

AValiação da Segurança Rodoviária em Fase de Planeamento: Modelo Estatístico de Resposta Qualitativa

António Couto

Sara Ferreira

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

RESUMO

Neste estudo propõe-se a adoção de um modelo estatístico de resposta qualitativa para a análise da segurança rodoviária de redes de transporte na fase de planeamento. Tendo em conta as características desta fase, como seja a escassez de informação e o âmbito generalista de análise, os modelos de resposta quantitativa não se enquadram nestas características. Assim, utilizando dados da cidade do Porto, desenvolveu-se um modelo ordenado probit, definindo três categorias de insegurança como variável dependente. Os parâmetros foram estimados com nível de confiança de 95% estando os efeitos marginais em linha com outros estudos. Com o objetivo de analisar a influência dos atributos do segmento assim como, comparar os resultados com um modelo binomial negativo, aplicou-se ainda o modelo a vários cenários de um segmento. A probabilidade de ocorrer cada categoria permite realizar uma análise de risco a partir da qual se pode comparar diferentes soluções definidas em fase de planeamento.

ABSTRACT

This study proposes the use of a qualitative response model to analyze safety of an urban road network at the planning level. Taking into account the poor data available at planning level and the general scope of analysis that features this level, the quantitative response models may not be the most appropriate. Thus, using data from Porto, an ordered probit model was developed using three categories illustrating degrees of unsafety as the dependent variable. The parameter estimates were statistically significant and the marginal effects were in line with expectations. In order to better analyze the effects of the segment features and also to compare this model with the negative binomial model, both were applied to several scenarios of a segment. The probabilities associated to each category allow to performing a risk analysis from which various solutions defined at planning level are compared.

1. INTRODUÇÃO

Cerca de 85% do PIB da UE é gerado nas cidades (Comission of the European Communities, 2009) sendo como tal necessário sistemas de transporte eficientes que assegurem o desenvolvimento económico e o bem-estar dos seus habitantes. As atuais políticas de mobilidade urbana enfrentam o desafio de tornar o transporte sustentável, abordando princípios que são por vezes antagónicos. Os programas prioritários de investigação para a mobilidade urbana estão principalmente focados em temas relacionados com a energia e meio ambiente. No entanto, a segurança rodoviária, sendo uma preocupação social, deveria ser incluída nestes programas de investigação, especialmente quando se trata de uma abordagem de avaliação a longo prazo de diferentes soluções e políticas para a rede rodoviária urbana.

Nas últimas três décadas, o número de acidentes rodoviários em Portugal diminuiu em cerca de 74%. Apesar disso, a média do número de mortes por milhão de habitantes de Portugal continua acima da média europeia. Um total de 47% destas vítimas mortais e 71% dos acidentes com vítimas ocorreram em vias urbanas (ANSR, 2009). Neste contexto, torna-se fundamental incluir explicitamente a segurança rodoviária na primeira fase de atuação, isto é, a fase de planeamento e decisão. De facto, a antecipação da ocorrência de acidentes através de uma análise de risco pode ser uma medida importante para a prevenção dos acidentes rodoviários. Nesta fase, várias soluções para a rede viária são propostas e analisadas, sendo a análise de risco de acidente uma ferramenta útil para a seleção do melhor cenário em termos de segurança. Assim, sendo habitual na fase de planeamento e decisão, analisar e coordenar

vários critérios tais como, ambientais e económicos, torna-se necessário dotar o planeador de meios de análise que garanta da mesma forma a inclusão da segurança.

Com o objetivo de desenvolver uma ferramenta de apoio ao planeamento de uma rede segura, vários estudos têm sido desenvolvidos com base em modelos de previsão de acidentes. A maior parte destes modelos são aplicados a uma área do meio urbano (nível macro de atuação), geralmente agregando os dados ao nível de uma zona resultante do zonamento do tráfego (ZT) (Levine, *et al.*, 1995, Hadayeghi, *et al.*, 2003, Guevara, *et al.*, 2004, Sayed e Lovegrove, 2006, Hadayeghi, *et al.*, 2010, Naderan e Shahi, 2010). Outros modelos foram ainda desenvolvidos para aplicação ao nível de agregação da rede viária constituída por nós e arcos com o objetivo de avaliar diferentes cenários para a rede de viária (Lord e Persaud, 2004, Tarko, *et al.*, 2008, Ferreira e Couto, 2011).

Os modelos acima referidos apresentam como resultado final o número esperado de acidentes para um determinado período de tempo e local. De notar que este número é estimado considerando dados que caracterizam a rede ou área urbana de uma forma abrangente como é característico da fase de planeamento. Salienta-se ainda que nesta fase são tomadas decisões através de uma análise multicritérios (ambientais, económicos, etc.).

Tendo em conta que na fase de planeamento da rede urbana o objetivo é avaliar e comparar cenários definidos, por exemplo, aquando da elaboração do plano director municipal, ou seja, numa fase em que a caracterização da rede é muito generalista, entende-se que uma avaliação baseada numa variável probabilística que permita uma análise de risco é mais coerente e adaptada à fase em questão.

Nesse sentido, este trabalho apresenta um modelo de resposta qualitativa cujo resultado corresponde a um conjunto de probabilidades de ocorrer determinada categoria que caracteriza a entidade viária em estudo por um grau de (in)segurança. Essas categorias de (in)segurança foram definidas intervalos de número de acidentes que reflectissem graus de gravidade em termos de segurança e, como tal, mantendo assim o carácter de medida de avaliação. Assim, considerou-se três categorias de graus de insegurança: baixo, médio e alto; como variável dependente de um modelo ordenado probit (MOP). Este modelo foi desenvolvido e aplicado aos segmentos de rede viária urbana do Porto (Portugal) considerando dados de um período de 5 anos. A seleção das variáveis independentes a incluir no modelo teve em conta a caracterização geométrica e funcional dos segmentos, bem como da envolvente urbana aos mesmos, e cujos dados sejam possíveis de obter ou estimar na fase de planeamento.

Os parâmetros estimados pelo modelo para as variáveis ilustram os impactos das variáveis independentes sobre a probabilidade de cada uma das três categorias ocorrer. Comparando estes valores com os resultados de outros estudos baseados em modelos de resposta quantitativa geralmente modelos lineares generalizados (Mountain, *et al.*, 1996, Karlaftis e Tarko, 1997, Mountain, *et al.*, 1998, Ivan, *et al.*, 2000, Greibe, 2003, Wedagama, *et al.*, 2006, Wier, *et al.*, 2009), bem como com os resultados de um modelo de resposta quantitativa aplicado à mesma base de dados (Ferreira, 2010, Ferreira e Couto, 2011), verifica-se que os valores estimados são consistentes na medida em que apontam para o mesmo tipo de efeitos. Neste estudo, e com o objetivo de facilitar a interpretação das consequências resultantes de alterações das variáveis independentes bem como comparar os resultados do MOP com um

modelo quantitativo (modelo binomial negativo), apresenta-se ainda uma aplicação do MOP desenvolvido para cenários hipotéticos de um segmento viário.

Apresenta-se a seguir, os capítulos: estado da arte, descrição dos dados e metodologia, resultados do modelo, análise de cenários e resumo e considerações finais.

2. ESTADO DA ARTE

Diversos estudos têm sido divulgados com o objetivo de desenvolver uma ferramenta a ser aplicada ao nível do planejamento. Esses estudos podem ser divididos em dois tipos em função do nível de agregação dos dados: nível da rede viária; nível da área. Estes últimos são geralmente baseados em dados agregados ao nível da ZT e incluem dados de fatores de exposição e caracterizadores da rede viária, tais como, quilômetros percorridos pelos veículos, densidade da rede, população, número de população empregada, etc. Contudo, tal como referido por Tarko *et al.* (2008), o nível macro (dados agregados por área) são modelos úteis para avaliar políticas e soluções de segurança rodoviária muito abrangentes, sendo, no entanto, modelos pouco aplicáveis quando se pretende avaliar soluções específicas na rede ou ainda como apoio à seleção do tipo de entidade viária, quer seja segmento ou intersecção, a introduzir na rede. Nesse sentido, alguns autores (Lord e Persaud, 2004, Tarko, *et al.*, 2008, Ferreira e Couto, 2011) desenvolveram modelos cujos dados são agregados ao nível da rede. Diferentes abordagens para este tipo de modelos foram aplicadas sendo, no entanto, de salientar que se basearam numa técnica comum: os modelos lineares generalizados (MLG), geralmente assumindo para a distribuição da componente aleatória a distribuição binomial negativa (BN) (Hadayeghi, *et al.*, 2003, Guevara, *et al.*, 2004, Lord e Persaud, 2004, Sayed e Lovegrove, 2006, Tarko, *et al.*, 2008, Naderan e Shahi, 2010). O procedimento adoptado nos modelos acima mencionados compreende a estimação dos parâmetros que representam a relação entre a variável dependente, geralmente o número de acidentes por ano numa ZT ou numa intersecção ou segmento, e as variáveis independentes. Como tal, o resultado final destes modelos é uma medida quantitativa da segurança rodoviária.

De salientar, contudo, que ao nível do planejamento da rede rodoviária, em particular no processo de decisão, a avaliação da segurança por uma medida quantitativa não é consistente com o tipo de análise praticável nesta fase, geralmente condicionada pela escassa informação disponível sobre as características da futura rede rodoviária, bem como pela amplitude da escala de intervenção. Ao aferir um número específico de acidentes, a abordagem quantitativa induz a uma interpretação muito precisa de um valor obtido por dados generalistas. A previsão do número de acidentes deverá ser realizada posteriormente quando já existir um conjunto de informação específica da rede futura.

Nesse sentido, com este trabalho, propõe-se uma nova abordagem que tem como objetivo avaliar a segurança na fase de planejamento e decisão do sistema rodoviário. Esta abordagem é baseada em modelos probabilísticos aplicados a uma variável dependente discreta em que esta tem um valor que corresponde a um código que identifica uma categoria à qual é associado um determinado significado (Greene, 2008).

Este tipo de modelos probabilísticos tem a seguinte estrutura geral (Greene, 2008):

$$Prob(\text{evento } j \text{ ocorrer}) = Prob(Y=j) = F[\text{fatores relevantes, parâmetros}] \quad (1)$$

em que um "evento" corresponde a uma categoria entre um conjunto possíveis de categorias.

Este tipo de modelos foi amplamente aplicado na análise dos transportes, em especial em estudos de repartição modal. Só recentemente, foram também aplicados ao estudo da sinistralidade, fundamentalmente na modelação da gravidade das vítimas dos acidentes. As técnicas estatísticas mais comuns aplicadas para modelar a gravidade dos acidentes são o modelo multinomial logit, modelo hierárquico e modelo ordenado probit e logit (Carson e Mannering, 2001, Kockelman e Kweon, 2002, Abdel-Aty, 2003, Eluru, *et al.*, 2008, Wang e Abdel-Aty, 2008, Savolainen, *et al.*, 2011). Estes modelos podem ser agrupados em duas abordagens em função do tipo de resposta: resposta ordenada (é exemplo o modelo ordenado probit ou logit) e resposta não-ordenada (é exemplo o modelo multinomial logit). O mecanismo de resposta ordenada tem a condicionante de ter uma única regressão (designada de regressão latente) para todas as categorias de resposta, pressupondo como tal, as mesmas variáveis independentes e o mesmo tipo de efeito na variável dependente, assumindo assim, uma correlação entre as diferentes categorias. No entanto, devido a este facto, tem uma estrutura parcimoniosa o que pode ser uma vantagem. Por outro lado, o mecanismo de resposta não-ordenada é fundamentado num modelo utilitário aleatório, possibilitando considerar para as várias categorias diferentes relações entre a variável dependente e as variáveis independentes, pressupondo uma independência entre as categorias. Estes modelos, tal como o nome indica, não atribuem uma ordenação às categorias (Bhat e Pulugurta, 1997).

Para o estudo da gravidade das vítimas de sinistralidade, e segundo Wang e Abdel-Aty (2008), como os modelos ordenados têm uma estrutura simples são, por isso, mais fáceis de aplicar e analisar, com a vantagem de permitir ordenar a gravidade dos acidentes por níveis correlacionados entre si. Abdel-Aty, M. (2003) aplicou, a uma mesma base de dados, os três modelos habitualmente utilizados no estudo da gravidade dos acidentes - modelos ordenado, multinomial e hierárquico, com o objetivo de comparar os resultados. O autor concluiu que o modelo que produziu piores resultados foi o multinomial logit. Os resultados do modelo hierárquico foram ligeiramente melhores do que o do modelo ordenado mas, tendo em conta que este último é de mais fácil aplicação e interpretação, o autor seleccionou este modelo para o estudo. Contudo, a rigidez do modelo ao considerar os mesmos fatores (variáveis independentes) para todos os níveis de gravidade, levou a que alguns autores (Kockelman e Kweon, 2002, Train, 2003) optassem por aplicar modelos não-ordenados, tais como, o modelo multinomial (para melhor conhecimento deste assunto consultar Savolainen *et al.* (2011)).

No contexto da previsão de acidentes, modelos de resposta qualitativa conhece-se, até à data, apenas o estudo de Qi *et al.* (2007). Estes autores aplicaram um MOP com parâmetros aleatórios, tendo em conta a preponderância de 0 acidentes num período de tempo muito curto, para prever a probabilidade de acidentes em tempo real considerando três categorias de resposta: não-acidente (0 acidente); 1 acidente e mais do que um acidente por intervalo de tempo. Os resultados do estudo mostram que o modelo tem um bom desempenho na identificação de fatores associados a acidentes rodoviários e na previsão da probabilidade de ocorrer.

Com base nesta breve descrição do estado da arte dos modelos qualitativos, pode-se concluir que estes são quase exclusivamente aplicados, no âmbito da segurança rodoviária, ao estudo da gravidade das vítimas, sendo como tal a aplicação dos mesmos à fase de planeamento uma abordagem inovadora.

3. DADOS E METODOLOGIA

Com o objetivo de desenvolver um modelo de resposta qualitativa para avaliar a segurança ao nível do planeamento de uma rede viária urbana, aplicou-se o modelo a uma base de dados relativa aos segmentos da rede viária da cidade do Porto (Portugal). Este modelo aplicado a segmentos pode ser utilizado, por exemplo, para a análise de cenários de um corredor viário (conjunto de segmentos que definem uma rua) ou de uma rede viária (em conjunto com modelos de intersecções para uma análise completa da rede). Salienta-se, no entanto, que a abordagem descrita neste estudo pode ser considerada para um modelo de dados agregados numa área (macro) habitualmente utilizados na fase de planeamento.

Os dados utilizados neste estudo são relativos a acidentes ocorridos em segmentos urbanos classificados por vias distribuidoras local e principal, registados ao longo de um período de 5 anos (de 1 de Janeiro de 2001 a 31 de Dezembro de 2005). De notar que os segmentos resultam de uma caracterização da rede em arcos e nós no âmbito de um estudo de doutoramento (Ferreira, 2010), sendo que os acidentes ocorridos dentro de uma área de 20 metros de raio com centro na intersecção das vias foram atribuídos aos nós. A base de dados dos acidentes foi obtida a partir de dados oficiais da Polícia de Segurança Pública e incluem todo o tipo de acidentes (com vítimas e só com danos materiais) registados com a informação do local de ocorrência. Com base nesta informação, os acidentes foram geo-referenciados através de um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os dados consistem em 5 650 acidentes, dos quais 1 183 resultaram em vítimas e 4 467 só com danos materiais, referenciados a 396 segmentos.

A partir destes dados, analisaram-se possíveis graus de gravidade em termos de frequência de acidentes (com vítimas e sem vítimas) que definissem categorias a considerar como variável de resposta. Assim, considerou-se três categorias que reflectem três níveis de insegurança no segmento: baixo (0 a 2 acidentes por ano); médio (3 a 8 acidentes por ano) e alto (mais do que 8 acidentes por ano). A primeira compreende a ocorrência de número baixo de acidentes que podem eventualmente ser consequência de situações fortuitas possivelmente relacionadas com o comportamento do condutor. A segunda categoria corresponde à ocorrência já de um número elevado de acidentes reflectindo a eventual presença de fatores de insegurança. Finalmente, a terceira categoria à qual corresponde um número muito elevado de acidentes e como tal indicando um elevado potencial de existir características no segmento altamente inseguras. A fronteira entre as duas últimas categorias baseou-se no número de acidentes correspondente ao percentil 90 das observações registadas nesta base de dados. Este critério de definição da fronteira é flexível pois ajusta-se a base de dados distintas. Saliente-se ainda que a própria definição das categorias pode ser adaptada a outras realidades urbanas. Na base de dados em estudo, verificou-se uma distribuição das observações pelas três categorias de 64% para a primeira categoria, 28% para a segunda e 8% para a terceira categoria (por ordem crescente de grau de insegurança).

A aplicação deste modelo permite então relacionar estas categorias com fatores que caracterizam a rede viária. Estes fatores devem ser possíveis de obter na fase de planeamento e decisão. Nesse sentido, consideram-se duas variáveis que caracterizam geometricamente a rede e que são habitualmente utilizadas na modelação: comprimento da via e número de intersecções minoritárias por quilómetro (densidade de intersecções com vias de acesso local). Estas variáveis são normalmente utilizadas para homogeneizar o segmento e são fáceis de

determinar na fase de planeamento, por exemplo, através de um SIG. De forma a incluir uma caracterização não só funcional e geométrica dos segmentos mas também da envolvente ao mesmo, incluiu-se ainda como variáveis independentes, a classificação hierárquica das vias e a ocupação do solo. Estas variáveis, e em particular, a ocupação do solo, têm sido extensivamente estudadas como variável independente (Ivan, *et al.*, 2000, Greibe, 2003, Wedagama, *et al.*, 2006, Dissanayake, *et al.*, 2009). De facto, as principais decisões na fase de planeamento do meio urbano compreendem a definição da distribuição da ocupação do solo e da função hierárquica das vias. Assim, neste estudo considerou-se, com base no plano director municipal, cinco tipos de ocupação do solo: ocupação do solo 1 (OS1) – zona de densidade habitacional alta; ocupação do solo 2 (OS2) – zona de densidade habitacional baixa; ocupação do solo 3 (OS3) – zona empresarial; ocupação do solo 4 (OS4) – zona com edifícios comunitários (escolas, pavilhão desportivo, etc.); ocupação do solo 5 (OS5) – zona central histórica.

O plano director municipal define também quatro classes hierárquicas das vias: acesso local, distribuidora local, distribuidora principal e coletora. Contudo, para o presente estudo excluiu-se as vias coletoras e de acesso local, a primeira por ter características muito distintas das vias urbanas (via rápida) e a segunda por não existir dados de volume de tráfego.

Considerou-se ainda uma variável que descreve a tendência de variação dos acidentes ao longo do tempo. Diversos estudos (Fridstrom, *et al.*, 1995, Mountain, *et al.*, 1998, Greibe, 2003) incluem esta variável de forma a captar efeitos de vários fatores, tais como, a implementação de estratégias, políticas ou programas educacionais de segurança rodoviária a nível local ou nacional, fatores económicos, condições temporais, etc. Geralmente, esta variável tem um efeito negativo na ocorrência de acidentes, isto é, verifica-se uma tendência para a diminuição dos acidentes ao longo do tempo. Esta variável foi incluída no modelo através de uma função geométrica, considerando-se assim que de ano para ano a variação é a mesma (Mountain, *et al.*, 1998). Esta simplificação foi testada considerando uma variável binária para cada ano, não se tendo verificado variações significativas. Adicionalmente, para se testar a eventual existência de correlação temporal, aplicou-se o teste de razão de verosimilhança tal como realizado por Poch e Mannering (1996), tendo-se concluído que, se existir, esta não afeta significativamente os valores dos parâmetros estimados.

Por último, os valores do volume de tráfego foram estimados por um modelo de tráfego a partir do programa de cálculo “SATURN”. Com base nos dados fornecidos pela divisão de controlo de tráfego da câmara municipal do Porto, obtidos a partir de contadoras de tráfego (espiras electromagnéticas) instaladas em algumas zonas da cidade, calculou-se o tráfego médio diário anual (TMDA). Diversos estudos, referentes ao nível do planeamento, utilizaram a simulação de tráfego como método de obtenção de dados de tráfego, já que nesta fase ainda não é possível ter dados reais (Lord e Persaud, 2004, Hadayeghi, *et al.*, 2010).

Eventuais correlações entre as variáveis foram analisadas, podendo-se assumir que estas não estão correlacionadas ($\rho \leq 0.3$). A Tabela 1 apresenta uma breve descrição estatística das variáveis incluídas no modelo desenvolvido neste estudo.

Tabela 1 – Descrição estatística das variáveis do modelo

Variável	Min.	Máx.	Média	Desvio Padrão.
Número de acidentes	0	27	2.85	3.90
TMDA	142.37	64067.80	15240.38	11699.49
Comprimento do segmento (metros)	20.71	3342.78	313.18	352.56
Densidade de intersecções minoritárias	0.00	32.04	4.57	5.18
Elevada densidade habitacional (OS1)	0	1	0.55	0.50
Baixa densidade habitacional (OS2)	0	1	0.22	0.42
Empresarial (OS3)	0	1	0.03	0.17
Edifícios comunitários (OS4)	0	1	0.06	0.23
Centro histórico (OS5)	0	1	0.14	0.35
Via distribuidora local	0	1	0.50	0.50
Via distribuidora principal	0	1	0.50	0.50

Como se pode depreender dos valores apresentados na Tabela 1, verifica-se uma elevada heterogeneidade da rede, no entanto, muito comum em meios urbanos de cidades históricas como é o caso da cidade do Porto. De notar, que a ocupação do solo e classificação hierárquica das vias são variáveis binárias (apenas tomam o valor 0 ou 1).

Tendo em conta a natureza ordinal, com eventual correlação entre as categorias definidas, considerou-se o modelo ordenado para esta abordagem qualitativa. Testou-se quer o modelo ordenado probit quer o modelo ordenado logit, sendo os resultados muito semelhantes tal como seria de esperar, pois apenas divergem na distribuição considerada para a componente estocástica da regressão latente. Assim, como o modelo ordenado probit apresentou medidas de avaliação da qualidade do ajuste ligeiramente superiores, considerou-se este modelo.

O modelo ordenado é estruturado a partir da regressão latente em que as variáveis independentes e respetivas formas funcionais são as mesmas da equação:

$$y_n^* = x_n' \beta + \varepsilon_n \quad n = 1, \dots, N \quad (2)$$

em que y_n^* : componente não observada
 x_n' : vector de variáveis independentes
 β : vector de parâmetros
 N número total de segmentos

Na Equação (2), a componente não observada y_n^* traduz o impacte das variáveis e está relacionado com y_n da seguinte forma:

$$y_n = \begin{cases} 0 & \text{if } y_n^* \leq 0 & (\text{baixo}) \\ 1 & \text{if } 0 < y_n^* \leq \mu & (\text{médio}) \\ 2 & \text{if } y_n^* > \mu & (\text{alto}) \end{cases} \quad (3)$$

em que μ : valor fronteira (positivo)

Na Equação (3), as três categorias codificadas como 0, 1 e 2 representam os três níveis de insegurança referidos anteriormente.

As probabilidades associadas a cada categoria obtidas pelo MOP são:

$$P_n(0) = \Pr(y_n = 0) = \Phi(-x_n' \beta), \quad (4)$$

$$P_n(1) = \Pr(y_n = 1) = \Phi(\mu - x_n' \beta) - \Phi(-x_n' \beta), \quad (5)$$

$$P_n(2) = \Pr(y_n = 2) = 1 - \Phi(\mu - x_n' \beta). \quad (6)$$

em que $\phi(\cdot)$: função da distribuição cumulativa normal

Através do método da máxima verosimilhança, os parâmetros β e μ são estimados. É de salientar que na análise dos modelos probabilísticos não lineares, como é o caso do modelo ordenado, é importante ter em conta que os parâmetros β estimados não representam o efeito marginal das variáveis independentes consideradas no modelo. Por esse facto, quando se pretende analisar o efeito da variação dos valores das variáveis na probabilidade calculam-se os efeitos marginais:

$$\frac{\partial \text{Prob}(y=0)}{\partial x} = -\phi(x'_n \beta), \quad (7)$$

$$\frac{\partial \text{Prob}(y=1)}{\partial x} = [\phi(x'_n \beta) - \phi(\mu - x'_n \beta)]\beta, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \text{Prob}(y=2)}{\partial x} = \phi(\mu - x'_n \beta)\beta. \quad (9)$$

em que $\phi(\cdot)$: densidade normal padrão

Como se pode constatar das Equações (7) e (9), a variação dos efeitos marginais da primeira e última categoria estão diretamente relacionados com os sinais dos parâmetros β . Na categoria intermédia, Equação (8), o efeito do sinal do parâmetro β é mais ambíguo pois depende das duas densidades. Note-se que os efeitos marginais das variáveis binárias são a diferença entre as duas probabilidades associadas à variável binária com valor 0 e 1 (sem e com a variável, respetivamente): $\text{Pr}[y/x=1] - \text{Pr}[y/x=0]$.

4. RESULTADOS DO MODELO

Os resultados da estimação do MOP e os efeitos marginais para cada variável são apresentados na Tabela 2. Como se pode concluir da tabela, os parâmetros das variáveis independentes e do parâmetro fronteira foram estimados com um nível de confiança de 95%.

Tabela 2 – Resultados da estimação do MOP

Parâmetro	Valor estimado	Desvio padrão	P[Z>z]	Efeitos marginais		
				Baixa (0)	Média (1)	Alta (2)
Constante	-9.984	0.505	0.0000	-	-	-
LnTMDA	0.393	0.045	0.0000	-0.129	0.116	0.013
LnComprimento	1.107	0.047	0.0000	-0.364	0.328	0.036
Tendência temporal	-0.056	0.022	0.0119	0.018	-0.017	-0.002
Densidade de intersecções min.	0.038	0.007	0.0000	-0.012	0.011	0.001
Baixa dens. habitacional (OS2)	-0.287	0.082	0.0005	0.089	-0.081	-0.008
Empresarial (OS3)	0.614	0.175	0.0005	-0.229	0.190	0.038
Edifícios comunitários (OS4)	-0.494	0.132	0.0002	0.138	-0.128	-0.010
Centro histórico (OS5)	0.299	0.093	0.0012	-0.104	0.092	0.013
Via distribuidora local	-0.186	0.069	0.0076	0.061	-0.055	-0.006
μ	1.614	0.062	0.0000	-	-	-
Função logarítmica de verosimilhança (s/ variáveis)	-1682.965					
Função logarítmica de verosimilhança (c/ variáveis)	-1158.103					
Percentagem de observ. correctamente previstas	73%					

Os valores dos parâmetros estimados pelo MOP indicam o efeito das variáveis independentes na propensão latente de ocorrer determinada categoria de sinistralidade num local. Contudo, os parâmetros dos modelos probabilísticos não lineares não traduzem a magnitude e o sentido

do efeito das variáveis independentes nas respetivas categorias de sinistralidade. Por esse facto, analisou-se os efeitos marginais das variáveis em cada categoria e que estão apresentados na Tabela 2. Note-se que a soma dos efeitos marginais para cada variável é zero que decorre da condição da soma de probabilidades igual a um (Greene, 2008).

Os efeitos marginais do volume de tráfego (TMDA), do comprimento do segmento e da densidade de intersecções minoritárias são positivos nas categorias 1 (médio) e 2 (alto), sugerindo como tal um maior efeito nas categorias de maior grau de insegurança. De facto, estes valores estão em linha com os efeitos apontados noutros estudos de modelos de resposta quantitativa (Mountain, *et al.*, 1996, Karlaftis e Tarko, 1997, Mountain, *et al.*, 1998, Ivan, *et al.*, 2000, Greibe, 2003, Wedagama, *et al.*, 2006, Wier, *et al.*, 2009) e com os resultados obtidos por um modelo BN aplicado à mesma base de dados (Ferreira, 2010, Ferreira e Couto, 2011). O efeito da tendência temporal é negativo nas duas últimas categorias (1 e 2) e, portanto, aponta para uma diminuição anual de frequência de acidentes em segmentos com maior número de acidentes. Os parâmetros das variáveis binárias que representam a zona empresarial e zona centro histórica (OS3 e OS5, respetivamente) apresentam valores positivos associados às categorias 1 e 2. Mais uma vez, estes resultados estão em linha com estudos anteriores (Ivan, *et al.*, 2000, Greibe, 2003) mas também, com as expectativas tendo em conta as características das zonas em estudo. A ocupação do solo tipo 3 (zona empresarial), concentra-se numa única zona do Porto e caracteriza-se por dois tipos de funções: durante o dia verifica-se essencialmente um elevado tráfego misto (pesado e ligeiro) para acesso às empresas e com um número elevado de estacionamento para cargas e descargas muitas vezes em situação ilegal; durante a noite é uma zona de diversão noturna (bares, discotecas, restaurantes, etc.) e como tal com potenciais comportamentos de maior risco por parte dos condutores. A ocupação do solo do tipo 5 concentra-se no centro da cidade onde se situam comércio e serviços. Esta é uma zona caracterizada por vias geometricamente pouco adaptadas às funções atribuídas, havendo também uma elevada densidade de construção. Caracteriza-se ainda por ser uma zona com elevada afluência de peões em conjunto com a existência de várias paragens de transporte público. Também os valores negativos dos parâmetros estimados para OS2 e OS4 estão em linha com as expectativas. Na realidade, zonas com edifícios de baixa densidade, como é o caso do OS2 estão associadas a um menor número de acidentes. A OS4 compreende apenas duas zonas da cidade em que uma das zonas abrange um pólo universitário e um hospital e a outra, um pólo universitário e um pavilhão desportivo. A diminuição do risco de acidentes nestas zonas pode dever-se a fatores, tais como, pouca densidade de construção, infra-estruturas viárias adequadas e a sazonalidade do tráfego (períodos de tempo com elevado congestionamento e número de conflitos em oposição a outros períodos de tempo com reduzido congestionamento e conflitos de tráfego). Relativamente à classificação hierárquica das vias, e tendo como base de comparação as vias distribuidoras principais, verifica-se um decréscimo nos acidentes nos segmentos classificados como vias distribuidoras locais. Este decréscimo não contraria as características habitualmente apontadas por esta classe hierárquica na medida em que estas vias são, em geral, geometricamente mais urbanas, isto é, com características que se traduzem num comportamento do condutor de menor risco, nomeadamente na prática de velocidades mais reduzidas.

De notar que, tal como mostra a Tabela 2, a percentagem de observações correctamente previstas são de 73%.

Determinou-se ainda, a distribuição percentual dos 396 segmentos pelas três categorias em estudo, obtendo-se que 69% dos segmentos são de baixo nível de insegurança, 27% de médio nível de insegurança e 4% de alto nível de insegurança. Este tipo resultado permite uma análise de previsão e/ou de avaliação comparativa do risco de um determinado cenário.

5. ANÁLISE DE CENÁRIOS

Com o objetivo de, por um lado, melhor descrever as vantagens do modelo qualitativo e, por outro lado, exemplificar uma aplicação do modelo e respetiva interpretação dos resultados, definiu-se cenários hipotéticos para um segmento de referência com determinados atributos. Como tal, apresenta-se na Tabela 3 a percentagem de probabilidades para cada uma das três categorias, determinadas tendo em conta os atributos de cada cenário, bem como o número esperado de acidentes resultante de um modelo BN para os mesmos atributos. Partiu-se de um cenário de referência (C_0) em que o segmento tem um comprimento de 600 metros, com um fluxo de tráfego de 40 000 TMDA e com uma intersecção minoritária. O segmento de referência é classificado como uma via distribuidora local e está localizado numa zona de baixa densidade habitacional (OS2). Com estes atributos, o segmento de referência está associado a uma probabilidade de 73% de ocorrer a categoria alto nível de insegurança. Assim, dado que as categorias “alto” e “médio” têm maior probabilidade de ocorrer, pode-se concluir que o segmento está associado a um elevado risco de acidente.

Tabela 3 – Impacto dos cenários: resultados do MOP e do modelo BN

	Prob(y=0) %	Prob(y=1) %	Prob(y=2) %	Y ^{a)} (número acidentes)
C ₀ : Cenário de referência: TMDA=40000;Comp.=600 m; Densid. inters. minor.=1.67 ; OS2; Via distrib. local	1	26	73	5.2
C ₁ : +30% de TMDA	1	19	80	5.7
C ₂ : De OS2 para OS4	9	52	39	5.3
C ₃ : De dist. local para dist. principal	0	14	86	6.2
C ₄ : Efeitos acumulados = C ₁ +C ₂ +C ₃	1	21	78	6.9

a) Estes valores previstos resultam de um modelo BN, cujos parâmetros foram estimados com um nível de confiança de 95% e com um $R^2_{FT} = 67\%$ (Ferreira, 2010).

Nos três cenários em que um dos atributos iniciais do segmento foi alterado, constata-se que apenas se verificou uma alteração significativa nos valores das probabilidades quando se alterou a ocupação do solo de OS2 para OS4. Neste caso, a categoria 1 (“médio”) apresenta a maior probabilidade (52%). O aumento de 30% do TMDA e da classificação hierárquica de distribuidora local para principal agravou ligeiramente a probabilidade de ocorrer a categoria 2 (alto nível de insegurança). O resultado dos efeitos acumulados das referidas alterações aos atributos de referência do segmento é apresentado na última linha da Tabela 3 (C₄). Estes efeitos acumulados mantêm o nível de alto risco associado ao cenário inicial (C₀), pois o nível “alto” tem maior probabilidade de ocorrer.

Comparando os resultados do MOP com o número de acidentes previstos por um modelo BN desenvolvido para a mesma base de dados e com as mesmas variáveis independentes, verifica-se que este último, não se situa, na maior parte dos cenários, na categoria de maior probabilidade de ocorrer (alto nível de insegurança), correspondendo em todos os casos à categoria médio nível de insegurança. Para uma conforme comparação destes resultantes seria, contudo, necessário definir critérios adequados de homogeneização das duas

abordagens distintas. No entanto, importa salientar nesta comparação que com os resultados do MOP é possível realizar uma análise de risco (análise essa que pressupõe a atribuição de probabilidades), evitando-se simultaneamente a avaliação da gravidade através de um valor paradoxalmente específico numa fase cujo nível de informação é escasso e com uma escala de intervenção muito alargada.

6. RESUMO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem habitualmente mais utilizada para analisar a segurança rodoviária na fase de planeamento, baseia-se na utilização de técnicas estatísticas do tipo MLG, mais especificamente assumindo a distribuição BN ou de Poisson para o erro da regressão. Nesta abordagem, a variável dependente é normalmente um número de acidentes por entidade viária ou por área, ou seja, uma resposta quantitativa do modelo. Contudo, ao nível do planeamento da rede rodoviária, e em particular no processo de decisão, a avaliação da segurança por uma medida quantitativa não se enquadra plenamente nas características específicas desta fase.

Assim, neste estudo apresenta-se uma abordagem alternativa cuja variável dependente, a partir da qual se analisa o risco de acidente, é uma categoria à qual se associa um grau de (in)segurança. Assim, definiu-se três categorias que refletissem a gravidade em termos de insegurança com base na frequência dos acidentes. Nesta abordagem diferentes critérios podem ser ajustados à base de dados e tipo de entidade viária em análise, assim como aos objetivos pretendidos.

Considerando os dados de segmentos da rede viária da cidade do Porto para um período de 5 anos, aplicou-se um MOP para estimar os parâmetros e calcular os efeitos marginais das variáveis incluídas no modelo. Verificou-se que todos os parâmetros foram estimados para um nível de confiança de 95% e que os valores dos efeitos marginais estão consistentes com os obtidos por um modelo BN para a mesma base de dados ou relativamente a outros estudos realizados. Para melhor exemplificar uma aplicação do modelo, considerou-se ainda a aplicação do modelo estimado a diferentes cenários de um segmento hipotético. O resultado do MOP compreende valores probabilísticos associados às três categorias (graus de insegurança) consideradas, a partir dos quais se pode aferir um risco para cada cenário. Esta aplicação permitiu facilmente analisar a influência dos atributos (variáveis independentes) no risco associado ao segmento. Este resultado foi ainda comparado com o número esperado de acidentes para o mesmo cenário obtido a partir de um modelo BN. Para além do facto de o número médio de acidentes estimado não coincidir com a categoria com maior probabilidade de ocorrer segundo o MOP, depreendeu-se que estes resultados quantitativos não se revelam eventualmente como os mais apropriados numa análise de risco em fase de planeamento, sendo eventualmente mais ajustado a uma fase seguinte onde a informação da rede seja mais pormenorizada e disponível.

Assim, com este estudo pretende-se apresentar uma alternativa aos modelos habitualmente aplicados em fase de planeamento de forma a constituir uma ferramenta para os planeadores e decisores de redes de transportes em meio urbano. Contudo, futuras aplicações a outras bases de dados, de forma a validar os resultados obtidos e a eventual introdução de outras variáveis independentes devem ser consideradas. Outros modelos de resposta qualitativa devem ainda ser testados de forma a melhorar o ajuste quer aos dados quer às categorias consideradas, nomeadamente considerando a análise de modelos com mecanismo não-ordenado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Aty, M. (2003) Analysis of driver injury severity levels at multiple locations using ordered probit models. *Journal of Safety Research*, 34, 597-603.
- ANSR (2009) *Sinistralidade rodoviária. Elementos estatísticos de 2009*. Observatório de Segurança Rodoviária, ANSR, Lisboa.
- Bhat, C. R. e Pulugurta, V. (1997) A comparison of two alternative behavioral choice mechanism for household auto ownership decisions. *Transportation Research Part B*, 32, 61-75.
- Carson, J. e Mannering, F. (2001) The effect of ice warning signs on ice-accident frequencies and severities. *Accident Analysis and Prevention*, 33, 99-109.
- Comission of the European Communities (2009) *Action Plan on Urban Mobility*. Brussels.
- Dissanayake, D., Aryaija, J. e Wedagama, D. M. P. (2009) Modelling the effects of land use and temporal factors on child pedestrian casualties. *Accident Analysis and Prevention*, 41, 1016-1024.
- Eluru, N., Bhat, C. R. e Hensher, D. A. (2008) A mixed generalized ordered responde model for examining pedestrian and bicyclist injury severity level in traffic crashes. *Accident Analysis and Prevention*, 40, 1033-1054.
- Ferreira, S. (2010) *A Segurança Rodoviária no processo de planeamento de redes de transportes*. Ph.D. dissertation, University of Porto.
- Ferreira, S. e Couto, A. (2011) Urban road planning: a safety perspective. *1st International Conference on Transportation Information and Safety*, ASCE proceedings, Wuhan, China.
- Fridstrom, L., Ifver, J., Ingebrigtsen, S., Kulmala, R. e Thomsen, L. K. (1995) Measuring the contribution of randomness, exposure, weather and daylight to the variation in road accident counts. *Accident Analysis and Prevention*, 27, 1-20.
- Greene, W. H. (2008) *Econometric Analysis*. Sixth Edition. Pearson International Edition, New Jersey.
- Greibe, P. (2003) Accident prediction models for urban roads. *Accident Analysis and Prevention*, 35, 273-285.
- Guevara, F. L. d., Washington, S. P. e Oh, J. (2004) Forecasting Crashes at the Planning Level. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1897, 191-199.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A. e Persaud, B. (2010) Development of planning level transportation safety tools using Geographically Weighted Poisson Regression. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 676-688.
- Hadayeghi, A., Shalaby, A. S. e Persaud, B. (2003) Macrolevel accident prediction models for evaluating safety of urban transportation systems. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1840, 87-95.
- Ivan, J. N., Wang, C. e Bernardo, N. R. (2000) Explaining two-lane highway crash rates using land use and hourly exposure. *Accident Analysis and Prevention*, 32, 787-795.
- Karlaftis, M. G. e Tarko, A. P. (1997) Heterogeneity considerations in accident modeling. *Accident Analysis and Prevention*, 30, 425-433.
- Kockelman, K. M. e Kweon, Y.-J. (2002) Driver injury severity: an application of ordered probit models. *Accident Analysis and Prevention*, 34, 313-321.
- Levine, N., Kim, K. E. e Nitz, L. H. (1995) Spatial Analysis of Honolulu motor vehicle crashes: II. Zonal generators. *Accident Analysis and Prevention*, 27, 675-685.
- Lord, D. e Persaud, B. N. (2004) Estimating the safety performance of urban road transportation networks. *Accident Analysis and Prevention*, 36, 609-620.
- Mountain, L., Fawaz, B. e Jarrett, D. (1996) Accident prediction models for roads with minor junctions. *Accident Analysis and Prevention*, 28, 695-707.
- Mountain, L., Maher, M. e Fawaz, B. (1998) The influence of trend on estimates of accidents at junctions. *Accident Analysis and Prevention*, 30, 641-649.
- Naderan, A. e Shahi, J. (2010) Aggregate crash prediction models: Introducing crash generation concept. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 339-346.
- Poch, M. e Mannering, F. (1996) Negative Binomial analysis of intersection-accident frequencies. *Journal of Transportation Engineering*, 122, 105-113.
- Qi, Y., Smith, B. L. e Guo, J. (2007) Freeway accident likelihood prediction using a panel data analysis approach. *Journal of Transportation Engineering*, 133, 149-156.
- Savolainen, P. T., Mannering, F., Lord, D. e Quddus, M. (2011) The statistical analysis of highway crash-injury severities: a review and assessment of methodological alternatives. *Accident Analysis and Prevention*, 43, 1666-1676.
- Sayed, T. e Lovegrove, G. R. (2006) Macro-level collision prediction models for evaluating neighbourhood traffic safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33, 609-621.

- Tarko, A. P., Inerowicz, M., Ramos, J. e Li, W. (2008) Tool with road-level crash prediction for transportation safety planning. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2083, 16-25.
- Train, K. (2003) Discrete Choice Methods with Simulation. C. U. Press. <http://elsa.berkeley.edu/books/choice2.html>
- Wang, X. e Abdel-Aty, M. (2008) Analysis of left-turn crash injury severity by conflicting pattern using partial proportional odds models. *Accident Analysis and Prevention*, 40, 1674-1682.
- Wedagama, D., Bird, R. e Metcalfe, A. (2006) The influence of urban land-use on non-motorised transport casualties. *Accident Analysis and Prevention*, 38, 1049-1057.
- Wier, M., Weintraub, J., Humphreys, E. H., Seto, E. e Bhatia, R. (2009) An area-level model of vehicle-pedestrian injury collisions with implications for land use and transportation planning. *Accident Analysis and Prevention*, 41, 137-145.