

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DE RODOVIAS NA FREQUÊNCIA E SEVERIDADE DE ACIDENTES VIÁRIOS EM CURVAS: O CASO DA BR 116

César Luís Andriola

Tânia Batistela Torres

Daniel Sergio Presta García

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Laboratório de Sistemas de Transportes (LASTRAN)

RESUMO

Dada a necessidade de prover rodovias mais seguras aos usuários, este trabalho buscou identificar os impactos dos parâmetros geométricos na frequência e na severidade dos acidentes em curvas de rodovias de pista simples. Esta análise foi conduzida para 225 quilômetros de trechos rodoviários de pista simples da BR 116 no estado do Rio Grande do Sul. A reconstituição geométrica rodoviária viabilizou a construção de uma base de dados que reúne as características dos acidentes registrados entre 2007 e 2016 pela Polícia Rodoviária Federal (PRF) e os parâmetros geométricos, permitindo a análise da frequência e da severidade dos acidentes a partir desses parâmetros. Foram estimados os modelos econométricos: (i) binomial negativo (BN) para a modelagem da frequência; e (ii) logit ordenado (LO) para a severidade de acidentes. Os resultados indicam que o aumento da declividade e da superelevação impactam no aumento da frequência de acidentes e na redução da severidade.

ABSTRACT

Given the need to provide safer roads, this paper sought to identify geometrical parameters impact in frequency and severity of accidents in two-lane highway curves. This analysis was carried out on 225 kilometers of the two-lane highway BR 116 in the state of Rio Grande do Sul. The performed geometrical road reconstruction made possible the building of a database that combines the characteristics of accidents registered between 2007 to 2016 by the Federal Highway Police (PRF) and the geometrical parameters, allowing to analyze accidents' frequency and severity. Two econometric models were estimated: (i) negative binomial (NB) for frequency modeling; and (ii) ordered logit (OL) for accidents' severity. The results show that the increase in downward slope and the superelevation contribute to the increase of accidents' frequency, though these helped on reducing its severity.

1. INTRODUÇÃO

Diante da possibilidade de os acidentes de trânsito causarem a perda de até 1,9 milhão de vidas por ano até 2020, governos de todo o mundo se comprometeram a tomar medidas para prevenir os acidentes de trânsito através do Plano de Ação Global para a Década (2011 a 2020) (WHO, 2011). Tais objetivos foram incorporados às diretrizes de Desenvolvimento Sustentável, através da Agenda 2030 (United Nations, 2017), de forma que o desenvolvimento deve ser pautado nos pilares de segurança: gestão de segurança viária, rodovias e mobilidade seguras, veículos seguros, usuários seguros e resposta à acidentes (United Nations, 2011).

Os acidentes viários resultam de três fatores contribuintes: usuário, veículo e via (Treat et al., 1979). As pessoas cometem erros e são fisicamente vulneráveis em acidentes, enquanto que o sistema viário, da maneira como ainda é estruturado, contribui para que esses erros gerem acidentes (ITF, 2016). Nesse sentido, um projeto rodoviário seguro permite compensar, em parte, os riscos oferecidos pelos outros fatores, contribuindo com a redução da frequência dos acidentes e minimizando a severidade daqueles que ocorrerem.

Embora a maior parte dos acidentes em rodovias aconteça em trechos retos, são em curvas que ocorrem acidentes com maior severidade (Radimsky et al, 2016). Diversos estudos demonstram a necessidade de atualizar as atuais diretrizes para o projeto de curvas horizontais, principalmente no que se refere a trechos com elevadas declividades. O manual para projeto geométrico de rodovias vigente nos Estados Unidos (AASHTO, 2011) possui recomendações

quanto ao projeto de curvas em grandes declividades, ao contrário do que ocorre no manual vigente para as rodovias federais brasileiras (DNER, 1999), que não aborda o tema.

Diversos estudos vêm abordando a frequência e ou a severidade de acidentes em rodovias, identificando os parâmetros geométricos que potencialmente as impactam. Uma série de estudos é dedicada à análise de rodovias de pista simples utilizando modelagens estatísticas e buscando determinar a influência de parâmetros geométricos na frequência de acidentes. Nesses estudos foram identificadas, na medida em que os valores desses parâmetros aumentam, a influência do ângulo central no aumento (Aram, 2010; Dong et al., 2015), do desenvolvimento no aumento (Aram, 2010; Schneider et al, 2010), do raio na redução (Schneider et al, 2010; Ma e Li, 2010; Hosseinpour et al., 2016; Cruz et al., 2017) e da superelevação no aumento da frequência de acidentes (Aram, 2010).

Também foram identificados esforços que analisam os diferentes números de faixas ou tipos de veículos, mas que também buscaram determinar a influência dos parâmetros geométricos na frequência de acidentes. Esses estudos indicam, na medida em que os valores desses parâmetros aumentam, a influência do ângulo central no aumento (Rengarasu et al, 2009; Garnaik, 2014), da declividade no aumento (Agbelie, 2016; Shankar et al, 1995), do raio na redução (Garnaik, 2014; Iyina et al., 1997) e da superelevação no aumento da frequência de acidentes (Garnaik, 2014). Outras variáveis encontradas como influentes foram a velocidade no aumento (Dong et al., 2015), a iluminação na redução (Agbelie, 2016; Dong et al., 2015), a condição climática desfavorável no aumento (Shankar et al, 1995) e a redução da faixa etária do condutor no aumento da frequência de acidentes (De Oña et al, 2011).

Os estudos que analisaram a influência de parâmetros geométricos na severidade de acidentes em rodovias de pista simples identificaram a influência apenas do raio na redução da severidade de acidentes (Schneider et al, 2009). Outras variáveis encontradas como relevantes nesse caso foram a velocidade e influência de álcool (Ma et al., 2015), atuando no sentido de aumentar a severidade de acidentes. A presença de poucos estudos sobre a severidade de acidentes em rodovias de pista simples, especificamente, se dá por essa análise geralmente ser conduzida a partir de variáveis ambientais e do usuário.

Há ainda, outros estudos, que consideram diferentes números de faixas ou tipos de veículos, mas que também buscaram determinar a influência dos parâmetros geométricos na severidade de acidentes. Esses estudos indicam, na medida em que os valores desses parâmetros aumentam, a influência da declividade no aumento (Anastasopoulos et al., 2012; Chikkakrishna et al, 2017), do raio na redução (Anastasopoulos et al., 2012) e da superelevação na redução da severidade de acidentes (Sameen e Pradhan 2016). Outras variáveis encontradas como relevantes nesse caso foram a velocidade no aumento da severidade (Renski et al, 1999; Chikkakrishna et al, 2017), a iluminação na redução da severidade (De Oña et al, 2011). Para a ocorrência de condição climática desfavorável não há consenso, podendo ter influência no aumento (Anastasopoulos et al., 2012; Ma et al., 2015) ou na redução da severidade (Castro et al, 2013; Chen et al., 2016; Shrestha e Shrestha, 2017; Milton et al, 2008), a faixa etária elevada no aumento (Chen et al., 2016), o elevado atrito entre pista e veículo na redução (Anastasopoulos et al., 2012), a influência de álcool no aumento (Chen et al., 2016) e a presença de cinto de segurança na redução da severidade de acidentes (Hernandez e Anderson, 2018).

Nesse contexto, este estudo tem o objetivo de identificar os impactos que os parâmetros geométricos causam na frequência e na severidade dos acidentes em curvas de rodovias de pista

simples. Como objetivo específico, este estudo concilia o objetivo de desenvolvimento de uma base de dados capaz de associar os registros de acidentes aos parâmetros geométricos da rodovia, obtida pelo processo de reconstituição geométrica. Para isso, este artigo está estruturado em cinco seções, incluindo esta introdução e revisão teórica. A seção 2 descreve o processo de construção da base de dados, contendo as informações de acidentes em curvas e os respectivos parâmetros geométricos, a seção 3 apresenta a análise de dados do caso estudado e a seção 4 descreve a estimação dos modelos e a discussão dos resultados obtidos, enquanto que a seção 5 traz as considerações finais do estudo.

2. METODO

Este trabalho foi desenvolvido a partir de duas etapas metodológicas principais: (i) construção da base de dados a partir de reconstituição geométrica da rodovia, ajustes quilométricos, processamento dos parâmetros geométricos e compatibilização com os registros de acidentes (DPRF, 2017); e (ii) modelagem da frequência e severidade dos acidentes.

2.1. Construção da base de dados

Foram adotados conceitos de projeto de rodovias para reconstituir o projeto do trecho rodoviário analisado em formato digital, de modo a ser possível a extração dos parâmetros geométricos. Em seguida foi realizado o ajuste das quilometragens resultantes da reconstituição geométrica aos marcos quilômetros existentes ao longo da rodovia. Por fim, obtida a classe e relevo da rodovia, pode-se extrair os parâmetros geométricos.

2.1.1 Reconstituição geométrica

A reconstituição geométrica permite a obtenção de elementos planimétricos, topográficos e altimétricos da rodovia. A rodovia a ser reconstituída é dividida em trechos conforme informações do Sistema Nacional de Viação (SNV) vigente (BRASIL, 2011), de modo a simplificar o processo e reduzir o poder de processamento necessário. Para esse processo, é necessária uma base de dados de pontos com coordenadas georreferenciadas, com precisão suficiente para a identificação das curvas de concordância horizontais e verticais.

A Figura 1 ilustra as etapas do processo de reconstituição geométrica, que se inicia com a importação dos pontos de coordenadas para o *software* SAEPRO (Sistema Avançado para Estudos e Projeto Viários) [versão 1.0.0.26]. Cada uma das linhas de pontos disposta na etapa 1 representa uma faixa de rolamento da rodovia, percorrida pelo veículo que realizou a coleta dos pontos por meio de equipamento GPS. Na etapa 2, a partir dos pontos disponíveis, é obtido para os segmentos em tangente, retas que melhor se adaptam a esses pontos. A partir dessas retas é obtido o eixo da rodovia no trecho em questão, e a partir desse, as curvas de concordância horizontais.

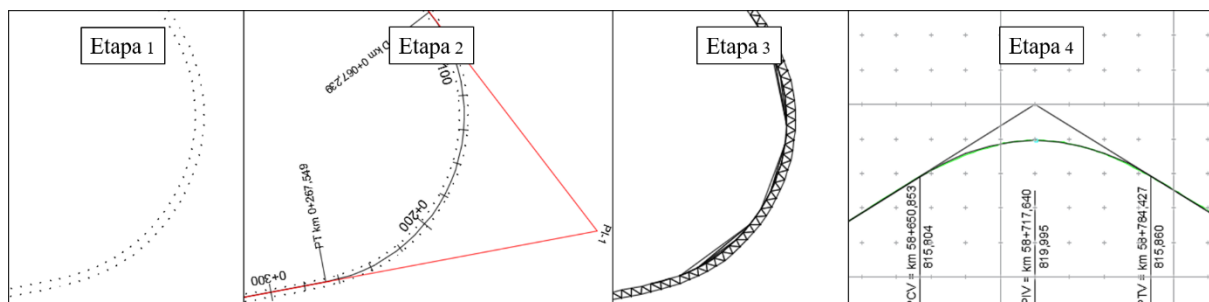


Figura 1- Etapas do processo de reconstituição geométrica

Na etapa 3 é obtida a superfície do terreno, necessária para a reconstituição altimétrica. Essa superfície é recomposta pelo processamento da geometria pelo SAEPRO, mediante a criação de uma malha irregular triangularizada. A superfície obtida representa a real configuração da rodovia, de modo que a definição do perfil altimétrico da rodovia, na etapa 4, deve buscar o melhor ajuste possível com o terreno obtido.

2.1.2 Ajustes quilométricos

Tendo em vista que a coleta da localização dos acidentes indicada no registro de acidentes, até o ano de 2017, era realizada apenas com base nos marcos quilométricos existentes ao longo da rodovia, é necessário verificar os valores de quilometragem resultantes da reconstituição geométrica em comparação com a localização dos marcos quilômetros. Para esse processo é utilizada a ferramenta *Street View* (Google Earth), para localizar os marcos quilométricos mais próximos do início e fim de cada trecho, e o *software* SAEPRO para realizar o ajuste. Caso os valores diverjam, esses devem ser corrigidos conforme Figura 2, onde o valor da quilometragem inicial do trecho é alterada de modo que a posição do marco quilométrico coincida com a quilometragem no mesmo local.

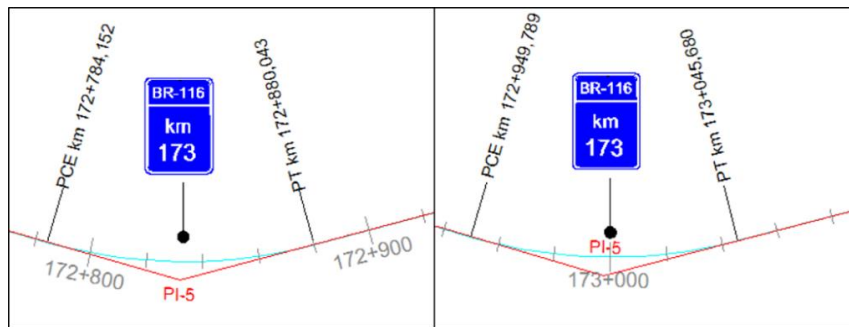


Figura 2 - Exemplo de correção do erro do SNV em relação ao marco quilométrico

2.1.3 Extração e filtragem dos parâmetros

Os parâmetros geométricos necessários para as análises propostas são obtidos por meio dos relatórios de planimetria (RPL) e altimetria (RAT) gerados pelo SAEPRO. O Ângulo Central, Desenvolvimento e Raio são obtidos diretamente do RPL, já a Superelevação máxima para a classe e relevo da rodovia (e_{max}) pode ser obtida a partir dos raios fornecidos pelo RPL, quando aplicados na equação (1).

$$e = e_{max} \times \left(\frac{2 \times R_{min}}{R} - \frac{R_{min}^2}{R^2} \right) \quad (1)$$

Em que R_{min} é o raio mínimo para determinada classe e relevo e R é o raio da curva. A aplicação dessa equação é condicionada à determinação da classe e relevo dos trechos da rodovia, que são obtidos analisando o raio mínimo, constante k mínima e declividade máxima existente para cada trecho analisado. A Declividade de acidentes que ocorram em rampa é obtida diretamente do RAT, enquanto para segmentos em curva de concordância vertical, simplifica-se a mesma por meio de duas rampas, de modo a obter valores pontuais de declividade.

2.2. Modelagem estatística

Nesta seção estão dispostos os procedimentos metodológicos para a estimação dos modelos econométricos para a frequência e a severidade de acidentes, pela aplicação do modelo Binomial Negativo e *Logit* Ordenado, respectivamente. O primeiro passo no processo de modelagem é definição das variáveis candidatas aos modelos, selecionada a partir da revisão

da literatura. A partir da definição das variáveis candidatas é necessário verificar a existência de multicolinearidade, que ocorre quando algumas variáveis independentes compartilham variância com outras variáveis independentes. A multicolinearidade foi avaliada pelo fator de inflação da variância (VIF), que traduz o valor de tolerância, o qual expressa diretamente o grau de multicolinearidade em um impacto sobre o processo de estimação. Um valor de VIF igual a 1 indica a inexistência de multicolinearidade e valores de VIF maiores que 10 indicam multicolinearidade elevada, geralmente utilizados como valores de corte (Hair et al., 2009).

2.2.1 Modelo de frequência de acidentes

Para a estimação do modelo de frequência de acidentes, foi necessário identificar o modelo que mais se adequa para os dados disponíveis. Quando a distribuição de frequência dos acidentes não verifica as hipóteses de normalidade, demonstrando assimetria na distribuição, analisa-se a dispersão da distribuição (McCullagh e Nelder, 1989). A análise da superdispersão deve ser realizada, e se confirmada a hipótese de média (μ_i) inferior à variância (μ_i), é indicada a aplicação do modelo Binomial Negativo (Greene, 2012), expresso pela generalização do modelo de Poisson:

$$\ln(\mu_i) = \sum_j \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i = \ln(\lambda_i) + \ln(u_i) \quad (2)$$

Onde: x_{ij} = variáveis explicativas

β_j = parâmetros estimados,

ε_i = termo de erro da distribuição Gamma.

λ_i = número esperado de acidentes.

A função de ligação é dada pela distribuição de Poisson:

$$\lambda_i = \exp(\sum_j \beta_j x_{ij}) \quad (3)$$

A estimação do modelo foi realizada no software *IBM SPSS Statistics 23*, utilizando a técnica de eliminação regressiva (*backward elimination*). Apesar do modelo Binomial Negativo permitir identificar as variáveis significativas e suas influências na frequência de acidentes, a diferença nas escalas das variáveis pode dificultar a compreensão dos resultados. A comparação da magnitude do impacto de cada variável no respectivo modelo pode ser obtida pelo cálculo do efeito marginal (Hilbe, 2011), dado pela Equação 4, sendo que o incremento das variáveis contínuas foi estabelecido como 10% da média de todos os valores existentes de cada uma.

$$\partial E(y|x_{ij})/\partial x = \beta_{ij}[\exp(x_{ij}\beta_j)] \quad (4)$$

Em que x_{ij} é variável explicativa, y é a variável dependente e β é vetor de coeficientes de regressão.

2.2.2 Modelo de severidade de acidentes

Para a construção do modelo de severidade de acidentes, foi estimado o modelo *Logit Ordenado*, o qual é um modelo de escolha discreta, em que a variável dependente severidade é discreta e seus valores traduzem uma ordenação (Small, 1987). O modelo assume que a variável latente y_i^* é uma combinação linear de um conjunto de variáveis explicativas (Greene, 2012), em que os parâmetros β' são estimados pelo método de máxima verossimilhança, que busca maximizar a função:

$$y_i^* = \beta' x_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

Onde: y_i^* = variável dependente

x = vetor de atributos observáveis que determinam a ordem discreta de cada evento;

β' = vetor de parâmetros estimados.

A variável dependente severidade (y_i) assume os valores 1, 2, 3 e 4 para danos materiais, feridos leves, feridos graves e vítimas fatais, respectivamente. No modelo *Logit* Ordenado estima-se a probabilidade generalizada do acidente estar em determinada categoria m , conforme:

$$P(y_i = m) = L(\mu_m - \beta'x_i) - L(\mu_{m-1} - \beta'x_i) \quad (6)$$

$$L(\beta'x) = \frac{e^{\beta'x_i}}{1 + e^{\beta'x_i}} \quad (7)$$

Onde: L = distribuição logística acumulada;

μ_m = pontos de corte;

x = vetor de atributos observáveis que determinam a ordem discreta de cada evento;

β' = vetor de parâmetros estimados.

O modelo *Logit* ordenado foi estimado por eliminação regressiva (*backward elimination*) no software Biogeme (Bierlaire, 2003). O ajuste geral do modelo foi avaliado através do teste da razão de verossimilhança, que demonstra que o modelo obtido é estatisticamente significativo (p-valor <0,05), para o nível de significância de 5%, que indica que a variável independente é significativa ao nível de confiança de 95%. A medida de ajuste geral do modelo é expressa pelo valor de Pseudo-R² (entre 0 e 1, em que 1 significa ajuste exato), no qual valores próximos a 0,4 podem ser considerados bons ajustes (Ortúzar e Willumsen, 2011).

O sinal dos coeficientes estimados para as variáveis indica o impacto positivo ou negativo na severidade dos acidentes, porém, no modelo *Logit* ordenado o cálculo de efeitos marginais é estritamente necessário para a compreensão do efeito das estimativas dos parâmetros individuais. Nesse modelo, o efeito marginal da probabilidade de um acidente ter uma severidade m em relação a uma variável x foi calculado pela Equação 8 (Greene, 2012):

$$P(y_i = m)/\partial x = [L(\mu_m - \beta'x_i) - L(\mu_{m-1} - \beta'x_i)]\beta \quad (8)$$

Para as variáveis contínuas o efeito foi calculado pelo incremento de 10% da média das observações, e para as variáveis discretas pelo incremento de uma unidade. Para variáveis *dummy*, tal relação não faria sentido (GREENE, 2012), assim, o efeito marginal foi calculado como a diferença de probabilidade para x_i , (que é a variável *dummy*) assumindo os valores 0 e 1, conforme Equação 9:

$$x_i = P(y_i = m)|x_i = 1 - P(y = m)|x_i = 0 \quad (9)$$

Valores positivos de β' indicam que um aumento em x_i gerará claramente o aumento (respectivamente, redução) da probabilidade da severidade mais alta (respectivamente, menor). No entanto, não é óbvio o efeito que um valor positivo ou negativo de β' gerará nas probabilidades dos níveis intermediários (Mannering e Bhat, 2014).

3. DADOS

Foram considerados neste estudo trechos de pista simples da BR 116 no Rio Grande do Sul, do quilômetro 0 ao 235. Os acidentes considerados foram capotamento, tombamento, colisão com objeto fixo e saída de pista. Um fato que corrobora essa hipótese é a ocorrência, em curvas dos trechos estudados, de acidentes dos tipos considerados em 72,6% dos casos, contra 30,9% para os demais tipos de acidentes. Foram analisados acidentes entre os anos de 2007 e 2016, considerando que não ocorreram mudanças significativas na geometria da rodovia estudada.

Os segmentos desse estudo foram reconstituídos por meio de um levantamento de coordenadas que incluía toda a extensão da BR-116 no estado do Rio Grande do Sul, onde a partir desse universo limitou-se o estudo para segmentos de pista simples e região montanhosa, de modo a realizar as análises em segmentos mais homogêneos possíveis. Essa delimitação resultou em 12 trechos de pista simples, com um total de 225 quilômetros. Nesse universo foram observados

2007 acidentes em curva dos tipos saída de pista, tombamento, capotamento e colisão com objeto fixo. Os segmentos foram então divididos em trechos, conforme SNV vigente.

O processo de reconstituição geométrica resultou, após simplificações, em trechos de Classe 3 e região Montanhosa, com 729 curvas de concordância horizontal. Após realizado o cruzamento das informações dessa reconstituição com as informações de acidentes, foram obtidos, para cada um dos 2.007 acidentes considerados, sua localização, curva, parâmetros geométricos e outras características disponíveis na base de dados da PRF.

Nos modelos de frequência de acidentes foram utilizadas como variáveis os parâmetros geométricos extraídos da base de dados construída, conforme Tabela 1. Tendo em vista a natureza do modelo de frequência de acidentes, de agrupar os acidentes por curva, não foram incluídas características individuais dos acidentes disponibilizadas na base de dados da PRF.

Tabela 1 - Estatística descritiva para os modelos de frequência

Variável		N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Dependente	Frequência de acidentes (n°)	729	0,000	35,000	2,753	4,397
	Ângulo Central (°)	729	0,370	164,669	44,086	31,722
	Declividade Absoluta (%)	729	0,020	9,908	4,451	2,259
Independentes	Desenvolvimento (m)	729	0,646	427,960	108,116	59,788
	Raio (m)	729	45,420	5490,900	202,447	263,469
	Superelevação (%)	729	2,000	8,000	4,657	1,769

O modelo de severidade de acidentes, pela natureza desagregada de sua análise, permitiu a inclusão das variáveis ambientais e do usuário disponíveis na base de dados da PRF, conforme Tabela 2. Além das variáveis utilizadas no modelo de frequência de acidentes, foram adicionadas as variáveis *dummy* Aclive, Chuva, Dia, Neblina e Velocidade Incompatível.

Tabela 2 - Estatística descritiva de variáveis adicionadas ao modelo de severidade

Variável		N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Dependente	Severidade (0-4)	1938	1,000	4,000	1,533	0,745
	Aclive (0;1)	1938	0,000	1,000	0,377	0,485
	Chuva (0;1)	1938	0,000	1,000	0,328	0,470
Independentes	Dia (0;1)	1938	0,000	1,000	0,621	0,485
	Neblina (0;1)	1938	0,000	1,000	0,034	0,181
	Velocidade Incompatível (0;1)	1938	0,000	1,000	0,478	0,500

As variáveis *dummy* assumem valores de 0 e 1, de modo a indicar a presença ou ausência de determinada característica. As variáveis Chuva e Neblina indicam a condição climática no momento do acidente, a variável Dia indica se o acidente ocorreu de dia ou à noite, e a variável Velocidade Incompatível indica se o motorista estava com uma velocidade incompatível com a velocidade máxima do local em questão.

4. RESULTADOS

Neste capítulo, estão dispostos os resultados da construção dos modelos de frequência de acidentes e do modelo de severidade de acidentes. Nenhuma das variáveis nos modelos de frequência e de severidade indicaram elevada correlação segundo o critério utilizado nesse trabalho de um VIF máximo de 10 (Hair et al., 2009).

4.1 Modelos de frequência de acidentes

Foram estimados modelos Binomiais Negativos para a frequência de acidentes totais,

frequência de acidentes em aclives e frequência de acidentes em declives, de modo a incluir na análise a informação sobre a ocorrência do acidente em aclive ou declive. A técnica de eliminação regressiva (*backwards elimination*) foi aplicada para um nível de significância de 10%, de modo a incluir a variável Superelevação na análise do modelo de frequência de acidentes em declives e as variáveis Declividade Absoluta e Aclive na análise do modelo de severidade de acidentes. Esse procedimento resultou nas variáveis dispostas na Tabela 3, onde coeficientes positivos indicam que a variável aumenta a frequência de acidentes, na medida que seu valor aumenta. Na mesma tabela estão dispostos os efeitos marginais, que permitem uma melhor compreensão dos resultados, tendo em vista as diferentes grandezas das variáveis.

Tabela 3 - Coeficientes e efeitos marginais para os modelos de frequência de acidentes

Variável	Acidentes Totais		Acidentes em Aclive		Acidentes em Declive	
	Coefficiente	Efeito marginal	Coefficiente	Efeito marginal	Coefficiente	Efeito marginal
Ângulo Central (°)			0,009	0,403	0,013	0,602
Declividade Absoluta (%)	0,075	0,338			0,101	0,461
Desenvolvimento (m)	0,005	0,550	0,005	0,517		
Superelevação (%)	0,161	0,777	0,138	0,663	0,065	0,309

4.1.1 Modelo de frequência de acidentes totais

No modelo estimado para a frequência de acidentes totais, foram encontradas como variáveis significativas a Declividade Absoluta, o Desenvolvimento e a Superelevação. Os resultados mostraram a influência dessas variáveis no sentido de aumentar a frequência de acidentes, corroborando com os resultados da literatura.

A Declividade Absoluta se demonstrou significativa para o aumento na frequência de acidentes, à medida que ela aumenta, conforme resultados da literatura (Shankar et al, 1995; Agbelie, 2016). Esse resultado pode ser explicado pela maior dificuldade que regiões de grande declividade apresentam ao motorista e pela redução da margem de segurança do atrito transversal, que contribuem para a saída de pista do veículo (Torbic et al., 2014).

A análise dos efeitos marginais permitiu concluir que o Desenvolvimento possui maior influência na frequência de acidentes do que a Declividade Absoluta, aumentando a frequência de acidentes com o aumento do mesmo, conforme resultados da literatura (Aram, 2010; Schneider et al, 2010). É possível interpretar esse resultado através de um maior tempo de permanência do motorista na curva, pois o desenvolvimento representa o percurso que o veículo percorre na curva horizontal. Apesar disso, um maior Desenvolvimento pode significar maior Raio, Maior Ângulo Central ou ambos.

A terceira variável obtida como significativa foi a superelevação, que segundo os resultados dos efeitos marginais foi a de maior impacto, possuindo mais que o dobro de influência na frequência de acidentes. Apesar do resultado não é possível concluir que a superelevação está diretamente associada a uma maior frequência de acidentes, pois ela possui maior valor em locais mais críticos, com menor Raio, o que explica o resultado. No entanto, esse resultado vai de encontro com o obtido na literatura (Aram, 2010; Garniak, 2014).

4.1.2 Modelo de frequência de acidentes em aclives

Para o modelo estimado, levando em conta apenas os acidentes ocorridos em aclive, as variáveis significativas foram Ângulo Central, Desenvolvimento e Superelevação. A variável Declividade não se demonstrou um fator significativo nesta análise. Uma explicação para tal

resultado é a ocorrência de dois efeitos adversos com o aumento da declividade: o acréscimo da perda de atrito transversal (Torbic et al., 2014) e a redução da velocidade do veículo pelo condutor (Garcia et al, 2013).

O Ângulo Central foi a única variável significativa nesse modelo que não se mostrou significativa no modelo anterior. Segundo os resultados de efeitos marginais a frequência de acidentes aumenta com o aumento do Ângulo Central, o que é intuitivo e se confirma na literatura (Aram, 2010; Garniak, 2014; Dong et al., 2015; Rengarasu et al, 2009), pois um maior Ângulo Central significa curvas mais acentuadas. As variáveis Desenvolvimento e Superelevação já foram discutidas no modelo anterior.

4.1.3 Modelo de Frequência de acidentes em declives

Considerando o modelo de frequência de acidentes apenas em declive, as variáveis significativas foram Ângulo Central, Declividade e Superelevação. A variável Ângulo Central se demonstrou mais significativa do que a variável Superelevação, diferente do observado no modelo de frequência de acidentes em aclives. A variável Declividade, ao contrário do observado no modelo de frequência de acidentes em aclive, foi significativa. Esse resultado pode ser explicado pelo fato dos declives serem mais críticos do que aclives, conforme resultados da literatura (Bonneson, 2000; Eck; French, 2002).

4.2 Modelo de severidade de acidentes

A estimação do modelo de severidade de acidentes, assim como para a frequência de acidentes, foi realizada por eliminação regressiva. Após a aplicação dessa técnica, as variáveis Raio, Dia e Desenvolvimento, respectivamente, não se demonstraram dentro do nível de confiança de 90%. As variáveis significativas são apresentadas pela Tabela 4:

Tabela 4 – Modelo de severidade de acidentes

Variável	Coefficiente	Efeito marginal (Severidade 1)	Efeito marginal (Severidade 2)	Efeito marginal (Severidade 3)	Efeito marginal (Severidade 4)
Ângulo Central (°)	0,0042	-0,00094	0,00056	0,00027	0,00011
Declividade Absoluta (%)	-0,0353	0,00783	-0,00472	-0,00224	-0,00088
Superelevação (%)	-0,1050	0,02323	-0,01409	-0,00658	-0,00256
Aclive (0;1)	-0,1650	0,03655	-0,02211	-0,01040	-0,00405
Chuva (0;1)	-1,2300	0,19352	-0,12902	-0,04724	-0,01726
Neblina (0;1)	-0,6180	0,13774	-0,08987	-0,03489	-0,01297
Velocidade Incompatível (0;1)	0,3570	-0,02805	0,01650	0,00830	0,00326

O aumento da variável Ângulo Central produz, segundo a análise dos efeitos marginais, uma pequena redução na probabilidade de ocorrência da severidade 1 (danos materiais) e um pequeno aumento na probabilidade de ocorrência das severidades 2, 3 e 4 (feridos leves, feridos graves e fatais, respectivamente). Esse resultado pode ser explicado com ajuda dos resultados dos modelos de frequência de acidentes em aclive e declive, onde o Ângulo Central teve influência no aumento da frequência dos acidentes.

A variável Declividade também apresenta pequeno efeito na severidade de acidentes, mas apesar de um aumento na Declividade provocar um aumento na frequência de acidentes, a análise dos efeitos marginais do modelo de severidade de acidentes mostra um aumento na probabilidade de ocorrência da severidade 1 e uma redução da probabilidade de ocorrência das severidades 2, 3 e 4, de acordo com resultados da literatura (Chikkakrishna et al, 2017), e pode ser explicado pela tendência de redução da velocidade operacional que ocorre em elevadas declividades (Garcia et al, 2013), que por sua vez leva a acidentes de menor severidade,

conforme discutido no final deste capítulo.

O último parâmetro geométrico utilizado nos modelos de severidade de acidentes que se mostrou uma variável significativa foi a Superelevação, que produziu resultados semelhantes ao da variável Declividade, e que podem ser interpretados de mesmo modo. A análise dos efeitos marginais produziu um aumento da probabilidade de ocorrência da severidade 1 e uma redução da probabilidade de ocorrência das severidades 2, 3 e 4, semelhantes aos resultados da literatura (Sameen e Pradhan, 2016). A variável Superelevação depende do Raio da rodovia, sendo que uma maior Superelevação ocorre em Raios pequenos, que por sua vez produz velocidades operacionais reduzidas e acidentes de menor severidade.

A variável *dummy* Aclive é importante para um melhor entendimento da variável declividade e por depender do acidente só pode ser analisada no modelo de severidade. Os resultados indicam que a ocorrência de um acidente em aclive aumenta em 3,6% a probabilidade de acidentes de severidade 1 e que a ocorrência de um acidente em declive aumenta a probabilidade de acidentes das severidades 2, 3 e 4 em 2,2%, 1,0% e 0,3%, respectivamente. Esse resultado vai de encontro com os resultados observados nos modelos de frequência de acidentes, onde a variável declividade se mostrou significativa no modelo de frequência de acidentes em declives, que são mais críticos segundo literatura (Bonneson, 2000; Eck e French 2002).

As variáveis *dummy* Chuva e Neblina são ambas variáveis ambientais que produziram um efeito marginal considerável no sentido de aumentar a probabilidade de acidentes de severidade 1 e reduzir a probabilidade de acidentes de severidades 2, 3 e 4, que está de acordo com resultados da literatura (Anastasopoulos et al., 2012; Ma et al., 2015). Esse comportamento se explica pela diminuição do nível de conforto que o motorista percebe ao trafegar na chuva ou neblina, que o faz reduzir a velocidade, e por consequência, a severidade do acidente.

A última variável que se mostrou significativa no modelo de severidade foi Velocidade Incompatível, que produziu uma redução na probabilidade de ocorrência da Severidade 1 um aumento na probabilidade de ocorrência das severidades 2, 3 e 4. Esse resultado corrobora resultados da literatura, onde uma maior velocidade leva a severidades mais elevadas (Renski et al, 1999; Chikkakrishna et al, 2017; Ma et al., 2015).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou analisar o impacto de parâmetros geométricos de curvas na frequência e severidade de acidentes em rodovias de pista simples. Além das variáveis geométricas, o modelo de severidade de acidentes permitiu a inclusão na análise de variáveis humanas (Velocidade incompatível) e variáveis ambientais (Chuva, Dia, Neblina). Estimou-se os modelos econométricos Binomial Negativo e *Logit* Ordenado, nos quais, dentre os cinco parâmetros geométricos analisados: Ângulo Central, Declividade Absoluta, Desenvolvimento, Raio e Superelevação, apenas a variável Raio não foi significativa em nenhum dos modelos. Esse resultado, no entanto, é esperado pela relação existente entre as variáveis Superelevação e Raio, tendo em vista que a região de estudo foi considerada de classe uniforme. Entre as variáveis significativas, a Declividade absoluta e a Superelevação foram consistentemente associadas ao aumento da frequência e à redução da severidade dos acidentes.

Os parâmetros geométricos fazem parte do componente viário dos acidentes e tem grande influência na frequência e severidade de acidentes, conforme identificado neste estudo, demonstrando a importância de um bom projeto na engenharia rodoviária. Apesar de parte dos

resultados encontrados serem intuitivos, a quantificação do impacto de cada variável contribui com evidências capazes de orientar o desenvolvimento de projetos viários seguros e melhorias naqueles já executados. Para estudos futuros, sugere-se que a análise da frequência e severidade de acidentes a partir de parâmetros geométricos seja replicada em rodovias de pista dupla. Em relação à modelagem da frequência e severidade, a análise utilizando modelos de parâmetros mistos pode contribuir com a acurácia da estimação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agbelie, B. R. D. K. (2016) Random-parameters analysis of highway characteristics on crash frequency and injury severity. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 3, n. 3, p. 236–242.
- Agbelie, B. R. D. K. (2016) A comparative empirical analysis of statistical models for evaluating highway segment crash frequency. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 3, n. 4, p. 374–379.
- American Association Of State Highway And Transportation Officials. (2011) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. 5th ed. Washington, D.C.
- Anastasopoulos, P. C.; V. N. Shankar; J. E. Haddock e F. L. Mannering (2012) A multivariate tobit analysis of highway accident-injury-severity rates. *Accident Analysis & Prevention*, v. 45, p. 110–119.
- Aram, A. (2010) Effective Safety Factors on Horizontal Curves of Two-lane Highways. *Journal of Applied Sciences*, v. 10, n. 22, p. 2814–2822.
- Bierlaire, M. (2003). Biogeme: a free package for the estimation of discrete choice models. Proceedings of the 3rd Swiss Transportation Research Conference, Ascona, Switzerland.
- Bonneson, J. A. (2000) *Superelevation distribution methods and transition designs*. Washington, D.C: National Academy Press.
- Brasil. (2011) Lei n.º 13.379, de 6 de janeiro de 2011. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Viação - SNV. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF.
- Castro, M.; R. Paleti e C.R. Bhat (2013) A spatial generalized ordered response model to examine highway crash injury severity. *Accident Analysis & Prevention*, v. 52, p. 188–203.
- Chen, C.; G. Zhanga; H. Huang; J. Wang e R. A. Tarefder (2016) Examining driver injury severity outcomes in rural non-interstate roadway crashes using a hierarchical ordered *logit* model. *Accident Analysis & Prevention*, v. 96, p. 79–87.
- Chikkakrishna, N. K.; M. Parida e S. S. Jain (2017) Identifying safety factors associated with crash frequency and severity on nonurban four-lane highway stretch in India. *Journal of Transportation Safety & Security*, v. 9, n. sup1, p. 6–32, 30.
- Cruz, P.; T. Echaveguren e P. González (2017) Estimación del potencial de rollover de vehículos pesados usando principios de confiabilidad. *Revista ingeniería de construcción*, v. 32, n. 1, p. 5–14.
- De Oña, J.; R. O. Mujalli e F. J. Calvo (2011) Analysis of traffic accident injury severity on Spanish rural highways using Bayesian networks. *Accident Analysis & Prevention*, v. 43, n. 1, p. 402–411.
- Departamento De Policia Rodoviária Federal. (2017) *Acidentes*. Disponível em: <<<https://www.prf.gov.br/portal/dados-abertos/acidentes>>>. Acesso em: 10 set. 2017
- Departamento Nacional das Estradas de Rodagem (1999) *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais*. Rio de Janeiro: DNER.
- Dong, C; S. S. Nambisan; S. H. Richards e Z. Ma (2015) Assessment of the effects of highway geometric design features on the frequency of truck involved crashes using bivariate regression. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 75, p. 30–41.
- Eck, R. W.; French, L. J. (2002) Effective Superelevation for Large Trucks on Sharp Curves and Steep Grades. *WVDOT RP 153*.
- Garcia, D. S. P.; L. A. Lindau e C. T. Nodari (2013) Multivariate Operating Speed Forecasting Model Based on the Geometric Elements of Two-Lane Highways. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, v. 1, n. 2, p. 97–103.
- Garnaik, M. M. (2014) Effects of Highway geometric elements on Accident Modelling. Thesis (Master of Technology in Transportation Engineering). Department of Civil Engineering, National Institute of Technology Rourkela Odisha, India.
- Greene, W. H. (2012) *Econometric Analysis*. 7. ed. Edition. New Jersey: Pearson.
- Hair, J. F.; W. C. Black; B. J. Babin; R. E. Anderson e R. L. Tatham (2009) *Análise multivariada de dados*. Bookman Editora.
- Hilbe, J. (2011) *Negative Binomial Regression*. 2nd ed. 573 p. Cambridge University Press.
- Hosseinpour, M.; A. S. Yahaya; A. F. Sadullah; N. Ismail e S. M. R. Ghadiri (2016) Evaluating the effects of road

- geometry, environment, and traffic volume on rollover crashes. *Transport*, v. 31, n. 2, p. 221–232.
- ITF. (2016) *Zero Road Deaths and Serious Injuries: Leading a Paradigm Shift to a Safe System*. OECD Publishing, Paris. doi:10.1787/9789282108055-en
- Iyınam, A. F.; S. Iyınam e M. Ergun (1997) Analysis of relationship between highway safety and road geometric design elements: Turkish case. Technical University of Istanbul, Faculty of Civil Engineering, Turkey.
- Ma, J. e Z. Li (2010) Bayesian Modeling of Frequency-Severity Indeterminacy with an Application to Traffic Crashes on Two-Lane Highways. American Society of Civil Engineers. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41127%28382%29110>>. Acesso em: 24 maio. 2018
- Ma, Z; W. Zhao; S. I. Chien e C. Dong (2015) Exploring factors contributing to crash injury severity on rural two-lane highways. *Journal of Safety Research*, v. 55, p. 171–176.
- Mannering, F. L. e C. R. Bhat (2014) Analytic methods in accident research analytic methods in accident research : methodological frontier and future directions. *Analytic Methods in Accident Research*. v. 1, p. 1–22.
- Mccullagh, P. e J. A. Nelder (1989) *Generalized linear models*. 2nd ed. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability.
- Milton, J. C.; V. N. Shankar e F. L. Mannering (2008) Highway accident severities and the mixed *logit* model: An exploratory empirical analysis. *Accident Analysis & Prevention*, v. 40, n. 1, p. 260–266.
- Ortúzar, J. D. e L. G. Willumsen (2011) *Modelling Transport*. 4th ed., London: Wiley.
- Radimsky, M.; R. Matuszkova e O. Budik (2016) Relationship between horizontal curves design and accident rate. *Jurnal Teknolog*, v. 78, n. 5–2.
- Rengarasu, T.; T. Hagiwara e M. Hirasawa (2009) Effects of Road Geometry and Cross-Section Variables on Traffic Accidents: Study Using Homogeneous Road Segments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2102, p. 34–42.
- Renski, H.; A. Khattak e F. Council (1999) Effect of Speed Limit Increases on Crash Injury Severity: Analysis of Single-Vehicle Crashes on North Carolina Interstate Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1665, p. 100–108.
- Sameen, M. I. e B. Pradhan (2016) Forecasting severity of traffic accidents using road geometry extracted from mobile laser scanning data. *Conference on Remote Sensing (ACRS)*.
- Schneider, W. H.; P. T. Savolainen e D. N. Moore (2010) Effects of Horizontal Curvature on Single-Vehicle Motorcycle Crashes along Rural Two-Lane Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2194, n. 1, p. 91–98.
- Schneider, W. H.; P. T. Savolainen e K. Zimmerman (2009) Driver Injury Severity Resulting from Single-Vehicle Crashes along Horizontal Curves on Rural Two-Lane Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2102, n. 1, p. 85–92.
- Shankar, V.; F. Mannering e W. Barfield (1995) Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies. *Accident Analysis & Prevention*, v. 27, n. 3, p. 371–389.
- Shrestha, P. P. e K. J. Shrestha (2017) Factors associated with crash severities in built-up areas along rural highways of Nevada: A case study of 11 towns. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 4, n. 1, p. 96–102.
- Small, K.A. (1987) Discrete Choice Model for Ordered Alternatives, *Econometrica*, v. 55, n. 2, p. 409.
- Torbic, D. J; E. T. Donnell; S. N. Brennan; A. Brown; M. K. O’Laughlin e K. M. Bauer (2014) Superelevation Criteria for Sharp Horizontal Curves on Steep Grades. Washington, D.C.: *Transportation Research Board*.
- Treat, J.; N. S. Tumbas; S. T. McDonald; D. Shinar; R. D. Hume; R. E. Mayer; R. L. Stansifer e N. J. Castellan (1979) Tri-level study of the causes of traffic accidents. Executive summary. *Vision Research*. v. 42, n. 21, p. 2419–2430.
- United Nations. (2011) *Global Plan for The Decade of Action for Road Safety 2011–2020*. Disponível em: www.who.int/roadsafety/decade_of_action/plan/english.pdf
- United Nations. (2017) *Sustainable Development Goals*. United Nations Department of Public Information. Obtido 20 de junho de 2018, de <http://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html>
- World Health Organization (2011) *Saving Millions of lives: Decade of action for road safety 2011-2020*. WHO publication (Vol. 11). Obtido de http://who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic/saving_millions_lives_en.pdf

César Luís Andriola (andriola.cesar@gmail.com)

Tânia Batistela Torres (batistela.torres@ufrgs.br)

Daniel Sérgio Presta García (daniel.garcia@ufrgs.br)

Laboratório de Sistemas de Transportes – Departamento de Engenharia de Produção e Transportes

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Av. Osvaldo Aranha, 99 – Porto Alegre, RS, Brasil