

## **UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE DO IMPACTO DE ERROS DE QUANTIFICAÇÃO NA QUALIDADE DOS RESULTADOS DE MODELOS DE ATRIBUIÇÃO/SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO**

**Álvaro Jorge da Maia Seco**

Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade de Coimbra

**António Luís Pimentel Vasconcelos**

Escola Superior de Tecnologia  
Instituto Politécnico de Viseu

### **RESUMO**

São muitas as potencialidades dos modelos de atribuição/simulação de tráfego no âmbito dos processos de planeamento e gestão de sistemas de transportes. Contudo, a aplicação prática destes modelos é, muitas vezes, complexa e dispendiosa, o que motiva a necessidade de selecção criteriosa dos recursos envolvidos na obtenção dos dados de base em função do nível de precisão necessária ao nível dos resultados. Presentemente a obtenção deste compromisso é dificultada pela inexistência de referências internacionais relevantes que abordem aprofundadamente o problema da complexa interrelação entre o tipo e nível de erros cometidos ao nível dos dados, e a precisão obténível ao nível dos resultados, o que torna os processos de modelagem extremamente dependentes da experiência do utilizador. No presente texto é apresentada uma metodologia genérica que permite avaliar o impacto dos erros de quantificação na qualidade das estimativas produzidas. São também apresentados alguns dos resultados obtidos durante o processo de teste da metodologia, que teve como base de trabalho o modelo da rede viária da cidade de Coimbra (Portugal), desenvolvido através do *software* SATURN.

### **ABSTRACT**

Traffic assignment/simulation models are widely applied in transport planning and traffic management operations, particularly in the scope of urban networks, but their application is, in many cases, complex and resource demanding, forcing end users to search the best balance between the level of data collection efforts and the models' results required accuracy. This isn't an easy task. In the absence of relevant references that show how the different kind of errors affect the outputs of the models, traffic models construction and validation has become an "art", where the user experience is essential to guarantee efficient modeling processes and results. In the current text a methodology which allows simulating and assessing the impacts of quantification modeling errors is presented. This methodology was tested through the development of a SATURN simulation model applied to the road network of a medium size portuguese city (COIMBRA). Some of the test results are presented in the present document.

## **1 INTRODUÇÃO**

Os modelos computadorizados de atribuição/simulação de tráfego são ferramentas com grandes potencialidades no âmbito dos processos de planeamento e gestão de sistemas de transportes, mas a aplicação dos modelos a casos reais é, em muitos casos, complexa e muito exigente do ponto de vista dos recursos temporais, humanos e financeiros envolvidos.

Tal facto leva a que nos processos de construção de construção, calibração e validação destes modelos se recorra a referenciais normativos relativos aos níveis mínimos de "aderência entre sistemas reais e modelados" exigíveis, definidos em documentos normativos aceites internacionalmente (ver por exemplo UK-DOT, 1996 e FHWA, 1997)

No entanto, nem estes documentos, nem quaisquer outras referências relevantes, apresentam indicações significativas quanto ao modo como os diferentes erros ou imprecisões influenciam a qualidade das estimativas. Tal implica obviamente, também, a praticamente inexistência de recomendações sobre, por exemplo, os graus de rigor necessários e/ou suficientes na quantificação dos diferentes *inputs* dos modelos. Esta situação torna o processo

de construção e validação dos modelos uma “arte”, em que a experiência do utilizador é essencial para garantir processos eficientes de modelagem.

No presente documento descreve-se uma metodologia que facilita a compreensão da forma como um tipo específico de erros controláveis pelo utilizador final – os *erros de quantificação* – afectam o desempenho e a aplicabilidade dos modelos. Essa metodologia foi desenvolvida e testada usando como “base de trabalho” um modelo de atribuição/simulação de tráfego razoavelmente representativo de uma realidade específica, no caso o modelo da rede viária da cidade de Coimbra, em Portugal, através do *software* SATURN.

## **2 ERROS DE MODELAGEM**

São muitos os factores responsáveis pelas discrepâncias entre um modelo e o sistema real representado. A existência destas diferenças, denominadas *erros*, é intrínseca ao processo de modelagem, não significando necessariamente que tenha havido “enganos” por parte do utilizador.

Com base em classificações mais completas (FHWA, 1997; Ortúzar e Willumsen, 1990), consideraram-se duas grandes categorias de erros. Na primeira incluem-se todos aqueles que se encontram a montante da modelagem de um sistema real concreto. São os erros de especificação e computação, cujas implicações no rigor das estimativas são avaliadas através dos processos de *validação do modelo conceptual* e do *modelo computadorizado*.

Na segunda categoria incluem-se os erros associados à modelagem de um sistema em particular, cujas implicações são avaliadas no processo de *validação operacional*. Estes erros são, em certa medida, controláveis pelo utilizador final, implicando um compromisso entre o rigor e o custo de desenvolvimento do modelo. Neste processo distinguem-se duas sub-fases, associadas a erros de tipologias muito diferentes:

- a) *Definição da estrutura do modelo seleccionado*. As decisões relativas à área de estudo e ao detalhe com que é modelada são essencialmente tomadas em função dos objectivos a atingir com o modelo. É aqui que têm origem os erros de *simplificação*.
- b) *Desenvolvimento do modelo/estrutura assumido ao longo das fases anteriores*. Aqui, a qualidade do modelo fica condicionada pelos erros de *quantificação* dos seus diversos *inputs*.

No que respeita especificamente a esta última etapa, a tarefa do analista é dificultada por diversos factores. Por um lado, são exigidos determinados níveis de precisão das estimativas produzidas pelo modelo, mas não existem quaisquer referências que sugiram os níveis de precisão mais adequados na quantificação das variáveis independentes. Por outro lado, são mal conhecidas as próprias relações entre os erros cometidos ao nível dos *inputs* e os graus de imprecisão resultantes ao nível dos *outputs* dos modelos.

Compreende-se, assim, que a racionalização do processo de desenvolvimento de um modelo passa por uma melhor compreensão da forma como os diferentes níveis de precisão dos *inputs* se reflectem no desempenho dos modelos. A definição de uma metodologia que permite suportar este tipo de análises é objecto do próximo capítulo.

### 3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DO IMPACTO DE ERROS DE QUANTIFICAÇÃO

#### 3.1 Enquadramento

A obtenção de uma solução com um modelo de simulação de tráfego é uma operação que, normalmente, se revela bastante complexa face ao número de variáveis e relações envolvidas. Como tal, é praticamente impossível prever o valor que uma determinada variável dependente tomará quando se comete um erro na quantificação de uma ou mais variáveis independentes, ou seja, estabelecer uma relação determinística pura entre os dois níveis de erros.

Mas esse nível de conhecimento também não é essencial. Na maioria das vezes é já bastante valioso o conhecimento dos padrões de variação da qualidade dos resultados em função do tipo e nível de erros nos *inputs*, respondendo a questões como: “b erro origina uma estimativa por excesso ou por defeito?”, “existe uma gama de erros nos dados com impactos desprezáveis?”, “é mais gravoso haver concentração ou dispersão de erros?”.

As análises de sensibilidade, no sentido tradicional, não representam qualquer inovação. É vulgar a sua aplicação para demonstrar o comportamento de uma variável dependente face a variações em uma ou mais variáveis independentes. Já no que respeita à avaliação da sensibilidade de variáveis quando integradas em modelos de simulação, praticamente não se identificaram trabalhos de investigação.

Como excepção pode referir-se o trabalho de Martin e Douglas (1983) que descreveram o desenvolvimento de um programa cujo objectivo era facilitar a avaliação do impacto de diversas suposições ao nível do modelo de atribuição, sobre a distribuição final de fluxos. Basicamente, o programa comparava os resultados de duas atribuições idênticas em todos os aspectos à excepção da relação *custo do tempo / custo da distância*, que é utilizada para quantificar o custo de utilização de um determinado arco.

Uma outra linha de investigação é seguida por autores como Smith (1984), Dafermos e Nagurney (1984), Tobin (1986) e Clark e Watling (2002), que estudam o desenvolvimento de relações analíticas entre causa e efeito, tendo já apresentado resultados preliminares promissores, embora em redes extremamente simples. Destaque-se no entanto o carácter eminentemente teórico destas abordagens, pelo que a efectiva aplicabilidade destes métodos a redes reais e situações concretas parece estar ainda longe de ser uma realidade.

A presente investigação seguiu a linha traçada por Martin e Douglas (*op. cit.*), mas com as seguintes diferenças fundamentais:

- ♣ Procurou-se desenvolver uma metodologia para a avaliação do impacto de erros decorrentes dos métodos tradicionais de colecta de dados e de calibração de parâmetros, por oposição a perturbações genéricas;
- ♣ A metodologia deveria permitir a avaliação do impacto de erros em todo o tipo de dados e não apenas em parâmetros globais;
- ♣ Deveria ser avaliada a influência da distribuição espacial dos erros ao nível dos dados e dos resultados.

### 3.2 Estrutura conceptual da metodologia de análise

Considere-se um estado particular de um sistema real  $\mathbf{Y}_{Ri} = f(\mathbf{X}_{Ri})$ , cujo desempenho é caracterizado por um conjunto de variáveis  $\mathbf{Y}_{Ri}$  e causado (ou explicado) pelas variáveis  $\mathbf{X}_{Ri}$

$$\begin{aligned}\mathbf{Y}_{Ri} &= [y_1, y_2, \dots, y_n] \\ \mathbf{X}_{Ri} &= [x_1, x_2, \dots, x_n]\end{aligned}$$

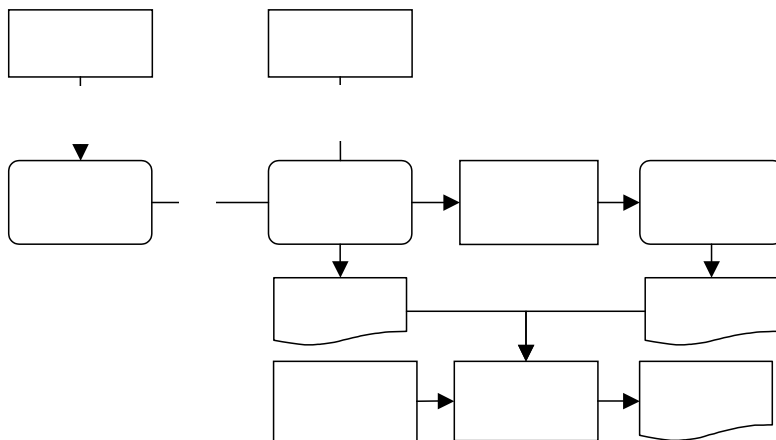
Um modelo procura reproduzir as relações observadas entre as variáveis explicativas e dependentes, constituindo um sistema virtual potencialmente *perfeito*  $\mathbf{Y}_{P1} = g(\mathbf{X}_{P1})$ . Trata-se de uma descrição matemática do problema, que pressupõe a introdução de um conjunto de simplificações, em parte inerentes ao próprio modelo e em parte assumidas pelo analista, pelo que os dois estados (físico e virtual) não coincidem. Acrescenta ainda que o carácter contínuo e/ou aleatório das variáveis explicativas implica a existência de erros de quantificação. Assim sendo, a previsão do estado do sistema passa a assentar nas variáveis explicativas  $\mathbf{X}_{E1i}$ , pelo que a representação virtual *aproximada* do sistema físico é  $\mathbf{Y}_{A1} = g(\mathbf{X}_{A1})$ .

Particularizando, o sistema  $\mathbf{Y}_R$  constitui um sistema real urbano de tráfego, caracterizado por variáveis  $\mathbf{Y}_{Ri}$  como fluxos, tempos de trajecto e filas de espera. O estado do sistema é causado por variáveis  $\mathbf{X}_{Ri}$  – capacidade das vias, características funcionais da rede, etc.

A metodologia adoptada no presente trabalho (ver a Figura 1) implica, num primeiro passo, o desenvolvimento de um modelo de simulação de tráfego representativo deste sistema, processo que tanto quanto possível deve seguir o actual *estado-da-arte*, em particular no que respeita aos processos de calibração e validação, e onde, inevitavelmente, são cometidos erros dos diversos tipos. No entanto, após esta fase é assumido que este modelo “aproximado”,  $\mathbf{Y}_{A1}$  é de facto um modelo “perfeito”, ou seja, que não são cometidos quaisquer erros de quantificação no seu desenvolvimento pelo que todos os valores codificados são exactos. Constitui assim o sistema virtual de referência e pode ser considerado como a representação exacta de uma realidade possível, muito próxima daquela que se pretendia simular.

O segundo passo consiste na execução de múltiplas corridas do modelo de referência, em cada caso afectado de uma entre uma variedade de tipologias, níveis e combinações de erros de quantificação em diferentes variáveis e parâmetros do modelo, gerados estruturada e sistematicamente, de forma a serem representativos de situações passíveis de ocorrência em processos reais de modelagem regidos por regras de boa prática (sistemas  $\mathbf{Y}_{A2(i)}$ ).

O passo final consiste na análise qualitativa e quantitativa das diferentes relações de causa-efeito observadas entre os vários tipos de “erros” introduzidos e as correspondentes imprecisões ao nível das estimativas do modelo (diferenças entre  $\mathbf{Y}_{P2}$  e os sistemas  $\mathbf{Y}_{A2(i)}$ ), procurando caracterizá-las e explicá-las em função de um conjunto de factores ligados às características intrínsecas dos próprios erros, da rede rodoviária ou das suas condições de operação.



**Figura 1:** Representação esquemática da metodologia de análise

### 3.3 O processo de quantificação dos impactos dos erros

Foi preparada uma estrutura de avaliação quantitativa dos impactos que implicou o tratamento de três questões básicas: a) selecção dos indicadores do estado do sistema real; b) selecção das medidas estatísticas, e c) selecção dos critérios de validação.

#### 3.3.1 Indicadores do estado do sistema real

Uma vez que garantir a validade do modelo para além de um determinado nível pode ser uma tarefa muito consumidora de recursos, Law e Kelton (2000) defendem que é mais adequado validar o modelo relativamente aos indicadores que vão ser utilizados para fazer opções de planeamento, gestão ou controlo.

Assim, adoptaram-se os indicadores “fluxo de tráfego” e “tempo de trajecto”, tendo para tal sido considerados os seguintes aspectos:

- ♣ Tratam-se dos principais indicadores de suporte aos processos de calibração e validação de modelos macro e mesoscópicos;
- ♣ Estão directamente associados à maior parte dos critérios de avaliação de alternativas, definidos em função dos objectivos de alto nível, como a eficiência económica, grau de protecção ambiental, segurança e sustentabilidade (SMARTTEST, 1999).

#### 3.3.2 Medidas estatísticas para comparação dos resultados

O tipo de análises em causa nesta investigação implica o tratamento de uma grande quantidade de informação. Em particular, é necessário efectuar comparações sistemáticas de valores emparelhados.

Normalmente, essa comparação é feita com base em duas medidas fundamentais: a diferença simples e a variação percentual. Existem, contudo, medidas estatísticas muito mais eficientes para este tipo de análises, nomeadamente aquelas que apresentam sensibilidade simultânea às diferenças simples e relativas. Destas, adoptou-se a estatística empírica GEH, sugerida no *Traffic Appraisal Manual* (UK-DOT, 1996), e que mais não é que uma adaptação conveniente da estatística Chi-quadrado:

$$GEH = \sqrt{2(O - M)^2 / (O + M)} \quad (1)$$

onde  $O$  é o valor observado e  $M$  é o valor modelado.

O interesse na utilização desta medida empírica reside no facto de produzir resultados que estão em linha com as expectativas dos analistas. Por exemplo, será defensável admitir que um erro de 30 veículos/hora quando os fluxos são da ordem dos 100 veículos (30%) é tão grave como um erro de 100 sobre 1000 (10%), e nos dois casos o GEH é aproximadamente igual a 3. Por outro lado, Van Vliet (1997), identifica as vantagens de utilizar a média dos valores observados e modelados no denominador, evitando divisões por zero e a independência da ordem de valores

### 3.3.3 Critérios de validação

Para avaliar objectivamente a gravidade das discrepâncias entre valores observados e modelados, um analista tem essencialmente ao seu dispor dois tipos de recomendações: os critérios de validação britânicos (UK DOT, 1996), quando estão em causa intervenções na rede viária a curto e médio prazo; os critérios norte americanos (FHWA, 1997), associados a problemas de planeamento estratégico de transportes, nos quais deverá ser equacionada a modelagem de processos como a distribuição de tráfego e a repartição modal.

Incidindo esta investigação sobre a problemática de modelos de redes urbanas e sub-urbanas, entendeu-se que as recomendações britânicas (ver a Tabela 1) eram as mais adequadas.

**Tabela 1:** Critérios de validação: fluxos horários de tráfego e tempos de trajecto (UK DOT, 1996)

Indicador	N.º mínimo de observações a satisfazer condição de validação	Erro aceitável entre valores observados e modelados
Fluxos individuais ( $Q < 700$ veic/h)	85%	100 veic/h
Fluxos individuais ( $700 < Q < 2700$ veic/h)	85%	15%
Fluxos individuais ( $Q > 2700$ veic/h)	85%	400 veic/h
Fluxos em <i>screenlines</i>	100%	5%
Fluxos individuais	85%	GEH = 5
Fluxos em <i>screenlines</i>	100%	GEH = 4
Tempos de trajecto	85%	15% (ou 1 minuto)

Relativamente a estas metas importa, no entanto, notar que não são diferenciados os casos dos fluxos nos arcos e nos movimentos de viragem, sendo que os primeiros representam uma agregação dos segundos e, por esse motivo, mais facilmente respeitam o critério de validação. Este aspecto foi reconhecido por Van Vuren (1996) que propõe a tolerância de 15% ou 100 veic/h no arcos e de 25% ou 100 veic/h nos movimentos de viragem, independentemente do fluxo observado. Sugere ainda que seja imposto o limite  $GEH = 2$  relativamente à média das 85% melhores previsões.

Apesar da relativa diversidade de critérios de validação, verifica-se que nenhum deles é, isoladamente, plenamente adequado à realização de uma análise de sensibilidade. Para esse efeito interessa adoptar um único indicador, dependente de todos os elementos da rede e sensível à totalidade das discrepâncias registadas, independentemente do seu valor.

Adoptou-se assim, como indicador de aderência à realidade, a estatística GEH calculada com base na totalidade dos fluxos de tráfego, nos arcos e nos movimentos de viragem – QGloGEHM. Complementarmente, realizou-se uma análise específica, da qual se concluiu que o critério de validação QGloGEHM = 2,5 é compatível com os valores de referência constantes das recomendações britânicas (Vasconcelos, 2004).

## **4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE REFERÊNCIA**

### **4.1 Opções base**

O principal objectivo desta fase foi o de desenvolver o modelo de tráfego de referência, de forma a constituir uma base adequada à realização de um conjunto alargado de análises e que, tanto quanto possível, permitisse a generalização das metodologias utilizadas. Entendeu-se assim que, preferencialmente, este modelo deveria possuir as seguintes características fundamentais:

- ♣ Representar uma rede viária urbana: a codificação das redes urbanas é extremamente exigente no que respeita à quantidade e tipologia de dados, pelo que a fase de colecta de informação consome uma fatia considerável dos recursos alocados ao projecto, sendo particularmente relevante que esta seja feita da forma mais produtiva possível;
- ♣ Tratar uma área de estudo razoavelmente alargada: pretendeu-se com esta condicionante aumentar a representatividade dos resultados, ao mesmo tempo que se diminuam as ligações da rede com o meio exterior, facilitando a codificação do modelo base.

Da conjugação das condicionantes anteriores, do conhecimento da rede e da disponibilidade de dados, resultou a adopção natural da cidade de Coimbra, em Portugal, como área a modelar. Coimbra é a sede de um município com uma população de 316,5 km<sup>2</sup> e 149.497 habitantes. À data da realização do estudo, a cidade debatia-se com significativos problemas de congestionamento em partes importantes da rede, situação que tornava o “ambiente” de modelagem particularmente interessante para o desenvolvimento do estudo.

### **4.2 O modelo SATURN**

A modelagem foi feita com o modelo de atribuição/simulação de tráfego SATURN (Hall, Van Vliet e Willumnsen, 1980). Trata-se de um modelo que permite a codificação com dois níveis de detalhe:

- ♣ Atribuição: o elemento explicitamente codificado é o arco, sendo as demoras calculadas através de curvas fluxo-velocidade. As demoras nas intersecções são, ou desprezadas, ou integradas nas demoras dos arcos;
- ♣ Simulação: o elemento explicitamente codificado é o nó, sendo as demoras calculadas em função de características como os fluxos de saturação, intervalos críticos de aceitação, prioridades relativas entre movimentos e programações semafóricas.

Tradicionalmente, por uma questão de eficiência custo/benefício, opta-se pela codificação da parte mais sensível da área de estudo no modo de simulação, reservando-se o modo de atribuição para codificar a área envolvente.

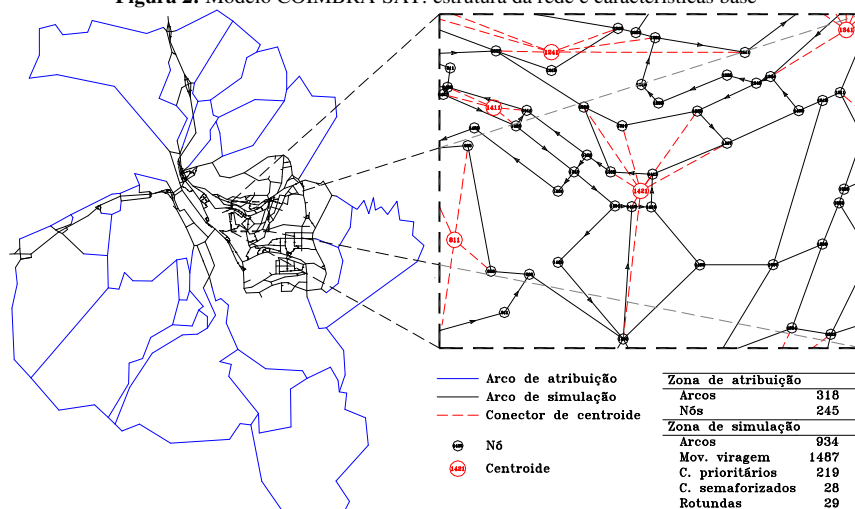
### **4.3 Área de estudo e estrutura da rede**

Definiu-se a área de estudo apresentada na Figura 2, com aproximadamente 85 km<sup>2</sup> e que abrange ou intersecta a maior parte das estradas do município de Coimbra. Optou-se pela

modelagem da rede em dois níveis, como é prática comum com este tipo de modelos, distinguindo-se as áreas periféricas das áreas centrais:

- ♣ Zona periférica – Aproximadamente 69 km<sup>2</sup>, com uma rede viária esparsa, caracterizada por cargas de tráfego moderadas face à capacidade instalada e por distâncias consideráveis entre intersecções, modelada de forma convencional sem consideração explícita de demoras nos nós;
- ♣ Zona central – Área com aproximadamente 16 km<sup>2</sup>, com uma rede viária densa sujeita a congestionamento e com distâncias curtas entre intersecções, onde se procedeu à codificação detalhada do funcionamento das diferentes intersecções.

**Figura 2: Modelo COIMBRA-SAT: estrutura da rede e características base**



#### 4.4 Matriz origem-destino

Houve a possibilidade de incorporar no presente trabalho de investigação o resultado do complexo e dispendioso processo de construção da matriz origem-destino da cidade, levado a cabo pelo Departamento de Engenharia Civil da FCTUC no âmbito de um protocolo com a Câmara Municipal de Coimbra (Seco e Pinto, 2003). Essa matriz é constituída por 182 zonas, está discriminada por hora de viagem, motivo (casa-emprego; emprego-emprego, compras, aulas, saúde, etc.) e por classe de veículos (ligeiros e pesados).

O modelo foi desenvolvido tendo em vista a análise das condições de circulação à hora de ponta da manhã que, no caso da rede de Coimbra, se concluiu ser correspondente à matriz equivalente horária representativa do período 8:15 – 8:45. Para efeitos de modelagem, agregaram-se os motivos de viagens e uniformizaram-se as correntes de tráfego em unidades de veículos equivalentes ligeiros (UVE), considerando que cada veículo pesado equivale a dois veículos ligeiros. A matriz assim obtida contém um volume horário equivalente para o período de ponta da manhã 24.343 UVE/h.

### 5 APLICAÇÕES DA METODOLOGIA AO MODELO COIMBRA-SAT

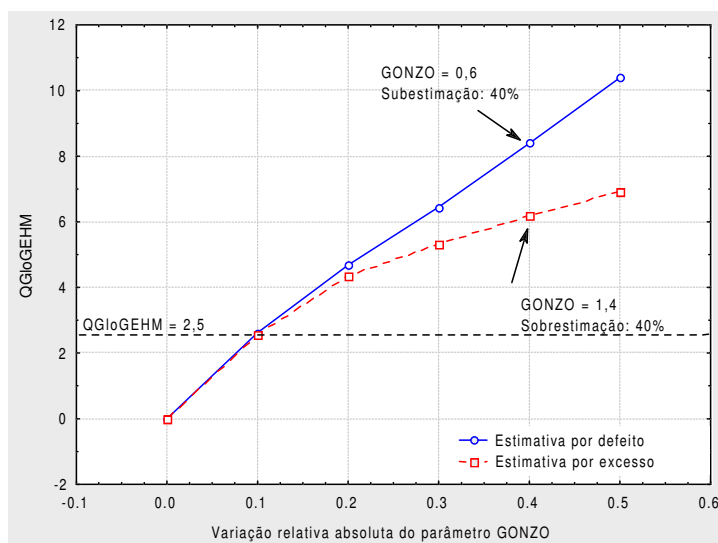
A metodologia genérica anteriormente apresentada permite simular e avaliar as consequências de uma grande diversidade de erros e, assim, responder a uma série de questões práticas que



se colocam aos analistas. Neste capítulo apresentam-se, a título exemplificativo, três análises resultantes da aplicação da metodologia ao modelo COIMBRA-SAT.

### 5.1 Erros de ocorrência singular na caracterização da procura

Esta primeira análise aborda a importância de erros simples de estimação de parâmetros globais do modelo. Especificamente, procura-se saber de que forma erros na quantificação do nível global da procura, que no SATURN é ajustável pelo parâmetro GONZO, afectam a aplicabilidade de um modelo. Para tal, foram realizadas 10 corridas, correspondentes a erros de -50% a +50% com incrementos de 10% (ver a Figura 3). Note-se que, em exercícios sérios de modelagem, não serão de esperar erros deste tipo acima dos 10 ou 15%, pelo que os limites foram fixados apenas com o objectivo de facilitar a leitura dos resultados.



**Figura 3:** Sensibilidade a erros na avaliação do volume total de viagens na matriz origem-destino

Constata-se que os erros de sobrestimação tendem a ser menos graves que os erros de subestimação, embora estas diferenças apenas surjam para erros de gravidade não natural. Este comportamento explica-se pelo progressivo aumento do número de arcos em que o fluxo atinge o valor máximo, tornando-se assim independente da procura potencial.

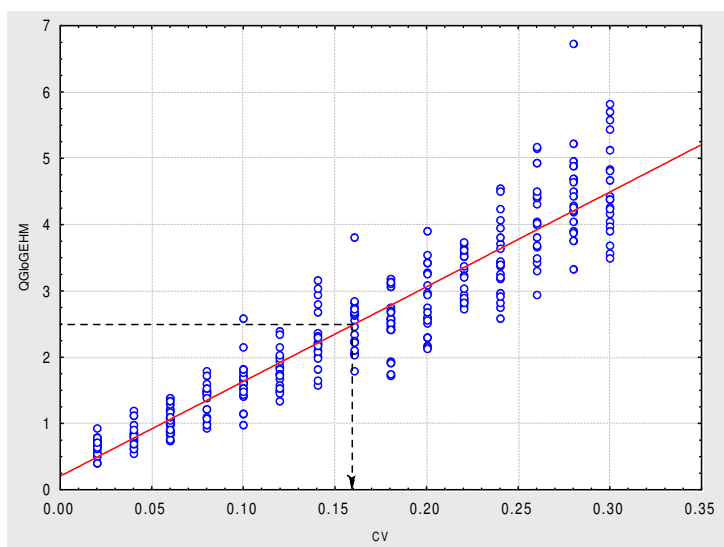
Verifica-se ainda que erros com magnitudes dentro da gama de valores “plausível” são suficientes para pôr em causa a aplicabilidade do modelo. De facto, um erro de quantificação  $\pm 10\%$  origina um QGloGEHM de 2,6, valor que já não respeita as recomendações britânicas.

### 5.2 Erros de ocorrência múltipla na caracterização da infra-estrutura

Com esta análise procurou-se compreender melhor como se repercutem os erros em variáveis com múltiplas ocorrências, ou seja, aquelas que podem tomar diferentes valores consoante o elemento da rede a que estão associadas.

A variável seleccionada foi o “fluxo de saturação” tendo em atenção que se trata de uma variável indispensável à caracterização de cada um dos movimentos de viragem da rede de simulação o que, no caso do modelo de Coimbra, representa um total de 1487 ocorrências.

Simulou-se um cenário em que todos os valores foram estimados por amostragem, através de um processo que origina erros aleatórios de intensidade variável. Para tal, recorreu-se a um processo de geração de erros do tipo Monte Carlo: em cada corrida, cada um dos fluxos de saturação foi afectado de um erro extraído de uma população Normal, com média igual a zero e um determinado coeficiente de variação (CV) representativo da variabilidade do erro que se pretendia simular. Esta análise implicou a realização de 300 corridas.



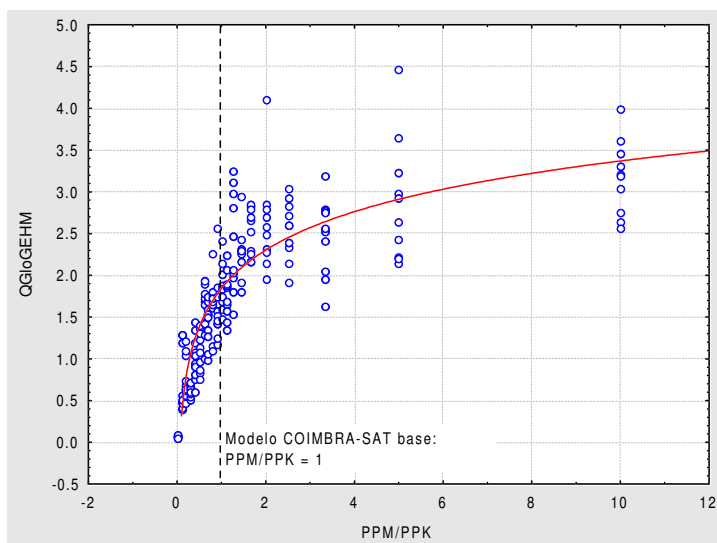
**Figura 4:** Sensibilidade a erros aleatórios na quantificação dos fluxos de saturação dos movimentos de viragem

Das conclusões obtidas com esta análise destaca-se a evidência da existência de uma relação aproximadamente linear entre o desempenho do modelo e a gravidade dos erros aleatórios, assim como a comprovação da grande sensibilidade do modelo a este tipos de erros. De facto, na ausência de outros tipos de erros, em média a condição de validação  $QGloGEHM \bullet 2,5$  apenas é respeitada quando o coeficiente de variação é inferior a 16%, sendo que existe uma probabilidade não desprezável de ultrapassagem do critério de ajuste do modelo para coeficientes de variação superiores a 10/12%.

### 5.3 Importância do ambiente rodoviário

Nas análises anteriores avaliou-se a sensibilidade do modelo COIMBRA-SAT a erros em variáveis de ocorrência singular e múltipla, na inexistência de quaisquer outros tipos de erros. Uma outra questão extremamente relevante é a de saber de que forma o comportamento observado ao nível do desempenho de um modelo dependente do “ambiente” de modelagem, nomeadamente ao nível de aspectos como o grau de congestionamento, a estrutura hierárquica da rede ou o próprio comportamento dos condutores.

Como exemplo deste tipo de análises, avaliou-se o nível de impacto de erros aleatórios com intensidade constante ( $CV = 0,15$ ) na quantificação dos fluxos de saturação, face a diferentes atitudes dos condutores na valorização relativa do tempo e da distância percorrida. No modelo SATURN este comportamento é modelado através da relação de parâmetros PPM/PPK (*pence per minute / pence per kilometer*). Nesta análise foram realizadas 200 corridas, sendo testados 10 ambientes PPM/PPK (ver a Figura 5).



**Figura 5:** Sensibilidade a erros na quantificação dos fluxos de saturação com diferentes valorizações relativas do custo do tempo e da distância

Constata-se que o nível de impacto deste tipo de erros de quantificação é extremamente dependente da forma de valorização relativa feita pelos condutores da relação tempo / distância ligada ao processo de selecção de trajectos. Verifica-se ainda que a sensibilidade do modelo a este tipo de erros cresce muito rapidamente quando o factor tempo começa a ganhar importância relativamente ao factor distância, passando depois a partir de uma relação de aproximadamente 1:1 este crescimento a ser cada vez mais lento embora constante.

Para compreender este comportamento, importa lembrar que os erros de quantificação do fluxo de saturação de um movimento de viragem se traduzem essencialmente por um maior ou menor tempo de espera. Como tal, em redes onde os condutores valorizem essencialmente a distância percorrida, este tipo de erros tem um impacto bastante limitado. Já em redes onde o principal critério de escolha de trajectos é o tempo total de percurso (maiores relações PPM/PPK), a incorrecta quantificação de um fluxo de saturação implica normalmente um processo de reafecção de tráfego, especialmente se esse movimento direccionar integrar um de vários trajectos alternativos de custo mínimo entre um ou mais pares O-D, o que normalmente acontece em redes congestionadas.

Assumindo que o quociente PPM/PPK está relacionado com o nível de desenvolvimento económico, estes resultados sugerem que será tanto mais difícil validar um modelo quanto maior o nível de desenvolvimento da cidade ou região a que respeita.

## 6 SÍNTESE

A metodologia desenvolvida para análise do impacto de erros de quantificação sobre a fiabilidade dos resultados produzidos por um modelo de atribuição/simulação revelou-se eficaz para a identificação de diferentes ‘padrões’ significativos de relações entre erros de tipologias muito diferenciados e os resultados do modelo. Parece assim possível avançar significativamente na identificação dos tipos de erros que tendem a afectar mais negativamente a qualidade dos resultados e a definir níveis mínimos de precisão desejável na quantificação das variáveis a que estão associados.

Parece ainda ser possível proceder a algumas generalizações dos resultados relativamente a aspectos ligados ao “ambiente” de modelagem, nomeadamente ao nível de questões como a relação entre nível de impacto dos erros e o grau de congestionamento da rede ou o tipo de processo de decisão dos condutores na escolha dos trajectos.

De qualquer modo a produção de resultados verdadeiramente conclusivos deverá passar pela análise conjunta de resultados obtidos com a aplicação da metodologia de análise a outras redes rodoviárias. Será também interessante avaliar qual o grau de especificidade que os resultados apresentam relativamente ao tipo de modelo utilizado, no presente caso ao modelo SATURN, através da aplicação da metodologia a outros modelos de simulação/atribuição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Clark, S. e Watling, D. (2002): ‘Applications of sensitivity analyses for probit stochastic network equilibrium’. Institute for Transportation Studies, University of Leeds, UK
- Dafermos, S., Nagurney, A. (1984): ‘Sensitivity Analysis for the Asymmetric Network Equilibrium Problem’. *Mathematical Programming*, 28(1984), 174-184.
- FHWA (1997). Model validation and reasonableness checking manual. Barton-Aschman Associates, Inc. e Cambridge Systematics, Inc. (<http://tmip.fhwa.dot.gov/clearinghouse/docs/mvrcm/finalval.pdf>)
- Hall, D., Van Vliet, D. e Willumsen, L. (1980): ‘SATURN – a simulation-assignment model for the evaluation of traffic management schemes’. *Traffic Engineering + Control*, Abril
- Law, A.M. e W.D. Kelton (2000) *Simulation Modeling and Analysis*. 3rd ed. McGraw-Hill, Boston, EUA.
- Martin, I. e Douglas, J. (1983) *The roadway assignment comparison program*, RDSTRC, PTRC, 11th Summer Annual Meeting, Transportation Methods, pp. 93-100.
- Ortúzar, J. e Willumsen, L. (1990): *Modelling Transport*, Ed. John Wiley & Sons.
- Seco, A., Pinto, N. (2003): ‘Relatório de execução da matriz origem-destino de Coimbra’. Organização do Sistema de Transportes de Coimbra – 2.ª fase do Projecto. Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
- SMARTTEST consortium (1999): deliverable D8 (<http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/>)
- Smith, M. J. (1984): ‘The stability of a Dynamic Model of Traffic Assignment – An Application of a Method of Lyapunov’. *Transportation Science*, Vol. 18, No.3, 1984. 245-252.
- Tobin, R. L. (1986): ‘Sensitivity Analysis for Variational Inequalities’. *Journal of Optimization Theory and Applications*. Vol.48, No.1, 1986, 191-204.
- UK DOT - Department of Transport (1996): ‘Traffic appraisal in urban areas’. *Design Manual for Roads and Bridges*, Volume 12, Secção 2, Part 1. HMSO.
- Van Vliet, D. e Hall, M. (1997): *SATURN 9.3 User Manual*
- Vasconcelos, A. L. (2004): ‘Modelos de atribuição/simulação de tráfego: o impacto na qualidade dos resultados de erros no processo de modelagem’. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

## Endereços dos autores

Álvaro Jorge da Maia Seco  
Departamento de Eng. Civil da FCTUC  
3030 – 290 Coimbra, PORTUGAL  
E-mail: aseco@dec.uc.pt

António Luís Pimentel Vasconcelos  
Departamento de Eng. Civil da ESTV  
3504-510 Viseu, PORTUGAL  
E-mail: vasconcelos@dcivil.estv.ipv.pt