

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

LOANY STEFFANE REZENDE FALCÃO

MODELAGEM ESTATÍSTICA DA FREQUÊNCIA DE ACIDENTES EM TRÁFEGO  
RODOVIÁRIO: UM ESTUDO DE CASO EM RODOVIA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Joinville

2021

LOANY STEFFANE REZENDE FALCÃO

MODELAGEM ESTATÍSTICA DA FREQUÊNCIA DE ACIDENTES EM TRÁFEGO  
RODOVIÁRIO: UM ESTUDO DE CASO EM RODOVIA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Trabalho apresentado como requisito  
para obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia de Transportes e  
Logística do Centro Tecnológico de Joinville  
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Helry Luvillany  
Fontenele Dias

Coorientador: Dr. Marcos José Timbó  
Lima Gomes

Joinville

2021

LOANY STEFFANE REZENDE FALCAO

MODELAGEM ESTATÍSTICA DA FREQUÊNCIA DE ACIDENTES EM TRÁFEGO  
RODOVIÁRIO: UM ESTUDO DE CASO EM RODOVIA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 23 de abril de 2021.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Helry Luvillany Fontenele Dias  
Orientador  
Presidente

---

Dr. Marcos José Timbó Lima Gomes  
Co-orientador  
Universidade Federal do Cariri

---

Dra. Christiane Wenck Nogueira Fernandes  
Membro da banca  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Eduardo Loewen  
Membro da banca  
Autopista Litoral Sul

Dedico este trabalho a minha mãe e irmã.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, pai (in memoriam) e irmã, que me apoiaram em todas as escolhas e acreditaram no meu potencial.

Aos meus orientadores, prof. Helry e Timbó. Tive a sorte de encontrar professores que me deram todo o suporte possível, com paciência e disponibilidade em um momento tão único e difícil que é o enfrentamento da pandemia do COVID-19.

À prof. Elisete que viu em mim uma engenheira de transportes e logística e me ajudou em todos os trâmites para a transferência de curso. Aos prof. Cristiano e Christiane que me auxiliaram sempre que precisei e me motivaram em diversos momentos.

Aos profissionais e amigos da SEPUD que me fizeram ver os meios de transportes de forma diferente e auxiliaram no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Aos profissionais e amigos da Litoral Sul que me acolheram e tanto me ensinaram no decorrer desses anos.

A todos os amigos que fiz nesses anos morando em Santa Catarina, os quais fizeram Joinville virar um lar e uma cidade que tenho muito carinho.

There are only two means by which men can deal with one another: guns or logic. Force or persuasion. Those who know that they cannot win by means of logic, have always resorted to guns.  
(AYN RAND, 1982).

## RESUMO

A avaliação do Desempenho de Segurança Viária (DSV) utiliza Modelos de Previsão de Acidentes (MPA) como ferramenta estatística para determinar a frequência de acidentes e a gravidade dos acidentes. Devido à objetividade na definição do número de acidentes e alto custo social e financeiro associado aos acidentes com vítimas, este trabalho busca relacionar a frequência de acidentes com vítimas por meio de análises estatísticas dos dados históricos disponíveis em rodovias federais dos estados de Santa Catarina e Paraná. A partir de revisão do estado da arte e prática disponíveis, foi possível definir correlações entre a ocorrência de acidentes, fluxo de veículos e infraestrutura da via. O estudo de caso propôs um modelo para a BR-116/PR e BR-101/SC, com segmentos homogêneos com no mínimo um quilômetro de extensão. Todos os testes (desvio escalonado, estatística generalizada de Pearson, parâmetro de dispersão e critério de informação de Akaike) realizados comprovaram que o Modelo Binomial Negativo possui melhor ajuste quando comparado com o Modelo de Poisson, explicando a correlação entre o número de acidentes e fluxo de veículos. Para definição do ajuste dos modelos, utilizou-se o gráfico *CURE plot*, o qual possui limites inferiores e superiores de dispersão. O modelo da BR-116/PR mostrou que o número de acessos à rodovia possui grande correlação quanto à ocorrência de acidentes, e partir da análise do *CURE plot* foi possível avaliar que o modelo se ajustou de forma esperada. O modelo da BR-101/SC apresentou grande correlação entre a frequência de acidentes e as variáveis relacionadas à barreira lateral e velocidade de fluxo livre. Porém, na análise do gráfico *CURE plot* percebe-se que o modelo não se ajustou como esperado em volume diário médio anual (VDMA) muito baixos e muito altos, devido à superdispersão dos dados, também não apresentou ajuste esperado nos segmentos com comprimentos menores, provavelmente devido o baixo número de acidentes em tais pontos, gerando a subdispersão.

**Palavras-chave:** Segurança-viária. Acidente. Rodovia.

## ABSTRACT

Safety Performance Functions (SPF) assessment uses Accident Prediction Models (APM) as statistics tools to ascertain accidents frequency and severity. Due to objectivity in defining accidents frequency and high social and financial cost related to accidents with victims, this study aims to relate accidents with victims frequency by means of statistical analysis of historical data available in Santa Catarina and Paraná states federal highways. With the revision of the state of the art and available practices, it was possible to define correlations between accidents occurrence, vehicle traffic and road infrastructure. The case study proposed a model for highways BR-116/PR and BR-101/SC, considering homogeneous segments with a minimum extension of one kilometer. All tests (scaled deviance, Pearson chi-square, dispersion parameter and Akaike information criterion) proved that the Negative Binomial Regression Model showed better adjustments when compared to Poisson Model, explaining the correlation between the number of accidents and vehicle traffic. For the definition of model adjustments, it was used the CURE plot graph, which possesses inferior and superior dispersion limits. BR-116/PR model showed that the number of accesses to the highway possesses great correlation to accidents occurrence and with CURE plot analysis it was possible to evaluate that the model adjusted itself in the expected way. BR-101/SC model showed great correlation between accidents frequency and the variables related to lateral barrier and free-flow speed. However, in CURE plot graph analysis it was perceived that the model did not adjusted itself as expected in very low and very high Annual Average Daily Traffic (AADT), generating data superdispersion, also did not present the expected adjustments in segments with smaller lengths, probably due to low number of accidents in those points, generating superdispersion.

**Keywords:** Road-safety. Accident. Highway.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de apresentação .....	18
Figura 2 - Componentes de custo dos acidentes nas rodovias federais (2014) .....	20
Figura 3 – Exemplo de <i>CURE plot</i> .....	31
Figura 4 - Fluxograma com as etapas da metodologia.....	32
Figura 5 – BR116/PR em azul, BR376/PR em roxo, BR101/SC em verde .....	40
Figura 6 - Gráfico de dispersão e correlação do VDMA da BR-101/SC .....	47
Figura 7 - Gráfico de dispersão e correlação da BR-101/SC .....	47
Figura 8 - Print do software R para o modelo da BR101/SC .....	48
Figura 9 - Boxplot da extensão do segmento e número de acidentes da BR-101/SC .....	49
Figura 10 - Boxplot da porcentagem de barreira lateral e velocidade da BR-101/SC .....	50
Figura 11 - Boxplot do VDMA da BR-101/SC.....	50
Figura 12 - <i>CURE plot</i> da BR-101/SC.....	51
Figura 13 - Gráfico de dispersão e correlação do VDMA da BR-116/PR .....	54
Figura 14 - Gráfico de dispersão e correlação da BR-116/PR .....	54
Figura 15 - Print do software R para o modelo da BR-116/PR.....	55
Figura 16 - Boxplot da extensão da BR-116/PR .....	56
Figura 17 - Boxplot de acessos e VDMA da BR-116/PR.....	56
Figura 18 - <i>CURE plot</i> da BR-116/PR .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades de Carro de Passeio (UCP).....	35
Tabela 2 - Categoria para greide .....	45
Tabela 3 - Categorias para velocidade em fluxo livre.....	45
Tabela 4 – Testes estatísticos para validação do modelo .....	48
Tabela 5 - Estatísticas variáveis dependentes e independentes - BR-101/SC.....	49
Tabela 6 - Análise dos dados entre o VDMA 12617 e 12911.....	52
Tabela 7 - Análise dos dados entre o VDMA 49334 e 49599.....	53
Tabela 8 - Estatísticas variáveis dependentes e independentes - BR-116/PR.....	54
Tabela 9 - Estatísticas variáveis dependentes e independentes - BR-116/PR.....	55
Tabela 10 - Análise dos dados entre o VDMA 24458 e 29735.....	58

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AIC - Critério de informação de Akaike

ALS - Autopista Litoral Sul

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DPVAT - Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Via Terrestre

DSV – Desempenho de Segurança Viária

GPS - Global Positioning System

HSM - Highway Safety Manual

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

MBN – Modelo Binomial Negativo

MLG – Modelo Linear Generalizado

MPA – Modelo de Previsão de Acidentes

ONU – Organização das Nações Unidas

PRF – Polícia Rodoviária Federal

UCP - Unidades de Carro de Passeio

VDMA – Volume Diário Médio Anual

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1.	OBJETIVOS	16
1.1.1.	Objetivo Geral	16
1.1.2.	Objetivos Específicos	16
1.1.3.	Justificativa	17
1.2.	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
2.1.	SEGURANÇA VIÁRIA	19
2.1.1.	Custos dos Acidentes de Trânsito	19
2.1.2.	Principais Causas de Acidentes	20
2.2.	MODELOS DE DESEMPENHO DE SEGURANÇA VIÁRIA	22
2.2.1.	Modelos Lineares Generalizados	23
2.2.2.	Modelo de Poisson	23
2.2.3.	Modelo Binomial Negativo	24
2.3.	TAMANHO DA AMOSTRA	28
2.4.	CURE PLOT	29
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>32</b>
3.1.	ESCOLHA DO MÉTODO DE PREVISÃO DE ACIDENTES	32
3.2.	ESCOLHA DAS VARIÁVEIS	33
3.3.	COLETA DE DADOS	34
3.3.1.	Ocorrência de acidentes	34
3.3.2.	Infraestrutura da via	34
3.3.3.	Fluxo de veículos	35
3.4.	PROPOSIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	35
<b>4.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE PREVISÃO DE ACIDENTES</b>	<b>40</b>
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	40
4.2.	ESCOLHA DO MÉTODO DE PREVISÃO DE ACIDENTES	41
4.3.	ESCOLHA DAS VARIÁVEIS	42
4.4.	COLETA DE DADOS	42
4.4.1.	Ocorrência de acidentes	42
4.4.2.	Fluxo de veículos	43

<b>4.4.3. Infraestrutura da via .....</b>	<b>44</b>
<b>4.5. PROPOSIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5.1. Rodovia BR-101/SC .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5.2. Rodovia BR-116/PR.....</b>	<b>53</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em 1988 o governo brasileiro autorizou o DNER a contratar, mediante concessão, a construção, conservação e exploração de rodovias. As concessões rodoviárias promovem a melhor dedicação do governo para outros setores, visto que o responsável pela rodovia se torna uma empresa privada. Além da redução de investimento público na infraestrutura, as concessionárias responsáveis pela rodovia são obrigadas a prestar serviços como atendimento mecânico e médico (BARDO, et al, 2010).

Adicionalmente aos atendimentos prestados, a concessionária busca realizar estudos para redução de acidentes focados na região administrada. Tal busca na redução de acidentes pode ser confirmada a partir do estudo de Oliveira et al. (2019), no qual concluiu-se que houve redução de 1,8 pontos no número médio de acidentes por quilômetro em rodovias concedidas, enquanto nas demais rodovias a redução ficou em torno de 0,7 pontos.

Dentre os principais objetivos das concessionárias em realizar os estudos para redução de acidentes podemos citar o custo financeiro relacionado ao deslocamento de recursos para atendimento e os inconvenientes gerados, tais como: interdições de pista, danos à infraestrutura e perda social vinculada a acidentes com vítimas (BARDO, et al, 2010).

De acordo com o World Health Organization (WHO, 2018), os acidentes de trânsito são uma das principais causas mundiais de mortes de indivíduos com idades entre cinco e 29 anos. São 1,35 milhão de mortes e 50 milhões de feridos anualmente em acidentes de trânsito, dos quais 90% das vítimas são de países em desenvolvimento.

No Brasil, 20% dos acidentes fatais ocorreram em rodovias federais, com forte destaque para acidentes envolvendo motocicletas, visto que são veículos motorizados com grande crescimento na frota e que apresentam maior exposição do condutor, gerando alto número de óbitos e feridos graves quando há ocorrência de acidentes (CARVALHO, 2016).

De acordo com estudos viários, em 2015 os acidentes de trânsito no território nacional tiveram um custo em torno de 56 bilhões de reais. Dentre os custos associados aos acidentes estão os cuidados com a saúde, perda de produção devido às lesões ou morte, danos à infraestrutura no local do acidente, bem como dos veículos envolvidos, perda de carga, custos operacionais como remoção dos veículos acidentados, dentre outros fatores (IPEA, 2020)

Dessa forma, entende-se que os acidentes com vítimas e fatais apresentam os maiores custos, pois além dos investimentos financeiros em recuperação dos danos materiais, há aqueles vinculados ao tratamento das vítimas. De acordo com o IPEA (2020), em rodovias federais os

acidentes fatais representam 5% do total de ocorrências, e 35% dos gastos totais relacionados à acidentes.

Em 2011 a Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU), com o intuito de amenizar o aumento do número de fatalidades nos acidentes de trânsito, criou uma resolução na qual foi definido que entre os anos 2011 e 2020 o número de fatalidades no trânsito deveria apresentar redução de 50% (ONU, 2010). Essa definição ficou conhecida como a *Década de Ação pela Segurança no Trânsito* e foi adotada por diversos países que definiram suas próprias diretrizes para alcançar o objetivo.

Em atendimento à meta, o DENATRAN lançou o *Plano Nacional de Redução de Acidentes e Segurança Viária para a década 2011-2020*, que define cinco pilares para a redução de acidentes: (i) fiscalização, através de leis de obrigatoriedade, como uso de cinto de segurança e lei seca, (ii) educação, com foco na prática pedagógica infantil, visto que a criança possui grande vulnerabilidade frente aos veículos, (iii) saúde, com preceitos de saúde voltada à mobilidade urbana, (iv) segurança veicular, compreendendo que o veículo precisa ser seguro, por meio de manutenções e dispositivos de segurança, como airbags, e (v) infraestrutura, compreende desde a criação e manutenção do pavimento quanto a padronização de sinalização (DENATRAN, 2010).

Para a adoção de intervenções com vistas à redução de acidentes é necessário compreender as razões que levam à sua ocorrência, relacionando o número de acidentes e características locais. Dessa forma, os pesquisadores têm aplicado uma série de métodos estatísticos, com base no desempenho da segurança viária (DSV). O DSV é dividido de acordo com o nível de agregação das variáveis. No nível desagregado utiliza-se entidades de rede como segmentos (arcos) e interseções (nós), relacionando o volume diário médio anual (VDMA) e os atributos geométricos da via (GOMES, 2018).

Em nível agregado, também denominado modelo macroscópico, há a relação entre o uso do solo e aspectos socioeconômicos da área de estudo, de forma a proporcionar cenários mais preditivos aos modelos de previsão de acidentes (MPA). Por se tratar de uma abordagem de planejamento, é muito utilizada para políticas públicas a fim de definir metas de investimento (GOMES, 2018).

Para a definição dos pontos a serem tratados nos MPA, pode-se utilizar a abordagem de estimação da segurança por meio de estatísticas aplicadas a séries históricas dos acidentes registrados. Mesmo que a relação entre segurança viária e número de acidentes no ponto sejam diretamente ligadas, é importante entender os fatores que influenciam o acidente para que se possa prever a ocorrência do mesmo (CUNTO, 2008).

Com o intuito de analisar a ocorrência de acidentes no Brasil, o IPEA realiza a compilação dos dados e define frentes de análise dos acidentes. Em 2015, o Instituto publicou uma pesquisa com foco nos estados brasileiros, destacando aqueles com maior número de acidentes. Dessa forma, fica mais visível para o governo entender os estados que possuem maior necessidade de melhorias no cenário (CARVALHO, 2016).

De acordo com Carvalho (2016), os estados que apresentam maior taxa de acidentes por quilômetros rodoviários são, respectivamente, os estados de Santa Catarina, Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Paraná. Tais estados também se destacam em número de mortes ocasionadas por acidentes.

Dessa forma, nota-se que dos cinco estados com maiores riscos de acidentes, dois são foco do estudo deste trabalho. Devido ao alto índice de acidentes, entende-se a necessidade de estudo quanto a aplicação de modelos de previsão de acidentes nos estados do Paraná e Santa Catarina, viabilizados por meio de modelagem matemática e estatística.

## 1.1. OBJETIVOS

Buscando mitigar a problemática do aumento no número de acidentes de trânsito fatais em rodovias dos estados do Paraná e Santa Catarina, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Propor um modelo estatístico de acidentes com vítimas em rodovias federais nos estados de Santa Catarina e Paraná.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Compreender o cenário atual, por meio do levantamento da ocorrência de acidentes com vítimas, fluxo de veículos, infraestrutura e características físicas das rodovias observadas;
- Propor modelos estatísticos de DSV desagregado aplicados ao tráfego das rodovias analisadas;
- Validar os modelos propostos com os parâmetros observados nas rodovias estudadas.

### 1.1.3. Justificativa

Com o crescimento contínuo no número de veículos motorizados no Brasil, e consequente aumento de acidentes de trânsito, entende-se a grande necessidade na redução de tais ocorrência, o que explica o surgimento de programas como a *Década de Ação pela Segurança no Trânsito*, a implantação de leis como lei seca, obrigatoriedade no uso do cinto de segurança, dentre outros fatores (WHO, 2018).

Além da redução de acidentes por meio de leis de trânsito e programas educacionais, pesquisadores veem buscando maneiras de obter melhor compreensão dos fatores que podem levar à ocorrência de um acidente de trânsito. No decorrer dos anos, muitos estudos analisaram diferentes abordagens metodológicas para a previsão de acidentes (LORD; MANNERING, 2010).

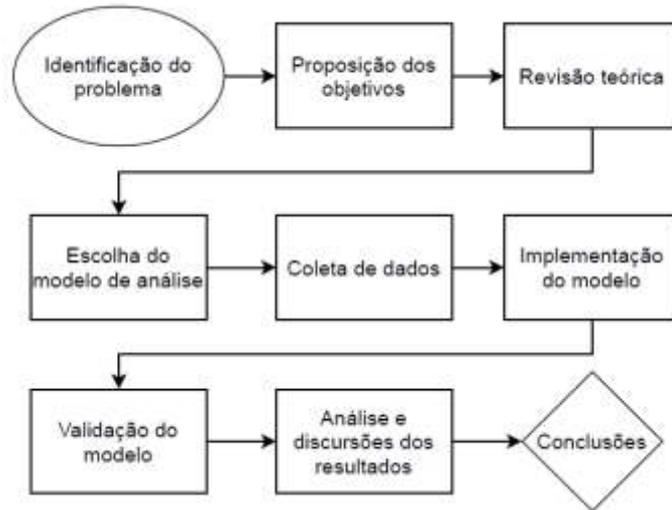
Dentre os estudos existentes é possível notar a evolução dos modelos de desempenho de segurança viária aplicados para o cenário brasileiro. Entendendo-se a importância em aplicar os modelos em rodovias, as quais apresentam maior índice de fatalidades, quando comparadas com acidentes em meio urbano.

Tal índice elevado de fatalidades em rodovias pode ser justificado a partir da grande exposição dos veículos no ambiente rodoviário juntamente com as grandes variações no comportamento do motorista de acordo com a região brasileira a qual pertence. Dessa forma, torna-se de extrema importância o estudo de modelos de previsão de acidente nos estados do Paraná e Santa Catarina, os quais apresentam elevado número de fatalidades no cenário brasileiro.

## 1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

A partir da problemática exposta, o presente trabalho busca abordar o tema de forma mais aprofundada, com base nas referências internacionais e nacionais disponíveis, de modo a propor o modelo que melhor se adapte à realidade estudada. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra a proposta metodológica presente no atual trabalho.

Figura 1 - Fluxograma de apresentação



Fonte: Autor

Conforme a figura apresentada este trabalho é composto por cinco capítulos. O primeiro introduz, contextualiza, justifica e aponta os objetivos deste estudo. O segundo capítulo abrange o referencial teórico para apresentação do estado da arte em modelos de desempenho de segurança viária, além da contextualização dos modelos estatísticos utilizados para os estudos de previsão de acidentes.

O terceiro capítulo aborda a metodologia utilizada, definindo os passos e dados necessários de acordo com o cenário analisado pelo estudo, bem como a forma para obtenção de tais dados, com base na teoria apresentada no capítulo anterior. O quarto capítulo refere-se ao estudo de caso com a implementação da teoria estudada no capítulo dois e baseado no passo a passo apresentado no capítulo três. O capítulo aborda desde a obtenção dos dados, tratamento deles, até a implementação e análises dos resultados obtidos.

O último capítulo levanta as considerações finais sobre o presente trabalho, elencando sugestões para trabalhos futuros.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. SEGURANÇA VIÁRIA**

O grande crescimento dos centros urbanos tornou necessário o uso de meios de transporte para a mobilidade, sendo que em alguns países, como o Brasil, houve grande destaque para o crescimento do uso de veículos motorizados individuais. Além do uso para atividades cotidianas, o automóvel é visto com valor social na cultura brasileira, representando uma elevação no status social da pessoa que o possui. Dessa forma, entende-se o grande crescimento do uso de veículos e conseqüentemente o aumento no número de acidentes, justificando a importância do estudo de segurança viária, visto que há impactos diretos na sociedade e meio ambiente (MÂNICA, 2007).

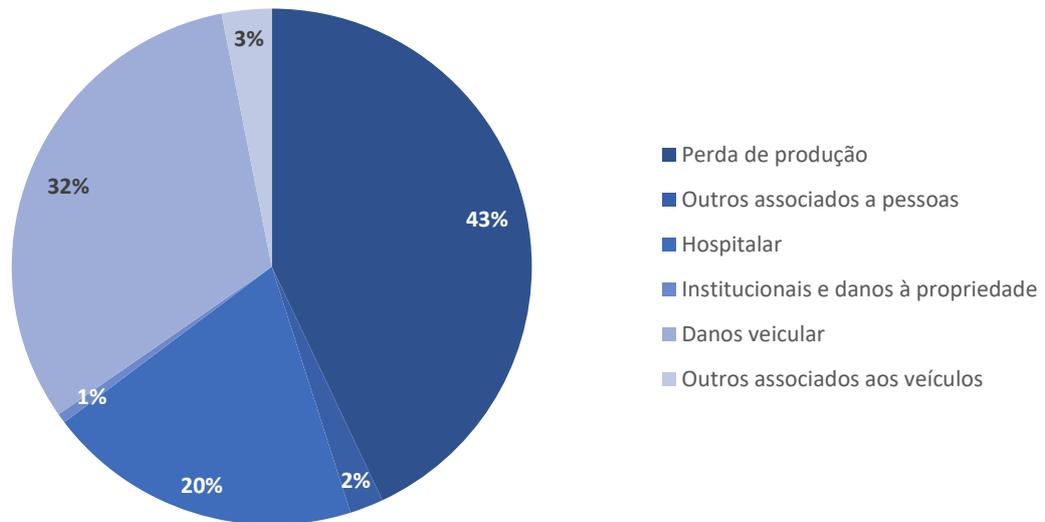
Nesse cenário a segurança viária torna-se a medida de desempenho do sistema viário, definindo o quanto o sistema é seguro em relação a ocorrência de acidentes e as conseqüências relacionadas (CARDOSO, 2006).

#### **2.1.1. Custos dos Acidentes de Trânsito**

Segundo o IPEA (2020), um dos aspectos negativos dos acidentes de trânsito que mais se destaca é o alto custo envolvido, gerando grande impacto na economia dos países. Os custos dos acidentes abrangem o atendimento das vítimas, danos ao veículo, danos patrimoniais, custos institucionais, entre outros.

Nas rodovias federais em 2014, os custos dos acidentes para a sociedade foram em torno de R\$12,8 bilhões, sendo que 62% dos custos são relacionados às vítimas e 37,4% relacionados ao veículo, como perda de carga, danos ao veículo e remoção. A Figura 2 ilustra tais divisões dos custos associados aos acidentes.

Figura 2 - Componentes de custo dos acidentes nas rodovias federais (2014)



Fonte: Carvalho (2020)

O impacto causado devido a perdas de produção justifica o número expressivo de indenizações registradas pelo seguro DVAT (Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Vias Terrestres). Em 2020, foram registradas 310.710 indenizações relacionadas a acidentes de trânsito no Brasil, sendo 67% decorrentes de invalidez permanente, 22% de despesas médicas e 11% por mortes (SEGURADORA LÍDER, 2020)

Analisando individualmente, cada acidente em rodovias federais teve um custo aproximado de R\$261.689,00 à sociedade, sendo que acidentes com vítimas fatais apresentam um valor 2,5 vezes maior. Dessa forma, entende-se a grande busca na redução de acidentes, sobretudo acidentes com vítimas, pois além da segurança gerada para a população, os valores gastos com o acidente poderiam ser revertidos para outros programas sociais (IPEA, 2020).

### 2.1.2. Principais Causas de Acidentes

Os eventos antes e durante o acidente mostram os fatores que contribuíram para sua gravidade e como as soluções de engenharia ou mudanças tecnológicas podem reduzir a ocorrência ou severidade do acidente (AASHTO, 2009). Porém, a definição do conjunto de causas do acidente é um dos maiores desafios na melhoria da segurança viária, visto que, de forma geral, envolve a interação de diferentes fatores na sua ocorrência (CARDOSO, 2006).

De acordo com o Ministério dos Transportes (2002), os principais fatores que podem contribuir à ocorrência de acidentes são divididos em três categorias: (i) fator humano,

associado ao comportamento e tempo de reação do motorista; (ii) fator via e meio ambiente, relacionado a questões de projeto, manutenção da via e da vegetação próxima ao trecho, e (iii) fator veículo, associado a eventuais problemas que possam ocorrer decorrente de falhas no veículo.

Dessa forma, a classificação é o resultado da análise entre a relação direta do risco de ocorrência do acidente em um determinado local e as características geométricas, ambientais, condições de trafegabilidade e do veículo que circula na via, assim como a reação do condutor a tais eventos (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2002).

Segundo Gold (1998) existe mais um fator que pode ter ligação direta aos acidentes, o fator institucional/social. Tal fator estaria relacionado a questões de regulamentação e fiscalização, como a obrigatoriedade do uso de cadeirinha para crianças, uso de cinto de segurança, não ingestão de bebida alcoólica, determinação de velocidade máxima permitida, dentre outros fatores. Porém, mesmo o fator sendo considerado influente na redução de acidentes não é, habitualmente, considerado nos estudos.

Elvik (2006) apresenta quatro leis com o objetivo de justificar a ocorrência de um acidente de trânsito: (i) A primeira é a lei universal do aprendizado, que define que quanto mais experiência o motorista adquire, melhor se torna a sua capacidade em detectar e controlar riscos para a ocorrência de acidentes, (ii) a segunda refere-se a eventos raros, dessa forma entende-se que quanto mais raro um evento é de ser encontrado, mais difícil se torna a previsão de sua ocorrência e menores são as chances de evitar que o acidente ocorra, (iii) a terceira está relacionada à complexidade, ou seja, a união de diversos eventos relevantes, podendo gerar dificuldades cognitivas, (iv) a quarta está associada à capacidade cognitiva, ocorre devido a reduzida necessidade que o motorista tem de tomar decisões de curto prazo e concentrar a atenção na via.

As quatro leis são definidas como leis da causalidade de acidentes e são hipóteses empiricamente testáveis. As leis não definem que existem apenas esses fatores que influenciam a ocorrência de acidentes, podendo ser somados aos fatores anteriormente descritos (ELVIK, 2006).

A partir do exposto, entende-se a importância da previsão de acidentes de trânsito viabilizadas por meio de ferramentas de modelagem, como forma de reduzir, ou mesmo evitar tais ocorrências. Dessa forma, os modelos de segurança viária vêm sendo utilizados para auxiliar na compreensão e mitigação das ocorrências observadas nos trechos estudados.

## 2.2. MODELOS DE DESEMPENHO DE SEGURANÇA VIÁRIA

O Highway Safety Manual (HSM) define que não há segurança absoluta, partindo desse princípio, os estudos de segurança viária são realizados em busca da redução no número e gravidade dos acidentes dentro das limitações de cada localidade, como infraestrutura, recursos financeiros, dados disponíveis, dentre outros fatores (AASHTO, 2009).

Nos últimos anos, muitos foram os estudos desenvolvidos sobre segurança viária, porém, do ponto de vista da engenharia é importante analisar como os estudos sobre o assunto são definidos e medidos. Em geral, os pesquisadores têm desenvolvido métodos para representar a segurança de acordo com a ocorrência dos acidentes observados, de forma a definir um padrão histórico. Porém, as suposições mais estudadas demonstram que os acidentes são individualmente imprevisíveis, embora não se deva descartar a padronização que acontece em determinados locais (DAVIS, 2004).

De forma geral, os acidentes são analisados de duas formas: de acordo com a frequência que ocorrem ou de acordo com a severidade. A principal diferença entre as duas formas de análise deve-se ao fato da frequência, diferentemente da gravidade dos acidentes, ser um estudo de segurança objetiva, por ser uma medida independente do observador. Porém, partindo do princípio de que o risco da ocorrência de acidentes sempre existirá, é de extrema importância que haja redução dos acidentes com vítimas (AASHTO, 2009).

A partir dos estudos desenvolvidos no decorrer dos últimos anos, entende-se o uso do termo frequência média esperada de acidentes para descrever a estimativa da frequência média de acidentes a longo prazo, visto que um indicador a curto prazo não define a tendência do problema (AASHTO, 2009). Dessa forma, as séries históricas de acidentes de trânsito juntamente com questões geométricas e operacionais da via são estudados através de modelos estatísticos, também conhecidos como modelos de previsão de acidentes (MPA) (CUNTO; NODARI, 2011).

Atualmente muitos modelos de previsão de acidentes são estudados, dentre estes, podemos destacar o Modelo de Poisson e Modelo Binomial Negativo, por apresentarem bom desempenho ao tratar dados com grande dispersão de dados, como é caso da análise de ocorrência de acidentes. Dessa forma, a seguir será realizado uma breve análise dos modelos lineares generalizados (MLG), com foco principal no Modelo Binomial Negativo (MBN).

### 2.2.1. Modelos Lineares Generalizados

Os primeiros estudos para desenvolvimento de MPA utilizaram como base a regressão linear, porém o modelo pode gerar valores que não são inteiros e valores negativos, apresentando imprecisões. Além disso, o grande número de zeros na amostra dificulta a transformação do modelo em distribuição normal, gerando inconsistências com a frequência de ocorrências analisadas (ABDULHAFEDH, 2017).

Dessa forma, estudos adicionais mostraram que o uso de modelos lineares generalizados, como distribuição de Poisson ou Binomial Negativa, forneceram resultados mais condizentes com a realidade, visto a elevada dispersão na ocorrência de acidentes de trânsito (CUNTO, 2008).

### 2.2.2. Modelo de Poisson

Dentre as vantagens do uso do modelo de Poisson na previsão de acidentes podemos destacar a restrição do modelo à valores não negativos e inteiros, além de conseguir tratar distorções observadas em que os dados possuem elevado número de zeros, fato esse que impede a transformação em uma distribuição normal (ABDULHAFEDH, 2017).

A distribuição de Poisson é amplamente utilizada para modelar dados de contagem, ao assumir erros que seguem uma distribuição não normal e modela o logaritmo da variável resposta, e não a variável resposta diretamente, como ocorre em modelos de regressão linear (ABDULHAFEDH, 2017).

No conjunto de amostras estudadas, a distribuição de Poisson apresenta a média igual à variância ( $\lambda = \sigma^2$ ), e os eventos são independentes entre si, acontecendo aleatoriamente, de forma a não aumentar ou reduzir a ocorrência de um evento (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2009).

Dessa forma, considera-se uma variável aleatória  $x$  igual ao número de ocorrências de um determinado evento em um intervalo de tempo  $t$ . O intervalo é então particionado em  $n$  subintervalos ( $\Delta t = 1/n$ ).

Considerando  $n$  suficientemente grande para que a probabilidade de acontecer duas ou mais ocorrências seja desprezível, em cada subintervalo de amplitude  $\Delta t$ , de forma que em cada subintervalo só exista a possibilidade de ocorrer (1) ou não ocorrer (0). Definindo  $p$  a probabilidade de que uma ocorrência aconteça em  $\Delta t$ , tem-se a seguinte fórmula:

$$p(x) = \frac{e^{-\lambda}\lambda^x}{x!}, x = 0,1,2, \dots \quad (1)$$

Em que  $y$  é a probabilidade de ocorrência em certo intervalo  $t$ ,  $\lambda$  é o número médio de ocorrências em um intervalo e  $x$  é o evento mensurado por variável aleatória  $[0,1,2\dots n]$ .

Quanto a relação entre o parâmetro de Poisson e as variáveis independentes previstos nos MLG, a função de ligação estabelecida é dado pela seguinte função:

$$E(x) = V(x) = \lambda_i = e^{\beta X_i} \quad (2)$$

No qual,  $\beta$  são os parâmetros que se deseja estimar e  $\mathbf{X}_i$  é o vetor de variáveis explicativas.

Todo o modelo de Poisson parte da premissa que a variância é igual a média, porém a partir do desenvolvimento dos MPA, os pesquisadores descobriram que diferentemente do proposto pelo modelo de Poisson, os dados de acidentes frequentemente apresentam a variância maior que a média, tornando o modelo de Poisson problemático. Dessa forma, entende-se que apesar da simplicidade do modelo de Poisson, a não adequação a situações de superdispersão de dados torna o modelo ineficaz (GOMES, 2018).

Segundo Aashto (2009) a distribuição Binomial Negativa é uma extensão da distribuição de Poisson. O grau de superdispersão em um MBN é representado por um parâmetro estatístico, conhecido como parâmetro de superdispersão, que é estimado junto com os coeficientes da equação de regressão. Quanto maior o valor do parâmetro de superdispersão, mais os dados de falha variam em comparação com uma distribuição de Poisson com a mesma média.

### 2.2.3. Modelo Binomial Negativo

Mountain, Fawaz e Jarrett (1996) destacam que em rodovias, diferentemente de segmentos urbanos, é comum supor uma relação proporcional entre a ocorrência de acidentes e o fluxo de veículos. Essa relação é explicada pelo baixo número de interferências, como cruzamentos, tornando o fluxo de veículos o principal fator de exposição do usuário.

No caso de acidentes em rodovias, entende-se que devido à natureza probabilística do acidente, alguns segmentos podem não apresentar acidentes em um determinado período de

análise. Tal fator gera grande dispersão em relação ao valor esperado (média), fazendo com que o modelo de Poisson não se ajuste da forma adequada por apresentar média igual a variância (MIAOU; LUM, 1993).

Dessa forma, o Modelo Binomial Negativo torna-se adequado por fazer tal distinção de valores, explicando assim, que a ocorrência de acidentes em rodovias e o fluxo de veículos não possuem uma relação proporcional (MOUNTAIN et al., 1996).

Vale ressaltar que a ocorrência de acidentes em um determinado local é tratada como um fenômeno aleatório raro, visto que representa uma pequena parcela do número total de eventos. A aleatoriedade significa que as falhas ocorrem devido a um conjunto de eventos influenciados por alguns fatores dependentes determinísticos e outros estocásticos (AASHTO, 2009).

Quando um evento é raro, a distribuição Binomial Negativa se aproxima muito da distribuição de Poisson. Para um evento ser definido como raro é importante que  $n$  seja grande e a probabilidade  $p$  de ocorrência de um evento ser próxima de zero e  $q$  tende a um (BARBETTA et al., 2009). Ou seja, um evento raro é definido quando o número de tentativas é igual ou maior que cinquenta e o produto das variáveis  $n$  e  $p$  é menor que cinco (MÂNICA, 2007).

Devido à alta probabilidade de  $p$  ser muito pequeno, os modelos de previsão de acidentes no HSM são baseados na distribuição Binomial Negativa (AASHTO, 2009). A distribuição binomial possui dois resultados possíveis: sucesso (1) ou não sucesso (0), com cenários independentes entre si. Caso o evento ocorra é necessário avaliar as variáveis envolvidas e entender as respectivas correlações (BARBETTA et al., 2009).

Sendo uma variável aleatória com distribuição binomial de parâmetros  $n$  e  $p$ . A probabilidade da variável assumir um determinado valor  $x$ , pode ser calculada pela expressão:

$$p(x) = \binom{n}{x} \cdot p^x \cdot (1 - p)^{n-x} \quad (3)$$

Em que  $y$  é a probabilidade de ocorrência de acidente em certo intervalo  $t$ ,  $n$  é o número de amostras,  $p$  é a probabilidade de sucesso  $p$  em uma amostra  $X$  e  $(1-p)$  é a probabilidade de um fracasso em uma amostra  $X$ .

A função de ligação no MBN assume que o parâmetro  $\lambda_i$  segue o valor esperado de ocorrências de acidentes com distribuição de Poisson, acrescido de uma parcela aleatória do

número de ocorrência de acidentes com distribuição Gama e média igual a 1 e variância  $\alpha$  (GOMES, 2018). A função é então calculada pela fórmula:

$$\lambda_i = e^{\beta X_i + \varepsilon_i} \quad (4)$$

A adição de  $\varepsilon_i$  permite que a média  $E[y_i]$  seja diferente da variância  $VAR[y_i]$ , como mostrado na Equação 5.

$$VAR[y_i] = E[y_i] \cdot [1 + \alpha \cdot E[y_i]] = E[y_i] + \alpha \cdot E[y_i]^2 \quad (5)$$

A partir da variância  $\alpha$ , entende-se que o modelo de Poisson é um caso particular do MBN, pois quando  $\alpha$  se aproxima de zero, a escolha entre os modelos depende do valor de  $\alpha$ . Dessa forma, o parâmetro  $\alpha$  é entendido como o parâmetro de superdispersão.

Enquanto a superdispersão é melhor tratada no MBN, a subdispersão apresenta limitações no modelo, gerando estimativas incorretas dos parâmetros. A subdispersão de dados ocorre em casos nos quais a média de ocorrência de acidentes é menor que a variância. Embora raro, esse fenômeno de subdispersão pode surgir quando o tamanho da amostra é muito pequeno (LORD; GREEDIPALLY; GUIKEMA, 2008).

Uma das limitações para a modelagem do MPA refere-se ao alto custo na obtenção de dados relacionados à ocorrência de acidentes, podendo gerar uma amostra pequena, com grande quantidade de zeros. Considerando os MBN, a existência de zeros nas amostras pode deslocar a distribuição das frequências em direção a zero, gerando estimação errada dos parâmetros (GOMES, 2018).

Devido à grande necessidade em tratar situações em que ocorre os *excessos de zeros* foi desenvolvido a regressão Poisson Inflada de Zero e Binomial Negativa Inflada de Zero, a partir dos modelos de Poisson e MBN, respectivamente. Os novos modelos são estruturados em probabilidades binárias de ocorrência de acidente (maior que zero) e não ocorrência de acidente (0) (LORD; MANNERING, 2010).

Além da utilização dos modelos inflados de zero há a possibilidade em aumentar o tamanho da amostra, caso seja viável financeiramente, reduzindo, assim, o número de zeros. (ABDULHAFEDH, 2017). Porém, ao analisar grandes períodos de tempo é intrínseco a necessidade de incluir variáveis explicativas relacionadas às alterações causadas com o tempo, como o desenvolvimento tecnológico dos carros, alterações viárias, desenvolvimento de

políticas públicas, alteração na estrutura de coleta de dados dos acidentes, dentre outros (SOBREIRA, 2019).

Em geral, os estudos para definir os modelos dos MPA utilizam formulação com componentes variando de acordo com os critérios adotados para o modelo, como na fórmula abaixo:

$$Y = \alpha \left\{ \prod_i (A_i)^{\beta_i} \right\} \cdot e^{\sum_j (\gamma_j B_j)} + \left( \sum_k \delta_k C_k \right) \quad (6)$$

Em que  $Y$  é número esperado de acidentes em um intervalo de tempo (ano).  $A$ ,  $B$ ,  $C$  são os vetores de variáveis preditoras e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  são os parâmetros do modelo.

Importante ressaltar que os parâmetros dependem inteiramente dos critérios adotados para análise do modelo, sendo as variáveis do vetor  $A$  associados à exposição, como VDMA e comprimento do segmento. No vetor do tipo  $B$  estão os atributos associados a características físicas e operacionais, como número de greide, número de acessos, número de faixas, existências ou não de acostamento, dentre outros. E por fim, as variáveis associadas ao vetor  $C$  são aqueles que podem influenciar a ocorrência de acidentes em pontos específicos, como pontes, retornos em nível, área de escape etc. (CUNTO; NODARI, 2011; HAUER, 2004).

De acordo com Lord e Mannering (2010), as Equações de Estimação Generalizada (GEE) são um caso particular dos MLG, incorporando o efeito de tendências temporais aos modelos. A necessidade de incorporação de fatores temporais se dá quando o estudo analisa séries históricas com dados de cinco anos ou mais.

Dessa forma, para análise de uma amostra que utilize dados de vários anos, com o mesmo coeficiente  $\beta$ , é possível alterar apenas o coeficiente  $\alpha$ , que está associado a variações anuais relacionadas a mudanças em aspectos macros como clima, qualidade de dados, crescimento urbano, alteração em legislações (HAUER, 2004).

Para a estimação dos parâmetros é necessário o uso de programas computacionais como o SAS, SPSS ou R, que possuem as rotinas pré-definidas de acordo com a modelagem assumida para o erro (Poisson ou Binomial Negativa) (CUNTO; NODARI, 2011).

De acordo com Hauer (2004) a construção do modelo é melhor realizada adicionando uma variável após a outra (forward), começando com a variável relacionada ao VDMA, e reestimando todos os parâmetros após cada adição. Dessa forma, analisa-se a correlação entre a variável adicionada e as demais variáveis presentes no modelo, definindo a permanência ou retirada da variável (stepwise).

Uma nova variável é introduzida no modelo quando as estimativas dos parâmetros  $\beta, \gamma, \delta$  apresentam relação ordenada com a variável. As mudanças geradas nos parâmetros definem qual variável possui correlação com o modelo. Essa forma de modelagem definem as causas da ocorrência do acidente, diferente dos modelos preditivos, que tornam menor a soma dos resíduos quadrados ponderados (HAUER, 2004).

O modelo estatístico utilizado deve ser o primeiro passo para modelagem do MPA, sendo necessário definir posteriormente quais variáveis estão disponíveis dentre as restrições impostas pelo trabalho, como custo e tempo para coleta dos dados, e então, implementar o modelo para entender as correlações que serão criadas.

### 2.3. TAMANHO DA AMOSTRA

Um fator de grande importância no desenvolvimento do modelo refere-se ao dimensionamento da amostra. Não há uma definição precisa dos critérios a serem adotados, devido às dificuldades em encontrar amostras iguais àqueles estudados em outros ensaios. Dessa forma, para estabelecer o modelo a ser utilizado define-se as semelhanças entre o trecho a ser analisado e os estudos já existentes (CUNTO; NODARI, 2011).

Lord (2006) realizou um estudo sobre o impacto do tamanho da amostra e da média de acidentes no parâmetro de dispersão ( $\alpha$ ) da distribuição BN. O estudo analisou amostras com 50, 100 e 1000 observações, e concluiu que quanto menor o número de acidentes, maior deve ser o tamanho da amostra, além de aconselhar o uso de amostras maiores ou iguais a 100 observações.

A precisão da localização do acidente é um fator de grande importância na definição do comprimento do segmento. Calcula-se que até 8% dos acidentes podem estar localizados incorretamente a mais de 152 metros de distância do ponto real (GREEN; KENNETH, 2011). Os demais atributos da rodovia, como volume de tráfego, largura da via, número de faixas, dentre outros, também impactam na extensão dos segmentos (GREEN, 2018).

Ainda de acordo com Green (2018), devido às rodovias apresentarem número de acessos limitados, o número de segmentos pode ser reduzido visto que há pouca variação dos atributos no decorrer do trecho em análise. Dessa forma, à medida que o número de atributos da rodovia aumenta, o comprimento dos segmentos homogêneos diminui. No entanto, o uso de segmentos longos pode apresentar duas problemáticas: apenas uma pequena parcela do segmento pode necessitar de melhorias e seria inviável financeiramente realizar uma melhoria em um longo trecho.

De acordo com Miaou e Lum (1993) a rodovia pode ser dividida em subtrechos com comprimentos iguais ou em segmentos homogêneos, ou seja, seções com desenho geométrico e características de tráfego semelhantes. Como já definido anteriormente, segmentos curtos possuem impactos indesejáveis na estimação dos modelos. Dessa forma, opta-se por segmentos maiores, com extensões acima de 1,6 quilômetros, de forma a impedir que ocorra os excessos de zero no modelo. Porém um impeditivo para o uso de grandes extensões se deve a presença de curvas, variação na inclinação da via, ou inclusão no mesmo segmento de locais com baixo número de acidentes e locais com alto número de acidentes.

De acordo com Souleyrette, Haas e Maze (2007) a divisão em subtrechos que resulta nos segmentos mais curtos apresenta o pior desempenho em análises de DSV. De acordo com Koorey (2009) a segregação em segmentos homogêneos apresenta melhores resultados, devido aos atributos variáveis contidos em segmentos de comprimento fixo. As dificuldades quanto à modelagem com atributos variáveis se dão no desenvolvimento de modelagem computacional mais complexa ao ajustar as diferentes variáveis a comprimentos predeterminados.

Segundo Aashto (2009), o comprimento mínimo sugerido, de forma a evitar a existência de segmentos com número de ocorrências igual a zero, é de 0,16 km. Não há, portanto na literatura estudada, uma definição do comprimento limite, porém, de acordo com Abdlhafedh (2017) é de extrema importância analisar o comprimento do segmento, visto que para atender o MBN é necessário não haja subdispersão dos dados.

Dessa forma, de acordo com Green (2018), o tamanho da amostra será definido de acordo com o comprimento do segmento e período de análise. Após a definição do tamanho da amostra e a coleta das variáveis associadas ao modelo é necessário examinar o ajuste, através dos resíduos gerados. Para isso, uma das abordagens utilizadas é a análise por meio do gráfico de resíduos acumulados, também conhecido como *CURE plot*.

#### 2.4. CURE PLOT

A qualidade do ajuste do modelo pode ser medida através de diversos testes que analisam globalmente o modelo proposto. Porém para a validação dos MPA, é necessário analisar o ajuste de acordo com uma variável específica. Sendo assim, o *CURE plot* surge como uma forma de plotar os resíduos calculados em função de uma variável de interesse (TORRES, 2016)

O *CURE plot* é um gráfico dos resíduos cumulativos por uma variável independente (VDMA) (SRINIVASAN; BAUER, 2013). Os resíduos são a diferença entre a ocorrência de

acidentes e o valor ajustado previsto pelo MPA. Quanto mais distante um ponto estiver do eixo da variável independente (eixo x) maior será o resíduo, ou seja, pior a previsão do MPA. O resíduo pode ser positivo, quando a ocorrência de acidentes é maior que aquela prevista pelo modelo, ou negativa, quando a ocorrência é menor que a previsão (HAUER, 2015).

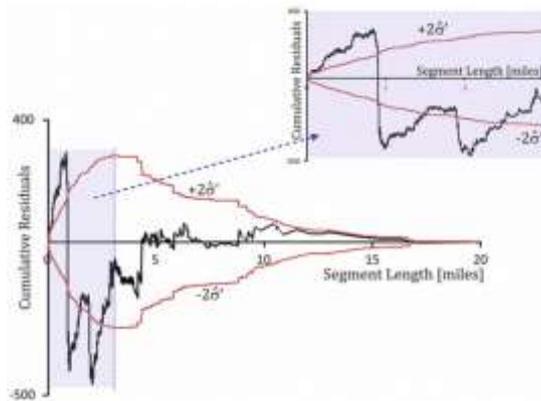
Ainda segundo Hauer (2015), a oscilação que ocorre ao redor do eixo x é esperada devido ao erro aleatório, porém é importante que não haja ascensão ou quedas verticais, pois são indicativos de resíduos excessivamente grandes, indicativos de super ou subestimação. A variação entre resíduos superestimados e subestimados podem, de maneira geral, se ajustar de forma satisfatória, porém se torna enviesada quando analisada de ponto a ponto, apresentando pouco uso prático.

Para a construção do gráfico os resíduos devem ser plotados no eixo vertical e a variável de maior interesse no eixo horizontal. Sendo que a variável do eixo horizontal deve ser classificada em ordem crescente de valores, para que os dados sejam plotados seguindo uma linearidade. O objetivo em se utilizar os resíduos acumulados se dá na melhor visualização do problema, visto que pontos dispersos se tornam as linhas de dispersão, sendo possível analisar locais nos quais há superdispersão ou subdispersão dos dados (HAUER, 2015).

Em modelos aceitáveis, além dos resíduos acumulados apresentarem oscilações moderadas em torno de zero, deve também terminar em um valor final acumulado próximo a zero (*random walk*).

O *CURE plot* apresenta ainda uma linha inferior e uma linha superior com os limites aceitáveis para os resíduos acumulados. Tais linhas definem que em torno de 98% dos resíduos acumulados devem estar contidas nesse limite. Assim, o gráfico *CURE plot* para modelos de MPA pode apresentar raras passagens pelos limites propostos. A Figura 3 apresenta os limites ( $\pm 2\sigma$ ) citados, obtidas a partir seguintes cálculos apresentados por Torres (2016):

- I. Calcula-se o quadrado do resíduo para cada um dos resíduos ordenados;
- II. Calcula-se  $\widehat{\sigma^2}(z)$ , com a soma desses resíduos quadrados de 1 a z;
- III. Calcula-se  $\sigma^*(z) = \widehat{\sigma}(z) = \sqrt{1 - \frac{\widehat{\sigma^2}(z)}{\widehat{\sigma}(N)}}$ ;
- IV. Adiciona-se os limites de  $\pm 2\sigma^*(z)$  ao *CURE plot*;

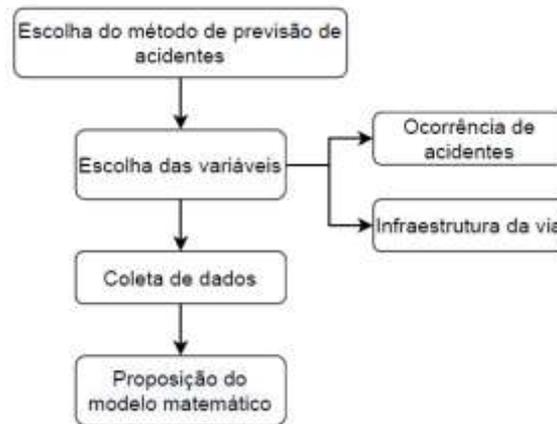
Figura 3 – Exemplo de *CURE plot*

Fonte: Hauer (2015)

A partir do exposto, é notável o crescimento no número de estudos que buscam desenvolver modelos para análises mais precisas de DSV. Assim, o presente trabalho fez uso do MBN, por apresentar o melhor ajuste para tratar a ocorrência de acidentes com superdispersão. Dessa forma, no capítulo 3 será abordado a metodologia utilizada para o desenvolvimento do modelo proposto.

### 3. METODOLOGIA

Figura 4 - Fluxograma com as etapas da metodologia



Fonte: Autor

A principal análise realizada no estudo de previsão de acidentes se baseia na relação da ocorrência de acidente por unidade de tempo em função das características da rodovia. Porém, não há um modelo que indique, por exemplo, a relação entre a ocorrência de acidentes e o aumento no fluxo de veículos, ou o raio de curvatura da rodovia. Desse modo, o processo de desenvolvimento do modelo se baseia naquele que melhor se ajusta aos dados estudados (HAUER, 2004).

#### 3.1. ESCOLHA DO MÉTODO DE PREVISÃO DE ACIDENTES

Os modelos de previsão de acidentes podem ser utilizados para modelar ocorrências de acidentes de acordo com a frequência ou grau de severidade. A frequência de acidentes refere-se à previsão no número de acidentes que ocorreriam em um segmento da via em um período de tempo. A medição do grau de severidade geralmente analisa a relação entre as categorias de gravidade da lesão e fatores influentes, como características do veículo, geometria e infraestrutura da via, fluxo de veículos e condições climáticas (ABDULHAFEDH, 2017).

Dentre as dificuldades na análise de acidentes de acordo com a gravidade, a principal problemática está na forma de classificação da severidade do acidente. Um acidente pode gerar diversas vítimas, com grau de ferimentos diferentes, dessa forma, uma das abordagens utilizadas é a classificação de acordo com a vítima mais grave, dessa forma, acidentes com óbitos, sempre serão acidentes fatais (LORD; MANNERING, 2010).

Dessa forma, a abordagem de modelagem mais comum é considerar a frequência de todos os acidentes e lidar com as gravidades das lesões ou tipos de acidentes separadamente, uma vez que o número total de acidentes é determinado e não possui interferência da análise do observador quanto à gravidade (LORD; MANNERING, 2010). A partir do exposto, o presente trabalho utilizou a análise da frequência de acidentes com vítimas e as variáveis relacionadas.

### 3.2. ESCOLHA DAS VARIÁVEIS

A análise de MPA agregados possui diversas dificuldades associadas a obtenção de dados que podem apresentar interferência na ocorrência de acidentes. Dados socioeconômicos, por exemplo, apresentam grande relação pois pessoas com maior poder socioeconômico utilizam carros mais seguros e estradas melhores, quando comparados a pessoas com menor renda. Devido aos obstáculos em levantar tais dados, o estudo de MPA foca em variáveis relacionadas a infraestrutura viária, enquanto renda e educação dificilmente são estudados (HAUER, 2015).

Para o desenvolvimento do MPA os principais dados necessários referem-se aos acidentes, infraestrutura da via na qual ocorrem os acidentes e fluxo de veículos no local. (CUNTO; NODARI, 2011). Fica a critério do pesquisador quais variáveis relacionadas à infraestrutura viária serão incluídas no modelo. De forma geral as variáveis utilizadas são:

- I. Número de faixas, visto que tal variável possui relação direta no nível de serviço e segurança da via, permitindo ultrapassagens mais seguras;
- II. Existência de acostamento, por apresentar maior segurança ao usuário que necessita parar emergencialmente;
- III. Número de greide, pois aclives e declives influenciam na velocidade e controle dos veículos;
- IV. Existência de segregador/barreira rígida, ao apresentar segregadores entre os fluxos opostos diminui-se a possibilidade de colisão frontal, a qual apresenta maior índice de fatalidade. A existência de segregadores laterais ainda impede que o veículo saia de pista e possa sofrer danos maiores;
- V. Número de acessos apresenta grande relação com número de acidentes pois é entendido como uma interferência na via, algo não esperado pelo motorista;

Em algumas situações os dados estão disponíveis em diferentes padrões, como o caso de acidentes que são georreferenciados, enquanto o fluxo de veículos é especificado na

quilometragem padrão da rodovia. Em casos, como o citado, é necessário que haja tratamentos para padronização dos dados para que se entenda as relações.

### 3.3. COLETA DE DADOS

#### 3.3.1. Ocorrência de acidentes

Em rodovias federais o órgão responsável por realizar o registro de acidentes é a Polícia Rodoviária Federal (PRF) através do boletim de ocorrência. O boletim de ocorrência gerado alimenta a base de dados abertos à população com informações como: período do dia em que o acidente ocorreu, sentido e traçado da via, número de vítimas, veículos envolvidos, além da localização georreferenciada do acidente.

Desde 2015 acidentes que não possuem vítimas podem realizar a solicitação do boletim de ocorrência via internet, sem a necessidade do deslocamento da PRF para o registro do acidente. Tal tratativa reduziu o número de acionamentos da PRF para acidentes sem vítimas, permitindo prontidão para atendimento de acidentes com vítimas. Porém o registro do boletim de ocorrência via internet pode gerar problemáticas relacionadas à geolocalização do acidente.

Além do registro realizado pela PRF, há também os registros realizados pelas concessionárias, em rodovias que são concedidas. Porém, por se tratar de dados privados, é necessário que haja disponibilização dos dados por parte da empresa.

Após a obtenção dos dados georreferenciados dos acidentes é possível relacionar o local do acidente com o segmento da via analisado, de forma a definir quantos acidentes ocorreram no local, no período de estudo.

#### 3.3.2. Infraestrutura da via

A definição dos subsegmentos homogêneos, como explicado anteriormente, pode ser feita a partir de comprimentos fixos ou variáveis. Tal critério fica a cargo das necessidades do pesquisador e disponibilidade dos dados. Após a definição dos subsegmentos, analisa-se as características físicas da via as quais influenciam na variação de desempenho operacional da via, como a classe da rodovia, quantidade e dimensão das faixas de tráfego, existência de acostamentos, velocidade diretriz, desenvolvimento do perfil longitudinal (inclinação e extensão de rampas significativas, ascendentes e descendentes) e tipo de ocupação lindeira e densidade de acessos.

As demais variáveis são àquelas que podem ser adaptadas de acordo com o modelo e número de dados disponíveis para análise. Podendo se referir à declividade ou número de greide de cada segmento analisado, velocidade de fluxo livre como forma de analisar o nível de serviço do segmento em questão, existência ou não de canteiros centrais, segregadores e protetores laterais.

### 3.3.3. Fluxo de veículos

Para a definição do VDMA é necessário que haja contagens do fluxo de veículos em locais estratégicos que consigam definir o fluxo de veículos no segmento homogêneo analisado. Atualmente classificamos as contagens em manual ou automática, sendo que alguns segmentos estudados podem possuir contadores automáticos fixos, de forma a facilitar a coleta de dados. Fica a critério do pesquisador definir a forma como as contagens de tráfego serão realizadas, de acordo com os equipamentos disponíveis e necessidades da pesquisa (STEINSET, 2004).

Após a coleta dos dados a partir de contagens é necessária realizar cálculos para a definição do Volume Diário Médio Anual, que se baseia em múltiplas contagens ao longo do ano. Para a realização da expansão anual é necessário que as contagens sejam realizadas em um período de 24 horas, nos dois sentidos da rodovia, em dias típicos (AASHTO, 2010).

Na contagem realizada é de extrema importância que haja a distinção no tipo de veículo que trafega na rodovia. Tal diferenciação permite a realização de cálculos para o ajuste de uma unidade para todos os veículos. Dessa forma, o volume de veículos mistos é padronizado em Unidades de Carro de Passeio (UCP) de acordo com o modelo adotado pelo Highway Capacity Manual (DNIT, 2006), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Unidades de Carro de Passeio (UCP)

Tipo de veículo	Veículo leve	Caminhões e ônibus convencionais	Semi-reboque/ Reboque	Motocicleta	Bicicleta
Fator de equivalência	1	1,5	2	1	0,5

Fonte: DNIT (2006)

## 3.4. PROPOSIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Após a obtenção dos dados necessários para o estudo é realizado o ajuste do modelo por meio das seguintes etapas: (i) análise da correlação entre as variáveis, (ii) determinação da combinação entre as variáveis analisadas e os parâmetros e (iii) estimação dos valores dos

parâmetros. Após a conclusão das etapas, o objetivo é apresentar um modelo com o melhor desempenho. Em situações em que os modelos não apresentam resíduos satisfatórios é necessário refazer a estimação com inclusão ou retirada de variáveis até que o modelo seja aceito (HAUER, 2015).

Poucas são as afirmações possíveis de serem feitas antes da implementação e análise dos resultados. Pela lógica só se pode afirmar que em segmentos de comprimento zero e em segmentos sem tráfego não haverá acidentes. Dessa forma, subentende-se que na origem a equação escolhida deve iniciar em zero, qualquer outra afirmação acerca da relação entre a previsão de ocorrência de acidentes e características físicas da via precisam ser estimadas (HAUER, 2015).

A primeira ferramenta utilizada para a construção de regressões e desenvolvimento dos modelos foi o Microsoft Excel, com o uso do Solver. No entanto era necessário conhecimento avançado e familiaridade com a planilha de DSV, o que limitaria a compreensão de um pesquisador inexperiente no desenvolvimento do modelo. Dessa forma, atualmente muitos pesquisadores fazem uso de ferramentas estatísticas específicas como SAS, R ou SPSS (GREEN, 2018).

Neste estudo, utilizou-se a ferramenta R para a proposição e ajuste dos modelos. O R é uma linguagem de programação desenvolvida em 1993, que apresenta código aberto, ou seja, possui disponibilização gratuita à comunidade. A linguagem é amplamente conhecida e utilizada para análises estatísticas, visto que uma das principais funcionalidades é manipular, analisar e visualizar dados. O R possui biblioteca específica para calcular modelos matemáticos, como o MBN, Poisson, o que faz, de acordo com Green (2018), com que a modelagem se torne mais simples para novos pesquisadores (GREEN, 2018).

Dessa forma, a partir da estruturação dos dados em formato de planilha no padrão necessário para análise, exporta-se os dados para o R, e então inicia-se as etapas para a construção do modelo:

- I. Análise dos dados por meio dos valores de mínimo, máximos, média, mediana, de forma a visualizar algum dado discrepante;
- II. Organiza-se os dados do menor para o maior de acordo com a variável que será analisada no *CURE plot*;
- III. Cria-se boxplot das variáveis de interesse para análise das variações;
- IV. Em seguida modela-se o gráfico de dispersão e correlação, de forma a entender quais variáveis possivelmente não irão apresentar correlações com o modelo;

- V. Inicia-se os testes com o MBN, com a exclusão de variáveis que apresentarem baixa correlação com o modelo. Além da correlação entre as variáveis, a biblioteca do MBN calcula automaticamente os valores do desvio escalonado, critério de informação de Akaike e o parâmetro de dispersão;
- VI. Calcula-se os valores previstos para o modelo;
- VII. A partir dos valores previstos, calcula-se os resíduos (valores observados - valores previstos) e o quadrado dos resíduos;
- VIII. Gera-se o *CURE plot* a partir dos resíduos e analisa-se o ajuste do modelo, caso o modelo não se ajuste de forma adequada, o processo de modelagem é repetido até se obter uma variável que gere resíduos satisfatórios para o *CURE plot*;
- IX. Calcula-se a Estatística generalizada de Pearson para comparação com o Modelo de Poisson;

Após os cálculos do MBN, é necessário validar com o modelo de Poisson para comprovar aquele que melhor se ajusta ao MPA. Dessa forma, todos os cálculos são repetidos para o modelo de Poisson e os testes estatísticos são comparados com o MBN.

A partir dos modelos apresentados no capítulo 2, entende-se o uso dos modelos lineares generalizados (MLG), que conseguem apresentar bom desempenho ao tratar dados com grande dispersão dos dados, diferentemente dos modelos tradicionais. Para a modelagem, tanto o modelo de Poisson quanto o MBN são testados para análise daquele que melhor atende às variáveis estudadas (ABDULHAFEDH, 2017).

De acordo com Cunto e Nodari (2011), os MLG apresentam diversos indicadores matemáticos que são utilizados para validação e definição do melhor modelo matemático, dentre eles destacam-se:

- I. Desvio escalonado ( $S_p$ );
- II. Estatística generalizada de Pearson ( $X_p^2$ );
- III. Parâmetro de dispersão ( $\sigma_d$ );
- IV. Critério de informação de Akaike (AIC);
- V. Gráfico de resíduos acumulados (*CURE plot*);

O desvio escalonado ( $S_p$ ) realiza a comparação da máxima verossimilhança entre o modelo proposto e um modelo saturado a partir da seguinte equação:

$$S_p = 2(\widehat{\ell}_n - \widehat{\ell}_p) \quad (7)$$

Em que  $\widehat{\ell}_n$  é o valor do logaritmo da máxima verossimilhança do modelo saturado e  $\widehat{\ell}_p$  é o valor do logaritmo da máxima verossimilhança do modelo proposto.

O desvio escalonado propõe que para um modelo se ajustar adequadamente deve apresentar pequeno desvio comparado a um modelo saturado, mesmo que possua poucos parâmetros.

A estatística de Pearson mede o grau de correlação entre os parâmetros, definindo o ajuste do modelo através da seguinte expressão:

$$X_p^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \widehat{\mu}_i)^2}{V(\widehat{\mu}_i)} \quad (8)$$

Em que  $\widehat{\mu}_i$  são valores da variável resposta estimados pelo modelo e  $V(\widehat{\mu}_i)$  é a função de variância estimada pelo modelo. Além do uso da expressão 8 para a definição da significância do modelo também deve-se comprovar tal critério pela expressão 9 abaixo:

$$X_p^2 > X_{\alpha, n-p-1}^2 \quad (9)$$

Em que  $\alpha$  é nível de significância,  $n$  é número de observações e  $p$  é o número de parâmetros. Então a variância explicada pelo modelo difere da variância observada nos dados. A razão entre a estatística de Pearson e a diferença entre o número de observações e o número de parâmetros do modelo caracteriza o cálculo do parâmetro de dispersão  $\sigma_d$ . Dessa forma, valores próximos a 1 indicam que a variância observada nos dados é semelhante à assumida no modelo, enquanto valores menores que 1 mostram dispersão de dados abaixo do modelo proposto e vice-versa.

Para a definição do melhor modelo a ser avaliado é importante analisar os resíduos gerados, sendo um dos critérios, a análise de informação de Akaike (Akaike Information Criterion – AIC). A partir do AIC obtém-se a minimização da informação de Kullback-Leibler (K-L), métrica da distância entre a distribuição verdadeira e o modelo proposto. Essa medida baseia-se na soma do ponto máximo da função de logaritmo da verossimilhança (FLV) e a penalidade associada ao número de parâmetros do modelo. De forma geral, quanto menos informações são perdidas no modelo proposto, maior a qualidade do modelo e menor o valor do AIC.

$$AIC = -2 \widehat{\ell}_p + 2k \quad (10)$$

Em que  $AIC$  é o critério de Informação de Akaike,  $\widehat{\ell}_p$  é o máximo valor da função de máxima verossimilhança para o modelo estimado e  $k$  é o número de parâmetros incluídos no modelo (variância).

Dessa forma, para modelos com poucos parâmetros haverá pequeno viés, porém com elevada variância, aumentando a aplicabilidade do modelo. Enquanto para modelos com elevado número de parâmetros, a variância será baixa devido o ajuste, entretanto devido à complexidade, o modelo será válido apenas para os dados analisados. Tal modelo com elevado número de parâmetros apresenta baixa perda de informação e conseqüentemente baixo valor do AIC, apresentando melhor ajuste.

E por fim, como descrito no capítulo 2, o *CURE plot* é a análise feita através do gráfico de resíduos acumulados com informações dos valores esperados e observados, de forma a entender o comportamento do modelo proposto. Sendo possível, através de tais validações, o desenvolvimento do modelo através da aplicação prática do estudo de caso em rodovias, como será apresentado no capítulo 4.

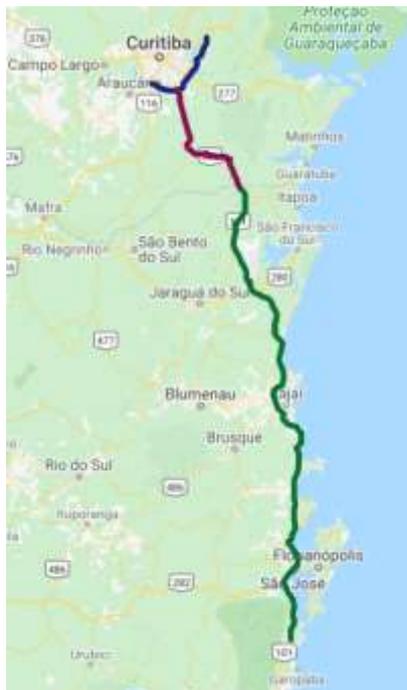
#### 4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE PREVISÃO DE ACIDENTES

O desenvolvimento do modelo de previsão de acidentes foi aplicado nas rodovias administradas pela Autopista Litoral Sul (ALS), propondo um modelo de previsão de acidentes a partir dos dados disponibilizados.

##### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O trecho concedido pela ALS apresenta 354 km de extensão, compreendendo três rodovias federais: BR-116/PR, BR-376/PR e BR-101/SC. O trecho liga Curitiba/PR à Florianópolis/SC, passando pela maior cidade de Santa Catarina – Joinville. A Figura 5 apresenta o trecho administrado.

Figura 5 – BR116/PR em azul, BR376/PR em roxo, BR101/SC em verde



Fonte: Google Maps

Devido à proximidade com 5 portos: Porto de Itapoá, Porto de Paranaguá, Porto de São Francisco do Sul, Porto de Navegantes e Porto de Imbituba, o trecho administrado possui grande fluxo de veículos pesados, em torno de 4 milhões por ano, podendo trazer impactos na frequência de acidentes do trecho analisado.

Quanto ao fluxo de veículos leves, há grande concentração nas cidades litorâneas, visto que a rodovia é utilizada para tráfego diário dos moradores da região. Além da intensificação do fluxo de veículos de caráter turístico aos fins de semana decorrente do litoral catarinense, gerando um fluxo em torno de 15 milhões de veículos anualmente nos segmentos com maior movimento.

Cada uma das três rodovias administradas possui sua particularidade. Dessa forma, cada rodovia foi analisada separadamente, de forma a entender como cada particularidade pode influenciar nas análises.

A rodovia BR-116/PR, é a extensão da rodovia BR116 que atravessa o Brasil. No trecho administrado pela ALS, possui apenas 44 km de extensão, sendo conhecida como o Contorno Leste de Curitiba, apresenta tráfego intenso nos horários de pico urbano devido ao tráfego cotidiano da região de Curitiba e São José dos Pinhais.

A BR-376/PR apresenta 67 km de extensão, e compreende a Serra do Mar, possuindo grandes aclives e declives, além de curvas acentuadas em determinados trechos. A rodovia apresenta poucas intervenções de cidades lindeiras, e não apresenta conexão com outras rodovias no decorrer do trecho. Apresentando pouca variação de VDMA no decorrer de toda sua extensão.

A BR-101/SC apresenta 244 km de extensão e possui grande parte do seu trecho percorrendo o litoral catarinense, tal fator justifica fluxo intenso, principalmente na região próxima a Balneário Camboriú/SC e São José/SC.

Todo o trecho administrado é duplicado, não havendo regiões onde haja interação entre fluxos de sentidos opostos. A segregação entre os sentidos opostos é feita através de canteiro central e/ou barreira rígida. A barreira rígida ou metálica também está presente em alguns pontos da lateral da via.

#### 4.2. ESCOLHA DO MÉTODO DE PREVISÃO DE ACIDENTES

A Concessionária possui três tipos de classificação dos acidentes: acidentes com danos materiais, acidentes com vítimas, acidentes com vítimas fatais. Acidente com danos materiais é aquele no qual não há nenhuma vítima ferida, acidentes com vítimas possuem classificação das vítimas em vítimas leves, moderadas e graves, e o acidente com vítima fatal possui as mesmas classificações do acidente com vítimas com a inclusão da vítima fatal.

A partir do entendimento que um acidente é um fato aleatório, sempre haverá a probabilidade da ocorrência de acidentes. Porém, visto o alto custo social e financeiro dos

acidentes com vítimas e fatais, organizações e estudos têm buscado reduzir esse tipo de acidente. Dessa forma, o trabalho buscou analisar a frequência de ocorrência de acidentes com vítimas e acidentes com vítimas fatais.

#### 4.3. ESCOLHA DAS VARIÁVEIS

As variáveis foram escolhidas de acordo com a necessidade do modelo e disponibilidade da Concessionária. Algumas variáveis não foram analisadas por atender padrões de segurança viária adotados pelo Manual DNIT (2006), como faixas de tráfego com no mínimo 3,60 metros de largura, acostamentos ou afastamentos laterais com largura mínima de 1,80 metros, faixas com livre ultrapassagem e ausência de cruzamentos na via principal.

#### 4.4. COLETA DE DADOS

O intervalo de tempo estudado foi de janeiro de 2017 a dezembro de 2019, visto que tais dados conseguem apresentar ocorrências de acidentes semelhantes aos acidentes atuais, não havendo grande número de construções civis, como pontes, correção geométrica de curvas, dentre outras, que gere grande impacto nas análises, não sendo necessária a inclusão das variáveis temporais associadas.

##### 4.4.1. Ocorrência de acidentes

O registro de ocorrência de acidentes em uma concessionária é realizado através do atendimento. O acionamento dos recursos é realizado pelo centro de controle operacional, que recebe a informação do acidente através de contato telefônico da empresa, contato de terceiros, como bombeiros, PRF, dentre outros, ou a partir da visualização das câmeras. Após a chegada do recurso no local do acidente são colhidas as informações dos envolvidos e do acidente, bem como o local, através do GPS.

A partir das informações obtidas, é feito o registro do acidente no sistema. Para análise, foram disponibilizados o local exato do acidente, sendo possível definir quantos acidentes ocorreram no segmento analisado.

#### 4.4.2. Fluxo de veículos

Dado a correlação entre o fluxo de veículos e a ocorrência de acidentes em rodovias observado em estudos anteriores, o principal critério adotado para a definição do segmento homogêneo foi o VDMA.

Todos os cálculos para a obtenção do fluxo de veículos, que define a exposição do usuário ao acidente foram disponibilizados pela Concessionária, bem como a metodologia utilizada. Sendo o Volume Diário Médio Anual (VDMA) calculado a partir da análise de múltiplas contagens ao longo do ano. As contagens foram realizadas em intervalos de 15 minutos, em um dia útil típico, durante 24 horas.

Além dos dados obtidos a partir de contagens, foram utilizados os dados das cinco praças de pedágio presentes no trecho estudado. Nos segmentos que compreendiam as praças de pedágio foram utilizados dados de 8.760 horas do ano de análise, separados por classe de veículo e sentido.

Após a obtenção dos dados das praças e pedágio foi necessário tratar os dados de expansão semanal e expansão mensal para a obtenção de fatores de expansão semanal, mensal, respectivamente. A partir do tratamento dos dados foi possível calcular o VDMA.

A expansão semanal para os dados coletados a partir das contagens, foi feito através da razão entre o volume semanal e o volume do dia em que foi realizada a contagem, na respectiva semana em que foi efetuada a contagem, da praça de pedágio de referência, de acordo com a categoria de veículo e sentido do tráfego observado.

O fator de expansão semanal foi calculado para as categorias de veículos leves, caminhões unitários e caminhões articulados. Para ônibus, foi utilizado o mesmo fator dos veículos leves, como forma de simplificação devido a limitações contidas nos dados, uma vez que, a praça de pedágio não obtém os dados de ônibus separadamente. Devido ao baixo número de ônibus no VDMA total, entende-se tal simplificação não gere impactos significativos nos dados.

A expansão mensal é calculada a partir da expansão semanal obtida, sendo a razão entre o volume mensal e o volume semanal, no mês e semana, respectivamente, da contagem realizada na praça de pedágio de referência.

Os dados referentes ao VDMA disponibilizados pela Concessionária apresentou separação entre o fluxo para veículos leves e pesados, sendo que para o cálculo dos veículos pesados foram realizadas as conversões de acordo com o Manual DNIT (2006).

Devido à necessidade de obter-se o VDMA absoluto no segmento analisado foram realizados os cálculos inversos aos apresentados pelo Manual. Assim, entende-se que o grande número de cálculos realizados para a obtenção do VDMA de veículos pesados pode apresentar grandes variações do valor real.

Para realizar o cálculo do VDMA, calcula-se o fluxo de veículos no do trecho observado. O Manual define a necessidade do fator de ajustamento para veículos pesados ( $f_{vp}$ ), dado na equação 11.

$$f_{vp} = \frac{1}{1 + P_c(E_c - 1) + P_{vr}(E_{vr} - 1)} \quad (11)$$

Em que  $P_c$  é a proporção de caminhões e ônibus na corrente de tráfego, em decimal,  $P_{vr}$  é a proporção de veículos de recreio na corrente de tráfego, em decimal,  $P_{vr}$  é o equivalente de caminhões e ônibus, em carros de passeio e  $E_{vr}$  é o equivalente de veículos de recreio, carros de passeio.

O cálculo do valor equivalente em veículo de passeio ( $E_c$ ) é realizado de duas formas, para segmentos extensos de rodovia utilizando-se a Tabela 82 do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006) e para segmentos com rampas específicas utiliza-se as tabelas 83, 84 e 85 do mesmo Manual.

A proporção de veículos pesados e leves é calculado a partir das contagens realizadas no segmento. Após a obtenção das variáveis é possível definir o fator de ajustamento para veículos pesados. Dessa forma, basta multiplicar o  $f_{vp}$  pelo VDMA de veículos pesados.

Após o cálculo “inverso” para a definição do número absoluto de veículos pesados que trafegam no segmento, os valores do VDMA de veículos pesados e leves foram somados para a definição do VDMA total. Entendendo-se que a realização do cálculo inicial de veículos pesados nos dados disponibilizados pela Concessionaria, de acordo com os critérios do Manual DNIT e o cálculo inverso realizado no atual estudo para obtenção do tráfego absoluto pode apresentar distorções nos dados.

#### 4.4.3. Infraestrutura da via

Os segmentos homogêneos foram definidos a partir da análise dos trechos que apresentam características físicas e de fluxos semelhantes, devido às dificuldades

computacionais em definir trechos homogêneos com comprimentos iguais, visto que são muitas variáveis dentre de um mesmo segmento.

O número de acessos foi o único dado obtido através de fontes externas, através do Google Earth. Vale ressaltar que grandes variações no VDMA de rodovias são observadas em locais nos quais há intersecções com rodovias de grande importância e acessos a regiões metropolitanas ou cidades de maior concentração populacional. Acessos a pequenas cidades e rodovias de baixo VDMA não causam efeito significativo no tráfego.

Após definido os segmentos homogêneos de acordo com o VDMA, analisou-se o greide do segmento e assim, realizou-se nova subdivisão dos segmentos homogêneos, visto que o greide possui interferência direta no número de acidentes. Dessa forma, o greide foi categorizado de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Categoria para greide

Greide	Categoria
Plano	0
>0 e 2=<	1
>2 e 4=<	2
>4 e 5=<	3
>5	4
Ondulado	5

Fonte: Autor

Assim como os valores de greide, a velocidade de fluxo livre da rodovia, foi separada em faixas de valores para melhor análise. Tais dados também foram disponibilizados pela Concessionária. A

Tabela 3 apresenta as faixas de valores da velocidade de fluxo livre.

Tabela 3 - Categorias para velocidade em fluxo livre

Velocidade	Categoria
61-75	1
76-90	2
91-105	3
>106	4

Fonte: Autor

Outra variável analisada foi o número de acessos, porém devido não haver segmentos homogêneos com número maior que 6 acessos, não houve classificação de acordo com o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT, e usou-se os valores absolutos por segmento.

Devido a definição do comprimento dos segmentos homogêneos terem considerado o fluxo de veículos e o relevo, não houve análise de variáveis binárias, visto que a classificação em porcentagens se adequou de forma mais satisfatória. Dentre as variáveis classificadas em porcentagens podemos citar: (i) barreira rígida latera, (ii) barreira rígida central, (iii) marginal, (iv) acostamento. Sendo classificadas de 0% quando não houvesse presença no segmento homogêneo analisado e 100% quando cobrisse todo o segmento.

#### 4.5. PROPOSIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

A partir da consolidação dos dados das rodovias federais apresentadas anteriormente desenvolveu-se os MPA desagregados de frequência de acidentes através das equações associadas à correlação entre os parâmetros no software R.

Para a análise considerou-se primeiramente segmentos com no mínimo 250 metros, porém devido a escolha da análise de acidentes com vítimas, muitos segmentos apresentaram número de acidentes igual a zero. Com o intuito de reduzir o excesso de zeros da análise, o comprimento mínimo dos segmentos foi aumentado para um quilômetro.

Além da definição do tamanho mínimo dos segmentos definiu-se a separação o trecho administrado pela concessionária de acordo com cada rodovia como apresentado a seguir.

##### 4.5.1. Rodovia BR-101/SC

Após a definição dos segmentos homogêneos chegou-se a 333 amostras para análise da BR-101/SC. O primeiro passo no software R foi gerar o gráfico de dispersão e correlação para as variáveis da rodovia.

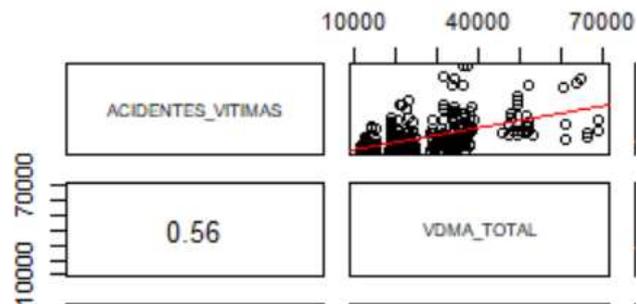
O gráfico apresentado na Figura 7 apresenta as correlações entre as variáveis e os acidentes com vítimas nos segmentos homogêneos analisados. Vale destacar que as variáveis que apresentam correlação negativa, como a velocidade, acostamento e marginal são variáveis que o seu aumento gera redução de acidentes.

A relação entre o aumento da velocidade de fluxo livre e redução na ocorrência de acidentes com vítimas deve-se à ligação entre o nível de serviço e a velocidade de fluxo livre. De forma simplificada, entende-se que quanto melhor o nível de serviço, menor o número de

veículos no trecho na analisado, reduzindo a exposição do motorista e aumentando a velocidade de fluxo livre. Dessa forma, quanto maior a velocidade de fluxo livre ou melhor o nível de serviço, menor o número de acidentes com vítimas.

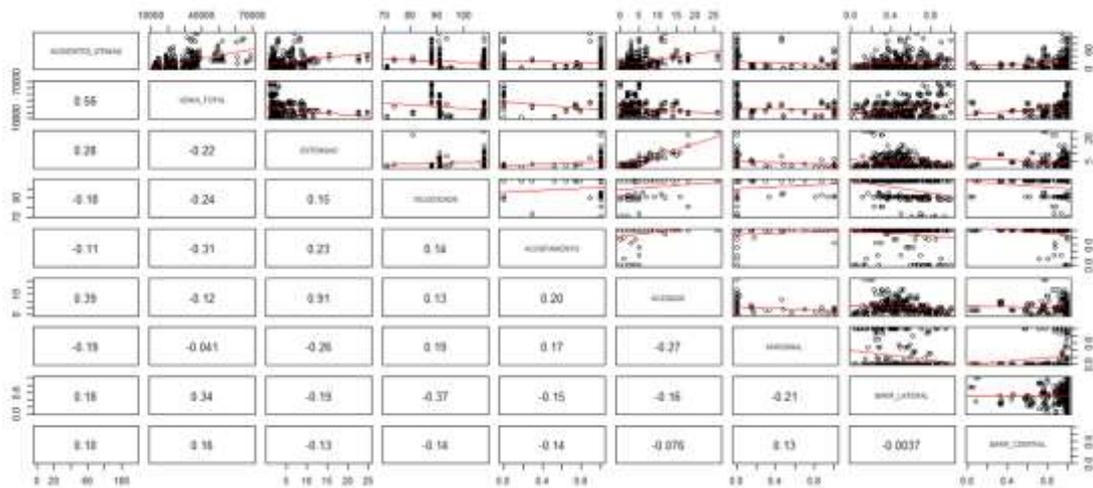
A partir do gráfico apresentado na Figura 6 é possível avaliar que a variável que possui maior relação com a ocorrência de acidentes na rodovia analisada é o VDMA, justamente por justificar a maior exposição dos veículos.

Figura 6 - Gráfico de dispersão e correlação do VDMA da BR-101/SC



Fonte: Autor

Figura 7 - Gráfico de dispersão e correlação da BR-101/SC



Fonte: Autor

Após a análise do gráfico de dispersão é importante realizar os testes para definir o modelo estatístico que será utilizado. Dessa forma é realizado a análise comparativa entre o modelo estatístico de Poisson e Binomial Negativa. Para definir a escolha do melhor modelo estatístico foram utilizados os testes matemáticos apresentados no capítulo 3, e os resultados são mostrados na Tabela 4:

Tabela 4 – Testes estatísticos para validação do modelo

Teste	Símbolo	Binomial Negativo	Poisson
Desvio escalonado	$S_p$	350.19	2061.30
Estatística generalizada de Pearson	$X_p^2$	333.19	1912.51
Parâmetro de dispersão	$\sigma_d$	0.74	5.56
Critério de informação de Akaike	AIC	2760.90	3750.30

Fonte: Autor

Os quatro testes apresentados propõem o melhor ajuste para aquele no qual se observa o menor valor. A partir do exposto é possível visualizar que o modelo de Poisson apresenta valores acima do MBN em todos os testes apresentados. Dessa forma, para a BR-101/SC, de segmentos com comprimento mínimo de um quilômetro, o modelo que apresenta o melhor ajuste é o Binomial Negativo.

Assim, foram realizadas análises das variáveis que melhor se adequaram ao modelo proposto, através do nível de significância das variáveis. De acordo com Mayer e Summergill (1996), variáveis que apresentem significância de 99% não devem ser rejeitadas do modelo. Dessa forma, variáveis que não apresentaram significância mínima foram excluídas do modelo a cada teste. A exclusões são realizadas até que todas as variáveis presentes no modelo apresentassem significância maior que 99%, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Print do software R para o modelo da BR101/SC

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -15.336308  0.931237 -16.469 < 2e-16 ***
log(VDMA_TOTAL)  1.781760  0.080908  22.022 < 2e-16 ***
log(EXTENSAO)    0.942277  0.046124  20.429 < 2e-16 ***
VELOCIDADE     -0.013494  0.003473  -3.885 0.000102 ***
BARR_LATERAL    0.392005  0.158122   2.479 0.013170 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for Negative Binomial(4.0384) family taken to be 1)

Null deviance: 1199.49  on 332  degrees of freedom
Residual deviance:  350.19  on 328  degrees of freedom
AIC: 2236.5

Number of Fisher Scoring iterations: 1

      Theta:  4.038
Std. Err.:  0.418

2 x log-likelihood: -2224.498

```

Fonte: Autor

Dessa forma, dentre as variáveis apresentadas, a extensão, porcentagem de barreira lateral, velocidade em fluxo livre e VDMA foram aquelas que apresentaram melhor desempenho. A Tabela 5 apresenta as estatísticas das variáveis citadas.

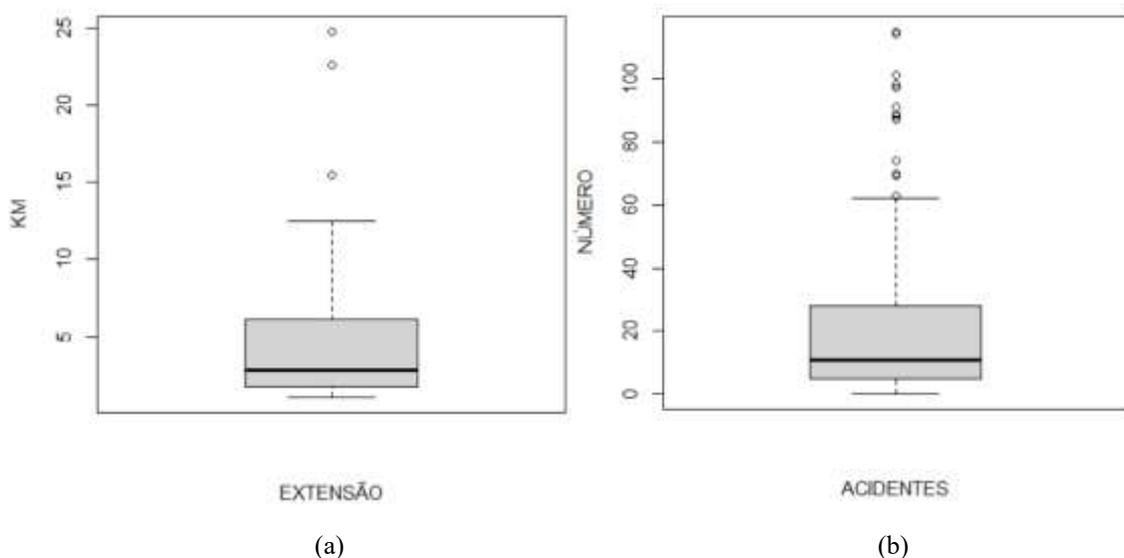
Tabela 5 - Estatísticas variáveis dependentes e independentes - BR-101/SC

	Extensão	Acidentes	Barreira Lateral	Velocidade	VDMA
<b>Mínimo</b>	1.06	0	0.02	71	11373
<b>1º quartil</b>	1.74	5	0.32	91	15166
<b>Mediana</b>	2.83	11	0.48	108	22903
<b>Média</b>	4.41	19.15	0.49	100.7	25855
<b>3º quartil</b>	6.10	28	0.64	108	33312
<b>Máximo</b>	24.77	115	1	108	69018

Fonte: Autor

Avaliando cada variável apresentada na Tabela 5 é possível gerar um boxplot (apresentado na Figura 9), para análise individual do comportamento das variáveis. Dessa forma, entende-se que a extensão varia entre 1,06 quilômetro e 24,77 quilômetros, porém há grande concentração de segmentos menores que 6,1 quilômetros, e valores acima de 14 quilômetros são outliers (Figura 9(a)).

Figura 9 - Boxplot da extensão do segmento e número de acidentes da BR-101/SC

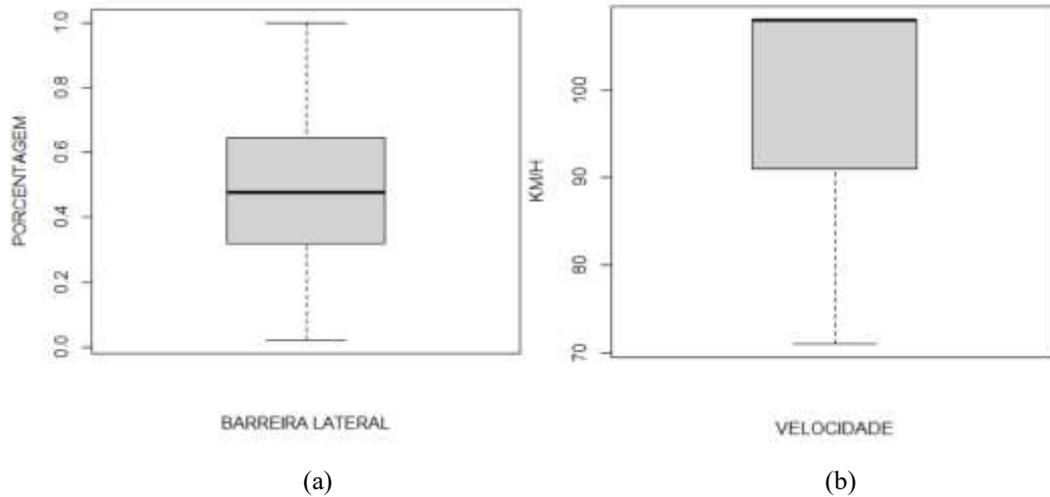


Fonte: Autor

Quanto aos acidentes (Figura 9(b)) também há grande dispersão nos dados, variando de 0 a 115 acidentes, com grande concentração no intervalo entre cinco e 28, sendo que

acidentes acima de 60 são outliers. A existência de barreira (Figura 10 (a)) varia entre 0,02% e 1%, com maior concentração entre 0,3% e 0,6% e por apresentar baixa dispersão nos dados não há presença de outliers, o que pode ter influenciado para a correlação gerada no modelo.

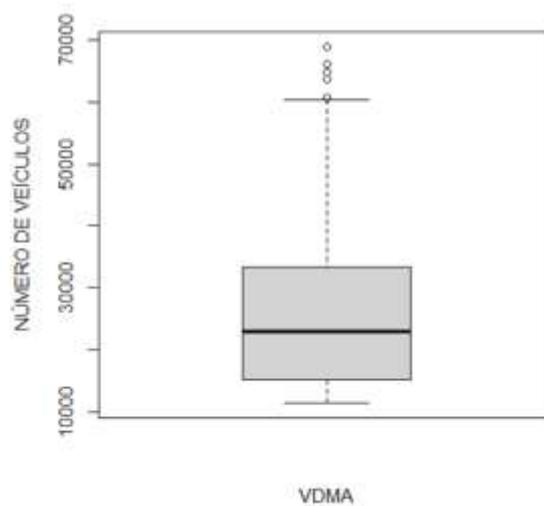
Figura 10 - Boxplot da porcentagem de barreira lateral e velocidade da BR-101/SC



Fonte: Autor

O mesmo pode ser observado do boxplot da velocidade (Figura 10 (b)), o qual varia entre 71 e 108 km/h, com concentração de dados entre 91 e 108. E por fim, a Figura 11 apresenta o boxplot do VDMA, com valores entre 11373 e 69018 veículos, concentração de dados entre 15166 e 33312 veículos, e outliers a partir de 60 mil veículos.

Figura 11 - Boxplot do VDMA da BR-101/SC



Fonte: Autor

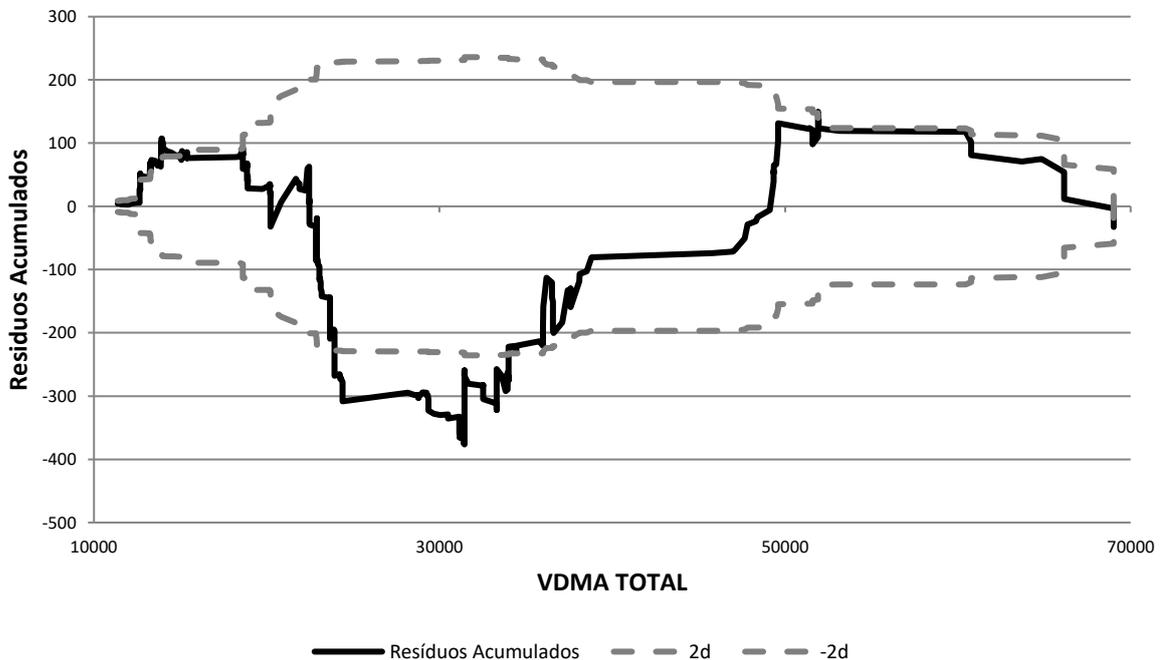
A partir do exposto é possível notar que as variáveis que apresentaram melhor correlação com a ocorrência de acidentes e o VDMA possuem poucas dispersões de valores no boxplot, ou seja, menor aleatoriedade. A estabilidade da variável em não possuir outliers influência diretamente nas observações da influência destas sobre a ocorrência de acidentes.

Sendo assim, a relação existente entre a velocidade em fluxo livre e a ocorrência de acidentes, como explicado anteriormente, está associada à capacidade da via, ou seja, quanto maior o fluxo de veículos na via, menor a velocidade em fluxo livre. Tal fator, justifica o aumento de acidentes ao se reduzir a velocidade em fluxo livre.

A variável relacionada à barreira lateral mostra que a correlação é inversa, assim como a variável de velocidade em fluxo livre, quanto menos barreira lateral maior o número de acidentes, pois aumenta-se o risco do usuário em sair de pista e gerar acidentes com vítimas.

O *CURE plot* do modelo proposto pode ser observado na Figura 12. No qual é notável que houve dois pontos de ascensão (12638; 49117), um ponto de queda (22449) e o gráfico não finaliza na origem.

Figura 12 - CURE plot da BR-101/SC



Fonte: Autor

Para exemplificar os motivos dos picos presentes nos segmentos com VDMA entre 12617 e 12911 veículos, a Tabela 6 apresenta os dados dos segmentos em questão. A partir das análises é possível notar que o trecho está compreendido entre o km 221,5 e km 248,48, ou seja,

os últimos quilômetros da rodovia analisada. Os locais nos quais houve picos de superdispersão nos resíduos são pontos que apresentaram elevado número de acidentes, como mostrado nas linhas em destaque, e baixo VDMA.

Tabela 6 - Análise dos dados entre o VDMA 12617 e 12911

ID	SENTIDO	EXTENSÃO	ACIDENTES	BARR_LATERAL	VELOCIDADE	VDMA
510	1	1.17	4	90%	108	12617
512	1	1.53	1	2%	108	12618
378	0	1.81	6	63%	108	12638
379	0	8.2	21	39%	108	12638
380	0	1.33	3	69%	71	12638
382	0	9.48	15	31%	108	12638
129	1	7.31	11	21%	108	12668
131	1	1.33	3	60%	71	12668
132	1	2.16	8	82%	71	12668
133	1	9.48	17	26%	108	12668
187	0	1.81	5	55%	108	12668
188	0	8.2	17	38%	108	12668
189	0	1.33	2	69%	71	12668
191	0	9.48	5	33%	108	12668
320	1	7.31	13	20%	108	12700
322	1	1.33	3	60%	71	12700
323	1	2.16	2	85%	71	12700
324	1	9.48	9	39%	108	12700
330	0	1.21	1	76%	93	12911

Fonte: Dados fornecidos pela Autopista Litoral Sul

O mesmo ocorre no ponto com VDMA entre 49334 e 49599, são pontos que apresentam aumento considerável no número de acidentes, como mostrado na Tabela 7, alto VDMA, gerando superdispersão nos pontos.

Tabela 7 - Análise dos dados entre o VDMA 49334 e 49599

ID	SENTIDO	EXTENSAO	ACIDENTES	BARR_LATERAL	VELOCIDADE	VDMA
567	0	1.3	29	58%	91	48399
561	0	1.9	48	69%	88	49117
564	0	1.46	70	36%	88	49334
565	0	2.54	62	54%	88	49334
126	1	1.3	22	67%	91	49339
185	0	1.3	36	53%	91	49351
508	1	1.3	28	94%	91	49480
373	0	1.46	63	36%	88	49599
374	0	2.54	74	54%	88	49599
314	1	1.8	30	78%	88	51398
315	1	2.2	48	76%	88	51398
505	1	1.8	38	90%	88	51596
506	1	2.2	25	78%	88	51596
182	0	1.46	39	36%	88	51911

Fonte: Dados fornecidos pela Autopista Litoral Sul

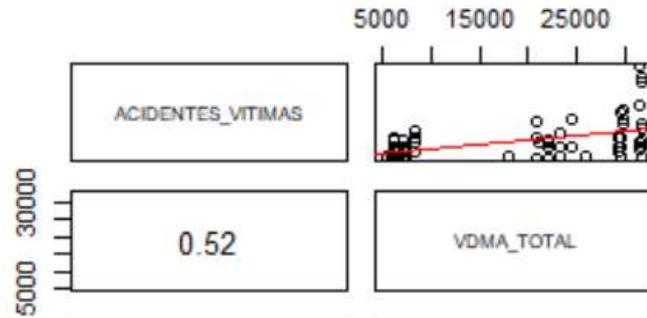
No segmento com VDMA entre 22449 e 24394, houve uma redução de acidentes em determinados segmentos, gerando uma subdispersão no ponto. Entre o VDMA de 22449 e 38202 há grande variação no número de acidentes analisada, em partes devido à extensão do segmento analisado, porém há também muita influência do comportamento do segmento analisado. Diversos pontos que apresentaram subdispersão trata-se de pontos com grande concentração populacional, e conseqüentemente, grande número de acidentes.

Através das observações foi possível determinar os motivos para a subdispersão ou superdispersão dos dados, resultando na ultrapassagem dos limites estabelecidos pelo *CURE plot*. Dessa forma, o modelo entende-se que o modelo não se ajustou de forma esperada.

#### 4.5.2. Rodovia BR-116/PR

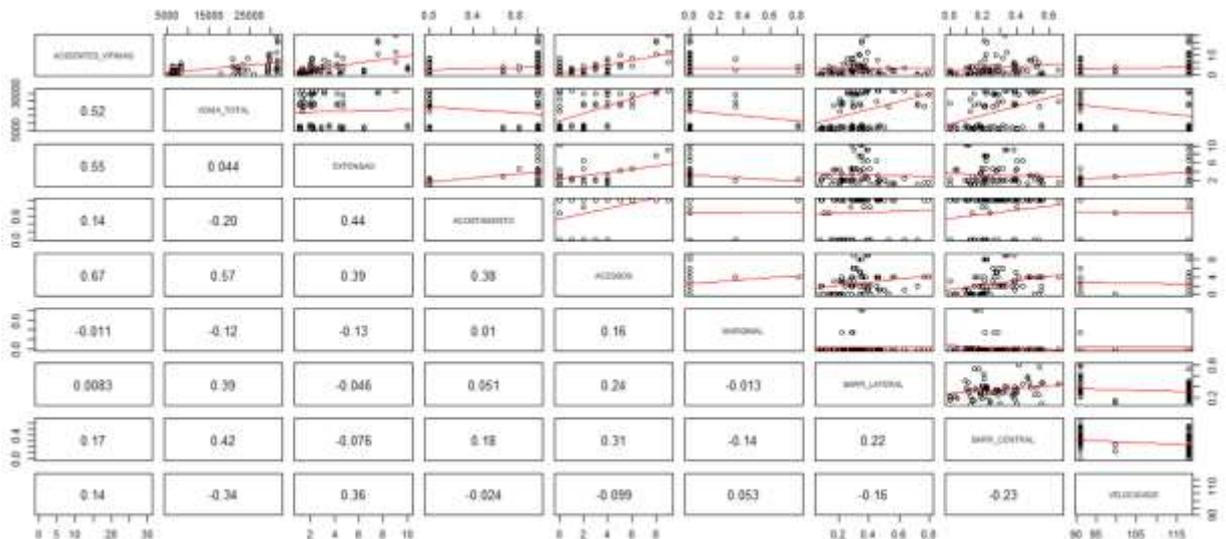
Após a segmentação da rodovia BR-116/PR foram obtidos 81 amostras para análise. E assim como na rodovia BR-101/SC, gerou-se o gráfico de dispersão e correlação (Figura 14) para análise das correlações entre o número de acidentes e as variáveis utilizadas. Sendo o VDMA a variável com maior correlação com o número de acidentes com vítimas como mostrado na Figura 13. De forma geral, é possível analisar que a existência de acostamento, marginal e barreira lateral apresentaram baixa correlação com a ocorrência de acidentes na rodovia em questão.

Figura 13 - Gráfico de dispersão e correlação do VDMA da BR-116/PR



Fonte: Autor

Figura 14 - Gráfico de dispersão e correlação da BR-116/PR



Fonte: Autor

Também foi realizado análise comparativa entre os modelos estatísticos de Poisson e Binomial Negativa. E assim como o modelo proposto para a rodovia BR-101/SC, é possível analisar a partir da Tabela 8 que o modelo de Poisson apresenta valores acima do MBN em todos os testes apresentados. Dessa forma, o MBN apresentou o melhor ajuste.

Tabela 8 - Estatísticas variáveis dependentes e independentes - BR-116/PR

Teste	Símbolo	Binomial Negativo	Poisson
Desvio escalonado	$S_p$	89.1	283.1
Estatística generalizada de Pearson	$X_p^2$	92.8	296.7
Parâmetro de dispersão	$\sigma_d$	1.16	3.68
Critério de informação de Akaike	AIC	566.4	659.3

Fonte: Autor

Após a definição do modelo utilizado foi realizado a validação do modelo de acordo com as variáveis que apresentaram melhor correlação, a partir da análise do nível de significância das variáveis. Seguindo o mesmo critério adotado para análise da BR-101/SC, as significâncias com valores inferiores a 99% foram excluídas do modelo a cada teste, até restar apenas as variáveis com significância superior àquela proposta, como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Print do software R para o modelo da BR-116/PR

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  -3.59954    0.88052  -4.088 4.35e-05 ***
log(VDMA_TOTAL)  0.58000    0.09266   6.259 3.87e-10 ***
log(EXTENSAO)   0.70828    0.08814   8.036 9.31e-16 ***
ACESSOS        0.08484    0.02714   3.126 0.00177 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for Negative Binomial(7.3145) family taken to be 1)

Null deviance: 389.642 on 80 degrees of freedom
Residual deviance: 89.071 on 77 degrees of freedom
AIC: 566.39

Number of Fisher Scoring iterations: 1

              Theta: 7.31
             Std. Err.: 1.79

2 x log-likelihood: -556.393

```

Fonte: Autor

Assim, além das variáveis relacionadas ao comprimento do segmento e VDMA, foi incluída a variável de número de acessos no segmento. Os valores estatísticos das variáveis são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Estatísticas variáveis dependentes e independentes - BR-116/PR

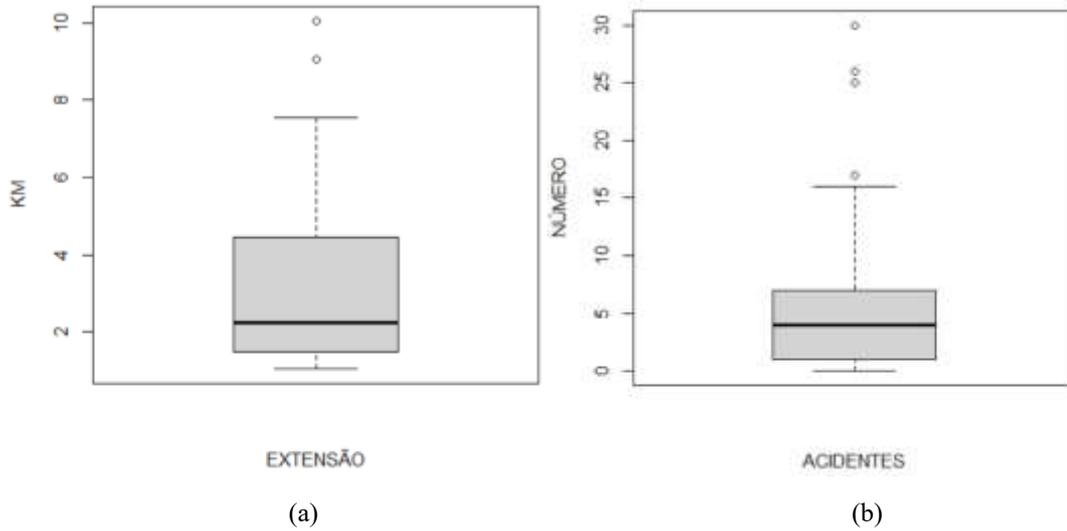
	<b>Extensão</b>	<b>Acidentes</b>	<b>Acessos</b>	<b>VDMA</b>
<b>Mínimo</b>	1.04	0	0	5377
<b>1º quartil</b>	1.47	1	0	7002
<b>Mediana</b>	2.24	4	2	20957
<b>Média</b>	3.26	5.27	2.52	17563
<b>3º quartil</b>	4.46	7	4	29588
<b>Máximo</b>	10.06	30	9	31863

Fonte: Autor

Com base nas variáveis apresentadas na Tabela 9 gerou-se um boxplot (apresentado na Figura 16) para cada variável, para análise individual do comportamento. A partir do exposto entende-se que a extensão (Figura 16 (a)) varia entre 1,04 quilômetro a 10,06 quilômetros, porém

a maior concentração de dados encontra-se entre 1,47 e 4,46 quilômetros, com outliers para valores acima de 7,8 quilômetros.

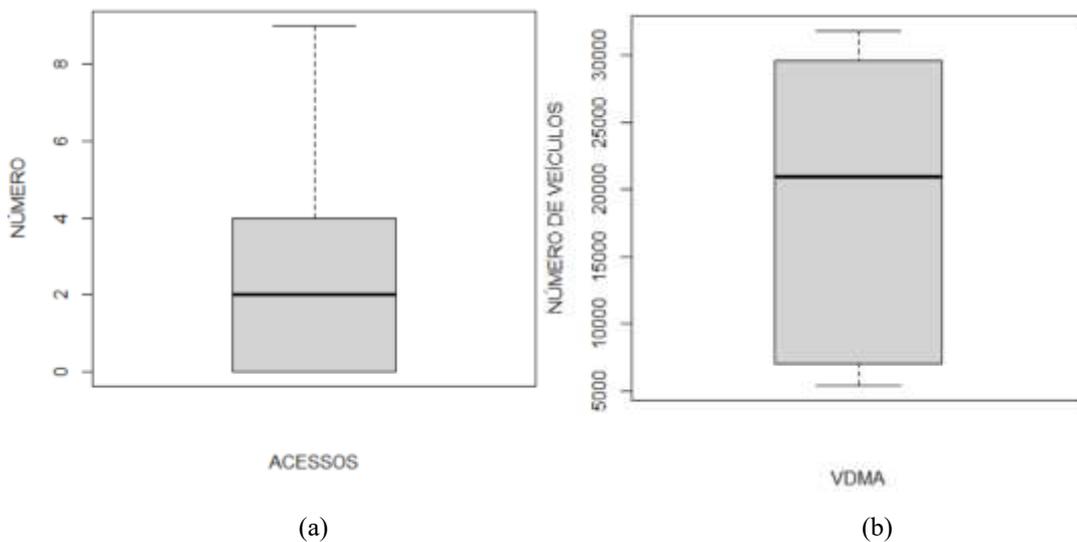
Figura 16 - Boxplot da extensão da BR-116/PR



Fonte: Autor

Os boxplot dos acidentes (Figura 16 (b)) apresentaram grande dispersão, com dados variando de 0 a 30 acidentes, a grande concentração ocorre no intervalo entre um e sete, sendo que acidentes acima de 16 são outliers. A variável relacionada aos acessos (Figura 17 (a)) apresenta dados entre zero e nove nos segmentos analisados, com concentração de dados entre zero e quatro acessos, não apresentando outliers.

Figura 17 - Boxplot de acessos e VDMA da BR-116/PR



Fonte: Autor

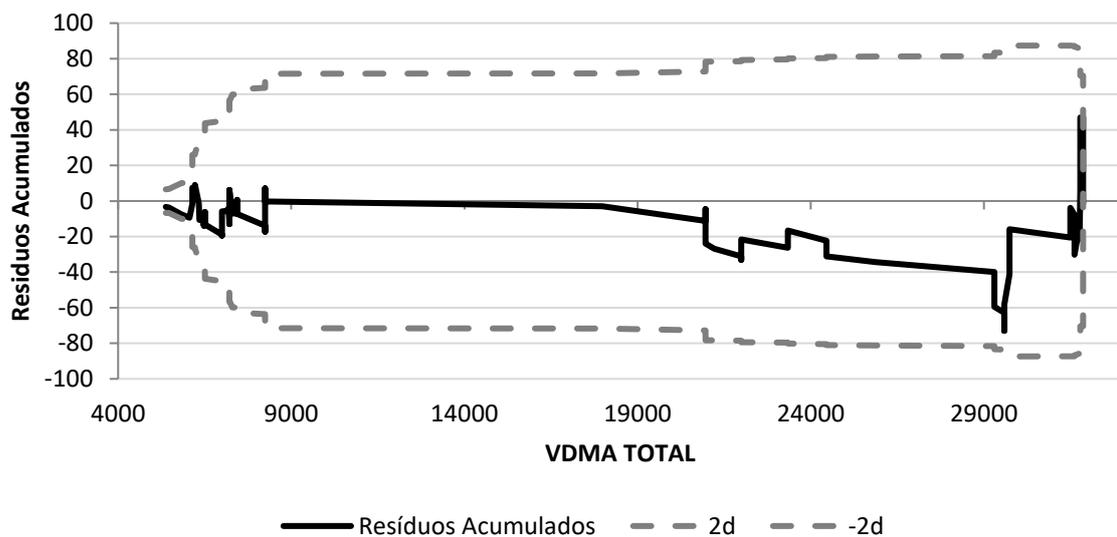
E por fim, a (Figura 17 (b)) apresenta o boxplot do VDMA, com valores entre 5377 e 31863 veículos e concentração de dados entre 7002 e 29588 veículos. Assim como o número de acessos, o VDMA não apresentou outliers no boxplot.

Assim como no modelo da BR-101/SC, houve grande correlação entre o VDMA e a ocorrência de número de acidentes, visto que quanto maior o fluxo de veículos mais expostos os veículos estão. A variável relacionada ao número de acessos apresentou grande correlação à ocorrência de acidentes devido à rodovia atender um grande fluxo cotidiano, apresentando elevado número de acessos à via principal.

O *CURE plot* do modelo proposto pode ser observado na Figura 18. Sendo possível observar que o modelo não ultrapassou os limites em nenhum ponto. Porém, também vale salientar que entre o VDMA de 8246 e 17997 houve pouca variação ao redor do eixo horizontal, o que pode representar que entre esse VDMA o modelo se ajusta de forma satisfatória, ou seja, é possível prever de forma mais precisa a relação entre o número de acessos e aumento de VDMA com a ocorrência de acidentes.

Nos segmentos com VDMA maior que 20957 há grande variação na previsão, devido segmentos com número de acidentes abaixo do que proposto pelo modelo, porém o erro se apresenta de forma aceitável, visto que se encontra no intervalo de limites.

Figura 18 - *CURE plot* da BR-116/PR



Fonte: Autor

Na Tabela 10 é possível analisar os segmentos com VDMA entre 24458 e 29735, alguns pontos nos quais há redução significativa no número de acidentes em segmentos nos quais o número de acessos continua semelhante aos segmentos próximos.

Tabela 10 - Análise dos dados entre o VDMA 24458 e 29735

ID	SENTIDO	INCLINACAO	EXTENSAO	ACIDENTES	ACESSOS	VDMA
212	0	0.01	2.04	4	4	24458
213	0	0.01	4.66	13	6	24458
215	0	0.01	1.47	4	4	24458
405	0	0.01	1.33	1	0	25873
403	0	0.01	2.04	4	4	29301
404	0	0.01	4.66	7	6	29301
406	0	0.01	1.47	2	4	29301
389	1	0.01	2.25	4	3	29588
390	1	0.01	1.08	1	2	29588
391	1	0.01	2	7	3	29588
392	1	0.01	4.17	15	5	29588
393	1	0.01	7.55	16	8	29735

Fonte: Dados fornecidos pela Autopista Litoral Sul

Dessa forma, a partir do exposto é possível entender que o aumento de acessos, pode gerar o aumento no número de acidentes com vítimas. Partindo-se da ideia que o número de acessos no decorrer da via é baixo, entende-se que o aumento de um acesso pode gerar um aumento considerável no número de acidentes com vítimas.

## 5. CONCLUSÃO

O estudo do Desempenho de Segurança Viária (DSV) tem se desenvolvido nos últimos anos de forma notável. Dentre os principais métodos utilizados podemos destacar os modelos de previsão de acidentes (MPA). Como são estudos recentes, muitos são os ajustes necessários para o desenvolvimento do modelo, principalmente quando se analisa o cenário brasileiro, visto que possuímos características físicas das rodovias e comportamentos dos motoristas diferentes quando comparados com outros países.

Considerando esse contexto, o presente trabalho propôs um modelo de previsão de acidentes com vítimas nas rodovias BR-116/PR e BR-101/SC, com base nos dados relacionados a infraestrutura e fluxo de veículos. A partir da definição do MBN foi necessário realizar testes quanto a correlação das variáveis para a definição daquelas que melhor se ajustaram.

A partir das correlações e resultados obtidos concluiu-se que variáveis que possuem existência em grande parte do segmento analisado irão apresentar baixa correlação com o número de acidentes, como a existência de acostamento e barreira central. O inverso também se torna verdadeiro, ou seja, variáveis com baixa presença nos segmentos apresentam pouca correlação com a ocorrência de acidentes, isso se dá devido à baixa amostragem para correlacionar com ocorrência do acidente.

Também foi possível concluir que é de extrema importância separar as rodovias de acordo com suas características, não sendo recomendado, por exemplo, a análise das duas rodovias juntas, visto as diferenças físicas e operacionais das rodovias.

No caso específico da BR-101/SC com 244 km de extensão, muitos segmentos apresentaram subdispersão ou superdispersão de dados devido às grandes variações de VDMA e infraestrutura observadas no decorrer da via. Tal fator tornou o ajuste do modelo inadequado para a previsão de acidentes com vítimas na rodovia.

Enquanto a BR-116/PR, com apenas 44 km de extensão, ou seja, cinco vezes menor que a BR101/SC, apresentou poucas variações estruturais e operacionais, gerando um gráfico *CURE plot* aceitável, porém devido à baixa amostra quando comparada com a BR-101/SC observa-se que seja necessário maior análise temporal, gerando maior número de amostras.

Dentre os desafios encontrados e que podem servir como tema para trabalhos futuros, podemos destacar os seguintes:

- I. A definição de comprimento mínimo e máximo para segmentos homogêneos com comprimentos variados, pois no trabalho foi possível notar que segmentos

com grande extensão apresentaram alto número de acidentes, gerando superdispersão dos dados.

- II. Análises quanto à subdivisão da rodovia analisada de acordo com as características físicas e operacionais, visto que uma mesma rodovia pode apresentar variações consideráveis no decorrer do trecho em análise.
- III. Estudo de uma amostra maior através do aumento do período analisado, com inclusão da variável temporal para melhorar a robustez do modelo.

## REFERÊNCIAS

AASHTO. **Highway Safety Manual**. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials. 2009.

ABDULHAFEDH, A. Road crash prediction models: different statistical modeling approaches. **Journal of Transportation Technologies**, v. 7, p. 190–205, 2017.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. Variáveis Aleatórias Discretas. In: BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. (org). **Estatística para cursos de Engenharia e Informática**. São Paulo: Atlas, 2009. p. 116-139.

BARDO, A. R., et al. **A Evolução da Regulação nas Rodovias Federais Concedidas**. Revista ANTT, ed. 2, n. 2, p. 110–123, nov. 2010.

STEINSET, B. K.; OVERBY, C. Traffic Data Collection and Analysis, Ministry of Works and Transport. Gaborone, Botswana. 2004

CARDOSO, G. **Modelos para previsão de acidentes de trânsito em vias arteriais urbanas**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre. 2006.

CARVALHO, C. H. R. **Mortes por Acidentes de Transporte Terrestre No Brasil: Análise dos Sistemas de Informação do Ministério da Saúde**. Instituto De Pesquisa Economica Aplicada. Brasília, 2016.

CUNTO, F. J. C. **Assessing safety performance of transportation systems using microscopic simulation**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Waterloo, Waterloo, 2008.

CUNTO, F. J. C.; NODARI, C. T. Aspectos conceituais sobre o desenvolvimento de modelos de previsão de acidentes de trânsito. In: XV ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, **Anais...** Belo Horizonte, 7 a 11 de novembro de 2011.

DAVIS, G. A. Possible aggregation biases in road safety research and a mechanism approach to accident modeling. **Accident Analysis and Prevention**, 6 ed. p. 1119–1127, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). **Plano Nacional de Redução de Acidentes e Segurança Viária para a Década 2011-2020**. Brasília, 08 de setembro de 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Estudos de Tráfego**. Ministério dos Transportes. Brasília, 2006.

ELVIK, R. Laws of accident causation. **Accident Analysis And Prevention**, 4 ed. v. 38, p. 742–747, 2006.

GENERAL ASSEMBLY OF THE UNITED NATIONS (ONU). **Improving global road safety**. Resolução A/64/L.44/Rev.1, 2 de março de 2010.

GOLD, P. A. **Segurança no Trânsito: Aplicações de Engenharia para Reduzir Acidentes**. Banco Interamericano de Desenvolvimento, New York, 1998.

GOMES, M. J. T. L. **Proposta Metodológica de Avaliação dos Efeitos Espaciais de Dependência e Heterogeneidade dos Acidentes de Trânsito em Diferentes Configurações de Áreas com a Incorporação da Superdispersão**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

GREEN, E. R. **Segmentation strategies for road safety analysis**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - University of Kentucky, Lexington, 2018.

GREEN, E. R.; KENNETH, R. A. **Evaluation of the Locations of Kentucky's Traffic Crash Data**. 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, 2011.

HAUER, E. Statistical Road Safety Modeling. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1897, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 81-87, 2004.

HAUER, E. **The Art of Regression Modeling in Road Safety**. Springer. 1 ed. Toronto, Canadá, 2015.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA (IPEA). **Custos dos acidentes de trânsito no Brasil: Estimativa simplificada com base na atualização das pesquisas do IPEA sobre custos de acidentes nos aglomerados urbanos e rodovias**. Brasília, 2020.

KOOREY, G. “Road data aggregation and sectioning considerations for crash analysis.” **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2103 n. 1, p. 61-68, 2009.

LORD, D. Modeling Motor Vehicle Crashes Using Poisson-Gamma Models: Examining the Effects of Low Sample Mean Values and Small Sample Size on the Estimation of the Fixed Dispersion Parameter. **Accident Analysis and Prevention**, v. 33, p. 751-766. 2006.

LORD, D.; GUIKEMA, S. D.; GEEDIPALLY, S. R. Application Of The Conway-Maxwell Poisson Generalized Linear Model For Analyzing Motor Vehicle Crashes. **Accident Analysis and Prevention**. v. 40, ed. 3, 1123–1134. Maio de 2008

LORD, D.; MANNERING, F. The Statistical Analysis of Crash-Frequency Data: A Review and Assessment of Methodological Alternatives. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 44, n. 5, p. 291–305, Junho de 2010.

MAHER, M. J.; SUMMERGILL, I. A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. **Accident Analysis & Prevention**, v. 2, n.3, p. 281-296. 1996.

MÂNICA, A. G. **Modelo de Previsão de Acidentes Rodoviários Envolvendo Motocicletas**. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Procedimentos para o tratamento de locais críticos de acidentes de trânsito**. Programa Pare, 2002.

MIAOU, S.; LUM, H. Modeling Vehicle Accident and Highway Geometric Design. **Relationship Accident Analysis and Prevention**. V.25, n.6, p. 689-709. 1993

MOUNTAIN, L.; FAWAZ B.; JARRET, D. Accident Prediction Models For Roads With Minor Junctions. **Accident Analysis and Prevention**, v. 28, ed. 6, p. 695-707. Novembro de 1996.

OLIVEIRA, J. C. M; FRANCO, M. R. S.; JÚNIOR, L. H. S.; MENDES, A. V. C.; ALMEIDA, A. N. Avaliação de Impacto das Concessões na Redução de Acidentes, Feridos e Mortos em Rodovias Federais do Distrito Federal e Entorno. **Revista Meta: Avaliação**, v. 11, n. 31, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Global Status Report on Road Safety 2018. **GENEVA: WHO**. 2018.

TORRES, C. A. **Avaliação do Desempenho da Segurança Viária em Redes Urbanas de Transportes com Utilização de Modelos de Previsão de Acidentes**. Tese (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016

UM, ASSEMBLY GENERAL. UNITED NATIONS. Resolution adopted by the General Assembly. **United Nations Millennium Declaration**. A/RES/74/299. 31 de Agosto de 2000.

SEGURADORA LÍDER. **Relatório Anual: Seguro de Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Via Terrestre – DPVAT**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://www.seguradoralider.com.br/Documents/Relatorio-Anual/Relatorio%20Anual%20-%202020%20v3.pdf?#zoom=65%>>. Acesso em 15 de maio de 2021.

SOULEYRETTE, R. R., HAAS, R. P. & MAZE, T. H. Validation and implication of segmentation on Empirical Bayes for highway safety studies. **WIT Transactions on Biomedicine and Health**, v. 11, p. 85-94. Junho, 2007.

SRINIVASAN, R.; BAUER, K. **Safety performance function development guide: Developing jurisdiction-specific SPFs**. FHWA-SA-14-005. Federal Highway Administration, Washington, 2013.