

ESTIMATIVA DE UMA MATRIZ O-D SINTÉTICA PARA A REGIÃO CENTRAL DE MARINGÁ UTILIZANDO O QUEENSOD

Sergio Henrique Demarchi

Bruno Vieira Bertoncini

Ed Pinheiro Lima

Universidade Estadual de Maringá
Departamento de Engenharia Civil
Grupo de Engenharia de Transportes

RESUMO

Neste trabalho, uma matriz O-D é estimada sinteticamente a partir de contagens volumétricas para a rede viária da região central de Maringá, utilizando o aplicativo QUEENSOD. Após ter sido investigado como os parâmetros e opções do programa influem no cálculo do erro volumétrico obtido, foi constatada a necessidade de utilização de uma matriz semente para que não fossem estimadas viagens entre pares O-D não conectados por uma rota possível. Os melhores resultados foram obtidos quando se utilizou o critério do erro relativo para estimar as viagens e do erro quadrático para minimizar as diferenças volumétricas, e os resultados foram similares para o caso de uma ou duas rotas entre pares O-D. As conclusões obtidas são relevantes como subsídio àqueles que utilizam o QUEENSOD, e as viagens estimadas serão usadas na calibração do simulador INTEGRATION para a região central de Maringá.

ABSTRACT

The purpose of this research is to estimate a synthetic O-D matrix based on traffic counts for Maringá's CBD network. Trips were determined by means of QUEENSOD, after investigating the influence of its calibration parameters on the volumetric error. It could be noticed that it is always necessary to run QUEENSOD considering a seed O-D matrix, in order to avoid that trips are estimated for O-D pairs not connected by any feasible path. The best criteria for estimating O-D trips is to minimize the relative difference between estimated and observed trips and the quadratic difference between observed and estimated volumes. The results obtained when only one or two trees were considered for traffic assignment are similar. The conclusions are important as guidance for other QUEENSOD users. The O-D matrix will be used in calibration of the INTEGRATION simulator for Maringá's CBD.

1. INTRODUÇÃO

A determinação do número de viagens entre pontos ou regiões de uma cidade é fundamental em qualquer estudo de planejamento urbano e de transportes. Além disso, em virtude da disseminação do uso de simulação de tráfego nos últimos anos, a estimativa de matrizes O-D também é necessária para o processo de calibração de simuladores de tráfego, podendo inclusive ser considerada como uma etapa de calibração isolada, inserida dentro de um processo mais amplo de calibração do simulador (Rakha *et al.*, 1998).

O procedimento a ser utilizado para a estimativa do número de viagens de uma matriz O-D depende basicamente dos dados disponíveis (Van Aerde *et al.*, 2003), do custo para obter tais informações e principalmente do propósito de utilização da matriz. Em geral, a estimativa do número de viagens entre pares O-D diretamente a partir de coletas em campo ou a calibração de modelos sintéticos que relacionam o número de viagens a padrões de uso do solo requerem uma grande quantidade de recursos humanos e financeiros para o levantamento de dados. Além do mais, estes modelos não conseguem representar adequadamente as variações horárias da demanda (Paramahansan, 1999), o que é desejável para simular o impacto das condições de tráfego na rede viária, considerando o ponto de vista de análise operacional.

Portanto, os procedimentos mencionados não são os mais adequados para a calibração de si-

muladores de tráfego, pois em geral a estimativa da matriz O-D não é objetivo principal do processo, mas sim uma das etapas do processo de calibração e validação de simuladores, cujo propósito inicial (dentre outros) é fazer com que os volumes simulados sejam similares aos volumes observados no sistema real. Uma alternativa de menor custo, neste caso, consiste em estimar a matriz O-D a partir de contagens volumétricas, que podem ser obtidas com relativa facilidade em diversos pontos da rede viária através de filmagens, sensores fixos e portáteis, ou ainda através de processos manuais de contagem.

A principal dificuldade prática deste processo é que, para determinar as quantidades de viagens realizadas entre diferentes pares O-D, é necessário resolver um sistema de equações que relacionam volumes e viagens no qual o número de incógnitas é, em geral, maior que o número de restrições (ou volumes), o que produz um sistema que admite múltiplas soluções como resposta. Além disso, é comum que segmentos contíguos da rede não apresentem continuidade volumétrica, um das hipóteses básicas deste tipo de modelo (Van Aerde *et al.*, 2003).

Para contornar tais dificuldades, existem procedimentos descritos na literatura (Robbilar, 1975; Cascetta, 1984; Van Zuylen e Willumsem, 1980; Paramahansan, 1999) que buscam determinar a matriz O-D mais provável dentre as soluções possíveis e, ao mesmo tempo, minimizar uma medida do erro decorrente da falta de continuidade volumétrica. A complexidade prática inerente à solução do sistema de equações requer o uso de rotinas computacionais ou programas específicos, especialmente no caso de redes maiores. Um desses programas, chamado QUEENSOD, foi criado por Van Aerde (1998) visando estimar o número de viagens entre pares O-D, necessárias para a calibração do simulador de tráfego INTEGRATION (Rakha, 2002).

Assim como qualquer simulador de tráfego, o QUEENSOD possui uma série de parâmetros que podem ser modificados de forma a satisfazer critérios específicos de minimização de erros, ou ainda possibilitar a estimativa de viagens considerando o uso de múltiplas rotas. Portanto, é desejável definir quais são os valores dos parâmetros do QUEENSOD que produzem os resultados mais precisos, considerando a diferença entre volumes observados e estimados. Esta investigação tem como motivação principal a calibração do simulador INTEGRATION para a rede viária da região central de Maringá, no estado do Paraná (Bertoncini e Demarchi, 2002).

O objetivo deste trabalho é estimar uma matriz O-D sintética para a região central de Maringá a partir de contagens volumétricas realizadas pela Secretaria de Transportes do município – SETRAN – bem como investigar a influência dos parâmetros do QUEENSOD na precisão dos resultados obtidos. O trabalho está estruturado em 5 itens, incluindo esta introdução. No item 2 são apresentados os fundamentos relativos ao método de estimativa de matrizes O-D sintéticas a partir de contagens volumétricas, bem como detalhes sobre a estrutura básica dos arquivos de codificação do QUEENSOD. No item 3 é descrito o processo de codificação dos dados geométricos, de controle e obtenção dos volumes de tráfego a partir de contagens volumétricas realizadas pela SETRAN. No item 4 é feita uma análise da influência dos parâmetros de calibração do QUEENSOD na precisão dos resultados obtidos. No item 5 são apresentadas as conclusões obtidas e propostas algumas recomendações para futuras pesquisas sobre o assunto.

2. ESTIMATIVAS DE MATRIZES O-D SINTÉTICAS ATRAVÉS DO QUEENSOD

O QUEENSOD (Van Aerde, 1998) é um aplicativo criado para estimar matrizes O-D sintéticas a partir das contagens volumétricas em segmentos de vias e em interseções, além dos tempos de viagem na rede viária a ser simulada, o que é necessário para definir os possíveis caminhos

utilizados como rota de viagem. Para estimar sinteticamente uma matriz O-D, o QUEENSOD utiliza o procedimento descrito no item 2.1. A estrutura básica do programa e os arquivos necessários para sua calibração são apresentados no item 2.2.

2.1. Estimativa do Número de Viagens a Partir de Contagens Volumétricas

O número de viagens entre diferentes pares O-D são estimadas a partir de uma formulação matemática cujo desenvolvimento é descrito em detalhe por Paramahansan (1999) e Van Aerde *et al.* (2003) e Demarchi e Bertoncini (2004). Em linhas gerais, a formulação é derivada a partir da aplicação do conceito de maximização da entropia, visando estimar a matriz O-D mais provável e, ao mesmo tempo, minimizar uma medida do erro de continuidade volumétrica:

$$\sum_a p_{ij}^a \sum_{ij} p_{ij}^a w^a \lambda_{ij} = \ln Q - \ln S - \ln q_{ij} + \ln s_{ij}, \quad \forall i, j \quad (1)$$

sujeito a

$$\sum_a p_{ij}^a \sum_{ij} p_{ij}^a w^a q_{ij} = \sum_a p_{ij}^a w^a V_o^a, \quad \forall i, j \quad (2)$$

em que:

- p_{ij}^a : porcentagem das viagens q_{ij} que utilizam o arco a ;
- q_{ij} : quantidade de viagens entre o nó de origem i e o nó de destino j [veíc/h];
- s_{ij} : quantidade de viagens entre i e j fornecido em uma matriz semente [veíc/h];
- λ_{ij} : multiplicadores de Lagrange empregados na solução do problema;
- V_o^a : volume observado no arco a [veíc/h];
- Q : total de viagens estimadas

$$Q = \sum_{ij} q_{ij} \quad (3)$$

S : total de viagens da matriz semente

$$S = \sum_{ij} s_{ij} \quad (4)$$

w^a : critérios de ponderação do erro de continuidade, definidos a seguir.

As expressões (1) e (2) produzem um sistema de $2n$ equações para n pares O-D, que deve ser resolvido iterativamente, pois o conjunto de n equações expresso por (1) não são lineares. É interessante notar que, na formulação apresentada, considera-se sempre a existência de uma matriz O-D semente, obtida de estudos de planejamento, por exemplo. No caso em que essa matriz não é conhecida, o QUEENSOD gera automaticamente uma matriz semente em que todos seus elementos são idênticos.

As expressões (1) e (2) são usadas tanto para o caso em que cada par O-D usa uma única rota ou múltiplas rotas. Neste último caso, o QUEENSOD estima as viagens entre pares O-D considerando diferentes percentuais de viagens entre as rotas existentes e iterativamente determina quais são os valores mais adequados dos percentuais. O número de rotas deve ser definido pelo usuário do programa, mas os arcos que formam cada uma das rotas são selecionados automaticamente pelo QUEENSOD, exceto se as rotas também forem definidas pelo usuário.

O QUEENSOD também permite a consideração de três diferentes critérios para minimizar os

erros de continuidade volumétrica e os erros de estimativa das viagens em relação a matriz semente. Van Aerde (1998) considera os critérios de erro quadrático, Poissoniano ou relativo, para os quais o fator de ponderação w^a assume os valores 1, $1/\sqrt{V_o^a}$, ou $1/V_o^a$, respectivamente.

2.2. Estrutura Básica do QUEENSOD

O programa QUEENSOD é executado a partir da entrada de uma série de informações relativas às características geométricas, de tráfego e de controle da rede viária em questão. Os dados necessários devem ser codificados em arquivos em formato texto, sendo que 3 arquivos do QUEENSOD (nós, arcos e semáforos) possuem a mesma estrutura de codificação e são utilizados também pelo simulador INTEGRATION (Figura 1). Outros arquivos, tais como o arquivo de volumes observados, o arquivo da matriz O-D semente e o arquivo dos movimentos de conversão nas interseções são específicos ao ambiente de codificação do QUEENSOD, sendo que os dois últimos são opcionais. Os nomes dos arquivos mencionados, bem como os nomes dos diretórios em que estão os arquivos de dados e onde serão gravados os arquivos de resultados devem ser especificados em um arquivo mestre.

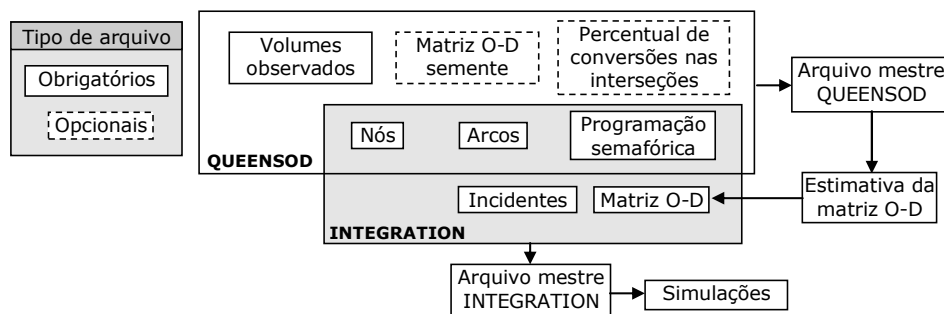


Figura 1: Arquivos utilizados pelo QUEENSOD e INTEGRATION

No item 3 é descrito o processo de codificação dos dados para a rede viária da região central de Maringá.

3. CODIFICAÇÃO DO QUEENSOD PARA A REGIÃO CENTRAL DE MARINGÁ

A malha viária da região central de Maringá é composta por várias avenidas de pista dupla e duas faixas de tráfego por sentido, dispostas em formato de grelha, como mostra a Figura 2. Nesta região, grande parte das interseções entre vias são semaforizadas, sendo que os semáforos são espaçados de uma distância aproximadamente igual a 100 m. Para codificar as informações geométricas, de tráfego e de controle em arquivos de dados dos programas INTEGRATION e QUEENSOD, foi adotado o procedimento descrito a seguir.

3.1. Codificação da Geometria Viária

A codificação dos arquivos de nós e de arcos foi realizada inicialmente como parte da calibração preliminar do simulador INTEGRATION (Bertoncini e Demarchi, 2002). A rede codificada é composta por 247 arcos e 107 nós, dos quais 35 são nós de origem e/ou destino de viagens e os outros 72 são intermediários, pelos quais só existe a passagem de veículos. No arquivo de nós são especificadas as coordenadas dos nós e seus tipos (origem, destino, intermediário). No arquivo de arcos são codificadas várias informações relativas ao comprimento dos arcos, o sentido de circulação, o número de faixas, a forma de controle de tráfego exercida na saída do

arco, a indicação de proibições de movimentos de conversão, além dos parâmetros da relação fluxo-velocidade que define o comportamento dos veículos na corrente de tráfego.

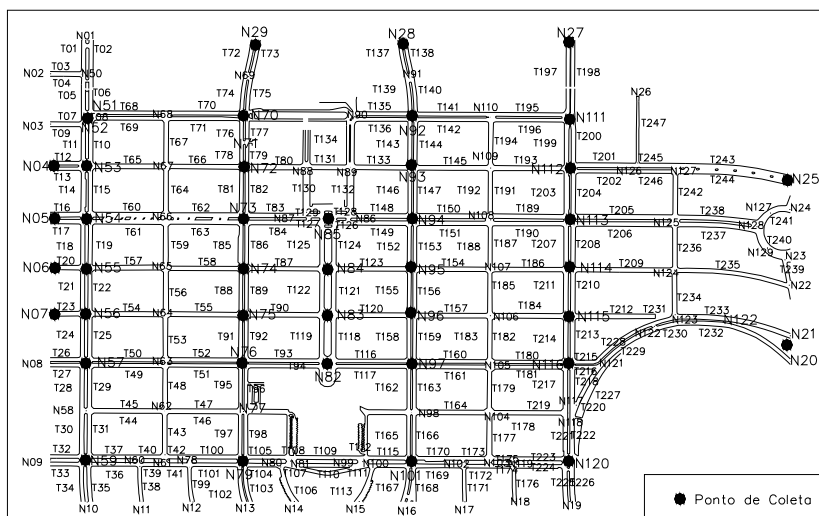


Figura 2: Região central de Maringá com a indicação dos locais de contagens volumétricas

As coordenadas geométricas dos nós foram obtidas a partir de um mapa da região digitalizado em AutoCad, fornecido pela SETRAN e tabuladas manualmente em uma planilha eletrônica, posteriormente convertida para formato texto. Uma macro foi elaborada para calcular os comprimentos dos arcos no segundo arquivo diretamente a partir das coordenadas, e as informações restantes neste arquivo foram digitadas manualmente.

3.2. Controle de Tráfego

Na região considerada existem 39 semáforos que foram codificados a partir de informações obtidas junto a SETRAN ou diretamente a partir de observações de campo. No arquivo de semáforos foram codificados o número de fases, o tempo de ciclo, a duração das fases e as defasagens. O tempo de ciclo considerado é de 70 s, utilizado em horários de pico.

3.3. Volumes de Tráfego

Os dados utilizados para a definição dos volumes observados nos arcos da rede foram coletados pela SETRAN em 50 interseções da região central de Maringá (Purpur, 1999). As coletas foram realizadas nos meses de maio a junho ano de 1999, totalizando 8876 horas de trabalho. Este levantamento consistiu em uma contagem volumétrica horária simples em cada interseção, considerando todos os possíveis movimentos que os veículos podem realizar num cruzamento (conversões à esquerda, à direita ou movimentos retos). As coletas foram realizadas no período de 6:00 às 22:00 h entre segundas e sextas e no período de 6:00 às 14:00 h aos sábados.

Nos 50 cruzamentos analisados, obteve-se uma total de 1.089.840 veículos observados durante o período de coleta, o que não implica que esta quantidade de veículos efetivamente tenha circulado no período, pois um mesmo veículo pode eventualmente ter sido contado mais de

uma vez em pontos distintos de coleta. Dos 50 pontos de coleta da pesquisa da SETRAN, foram considerados somente os 41 que estão inseridos na região estudada, conforme indicado na Figura 2. Em boa parte das interseções da rede foram realizados levantamentos, o que é relevante para que o processo de estimativa da matriz O-D seja feito com maior precisão.

Embora as contagens volumétricas tenham sido classificadas em três categorias distintas (automóveis, caminhões e ônibus), foi decidido considerar na análise somente as contagens referentes aos automóveis, por conveniência. Como os volumes foram coletados para diferentes horários do dia, e os volumes de pico não ocorrem necessariamente num mesmo período em todas as interseções, foi necessário somar os volumes horários de todos os movimentos em cada interseção e identificar os horários em que os picos eram observados em cada uma delas. Com essas informações, foi elaborado o histograma da Figura 3, que indica que em 19 das 41 interseções o volume máximo foi observado no período entre 13:00 e 14:00h. Dessa maneira, foi decidido utilizar os volumes de tráfego deste período para todas as interseções da rede.

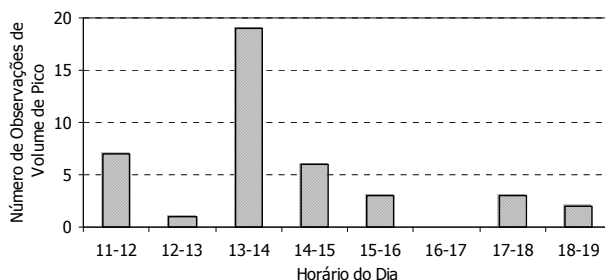


Figura 3: Número de interseções com volume de pico em função do horário do dia

Os volumes nos arcos foram determinados a partir dos cruzamentos e conversões observadas nas interseções. Inicialmente, os movimentos de cruzamento e de conversão que saem ou entram na interseção (Figura 4a) foram somados e atribuídos aos arcos a montante ou jusante da interseção considerada, conforme mostra a Figura 4b. Dessa forma, foram determinados dois valores de volumes, ou seja, de entrada e saída de cada arco.

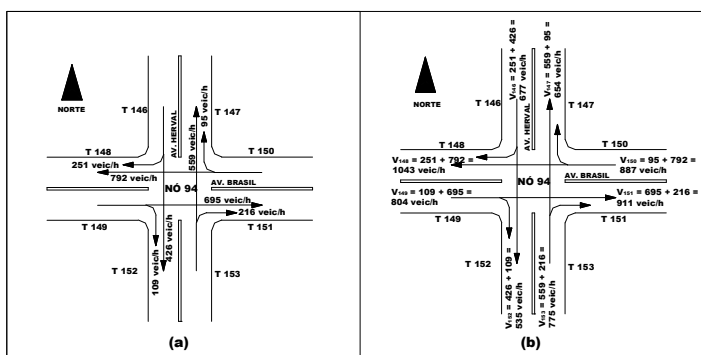


Figura 4: Determinação do volume nos arcos a partir dos movimentos em uma interseção

No entanto, este procedimento foi descartado, pois como eram obtidos dois valores de volume por arco, seria necessário utilizar a média dos volumes de entrada e saída, o que representaria

uma manipulação nos valores originalmente observados. Além disso, os percentuais de conversão que podem ser codificados no QUEENSOD referem-se somente ao volume que sai do arco. Assim, a soma dos cruzamentos e conversões foi feita de tal forma que as somas obtidas fossem atribuídas somente ao arco localizado a montante de cada interseção (arcos 146, 152, 153 e 150 na Figura 4). Este processo foi realizado para todos os arcos da rede, com exceção daqueles em que não houve coleta de dados no nó inicial. Para estes arcos, foi atribuído o valor -1 , o que é interpretado pelo QUEENSOD como um volume não coletado

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO QUEENSOD

Após a codificação dos arquivos de dados, foram realizados testes para verificar como algumas opções de codificação do QUEENSOD influenciam na precisão dos volumes estimados para os arcos. Foram investigados os impactos dos seguintes fatores nos resultados obtidos:

1. número de iterações;
2. utilização ou não de matriz O-D semente;
3. adoção de diferentes critérios para minimização do erro volumétrico e do erro de estimativa das viagens;
4. consideração de uma ou duas rotas para a realização das viagens; e
5. consideração ou não dos movimentos de conversão na saída dos arcos.

4.1. Número de Iterações

Em todos os testes foi especificado que o número máximo de 1000 iterações permitido pelo QUEENSOD (versão média) deveria ser realizado, a não ser que a proporção entre o erro volumétrico e o volume médio dos arcos fosse menor que 1%. Considerando este critério adicional e uma única rota para cada par O-D, foi possível satisfazer o critério de parada entre 41 e 91 iterações, dependendo do critério de minimização de erro considerado.

4.2. Utilização de Matriz Semente

Inicialmente o QUEENSOD foi executado sem a consideração de uma matriz semente, dado que nenhuma pesquisa de origem-destino fora realizada para a região central de Maringá. Neste caso, o QUEENSOD gerou uma matriz semente contendo números de viagens iguais para cada um de seus elementos. Para 34 nós de origem e destino, o QUEENSOD gerou automaticamente viagens para 391 pares O-D, desconsiderando no entanto a existência ou não de rota entre eles. Isso ocorre porque, aparentemente, o QUEENSOD ignora as proibições de conversão codificadas, o que acaba por eliminar potenciais rotas caso tais proibições não existissem. Dessa forma, a tentativa de simular a rede com o INTEGRATION, utilizando a matriz O-D obtida, produziu vários erros fatais, causando o término prematuro da simulação.

A partir do relatório de erros que o INTEGRATION produziu, todos os pares O-D para os quais não existia uma rota foram identificados e eliminados da matriz O-D. Além disso, foi decidido eliminar também todos os pares O-D para os quais o QUEENSOD estimou menos que 10 viagens/h, visando a redução do tamanho da matriz a ser obtida. Dessa forma, o arquivo de dados contendo as viagens realizadas entre 286 pares O-D foi utilizado como matriz semente para uma nova rodada do QUEENSOD, o que resultou em viagens estimadas somente para os pares O-D especificados na matriz semente.

4.3. Critérios de Minimização dos Erros Volumétricos e das Viagens

Outro aspecto investigado foi a influência do critério de minimização do erro adotado para a

estimativa das diferenças entre volumes observados e estimados e diferenças entre células da matriz O-D semente e matriz O-D estimada. Existem 3 opções possíveis: 1 para erro quadrático, 2 para erro Poissoniano e 3 para erro relativo. Como essas opções valem tanto para a estimativa das viagens como para volumes, existem no total 9 combinações possíveis de critérios para o cálculo dos erros no QUEENSOD.

Assim, a matriz semente obtida anteriormente foi utilizada para estimar as viagens segundo as combinações de critérios mencionadas, considerando ainda uma única rota para cada par O-D e o arquivo contendo os movimentos de conversão nas interseções. A análise comparativa da combinação de critérios foi feita em função das seguintes medidas estatísticas:

1. Percentual dos erros relativos em cada arco a (er^a), calculados em função dos valores dos volumes observados (V_o^a) e estimados (V_e^a)

$$er^a = \frac{V_o^a - V_e^a}{V_o^a}, \quad (5)$$

que situam-se na faixa $-20\% \leq er^a \leq +20\%$;

2. Coeficiente de correlação r entre volumes observados e estimados e coeficiente β do modelo $V_e^a = \beta \cdot V_o^a$. Quanto mais próximos de 1 forem r e β , melhor o resultado obtido; e
3. Verificação da hipótese de igualdade das médias dos volumes observados e estimados ($V_o^a = V_e^a$), utilizando o teste t de Student, com um nível de 5% de significância.

Para esta análise, foram considerados somente os 173 arcos da rede para os quais o volume observado era conhecido. A Tabela 1 mostra os valores das estatísticas obtidas para cada uma das combinações de critérios. Percebe-se que a melhor combinação é a “31” que considera o critério quadrático para o erro volumétrico e o critério do erro relativo para viagens da matriz O-D semente e estimada. Para essa combinação, cerca de 83% dos erros volumétricos relativos estão contidos na faixa de -20% a + 20% (como pode ser constatado na Figura 5a), o coeficiente de correlação entre volumes observados e estimados é $r = 0,9256$ e $\beta = 0,9812$, ambos os valores muito próximos de 1.

Tabela 1: Comparação das medidas estatísticas para diversos critérios de minimização de erro

Critério		Distribuição de erros volumétricos na faixa $-20\% \leq er^a \leq 20\%$	Coeficiente de correlação (r)	β ($V_e^a = \beta \cdot V_o^a$)	Probabilidade $ t \leq t_{173; 0,05}$ ($t_{173; 0,05} = 1,97$)
Viagens	Volume				
1	1	82,7%	0,9147	0,9810	0,8495
1	2	82,7%	0,9113	0,9631	0,0987
1	3	83,2%	0,8919	0,9447	0,0020*
2	1	82,7%	0,9148	0,9812	0,8374
2	2	82,7%	0,9113	0,9634	0,1028
2	3	82,7%	0,8914	0,9459	0,0026*
3	1	83,2%	0,9153	0,9812	0,8381
3	2	83,2%	0,9115	0,9638	0,1087
3	3	82,1%	0,8917	0,9468	0,0032*

1: erro quadrático ($w^a = 1$)

2: erro Poissoniano ($w^a = \sqrt{V_o^a}$)

3: erro relativo ($w^a = \frac{1}{V_o^a}$)

* nos casos em que $P(t \leq 1,97) < 0,05$ houve a rejeição da hipótese de igualdade da média de volumes observados e estimados, para um nível de significância de 5%

O valor dos coeficientes de correlação, obtidos para as nove combinações de critérios, podem ser considerados como satisfatórios, considerando que as contagens volumétricas foram reali-

zadas manualmente, em poucos dias para cada interseção e em dias diferentes da semana, incluindo dias atípicos como o sábado. Para se ter um padrão de comparação, Rakha *et al.* (1998) obtiveram coeficientes de correlação variando entre 0,95 e 0,99 ao estimar uma matriz O-D para Salt Lake City, nos Estados Unidos. No entanto, as contagens volumétricas em alguns dos arcos desta rede foram coletados durante períodos relativamente longos de tempo, variando entre 2 a 8 anos.

A Figura 5a mostra que, apesar da distribuição dos erros volumétricos relativos concentrar-se em torno de 0%, existem 6 arcos cujos erros relativos são menores que -100%. Entretanto, nestes arcos a diferença volumétrica absoluta não é menor que -150 veíc/h e os volumes observados possuem magnitude baixa (entre 10 e 61 veíc/h). Na Figura 5b observa-se que o coeficiente β de regressão linear entre volumes observados e estimados é muito próximo de 1 e que, em geral, existe para todas as combinações de critérios de erro uma leve tendência de subestimação dos volumes. Essa tendência é um pouco mais acentuada nos casos em que foi adotado o critério de erro relativo volumétrico (3), o que é identificado em função dos menores valores de β (em torno de 0,94) e em função dos resultados do teste t, mostrados na Tabela 1: para estes três casos, a hipótese de igualdade entre as médias dos volumes observados e estimados foi rejeitada, considerando um nível de significância de 5%. Para as outras 6 combinações de critérios, não houve indícios suficientes para rejeitar a hipótese de igualdade das médias.

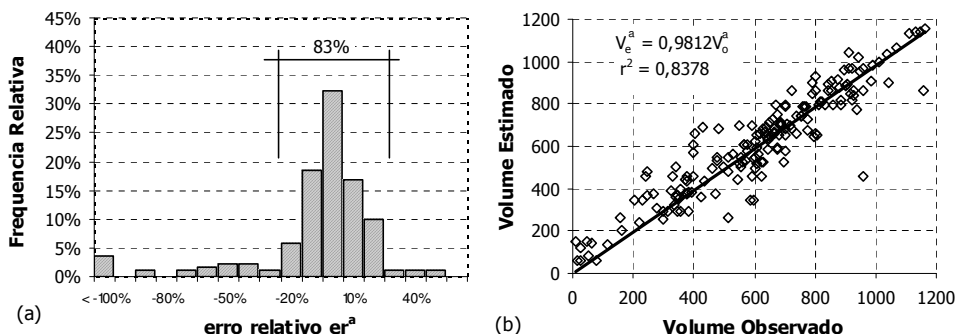


Figura 5: (a) Distribuição dos erros relativos entre volumes observados e estimados; (b) correlação entre volumes observados e estimados (critério “31”, uma única rota entre pares O-D e movimentos de conversão nas interseções)

4.4. Número de Rotas para Cada Par O-D

Rakha *et al.* (1998) mencionam que o valor do coeficiente de correlação entre volumes observados e estimados para diferentes períodos do dia na região metropolitana de Salt Lake City, nos Estados Unidos, aumentou em média 0,01 quando duas rotas para cada par O-D foram consideradas, em comparação ao uso de um único conjunto de rotas. Em função desse resultado, os autores deste trabalho recomendam que sempre sejam consideradas no mínimo duas rotas por par O-D de forma a replicar mais adequadamente os volumes observados.

O uso de dois conjuntos de rotas para a região central de Maringá fez com que o coeficiente de correlação passasse de 0,9153 (1 rota) para 0,9196 (2 rotas), indicando que o aumento no coeficiente de correlação no caso de Maringá corresponde a menos da metade do ganho obtido

em Salt Lake City. Além do mais, a soma das frequências dos erros volumétricos relativos entre -20% e +20% diminuiu de 83% para 81%, mas com uma distribuição um pouco maior de erros próximos a zero (Figura 6a). Neste caso, pode-se concluir que não foi observada uma diferença significativa em decorrência do uso de duas árvores de rotas entre os pares O-D.

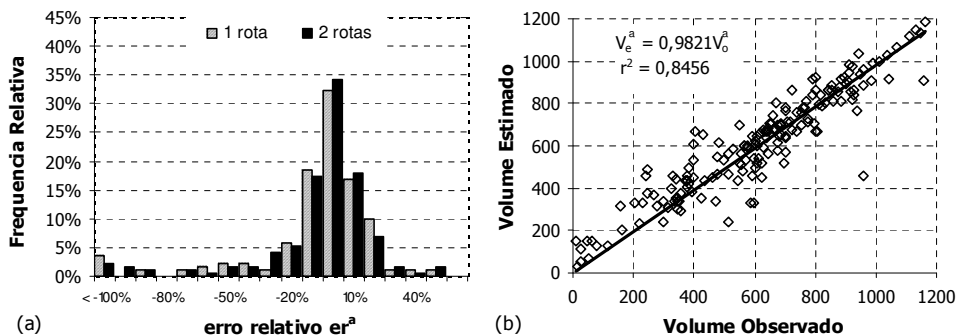


Figura 6: (a) Comparação das distribuições de erros volumétricos para o caso de uma ou duas rotas entre pares O-D; (b) correlação entre volumes observados e estimados (critério “31”, duas rotas para cada par O-D e movimentos de conversão nas interseções)

Outro detalhe observado é que o tempo de execução aumenta significativamente quando se considera mais de uma rota para cada par O-D. Para se ter uma idéia, enquanto são necessárias somente 41 iterações para minimizar o erro volumétrico para a rede considerando um único conjunto de rotas, para dois conjuntos foi necessário realizar 412 iterações, considerando que o QUEENSOD deve testar também diferentes combinações dos percentuais de viagens realizados por cada uma das rotas para definir os valores que melhor repliquem os volumes observados nos arcos. Dessa maneira, a questão da quantidade de rotas deve ser considerada como um fator relevante no caso em que se deseja estimar uma matriz O-D para uma rede relativamente grande em um computador com menor capacidade de processamento.

4.5. Consideração dos Movimentos de Conversão em Interseções

Outro fator investigado é como a precisão dos resultados é afetada em função da utilização ou não do arquivo contendo as porcentagens referentes aos movimentos de cruzamento e de conversão nas saídas dos arcos. Considerando uma única rota entre pares O-D, combinação de critérios “31” e desconsiderando o arquivo de conversões, 84% dos erros volumétricos concentram-se na faixa entre -20% e +20% do volume observado e 41% dos erros são próximos a 0% (Figura 7a). O coeficiente de correlação obtido para este caso é 0,9824.

De certa forma, é previsível que o coeficiente de correlação seja maior quando o arquivo de conversões não é utilizado, pois o número de restrições à solução do sistema de equações é menor neste caso. Embora as estatísticas sejam relativamente melhores para o caso em que as conversões são desconsideradas, o uso desta informação deve restringir o número de soluções possíveis, o que é mais interessante para a representação mais fiel do sistema real.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este artigo descreveu o processo de estimativa das quantidades de viagens de uma matriz O-D sintética a partir de contagens volumétricas realizadas nas interseções da rede viária da região

central de Maringá. Também foi investigado como os parâmetros de calibração do QUEENSOD influenciam na determinação das medidas estatísticas adotadas no processo de comparação dos volumes observados e estimados.

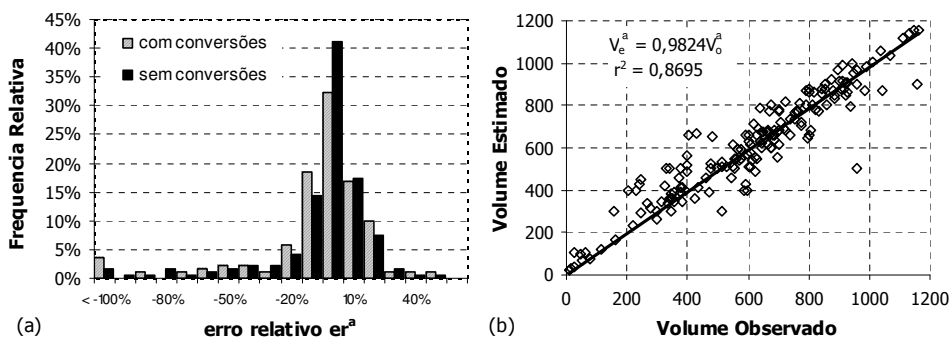


Figura 7: (a) Comparação das distribuições de erros volumétricos considerando ou não as conversões em interseções; (b) correlação entre volumes observados e estimados (critério “31”, uma única rota entre pares O-D e sem movimentos de conversão nas interseções).

Inicialmente foi observado que a matriz semente é indispensável para a estimativa da matriz O-D, mesmo que as quantidades de viagens da matriz semente sejam adotadas arbitrariamente, para evitar que o QUEENSOD estime viagens para todos os pares O-D, mesmo aqueles que não possuam uma rota ligando-os. Para situações similares ao caso de Maringá, em que a matriz semente não existe, recomenda-se rodar o QUEENSOD para obter uma matriz O-D preliminar, eliminar da matriz obtida as viagens entre pares O-D não ligados por uma rota possível e rodar novamente o programa para obter as viagens somente para os pares O-D desejados.

Foi constatado que a melhor opção para estimar demandas para Maringá é minimizar os erros relativos entre as viagens da matriz semente e as viagens estimadas, bem como minimizar as diferenças quadráticas entre volumes observados e estimados. Adotando tais critérios, foi observada uma melhor distribuição dos veículos pela rede durante as simulações realizadas no INTEGRATION. No entanto, a utilização de duas rotas para a alocação das viagens entre os pares O-D produziu resultados similares ao caso de uma única rota, demonstrando que, pelo menos neste caso, não seria necessário considerar mais do que uma rota entre os pares O-D.

Foi concluído ainda que o coeficiente de correlação entre volumes observados e estimados é menor no caso em que arquivo de conversões em interseções é utilizado, o que deve ser reflexo do maior número de restrições que devem ser consideradas durante a estimativa das viagens neste caso. Apesar disso, recomenda-se que o arquivo de conversões seja utilizado sempre que este for disponível, pois ele acrescenta informação ao processo de estimativa da matriz O-D.

Além disso, o uso do arquivo de conversões faz com que as filas nas interseções sejam, aparentemente, mais parecidas com as observadas no sistema real. É claro que esta conclusão baseia-se numa análise visual das simulações, pois não foi possível obter dados reais que permitam uma validação mais detalhada do simulador, o que extrapola o contexto deste trabalho. Além do mais, como não há dados de demanda reais ou uma matriz semente para a região,

não é possível validar a matriz O-D obtida. Seria desejável realizar uma pesquisa O-D para uma pequena região e estimar sinteticamente uma matriz O-D para ela, comparando os resultados.

De uma forma geral, os resultados obtidos podem ser considerados como satisfatórios, na medida em que permitem a conclusão de uma das etapas mais trabalhosas de calibração do simulador INTEGRATION para a região central de Maringá. Talvez muito mais importante que a finalização desta etapa do processo seja toda a experiência adquirida com o uso do QUEENSOD, resultando em uma série de conclusões que podem orientar futuros usuários do programa a respeito da melhor forma de se utilizar essa ferramenta e quais as principais dificuldades a serem encontradas durante o processo de obtenção de uma matriz O-D sintética a partir de contagens volumétricas.

Agradecimentos: Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq, pela concessão de bolsas de produtividade, de iniciação científica e de doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bertoncini, B. V.; Demarchi, S. H. (2002) "Calibração Preliminar do Simulador INTEGRATION para a Rede Viária da Região Central de Maringá". In: ENTECA 2003 – Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá, PR. *Anais*, v. 2, p. 486-496. Maringá, PR.
- Cascetta, E. (1984) "Estimation of Trip Matrices from Traffic Counts and Survey Data: a Generalized Least Squares Estimator". *Transportation Research*, v. 16B, n. 4-5, p. 289-299.
- Demarchi, S. H.; Bertoncini, B. V. (2004) "Determinação de Matrizes O-D Sintéticas a partir de Contagens Volumétricas". Artigo aceito para publicação nos anais do XVIII ANPET, Florianópolis, SC.
- Paramahamsan, H. (1999) *Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions*. Dissertação (Mestrado), Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. 133 p.
- Purpur, J. G. (1999) *Controle de Tráfego de Veículos em Maringá*. Secretaria de Transportes de Maringá, JGV – Consultoria e Assessoria Ltda., Maringá, PR.
- Rakha, H. Van Aerde, M.; Bloomberg, L.; Huang, X. (1998) "Construction and Calibration of a Large-Scale Microsimulation Model of the Salt Lake Area". *Transportation Research Record 1644*, p. 93-102.
- Rakha, H. (2002) *INTEGRATION Release 2.30 for Windows: User's Guide-Volumes 1 e 2*, Michel Van Aerde & Associates, Ltd, Blacksburg, VA.
- Robillard, P. (1975) "Estimating the O-D Matrix from Observed Link Volumes" *Transportation Research*, v. 9, p. 123-128.
- Van Aerde, M. (1998) *QUEENSOD – Release 2.10 – User's Guide: Estimating Origin Destination Traffic Demands from Link Flow Counts*. M. Van Aerde and Associates, EUA.
- Van Aerde, M.; Rakha, H.; Paramahamsan, H. (2003) "Estimation of O-D Matrices: the Relationship between Practical and Theoretical Considerations". *Transportation Research Record 1831*, p. 122-130.
- Van Zuylen, H. J.; Willumsen, L. G. (1980) "The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts". *Transportation Research*, v. 14B, p. 281-293.

Endereço dos autores:

Sergio Henrique Demarchi (shdm@terra.com.br)
Professor Adjunto, Depto. de Engenharia Civil,
Grupo de Engenharia de Transportes

Bruno Vieira Bertoncini (bruviber@irapida.com.br)
Aluno de iniciação científica, curso de Engenharia Civil

Ed Pinheiro Lima
Aluno de Doutorado, Programa de Engenharia Química

Universidade Estadual de Maringá – UEM
Av. Colombo, 5790 - Bloco C67
87020 - 900 – Maringá, PR, Brasil
fone: (044) 261-4322
fax: (044) 261-4322