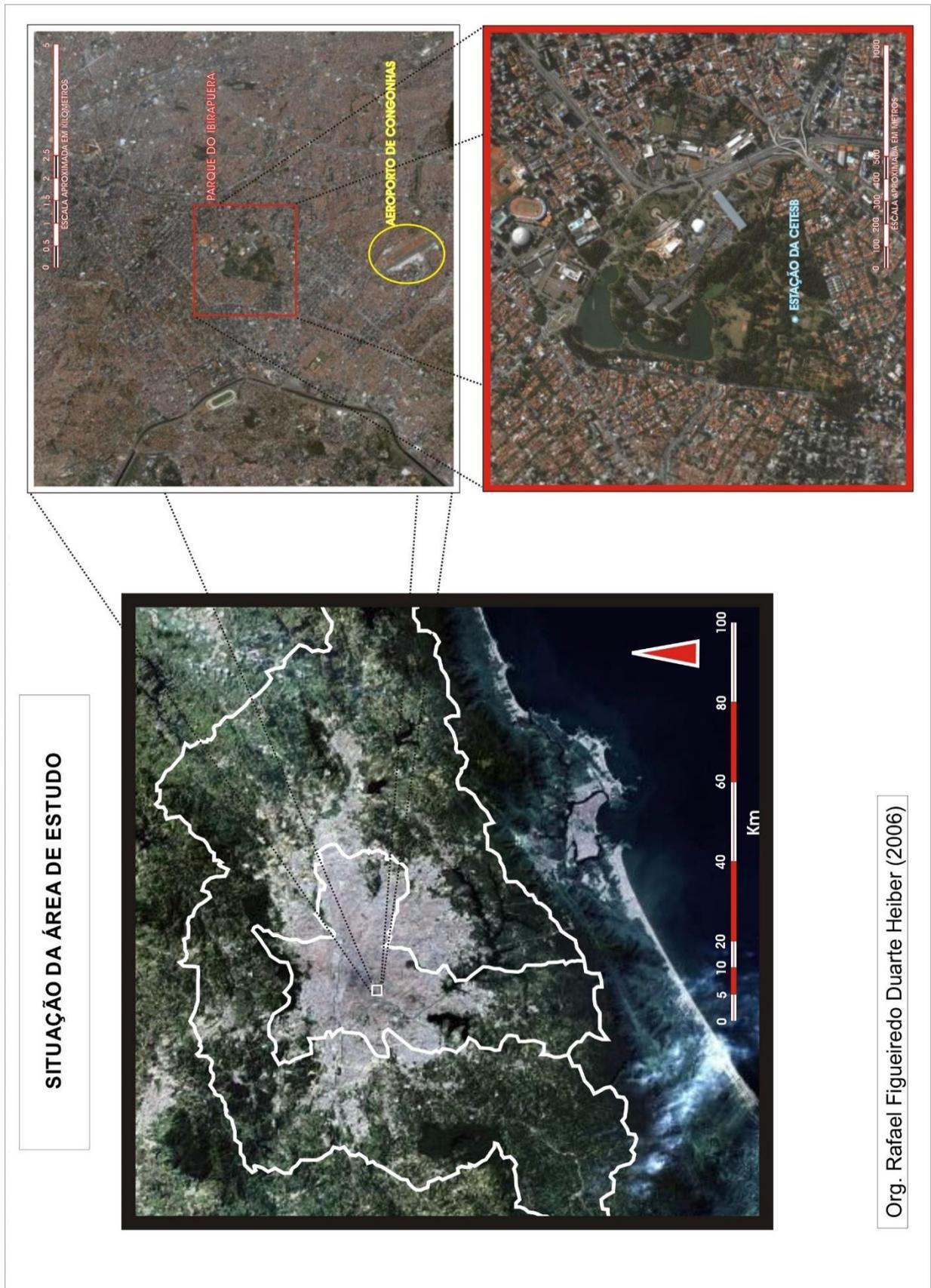


Figura 3 - A área de estudo em diferentes escalas: do geral ao particular

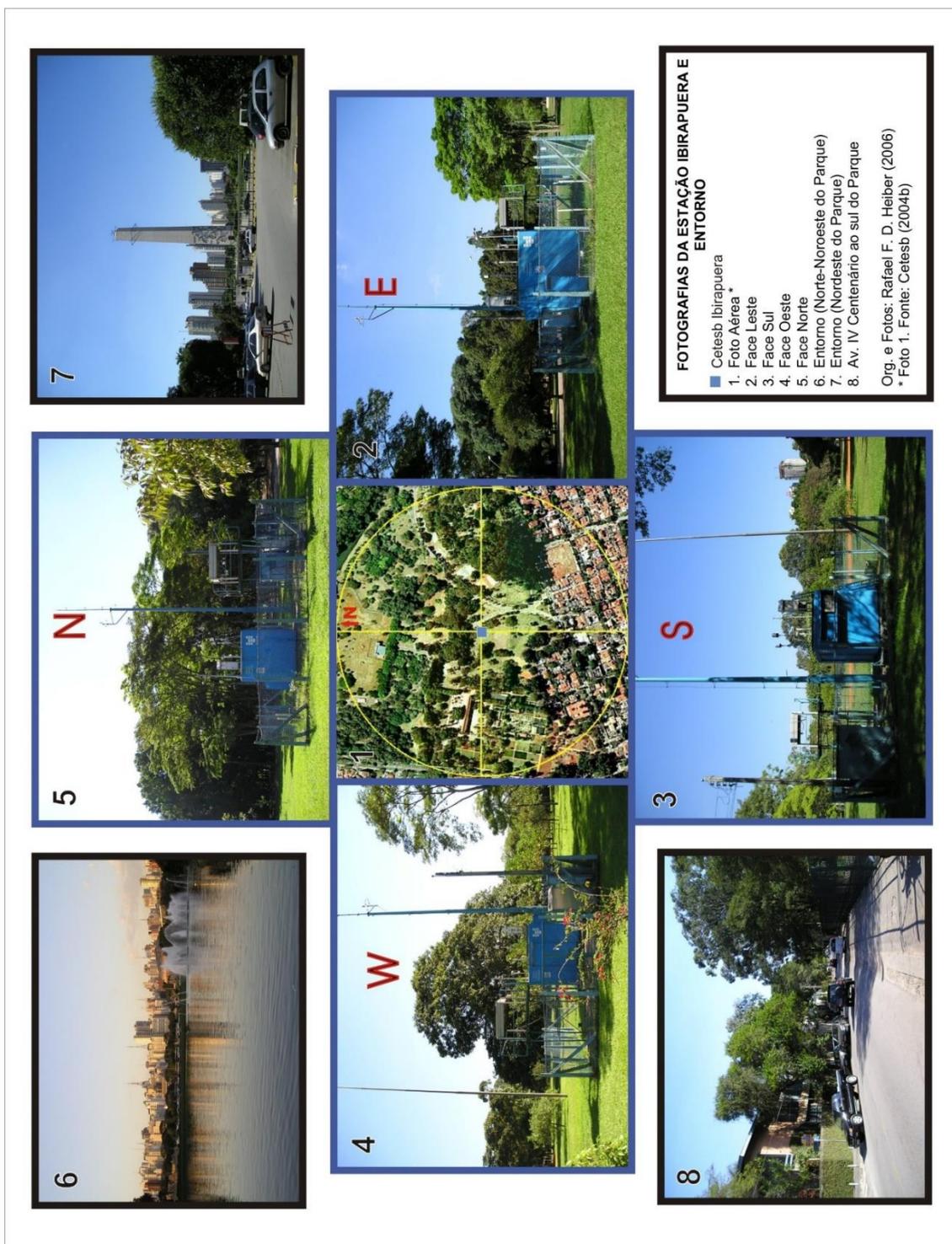


Figura 4 - A estação Ibirapuera e seu entorno

Dentro de toda a rede da CETESB, a estação do Ibirapuera era uma das duas estações completas para monitoramento de qualidade do ar pela CETESB, registrando os dados de CO, MP10, NO₂ e O₃. A outra, estação São Caetano do Sul, recebia maior influência direta de emissões industriais. Considerada a localização e a situação da estação, suas medições de poluentes não refletem a emissão nas vias, mas já misturados

na troposfera inferior, sendo estes momentos condicionados às sucessões de tipos de tempo.

A coleta de dados meteorológicos é prejudicada por árvores próximas à estação, que impedem a passagem livre dos ventos e produzem sombra. Na face norte esse problema é mais intenso, enquanto na face sul há um campo de futebol com piso de terra batida, a menos de 30 metros de distância. Estas condições impedem o uso exclusivo dos dados meteorológicos desta estação, fazendo-se necessário complementar os dados meteorológicos com as medições do Aeroporto de Congonhas.

Para evitar que as análises dos poluentes apenas restringissem à escala local, a análise rítmica foi baseada em dados diários. A esta escala temporal trabalha-se com dados que refletem o ritmo das atividades antrópicas por toda a área urbana, cujas emissões de poluentes está associada ao ritmo antrópico.

Altos índices de ozônio registrados no Ibirapuera, por exemplo, corroboram a questão da influência das escalas nas medições. O parque e seu entorno não produzem insumos para formação de ozônio nas proporções em que o mesmo se apresenta medido pela estação, um cenário afetado principalmente pela escala urbana (áreas diversas da RMSP) e regional (Cubatão e Baixada Santista). No caso dos poluentes primários, as escalas local e urbana estão diretamente envolvidas. O material particulado, devido a diversos fatores, tais como a construção civil e a presença de um campo de futebol de terra batida ao lado sul da estação, pode ter seu nível elevado graças a ventos.

MATERIAIS E TÉCNICAS

Para análise da poluição do ar causada por veículos automotores, foram utilizados dados horários de concentração dos poluentes CO, NO₂, MP10 e O₃ da estação Ibirapuera para os invernos de 2001, 2002, 2003 e 2004. Esses dados permitem analisar o comportamento de cada poluente em escalas temporais diversas: horária, diária, semanal, mensal e sazonal (do inverno). A validação espacial dos dados depende de três fatores principais: características do local em que a estação está instalada, as fontes emissoras e as peculiaridades de cada poluente. Por essa razão, observações de campo acompanhadas por fotografias também fazem parte do rol de materiais utilizados.

Após a análise do comportamento horário dos poluentes, os dados horários receberam tratamento estatístico e foram transformados em dados diários, o que

possibilitou a inserção dos mesmos nos gráficos de análise rítmica, técnica utilizada para analisar a sucessão dos tipos de tempo e a poluição em episódios de má qualidade do ar.

Os dados meteorológicos de superfície para definição de tipos de tempo são provenientes do Aeroporto de Congonhas, cuja estação respeita todos os critérios para medição, e foram fornecidos pelo Comando da Aeronáutica (Diretoria de Proteção ao Voo - Divisão de Meteorologia da Aeronáutica). Os seguintes dados diários foram coletados: temperatura (média de bulbo seco, máxima e mínima), umidade relativa média, pressão (média, máxima e mínima), velocidade máxima e direção de vento e precipitação (total e duração). Como complemento à série de Congonhas, a estação Ibirapuera foi fonte dos seguintes dados em escala horária: radiação, direção de ventos, umidade relativa e temperatura. Os dados horários de direção de ventos foram trabalhados estatisticamente e se tornaram complementares aos dados de Congonhas, indicando a representatividade de cada direção na escala diária. Os outros dados meteorológicos do Ibirapuera também receberam tratamentos estatísticos e geraram dados diários para a composição dos gráficos de análise rítmica. Embora a estação do Ibirapuera não seja fonte adequada à coleta dos dados meteorológicos por causa das árvores nas proximidades dos aparelhos medidores, suas informações contribuíram para a análise rítmica, na tentativa de reduzir a falta de dados não fornecidos pela Divisão de Meteorologia da Aeronáutica.

Além dos dados meteorológicos supracitados, os gráficos de análise rítmica dos episódios de grande poluição indicam a condição sinótica na RMSP a partir da leitura de duas imagens diárias dos satélites GOES ou Meteosat, 00:00GMT e 12:00GMT, da América do Sul, que permitiram observar a dinâmica de massas de ar sobre a área e são essenciais à definição de tipos de tempo.

Seleção episódica de poluição do ar

A prática da análise rítmica acaba por privilegiar estudo dos picos temporais de má qualidade do ar (ZAVATTINI, 2004. p.161-162) quando os mesmos são vistos em sequência contínua com os períodos que se encadeiam e propiciam o ápice e a queda da poluição. A dinâmica da poluição se dá em escalas horária e diária, observando-se determinados horários e dias em que ela é maior ou menor. Com o uso do paradigma rítmico deve-se respeitar tal dinâmica, até que sejam compreendidos os encadeamentos dos tipos de tempo diários relacionados à dinâmica da poluição.

Em dado lugar, episódios de altos índices de poluição podem ocorrer com duas condições: uma seria aquela em que a emissão de poluentes seja excepcionalmente elevada, e a outra em que a sucessão de tipos de tempo seja excepcionalmente prejudicial à dispersão da poluição produzida na metrópole. Ambas situações remetem ao conceito de ritmo, na climatologia e nas atividades antrópicas, em que o excepcional representa uma anomalia ou disformidade.

Os invernos de 2001 a 2004 na RMSP, foram propositadamente escolhidos porque o inverno representa o período do ano em que os estados atmosféricos são os mais prejudiciais à qualidade do ar e porque os referidos anos tiveram volume semelhante de emissões dos poluentes, segundo a CETESB (2005). Nesta perspectiva, os episódios de elevada poluição por fontes móveis na RMSP estão mais associados às sucessões de tipos de tempo do que a excepcionais emissões por parte dos veículos automotores.

O fator do ritmo antrópico foi considerado nas análises dos gráficos de poluentes construídos com dados horários nos quatro invernos (*Figura 5*), identificando-se os finais de semana e os dias comerciais, com o intuito de verificar o comportamento nas escalas horária e diária dos poluentes ao longo do período. Em seguida, foram definidos os episódios de grande poluição com uso de gráficos padronizados, compostos por dados diários dos poluentes, alcançados pelo cálculo da média dos dados horários em cada um dos dias.

Os episódios selecionados foram compostos por dias que antecedem e que sucedem os dias em que pelo menos um dos poluentes tenha atingido valor máximo no gráfico padronizado de cada inverno para os quatro poluentes, ou seja, cada episódio abarca o período de elevação, ápice e queda dos poluentes. Quando houve falta de dados para algum dos poluentes, o episódio foi descartado. O mesmo não aconteceu nos casos em que dois ou três poluentes atingiram a escala de valor máximo no gráfico padronizado.

Das observações feitas sobre os gráficos de poluentes nos invernos de 2001 a 2004, e da comparação de seus resultados com o relatório da CETESB (2004), foi possível concluir que os poluentes primários possuem ritmos horários semelhantes. O material particulado se diferencia por apresentar muitas variações dentro de um mesmo dia (fontes variadas e ressuspensões), enquanto o monóxido de carbono e o dióxido de nitrogênio possuem dois picos diários mais definidos (fontes semelhantes).

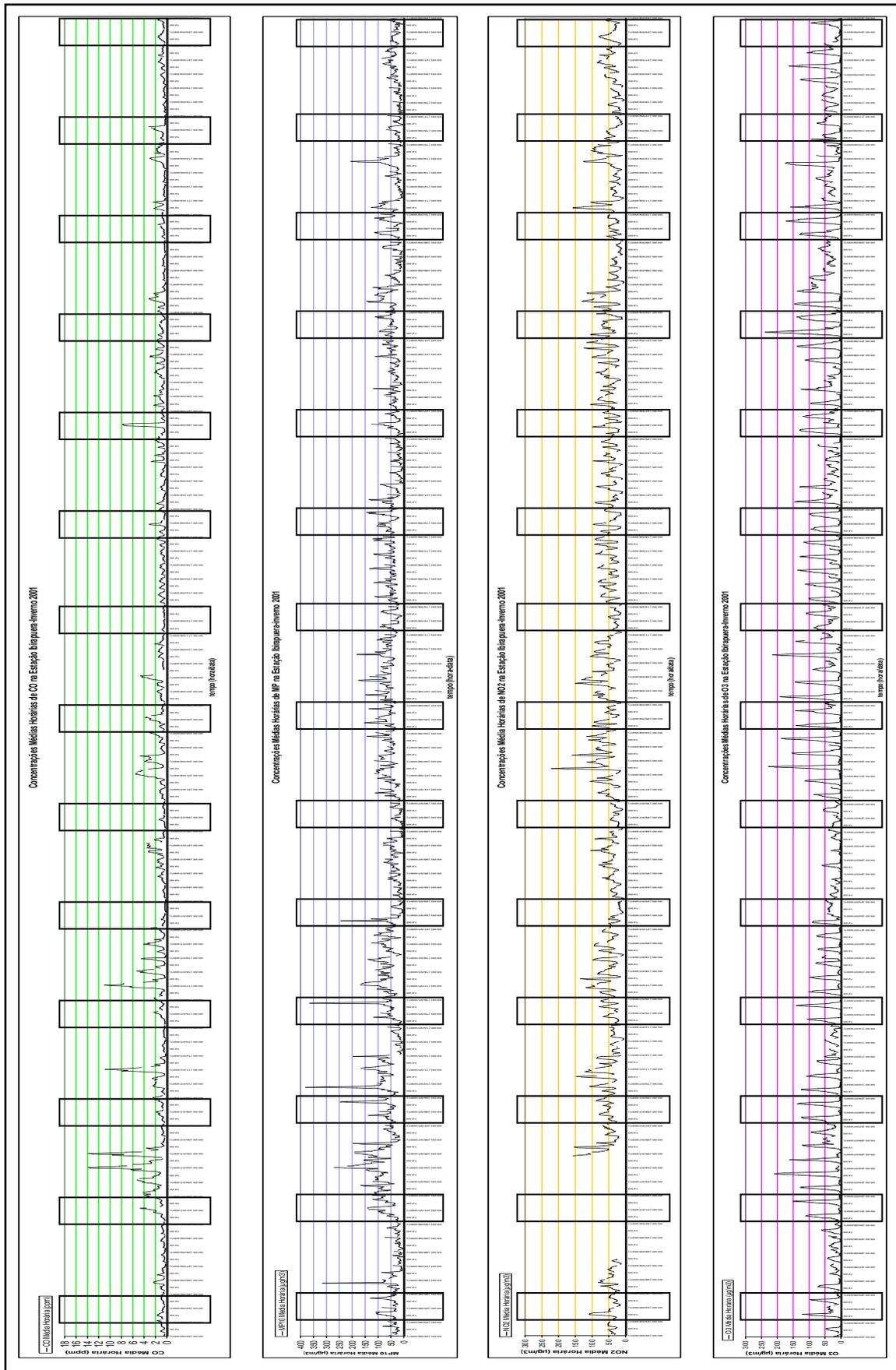


Figura 5 - Exemplo do inverno de 2001 para dados horários de CO, MP10, NO₂ e O₃

O CO teve maiores concentrações em dias úteis e durante manhãs e noites, decorrência da grande quantidade de automóveis em circulação e pela perda de calor na troposfera inferior, causando diminuição de sua espessura e maior concentração da poluição.

Já o ozônio, único poluente estritamente secundário analisado, possui maior regularidade rítmica diária, pois suas altas concentrações dependem efetivamente dos horários de maior radiação solar. A segunda metade de cada um dos invernos foi mais poluída pelo ozônio, influência do posicionamento astronômico do sol.

Para escolher os episódios de grande poluição em cada inverno, os dados de CO, MP10, NO₂ e O₃ foram transformados da escala horária para escala diária (também usados posteriormente na construção dos gráficos de análise rítmica). Depois de transformar os dados horários de cada poluente em médias diárias⁴, foi aplicada a seguinte fórmula de padronização aos dados diários, de cada poluente, em cada um dos invernos:

$$P_i = \frac{X_i - m}{M - m}$$

P_i = o valor padronizado;

X_i = valor original da variável;

m = menor valor da variável;

M = maior valor da variável;

Posteriormente, gráficos foram gerados a partir dos resultados obtidos da padronização dos dados de CO, MP10, NO₂ e O₃ (*Figura 6*), e os episódios escolhidos representando o período de grande poluição, mais os dias anteriores ao pico de poluição com o aumento das concentrações, e os dias posteriores aos picos, com a diminuição das concentrações. A escolha dos episódios se baseou então na identificação dos dias em que algum dos poluentes atingiu a escala do valor 1 nos gráficos padronizados.

⁴ Cada poluente possuía vinte e três dados horários por dia, pois há um determinado horário de manutenção diária em que os sensores não registram as medições. Por este motivo, cada dado diário que produzimos é resultado da soma dos dados horários divididos por vinte e três e não por vinte e quatro.

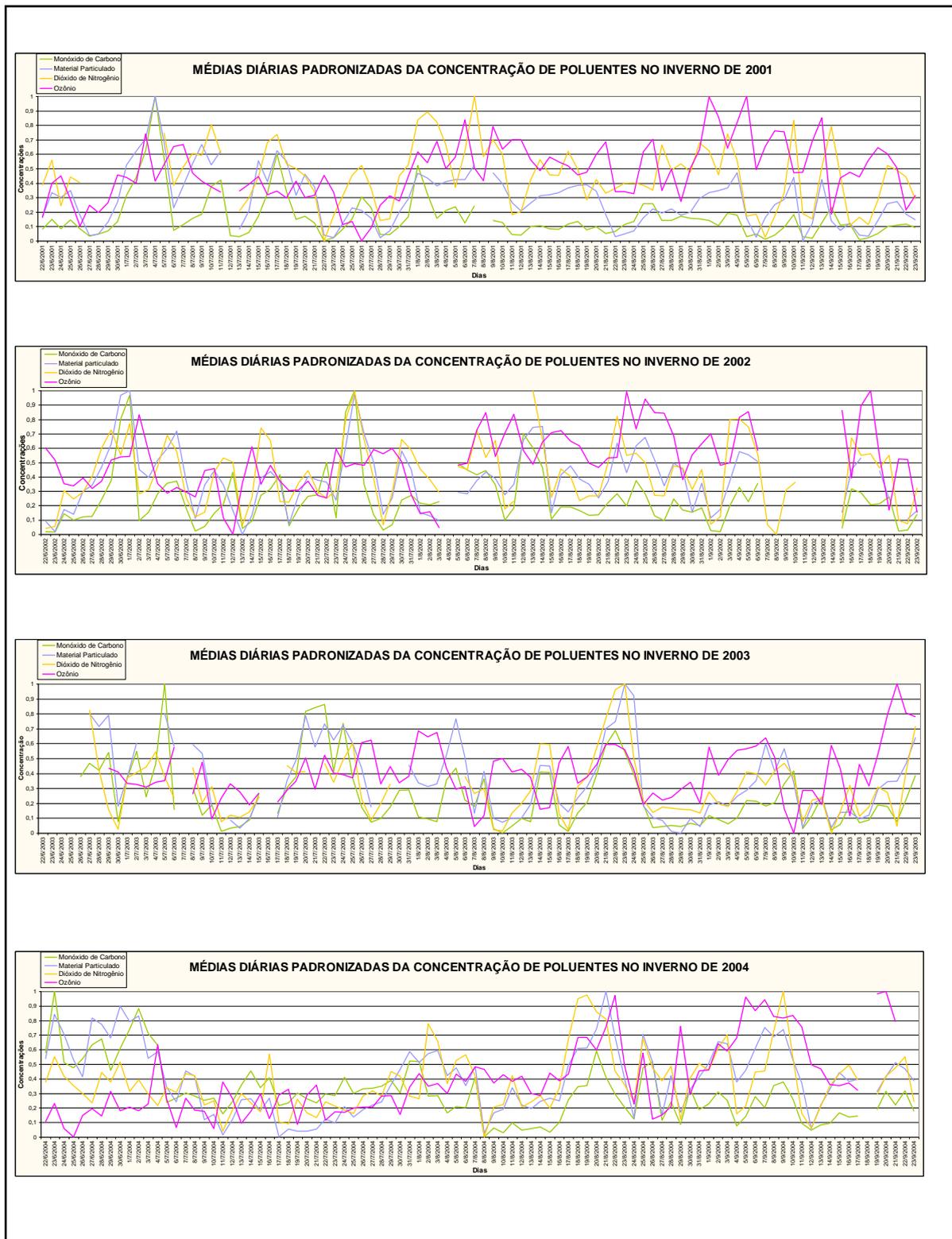


Figura 6 - Gráficos de dados médios diários padronizados dos quatro poluentes em cada inverno (2001, 2002, 2003 e 2004).

4.4. A análise rítmica de episódios de intensa poluição.

Depois de selecionar episódios de alta poluição, deu-se início à confecção dos respectivos gráficos de análise rítmica para cada um dos dez episódios. Cada um deles contendo as seguintes informações diárias:

- Poluentes: valores padronizados e não padronizados, respectivamente usados para comparação entre os poluentes num mesmo inverno e para possibilitar comparações entre invernos e/ou dados de estações diferentes;
- Pressão do ar: valores máximos e mínimos do Aeroporto de Congonhas;
- Temperatura do ar: valores máximos, médios e mínimos registrados no Aeroporto de Congonhas;
- Umidade relativa do ar: valores máximos e mínimos registrados na estação Ibirapuera, e valores médios registrados no Aeroporto de Congonhas
- Pluviosidade: totais acumulados e períodos de ocorrência registrados no Aeroporto de Congonhas;
- Radiação solar: valores médios registrados na estação Ibirapuera.
- Ventos: velocidade e direção do vento mais forte registrado no Aeroporto de Congonhas e duração das três direções de ventos predominantes da estação Ibirapuera.
- Sistemas atmosféricos atuantes, identificados pela análise de imagens de satélite das 00:00Z e 12:00Z, e nas variações rítmicas dos elementos do clima registrados no Aeroporto de Congonhas e na estação Ibirapuera.

A seguir procedemos com o exemplo de um episódio (*Figuras 7 e 8*), neste caso o mais curto e o quarto a ordem dos dez analisados (HEIBER, 2006) e que visa ilustrar a prática analítica. Deste modo tem-se o intuito de identificar os tipos de tempo que atuaram sobre a área de estudo nos períodos em que houve intensa poluição do ar. Assim, a construção dos gráficos serve para contemplar a análise rítmica dos elementos do clima e dos poluentes nos dias em que a poluição alcançou o ápice, e os dias que precedem e sucedem esses os picos da poluição, permitindo-nos avaliar o encadeamento sucessivo

dos tipos de tempo nesses períodos e a influência sobre a poluição do ar por veículos automotores.

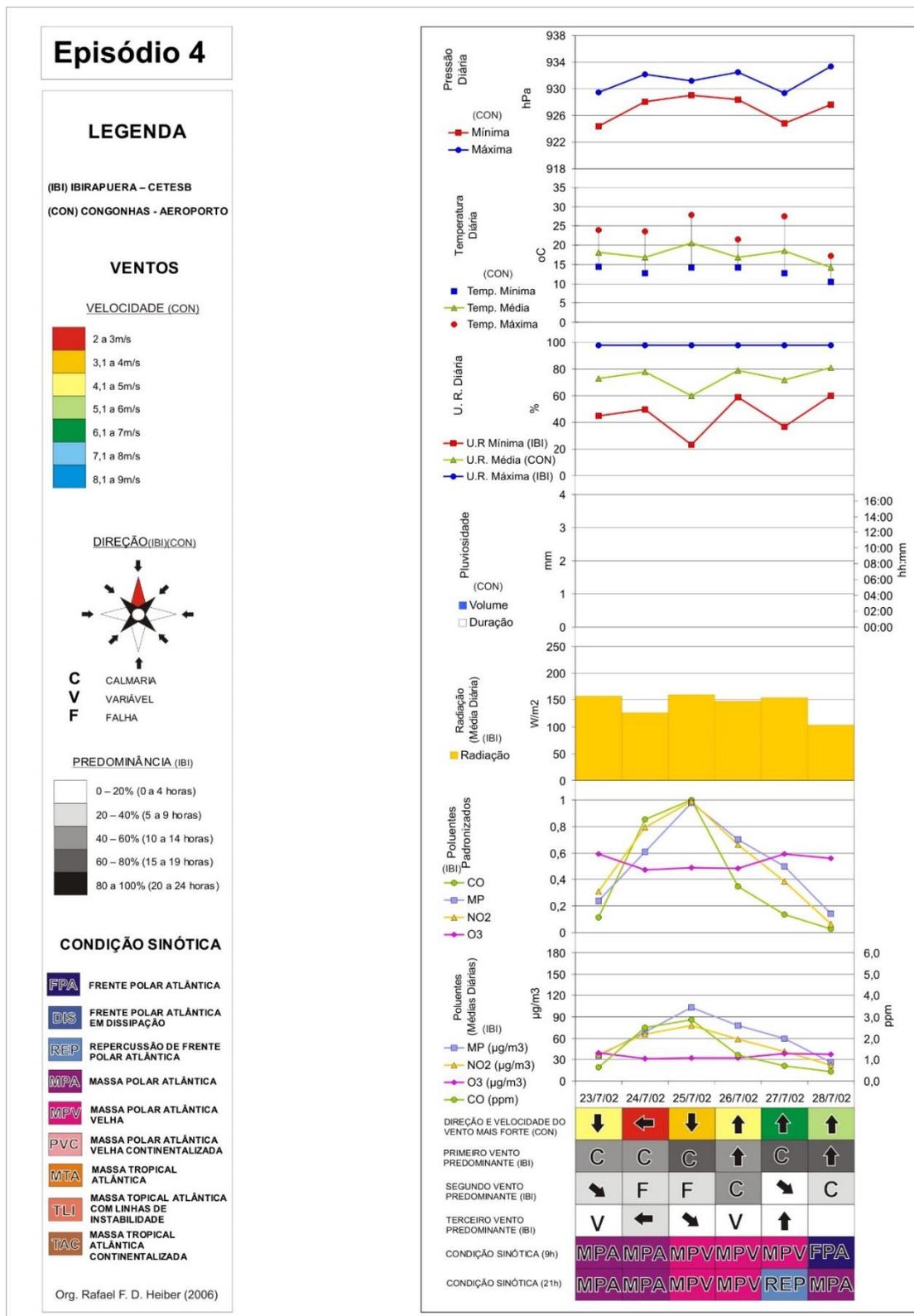


Figura 7 - Gráfico de análise rítmica de poluição na RMSP entre 23 e 28/07/2012.

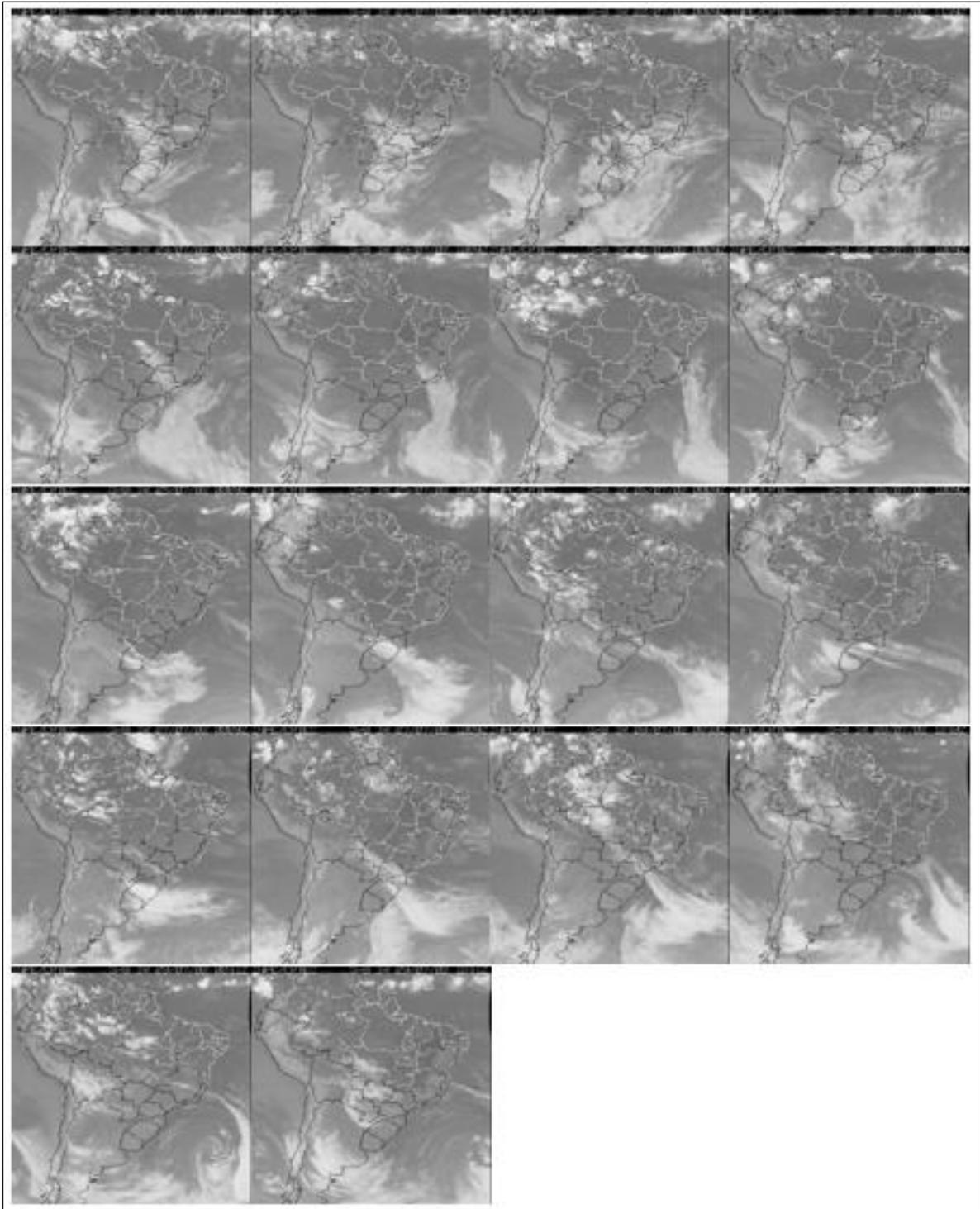


Figura 8. Imagens do Satélite GOES de 20/07/2002 a 29/07/2002.

EPISÓDIO DE MASSA POLAR ATLÂNTICA EM PROCESSO DE TROPICALIZAÇÃO – CURTA ESTABILIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS E ATUAÇÃO DE FRENTE POLAR ATLÂNTICA.⁵

O episódio foi selecionado porque representa período em que os poluentes primários (MP10, CO e NO₂) tiveram altos valores médios diários. Em apenas dois dias, saltaram de pequenas concentrações a níveis que foram dos mais altos no inverno de 2002.

Dia 23/07/2002 – Um sistema frontal polar de sudoeste que deixou o Estado de São Paulo e alcançou o Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais e Goiás. A situação pós-frontal teve domínio da Massa Polar Atlântica (MPA), temperaturas máximas inferiores a 25°C e fracos ventos de N.

Não houve altas concentrações de poluentes primários ou secundários.

Dia 24/07/2002 25/07/2002 – Dias em que os poluentes primários tiveram as altas mais expressivas, atingindo níveis máximos no dia 25. O CO teve quase 3ppm de média diária, o MP10 teve cerca de 100µg/m³ e o NO₂ 80µg/m³. A MPA atuou sobre a RMSP até o dia 24. No dia 25, com aumento da temperatura e queda da umidade, identificou-se a atuação da Massa Polar Velha (MPV). Os ventos foram bastante fracos, com predomínio das direções leste e norte. Estas condições associadas às emissões dos poluentes fizeram com que as concentrações de poluentes primários atingissem os altos níveis supracitados.

Dia 26/07/2002 – Um sistema frontal se formou no Rio Grande do Sul e em São Paulo houve atuação do Anticiclone Polar Atlântico através da MPV. Os ventos de sul foram frequentes com velocidade inferior a 5m/s e a radiação foi semelhante aos dias anteriores, com cerca de 150W/m².

Sob tais condições as concentrações dos poluentes primários diminuiram bastante.

Dia 27/07/2003 – A Frente Polar Atlântica (FPA) alcançou o sul de São Paulo. Na RMSP, com a grande queda da pressão atmosférica, evidenciou-se a situação pré-frontal.

⁵ Por conveniência de espaço e agilidade, utilizamos este episódio como exemplo porque ele abarca apenas cinco dias de análise.

Os ventos de sul ficaram mais fortes, chegando a quase 7m/s e provocando dispersão dos poluentes primários, que tiveram concentrações mais baixas que no dia anterior. As condições pré-frontais, com domínio da MPV e posteriormente repercussão da frente, se mostraram bastante eficientes na limpeza do ar na área central da RMSP.

Dia 28/07/2002 – O sistema frontal passou pela RMSP no período da manhã e a MPA teve domínio sobre o território paulistano nos períodos vespertino e noturno, o que causou aumento de umidade e nebulosidade, além de diminuição das temperaturas.

Os ventos de sul continuaram predominantes e fortes. O tipo de tempo anticiclônico polar oceânico associado a sistemas frontais com bastantes ventos de sul, em sucessão por praticamente três dias, trouxe grande limpeza do ar na área de estudo.

Neste episódio foi possível observar o comportamento semelhante de todos os poluentes primários, que tiveram as mesmas tendências durante todos os dias do período: elevaram-se nas sequências de dias em que o Anticiclone Polar Atlântico atuou através da massa polar em tropicalização, com períodos de calmaria e ventos fracos de direções pouco definidas, mas com registros importantes de ventos de norte e leste.

O ozônio teve comportamento bastante homogêneo, com níveis médios de concentração, em todo período, diferente dos poluentes primários.

Síntese de dez episódios

Seguindo as prescrições supracitadas, dez episódios de poluição foram analisados entre 2001 e 2004 na RMSP e revelaram dois perfis diferentes do fenômeno: episódios de intensa poluição por poluentes primários e episódios de intensa poluição por ozônio.

Os períodos representativos de intensa poluição por monóxido de carbono, material particulado e dióxido de nitrogênio foram caracterizados por longo período de calmaria em detrimento da intensa ação anticiclônica que impediu as invasões frontais. Os processos de tropicalização da MPA e de continentalização da MPV, que influenciaram o aumento das temperaturas e a queda da umidade, representaram os dias de aumento de poluição do ar.

Os mais altos níveis diários de poluição por ozônio foram caracterizados por ação de massas tropicais atlânticas, massas tropicais continentalizadas, massas polares velhas continentalizadas e massas polares em processos de tropicalização, com dias bastante

ensolarados e quentes em que as calmarias não foram responsáveis pelo aumento das concentrações de ozônio, ao contrário dos episódios de poluentes primários.

Todos os episódios analisados, contemplando a evolução da concentração dos poluentes, se iniciaram com dias em situação pós-frontal e terminaram com a ação de FPA, seja por dissipação, repercussão ou ação patente da frente. Observa-se, pois, a limpeza do ar pelos sistemas frontais atuantes na RMSP.

As análises do CO representaram os melhores resultados dentro do roteiro metodológico, dado seu vínculo quase estrito com as emissões veiculares e sua baixa atividade química na atmosfera. Atribuímos as diferenças de concentrações à ação de intensos sistemas anticiclônicos bloqueadores de sistemas frontais, com tipos de tempo em que atuaram a MPA e a MPV, num cenário de longa calmaria terminada por incursões da FPA e sua repercussão na instabilidade atmosférica.

CONCLUSÕES

Nossa proposta neste artigo foi, primeiro, representar a validade das bases erigidas há quarenta anos por Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro para o estudo do clima urbano e a qualidade do ar. Neste caso, utilizamos um estudo da poluição causada por veículos automotores na Região Metropolitana de São Paulo aplicando o paradigma do ritmo climático para identificar de tipos de tempo e entender os episódios de intensa poluição.

Segundo, acreditamos que este tipo de estudo e roteiro pode ser muito útil à prática pedagógica na academia, preparando os recém e futuros pesquisadores na tarefa de sintetizar fenômenos complexos sem a necessidade de reduzi-los equivocadamente, mas vinculá-los, relacioná-los, entende-los na vitalidade de sua dinâmica.

Muitas possibilidades poderiam ser sugeridas e certamente terminariam calibrando e gerando uma guia metodológica mais fina. Para não ir muito longe, e a modo de sugestão aos jovens geógrafos, entre os vários poluentes na atualidade possíveis de se analisar, seria interessante entender a diferença da dinâmica do material particulado de 2,5 μ m (MP2,5) em comparação com o material particulado de 10 μ m (MP10) analisado aqui. Suspeitamos que aquele (MP2,5) esteja ainda mais correlacionado aos veículos automotores que este (MP10).

BIBLIOGRAFIA

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, Caracterização das Estações da Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar na RMSP: Estação Ibirapuera. São Paulo, 2004.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2004. São Paulo, 2005.

HEIBER, R. F. D. H. Poluição do ar por veículos automotores e tipos de tempo em regiões metropolitanas: a elaboração de um roteiro metodológico. Dissertação (Mestrado), UNESP, 2006.

LATOUR, B. As Políticas da Natureza: como fazer ciência na democracia. EDUSC, São Paulo, 2004.

LATOUR, B. Reensamblar lo social: una introducción a la teoría del actor-red (1 Ed), Manantial, Buenos Aires, 2008.

MONTEIRO, C. A. F. Sobre a análise geográfica de seqüências de cartas de tempo. Rio Claro, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras. 1963. 7p. (Publicação didática, Série A, nº1).

_____. A frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada sul-oriental do Brasil. São Paulo: IG-USP, 1969. 68p. (Série Teses e Monografias nº1)

_____. A análise ritmica em climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e e achegas para um panorama de trabalho. Climatologia 1, São Paulo: IG-USP, 1971. 21p.

_____. Teoria e Clima Urbano. São Paulo: IGEOG-USP, 1976 (Série Teses e Monografias n. 25).

_____. Geografia e Ambiente. Revista do IG – USP, n.5 (Série Orientação). São Paulo, 1984.

_____. A Dinâmica Climática e as chuvas no Estado de São Paulo. Rio Claro, Unesp – Grupo de Pesquisa Climatologia Geográfica, 2000. v. 1. 1cd.

PÉDELABORDE, P. Introduction a l'étude scientifique du climat. Paris: SEDES, 1970.

SORRE, M. Les fondaments de la Geographie Humaine. Paris: Libr. Armand Colin. 1951. (les fondemensts biologiques – le climat).

STENGERS, I. The cosmopolitical proposal. In B. Latour & P. Weibel (Eds.), Making Things Public: Atmospheres of Democracy (First edition, pp. 994–1003). The MIT Press, Cambridge, 2005.

TARIFA, J. R.; MORAES, A. C. R.; COSTA, W. M. Tipos de tempo e balanço de energia na cidade de São Paulo. São Paulo: IG-USP, 1977. (Climatologia, n. 8).

ZAVATTINI, J. A. Estudos do clima no Brasil. Campinas: Alínea, 2004.

ZAVATTINI, J. A. A Climatologia Geográfica no Brasil e na Itália. *Ciência e Natura*, 36 (1), 2014.