

ABORDAGEM HÍBRIDA DE MODELAGEM DE TRÁFEGO PARA ESTIMATIVA DE EMISSÕES

Paula Ariotti, Laboratório de Sistemas de Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.ariotti@gmail.com

Helena Beatriz Bettella Cybis, Laboratório de Sistemas de Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, helenabc@producao.ufrgs.br

ABSTRACT

This paper suggests a hybrid traffic modeling approach, devised to improve vehicle emission estimation in urban areas. A hybrid traffic flow model may combine the specific advantages of aggregate and disaggregated approaches. The paper presents a case study where the proposed emission estimation approach is applied. This case study is based on the association of the traffic models SATURN and VISSIM and on the emission models MOBILE and IVE. The modeled network comprises an area in the city of Porto Alegre, Brazil. This network was selected for presenting heterogeneous infrastructure characteristics and operational conditions. The analysis considers the estimations of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NOx) and hydro carbonates (HC) provided by both modeling approaches. The work discusses the advantages e limitations of mesoscopic and microscopic traffic models for traffic emission estimation. The paper concludes that a hybrid traffic model may provide a promising approach to improve the estimation of traffic emissions in urban areas. It is intended to reduce the overall modeling effort and to concentrate the modeling and calibration effort on the network segments that requires more attention to improve estimations.

Key Words: hybrid modeling, estimation of emissions, traffic models, emission models

INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um dos problemas ambientais que mais afetam a qualidade de vida em centros urbanos. As elevadas taxas de motorização têm provocado crescentes congestionamentos e, por conseqüência, a redução da velocidade média do tráfego, o aumento dos tempos de deslocamento, do consumo de combustível e da poluição atmosférica. Embora o avanço tecnológico das últimas décadas tenha levado ao desenvolvimento de motores menos poluentes, o crescimento da frota veicular e a deficiência dos programas de inspeção e manutenção de veículos são responsáveis pelo aumento nos níveis de emissões em grandes centros urbanos (Chen; Yu, 2007).

Um dos grandes desafios do planejamento de transportes é a estimativa das emissões veiculares e a avaliação de seus impactos. Frequentemente, devido à dificuldade de monitoramento ou devido às incertezas associadas a novos cenários de transportes, a estimativa de emissões veiculares é realizada em um ambiente de modelagem, através da combinação de modelo de emissões e de modelos de tráfego. A previsão das emissões neste contexto pode assumir diferentes níveis de detalhamento.

Modelos macroscópicos de emissões são comumente utilizados para avaliações estratégicas ou para avaliações de grandes áreas, e necessitam de informações sobre fluxos e velocidades médias, provenientes de modelos macroscópicos de tráfego. Esta estrutura de modelagem, entretanto, não retrata adequadamente as particularidades do tráfego responsáveis pelas maiores variações nos níveis de emissões, como eventos de acelerações e desacelerações que ocorrem em condições de congestionamento.

Modelos microscópicos de emissões estão diretamente associados à variação do modo de operação dos veículos nas dimensões espacial e temporal, utilizando informações como as velocidades instantâneas dos veículos. Nesta estrutura de modelagem, os dados relativos à operação do tráfego provêm de modelos microscópicos de tráfego. A utilização destes modelos em grandes áreas, entretanto, demanda uma grande quantidade de dados, e para apresentar estimativas confiáveis dos ciclos de direção, necessitam ser adequadamente calibrados. Deve-se considerar também que a calibração de modelos microscópicos de tráfego em áreas extensas, com características heterogêneas de infraestrutura e operação, é bastante complexa. Os parâmetros que caracterizam o comportamento individual de veículos e motoristas podem ser efetivamente diferentes em vias de tráfego não saturado ou em congestionamento.

Este trabalho tem por objetivos a proposição de uma estrutura híbrida de modelagem para aprimorar as estimativas de emissões e a aplicação em um estudo de caso em área urbana. O método sugere a combinação de modelos de tráfego, com distintos níveis de detalhamento, e de modelos de estimativa de emissões veiculares compatíveis com os níveis estabelecidos. A modelagem híbrida agrega as vantagens individuais de cada abordagem, uma vez que combina a micro-simulação em áreas específicas com a simulação agregada em uma área de estudo mais abrangente. Esta estrutura possibilita a análise dos fenômenos microscópicos que não são capturados em níveis mais agregados, aumentando a precisão dos resultados e reduz a necessidade de coleta de dados e esforços de calibração em uma grande área de estudo.

ESTIMATIVA DE EMISSÕES VEICULARES ATRAVÉS DE MODELAGEM

A literatura apresenta um conjunto de modelos de tráfego e emissões que se enquadram nas características requeridas nesta abordagem. Modelos macroscópicos de tráfego, como, o EMME2 (INRO, 1996), descrevem o tráfego com alto grau de agregação do fluxo,

forneendo parâmetros como volumes diários ou horários. CONTRAM (Leonard et al., 1989) e SATURN (Van Vliet; Hall, 2000), classificados por vários autores como mesoscópicos, representam um nível intermediário de detalhes, descrevendo os veículos individualmente, porém sem considerar suas interações. AIMSUN (Barcelo et al., 1997), DRACULA (Liu, 2002) ou VISSIM (Fellendorf, 1996; PTV, 2006), descrevem o comportamento dos veículos que compõem a corrente de tráfego, bem como suas interações com o ambiente viário e com outros veículos. Esses modelos, tipicamente classificados de microscópicos, possuem capacidade de representar as variações dos ciclos de condução dos veículos ao longo de seus percursos em pequenos intervalos de tempo, em geral, a cada segundo.

Modelos de emissões são tipicamente classificados na literatura em duas categorias: estáticos e dinâmicos (Capiello, 2002). Modelos estáticos, como o MOBILE (EPA, 2007), o EMFAC (CARB, 2007) e o COPERT (Ntziachristos; Samaras, 2000), são, em geral, baseados na velocidade média dos veículos. São adequados para análises estratégicas, em larga escala, e para casos onde a velocidade média caracteriza o fluxo de tráfego de forma adequada em relação ao objetivo do estudo. É importante salientar que a velocidade média utilizada nesses modelos corresponde à de um ciclo, e um mesmo valor pode representar condições de tráfego diferentes, onde a previsão dos níveis de poluentes emitidos pode ser subestimada.

Modelos de emissões dinâmicos, ou modelos modais, consideram, de forma geral, os ciclos de condução dos veículos ao longo de sua trajetória na rede viária. Assim, as condições operacionais dos veículos em um determinado instante, tipicamente caracterizadas pela velocidade instantânea são associadas à quantidade de poluentes emitida. Outras variáveis também podem ser consideradas em modelos dinâmicos, como velocidade do motor, posição do acelerador, uso do ar condicionado, ou ainda, a transição de marchas no câmbio. A calibração de ambos os modelos, estáticos e dinâmicos, pode ser realizada através de testes em dinamômetros de chassi, realizados em laboratório, ou a partir de medições de equipamentos embarcados em veículos.

Relações entre as abordagens de modelagem

A Figura 1 apresenta as relações entre as abordagens de modelagem de emissões e detalhamento, estruturadas em três níveis de análise: (i) modelos de tráfego, que fornecem parâmetros de desempenho do tráfego; (ii) modelos de emissões, que prevêm a quantidade de poluentes emitida pelos veículos e, (iii) modelos de dispersão de poluentes, que proporcionam índices da qualidade do ar na região analisada. Estes últimos, no entanto, não são tratados neste trabalho.

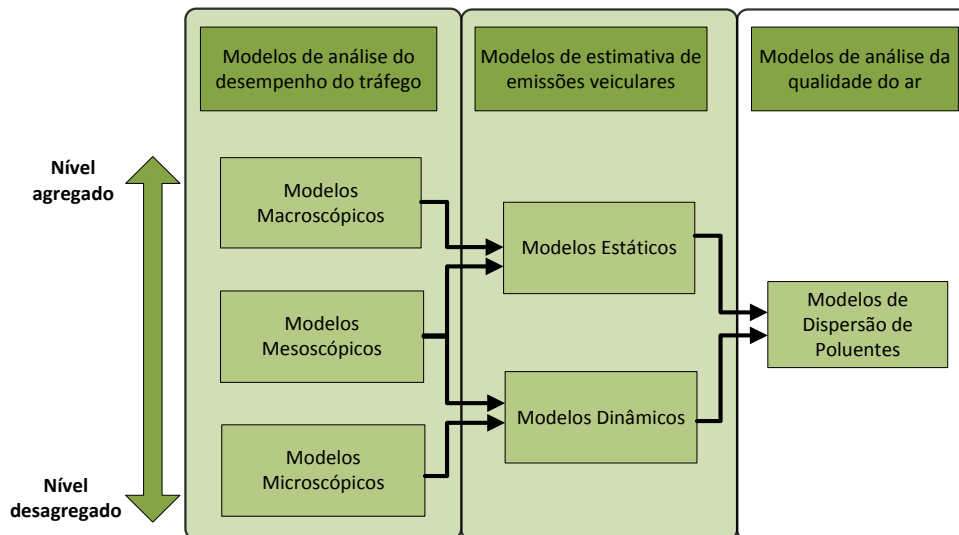


Figura 1 – Relações entre as abordagens de modelagem

Os dados provenientes de modelos macroscópicos e mesoscópicos de tráfego são adequados para utilização em modelos de emissões estáticos, que representam o nível agregado de variáveis. Da mesma forma, informações de modelos microscópicos e mesoscópicos podem ser incorporadas a modelos de emissões dinâmicos, os quais exigem informações mais detalhadas para sua utilização. Os resultados de ambos os modelos de emissões estáticos e dinâmicos podem alimentar modelos de dispersão de poluentes. Como mencionado anteriormente, a análise da qualidade do ar através de modelos de dispersão de poluentes não está incluída no foco deste trabalho.

Modelagem híbrida de tráfego

O uso da simulação de tráfego microscópica tem crescido devido aos avanços tecnológicos e computacionais. No entanto, esforços para a calibração microscópica e a preparação dos dados de entrada dos modelos freqüentemente tem inibido seu uso em grande escala. Por isso, modelos com características híbridas, mesoscópicas/microscópicas, como os modelos de Burghout (2004), Burghout et al. (2005), Yang e Morgan (2006) e Shi e Ziliaskopoulos (2006) têm sido reportados na literatura. Esses modelos permitem a simulação microscópica em áreas específicas de interesse, enquanto simulam as áreas remanescentes com menos detalhes, através de modelos mesoscópicos. Outros modelos ainda utilizam a abordagem híbrida macroscópica e microscópica, como os modelos de Bourrel e Lesort (2003), Magne et al. (2000), Poschinger et al. (2000) e Mammar et al. (2006).

A utilização integrada de diferentes níveis de modelagem de tráfego necessita a observação de cuidados específicos. As principais recomendações para a utilização de modelos de abordagem híbrida envolvem:

- Consistência da representação da rede: uma condição básica e das mais importantes para garantir a consistência geral entre as duas abordagens é a representação da rede viária, especialmente na definição dos limites físicos entre os dois modelos. A codificação da rede viária nas duas abordagens deve garantir

consistência de capacidade viária e fluxos, em especial nos limites físicos dos dois modelos.

- Consistência na representação da escolha de rotas: a escolha de rotas nas duas abordagens necessita ser compatível para garantir que os veículos adotem as mesmas decisões..
- Consistência das condições dinâmicas do tráfego nos limites das duas abordagens: as condições dinâmicas dos limites à montante e à jusante dos limites entre as duas abordagens devem ser garantidas. Por exemplo, quando uma fila é formada à jusante do limite físico entre as duas abordagens, ela pode continuar no outro sub-modelo, ultrapassando o limite. Assim, a definição do limite entre as abordagens deve ser cuidadosamente analisada.
- Consistência do desempenho entre as duas abordagens: idealmente, as estruturas da rede viária devem ser modeladas de modo a representar suficientemente bem as condições do tráfego nos dois modelos. Assim, embora modelos microscópicos representem fenômenos de aceleração, não captados por abordagens agregadas, os resultados em ambos os modelos, como por exemplo, tempos de viagem, fluxos, velocidades ou densidades devem ser compatíveis. Isso implica na necessidade de calibração consistente dos dois modelos.
- Adequada troca de informações entre as abordagens: os sub-modelos necessitam de adequada transmissão de dados das características dos veículos e das condições de tráfego. Isso requer uma eficiente sincronização e comunicação de informações, e um projeto de simulação que minimize a frequência e a quantidade de dados transmitidos de um modelo para outro.

A abordagem híbrida de modelagem de tráfego pode ser utilizada para atender objetivos distintos ou avaliar diferentes situações. Quando utilizada para analisar emissões veiculares em grandes áreas urbanas, apresenta como principais vantagens a diminuição dos esforços de calibração de modelos microscópicos e, em consequência da análise detalhada em regiões menores, também reduz a quantidade de dados utilizados em modelos de emissões dinâmicos, cuja base de informações, em geral, é dada por veículo/segundo.

ESTRUTURA DE MODELAGEM PROPOSTA

A estrutura de modelagem proposta para aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas consiste em dez etapas metodológicas. Esta estrutura pode ser utilizada para a elaboração do diagnóstico das emissões veiculares de uma região, ou a avaliação de projetos de transportes, como, por exemplo, mudanças nos sentidos de circulação viária, alteração ou implantação de semáforos, construção de novas vias ou ainda modificações na demanda de viagens. A Figura 2 apresenta a estrutura metodológica proposta.

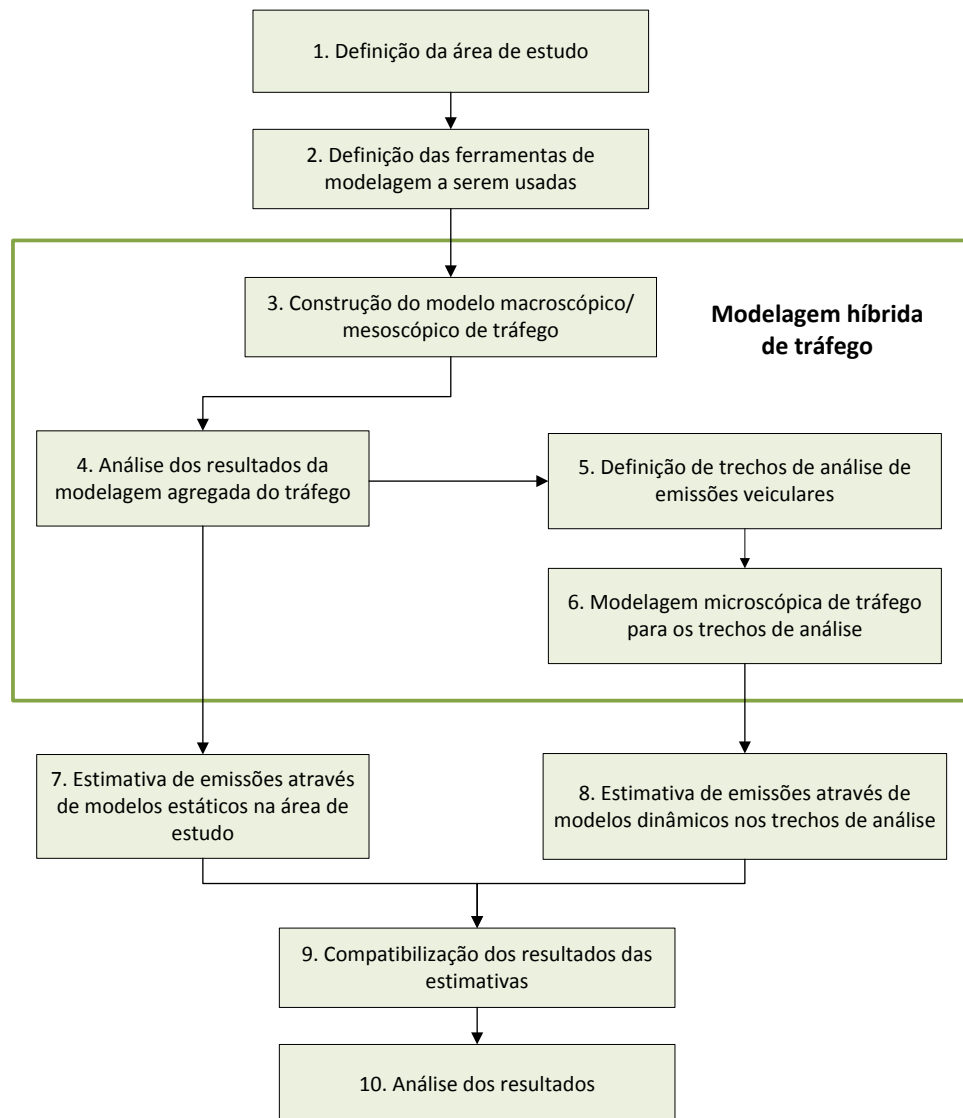


Figura 2 – Etapas metodológicas propostas

A seguir é apresentada a descrição das etapas e algumas recomendações acerca da utilização do método proposto.

- **Definição da área de estudo:** a área de estudo consiste na região para a qual é requerido um diagnóstico dos níveis de emissões ou a área de abrangência de um projeto de transportes a ser avaliado.
- **Definição das ferramentas de modelagem a serem usadas:** a escolha das ferramentas deve considerar a habilidade de representação dos fenômenos de tráfego e da rede viária e as facilidades de compatibilização das abordagens, visando a análise comparativa e integração de resultados dos dois modelos. Quanto aos modelos de estimativa de emissões, é importante que a base de dados, isto é, fatores básicos de emissões e informações da frota de veículos seja compatível, para permitir a comparação das estimativas.

- **Construção do modelo macroscópico/mesoscópico de tráfego:** nesta etapa ocorre a representação da rede viária e da demanda de viagens, considerando as particularidades do modelo agregado de tráfego. A demanda de viagens pode representar diferentes categorias de veículos, como transporte privado, público ou de carga e é, usualmente, informada através de uma matriz origem/destino entre as zonas de tráfego da área de estudo. Em geral, modelos agregados representam a rede viária através de um conjunto de arcos e nós, onde os arcos correspondem às vias, e os nós às interseções viárias. Alguns modelos podem realizar a alocação do tráfego em rotas, onde são definidos os fluxos nas vias, de acordo com a capacidade viária informada ao modelo. Nesta etapa, um aspecto importante a ser observado refere-se à calibração do modelo de tráfego, uma vez que as condições modeladas poderão ser representadas posteriormente em nível microscópico.
- **Análise dos resultados do desempenho agregado do tráfego:** é importante que o modelo de tráfego utilizado permita a análise segregada por arcos ou trechos, possibilitando a identificação de características da rede viária ou condições de tráfego que indiquem a possível ocorrência de altos níveis de emissões. Assim, esta etapa subsidia a divisão da rede viária em trechos específicos para análise de emissões. Os parâmetros agregados básicos para definição dos trechos de análise são volumes de tráfego e velocidades médias. Porém outras informações, caso sejam fornecidas pelo modelo, também podem ser úteis para a definição dos trechos de análise, como tamanho de filas ou relação volume/capacidade nos arcos.
- **Definição de trechos de análise de emissões:** esta etapa consiste na definição de trechos da rede viária que necessitam de análise detalhada do comportamento do tráfego. Esses trechos foram denominados de Trechos de Análise de Emissões (TAE) e caracterizam-se por apresentarem condições que potencialmente levam à estimativas muito diferenciadas de emissões quando modelados em distintos níveis de detalhamento. Estas diferenças podem ocorrer principalmente devido ao fato de que em nível agregado não são capturadas informações de eventos que provocam aumento nos níveis de emissões, como picos de aceleração.

Um trecho de análise de emissões (TAE) pode ser simplesmente um segmento da via, a composição de vários segmentos da mesma via ou ainda, a combinação de segmentos de vias diferentes. A divisão da rede viária em TAEs é condicionada às características de codificação dos modelos e às particularidades da rede. Ainda, a análise técnica da área de estudo também pode auxiliar a seleção dos trechos. A definição dos trechos de análise deve ser baseada na identificação de características específicas que influenciam as emissões veiculares. Estas características podem ser relacionadas à oferta, referentes ao projeto, ou à demanda de transportes, derivadas da modelagem de tráfego. A Figura 3 apresenta alguns exemplos das características que podem auxiliar a definição dos trechos de análise. Entende-se que alterações de uma ou mais destas características podem provocar mudanças importantes nos ciclos de condução dos veículos e, conseqüentemente, nos níveis de emissões.

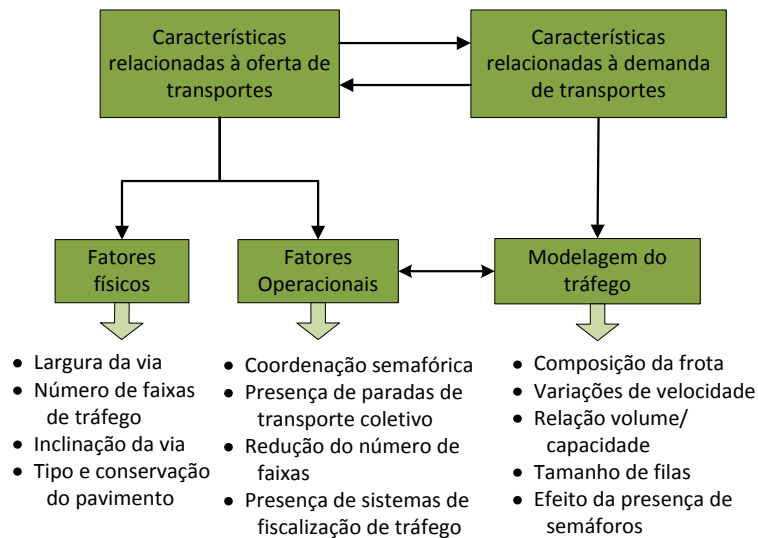


Figura 3 – Exemplos de características relevantes para definição dos TAEs

As características relacionadas à oferta de transportes podem ser divididas em fatores físicos ou operacionais. Os fatores físicos envolvem aspectos do projeto geométrico, como diferentes larguras da via, número de faixas de tráfego ou inclinação da via e, condições de qualidade das estruturas viárias, como tipo e conservação do pavimento. Os fatores operacionais envolvem os aspectos que podem afetar a operação do tráfego de acordo com sua existência ou modo de operação, como a coordenação semafórica, presença de pontos de parada de transporte coletivo, redução do número de faixas de tráfego ou presença de sistemas de controle ou fiscalização de tráfego.

As características relacionadas à demanda envolvem os parâmetros de saída do modelo de tráfego e a análise destes parâmetros. Exemplos de parâmetros decorrentes da modelagem podem envolver a composição da frota, variações de velocidade, relação volume/capacidade, tamanho de filas ou efeitos da presença dos semáforos.

- **Modelagem microscópica do tráfego:** esta etapa prevê a simulação dos trechos de análise de emissões (TAEs) definidos na etapa anterior através de modelos de micro-simulação de tráfego. A codificação dos TAEs no modelo de tráfego microscópico deve ser realizada de forma que a equivalência espacial desses trechos seja garantida.

A equivalência espacial dos TAEs nas duas abordagens de tráfego presume que as características físicas e operacionais da rede viária sejam semelhantes, principalmente, em relação ao tamanho dos arcos, número de faixas, características de interseções, conversões permitidas, regras de prioridade e velocidade codificada. Isso é importante para a estimativa de emissões, uma vez que são evitadas discrepâncias nos níveis de emissões decorrentes de diferenças na codificação dos modelos. Sistemas de informações geográficas podem contribuir para a

compatibilidade espacial da codificação dos modelos agregados e desagregados de tráfego.

Outro ponto importante para a simulação dos TAEs em nível microscópico é a alocação dos fluxos de tráfego. Se os fluxos são derivados do modelo agregado, deve-se garantir a equivalência das rotas entre as zonas de tráfego e os volumes associados a cada rota. Ainda, para reproduzir os efeitos da variabilidade aleatória das condições do tráfego na modelagem microscópica, é fundamental que a simulação dos TAEs seja replicada para diferentes sementes estocásticas. Assim, sugere-se utilizar como insumos do modelo de emissões dinâmico, os resultados obtidos da simulação com cada semente estocástica.

- **Estimativa de emissões através de modelos estáticos na área de estudo:** a estimativa de emissões veiculares através de modelos estáticos utiliza como dados de entrada, informações provenientes do modelo de tráfego agregado, tipicamente fluxos e velocidades médias nos arcos da rede viária. A estimativa de emissões através de modelos estáticos necessita também de dados adicionais, como a composição da frota na área de estudo, informações sobre os combustíveis utilizados e a porção da frota que utiliza cada tipo de combustível. Ainda, variáveis ambientais ou climatológicas, como temperatura média e altitude, podem ser solicitadas pelo modelo de emissões estático.
- **Estimativa de emissões através de modelos dinâmicos nos trechos de análise:** a estimativa de emissões através de modelos de emissões dinâmicos nos trechos de análise (TAEs) requer informações sobre a atividade operacional dos veículos, fornecidas pelo modelo de tráfego microscópico, com resolução temporal mínima de segundo. Velocidades instantâneas necessitam ser processadas para os ciclos de condução dos veículos durante o período da simulação, ou seja, são apropriados os tempos em velocidade constante, aceleração e desaceleração.

Neste estágio, velocidades instantâneas provenientes dos modelos de tráfego são transformadas em demanda por potências dos veículos. Modelos dinâmicos de emissões tipicamente associam emissões veiculares à demanda por potência dos veículos. Assim como nos modelos estáticos, os modelos dinâmicos exigem informações adicionais para o cálculo das emissões, como, composição da frota, características de combustíveis e frota associada a cada tipo, distribuição dos tempos de resfriamento do motor, temperatura ambiente e altitude. Tais informações devem ser compatíveis com os dados utilizados no modelo estático, para possibilitar a comparação e compatibilização das estimativas provenientes das duas abordagens.

Outro ponto importante a ser considerado é a compatibilidade dos fatores de emissão básicos utilizados nos modelos estático e dinâmico. Taxas de emissões variam em função das características da frota, combustíveis, ciclo de operação e diversos outros fatores. A obtenção de taxas de emissões é um processo bastante complexo e dispendioso. Modelos de emissões tipicamente apresentam sugestões

de taxas de emissões associadas a um conjunto de veículos e combustíveis que fazem parte de um banco de dados de teste. Em função de custos e disponibilidade de equipamentos, pode ser difícil obter taxas de emissões adaptadas às condições locais, a utilização deste método, entretanto, não fica invalidada. Este método pode ser utilizado para a análise referencial e comparativa dos impactos de projetos. Entretanto, para fins de validade da análise, é necessário garantir a maior compatibilidade possível entre as taxas de emissões para veículos e combustíveis utilizadas nos modelos estáticos e dinâmicos.

- **Compatibilização dos resultados das estimativas de emissões:** esta etapa consiste na compatibilização dos resultados das estimativas derivadas dos modelos estático e dinâmico. A divisão da área de estudo em trechos de análise de emissões permite a comparação direta das estimativas obtidas nestes trechos a partir de cada um dos modelos utilizados.
- **Análise dos resultados:** a última etapa do método proposto consiste na análise dos resultados de estimativas de emissões. A análise pode envolver ainda a relação entre os níveis de emissões calculados e as características dos trechos de análise, buscando identificar quais os fatores mais influentes para diferenças nas estimativas de emissões. Este tipo de análise pode contribuir para a elaboração de políticas para o planejamento de transportes e subsidiar a elaboração de estratégias para auxiliar no gerenciamento do sistema viário.

É importante salientar que a melhoria da estimativa de emissões prevista no método proposto está condicionada à adequada definição dos trechos de análise de emissões (TAE). Por isso, a análise de resultados referente à etapa do modelo agregado de tráfego é muito importante, pois subsidia a definição dos TAEs.

ESTUDO DE CASO

A estrutura de modelagem híbrida proposta neste trabalho foi aplicada em um estudo de caso. A área de estudo, representada na Figura 4, corresponde a uma porção da rede viária da cidade de Porto Alegre, Brasil. A rede viária modelada tem extensão de aproximadamente 33 km, e engloba três importantes eixos de ligação do município. As vias que compõem a rede modelada podem ser classificadas em arteriais e coletoras e apresentam características heterogêneas em relação à hierarquia das vias, projeto geométrico e sistema de controle do tráfego em interseções, e diferentes condições de congestionamento em pontos distintos da área de estudo.

Este estudo de caso foi desenvolvido com o objetivo de explorar as potencialidades da utilização da estrutura de análise de emissões proposta.

Construção do modelo microscópico de tráfego

Com o objetivo de identificar características que possam levar a diferenciais significativos nas estimativas de emissões derivadas das duas abordagens de modelagem, a rede viária modelada no SATURN foi também codificada no modelo microscópico VISSIM (Fellendorf, 1996; PTV, 2006). Ele utiliza o modelo de car-following psicofísico de Wiedemann (Wiedemann, 1974) para a movimentação longitudinal dos veículos, e um algoritmo baseado em regras de mudança de faixas (lane-changing) para a movimentação lateral dos veículos (Vélez, 2006). Esses modelos são fundamentais para a apropriação de velocidades instantâneas dos veículos e do ciclo de direção correspondente às condições modeladas.

Para representar a variabilidade decorrente do padrão estocástico das condições do tráfego, foram realizadas três simulações adotando diferentes sementes estocásticas. A cada semente estocástica, o VISSIM modifica o perfil do tráfego através da variação dos tempos de chegada, que representa a taxa de geração de viagens durante a simulação. As informações das condições do tráfego simuladas pelo VISSIM foram registradas a cada segundo. O modelo fornece relatórios de saída em que foram observadas as velocidades instantâneas e acelerações a cada segundo, para cada veículo gerado na rede ao longo do período de simulação. O tratamento das informações fornecidas pelo VISSIM exige uma considerável capacidade computacional. Para fins de comparação e compatibilização dos modelos, os trechos de análise de emissões (TAEs), unidades de codificação do VISSIM, foram definidos como trechos de uma mesma via, com características geométricas homogêneas. Devido à dificuldades de compatibilidade da codificação de interseções no modelo SATURN e VISSIM, os TAEs foram definidos de forma que interseções importantes não constituíssem elementos limites dos trechos. Atendido a estes requisitos a área de estudo foi dividida em 30 TAEs. A calibração do modelo de tráfego no VISSIM teve o objetivo de representar as condições operacionais modeladas no modelo SATURN. Desta forma, buscou-se compatibilizar, principalmente, os fluxos e velocidades dos arcos e, na medida do possível, condições médias de filas.

Estimativa de emissões através de modelos estáticos

A estimativa de emissões em nível agregado foi realizada com a utilização do modelo MOBILE (EPA, 2007), versão 6.2. O modelo MOBILE (EPA, 2007) foi desenvolvido pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, a Environmental Protection Agency (EPA). Em relação às versões anteriores, o MOBILE 6.2 considera ciclos de condução associados ao tipo de via, como expressa, arterial, coletora e local. As informações utilizadas pelo modelo MOBILE foram provenientes da modelagem de tráfego do modelo SATURN. Neste estudo, foram avaliados poluentes considerados críticos para a saúde humana, incluindo monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx). Somente veículos leves foram considerados na análise.

Estimativa de emissões através de modelos dinâmicos

A estimativa de emissões através do modelo de emissões dinâmico foi realizada através do modelo IVE – *International Vehicle Emissions* – (Davis et al., 2005). O modelo IVE foi desenvolvido pelo *International Sustainable Systems Research Center* (ISSRC) e pela *University of California* em Riverside (UCR), com apoio da U.S. EPA.

O IVE utiliza três grupos de dados para os cálculos das emissões: (i) distribuição da frota veicular, de acordo com as tecnologias; (ii) características da região de análise e atividade veicular, que compreendem temperatura média, inclinação das vias, composição de combustíveis, distâncias percorridas, distribuições dos padrões de condução e dos tempos de resfriamento do motor e; (iii) fatores de emissão dos veículos, que envolvem as taxas básicas de emissões para cada tecnologia veicular e fatores de ajuste diversos.

Os fatores de correção utilizados no IVE são divididos em três categorias: (i) variáveis locais, que correspondem à temperatura ambiente, umidade relativa do ar, altitude e programas de inspeção/manutenção de veículos; (ii) variáveis relativas ao combustível, que referem-se basicamente ao tipo de combustível (gasolina, diesel, gás natural veicular) e sua composição; e, (iii) variáveis de potência e condução, que consistem em informações dos ciclos de condução dos veículos, da inclinação da via, do uso de ar condicionado e da distribuição dos tempos de partida a frio.

As variáveis locais codificadas no IVE correspondem às informações utilizadas no modelo MOBILE. Assim, considerou-se a temperatura média de 25°C, e altitude zero, correspondente ao nível do mar. A existência de programas de inspeção/manutenção dos veículos não foi considerada para o cálculo das emissões. Da mesma forma que no MOBILE, foram considerados somente veículos leves, utilizando gasolina como combustível.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise da estimativa de emissões compreende a avaliação dos valores estimados pelo modelo estático MOBILE e pelo modelo dinâmico IVE. Foram analisados três poluentes considerados críticos: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx). Para facilitar a análise das estimativas de emissões, os resultados são apresentados de acordo com os níveis de carregamento de cada TAE. Foram considerados três níveis de carregamento viário: (i) baixo, trechos com volumes menores que 900 veículos na hora modelada; (ii) médio, para volumes entre 901 e 1500 veículos, e (iii) alto, para fluxos maiores do que 1500 veículos. Segundo este critério, a área de estudo foi dividida em 32 TAEs com volumes baixos, 30 TAEs com volumes médios e 18 TAEs que apresentaram altos volumes de tráfego. As barras das figuras representam cada uma dos TAEs identificadas por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado para o trecho.

Comparação dos TAEs com baixo nível de carregamento viário

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam a comparação dos resultados das emissões de CO, HC e NOx, respectivamente, para os TAEs com baixo nível de carregamento viário. As barras das figuras representam cada um dos TAEs identificadas por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado pelo VISSIM para o trecho em análise.

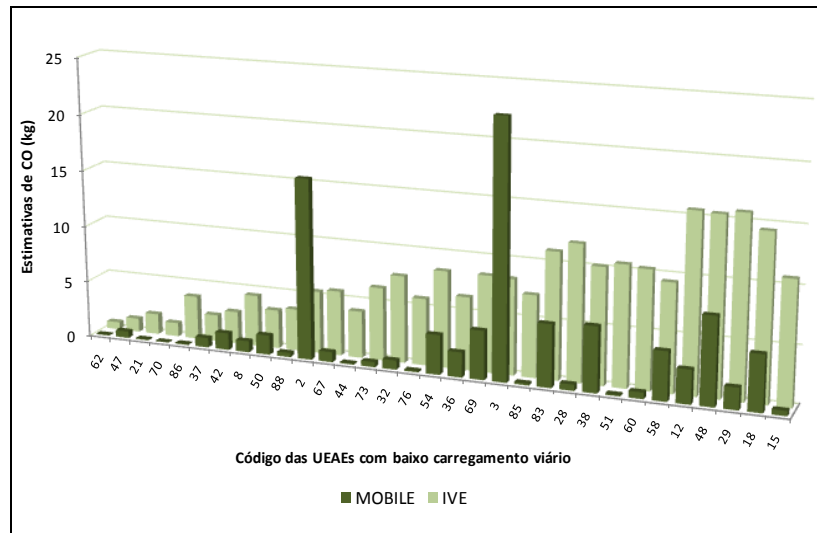


Figura 5 – Estimativas de CO para TAEs com baixo carregamento viário

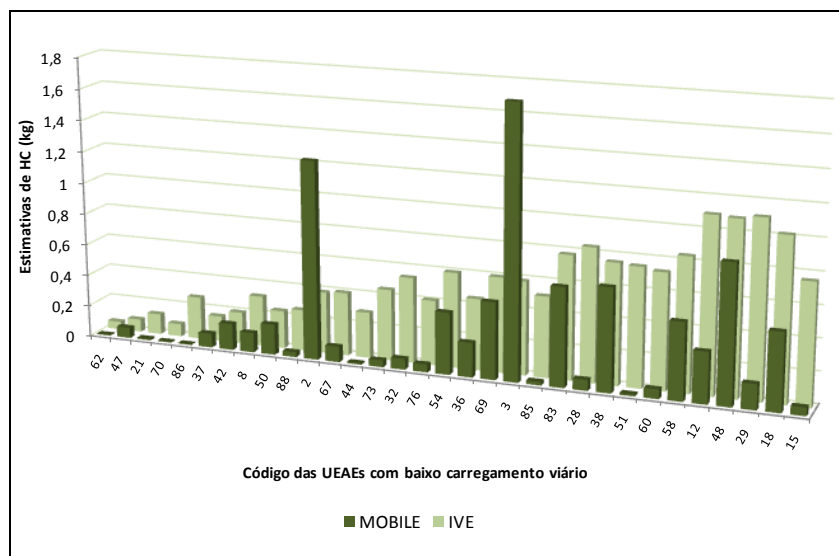


Figura 6 – Estimativas de HC para TAEs com baixo carregamento viário

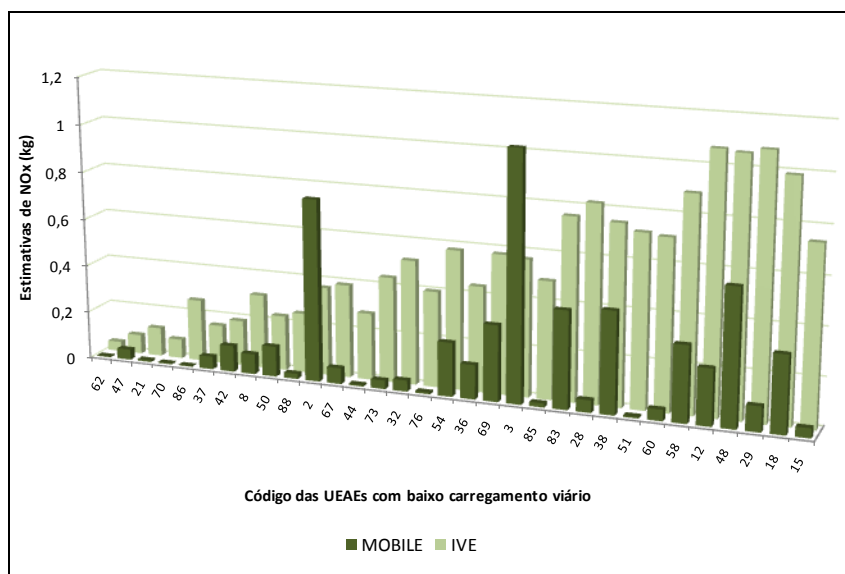


Figura 7 – Estimativas de NOx para TAEs com baixo carregamento viário

A análise identificou que as emissões estimadas pelo IVE foram maiores do que as estimadas pelo MOBILE. Os TAEs 2 e 3 apresentaram grandes picos de emissões nas estimativas do MOBILE, possivelmente devido à velocidade média estimada pelo SATURN ser maior do que 50 km/h. As diferenças percentuais médias entre as estimativas de CO, HC e NOx, considerando todas os TAEs com baixo carregamento viário, foram, respectivamente, 61%, 48% e 66%.

Comparação dos TAEs com nível médio de carregamento viário

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam a comparação dos resultados das emissões de CO, HC e NOx, respectivamente, para os TAEs com nível médio de carregamento viário. As barras das figuras representam cada uma dos TAEs identificadas por um código e são ordenadas em ordem crescente do volume de tráfego estimado pelo VISSIM para o trecho em análise.

Com exceção do TAE 24, as estimativas de emissões dos três poluentes realizadas pelo IVE foram maiores do que as do MOBILE. Em média, a diferença percentual entre as estimativas de CO pelos dois modelos foi de 68%, das emissões de HC foi 51% e das estimativas de NOx foi de 67%. A maior diferença percentual se deu no TAE 49 e aproximou-se de 98% para os três poluentes analisados. Por outro lado, a menor diferença foi observada no TAE 77, onde as diferenças relativas para CO, HC e NOx foram, respectivamente, 43%, 13% e 22%

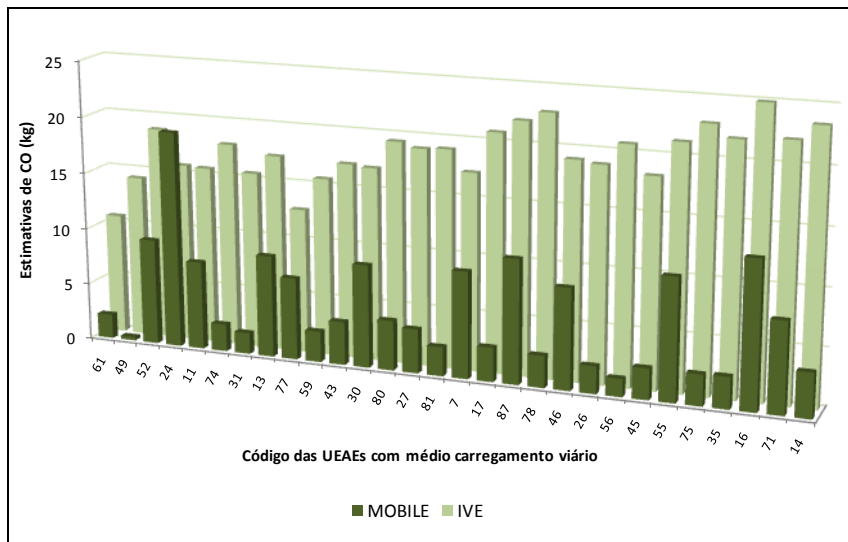


Figura 8 – Estimativas de CO para TAEs com médio carregamento viário

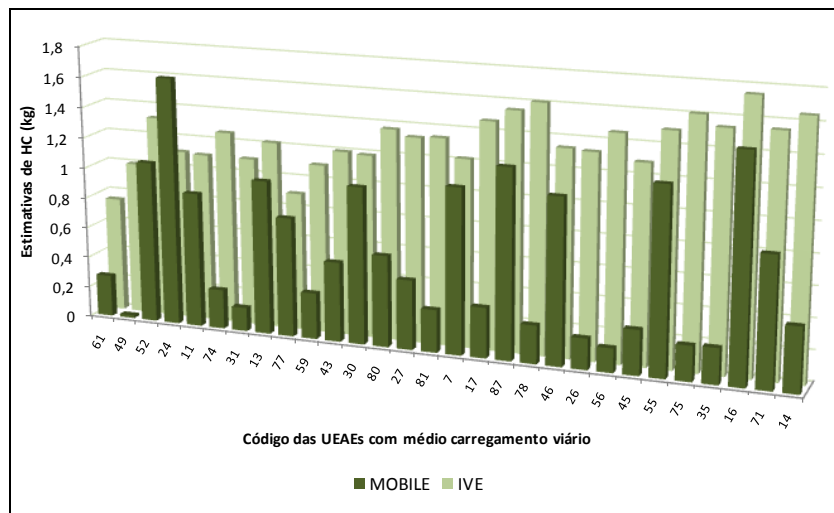


Figura 9 – Estimativas de HC para TAEs com médio carregamento viário

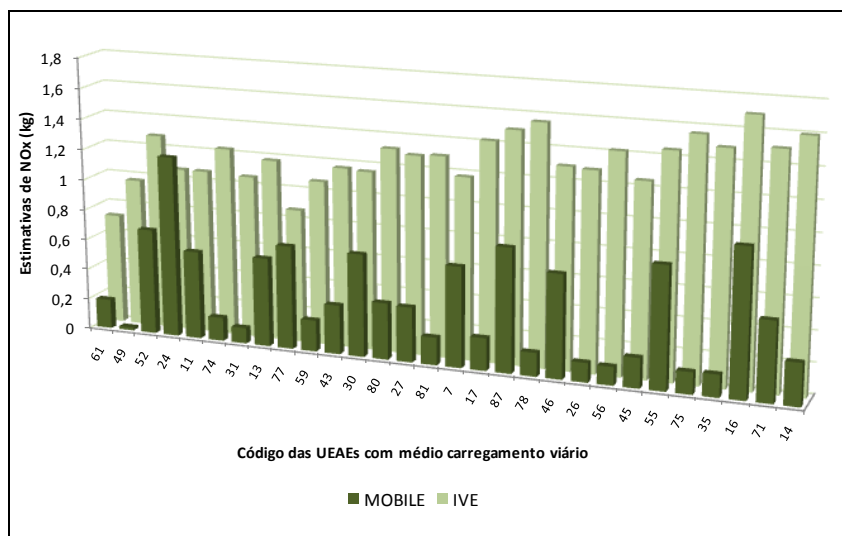


Figura 10 – Estimativas de NOx para TAEs com médio carregamento viário

Comparação dos TAEs com alto nível de carregamento viário

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam a comparação dos resultados das emissões de CO, HC e NOx, respectivamente, para os TAEs com alto nível de carregamento viário. As barras das figuras representam os TAEs identificados por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado pelo VISSIM para o trecho analisado.

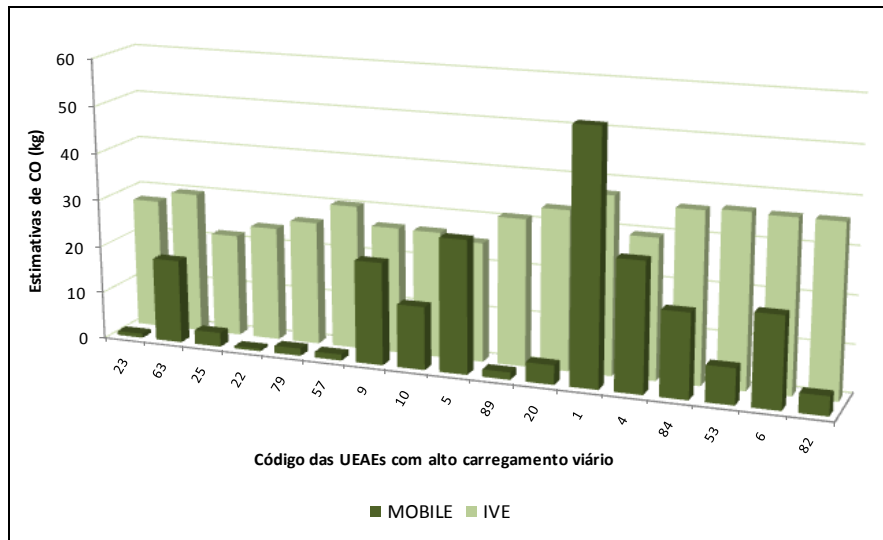


Figura 11 – Estimativas de CO para TAEs com alto carregamento viário

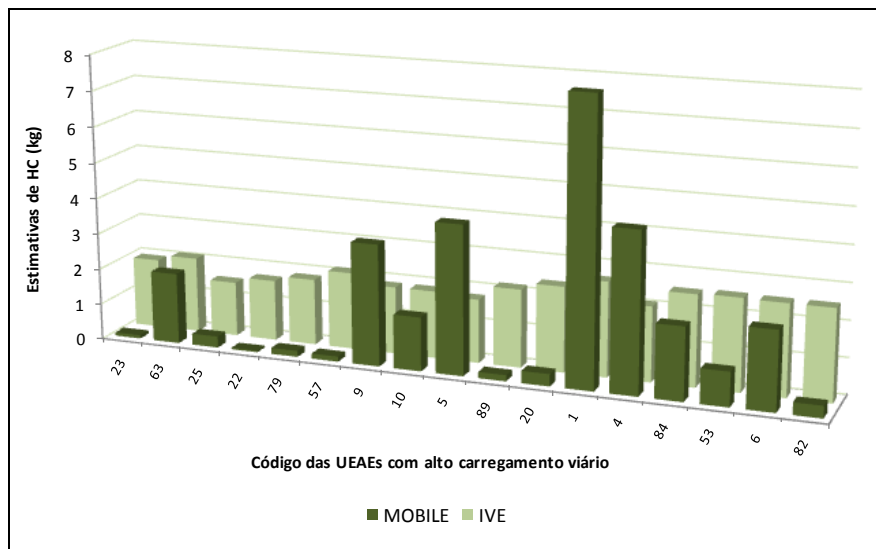


Figura 12 – Estimativas de HC para TAEs com alto carregamento viário

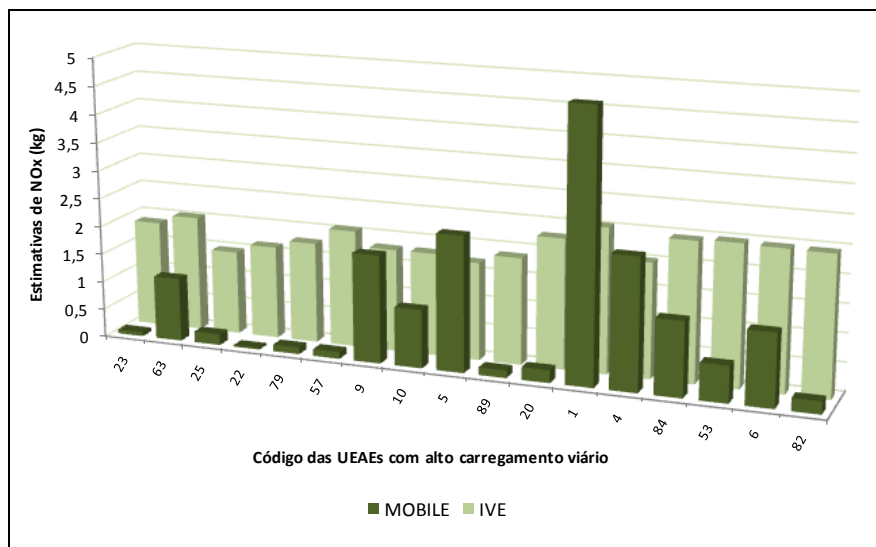


Figura 13 – Estimativas de NOx para TAEs com alto carregamento viário

Neste grupo de trechos de análise de emissões, apenas os TAEs 1 e 5 apresentaram estimativas do MOBILE maiores do que as do IVE. As diferenças percentuais observadas nas emissões do TAE 1 para CO, HC e NOx, foram, respectivamente, iguais a 42%, 199% e 87%. As diferenças percentuais médias das estimativas de CO, HC e NOx, considerando todas os TAEs com alto carregamento viário, foram, respectivamente, 58%, 19% e 50%.

No caso dos trechos de longa distância, as possíveis características responsáveis pelas diferenças significativas nos níveis de emissões podem estar relacionadas ao elevado número de interseções e de semáforos ao longo dos trechos. Essas características podem contribuir para padrões de condução com elevados eventos de desaceleração e aceleração.

Estimativa total de emissões na área de estudo

A Tabela 1 apresenta as emissões estimadas pelos modelos estático e dinâmico para todos os TAEs da área de estudo, classificados segundo o nível de carregamento.

Tabela 1 – Estimativas totais de emissões dos modelos MOBILE e IVE

Níveis de carregamento viário	MOBILE			IVE		
	CO (kg)	HC (kg)	NOx (kg)	CO (kg)	HC (kg)	NOx (kg)
Baixo	92,11	8,86	5,66	235,64	16,80	16,37
Médio	168,47	18,27	12,05	542,12	38,16	36,99
Alto	223,09	30,07	17,92	514,26	36,16	34,85
TOTAL	483,68	57,20	35,64	1292,02	91,12	88,21

É possível observar que a estimativa de monóxido de carbono (CO) realizada pelo IVE foi 267% maior do que a estimativa dada pelo MOBILE. Ainda, as estimativas de hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx) derivadas no IVE correspondem, respectivamente, a 159% e 248% a mais do que as realizadas pelo MOBILE.

Para fins de análise de sensibilidade, resultados da aplicação do método são apresentados a seguir. Neste processo, segundo a metodologia proposta, assume-se como referência as estimativas provenientes da modelagem agregada fornecida pelo modelo MOBILE. Com o objetivo de aprimorar as estimativas nos trechos que não são apropriadamente avaliados na modelagem agregada, as estimativas destes trechos foram substituídas pelas do modelo dinâmico IVE, teoricamente melhor capacitado para representar fenômenos de aceleração e desaceleração, típicos do tráfego em áreas urbanas.

A tabela 2 apresenta um exemplo desta aplicação. Neste exemplo foram selecionados os TAEs cujas estimativas fornecidas pelo IVE foram superiores às do MOBILE em 50% ou mais. Segundo este critério, estimativas do modelo de emissões dinâmico foram adotadas em 16 dentre as 32 TAEs categorizadas como baixos volumes, em 12 das 30 TAEs de categoria volumes médios e em 7 dentre as 18 TAEs com altos volumes. Desta forma, valores apresentados na tabela 2, são resultado de um processo no qual apenas 35 dos 80 trechos de modelagem que constituem a área de estudo passaram por um processo de modelagem microscópica de tráfego e pela sucessiva modelagem dinâmica de emissões.

Tabela 2 – Estimativas totais de emissões dos modelos MOBILE e calculadas através do método proposto

Níveis de carregamento viário	IVE			MÉTODO PROPOSTO		
	CO (kg)	HC (kg)	NOx (kg)	CO (kg)	HC (kg)	NOx (kg)
Baixo	235,64	16,80	16,37	153,89	12,31	10,70
Médio	542,12	38,16	36,99	349,44	48,79	49,14
Alto	514,26	36,16	34,85	335,73	32,26	24,12
TOTAL	1292,02	91,12	88,21	839,06	93,36	83,96

Os resultados mostram que as relações percentuais entre as estimativas de CO, HC e NOx do modelo estático, após a substituição dos valores previstos pelo modelo dinâmico nos TAEs com maiores diferenças, foram, respectivamente, iguais a 173%, 163% e 236%. No caso deste estudo, aprimorar a estimativa de emissões em trechos específicos permitiu chegar a uma estimativa global de CO próxima a 65% da estimativa realizada considerando apenas a simulação desagregada. Para as emissões de HC e NOx, a adoção das premissas do método proposto aproximou-se dos resultados obtidos com o modelo de emissões dinâmico.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta metodológica de modelagem híbrida de tráfego para aprimorar a estimativa de emissões em áreas urbanas. O método associa modelos de tráfego com níveis distintos de detalhamento, integrando-os a modelos de emissões compatíveis com o detalhamento das variáveis de tráfego. O método foi aplicado a um estudo de caso em uma região da cidade de Porto Alegre. A definição da área de estudo considerou a existência de características heterogêneas de infraestrutura e operação do tráfego com o objetivo de associar estimativas de emissões a estas características.

As condições de tráfego na área de estudo apresentaram boas condições de circulação. A rede não apresentava vias em estado saturado. A operação de tráfego em condições não

saturadas foi uma condição importante para que os resultados da análise de tráfego e as estimativas de emissões não estivessem vinculados a condições instáveis de operação. Os resultados do estudo de caso permitiram a identificação de trechos da rede viária nos quais as estimativas de emissões provenientes de modelos agregados foram significativamente diferentes das estimativas derivadas de modelos microscópicos. Para orientar as análises, os trechos de análise de emissões, TAEs, que se referem aos trechos de análise, foram divididos em três níveis de carregamento viário: baixo, médio e alto.

De forma geral, as diferenças mais significativas entre as estimativas de emissões dos TAEs de baixo carregamento viário ocorreram em trechos onde há presença de semáforo ao final do trecho. Em relação às TAEs de médio carregamento viário, as maiores diferenças foram observadas em locais onde, ao final do trecho, houve a necessidade de aguardar uma brecha para inserção na corrente de tráfego concorrente. No caso dos TAEs com alto carregamento viário, que representam os principais eixos viários da rede modelada, as características que possivelmente tenham contribuído para grandes diferenças nas estimativas de emissões referem-se ao elevado número de interseções e de semáforos ao longo dos trechos.

Ainda, foram observadas diferenças significativas nos níveis de emissões em TAEs que representam arcos externos da rede modelada. Os arcos externos da rede viária são, em geral, arcos curtos e têm a função de fazer a ligação das zonas de tráfego com a rede modelada. Assim, estes arcos concentram a demanda de veículos que entra e sai da rede viária. Por isso, é importante que trechos desse tipo não sejam o foco da análise de emissões, uma vez que nesses locais a representação do tráfego pode não refletir as reais condições de operação.

É importante ressaltar que este trabalho não teve como objetivo avaliar os valores absolutos das emissões, mas a variabilidade nas estimativas decorrente das diferenças da modelagem de tráfego. No entanto, é importante destacar que as taxas de emissões utilizadas pelos modelos de emissões na utilização deste método deveriam ser baseadas em medições de veículos utilizados na área de estudo. Porém, reconhece-se que a obtenção de medições precisas de fatores de emissão representa um processo complexo e de elevado custo. O método desenvolvido neste trabalho apresenta alto potencial de utilização tanto para a elaboração de diagnósticos de emissões em áreas urbanas, quanto para a avaliação de diferentes cenários de desempenho viário. Por fim, acredita-se que o método proposto neste trabalho possa alavancar outras pesquisas neste tema e que resultados de estudos específicos possam contribuir para o seu aprimoramento.

REFERÊNCIAS

- Barcelo, J.; Ferrer, J.; Grau, R. (1997) Microscopic traffic simulation for ATT systems analysis. Barcelona, Universitat Politecnica de Catalunya.
- Bourrel, E.; Lesort, J.-B. (2003) Mixing Micro and Macro Representations of Traffic Flow: a Hybrid Model Based on the LWR Theory. Transportation Research Board, Washington DC.

- Burghout, W. (2004) Hybrid Microscopic-Mesoscopic Traffic Simulation Modelling. Department of Infrastructure. Stockholm, Royal Institute of Technology: 210.
- Burghout, W.; Koutsopoulos, H.; Andreasson, I. (2005) Hybrid mesoscopic-microscopic traffic simulation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1934, 218-225.
- Cappiello, A. (2002) Modeling traffic flow emissions. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, EUA.
- CARB (California Air Resources Board) (2007). EMFAC 2007 version 2.30 - Calculating emission inventories for vehicles in California - User's Guide.
- Chen K.; Yu L. (2007) Microscopic Traffic-Emission Simulation and Case Study for Evaluation of Traffic Control Strategies. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 7(1), 93-100.
- Davis, N.; Lents, J.; Osses, M.; Nikkila, N. Barth, M. (2005) Development and Application of an International Vehicle Emissions Model. Transportation Research Board 81st Annual Meeting. Washington, D.C.
- EPA (Environmental Protection Agency)(2007). Mobile Source Emissions – Past, Present and Future. Disponível em: www.epa.gov/otaq/invntory/overview/examples.htm.
- Fellendorf, M. (1996) VISSIM for traffic signal optimisation. Traffic Technology International, Dorking, UK.
- Imasato, T.; Ariotti, P.; Jacondino, G.; Cybis, H. B. B. Análise Comparativa de Simuladores de Tráfego para Estimativa de CO em Áreas Urbanas. In: XV Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Cartagena de Índias. Actas de XV Congreso Panamericano de Tránsito y Transporte, 2008.
- INRO Consultants (1996). EMME/2 User's Manual. Software Release 8.0.
- Jacondino, G. B. (2005) Quantificação das emissões veiculares através do uso de simuladores de tráfego. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Leonard, D. R.; Gower, P.; Taylor, N. B. (1989) Contram: structure of the model. Crowthorn, Transportation Research Laboratory NO. 178.
- Liu, R. (2002) DRACULA traffic simulation model: a user guide. Institute for Transportation Studies, University of Leeds.
- Magne, L.; Rabut, S.; Gabard, J.-F. (2000) Towards an Hybrid Macro-micro Traffic Simulation Model. INFORMS, Salt Lake City, USA.
- Mammar, S.; Lebaque, J.-P.; Haj-Salem, H. (2006) A Hybrid Model Based on a Second Order Traffic Model. 85th Meeting of Transportation Research Board CD-ROM, Washington DC.
- Ntziachristos, L.; Samaras, Z. (2000) COPERTE III Computer Programme to calculate emissions from road transport. Methodology and emission factors (version 2.1).
- Poschinger, A.; Kates, R.; Meier, J. (2000) The Flow of Data in Coupled Microscopic and Macroscopic Traffic Simulation Models, Torino.
- PTV (Planung Transport Verkehr) (2006) Vissim 4.20 User Manual. Karlsruhe, Germany.
- Shi, H.; Ziliaskopoulos, A. (2006) A Hybrid Mesoscopic-Microscopic Traffic Simulation model: Design, Implementation and Computational Analysis. 85th Meeting of Transportation Research Board CD-ROM.
- Van Vliet, D., Hall, M. (2000) SATURN 10.1 User Manual. Leeds: Institute for Transport Studies, University of Leeds.

Abordagem híbrida de modelagem de tráfego para estimativa de emissões
ARIOTTI, Paula; CYBIS, Helena Beatriz Bettella

- Vélez, E. G. (2006) Adaptation of VISSIM, a Dynamic Simulation Model, to the Traffic Behavior at Intersections in Mayagüez, Puerto Rico. Thesis of Master of Science in Civil Engineering. University of Puerto Rico.
- Wiedemann, R. (1974) Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8.
- Willumsen, L.G. (1992) Estimation of OD Matrices and Transport Models from Traffic Counts. In: Simplified Transport Demand Modelling. Proceedings... London: PTRC, 33-43.
- Yang, Q.; Morgan, D. (2006) A Hybrid Traffic Simulation Model. 85th Meeting of the Transportation Research Board CD-ROM, Washington DC. Research Board CD-ROM, Washington DC.