

Compreensão da formação de NO₂ proveniente das operações de transporte urbano e suas relações com agentes causais

Jefferson Pereira Ribeiro¹, Demostenis Ramos Cassiano², Bruno Vieira Bertoncini³,
Verônica Teixeira Franco Castelo Branco⁴, Francelino Franco Leite de Matos Sousa⁵,
Wendy Fernandes Lavigne Quintanilha⁶, Rivelino Martins Cavalcante⁷,
Ithala Saldanha de Santiago⁸, Gabrielle Melo Fernandes⁹

¹Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, Brasil, jeffersonufc7@gmail.com

²Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, Brasil, cassiano@det.ufc.br

³Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, Brasil, bruviber@det.ufc.br

⁴Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, Brasil, veronica@det.ufc.br;

⁵Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, Brasil, francolms@gmail.com;

⁶Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, Brasil, wendy@det.ufc.br

⁷Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, UFC, Brasil, ithalasantiago@gmail.com;

⁸Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, UFC, Brasil, gabimelof@gmail.com;

⁹Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais, UFC, Brasil, rivelino@labomar.ufc.br

Recebido:

12 de junho de 2018

Aceito para publicação:

26 de janeiro de 2019

Publicado:

31 de agosto de 2019

Editor de área:

Sara Ferreira

Palavras-chaves:

Mobilidade urbana;
Concentração de NO₂;
Uso do solo;
Gabarito das edificações;
Volume de tráfego.

Keywords:

Urban mobility;
NO₂ levels;
Land use; building height;
Traffic volume.

DOI:10.14295/transportes.v27i2.1728

RESUMO

Os problemas oriundos da mobilidade urbana estão relacionados ao crescimento acelerado e não planejado das cidades, à distribuição espacial das atividades, ao crescimento expressivo do uso do automóvel, as deficiências do transporte público e a ocorrência de impactos negativos nos âmbitos sociais e ambientais, tendo como um dos principais impactos a concentração de NO₂. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência dos fatores (gabarito das edificações, uso do solo e volume de tráfego) nas concentrações de NO₂. Para tal, a complexidade do uso do solo urbano foi traduzida por meio do indicador que mede a diversidade do uso do solo urbano, entropia. As concentrações de NO₂ foram medidas através de um método de amostragem passiva. Como principais resultados verificou-se que o volume de tráfego veicular aliado a elevada entropia se relacionam diretamente com as concentrações de NO₂. O gabarito das edificações se relaciona com estas concentrações mas não de forma tão direta, pois tal fator pode ser suprimido pelo tráfego veicular ou influenciado por fenômenos naturais que facilitam ou não a dispersão de NO₂.

ABSTRACT

Challenges arising from urban mobility are related to rapid and unplanned growth of cities, spatial distribution of activities, significant increase in car usage, deficiencies of existing public transport system, and negative impacts on social and environmental scope. One of the main results of these problems is NO₂ concentration. Therefore, the present work aims to evaluate the influence of factors (building model, land use, and traffic volume) on NO₂ concentrations. In order to do this, urban land use complexity has been expressed by entropy, the index that measures the diversity of urban land use. NO₂ concentrations were measured by a passive sampling method. As main results, it was verified that the volume of vehicular traffic coupled to high entropy are directly related to NO₂ concentrations. On the other hand, the building height is also related to NO₂ levels, but not so directly, as this factor can be suppressed by vehicular traffic or be influenced by natural phenomena that facilitate or not the dispersion of NO₂.



1. INTRODUÇÃO

O setor de transportes – que é de suma importância para a sociedade, de forma a garantir o

deslocamento e acesso a bens, ou para permitir seus próprios deslocamentos com vistas a atender as necessidades diárias – está diretamente associado aos desafios da gestão urbana, pois é reconhecido como uma das principais fontes de poluição do ar em todo mundo (Colville *et al.*, 2001), ao mesmo tempo que resulta em outros inconvenientes para a sociedade (Taniguchi *et al.*, 2011).

Em geral, os estudos que abordam a poluição atmosférica como um dos impactos oriundos do setor de transportes, o fazem a partir de um viés que generaliza os resultados, sem relacionar parâmetros que venham a agravar tais impactos. Esse tipo de análise pode ser observada em trabalhos como Mayer (1999), Cruz e Campos (2002), Guttikunda *et al.* (2003) e Campos *et al.* (2010). Em contrapartida, alguns autores estudam a relação entre a poluição atmosférica e parâmetros individuais, por exemplo: tráfego, características demográficas e o próprio ambiente urbano, individualizado na figura do uso do solo (Yuval *et al.*, 2008; Eeftens *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018). Análises que busquem visualizar tais impactos de forma holística são vistas com menor frequência na academia, principalmente quando se busca avaliar a realidade brasileira.

Os efeitos ambientais, norteados pelas mudanças climáticas e pelos efeitos locais, são de extrema relevância nos dias atuais (WHO, 2015). Diante disso, acredita-se que o processo de análise, bem como o planejamento de um sistema de transportes, em si, deva incorporar com mais propriedade as questões ambientais, em especial dentro da análise das relações causais assumidas no processo desse planejamento.

Acredita-se que a falta de importância, traduzida pela não incorporação da problemática ambiental no planejamento de sistemas de transportes, especialmente no contexto brasileiro, tem, em partes, sua raiz no processo de formação acadêmica dos Engenheiros de Transportes, o que é notado, inclusive, na carência de trabalhos publicados por estes profissionais envolvendo a formação e análise da poluição atmosférica decorrentes desse setor.

Dessa forma, o presente estudo busca contribuir na compreensão da problemática da qualidade do ar em ambiente urbano, relacionada com os componentes constituintes de tal ambiente e utilizados no processo de planejamento de sistemas de transportes. Em complementação, busca-se enriquecer a discussão com os seguintes objetivos específicos: (1) avaliação do uso de amostradores passivos na quantificação de NO₂; (ii) compreensão do processo de formação dos impactos ambientais urbanos através do entendimento das relações entre os sistemas de transporte e de atividades; e (iii) compreensão dos fatores que influenciam a concentração desse poluente no meio urbano.

2. CONCENTRAÇÃO DE NO₂ E O SISTEMA DE TRANSPORTES

2.1. Formação do NO₂ e os efeitos sobre o meio ambiente

Os Óxidos de Nitrogênio (NO_x) são constituídos por diferentes substâncias e ganham destaque, principalmente nas áreas urbanas, devido ao aumento acentuado da frota de veículos automotores nos últimos anos (Alnawaiseh *et al.*, 2015), como encontrado em áreas próximas aos grandes centros comerciais e corredores de tráfego em horários de pico (Teixeira *et al.*, 2008). Segundo D'Agosto (2015), a atividade de transportes é responsável por 59% da concentração de NO_x presente no meio ambiente, sendo que a principal fonte emissora é proveniente do processo de combustão incompleta em motores veiculares (Hagenbjörk *et al.*, 2017). A maior proporção do NO_x é emitida como NO (90 – 70%), enquanto que a menor proporção é emitida na forma de NO₂ (10 – 30%) (Hagenbjörk *et al.*, 2017). Entretanto, o NO₂ pode ser produzido por

reações secundárias, através da interação entre dois ou mais poluentes primários presentes na atmosfera (Cónsul *et al.*, 2004), que contribuem para a manutenção de concentrações elevadas desse poluente em ambientes urbanos. A geração de NO₂ está diretamente associada a diferentes aspectos do veículo, tais como tipo de veículo, combustível utilizado, tecnologia do tratamento dos gases de escape, bem como o padrão de condução veicular (Cónsul *et al.*, 2004; Carslaw, 2005), obedecendo ordem cronológica.

O NO₂ apresenta diversos efeitos negativos sobre os seres vivos, em humanos causa irritações nas vias respiratórias, e ao meio ambiente em geral, tanto para componentes bióticos quanto abióticos, dependendo da concentração desse composto na atmosfera e do tempo de exposição ao composto. Além disso, o NO₂ também pode ocasionar chuva ácida, que gera impactos negativos na vegetação e a monumentos, ou equipamentos urbanos, como redes de transmissão de energia (Vesilind e Morgan, 2011). Diante dessa problemática, a compreensão da relação entre o sistema de transportes e a poluição atmosférica se faz necessária.

2.2. Relação entre o sistema de transportes e a poluição atmosférica

De forma geral, a presença do NO₂ em área urbana é derivada da ação direta dos transportes (Requia *et al.*, 2016), o que reforça a importância de compreender e quantificar a formação deste poluente dentro de um processo de planejamento de sistemas de transportes. Assim, para entender a importância dos impactos ambientais aqui representados pelo poluente NO₂, é preciso entender a dinâmica dos transportes em geral em uma zona urbana. Por sua vez, o transporte é uma atividade secundária, originada pelo desejo e/ou necessidade do deslocamento de pessoas e/ou bens, uma vez a demanda por deslocamentos é resultado da interação entre várias atividades econômicas e sociais, em uma determinada área (Cascetta, 2009).

Mas de que forma este poluente (NO₂) e aspectos dos sistemas de transporte se relacionam? Assim, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, seguindo proposta de Wee e Banister (2016), para determinar quais fatores ajudam na compreensão da formação de NO₂ decorrente do sistema de transportes. Para tal, definiu-se critérios de identificação de trabalhos, detalhando: forma de coleta, tipo, base de dados e palavras-chaves utilizadas na busca. Além disso, foram estabelecidos critérios de seleção, inclusão e exclusão dos trabalhos, de modo a filtrar o conteúdo encontrado e cumprir o objetivo da revisão.

Os critérios utilizados para revisão sistemática foram divididos em três etapas, na primeira: identificação das fontes de dados, palavras-chave e os tipos de trabalho. Neste trabalho foram utilizadas as seguintes fontes de pesquisa: Science Direct, Web of Knowledge e Scopus (Elsevier) e TRID (Transport Research International Documentation). As palavras-chave utilizadas para busca foram: *Air Urban Pollution*, *NO₂ Pollution*, *Land Use Pattern*, *Diversity of Land Use*, *Urban Traffic*, *Street Canyon*. Os tipos de trabalho considerados foram: artigos científicos, livros, teses e dissertações. Na segunda etapa, a partir da leitura dos resumos, foram selecionados trabalhos que apresentassem as abordagens temáticas: qualidade do ar urbano; influência do tráfego veicular na qualidade do ar urbano; influência do gabarito das edificações na concentração de poluentes atmosféricos; impacto do padrão de uso do solo no tráfego veicular. Na terceira etapa, os trabalhos que não se relacionam com o tema proposto foram excluídos e incluídos outros identificados pela estratégia “bola de neve” (*snowballing*), que consiste em obter outros estudos a partir do referencial teórico do portfólio de artigos.

Como resultado dessa pesquisa bibliográfica, 50 trabalhos foram identificados pelas palavras-chave. Após a análise dos resumos, 18 artigos foram incluídos na revisão sistemática, onde

foi identificado que os fatores uso e ocupação do solo, gabarito das edificações e volume de tráfego possuíam adesão aos objetivos do presente estudo. Os trabalhos selecionados estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1: Síntese da revisão bibliográfica

Fatores	Referência
Uso e ocupação do solo	Beelen <i>et al.</i> , 2010; Sider <i>et al.</i> , 2013; Hong e Goodchild, 2014; Weber <i>et al.</i> , 2014; Rodríguez <i>et al.</i> , 2016; Zhang <i>et al.</i> , 2018
Gabarito das edificações	Taseiko <i>et al.</i> , 2009; Richmond-Bryant <i>et al.</i> , 2011; Richmond-Bryant e Reff, 2012; Eeftens <i>et al.</i> , 2013; Bender e Dziedzic, 2014; Karra <i>et al.</i> , 2017
Volume de tráfego	Beevers e Carslaw <i>et al.</i> , 2005; Yuval <i>et al.</i> , 2008; Zhang e Batterman, 2013; Rakowska <i>et al.</i> , 2014; Zhou <i>et al.</i> , 2014; Liu <i>et al.</i> , 2017

De acordo com Zhang *et al.* (2018), as emissões de poluentes oriundas dos transportes estão relacionadas aos padrões de uso do solo, que afetam a configuração urbana impactando na geração de viagens, alterando os níveis de poluição. Os padrões de uso e ocupação do solo podem afetar, acentuadamente, a poluição atmosférica oriunda dos transportes, pois dependendo do tipo de atividade, comercial ou residencial, estes podem gerar maior número de viagens, o que culminará na maior emissão de gases poluentes para o meio ambiente. Segundo Sider *et al.* (2013), as atividades comerciais são responsáveis pela maior fração de poluentes lançados ao meio ambiente.

O gabarito das edificações, além de outros fatores como condições meteorológicas, pode influenciar na concentração dos poluentes presentes no ambiente urbano, e funcionar como barreiras artificiais para a dispersão dos gases atmosféricos (Bender e Dziedzic, 2014). Entretanto, não é apenas a altura das edificações que corroboram para o impedimento da dispersão dos gases. A largura da via também é um fator de influência. Através desses dois aspectos pode-se avaliar a forma da superfície edificada, que é calculada pela razão entre a altura das edificações (A) e a largura da via urbana (L) (Oke, 1988; Sousa *et al.*, 2015; Aguiar *et al.*, 2017). Karra *et al.* (2017) avaliaram a influência da heterogeneidade das edificações e da variabilidade dos ventos para a dispersão de poluentes atmosféricos. Nesse estudo, os autores constataram que a heterogeneidade no uso do solo, no padrão de gabarito das edificações, dificulta a dissipação dos gases poluentes, pois esta favorece a formação dos *cânions* urbanos.

Quanto ao volume de tráfego, Zhou *et al.* (2014) avaliaram a influência do volume de tráfego na emissão de poluentes. Os resultados desse estudo mostraram que o aumento do volume de veículos proporciona maior emissão de gases poluentes para a atmosfera. Por sua vez, o volume do tráfego possui forte relação direta com os níveis de poluição atmosférica. Segundo Ariotti (2010), as características da via urbana influenciam no volume do tráfego e, conseqüentemente, na poluição, entre elas pode-se destacar: geometria, velocidade máxima permitida e presença de semáforos ou interseções. Outro fator que potencializa a emissão de poluentes pelos veículos é o congestionamento do tráfego, sendo este um dos principais problemas enfrentados atualmente pela população urbana (Zhang e Batterman, 2013).

Os padrões de uso do solo ditam a necessidade por viagens, dado que os mesmos traduzem a maneira como as atividades estão distribuídas em uma área urbana. Como cada atividade (trabalho, lazer) geram desejo por transportes, tem-se aí a configuração da ocorrência de viagens em um ambiente urbano. Um dos desafios consiste em relacionar esta ocupação do solo com as viagens. Uma proposta para caracterizar numericamente o padrão uso do solo é o indicador de entropia. A entropia como indicador da distribuição de ocupações varia entre 0 e 1. Quando o

valor da entropia é zero, entende-se um uso do solo único, sem variação. Quando atinge o valor da unidade (1), a entropia está em perfeito balanceamento, pois os distintos tipos de uso do solo coexistem dentro da área em estudo (Sun *et al.*, 1998; Kockelman, 1997). Infere-se disto que, em condições ótimas, quanto maior a entropia, mais “eficaz” tende a ser os deslocamentos, pois minimamente os mesmos tendem a diminuir. Contudo, em condições urbanas brasileiras, quanto maior a entropia, maior a geração de viagens local, dado que a estrutura dos municípios ainda centra os deslocamentos em grandes distâncias e com uso de modos motorizados. Assim, adotou-se no presente trabalho o conceito de entropia para auxiliar na definição do comportamento do uso do solo das áreas avaliadas, para com isto expressar a concentração de viagens e, conseqüentemente, de poluentes oriundos desta atividade.

Diante do exposto, a Figura 1, tenta de forma conceitual, representar a relação entre os sistemas de atividades, retratada na forma de uso do solo, e transportes, bem como mostrar o alcance dos seus impactos.

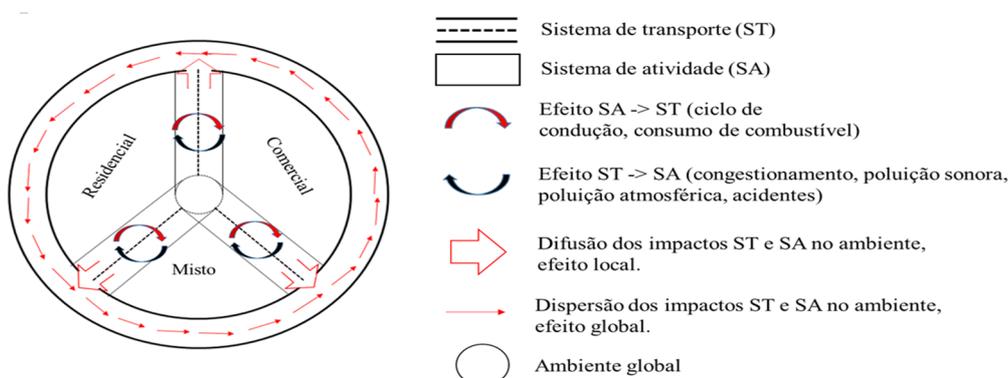


Figura 1: Poluição atmosférica no contexto de um sistema de transportes

Tais situações podem influenciar a concentração de poluentes atmosféricos de forma macro, ou microscópica. A influência macro está relacionada à concentração de poluentes em um nível agregado de informação, ou seja, sem isolar, nem correlacionar os fatores que influenciam as concentrações dos poluentes presentes no ambiente. Para uma análise micro leva-se em consideração a influência de fatores de forma desagregada, ou seja, busca-se relações causais entre a emissão, concentração e a dispersão dos poluentes (Karra *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018).

A compreensão da relação entre o sistema de transportes e a poluição atmosférica é extremamente relevante para a proposição de medidas mitigadoras dos impactos ambientais. No entanto, a escolha de um método de amostragem ambiental adequado passa pelo entendimento sobre as diversas metodologias utilizadas para a quantificação de poluentes atmosféricos.

3. MÉTODOS DE AMOSTRAGEM AMBIENTAL

A avaliação da poluição atmosférica oriunda dos transportes pode ser realizada de duas formas: (i) considerando as emissões, ou seja, as concentrações dos gases são analisadas após a saída das mesmas dos escapamentos veiculares; e (ii) através da dispersão, quando estes são analisados após o lançamento dos mesmos no meio ambiente. É importante salientar que as concentrações dos gases provenientes das emissões são mais elevadas se comparadas às oriundas dos poluentes que se encontram no meio ambiente (devido ao processo de dispersão).

Como forma de avaliar esses poluentes, existem várias técnicas para o monitoramento da qualidade do ar, a mais difundida é a ativa (Campos *et al.*, 2010; Hagenbjörk *et al.*, 2017). No entanto, esse tipo de monitoramento normalmente é dispendioso, necessita de mão de obra especializada para a realização da coleta, manutenção constante do equipamento de amostragem e também requer energia elétrica para o seu funcionamento. Este conjunto de fatores limita o monitoramento contínuo de vários locais ao mesmo tempo.

Por outro lado, os amostradores passivos capturam da atmosfera amostras de poluentes na forma de vapor ou gás, sem envolver a necessidade de um fluxo ativo de ar. A passagem de ar, neste caso, é controlada por processos físicos, como a difusão ou a permeação, não necessitando de energia elétrica, nem de mão de obra especializada e permitem alta resolução espacial da amostragem (Campos *et al.*, 2010), possibilitam monitoramento contínuo em vários locais ao mesmo tempo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A cidade de Fortaleza foi assumida como região para estudo, sendo a quinta maior cidade do país em termos populacionais, com área de aproximadamente 314 km. Assumiu-se como área de estudo uma região com representatividade em termos de comércio, serviços e residências, o que levou a escolha da Regional II, exposta na Figura 2.

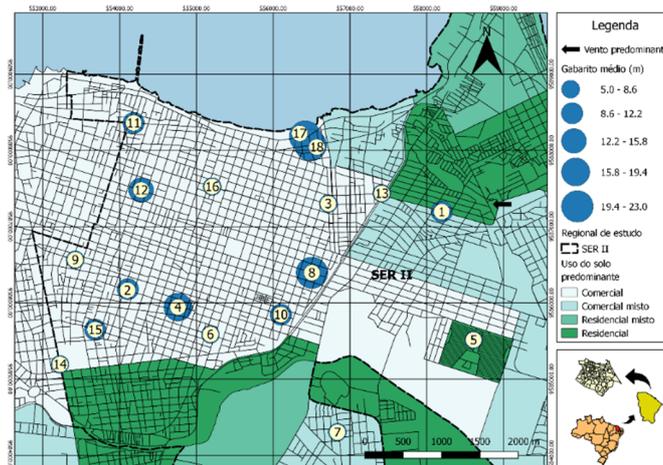


Figura 2: Localização dos pontos de amostragem na área de estudo

Os dados utilizados no estudo referentes ao uso do solo foram obtidos a partir da base de dados do IPTU da Secretaria de Finanças do Município (SEFIN) e apresentam os usos e as ocupações por lote. Através dos 18 pontos, buscou-se identificar áreas cujo predomínio fosse residencial, comercial, ou misto, evitando a instalação de amostradores próximos a regiões industriais.

Por sua vez, o gabarito das edificações foi avaliado a partir de uma análise com o auxílio do *Google Street View*, onde foram avaliados os locais com as maiores ocupações de prédios e aqueles com elevada ocupação residencial. A partir daí construiu-se uma altura média da quadra na qual se iriam inserir os pontos de amostragem.

Para estimar as condições de tráfego nos pontos estudados, foram utilizados dados do *Google Trânsito*, o que permitiu verificar a influência da corrente de tráfego no desempenho da rede viária. Esta ferramenta mostra a condição do tráfego em uma escala com quatro cores, variando

do rápido ao lento. Este padrão foi traduzido neste artigo seguindo uma codificação numérica, variando de 0 a 3, como apresentado na Figura 3. Isto possibilitou dados de fluxo de tráfego, que por sua vez foi analisado em termos da concentração de poluentes, ou seja, quanto mais lento o fluxo, maior a emissão de poluentes.

Ao utilizar a ferramenta do *Google* Trânsito é assumida a limitação de que em algumas situações ele pode não trazer uma boa representatividade. De acordo com Khisty e Lall (2002) e Cascetta (2009), os modelos derivados da teoria do fluxo de tráfego visam representar as interações entre os veículos que utilizam a mesma infraestrutura viária ao mesmo tempo, diante disso tais interações podem resultar um desempenho de rede bem distinto tendo um mesmo fluxo de tráfego. Neste trabalho os locais de estudo estão dentro da realidade modelada pelo *Google* Trânsito, respeitando as relações de fluxo, volume e capacidade.



Figura 3: Codificação da classificação das condições de tráfego do *Google* Trânsito

Para a avaliação do uso e ocupação do solo foi utilizada a formulação matemática (1) da entropia. Esse conceito é baseado na ideia de que a relação entre a diversidade do uso do solo urbano pode influenciar na forma como ocorrem os deslocamentos em uma zona urbana (Kockelman, 1997; Sun *et al.*, 1998; Bordoloi *et al.* 2013).

$$Entropia = - \sum_i \frac{P_i \ln(P_i)}{\ln(I)} \quad (1)$$

onde: I é o número de diferentes tipos de uso do solo; e P_i é a proporção do uso do solo i .

Com isso, nesse trabalho calculou-se a entropia do entorno de cada um dos 18 pontos selecionados para amostragem da concentração de poluentes. Dessa forma, espera-se captar o potencial pontual do padrão de uso do solo em cada ponto, assumindo a limitação de que o fluxo veicular é dinâmico e não pontual, mas não esquecendo do potencial dos Polos Geradores de Tráfego, em sua maioria, na cidade de Fortaleza, concentrados na região central, parcialmente englobada na área em estudo. A coleta da concentração de NO_2 foi feita com auxílio de amostradores passivos, adaptando a proposta de Campos *et al.* (2010), conforme ilustrado na Figura 4. Na extremidade fechada foi colocado o filtro, já impregnado com a solução absorvedora que irá reagir com o NO_2 presente no ar (Figura 4a) e três amostradores foram colocados em um suporte de acrílico (Figura 4b) e fixados em postes de energia elétrica localizados nas vias escolhidas.

As etapas de preparação dos amostradores passivos são: lavagem dos amostradores com dertec (Extran, Merk) e água deionizada; secagem à temperatura ambiente. Para a amostragem do NO_2 foi adicionado 100 μL da solução absorvedora em cada filtro de celulose de 25 mm de

diâmetro e estes, após secos em dessecador à vácuo por um período de 30 min., foram inseridos nos amostradores. Os amostradores foram armazenados em sacos herméticos e acondicionados a 4°C até o momento da amostragem.

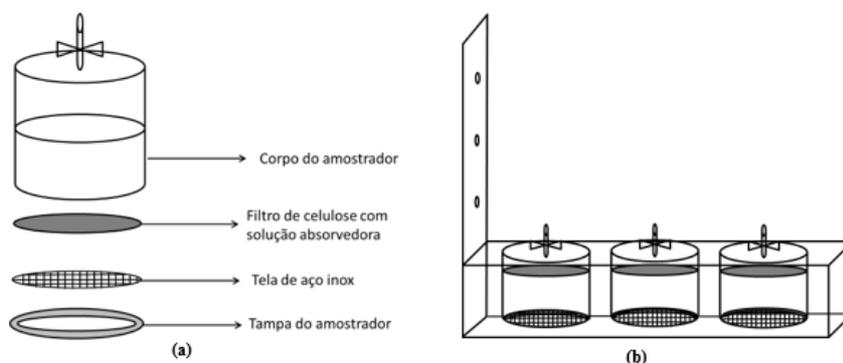


Figura 4: Esquema ilustrativo do amostrador passivo (a) e suporte com amostradores (b).

Para a amostragem dos 18 pontos selecionados, foram impregnados 54 filtros, referente à triplicata dos mesmos. Os brancos de amostragem foram preparados seguindo a mesma metodologia dos demais amostradores, entretanto, os mesmos permaneceram lacrados em sacos herméticos por todo o período de amostragem (14 dias).

O método utilizado para a determinação do NO_2 foi o Griess-Saltzman (Saltzman, 1954) modificado, que se baseia na espectrofotometria molecular UV/VIS. Após a amostragem, cada filtro de NO_2 foi transferido para um tubo de falcon de 15 mL, e neste foram adicionados 6 mL da solução reagente (reagente de Griess-Saltzman). A solução eluída dos filtros foi quantificada em 540 nm utilizando o espectrofotômetro UV-Vis numa faixa de trabalho de 1-5 $\mu\text{g/mL}$.

A concentração média dos gases na atmosfera durante o período de exposição do amostrador passivo foi calculada pela lei de difusão de Fick (2), considerando um sistema de coleta eficiente.

$$C = \frac{m \cdot L}{D \cdot A \cdot t} \quad (2)$$

onde: C é a concentração externa (ambiente) do gás ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); m é a massa total coletada (μg) acumulada sobre o filtro; D é o coeficiente de difusão do NO_2 (corrigido para a temperatura média do período de amostragem); A é a área da seção transversal do percurso de difusão (m^2); t é o tempo de amostragem (h); L é o comprimento do percurso difusivo (m) – que é a altura do amostrador até o filtro.

Uma análise espacial inicial foi realizada com o objetivo de entender como os resultados encontrados variam no espaço. Diante disso, existem três tipos de modelos de interpolação: determinístico de efeito local; determinísticos de efeito global; e efeitos locais e globais (*krigagem*) (Fotheringham, Brunson e Charlton, 2002). Neste trabalho foi utilizado o modelo de efeito local, que busca interpolar valores das amostras mais próximas utilizando como função de peso o inverso do quadrado da distância (3).

$$w_{ij} \propto \frac{1}{d_{ij}^2} \quad (3)$$

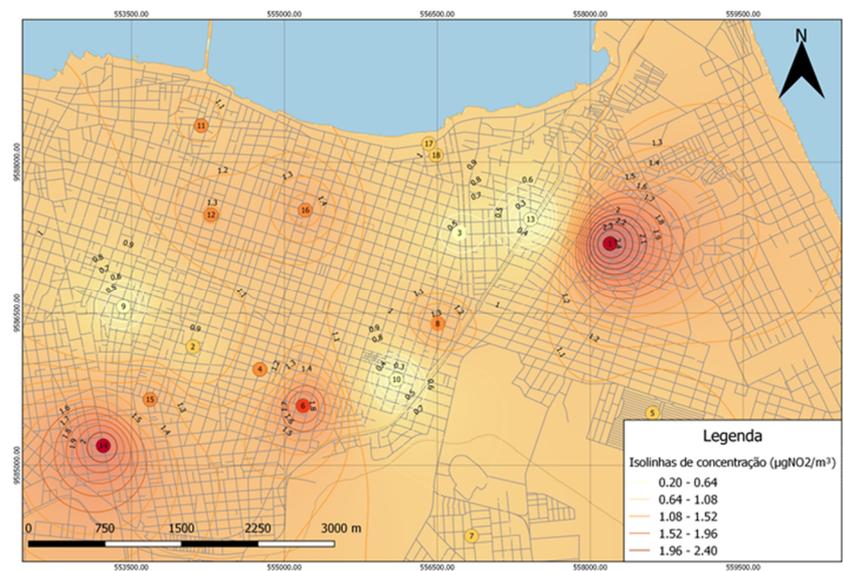
Assim, pontos mais próximos têm maior interação quando comparados com os mais distantes. Esse modelo não é capaz de representar a variabilidade espacial (O'Sullivan e Unwin, 2010), sendo que a razão da sua escolha deve-se às limitações da própria coleta dos dados, pois não foram coletados dados suficientes para a geração de um modelo em 3D. Porém, acredita-se que

os dados produzidos podem ser utilizados para levantar tendências que gerem contribuições fenomenológicas para a problemática da qualidade do ar em zonas urbanas relacionada às atividades antropogênicas.

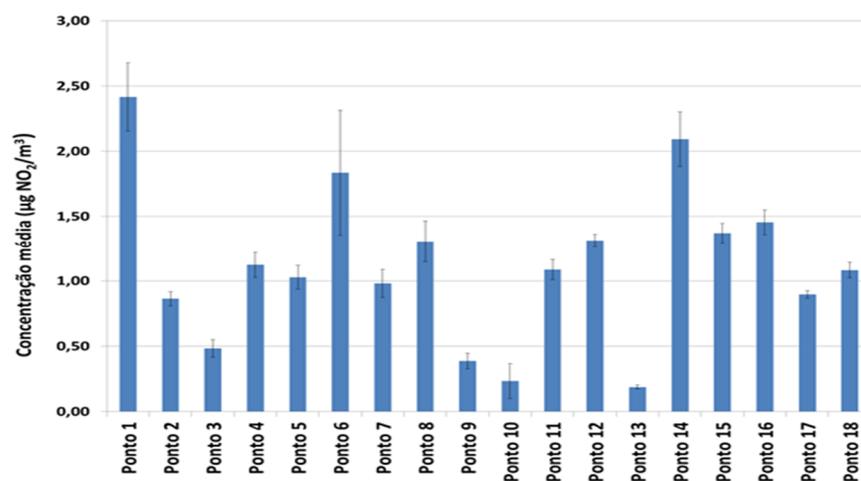
A interpolação ajuda na tarefa de modelar ao longo da superfície valores fora dos pontos de controle e torna-se algo interessante ao processo de análise do fenômeno em questão, daí ter-se adotado tal procedimento. Após a aplicação do modelo de interpolação foi realizada uma análise qualitativa dos parâmetros tráfego, padrão de uso do solo e gabarito das edificações, tal análise visa aumentar o entendimento do efeito da estrutura urbana na qualidade do ar.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da técnica de interpolação espacial, foi possível construir uma estrutura bidimensional de análise. Na Figura 5 o resultado é apresentado, bem como as linhas de contorno, que possibilitam a previsão espacial da concentração fora dos pontos de controle.



(a)



(b)

Figura 5: (a) Isolinhas da concentração de NO_2 ; (b) Médias e intervalos de confiança da concentração de NO_2 por ponto de coleta.

Os valores das concentrações de NO₂, em geral, apresentaram-se baixos, com concentração média mínima de 0,19 µg/m³.h⁻¹, registrada no Ponto 13 e concentração média máxima de 2,42 µg/m³.h⁻¹, registrada no Ponto 1, conforme pode ser observado na Figura 5(b). Em relação aos limites estabelecidos para concentração de NO₂, a Resolução CONAMA nº03/90 traz que a concentração média por hora para NO₂ pode ser de até 320 µg/m³.h, padrão primário, e de até 190 µg/m³.h, padrão secundário. Os padrões primários de qualidade do ar são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Os padrões secundários são as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Dessa forma, as concentrações de NO₂ obtidas nos pontos de amostragem do presente estudo encontraram-se abaixo dos limites estabelecidos pela legislação brasileira, e até mesmo pelos limites máximos dos órgãos internacionais (USEPA - 188 µg/m³.h; OMS - 200 µg/m³.h - 1h).

Para o melhor entendimento sobre a formação das concentrações observadas, optou-se por elaborar ilustrações relacionando os fatores (uso do solo, gabarito das edificações e volume de tráfego) de maneira conjunta. Para discussão, foram selecionados pontos de amostragem que apresentaram valores baixo, médio e alto de concentração de NO₂, observadas na Figura 5b, apenas para evitar a repetição das análises. Na Figura 6 é possível observar os fatores na região de entorno dos respectivos pontos. A Tabela 2 mostra a contribuição da entropia nos pontos de baixa, média e alta concentração de NO₂, bem como os valores dos fatores escolhidos para a análise conjunta.

Tabela 2: Contribuição da entropia na concentração de NO₂.

Pontos	[NO ₂] (µg NO ₂ /m ³)	Tráfego	Gabarito médio (m)	Entropia do entorno
13	0,19	1	6	0,47
4	1,12	0	18	0,50
14	2,09	1	6	0,65

Não esquecendo a importância dos fatores meteorológicos, vento, temperatura e precipitação, no processo de concentração e dispersão de poluentes, a análise feita nesse trabalho busca entender a contribuição da entropia do entorno (representação do uso do solo), tráfego e gabarito médio, no complexo universo da qualidade do ar em zonas urbanas. Ou seja, busca-se aqui tentar indicar a intensidade do poluente a partir de grandezas comumente relacionadas ao processo de planejamento e análise de um sistema de transportes, sem com isto ter a pretensão de trazer a parcela de contribuição de cada um destes elementos para a poluição observada, dado que a ideia é situar uma eventual preocupação que o planejamento deve ter.

Diante do exposto, de acordo com Tabela 2, a relação entre contribuição da entropia na concentração de poluentes está direta. A concentração média de NO₂ foi de 1,12 µg NO₂/m³ e a entropia média foi de 0,50. Além disso, os fatores tráfego e gabarito se somam de forma a fortalecer o entendimento dos impactos do tráfego veicular. Colocando na ordem lógica do processo temos: o tráfego veicular emitindo poluentes em função da sua relação com o uso do solo e o gabarito das edificações atuando de forma a afetar o processo de dispersão desses poluentes.

Analisando a Figura 5b, verifica-se que o Ponto 13 apresentou concentração de NO₂ de 0,19 µg/m³, a menor de toda a amostragem. O Ponto 13, de acordo com a Tabela 2, apresenta uma entropia baixa, em um nível mais pontual, porém a área escolhida para o estudo, Regional 2, é bem complexa com relação a diversidade de uso do solo, diferente das periferias da cidade que

apresentam uma menor diversidade, predominantemente residencial. O tráfego no Ponto 13 é considerável uma vez que nas imediações desse ponto existem um terminal de ônibus urbano e um terminal portuário. Tais fatos juntamente com a classificação da via em análise faz com que o entorno do Ponto 13 haja um fluxo constante.

Quanto a estrutura urbana relacionada ao gabarito percebe-se a presença preponderante de residências, bem como edificações com altura máxima de 8 m. Juntamente a isso, a presença de ventos constantes vindos da praia nesse ponto facilita o processo de dispersão dos poluentes emitidos pelo tráfego veicular.

Como pode ser visto na Figura 5a, o Ponto 4 é um ponto mais central, essa centralidade carrega consigo características únicas em relação aos pontos mais periféricos. O Ponto 4 apresentou uma concentração de NO_2 de $1,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor exatamente igual a média das concentrações de todos os pontos analisados. A entropia no Ponto 4 foi de 0,50, valor igual a média da entropia de todos os pontos. Tal fato implica em um solo misto, uma diversidade suficiente para não ser considerado residencial, tão pouco não residencial, o que caracteriza uma região de potencial mediano, no tocante a gerar viagens.

O tráfego do entorno do Ponto 4 é de baixo para moderado, como pode ser visto na Figura 6b. É uma região que oferece serviços ou seja atrai viagens, mas também produz viagens, devido a presença de residências. O Ponto 4 destaca-se por ser uma via de passagem da zona leste para o centro da cidade e, por isso, acaba recebendo um volume considerável de tráfego nos horários de pico.

Os poluentes emitidos nesse ponto, por ser mais adensado, terão uma maior dificuldade de se dispersar, visto que o entorno possui um gabarito médio de 12 m. Nesse ponto não são observadas canalizações do vento, bem como a presença dos ventos que predominam em outras partes da cidade. Além disso, por ser uma região que recebe um volume considerável de tráfego, principalmente nos horários de pico, as vias de menor largura e a presença de árvores nas calçadas são alguns fatores que impedem a dispersão do NO_2 emitido.

O Ponto 14 apresentou uma das maiores influências no modelo bidimensional mostrado na Figura 5(a). A concentração obtida no Ponto 14 foi de $2,09 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$, a elevada concentração é reflexo da região onde o ponto se encontra. O Ponto 14 fica localizado próximo ao centro da cidade e isso confere um valor de entropia mais alto. Essa maior entropia tem relação direta com as viagens realizadas tanto para o ponto/entorno como para zonas vizinhas.

O tráfego na região é elevado, isso pode ser evidenciado na Figura 6c, tanto pela classificação da via, como pelo trânsito típico. A região de coleta do Ponto 14 é passagem de quem sai da parte sul da cidade em direção ao centro, a região também é acesso para quem sai da BR 116, isso faz com que a região de coleta do Ponto 14 tenha um intenso volume de tráfego, principalmente nos horários de pico.

Embora o gabarito médio da região seja de 6 m, tal fato não foi suficiente para permitir a dispersão, acredita-se que o elevado tráfego atuou de forma a compensar essa característica urbana, que favorece a dispersão de poluentes.

Os resultados obtidos neste trabalho são condizentes com os apresentados nos trabalhos constantes da Tabela 1. Normalmente a abordagem com a qual se usa a entropia é diferente da abordada nesse trabalho, contudo, as características urbanas de Fortaleza colaboraram para abordagem aqui adotada. De uma forma geral, uma elevada entropia implica em viagens realizadas em sua predominância através do modal não motorizado. Em Fortaleza, a periferia

predominantemente residencial e o centro com um padrão misto corroboraram para a hipótese de que quanto maior a diversidade do uso do solo, maior o potencial de atrair viagens e consequentemente maior o tráfego, uma vez que a maior parte dos deslocamentos na cidade de Fortaleza se dá por modos motorizados. Com isso, acredita-se que os objetivos do trabalho foram alcançados, mas a contribuição de cada variável para a formação de poluentes precisa ser estudada de forma mais ampla e empregando outra metodologia, caso haja o interesse nesta quantificação.

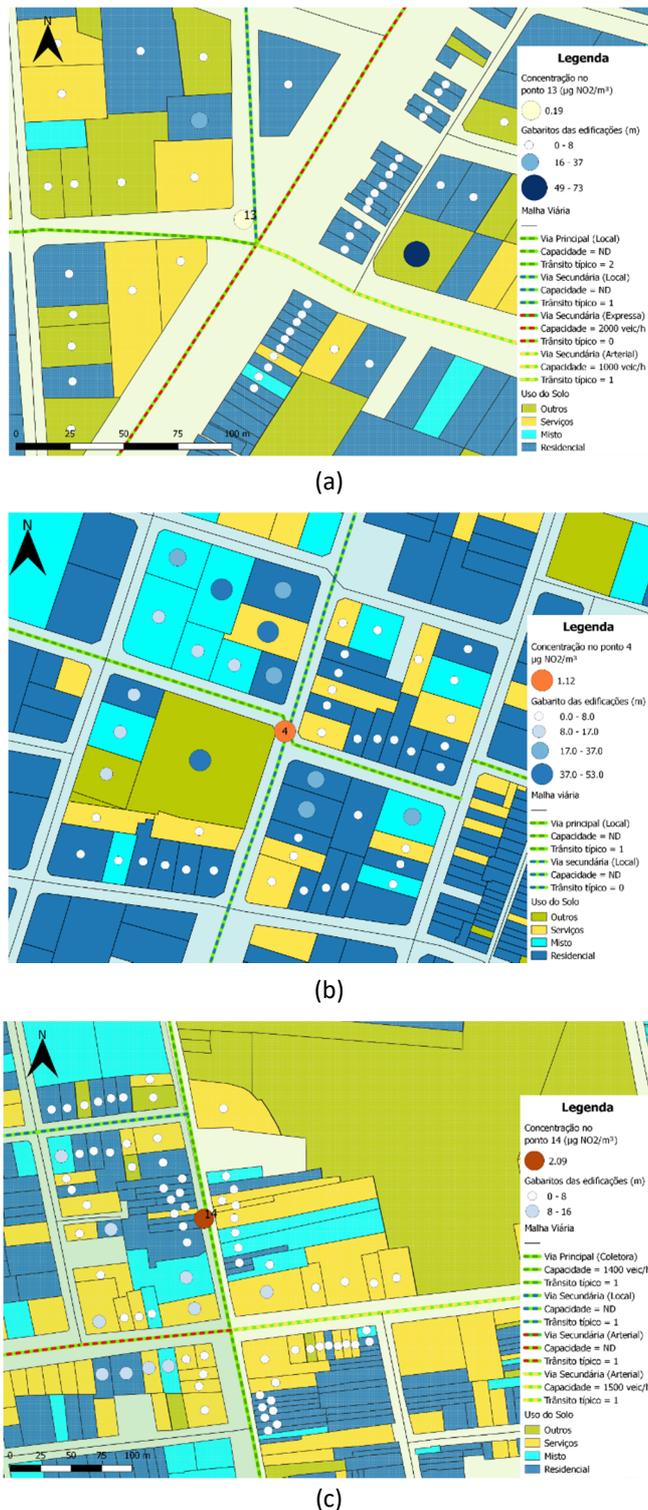


Figura 6: Concentração de NO₂ e fatores que influenciam: (a) Ponto 13; (b) Ponto 4; (c) Ponto 14.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo buscou contribuir na compreensão da complexa problemática da qualidade do ar urbano. A preocupação com essa problemática, levantada neste trabalho, visa gerar uma reflexão sobre a importância de se inserir aspectos ambientais no processo e planejamento dos sistemas de transportes em geral.

Os objetivos desse trabalho foram alcançados através da relação entre fatores: tráfego local, uso do solo e gabarito das edificações com as concentrações pontuais de NO₂; para o estudo do uso do solo foi utilizada a variável entropia ou diversidade de uso do solo, pois acredita-se que para a cidade de Fortaleza, a maior ou menor pluraridade do uso do solo indica um potencial local ou regional para gerar e atrair viagens.

Diante disso, considerando os fatores estudados, as maiores concentrações de NO₂ foram observadas em locais com um maior valor de entropia que tinham um maior potencial de atrair viagens e, com isso tendo uma relação direta com o fluxo veicular que, por consequência, são responsáveis pela emissão de poluentes atmosféricos, nesse trabalho o NO₂.

O volume de tráfego em vias com maior intensidade de tráfego, estão associadas a maiores emissões de NO₂. No entanto, algumas vias não consideradas como de elevado fluxo de veículos, apresentaram concentrações elevadas de NO₂, acredita-se que devido as características do solo no entorno, reforçando que olhar para o conjunto de variáveis é importante.

A análise do parâmetro gabarito das edificações, que teoricamente funciona como uma barreira física que facilita ou não a dispersão do NO₂, mostrou que nem sempre locais de gabarito baixo implicam em uma maior dispersão, pontualmente o impacto do gabarito pode ser suprimido pelo intenso tráfego, bem como um local de elevado gabarito pode sofrer do fenômeno de canalização do vento.

Para além dos limites da análise realizada nesse trabalho acredita-se que principalmente em países emergentes, que passam por uma transição, não só econômica, mas social, a preocupação com os impactos antropogênicos é algo de extrema relevância, em especial a poluição atmosférica, cujos efeitos podem ultrapassar as demarcações geográficas das áreas em estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelo financiamento da pesquisa e o suporte dado pelos laboratórios e instituições parceiros: LAT-UFC, LACOR-UFC, LANÁGUA e IFCE-CAUCAIA.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, L. F. M. C.; M. V. C. Silva; A. W. Gandu, C. A. Rocha e R. M. Cavalcante (2017) Caracterização de Cânions urbanos e seus efeitos climáticos em área com intenso processo de verticalização na cidade de Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 4, p. 1046–1058. DOI: 10.26848/rbfg.v10.4.p1046-1058.
- Alnawaiseh, N. A.; J. H. Hashim e Z. M. Isa (2015) Relationship between vehicle count and particulate air pollution in Amman, Jordan. *Asia-Pacific Journal of Public Health*, v. 27, n.2, p.1742–1751. DOI: 10.1177/1010539512455046.
- Ariotti, P. (2010) *Método para aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas através de modelagem híbrida em redes*. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Beelen, R.; M. Voogt; J. Duyzer; P. Zandveld e G. Hoek (2010) Comparison of the performances of land use regression modelling and dispersion modelling in estimating small-scale variations in long-term air pollution concentrations in a Dutch urban area. *Atmospheric Environment*, v. 44, p. 4614–4621. DOI:10.1016/j.atmosenv.2010.08.005.
- Beevers, S. D. e D. C. Carslaw (2005) The impact of congestion charging on vehicle emissions in London. *Atmospheric Environment*, v.39, p.1–5. DOI:10.1016/j.atmosenv.2004.10.001.
- Bender, A. P. e M. Dziedzic (2014) Dispersão de poluentes nos eixos estruturais em Curitiba (PR), Brasil. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, p. 31–42. DOI:10.1590/S1413-41522014019010000364.
- Bordoloi, R.; A. Mote; P. Pratim e C. Mallikarjuna (2013) Quantification of Land Use diversity in the context of mixed land use. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Elsevier B.V., 104, 563–572. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.150.

- Campos, V.P.; L.P.S. Cruz; R.H.M. Godoi; A.F.L. Godoi e T.M. Tavares (2010) Development and validation of passive samplers for atmospheric monitoring of SO₂, NO₂, O₃ and H₂S in tropical areas. *Microchemical Journal*, v. 96, p.132-138. DOI:10.1016/j.microc.2010.02.015.
- Carlsaw, D. C. (2005) Evidence of an increasing NO₂/NO_x emissions ratio from road traffic emissions. *Atmospheric Environment*, v. 39, n. 26, p. 4793-4802. DOI:10.1016/j.atmosenv.2005.06.023.
- Cascetta, E. *Transportation Systems Analysis*. 2nd ed. New York: Springer, 2009.
- Colvile, R.N.; E. J. Hutchinson; J. S. Mindell e R.F. Warren (2001) The transport sector as a source of air Pollution. *Atmospheric Environment*, v. 35, p. 1537-1565. DOI:10.1016/S1352-2310(00)00551-3.
- Cónsul, J. M. D.; D. Thiele; R. C. Veses e I. M. Baibich (2004) Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio. *Química Nova*, v. 27, n. 3, 432-440, 2004. DOI: 10.1590/S0100-40422004000300013.
- Cruz, L. P. S. e V. P. Campos (2002) Amostragem passiva de poluentes atmosféricos. Aplicação ao SO₂, *Química Nova*, v. 25, n.3, p. 406-411. DOI: 10.1590/S0100-40422002000300013.
- D'Agosto, M. A. (2015) *Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória*. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil.
- Eeftens M.; J. Beekhuizen; R. Beelen; M. Wang; R. Vermeulen; B. Brunekreef; A. Huss e G. Hoek (2013) Quantifying urban street configuration for improvements in air pollution models. *Atmospheric Environment*, v. 72, p.1-9. DOI:10.1016/j.atmosenv.2013.02.007.
- Fotheringham, A. S.; C. Brunson e M. Charlton (2002) *Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships*. London: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-0-471-49616-8.
- Guttikunda, S. K.; G. R.Carmichael; G. Calori; C. Eck e J-H Woo (2003) The contribution of megacities to regional sulfur pollution in Asia. *Atmospheric Environment*, v.37, p.11-22. DOI:10.1016/S1352-2310(02)00821-X.
- Hagenbjörk, A.; E. Malmqvist; K. Mattisson; N. J. Sommar e L. Modig (2017) The spatial variation of O₃, NO, NO₂ and NO_x and the relation between them in two Swedish cities. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 161, p. 1-12. DOI:10.1007/s10661-017-5872-z.
- Hong, J. e A. Goodchild (2014) Land use policies and transport emissions: Modeling the impact of trip speed, vehicle characteristics and residential location. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 26, p. 47-51. DOI:10.1016/j.trd.2013.10.011.
- Karra, S.; L. M. Epshtein e M. K. A. Neophytou (2017) Air flow and pollution in a real, heterogeneous urban street canyon: A field and laboratory study. *Atmospheric Environment*, v. 165, p. 370-384. DOI:10.1016/j.atmosenv.2017.06.035.
- Khisty, C. J. e B. K. Lall (2002) *Transportation Engineering: An Introduction*. Prentice Hall, Inc, New Jersey. ISBN 13: 9780130335609.
- Kockelman, K. M (1997) Travel Behavior as Function of Accessibility, Land Use Mixing, and Land Use Balance Evidence from San Francisco Bay Area. *Transportation Research Record 1607*, p. 116-125. DOI:10.3141/1607-16.
- Liu, S. V.; F-L. Chen e J. Xue (2017) Evaluation of Traffic Density Parameters as an Indicator of Vehicle Emission-Related Near-Road Air Pollution: A Case Study with NEXUS Measurement Data on Black Carbon. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v.14, p.1581. DOI: 10.3390/ijerph14121581.
- Mayer, H. (1999) Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*, v. 33, p. 4029-4037. DOI:10.1016/S1352-2310(99)00144-2.
- O'Sullivan, D. e D. J. Unwin (2010) *Geographic information analysis*. 2 ed. London: John Wiley & Sons Ltd, 2010. ISBN: 978-0-470-28857-3.
- Oke, T. R. (1998) Street design and urban canopy layer climate, *Energy and Buildings*, v. 11, p. 103-113. DOI:10.1177/030913338801200401.
- Rakowska, A.; K. C. Wong; T. Townsend; K. L. Chan; D. Westerdahl; S. Ng; G. Močnik; L. Drinovec e Zhi Ning (2014) Impact of traffic volume and composition on the air quality and pedestrian exposure in urban street canyon. *Atmospheric Environment*, v.98, p. 260-270. DOI:10.1016/j.atmosenv.2014.08.073.
- Requia, W. J.; P. Koutrakis; H. L. Roig; M. D. Adams e C. M. Santos (2016) Association between vehicular emissions and cardiorespiratory disease risk in Brazil and its variation by spatial clustering of socio-economic factors. *Environmental Research*, 150, 452-460. DOI:10.1016/j.envres.2016.06.027.
- Richmond-Bryant, J. e A. Reff (2012) Air pollution retention within a complex of urban street canyons: A two-city Comparison. *Atmospheric Environment*, v.49, p. 24-32. DOI:10.1016/j.atmosenv.2011.12.036.
- Richmond-Bryant, J.; S. S. Isukapalli e D. A. Vallero (2011) Air pollutant retention within a complex of urban street canyons. *Atmospheric Environment*, v.45, p. 7612-7618. DOI:10.1016/j.atmosenv.2010.11.003.
- Rodríguez, M. C.; L Dupont-Courtade e W. Oueslati (2016) Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p.1-9. DOI:10.1016/j.rser.2015.07.190.
- Saltzman, B. E. (1954) Colorimetric microdetermination of nitrogen dioxide in the atmosphere. *Analytical Chemistry*, v. 26, n. 12, p. 1949-1955. DOI: 10.1021/ac60096a025.
- Sider, T.; A. Alam; M. Zukari; H. Dugum; N. Goldstein; N. Eluru e M. Hatzopoulou (2013) Land-use and socio-economics as determinants of traffic emissions and individual exposure to air pollution. *Journal of Transport Geography*, v. 33, p. 230-239. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2013.08.006.
- Sousa, F. W.; R. M. Cavalcante; C. A. Rocha, R. F. Nascimento e A. G. Ferreira (2015) Carbonyl compounds from urban activities and their associated cancer risks: The influence of seasonality on air quality (Fortaleza-CE, Brazil). *Urban Climate*, v. 13, p. 110-121. DOI:10.1016/j.uclim.2015.03.004.

- Sun, X.; C. G. Wilmot e T. Kasturi (1998) Household Travel, Household Characteristics, and Land Use An Empirical Study from the 1994 Portland Activity-Based Travel Survey. *Transportation Research Record 1607*, p-10-17. DOI:10.3141/1617-02.
- Taniguchi, E., Thompson, R. G. e Yamada, T. (2012) Emerging techniques for enhancing the practical application of city logistics models. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Vol 39, 3–18. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.03.087.
- Taseiko, O. V.; S. V. Mikhailuta; A. Pitt; A. A. Lezhenin e Y. V. Zakharov (2009) Air pollution dispersion within urban street canyons. *Atmospheric Environment*, v. 43, p. 245–252. DOI:10.1016/j.atmosenv.2008.09.076.
- Teixeira, E. C.; S. Feltes; E. R. R. Santana (2008) Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. *Química Nova*, Porto Alegre, v. 31, n. 2, p.244-248. DOI:10.1590/S0100-40422008000200010.
- Vesilind, P. A. e S. M. Morgan (2011) *Introdução à Engenharia Ambiental*. São Paulo. Cengage Learning, 2ªed. ISBN-13: 9788522107186.
- Weber, N.; D. Haase e U. Franck (2014) Assessing modelled outdoor traffic-induced noise and air pollution around urban structures using the concept of landscape metrics. *Landscape and Urban Planning*, v. 125, p.105–116. DOI:10.1016/j.landurbplan.2014.02.018.
- Wee, B. Van e D. Banister (2016) How to Write a Literature Review Paper? *Transport Reviews*, 36(2), 278–288. DOI:10.1080/01441647.2015.1065456.
- WHO Regional Office for Europe OECD (2015) “Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth.” *European Environment and Health Processes*, 1–54.
- Yuval; B. Flicstein e D. M. Broday (2008) The impact of a forced reduction in traffic volumes on urban air pollution. *Atmospheric Environment*, v.42, p.428–440. DOI:10.1016/j.atmosenv.2007.09.066.
- Zhang, K. e S. Batterman (2013) Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *Science of the Total Environment*, v. 450–451, p. 307–316. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.01.074.
- Zhang, R.; K. Matsushima e K. Kobayashi (2018) Can land use planning help mitigate transport-related carbon emissions? A case of Changzhou. *Land Use Policy*, v. 74, p.32–40. DOI:10.1016/j.landusepol.2017.04.025.
- Zhou, Y; Y. Wu; S. Zhang; L. Fu e J. Hao (2014) Evaluating the emission status of light-duty gasoline vehicles and motorcycles in Macao with real-world remote sensing measurement. *Journal of Environmental Sciences-China*, v. 26, n. 11, p. 2240–2248. DOI:10.1371/journal.pone.0112195.