

ANÁLISE DOS PADRÕES DE VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO VOLUME VEICULAR NO AMBIENTE URBANO DE FORTALEZA

Marcus Vinicius Teixeira de Oliveira
Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes – PETRAN
Universidade Federal do Ceará – UFC

RESUMO

O dinamismo das atividades urbanas influencia diretamente na variação temporal e espacial do fluxo de tráfego em sistemas viários urbanos, fazendo com que o conhecimento desta variabilidade tenha papel fundamental no controle efetivo do tráfego. Buscando suprir a carência de metodologias sistêmicas para a análise deste fenômeno, este trabalho se destina a investigar o comportamento dos volumes veiculares, caracterizando e analisando a variabilidade nos dados de fluxo de tráfego de uma rede amostral de vias arteriais urbanas, em um estudo de caso na cidade de Fortaleza. Para tanto, é apresentada uma proposta metodológica de avaliação dos fatores de dependência temporal e espacial do fluxo de tráfego, examinando a existência dos efeitos de interação do mês do ano, do dia da semana e períodos de pico nas distribuições do volume veicular.

ABSTRACT

The dynamic behavior of urban activities affects both temporal and spatial variation of traffic flow in urban road systems, making the knowledge of this variability essential to effectively control the urban traffic. Trying to fulfill the lack of systemic methodologies to analyze this phenomenon, this work focus on the investigation of vehicular volume behaviors, characterizing and analyzing the variability in traffic flow data of a sample network of urban arterial streets, in a case study in the city of Fortaleza. Therefore, it is presented a methodological procedure to evaluate the temporal and spatial dependency factors of traffic flow, pointing out the presence of interaction effects for the month of the year, the day of the week and peak periods in the distribution of vehicular volumes.

1. INTRODUÇÃO

A variabilidade temporal e espacial dos fluxos de tráfego em sistemas viários urbanos é influenciada diretamente pela dinâmica das atividades urbanas e, segundo Stathopoulos e Karlaftis (2001), o conhecimento desta variabilidade tem papel essencial no planejamento, projeto e controle efetivo do tráfego. Conforme destaca Reis (2001), a variação do volume veicular ao longo do tempo e do espaço, embora reconhecida, necessita de uma investigação mais detalhada, sobretudo no que diz respeito às características de sua distribuição, relacionando as suas flutuações temporais com os aspectos locais e operacionais dos diferentes tipos de vias, assim como ao impacto em todos os níveis do planejamento urbano e de transportes.

Ademais, o estudo do caráter espaço-temporal da variabilidade do volume de tráfego em redes urbanas, apesar da sua grande importância na análise do sistema de transportes e na qualidade da organização racional do ambiente urbano, ainda carece de metodologia de análise. Esta carência torna-se crítica na medida em que a ocorrência de falhas em quantificar a distribuição desses volumes pode comprometer a precisão de diversas análises de impacto no sistema viário e resultar em projetos inapropriados ou desnecessários. Nesse sentido, a ausência de um procedimento científico para identificar o comportamento do volume de tráfego urbano aplicável às condições locais, investigando o processo de variação do fluxo de tráfego, acarreta no desconhecimento do padrão de deslocamento veicular da cidade, elemento básico para subsidiar ações de planejamento e a tomada de decisão na gestão do tráfego.

Buscando suprir essa carência, este trabalho se destina a investigar o comportamento dos volumes veiculares, caracterizando e analisando a variabilidade nos dados de fluxo de tráfego de uma rede amostral de vias arteriais urbanas, em um estudo de caso na cidade de Fortaleza. Para tanto, é apresentada uma proposta metodológica de avaliação dos fatores de dependência temporal e espacial do fluxo de tráfego, examinando a existência dos efeitos de interação do mês do ano, do dia da semana e períodos de pico nas distribuições do volume veicular. Adicionalmente, são estabelecidos procedimentos para se agrupar estes fatores em categorias, de forma a identificar a natureza dos padrões e tendências de variação do volume de tráfego nas condições típicas para a realidade local. Os dados de volume de tráfego para o estudo de caso desta pesquisa foram obtidos a partir da extensa rede de laços detectores que alimentam o controle semafórico em tempo real do Sistema de Controle Centralizado do Tráfego de Fortaleza (CTAFOR) (Loureiro *et al.*, 2002), abrangendo a principal região comercial e de serviços da cidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversas pesquisas foram feitas para investigar a flutuação do tráfego em períodos e escopos distintos, destinando-se a entender o padrão de fluxo temporal e espacial, e avaliar os seus efeitos na circulação e gestão do tráfego. No entanto, conforme ressalta Stathopoulos e Karlaftis (2001), a maioria dos estudos realizados para examinar variações temporais e espaciais no fluxo de tráfego concentraram-se em rodovias, enquanto as áreas urbanas, onde as estratégias de gestão dinâmica do tráfego podem ter os benefícios mais efetivos, foram em grande parte ignoradas.

2.1. Analisando a variabilidade temporal e espacial do fluxo de tráfego

Nos EUA, um grande esforço no sentido de estudar e caracterizar a variabilidade nos dados de tráfego, em segmentos de vias monitoradas continuamente, foi empreendido por Wright *et al.* (1997) na análise de variações de curto e médio prazos em 21 locais de diversos tipos de vias americanas. Nas vias arteriais, os resultados mais significativos confirmaram que os finais de semana e feriados contribuem substancialmente à variabilidade observada nos dados de volume de tráfego. Com relação à regularidade dos padrões de fluxo de tráfego nos dias úteis da semana, McShane e Crowley (1976), duas décadas antes, já relatavam que níveis específicos de fluxo em vias arteriais são alcançados aproximadamente no mesmo período do dia, com uma variação basicamente sistemática do fluxo entre os dias úteis. Mais recentemente, pesquisando sobre o efeito de fatores temporais (hora do dia, dia da semana e mês) nas proporções horárias do volume de tráfego, o estudo de Ivan *et al.* (1999) resultou em modelos de predição de proporções horárias de volume a serem aplicados em estimativas anuais do tráfego.

Merece também destaque a pesquisa de Stathopoulos e Karlaftis (2001), que se destinou à análise das variações temporais e espaciais no tráfego, usando dados de fluxo obtidos a partir de 140 laços detectores ao redor da área urbana de Atenas, Grécia. Neste trabalho, um estudo estatístico da variabilidade espacial e temporal do fluxo de tráfego revelou características peculiares sobre os deslocamentos na área urbana da cidade. Os dados de fluxo foram agregados em períodos de 15 minutos, relativos a todos os dias da semana, sendo excluídos os dias atípicos (feriados, eventos públicos, períodos com obras e desvios viários). Avaliando inicialmente os perfis temporais de distribuição dos fluxos, os resultados comprovaram que esses fluxos variam substancialmente por período do dia, sem contudo apresentarem variações

significativas entre dias úteis. Além disso, em relação ao perfil mensal do volume de tráfego, os autores também indicaram que a cidade de Atenas apresenta baixa sazonalidade, tendo os meses de verão como atípicos devido ao período de férias local. Quanto à variabilidade anual, os fluxos diários médios exibiram variação significativa ao longo dos anos pesquisados.

No que se refere à variação espacial, as pesquisas de Stathopoulos e Karlaftis (2001) indicaram a existência de um padrão direcional de variação espacial em relação ao centro da cidade. Os dados demonstraram que o volume de tráfego durante o período da manhã é maior no sentido da periferia ao centro da cidade, tornando-se mais significativo no sentido contrário durante o pico da tarde. Contudo, os autores relataram que no centro da cidade o tráfego não apresenta variação direcional.

2.2. O efeito da variabilidade do fluxo no desempenho do controle semafórico

Independente da existência de tais variações ao longo de dias da semana e meses, Ribeiro (1991) ressalta que praticamente nenhuma atenção especial é dada à flutuação imprevista, ou variabilidade, do fluxo de tráfego pelas fórmulas ou simuladores computacionais que desenvolvem os cálculos dos ajustes semafóricos no controle de interseções operando sob estratégias de tempo fixo. Em seu trabalho, Ribeiro (1991) destaca ainda que, normalmente, a variação de tráfego entre dias também não é considerada na geração de planos semafóricos, e as conseqüências desta prática correspondem a uma sub-avaliação dos atrasos e números de paradas veiculares modelados nos simuladores de tráfego, resultando na redução da qualidade dos planos semafóricos gerados.

No mesmo propósito, Reis (2001) estudou a influência do efeito da variação do volume de tráfego sobre o desempenho de planos semafóricos, destacando a importância do conhecimento da forma de variação dos volumes, em médio e longo prazos, na definição da regularidade de atualização dos planos semafóricos, de modo a evitar um fenômeno conhecido por processo de envelhecimento dos planos. Destaca-se também o trabalho desenvolvido por Fox e Clark (1998) que investigaram a variação do fluxo de tráfego conforme o período do dia, o dia da semana e a sazonalidade. O propósito do estudo foi avaliar os benefícios de um sistema avançado de controle semafórico em tempo real. O método foi baseado na simulação e avaliação do desempenho do sistema sob diferentes níveis de variabilidade do fluxo de tráfego. Por fim, os autores concluem por recomendar a inclusão da variabilidade do fluxo de tráfego nas avaliações de sistemas responsivos de controle de tráfego urbano.

3. METODOLOGIA PROPOSTA

Partindo da premissa de que o tráfego veicular urbano varia significativamente no tempo e no espaço, apresenta-se a seguir uma metodologia de análise da magnitude desta variação e de investigação de suas características (Oliveira, 2004), objetivando a identificação, quantificação, categorização e interpretação da variabilidade dos dados de fluxo de tráfego em malhas urbanas de grandes cidades brasileiras, com disponibilidade de uma rede suficientemente abrangente de detectores automáticos.

3.1. Estruturação da base de dados

Conforme disposto na Figura 1, a primeira etapa da metodologia contempla a estruturação do banco de dados. Inicialmente, na fase de planejamento do experimento, deve-se definir os elementos básicos e condicionantes da análise, incluindo a avaliação da fonte, forma de

obtenção e disponibilidade dos dados de volume de tráfego, assim como os recursos necessários. A condição prévia para o desenvolvimento de qualquer avaliação de padrões de circulação do tráfego é a disponibilidade de dados de fluxo em uma abrangência temporal e espacial que seja capaz de satisfazer os requisitos de precisão e confiabilidade estatística das análises exploratórias e inferenciais. A abrangência temporal, ou seja, a duração do período de amostragem é uma função do tipo de contagem veicular e do uso para o qual os dados de volume serão destinados. Nesse sentido, de forma que a variabilidade a curto e longo prazos possa ser analisada, os dados devem ser amostrados onde há coleta contínua sobre um amplo período de tempo. Os critérios de amostragem espacial, por sua vez, devem considerar a abrangência de cobertura na monitoração da via, de modo a permitir uma avaliação eficiente da homogeneidade espacial ao longo dos corredores viários, assim como no tocante à sua disposição na malha viária.

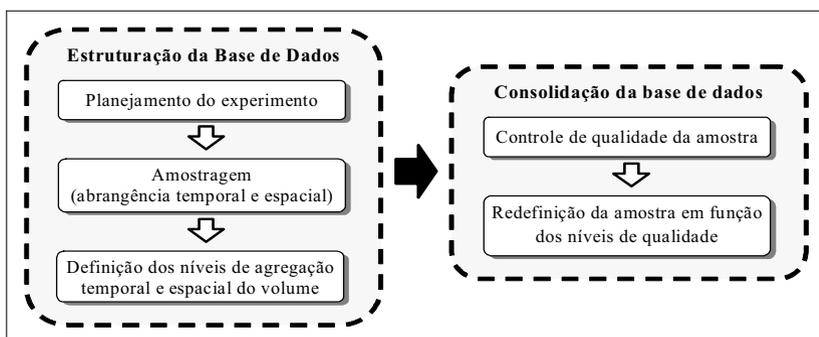


Figura 1: Fluxo de atividades preliminares de estruturação e consolidação da base de dados.

Uma vez selecionada a amostra, os dados são então agregados pela combinação dos aspectos temporais (dia da semana, meses ou anos) e espaciais (corredores viários, direção e sentido), de forma que seja possível classificar e ordenar as categorias em função dos níveis hierárquicos de análise (estratégico, tático e operacional). A agregação temporal, nesse processo, refere-se ao intervalo de tempo ao qual os dados são resumidos. Segundo Turner (2001), devido à natureza detalhada de dados de tráfego coletados por sensores em sistemas ITS (tipicamente coletados em curtos intervalos), a agregação dos dados é um conceito importante a considerar no manuseio de uma base de dados de tráfego.

Do mesmo modo, a consistência das análises depende também da agregação espacial adotada, tendo em vista os dados coletados por laços indutivos estarem no nível espacial mais desagregado, ou seja, a seção direcional da via (*link*). Assim, conforme o objetivo da análise pretendida, é possível agregar os *links* sob diferentes aspectos espaciais (ex. segmentos ou trechos de vias, corredores viários ou rotas direcionais). Adicionalmente, essa atividade destina-se também a economizar espaço de armazenamento e reduzir o tempo de processamento computacional dos dados quando analisados ou arquivados. Nesse contexto, a escala de agregação do volume de tráfego empregada neste trabalho foi baseada na amplitude temporal de variação. Ou seja, nas variações anual, mensal e diária, o volume de tráfego foi analisado sob a forma de volume médio diário (VMD). Já nos perfis horários foi empregado o fluxo como variável de avaliação.

3.2. Consolidação da base de dados

Considerando os aspectos de confiabilidade e qualidade dos dados de tráfego, os primeiros passos nesta etapa destinam-se à remoção de dados de volume nas seguintes situações: dias com falhas (remoção do dia completo para falhas em períodos horários); datas de feriados nacionais e locais; dias influenciados pelo efeito de feriados, comumente chamados de “período de feriado” (ex., dias que antecedem o carnaval, a véspera de natal, o *veillon*); datas comemorativas relevantes ao efeito no tráfego (ex., dia do estudante, dia do funcionário público, dia do comerciante); datas de eventos e festas regionais (ex., carnaval fora de época).

Nesse sentido, Wright *et al.* (1997) alertam que, embora o efeito do feriado e dias especiais seja pequeno nas estimativas médias do volume de tráfego, não é desprezível nos coeficientes de variação correspondentes. Além disso, é necessário identificar e remover adicionalmente os dias em que houve desvios na circulação viária, devido a obras de infra-estrutura (ex., reparos no pavimento, canalizações, drenagem, etc). Neste ponto, convém alertar que a ocorrência de uma intervenção parcial ou total da circulação viária normalmente acarreta em distúrbios sobressalentes às condições típicas do tráfego, relacionados ao período da intervenção e à sua abrangência espacial. Assim, devem ser considerados todos os locais (*links*) afetados diretamente pela intervenção na via, bem como os segmentos viários indiretamente impactados pelo desvio do tráfego provocado pela situação de obstrução viária. Da mesma forma, no processo de remoção do período em que ocorreram as intervenções na circulação viária, deve-se considerar a influência da ocorrência sobre os primeiros dias após a liberação dos trechos afetados, tendo em vista o retorno não imediato das condições normais de circulação.

Na seqüência, também devem ser definidos procedimentos para a remoção ou correção de valores extremos causados pela ocorrência de situações aleatórias e anômalas na corrente de tráfego, de modo a não afetar a identificação de condições típicas. Para tanto, o processo proposto baseia-se na identificação de *outliers* (dados atípicos que divergem significativamente da vasta maioria dos demais). Nesse processo, são considerados *outliers* os valores avaliados que permanecerem fora de um intervalo estabelecido em função da estatística *amplitude interquartil*, utilizada na construção do diagrama de caixa (*boxplot*) (SPSS, 2001). Essa ferramenta de análise exploratória mostra-se conveniente para revelar tanto o nível de dispersão e distribuição dos dados, quanto a presença de valores extremos. Por fim, uma vez definidos e aplicados esses critérios, é importante considerar a redefinição da amostra em função dos níveis de qualidade dos dados, pois a confiabilidade das análises depende da suficiência da amostra e das condições de representatividade dos dados de volume ao comportamento típico e real do tráfego.

3.3. Métodos estatísticos de análise dos dados de volume

Após a estruturação e a consolidação da base de dados, a terceira, e última, etapa da metodologia proposta contempla a seleção e implementação das técnicas de análise da variabilidade do volume veicular, que devem se basear num critério hierárquico estabelecido pela combinação, primeiramente, da escala temporal de variação do volume de tráfego (iniciando pelas formas mais agregadas de representação do volume). E segundo, pela amplitude do impacto desta variável em todos os níveis de atuação (estratégico, tático e operacional) direta ou indiretamente afetados, conforme diagrama apresentado na Figura 2.

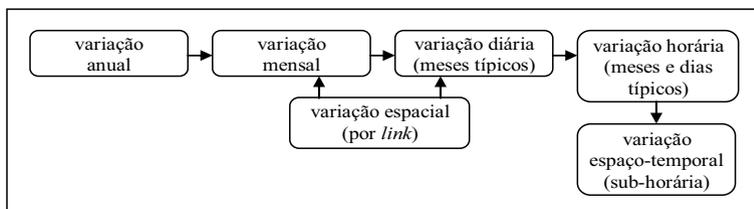


Figura 2: Seqüência metodológica de análise dos padrões de variação do volume veicular.

Nesse sentido, o cerne desta metodologia consiste em explorar os dados de volume, desenvolver e testar hipóteses e identificar padrões sobre os dados analisados. Para tanto, técnicas estatísticas exploratórias e inferenciais são empregadas nas diferentes formas de agregação da variável volume de tráfego, incluindo: estatística descritiva, testes de aderência e testes de significância. Estes últimos destinando-se a identificar VMDs mensais e diários (ao longo da semana) significativamente diferentes com base em um teste paramétrico de comparações de múltiplas médias: a Análise de Variância, ou ANOVA (SPSS, 2001).

O passo inicial na determinação das características do padrão do tráfego é a análise de sua natureza em termos da distribuição de probabilidade populacional. As técnicas estatísticas subsequentes usadas para avaliar as características das variações do volume de tráfego dependem do tipo de distribuição de probabilidade assumida pela variável, como por exemplo, a suposição de normalidade da distribuição empírica dos dados de volume veicular diário. Essa investigação é, portanto, uma das exigências para a aplicação de diversos testes inferenciais paramétricos. Como referência, muitos trabalhos anteriores, que analisaram variações temporais no fluxo de tráfego usando a análise de variância, examinaram previamente a variável e assumiram em seus estudos a distribuição normal como representativa do volume (McShane e Crowley, 1976; Ribeiro, 1991; Ivan *et al.*, 2002). Nesse contexto, evidencia-se a necessidade desta investigação para cada realidade local, tendo em vista os aspectos comportamentais e peculiares, inerentes a cada ambiente urbano. Assim, deve-se verificar previamente a validade do pressuposto de normalidade da distribuição da variável de volume analisada. Recomenda-se como teste de normalidade o de *Kolmogorov-Smirnov*, baseado na máxima diferença entre a distribuição amostral cumulativa e a distribuição hipotética (Milton e Arnold, 1990).

4. ESTUDO DE CASO – VIAS ARTERIAIS URBANAS DE FORTALEZA

A área selecionada para o estudo de caso deste trabalho refere-se a uma parcela da malha viária arterial de Fortaleza, abrangendo a principal região comercial e de serviços da cidade, que é monitorada pelo sistema semafórico do CTAFOR (Loureiro *et al.*, 2002). Assim, seguindo a etapa inicial da metodologia proposta, os princípios que nortearam a seleção da amostra de vias monitoradas pelo sistema de detecção basearam-se na tentativa de abranger a população de vias arteriais com diferentes condições geométricas e operacionais dentro da referida área de estudo. Nesse sentido, 16 vias arteriais foram selecionadas para a análise, consistindo na sua maioria de vias de mão dupla com duas faixas de tráfego por sentido e com canteiro central, além de cinco vias operando em sentido único, com duas destas possuindo três faixas de tráfego. No que se refere às características operacionais, a amostra contemplou diversos tipos e funcionalidades, incluindo vias essencialmente de tráfego de passagem, eixos de ligação leste-oeste, como também apresenta rotas com predominância comercial,

residencial e turística. Foram, então, implementados todos os procedimentos de verificação da consistência e qualidade dos dados descritos anteriormente.

4.1. Identificação dos padrões temporais e espaciais de variação do volume

4.1.1. Variação Anual

Iniciando a análise dos padrões temporais pela variação anual (Figura 2), a variável usada no processo de análise descritiva das tendências de crescimento em longo prazo do carregamento viário foi o Momento de Tráfego Total (MTT) da rede, representado em função do VMD de dias úteis de um mês considerado típico de cada ano - neste caso, o mês de abril. Esta medida possibilita uma boa indicação do potencial de deslocamento veicular em ambiente urbano, pois relaciona a demanda na rede à extensão do seu deslocamento. Os valores do MTT na rede, em um mês típico de cada ano, resultaram da formulação apresentada pela Equação 1:

$$MTT_k = \sum_{i=1}^n (VMD_{k, link\ i} \times L_{link\ i}) \quad (1)$$

em que MTT_k : refere-se ao momento de tráfego total, de um mês típico k , no conjunto de vias da amostra do estudo de caso [km x veic.];

$VMD_{k, link\ i}$: consiste no volume médio diário de dias úteis, de um mês típico k , em um dado $link\ i$ [veic.];

$L_{link\ i}$: comprimento do $link\ i$ correspondente [km];

n : quantidade total de $links$ que compõe a rede viária analisada.

Por conseguinte, a evolução da frota de veículos registrados no município também é apresentada com o propósito de estabelecer uma avaliação comparativa à variação do MTT da rede. O período de avaliação compreendeu os anos de 2002 a 2004 em virtude da disponibilidade de dados armazenados no banco de dados do sistema semafórico do CTAFOR. A Figura 3 apresenta o perfil de variação anual nas vias deste estudo de caso.

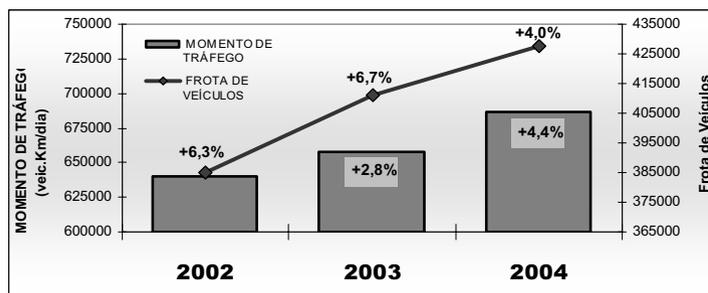


Figura 3: Variação anual do momento de tráfego diário médio na área de estudo comparativamente à evolução da frota (mês típico de cada ano).

A análise deste perfil permite verificar o nível elevado das taxas de crescimento do tráfego nas vias arteriais selecionadas, principalmente considerando a evolução do tráfego entre abril de 2003 e abril de 2004, período no qual a taxa de crescimento do momento de tráfego (4,4%) foi superior ao respectivo aumento relativo da frota registrada de veículos (4,0%) no município. Ademais, considerando as características de expansão restrita das atividades urbanas da região, que se encontram bastante consolidadas no tocante ao uso do solo, essa

tendência de crescimento do momento de tráfego alerta para uma situação potencialmente crítica, em médio prazo, de um forte desequilíbrio entre o crescimento acentuado da demanda e a limitação de oferta de capacidade viária. Esta análise também foi realizada de forma espacialmente desagregada (Oliveira, 2004), representando em um mapa temático a evolução anual dos fluxos nos trechos de cada corredor da rede analisada, de modo a permitir um diagnóstico mais relacionado ao uso do solo na área de influência do corredor.

Nesse contexto, a necessidade por ações visando garantir um nível satisfatório mínimo de mobilidade é imperativa e urgente. Diversas alternativas podem ser postuladas, incluindo desde soluções operacionais paliativas como a implementação de estratégias de gerenciamento da oferta viária operacional (ex. evolução e expansão da tecnologia semafórica, sistemas de informação ao usuário), bem como um planejamento estratégico sustentável com políticas de incentivo e investimento no transporte público coletivo.

4.1.2 Variação Mensal

Nesta etapa buscou-se avaliar, inicialmente de forma descritiva, a distribuição mensal do carregamento da rede ao longo do ano. Esta avaliação visa a estabelecer bases para a formulação de hipóteses sobre o comportamento típico mensal do volume de tráfego, tendo em vista a análise individual das vias selecionadas neste estudo de caso. Dessa forma, considerando que o período de análise compreendeu os 12 meses do ano de 2003, em virtude da disponibilidade integral deste no banco de dados do sistema, a Figura 4 apresenta a distribuição mensal do momento de tráfego total na rede, considerando separadamente a agregação de todos os dias da semana e os dias úteis. Ao examinar o referido perfil mensal, verifica-se que a época de início, meio e fim de ano é, como já de percepção geral, um período de comportamento atípico de tráfego em virtude das férias escolares e de trabalho. Em Fortaleza, porém, estes meses atípicos recebem também a influência da alta estação turística fazendo aumentar significativamente os fluxos em alguns corredores da cidade.

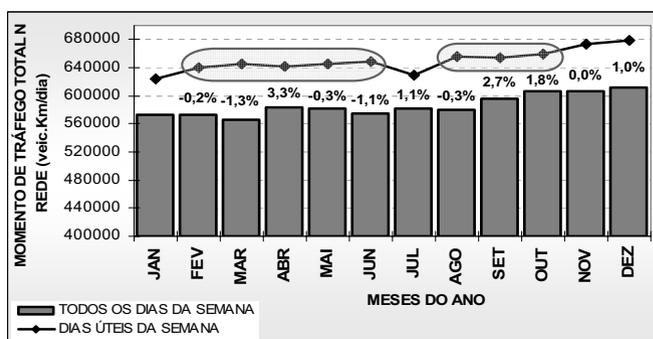


Figura 4: Distribuição mensal da evolução do momento de tráfego total.

Após a análise da variação global dos fluxos da rede viária arterial em estudo, o roteiro metodológico proposto define como necessária nesta etapa a análise dos aspectos espaciais do VMD de dias úteis, de forma que proporcione uma avaliação espacialmente representativa dos segmentos que compõem cada via. Dessa forma, considerando inicialmente a premissa a ser verificada de que o perfil mensal de variação dos VMDs não é influenciado espacialmente

pela posição do *link* ao longo da via, foram realizadas análises exploratórias do comportamento mensal dos volumes diários, por *link*, em cada via que compõe a amostra desta pesquisa. A Figura 5(a) apresenta, como exemplo, os resultados dessa avaliação em uma das 27 análises realizadas, por sentido, no conjunto das 16 vias selecionadas.

Em relação ao outro aspecto espacial, esta avaliação destinou-se também a verificar a distribuição espacial do VMD, por *link*, ao longo da via para a identificação de trechos homogêneos. Assim, enquanto que a avaliação anterior se propôs a avaliar a homogeneidade espacial em relação à variação temporal do VMD, é também pertinente e complementar a análise quanto à homogeneidade espacial da magnitude do volume diário médio. Nesse sentido, foram gerados perfis espaciais do VMD de dias úteis para todas as vias em estudo. A Figura 5(b) ilustra, como exemplo, a seleção dos trechos homogêneos com base nos perfis espaciais de uma via arterial da amostra deste estudo de caso.

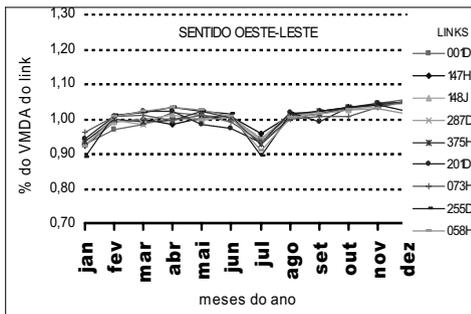


Figura 5(a): Perfis de variação mensal relativa do VMD por *link*

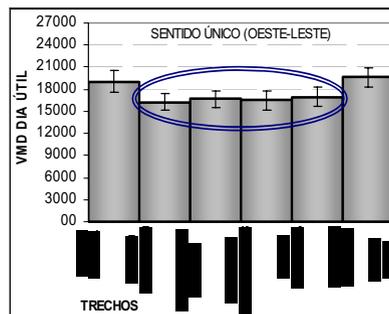


Figura 5(b): Perfis de variação espacial do VMD de dias úteis.

Analisando o perfil da Figura 5(a), verifica-se neste exemplo que a premissa previamente formulada pode ser validada, ou seja, a disposição espacial dos *links* ao longo da via parece não afetar o perfil médio de variação mensal dos volumes diários. Ademais, a avaliação geral do conjunto de vias permitiu concluir sobre a homogeneidade espacial da variação mensal do VMD, o que possibilita generalizar que o padrão mensal de variação do volume diário, identificado em pequenos trechos, seja considerado representativo do comportamento médio da via.

Relativamente ao perfil da Figura 5(b), verifica-se um maior nível de homogeneidade espacial do volume no trecho avaliado, o que sugere ser uma via com tráfego de passagem predominante. Ou seja, a disposição espacial da magnitude do VMD entre os segmentos viários representa o nível de capilaridade e ramificação do fluxo de tráfego ao longo da via, caracterizando-a pela intensidade de alimentação ou fuga de volume de tráfego pelas vias transversais. Os demais perfis espaciais avaliados apresentam diferentes padrões de distribuição do carregamento ao longo da via, tendo em vista as diversas características funcionais e de uso do solo, intrínsecas a uma rede viária urbana.

Na seqüência, tendo analisado os aspectos espaciais relevantes de variação do volume, e após a avaliação preliminar sobre o comportamento da distribuição mensal do tráfego na rede, esta

etapa é concluída com a aplicação das técnicas estatísticas de análise de variância nos VMDs mensais de cada via. Ao analisar a significância da variação mensal do volume, para o conjunto de vias selecionadas, os resultados apresentaram diferentes padrões de variação. A Figura 6 ilustra o exemplo de dois perfis de vias com características distintas.

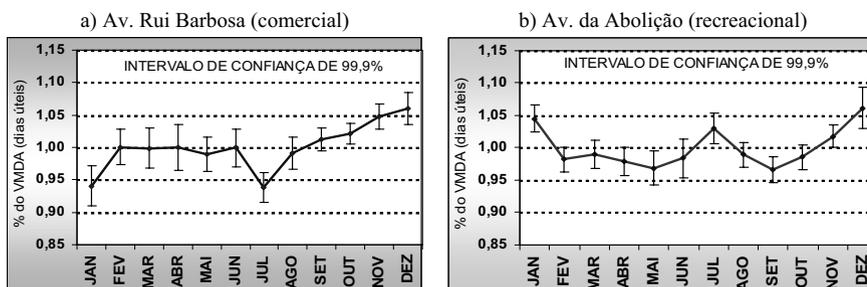


Figura 6: Perfis mensais relativos e nível de confiança da variabilidade do VMD de dias úteis

4.1.3. Variação diária

A análise dos padrões temporais e espaciais de variação do VMD ao longo dos dias da semana é essencialmente análoga ao implementado na análise das variações mensais. Ou seja, o processo de aplicação das atividades desta etapa da metodologia inicia com a avaliação descritiva do comportamento global da rede no tocante à distribuição do momento de tráfego total de meses típicos ao longo dos dias da semana. Em seguida, foi analisada a significância da variação dos VMDs de meses típicos entre os dias da semana para todas as vias. Contudo, convém esclarecer que, devido aos VMD de finais de semana serem expressivamente menores e com altos índices de variabilidade, considerou-se nos teste de significância apenas o VMD referente aos dias úteis, tendo em vista a identificação de padrões típicos do tráfego. A Figura 7 apresenta o perfil global de variação da rede, bem como um exemplo do comportamento diário médio de uma via, com os respectivos intervalos de confiança para cada dia útil.

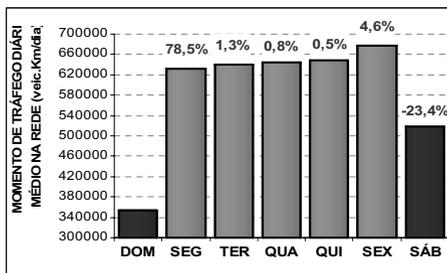


Figura 7(a): Distribuição diária do momento de tráfego total do conjunto amostral de vias ao longo da semana.

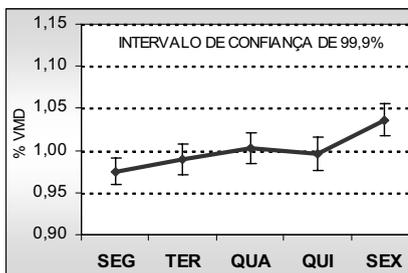


Figura 7(b): Perfil diário relativo de uma via e intervalos de confiança da variabilidade do VMD.

Como usualmente suspeito em áreas urbanas, constatou-se que o VMD em dias de fim de semana é expressivamente mais baixo que em dias úteis, porém com coeficiente de variação significativamente mais elevado. Além disso, avaliando os resultados da ANOVA, verifica-se que a grande maioria das vias apresenta um padrão caracterizado pela sexta-feira com um VMD significativamente superior em relação aos demais dias úteis da semana.

4.2. Avaliação espaço-temporal do fluxo horário médio

Como parte do processo metodológico de análise da variação horária e sub-horária, esta seção apresenta um método de avaliação espaço-temporal do fluxo de tráfego, de modo que permita identificar, de forma clara e sistemática, a distribuição horária do carregamento veicular ao longo do corredor viário direcional. Nesse sentido, são apresentados os resultados da aplicação do método de análise das superfícies de representação das dimensões espaço-tempo do comportamento típico do fluxo de tráfego nas vias selecionadas neste estudo de caso. A Figura 8 apresenta exemplos do resultado desta aplicação em duas vias.

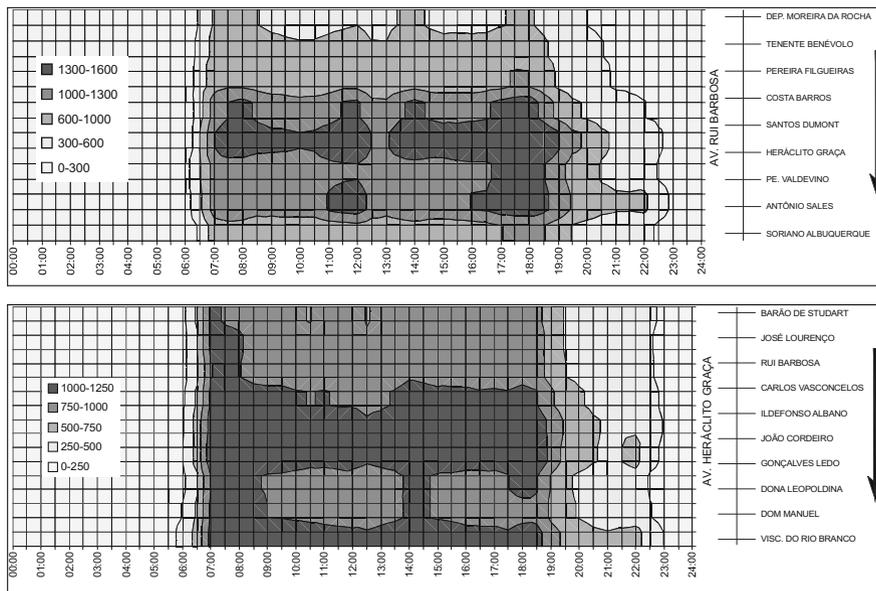


Figura 8: Exemplos de superfícies espaço-temporais de fluxo de tráfego horário.

Neste gráfico de superfície de fluxos horários, o eixo 'x' representa o período horário do dia, enquanto o eixo 'y' representa as vias transversais ordenadas espacialmente e no sentido do fluxo de tráfego. Considerando que as estações dos laços detectores estão posicionadas entre estas vias, cada célula formada pela combinação dos pares (x,y) representa a magnitude do fluxo de tráfego horário. Os níveis de fluxo são apresentados em uma escala de cinco categorias de magnitude, em cores distintas. Dessa forma, as isócronas de fluxo são então geradas pela interpolação dos valores médios de fluxo em cada par cartesiano.

Ainda, convém esclarecer que, mantendo a coerência do processo metodológico de análise proposto, esta etapa também se destina à investigação e identificação de condições típicas de comportamento espaço-temporal do fluxo de tráfego. Portanto, analogamente as demais etapas anteriores, os dados usados na geração destas superfícies de fluxo referem-se aos meses e dias de semana típicos identificados previamente.

A avaliação da natureza espaço-temporal do fluxo de tráfego da amostra de vias deste estudo de caso consiste na geração e interpretação das referidas superfícies, ou isócronas de fluxo. Dessa forma, é possível a identificação de padrões relacionados ao efeito simultâneo do espaço e do tempo, e assim colaborar, por exemplo, na definição de melhores estratégias de operação e controle do tráfego. A representação gráfica da distribuição do fluxo de tráfego apresentada nestes gráficos possibilita identificar segmentos potencialmente críticos ao longo da via e do dia. A primeira superfície da Figura 8 (Av. Rui Barbosa), por exemplo, sugere que o trecho compreendido entre as vias Costa Barros e Heráclito Graça necessita de uma atenção operacional específica (ex., ajuste da operação semafórica, alocação do efetivo de fiscalização e operação). Relativamente ao gerenciamento e operação semafórica, acredita-se que este método de avaliação resulte numa contribuição mais efetiva no sentido de auxiliar nas definições tanto da melhor estratégia de controle ao longo da via, quanto como uma das indicações para a delimitação de subáreas de operação e coordenação semafórica de sistemas centralizados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esforços no sentido de uma compreensão mais profunda sobre a natureza dos volumes veiculares em ambientes urbanos foram empreendidos neste trabalho, com fins a investigar suas formas de distribuição espaço-temporal, identificando e avaliando os padrões de variação do volume de tráfego sob diferentes aspectos. Contudo, com relação às conclusões baseadas nas análises conduzidas neste estudo, convém ressaltar inicialmente que este trabalho consistiu em um esforço exploratório e investigativo, e até de caráter confirmatório, sobre algumas das diversas hipóteses que podem ser levantadas do amplo conjunto de causas e efeitos inerentes ao comportamento do volume de tráfego em ambiente urbano.

Com relação à modelagem do comportamento do fluxo de tráfego, esta foi possível com a aplicação de técnicas estatísticas de análise dos dados. No entanto, essa atividade é afetada por imprecisões e erros inerentes a qualquer processo que tenta representar uma realidade típica. Ou seja, embora a prática usual consista na determinação de parâmetros médios para as variáveis de tráfego durante períodos de agregação específicos, observou-se a importância de calcular medidas de dispersão para avaliar a variabilidade das medidas de tendência central nos dados de tráfego, especialmente do volume. Nesse sentido, enquanto são identificadas as medidas que representam condições médias da demanda do tráfego, como o VMD, foi necessário atentar para inferências simples que apresentam a dispersão da medida resultante, como o intervalo de confiança, de modo a adquirir uma evidência da confiabilidade e precisão desses valores médios.

Dessa forma, a variabilidade nos fluxos em vias de redes urbanas foi analisada e algumas causas foram identificadas e quantificadas. A análise dos perfis temporais e espaciais do volume de tráfego permitiu, então, traçar um quadro geral da natureza dos padrões de variação do carregamento viário nesta amostra de vias arteriais. O estudo não só demonstrou que a variabilidade espaço-temporal contribui significativamente nas medidas de fluxo de

tráfego médio, mas também que as dimensões espacial e temporal são fundamentais e complementares para a compreensão da dinâmica do fluxo de tráfego. A abordagem proposta sugere que as análises das superfícies espaço-temporais do fluxo de tráfego, como descritas na metodologia deste trabalho, podem ser uma ferramenta útil de avaliação para habilitar os analistas de tráfego a entender e descrever, de forma abrangente e sistêmica, o comportamento do fluxo de tráfego em sistemas viários urbanos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Autarquia Municipal de Trânsito, Cidadania e Serviços Públicos de Fortaleza (AMC) pela cessão dos dados e cooperação em todas as etapas do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fox, K. e S. D. Clark (1998) *Evaluating the Benefits of a Responsive UTC System Using Micro-Simulation*. 30th Annual Conference of the Universities Transport Studies Group, Dublin.
- Ivan, J. N.; W. M. Eldessouki; M. Zhao e F. Guo (1999) *Estimating Link Traffic Volumes by Month, Day of Week and Time of Day*. Report JHR 02-287, Connecticut Department of Transportation. University of Connecticut, EUA.
- Loureiro, C.F.G.; C.H.P. Leandro e M.V.T. Oliveira (2002) Sistema Centralizado de Controle do Tráfego de Fortaleza: ITS Aplicado à Gestão Dinâmica do Trânsito Urbano. *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal, Comunicações Técnicas, p. 19-26.
- Oliveira, M.V.T. (2004) *A Natureza dos Padrões de Variação Espaço-Temporal do Volume Veicular em Ambiente Urbano: Estudo de Caso em Fortaleza*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
- McShane, W. R. e K. W. Crowley (1976) *Regularity of Some Detector-observed Arterial Traffic Volume Characteristics*. Transportation Research Board, TRR, Washington, D.C., EUA.
- Milton, J. S. e J. C. Arnold (1990) *Introduction to Probability and Statistic: Principles and Applications for Engineering and the Computing Sciences*. (2a. ed.) McGraw Hill, New York, EUA.
- Reis, A. K. O. (2001) *Análise do Efeito da Variação do Volume de Tráfego sobre o Desempenho de Planos Semafóricos de Tempo Fixo: Estudo de Caso em São Paulo*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, DF.
- Ribeiro, P. C. M. (1991) *Influence of Flow Variation on Fixed-Time Signal Control*. Ph.D. Dissertation. University College London, UK.
- SPSS (2001) *Applications Guide*. SPSS Version 11.0. SPSS Inc. Chicago, EUA.
- Stathopoulos, A. e M. Karlaftis (2001) *Temporal and Spatial Variations of Real-Time Traffic Data in Urban Areas*. Transportation Research Board, 80th Annual Meeting, Washington, D.C., EUA.
- Turner, S. M. (2001) *Guidelines for Developing ITS Data Archiving Systems*. Report 2127-3, Texas Department of Transportation in Cooperation with the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Texas, EUA.
- Wright, T.; P. HU; J. Young e A. Lu (1997) *Variability in Traffic Monitoring Data*. Final Summary Report, Oak Ridge National Laboratory for the US Department of Energy, University of Tennessee-Knoxville, Tennessee, EUA.

Universidade Federal do Ceará
Departamento de Engenharia de Transportes
Campus do Pici – Centro de Tecnologia – Bloco 703
60.455-760 – Fortaleza, CE – Fone/Fax: (85) 3366-9488

E-mail: marcus.vinicius@amc.fortaleza.ce.gov.br
felipe@det.ufc.br