

UMA PROPOSTA DE MODELAGEM DA MATRIZ OD SINTÉTICA A PARTIR DOS FLUXOS DE TRÁFEGO OBSERVADOS NAS INTERSEÇÕES

Bruno Vieira Bertoncini

Eiji Kawamoto

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Transportes

RESUMO

O objetivo deste trabalho é propor e verificar a hipótese de que a contagem de tráfego nas interseções da rede de transportes, ao invés de contagem de tráfego nos arcos, reduz o grau de indeterminação e torna mais precisa a matriz OD estimada pelo modelo sintético. Após detalhamento da proposta, foram realizados testes experimentais a fim de comprovar a hipótese formulada. TransCAD foi o software comercial usado na realização de testes. A principal conclusão foi que a matriz obtida ao considerar contagem de tráfego nas interseções apresenta melhor desempenho que a matriz obtida ao considerar contagens apenas nos arcos.

ABSTRACT

The aim of this work is to propose and verify the hypothesis that traffic counts collected at network intersections, instead of traffic counts collected on network links, reduce indeterminacy and make more accurate the OD matrix estimated by the synthetic model. After describing the method, experiments were carried out in order to verify the hypothesis. TransCAD was the commercial software used to perform the tests. The main conclusion was that the OD matrix estimation based on traffic counts collected at network intersections presents a better performance in contrast to the estimation based on traffic counts collected on network links.

1. INTRODUÇÃO

A modelagem da matriz origem-destino (OD) a partir das contagens de tráfego é uma alternativa ao método tradicional de modelagem da demanda, tem o intuito de reduzir custos de coleta de dados em entrevistas domiciliares e superar dificuldades inerentes à obtenção de uma matriz representativa do comportamento das viagens. Este problema pode ser interpretado como inverso das técnicas de alocação de tráfego, quando se busca reconstituir um conjunto de fluxos entre pares de zonas OD que, uma vez alocados na rede, reproduzam os volumes observados nos seus arcos. Todavia, Willumsen (1981) chama atenção para o fato de que os dados de fluxos observados em campo além de serem normalmente inconsistentes, apresentam também algum grau de dependência entre si, com algumas contagens se tornando redundantes, sem acrescentar informação para a obtenção da matriz OD sintética. Ademais, o principal desafio teórico para a solução do problema da reconstrução da matriz OD sintética em contextos reais diz respeito ao fato de o número de viagens OD ser normalmente bastante superior ao número de arcos com volumes conhecidos, tornando o sistema de equações sub-especificado, isto é, constituindo um problema indeterminado.

Em suma, na prática não é possível determinar apenas uma matriz OD somente com base em dados de contagem de tráfego nos arcos. Timms (2001) elenca os seguintes tipos de informação adicional normalmente utilizada na obtenção de matrizes sintéticas: a) matriz antiga; b) matrizes parciais obtidas, por exemplo, a partir de

pesquisas de placas; c) contagens diretas de fluxos entre pares OD; d) contagens dos totais de viagens entrando e saindo de cada zona; e) modelos que expliquem o comportamento da demanda, do tipo gravitacional, de escolha modal ou de demanda direta. Portanto, como definido por Cascetta e Nguyen (1988), o objetivo na formulação deve ser obter a matriz OD de viagens por meio da combinação eficiente dos dados de contagem de tráfego nos arcos e de toda e qualquer outra informação *a priori* disponível, ou ainda partindo de suposições sobre o comportamento dos usuários (modelagem). Mas a obtenção de informações adicionais geram custos, inerentes a coleta de dados, e o uso de matrizes semente constitui uma realidade distante para a grande maioria dos planejadores e municípios brasileiros. Reduzir a indeterminação do problema da modelagem sintética é um desafio e quando resolvido possibilitará a reconstrução de uma matriz OD com qualidade. A questão que se levanta é como contornar esse problema sem fazer uso de procedimentos de coleta de dados, que não sejam contagens de tráfego, ou uso de matrizes conhecidas *a priori*, difíceis de serem obtidas e que estão longe da realidade do planejamento.

Assim, o objetivo do trabalho é propor e verificar a hipótese de que contagem de tráfego nas interseções da rede de transportes, ao invés de contagem de tráfego nos arcos, reduz o grau de indeterminação e torna mais precisa a modelagem da matriz OD sintética. Como objetivos específicos e a correspondente organização no texto têm-se: (i) apresentar as considerações da literatura sobre uso de informação adicional na modelagem da matriz OD sintética (item 2); (ii) demonstrar matematicamente a ideia proposta pelo presente trabalho (item 3); (iii) verificar a possibilidade de a mesma ser utilizada por um modelo de reconstrução da matriz OD sintética que possua aplicação comercial (item 3 e 4); (iv) testar a proposta através de um experimento controlado (item 4); (v) verificar os efeitos causados pelo número de interseções com contagem (item 4); (vi) analisar a eficiência da proposta em função dos resultados obtidos (item 4); e (vii) obter conclusões e questões que motivem surgimento de novas pesquisas (item 5). A hipótese de partida é que, ao considerar os fluxos observados nas interseções, será possível aumentar a quantidade de informações, o que poderá reduzir a indeterminação e os erros, contribuindo para a obtenção da matriz OD sintética mais precisa, em comparação com a obtida considerando apenas contagens nos arcos.

2. INFORMAÇÃO ADICIONAL NA MODELAGEM DA MATRIZ OD SINTÉTICA

Van Zuylen (1978) foi o primeiro a reconhecer que apenas contagens de tráfego nos arcos não seriam suficientes para obter a matriz OD, que seria necessário inserir um mínimo de informação adicional. A saída, proposta por Van Zuylen, foi considerar a probabilidade de ocorrer uma viagem entre o par OD ij , informação essa que estaria acessível desde que se dispusesse de uma matriz semente, uma matriz de viagens previamente conhecida. Em 1980, Van Zuylen e Willumsen propuseram um modelo de reconstrução baseado na maximização da entropia e no uso da minimização da informação. Nielsen (1993), seguindo esta linha, incorporou no método um termo referente à expectativa da demanda, calculada a partir da informação contida em uma matriz OD semente e este modelo está implementado no TransCAD. Em 1999, Paramahamsan apresenta um comparativo entre modelagens que não consideram matriz semente, com as que consideram. De acordo com Paramahamsan, ao informar os valores prévios de uma viagem, o número de respostas possíveis capazes de satisfazer as restrições reduz, aumentando a probabilidade de a resposta obtida estar correta.

O uso de matriz OD conhecida a priori é notoriamente a principal fonte de informação adicional na modelagem sintética da matriz OD. No entanto, Van Zuylen e Willumsen (1980) utilizaram contagens de tráfego nas interseções como fonte de informação adicional para corrigir o problema da falta de continuidade volumétrica nos nós, ou seja, garantir a manutenção da lei de Kirchhoff, fluxos que entram em um nó, devem ser iguais aos que saem, desde que este nó seja apenas de passagem. Porém, na proposta de Van Zuylen e Willumsen os volumes contados na interseção não foram utilizados diretamente como fonte de informação adicional à reconstrução da matriz sintética, serviram para corrigir falhas nos dados de entrada.

Hellinga (1994) propôs estimar viagens levando em consideração a manutenção da conservação dos volumes nos nós, baseado na proposta de Van Zuylen e Willumsen. A diferença é que Hellinga utilizou os volumes contados nas interseções para reconstruir a matriz OD. Para tal, bastaria saber a quantidade de fluxo que entra em cada arco, bem como a porcentagem de conversão. Aplicando essa ideia a todas as interseções, seria possível determinar a matriz de viagens, com a vantagem de não utilizar técnicas de alocação para definir as rotas de viagem. De acordo com Hellinga, se a continuidade existir, existirá ao menos uma solução exata. Ainda assim, continua sendo um problema em que o número de incógnitas é superior ao de informações. O modelo de Hellinga foi desenvolvido e testado considerando uma via arterial, com poucas entradas e saídas. A aplicação do método seria inviável para redes de grande porte com formato de grelha.

Alibabai e Mahmassani (2008) propuseram um método para estimação da matriz OD dinâmica, baseado na alocação dinâmica do tráfego. O método consiste em um processo iterativo bi-nível (1º nível alocação e 2º reconstrução da matriz), cuja principal proposta seria minimizar a função objetivo ponderada entre a diferença quadrática do volume alocado e do volume observado, e a diferença entre matriz OD reconstruída e matriz OD semente. Para alocar o volume, o método leva em consideração a manutenção dos percentuais de conversão observados em campo. A crítica que se faz à proposta é que os pesos da função objetivo ponderada tem maior incidência na demanda, fazendo com que o aumento na diferença entre demandas favoreça o resultado. Somado a isso, a função objetivo não foi formulada de acordo com um conjunto de restrições, o que cria o problema de saber se a matriz reconstruída é, de fato, a esperada. Ademais, o método é condicionado ao conhecimento de uma matriz OD semente.

As propostas de Hellinga (1994) e Alibabai e Mahmassani (2008) não surtiram o efeito esperado. Via de regra, os volumes de conversão ainda não fazem parte diretamente do processo de reconstrução da matriz OD. Há ainda um paradigma de que volumes de conversão devem ser utilizados para corrigir os problemas da não continuidade volumétrica nas interseções, ou contribuir à escolha de rota, em que as proporções (taxas) de conversão em cada cruzamento são restrições a serem respeitadas no processo de alocação.

Acredita-se que a utilização de informações referentes ao movimento de conversão no processo de reconstrução da matriz OD poderá trazer benefícios, entretanto alguns paradigmas devem ser quebrados, a começar por não limitar o uso deste tipo de informação apenas para garantir continuidade volumétrica nas interseções, ou que o produto da alocação seja condizente com as taxas de conversão observadas em campo. É preciso ter uma proposta menos limitada e que incida diretamente no processo de reconstrução, como uma informação adicional ao problema.

3. CONSIDERAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CONVERSÃO NA MODELAGEM DA MATRIZ OD SINTÉTICA

Conceitualmente, a proposta apresentada neste artigo é que os volumes contados nas aproximações de uma interseção, de acordo com seus respectivos movimentos, façam parte do conjunto de restrições de um processo para reconstrução da matriz OD sintética, aumentando o número de informações e, consequentemente, reduzindo a indeterminação. Neste item é apresentada a descrição da proposta deste trabalho.

Considere $Rd(N,A)$ uma rede de transporte composta por um conjunto N de nós e um conjunto A de arcos orientados (com origem em n_o e final em n_f). Considere também que M_z representa o conjunto de movimentos permitidos em uma aproximação (z) [$M_z = (e_z, re_z, d_z)$ – esquerda, reto, direita]. Dependendo da configuração da interseção, é possível haver 2, 3, 4, 5, ou mais aproximações em uma mesma interseção (nó). Na Figura 1 é apresentada a configuração de interseção tipo cruz, na qual é possível observar a representação do arco orientado a , do nó final, de uma aproximação z , qualquer, e os respectivos movimentos possíveis em z (Figura 1(b)).

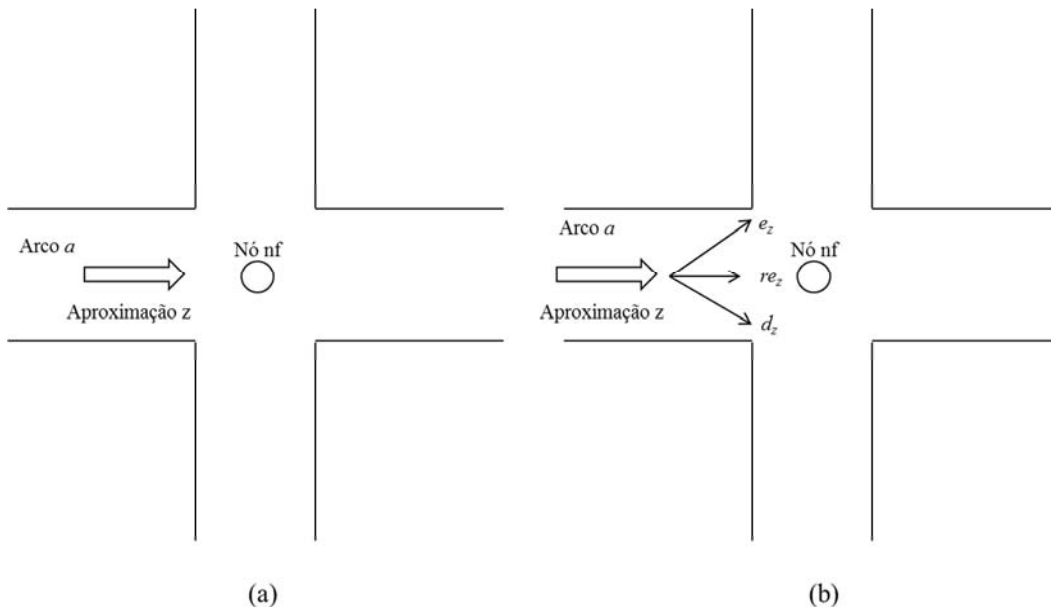


Figura 1: (a) Interseção tipo cruz; (b) Movimentos permitidos para aproximação z

Seja $N_c \subset N$ o conjunto contendo nós cujos fluxos foram observados e $V_n = (V_n^{M_1}, V_n^{M_2}, \dots, V_n^{M_z})$ o conjunto de fluxos observados no nó $n \in N_c$, conforme o movimento por aproximação (M_z) e $V = (V_n)$ o conjunto de todos os V_n .

Os fluxos observados contidos no conjunto V serão alocados a "arcos virtuais", criados exclusivamente para essa função. De acordo com Martin (1995), Glover et al (1977) propuseram o uso de nós e arcos artificiais para facilitar a obtenção de respostas da programação linear desenvolvida para estimar os fluxos de conversão em interseções: tal informação seria utilizada para controle de tráfego. Os nós e arcos artificiais servem para dar suporte a alguma função a ser desempenhada e não interferem no comportamento da rede; vale mencionar que para Glover et al (1977) a capacidade desses arcos seria infinita.

A ideia, no presente trabalho, ao fazer uso de "arcos virtuais" é possibilitar a inclusão das contagens nos nós em um programa, ou método, para reconstrução de

matriz de viagem que foi desenvolvido exclusivamente para contagens nos arcos. Portanto haverá um "arco virtual" para receber o fluxo de determinada aproximação, representando o movimento permitido e cuja contagem foi realizada.

Assim, $L = (av_1, av_2, \dots, av_n)$ é o conjunto de arcos virtuais que receberão os fluxos observados conforme movimento. Como recurso auxiliar, será criado o conjunto $Y = (I_1, I_2, \dots, I_n)$ de nós auxiliares que darão a direção de cada arco pertencente a L . Assim, um "arco virtual" com origem no nó auxiliar k e final no nó auxiliar m é definido como $av_n(I_k, I_m)$ mas um "arco virtual" também pode ter como origem um nó real e terminar em um "nó virtual", ou vice-versa.

Dessa forma, O representa o conjunto de todos os arcos da rede R (reais e virtuais), tal que $O \equiv (A; L)$.

Conhecidos os valores dos fluxos observados nos arcos (a) pertencentes ao conjunto O da rede e as rotas utilizadas para as viagens, é válido afirmar que a relação entre as demandas que utilizam um dado arco ($p_{ij}^a \cdot T_{ij}$) e o volume de tráfego observado neste arco (V_{obs}^a) é expressa pela Equação (1). Que é a restrição da grande maioria dos métodos de reconstrução da matriz OD sintética, tido como a chave do problema (Willumsen, 1981).

$$V_{obs}^a = \sum_{ij} p_{ij}^a \cdot T_{ij} \quad a \in O \quad (1)$$

Pode-se afirmar que o volume de tráfego que passa pelo arco $a \in A$, com nó inicial n_o e final $n_f (n_f \in N_c)$, é dado pela soma dos fluxos observados na aproximação z , que o arco a faz ao nó $n_f \in V$, conforme ilustrado na Figura 1 (a) e (b), matematicamente expresso pela Equação (2).

$$V_{obs}^{a(n_o, n_f)} = \sum_z V_{n_f}^{M_z} \quad (2)$$

Os fluxos T_{ij} podem ser recuperados pelo princípio da maximização da entropia, bastando obter a solução para o problema de maximização do tipo:

$$\text{Maximizar } \sum_{i,j} (-T_{ij} \cdot \ln T_{ij} + T_{ij}), \text{ sujeito a (1)} \quad (3)$$

O uso da maximização da entropia consiste apenas em uma sugestão para o método de otimização, qualquer modelo matemático proposto para recuperar a matriz OD sintética pode ser utilizado em conjunto com a ideia apresentada neste trabalho, desde que tenha (1), ou suas derivações, como restrição do problema.

Em suma, a ideia é aumentar o número de restrições (Equação (1)) devido ao aumento de informações provenientes das contagens. Teoricamente as vantagens da proposta são: (i) aumento na quantidade de informação de fluxo; (ii) possibilidade de ser utilizada por qualquer programa comercial de modelagem da matriz OD sintética.

4. VERIFICAÇÃO DA PROPOSTA

Por ser inócuo desenvolver um experimento amparado em uma situação real, que não permitiria inferir se possíveis erros são provenientes dos dados de entrada ou do método empregado, optou-se por verificar a proposta utilizando um experimento hipotético, o qual permite controle sobre os dados de entrada.

A rede hipotética é constituída de 9 nós (todos origem e destino) conectados entre si por 24 arcos orientados, conforme ilustrada na Figura 2 (a). Essa rede é carregada com uma matriz OD, denominada “real” (Figura 2 (b)), adotada sem nenhum critério específico e que possui dois objetivos: (i) fornecer as contagens de tráfego, equivalentes a uma contagem *in loco*, obtidas a partir da alocação da matriz “real” à rede, pelo método do equilíbrio do usuário; (ii) servir de referência na comparação dos resultados obtidos, permitindo assim mensurar os erros resultantes. Cada arco da presente rede tem associado uma função matemática para cálculo do tempo de viagem, único custo para utilização dos arcos, expressa conforme BPR (1964), com parâmetros $\alpha = 0,15$ e $\beta = 4$. O resultado da alocação é apontado ao lado dos respectivos arcos na Figura 2 (a) como V_{obs} , uma vez que o fluxo resultante da alocação em um arco será considerado o volume observado naquele arco para efeito de reconstrução da matriz OD.

O problema da modelagem da matriz OD sintética da rede hipotética apresentada na Figura 2 (a) possui, no mínimo, 72 incógnitas, caso apenas uma possibilidade de caminho entre cada par OD seja considerada, e, no máximo, 605 incógnitas, caso considere todas as possibilidades de caminho entre os pares OD. Por outro lado, é possível obter no máximo 24 informações de fluxo provenientes das contagens nos arcos. Como o número de incógnitas é maior que o de informações, não há garantias que a matriz obtida seja igual à original (matriz “real”). A expectativa é que ela se acerque da “real” à medida que se aumenta o número de informações adicionais. E é neste ponto que consiste esta verificação.

A modelagem da matriz origem-destino foi obtida utilizando o TransCAD (TCD) (Caliper, 2005), que tem implementado o método de Nielsen (1993), considerando técnica de alocação de equilíbrio do usuário. Este programa tem sua modelagem vinculada ao fornecimento de uma matriz OD semente, assim dois tipos de matriz OD semente foram utilizadas: (I) matriz semente binária: equivalente a situação em que não é fornecida matriz semente, ou seja, todas as viagens têm a mesma probabilidade de ocorrer. Neste caso, viagens intrazonais recebem valor 0 e as viagens interzonais recebem valor 1, lembrando que o modelo sintético parte do pressuposto de que não existem viagens intrazonais (Willumsen, 1981); e (II) matriz semente equivalente a 70% da matriz OD “real” (denominada S_{70}): situação idealizada e bastante favorável, em que a probabilidade de ocorrer uma viagem de i para j , dada pela matriz OD semente, é igual à da matriz “real”. A escolha do TCD deve-se a dois motivos: (i) Timms (2001) afirma que este programa apresenta bom desempenho na modelagem da matriz OD sintética; (ii) permite reconstruir a matriz OD a partir da informação das taxas de conversão ao final de cada arco, de forma a contribuir com a escolha da rota, fazendo com que esses percentuais sejam respeitados no processo de alocação e isso permitirá uma comparação com a ideia do presente trabalho. Assim quatro cenários foram simulados:

Cenário 1: representa a situação em que contagens são realizadas apenas nos arcos da rede viária. Representa a situação usual na modelagem da matriz OD sintética, em que as contagens de tráfego são obtidas apenas nas seções de via;

Cenário 2: ilustrado na Figura 3 (a), considera inserção de informação adicional, proveniente da contagem de tráfego nos nós. Neste caso a contagem de tráfego foi realizada no nó 5, que possui maior indeterminação (66% das viagens OD possuem rotas que contém este nó). Serão adicionadas 16 informações não redundantes provenientes da contagem nos nós e a rede passará a ter 40 informações não

redundantes, o que diminui o grau de indeterminação. Foram inseridos, de acordo com a proposta, 16 “arcos virtuais”, cuja impedância seria igual a 10^{-15} u.t. (unidades de tempo), para não interferir na escolha da rota, pois os mesmos não integram de fato a rede;

Cenário 3: Neste cenário as contagens ocorreram em todos os nós da rede viária e é representado na Figura 3 (b). É a situação em que pode ser obtida a maior quantidade de informação não redundante relativa a volume de tráfego, ao todo 64 informações;

Cenário 4: serão atribuídos a todos os arcos os percentuais de conversão, que serão utilizados pelo TCD no processo de alocação/escolha da rota, mostrando com isso as diferenças entre as abordagens.

4.1. Análise de sensibilidade da matriz OD sintética em relação a “real”

A análise de sensibilidade será descrita por cenário, ao final uma discussão, com a comparação entre os quatro cenários será apresentada.

▪ Cenário 1:

A Figura 4 apresenta os diagramas de dispersão entre viagens sintéticas e viagens “reais”. O total de viagens sintéticas obtidas pelo TransCAD resultou, ao fornecer matriz semente binária, em 25.818 viagens e ao fornecer matriz semente S_{70} o total de viagens geradas foi 23.177 (0,1% de viagens a mais que o total “real”).

Dentre as modelagens propostas para o Cenário 1, a obtida com matriz semente S_{70} foi menos dispersa, ainda assim um R^2 abaixo de 0,8, mesmo com matriz semente altamente representativa. Ao considerar uma matriz semente não representativa, os resultados do TransCAD foram fracos, uma alta dispersão pode ser observada. A diferença absoluta média, dada pela razão entre a somatória total das diferenças absolutas entre viagens sintética e “real”, e o número total de viagens “reais”, foi igual a 52% para os valores gerados com semente binária e 12% com semente S_{70} .

O desempenho apontado no Cenário 1 reflete a atual modelagem da matriz OD sintética, com resultados fracos mesmo em situações bastante favoráveis, como no caso de se conhecer uma matriz OD semente como S_{70} .

▪ Cenário 2:

Foram inseridas 16 informações adicionais de contagens de tráfego, o total de viagens sintéticas resultou, ao fornecer matriz semente binária, em 24.270 viagens e ao fornecer matriz semente S_{70} o total de viagens geradas foi 23.034. Em comparação com o Cenário 1, houve uma redução nos totais de viagens geradas, sendo que com semente binária os totais de viagens geradas se aproximaram do total “real”, porém a distribuição, apesar da melhora em comparação com Cenário 1, continuou ruim. A Figura 5 apresenta os diagramas de dispersão entre as viagens estimadas e as viagens “reais”.

Novamente a modelagem obtida pelo TransCAD com semente S_{70} apresentou menor dispersão, desta vez R^2 aumentou, sendo próximo de 0,9, consequentemente os resultados estão menos dispersos em comparação aos valores “reais” de viagem. Na situação de semente binária houve aumento do valor de R^2 , indicando que a incorporação das contagens nos nós trouxe benefícios aos resultados. Os aumentos

foram consideráveis, ainda que o valor bruto de R^2 continue baixo, mas o desempenho do TransCAD com matriz semente binária continua ruim, com diferença absoluta média foi igual a 37% para os valores gerados pelo TransCAD com semente binária e 10% com semente S70, corroborando com a análise da dispersão.

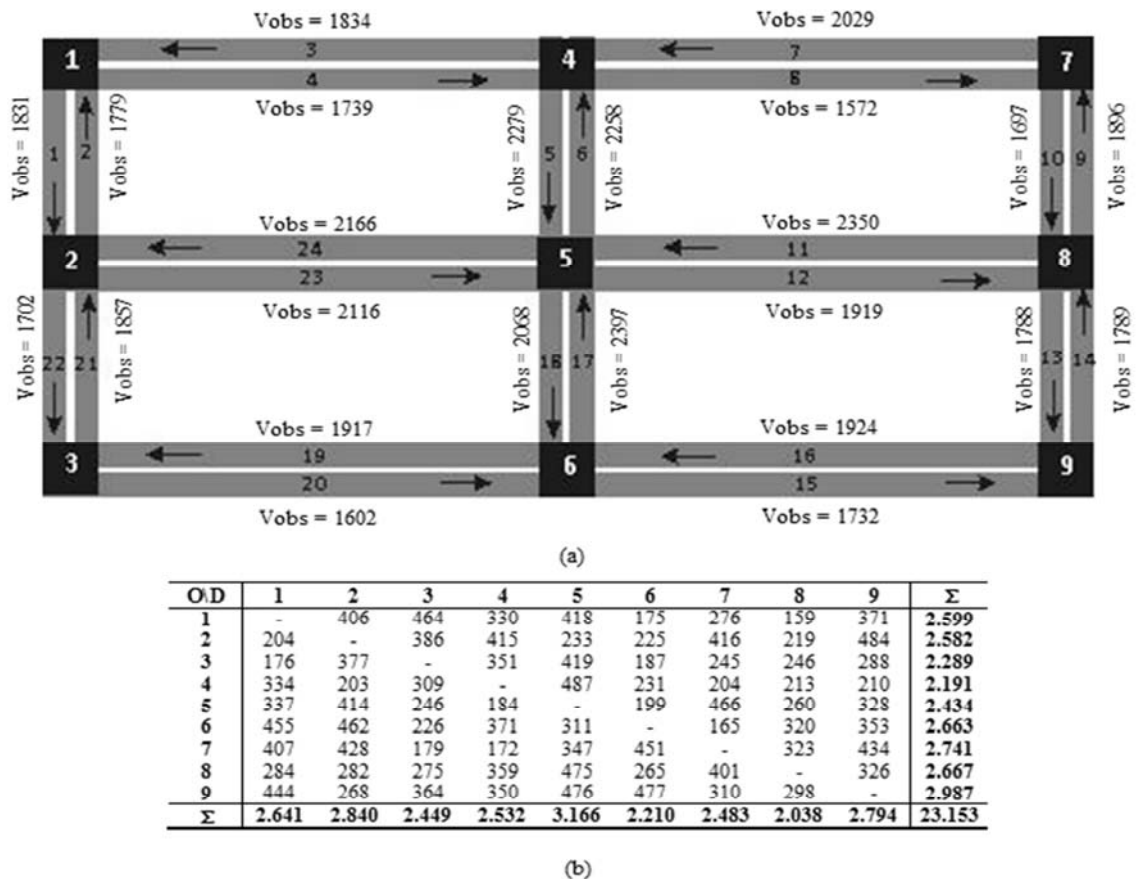


Figura 2: (a) Rede de transportes hipotética; (b) Matriz OD que demanda a rede

▪ Cenário 3:

Após inserir 40 informações adicionais de contagens de tráfego, máximo possível para esta rede, o total de viagens sintéticas resultou, ao fornecer matriz semente binária, em 22.225 viagens e ao fornecer matriz semente S70 o total de viagens geradas foi 23.390. A Figura 6 apresenta os diagramas de dispersão entre as viagens estimadas e as viagens “reais”.

O melhor desempenho, em termos de dispersão, continua sendo com semente S_{70} , desta vez R^2 foi 0,94. O desempenho com matriz semente binária continua fraco, mas o valor de R^2 aumentou, indicando diminuição do erro entre os valores sintéticos e os valores “reais”. A diferença absoluta média foi igual 17% para os valores gerados pelo TransCAD com semente binária e 7% com semente S_{70} .

À medida que aumentou o número de informações de tráfego, provenientes das contagens nas interseções, as matrizes OD sintéticas obtidas apresentaram melhorias em seus resultados. Vale ressaltar que o incremento no número de informações de volume de tráfego não implicou na realização de pesquisas complementares, como ocorreria se fosse utilizada matriz semente como informação adicional. A proposta

também não implicou desenvolvimento de um novo modelo de reconstrução, ou acréscimo no tempo para geração dos resultados. O único artifício utilizado, que possibilitou aplicar a proposta no TransCAD, foi criar “arcos virtuais” que receberiam os volumes contados em cada aproximação de acordo com o movimento de conversão. Pode-se dizer que mesmo sem matriz semente, a consideração das contagens nos nós trará benefícios ao processo de modelagem da matriz OD sintética, ainda que seja realizada contagem apenas na interseção com maior indeterminação.

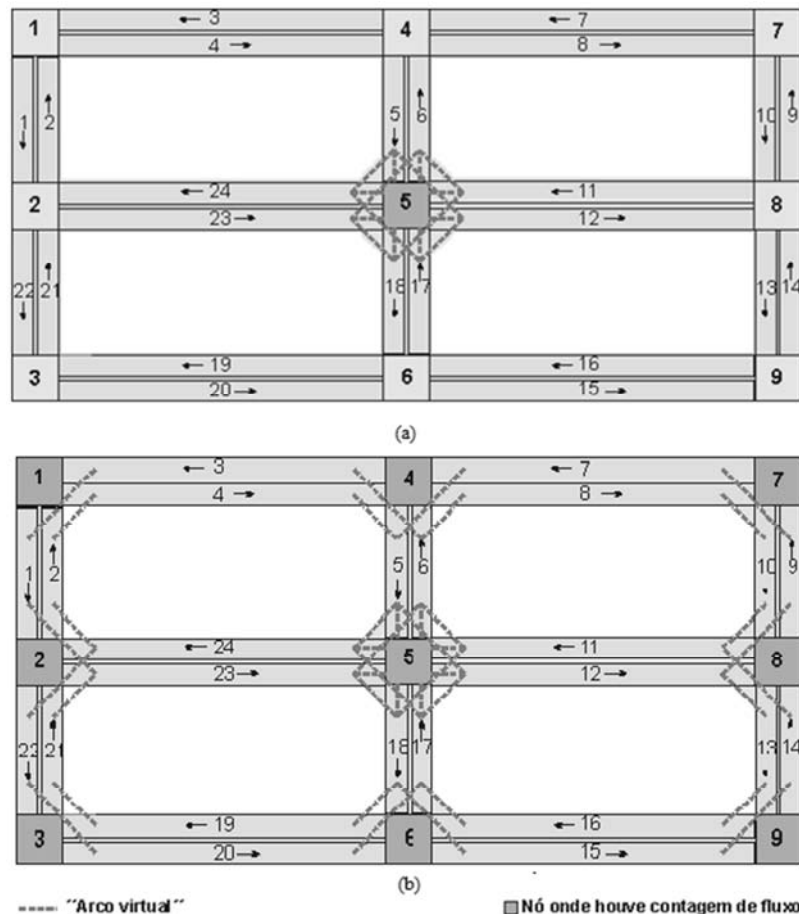


Figura 3: (a) Rede hipotética Cenário 1; (b) Rede hipotética Cenário 2

▪ Cenário 4:

O uso de informação das taxas de conversão em todas as interseções possibilitou a obtenção de resultados melhores que os apresentados quando considerou apenas contagens nos arcos (Cenário 1). Foram geradas 6,7% de viagens a mais que o total “real”, para uma matriz semente binária, e 0,79% de viagens a menos que o total “real”, com semente S70. A Figura 7 apresenta os diagramas de dispersão entre as viagens estimadas e as viagens “reais”.

O melhor desempenho, em termos de dispersão, continua sendo com semente S70, desta vez R2 foi 0,87. Ainda assim, o desempenho foi inferior ao obtido ao considerar as contagens em todas as interseções como integrantes do conjunto de restrição (Cenário 3), mostrando que a proposta deste artigo é mais eficiente que as considerações feitas, até então, a cerca dos movimentos de conversão na reconstrução da matriz OD sintética.

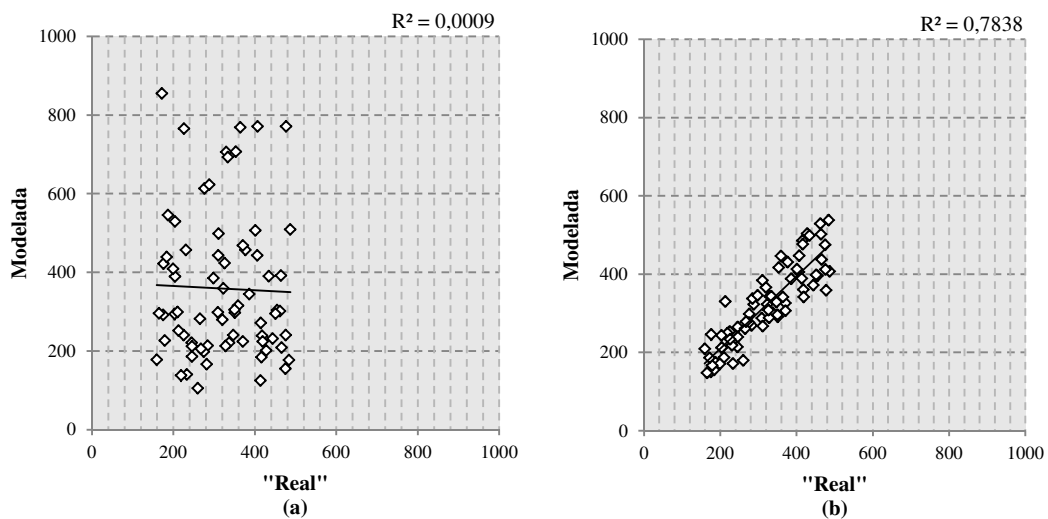


Figura 4: Diagrama de dispersão Cenário 1- (a) TransCAD semente binária; (b) TransCAD semente S_{70}

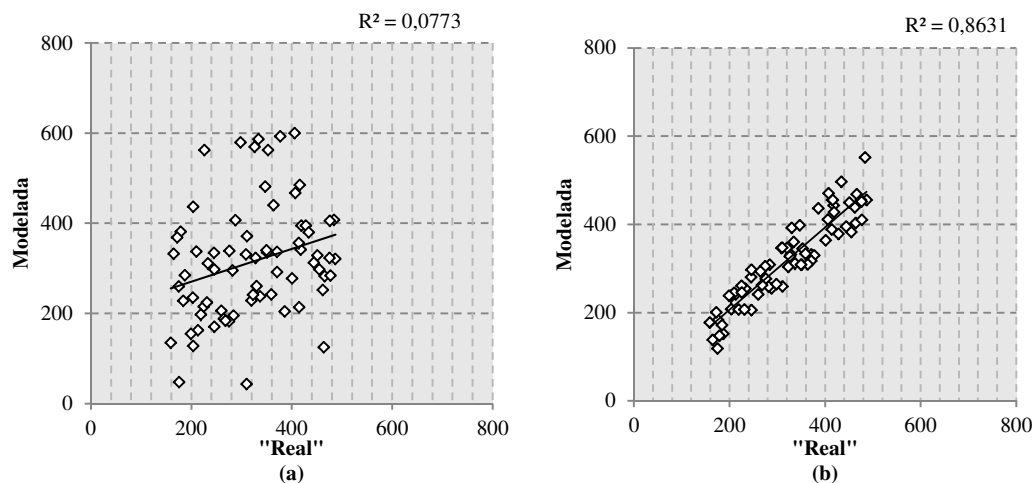


Figura 5: Diagrama de dispersão Cenário 2 - (a) TransCAD semente binária; (b) TransCAD semente S_{70}

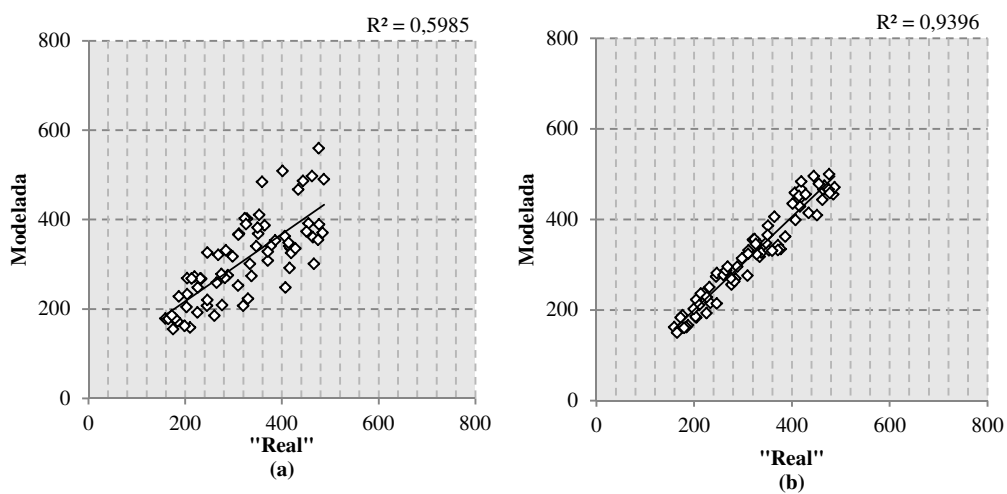


Figura 6: Diagrama de dispersão Cenário 3 - (a) TransCAD semente binária; (b) TransCAD semente S_{70}

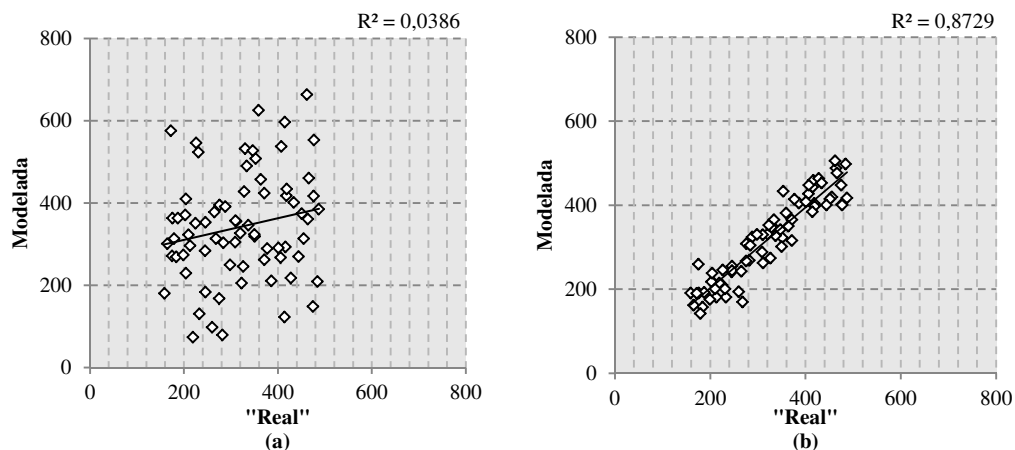


Figura 7: Diagrama de dispersão Cenário 4 - (a) TransCAD semente binária; (b) TransCAD semente S_{70}

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos estabelecidos para este trabalho foram alcançados. A proposta de considerar contagens de tráfego nas interseções, com intuito de aumentar a quantidade de informação, foi apresentada e os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, confirmando a hipótese estabelecida. Ainda assim, os resultados não possibilitaram recuperar a matriz OD original, pois, mesmo com aumento da quantidade de informação, o problema continua indeterminado. Os volumes observados servem como pontos de referência que moldam a resposta. Quanto mais pontos de referência maiores são as chances de o resultado obtido se acerrar do real. Por isso a ideia de considerar os volumes observados nas interseções possibilitou a reconstrução de matrizes com menor quantidade de erros, em comparação a situação em que se empregam apenas contagens nos arcos.

Idealmente seria interessante fazer contagens em todos os nós da rede em estudo, mas a opção de realizar contagens apenas no (s) ponto (s) com maior indeterminação (Cenário 2) é bastante interessante, pois permite a obtenção de resultados melhores, mesmo com matriz semente com pequena qualidade, que os obtidos pela técnica atualmente em uso.

A adoção dos “arcos virtuais” possibilitou a aplicação da proposta deste trabalho no TransCAD, que não foi desenvolvido considerando as contagens de tráfego nas interseções como integrantes do conjunto restrição. Assim, é esperado que tal artifício possibilite o uso da técnica por outros programas de reconstrução, uma vez que todos eles consideram volumes nos arcos como dados de entrada. Em relação ao TransCAD, largamente utilizado no planejamento de transportes, deve-se ter atenção quanto a qualidade da matriz semente fornecida, o artifício de usar uma matriz binária não se mostrou eficiente, embora o uso combinado com contagem nos nós trouxesse melhorias aos resultados, levando a crer que a alternativa proposta neste trabalho será de grande valia para o planejador que deseja modelar a matriz OD sintética e não dispõe de matriz semente de qualidade. O uso das taxas de conversão permitiu obter bons resultados, porém é muito mais prático e eficiente inserir os “arcos virtuais”.

Cabe ressaltar que o estudo aqui apresentado constitui apenas um estudo de caso, serão necessárias mais verificações, como testes utilizando redes com outros tamanhos e configurações, matrizes de demanda variada e matrizes sementes que

não guardem proporcionalidade direta com a “real”, para só então tecer generalizações. Ainda assim, pode-se afirmar que o método proposto consiste em uma mudança de paradigma na modelagem da matriz OD sintética. Acredita-se que a ideia defendida neste artigo poderá, futuramente, vir a contribuir, na prática, para o processo de reconstrução da matriz OD sintética. No entanto, há um longo caminho de estudos e análises até atingir este ponto.

Espera-se, com este trabalho, ter trazido contribuições efetivas à reconstrução da matriz OD sintética, em especial àquelas situações que não dispõem de recursos adicionais como matriz OD semente.

Agradecimentos: Os autores agradecem à FAPESP pela concessão de bolsa de estudo de doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alibabai, H.; Mahmassani, H.S. (2008). Dynamic origin-destination demand estimation using turning movement counts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n 2085. p 39-48.
- Bureau of Public Roads - BPR (1964) *Traffic Assignment Manual*, Washington, DC, USA
- Caliper (2005) *Travel Demand Modeling with TransCAD 4.8*. Caliper Corporation, Newton, USA.
- Cascetta, E.; Nguyen, S. (1988) A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. *Transportation Research Part B*, v. 18, n. 6, p. 437-455.
- Glover, F.; Hultz, J.; Klingman, D.(1977) *Improved computer-based planning techniques*. Relatório número CCS 283, Center for Cybernetic Studies, The University of Texas, Austin, Texas.
- Hellinga, B.R. (1994) *Estimating dynamic origin - destination demands from link and probe counts*. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Queen's University.
- Martin, P.T.; Bell, M.C. (1992) Network programming to derive turning movements from link flows. *Transportation Research Record*, n 1365, p. 147-154.
- Nielsen, O. A.(1993) *A new method for estimating trip matrices from traffic counts*. Institute of Roads, Traffic, and Town Planning. The Technical University of Denmark, Paper 3.
- Paramahamsan, H. (1999) *Fundamental properties of synthetic O-D generation formulations and solutions*. Master of Science, Civil and Environmental Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. 133 p.
- Timms, P. (2001) A philosophical context for methods to estimate origin-destination trip matrices using link counts. *Transport Reviews*, v. 21, n. 3, p. 269-301.
- Van Zuylen, H. (1978). The information minimizing method: validity and applicability to transport planning. In. *New Developments in Modeling Travel Demand and Urban Systems*. Edited by G. R. M. Jansen et al. Saxon, Farnborough.
- Van Zuylen, H. J.; Willumsen, L. G. (1980) The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research Part B*, n. 14, p. 281-293.
- Willumsen, L.G. (1981) Simplified transport models based on traffic counts. *Transportation*, n. 10, p. 257-278.

Endereço dos autores:

Bruno Vieira Bertoncini (bruviber@gmail.com)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

Escola de Engenharia de São Carlos, Depto. de Eng. de Transportes.

Eiji Kawamoto (eiji@usp.br)

Professor Titular, Depto. de Transportes,

Universidade de São Paulo – Escola de Eng. de São Carlos, Depto. de Eng. de Transportes.

Escola de Engenharia de São Carlos –
USP

Departamento de Eng. de Transportes

Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro
CEP: 13566-590 – São Carlos, São Paulo,
Brasil

Fone/Fax: (016) 3373-9602