

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PPGEP - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

André Luiz Dultra Nascimento da Silva

**PREVALÊNCIA DE FATORES ASSOCIADOS À
OCORRÊNCIA E SEVERIDADE DE ACIDENTES COM
BICICLETA EM PORTO ALEGRE**

Porto Alegre

abril 2018

ANDRÉ LUIZ DULTRA NASCIMENTO DA SILVA

**PREVALÊNCIA DE FATORES ASSOCIADOS À
OCORRÊNCIA E SEVERIDADE DE ACIDENTES COM
BICICLETA EM PORTO ALEGRE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Produção da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção –
Sistemas de Transporte

Orientadora: Christine Tessele Nodari

Porto Alegre

abril 2018

ANDRÉ LUIZ DULTRA NASCIMENTO DA SILVA

PREVALÊNCIA DE FATORES ASSOCIADOS À OCORRÊNCIA E SEVERIDADE DE ACIDENTES COM BICICLETA EM PORTO ALEGRE

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^ª. Christine Tessele Nodari, Dra.

Orientadora PPGEP/UFRGS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, PhD.

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Alejandro Ruiz Padillo, Dr. (UFSM)

Professor Daniel Sergio Presta Garcia, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Professor Letícia Dexheimer, Dra. (UFPEL)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Rita Dultra, e à minha irmã, Natalie Dultra, por serem a base de todas as minhas vitórias.

Agradeço à professora Christine Nodari por toda orientação, incentivo e compreensão ao longo do desenvolvimento deste trabalho e por todo conhecimento transmitido durante estes 2 anos de mestrado.

Agradeço aos professores Alejandro Padillo, Daniel Garcia e à professora Letícia Dexheimer pelas ricas contribuições derivadas da avaliação cuidadosa desta dissertação.

Agradeço à Rafaela Machado e à Tânia Batistela, sempre amigas e solícitas, por toda ajuda – fundamental – para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à amiga Verônica Oliveira, pela ajuda e orientação durante o mestrado, como também pelas boas conversas e risadas que tornaram este período mais humano e menos difícil.

Agradeço à minha companheira Bruna Minotto, por todo cuidado, incentivo e amor dedicados a mim, em especial neste período de mestrado.

Agradeço à CAPES, ao PPGEP, ao LASTRAN e à UFRGS pela oportunidade de aprender e me desenvolver academicamente através deste programa de pós-graduação.

Por fim, agradeço aos incontáveis e preciosos amigos e amigas que fizeram parte desta caminhada, não apenas nestes 2 anos, mas durante todo o processo que culminou nesta dissertação.

RESUMO

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, teve início um processo de aumento da utilização dos automóveis nos grandes centros urbanos que modificou o desenho das cidades e o padrão de deslocamento nesses espaços. Uma das diversas consequências negativas da consolidação do automóvel como principal meio de transporte nas metrópoles foi o aumento do número de acidentes no trânsito, principalmente os que envolviam os usuários de transporte ativo – pedestres e ciclistas. A promoção dos modos de transporte não motorizados, como a bicicleta, é tida como ação complementar para reversão desse processo, porém, para tanto, é necessário melhorar a percepção de segurança sobre o modo ciclovitário. A tomada de decisão por parte dos gestores do tráfego acerca das intervenções viárias que melhoram a segurança dos ciclistas carece de entendimento sobre os elementos que influenciam a ocorrência de acidentes envolvendo estes usuários. Desse modo, o trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo a verificação da existência de relação entre os elementos urbanos construídos, os fatores socioeconômicos e outras possíveis fontes de risco com a frequência e severidade dos acidentes ciclovitários na cidade de Porto Alegre. O processo de investigação utilizou *softwares* de georreferenciamento para consolidar os dados coletados segundo as unidades de análise definidas. A frequência de acidentes foi modelada através de Modelo de Regressão Binomial Negativo e a severidade de acidentes foi modelada através de Modelo *Logit* Multinomial. O modelo de frequência de acidentes apresentou duas variáveis significativas. Em seguida, foi gerado um novo modelo de frequência de acidentes a partir da eliminação de possíveis fontes de discrepância dos dados. Os resultados indicaram que este segundo modelo estava melhor ajustado ao cenário estudado. O modelo de severidade de acidentes foi composto por 18 variáveis significativas. Por fim, os elementos que demonstraram maior prevalência sobre a acidentalidade de ciclistas foram a interação com automóveis, a presença de vias arteriais, a proximidade com áreas de interseção e o envolvimento de usuários vulneráveis (jovens e idosos em bicicletas) nos acidentes.

Palavras-chave: segurança viária, ambiente construído, binomial negativo, logit multinomial, georreferenciamento, modelagem

ABSTRACT

After the end of the World War II, many cities around the world have experienced an increase on car using which changed the way cities were planned and also mobility patterns. That process has generated some problems at urban areas like road accidents increasing, most of them related to active transport modes - pedestrians and cyclers. Non motorized transportation modes fomentation, for example cycling, emerges as an alternative to change this issue. However, before it happens, cyclers need to feel more safe on transit. Understanding the influence of the elements that affect cyclers's safety gives to decision makers and traffic managers a better possibility to make the right decisions on safety improvement. Thus, this thesis aims to verify the relationship between built environment, socioeconomic factors and other risk sources and frequency and severity of traffic crashes involving cyclists in Porto Alegre. By using GIS softwares, the collected data were consolidated according to the defined analysis units. Accident's frequencies were modeled and the coefficients were estimated by using Negative Binomial Regression Model and the severity of accidents was modeled as a Multinomial Logit Model. The accident frequency model counted with two significant variables. Then, a new accident frequency model was estimated from the elimination of possible sources of data discrepancy. Results have shown that the second model fit better on the studied scenario. The accident severity model resulted in 18 significant variables. Finally, the elements that showed highest prevalences on cyclists safety were car interaction, presence of arterial roads, proximity to intersection areas and vulnerable cyclists users (young and old ones cycling) involvement on accidents.

Keywords: *road safety, built environment, negative binomial, multinomial logit, georeferencing, modeling*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas de desenvolvimento do trabalho	18
Figura 2: Evolução do número de acidentes com bicicleta em Porto Alegre	20
Figura 3: Sólido resultante da interação entre as dimensões da segurança viária	23
Figura 4: As 5 dimensões de análise da segurança viária segundo Huang e Adel-Aty	25
Figura 5: Componentes do sistema de trânsito segundo Treat <i>et al.</i> (1979)	26
Figura 6: Redução da visibilidade devido aos estacionamentos paralelos à ciclofaixa	34
Figura 7: Aspecto do histograma para uma distribuição Normal	45
Figura 8: Aspecto do qq-plot para uma distribuição Normal	45
Figura 9: Zonas Indefinidas (Áreas sem Classificação)	50
Figura 10: Mapa de localização dos acidentes investigados	57
Figura 11: Distribuição dos acidentes e das estações de compartilhamento	63
Figura 12: Sobreposições para buffer com raio de 100m em torno dos acidentes	64
Figura 13: Distribuição dos acidentes e das infraestruturas cicloviárias no mapa	65
Figura 14: Histograma para os dados de acidentes	66
Figura 15: Gráfico Q-Q para os dados de acidentes	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Circunstâncias da morte de ciclistas na Austrália entre 1997 e 2004	37
Quadro 2: Aspectos investigados e respectivas influências sobre os acidentes de bicicleta	40
Quadro 3: Graus e significados da variável severidade	52
Quadro 4: Lista das variáveis investigadas, suas características e respectivas fontes	58
Quadro 5: Contribuição das variáveis sobre os graus de severidade 2 e 3	83
Quadro 6: Síntese das variáveis significativas dos modelos de frequência de acidentes	88
Quadro 7: Síntese das variáveis significativas dos modelos de severidade de acidentes ...	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estatísticas descritivas dos dados do modelo completo de frequência de acidentes	68
Tabela 2: Estatísticas descritivas os dados do modelo reduzido de frequência de acidentes	69
Tabela 3: Estatísticas descritivas os dados do modelo de severidade de acidentes	70
Tabela 4: Valores de VIF para o modelo completo de frequência de acidentes	71
Tabela 5: Modelo de frequência de acidentes	73
Tabela 6: Efeitos marginais para o modelo completo de frequência de acidentes	74
Tabela 7: Valores de VIF para o modelo reduzido de frequência de acidentes	76
Tabela 8: Modelo reduzido de frequência de acidentes	77
Tabela 9: Resultado parcial do modelo reduzido de frequência de acidentes	77
Tabela 10: Efeitos marginais para o modelo reduzido de frequência de acidentes	79
Tabela 11: Comparação entre modelos completo e reduzido de frequência de acidentes .	80
Tabela 12: Valores de VIF para o modelo de severidade de acidentes	81
Tabela 13: Valores dos coeficientes do modelo de severidade de acidentes	82
Tabela 14: Efeitos marginais para o modelo de severidade de acidentes	85

LISTA DE SIGLAS

AIC – *Akaike Information Criterion*

BIC – *Bayesian Information Criterion*

BO – Boletim de Ocorrência

DETRAN – Departamento Estadual de Trânsito do Rio Grande do Sul

EPTC – Empresa Pública de Transportes e Circulação

FTP – Faixa de Travessia para Pedestres

GIS – *Geographic Information System*

MNL – *Multinomial Logit Model*

MPA – Modelo de Previsão de Acidentes

Q-Q – Quantil-Quantil

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SRC – Sistema de Referência de Coordenadas

VDMA – Volume Diário Médio Anual

VIF – *Variance Inflation Factor*

ZI – Zona Indeterminada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO	15
1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS	16
1.3 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO	17
1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	17
1.5 DELINEAMENTO DO ESTUDO	17
2 SEGURANÇA NO MODO CICLOVIÁRIO E A INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES ENVOLVENDO CICLISTAS	19
3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA SEGURANÇA CICLOVIÁRIA.....	27
3.1 HIERARQUIA VIÁRIA	27
3.2 CHUVA	28
3.3 IDADE DO CICLISTA	28
3.4 RENDA	29
3.5 SEMÁFOROS	30
3.6 PARADAS DE ÔNIBUS	31
3.7 TURNO DO DIA	31
3.8 INTERSEÇÕES	32
3.9 PONTOS DE TÁXI	33
3.10 DECLIVIDADE	34
3.11 USO DO SOLO	35
3.12 INTERAÇÃO COM VEÍCULOS MOTORIZADOS	37
3.13 DIA DA SEMANA	37
3.14 INFRAESTRUTURA DEDICADA AO TRÁFEGO CICLOVIÁRIO	38
3.15 ELEMENTOS NO ENTORNO DAS VIAS CICLÁVEIS	39
3.16 HABILITAÇÃO DO CONDUTOR	39

4 MÉTODO DE TRABALHO	40
4.1 CENÁRIO ESTUDADO	40
4.2 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	42
4.3 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS	43
4.4 DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO (<i>BUFFERS</i>)	43
4.5 MODELAGEM DA FREQUÊNCIA DE ACIDENTES	44
4.5.1 Análise de distribuição dos dados	44
4.5.2 Análise de multicolinearidade para os modelos de frequência de acidentes	46
4.5.3 Estimacão do modelo completo de frequência de acidentes	47
4.5.4 Cálculo dos efeitos marginais do modelo completo de frequência de acidentes	48
4.5.5 Estimacão do modelo reduzido de frequência de acidentes	49
4.5.6 Cálculo dos efeitos marginais do modelo reduzido de frequência de acidentes	51
4.5.7 Comparacão dos modelos de frequência de acidentes	51
4.6 MODELAGEM DA SEVERIDADE DE ACIDENTES	51
4.6.1 Análise de multicolinearidade para o modelo de severidade de acidentes	52
4.6.2 Estimacão do modelo de severidade de acidentes	52
4.6.3 Cálculo dos efeitos marginais do modelo de severidade de acidentes	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1 RESULTADO DA ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	56
5.2 RESULTADO DA DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS	58
5.3 RESULTADO DA DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA	62
5.4 RESULTADO DA ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS	66
5.5 RESULTADO DA ANÁLISE DE MULTICOLINEARIDADE DO MODELO COMPLETO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES	70
5.6 RESULTADO DA ESTIMACÃO DO MODELO COMPLETO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES	72
5.7 RESULTADO DO CÁLCULO DOS EFEITOS MARGINAIS DO MODELO COMPLETO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES	74

5.8 RESULTADO DA ANÁLISE DE MULTICOLINEARIDADE DO MODELO REDUZIDO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES	75
5.9 RESULTADO DA ESTIMAÇÃO DO MODELO REDUZIDO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES	76
5.10 RESULTADO DO CÁLCULO DOS EFEITOS MARGINAIS DO MODELO REDUZIDO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES	79
5.11 RESULTADO DA COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES	79
5.12 RESULTADO DA ANÁLISE DE MULTICOLINEARIDADE DO MODELO DE SEVERIDADE DE ACIDENTES	80
5.13 RESULTADO DO MODELO DE SEVERIDADE DE ACIDENTES	82
5.14 RESULTADO DO CÁLCULO DOS EFEITOS MARGINAIS DO MODELO DE SEVERIDADE DE ACIDENTES	85
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	87
REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

Com o fim da Segunda Guerra Mundial, os países ocidentais viveram uma fase que recebeu a alcunha de “Era de Ouro do Capitalismo”, situada no período entre 1947 e 1973. Essa denominação é devida à grande prosperidade econômica observada nesses anos, cujos reflexos estariam presentes nas grandes áreas urbanas até os dias atuais: teve início um processo de aumento no número de automóveis e ciclomotores por habitante, o que resultou em alterações significativas da organização das vias transitáveis e no modo das pessoas se locomoverem nas cidades (HOBSBAWN, 1995; INTERFACE FOR CYCLING EXPERTISE, 2009).

Ao longo da década de 1960, as cidades vivenciaram um processo de promoção do uso de veículos motorizados, para os quais eram destinadas as construções das infraestruturas viárias e o planejamento urbano, corroborado pelos tomadores de decisão que, no entendimento da época, acreditavam estar promovendo um aumento na segurança viária ao fomentar os modos de transporte motorizado em detrimento dos espaços para pedestres e ciclistas. Ao contrário do que se imaginava, o decréscimo no número de ciclistas contribuiu para o crescimento do número de acidentes fatais envolvendo estes usuários (INTERFACE FOR CYCLING EXPERTISE, 2009).

O número de mortes no trânsito ao longo dos últimos anos escalonou de tal forma que esse problema deixou de ser encarado apenas como uma questão de engenharia de tráfego, mas de saúde pública. Segundo a Organização Mundial de Saúde (WHO, 2015), os acidentes de trânsito já estão entre as 10 maiores causas de morte no mundo e, mantida esta tendência de crescimento, ela alcançará a quinta posição desse *ranking* em 2030. Nesse contexto, devido à sua fragilidade, os ciclistas, juntamente com os pedestres, são os usuários mais expostos ao risco do trânsito.

De acordo com o Centro de Controle e Prevenção de Doença dos Estados Unidos (CDC, 2017), um número estimado de 33 milhões de crianças pedalam o equivalente a 10 bilhões de horas por ano. Dessas, cerca de 200 tornam-se vítimas fatais do trânsito no país. Em Münster, na Alemanha, cidade que possui o modo ciclovitário como principal meio de transporte e possui uma população de bicicletas maior do que a de habitantes, cerca de 50% dos acidentes de trânsito envolveram um ciclista em 2009 (JUHRA *et al.*, 2012). WHO

(2015) aponta que se os índices de acidentes no modo cicloviário já são preocupantes nos países desenvolvidos, esses números podem alcançar valores muito mais altos em países de baixa e média renda, onde as taxas de acidentes podem dobrar em comparação aos países ricos. Segundo o autor, mais de 90% dos acidentes viários com vítimas ocorrem nos países em desenvolvimento, como o Brasil, os quais somam apenas 48% dos veículos registrados no planeta.

Diante desse cenário, a promoção da segurança viária torna-se necessária não apenas para prevenir os acidentes com ciclistas, mas também para promover a utilização desse modo de transporte. A redução do número de veículos motorizados e o aumento dos deslocamentos através de modos de transporte ativos estão relacionados a trânsitos mais seguros (ELVIK; VAA, 2009; EWING; DUMBAUGH, 2009; DUDUTA *et al.*, 2013; LITMAN; FITZROY, 2016). No entanto, a complexidade dos problemas de segurança viária demandam um nível de compreensão alto acerca dos fatores envolvidos nos acidentes, pois dessa forma os gestores de trânsito terão subsídios para tomar decisões e realizar intervenções eficazes. A investigação dos dados de acidentes cicloviários através da utilização de ferramentas de georreferenciamento e os Modelos de Previsão de Acidentes (MPA) podem ser usados para esse propósito.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo geral a verificação da relação entre as características da estrutura urbana, dos aspectos socioeconômicos e das características específicas dos acidentes, e a segurança cicloviária. Pretende-se, dessa forma, entender a influência destes fatores sobre a frequência e a severidade dos acidentes viários envolvendo bicicletas na cidade de Porto Alegre.

Concomitantemente, o trabalho propõe-se a desenvolver mais dois objetivos específicos:

- a. realizar comparações de ajuste entre os modelos de frequência de acidentes estimados;
- b. verificar os efeitos marginais dos elementos investigados nos modelos de frequência e de severidade de acidentes.

1.2 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO E DOS OBJETIVOS

As evidências empíricas apontam que o risco de ocorrência de acidentes está associado diretamente ao número de veículos motorizados, de forma que, por sua vez, o aumento na parcela de viagens realizadas através de modos de transporte ativo reduz esse índice (ELVIK; VAA, 2009; EWING; DUMBAUGH, 2009; LITMAN; FITZROY, 2016). Ainda assim, ao longo dos anos, a bicicleta tem sido tratada à margem das políticas públicas de transporte – com poucas exceções – o que pode decorrer da baixa representatividade relativa de ciclistas entre os demais usuários (GÖTSCHI *et al.*, 2016). O aumento da representatividade do modo cicloviário na matriz de viagens gera um ciclo virtuoso: quanto maior o número de ciclistas, maior será a segurança nos deslocamentos de bicicleta, o que por sua vez tornará mais interessante o uso desse modo de transporte.

Devido à fragilidade da bicicleta quando comparada aos veículos motorizados, o fomento do modo cicloviário depende da percepção de segurança do usuário ao longo de seu trajeto (TESCHKE *et al.*, 2012; GÖTSCHI *et al.*, 2016). Essa percepção do usuário pode ser alterada através do gerenciamento da segurança viária, que se dá através de intervenções no espaço urbano que visam reduzir ou eliminar as condições de risco para os usuários dos diferentes modos de transporte. No entanto, o processo de tomada de decisão por partes dos gestores e dos técnicos da área de transportes não é simples, haja vista a complexidade inerente à interação entre os diversos fatores que influenciam na segurança, principalmente no tocante à circulação dos usuários de transporte ativo. Desse modo, é primordial lançar mão do auxílio que as ferramentas de simulação e previsão podem fornecer. Análises prévias através de modelos podem produzir indicadores que expressam de forma objetiva o nível de segurança dos diversos componentes de um determinado cenário de interesse, reduzindo as chances de insucesso das intervenções e aumentando o grau de compreensão acerca das variáveis envolvidas no problema (EWING; DUMBAUGH, 2009; AASHTO, 2010; CUNTO *et al.*, 2012; OECD, 2013).

Uma das ferramentas que possibilitam a avaliação da relação entre os atributos geométricos e operacionais da malha viária, os fatores socioeconômicos dessas áreas e as séries históricas de acidentes de trânsito é o Modelo de Previsão de Acidentes (MPA), também chamado de funções de desempenho de segurança. Hauer (2002) explica que a análise dos acidentes de trânsito através dos MPA permite um maior controle da regressão à

média e da grande dispersão dos dados registrados, fenômenos decorrentes da estocasticidade inerente aos acidentes de trânsito. Enquanto países como Canadá, Estados Unidos, Inglaterra e Suécia já experimentam as vantagens dos MPA há mais de duas décadas, os registros mais recentes da utilização dessas ferramentas no Brasil datam dos anos de 2006 e 2007 (HAUER, 2002; CUNTO *et al.*, 2012;).

Nesse contexto, a estimação de Modelos de Previsão de Acidentes torna-se importante ferramenta para compreensão dos elementos que influenciam na ocorrência e na severidade dos acidentes ciclovitários. Busca-se aqui, através do seu uso, obter um maior entendimento sobre os aspectos que impactam na segurança viária dos ciclistas, o que pode municiar os tomadores de decisão com parâmetros objetivos que auxiliarão na implementação de medidas mitigadoras do risco ao qual estão expostos os usuários de bicicleta.

1.3 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

O presente estudo delimita-se a analisar a relação entre os acidentes de bicicleta ocorridos em Porto Alegre, entre 2012 e 2014, e as características da estrutura urbana e socioeconômicas dentro dos limites da cidade. Aspectos comportamentais dos usuários não foram considerados. A precisão e o detalhamento dos dados cedidos estiveram a cargo das respectivas fontes.

1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O estudo tem como limitações a não inclusão de dados relativos ao volume e fluxo de veículos nas vias, haja vista a indisponibilidade destes dados para esta pesquisa. Taxas de sub-registro acerca dos acidentes investigados não foram levadas em conta.

1.5 DELINEAMENTO DO ESTUDO

Esta dissertação foi desenvolvida de acordo com as etapas ilustradas na Figura 1 e descritas a seguir.

Figura 1 – Etapas de desenvolvimento do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

O trabalho iniciou com a realização de uma revisão da literatura acerca do modo cicloviário, ferramentas de investigação de acidentes e a relação da acidentalidade com elementos da estrutura urbana, fatores socioeconômicos e dados de acidentes com bicicleta. Essa revisão embasou todas as etapas subsequentes do trabalho. Posteriormente, foram definidas a metodologia utilizada e os fatores investigados no trabalho. Em seguida, foram coletados os dados necessários para abastecimento das ferramentas usadas para desenvolvimento dos modelos. Na etapa seguinte, os dados coletados foram analisados, tratados e tabulados de forma a compatibilizá-los com os formatos requeridos pelos *softwares* utilizados na pesquisa. Após a geração dos modelos, os resultados foram confrontados com os conhecimentos encontrados na literatura a fim de discutir os aspectos mais relevantes do trabalho. Por fim, foram realizadas as conclusões finais e as recomendações para trabalhos futuros.

2 SEGURANÇA NO MODO CICLOVIÁRIO E A INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES ENVOLVENDO CICLISTAS

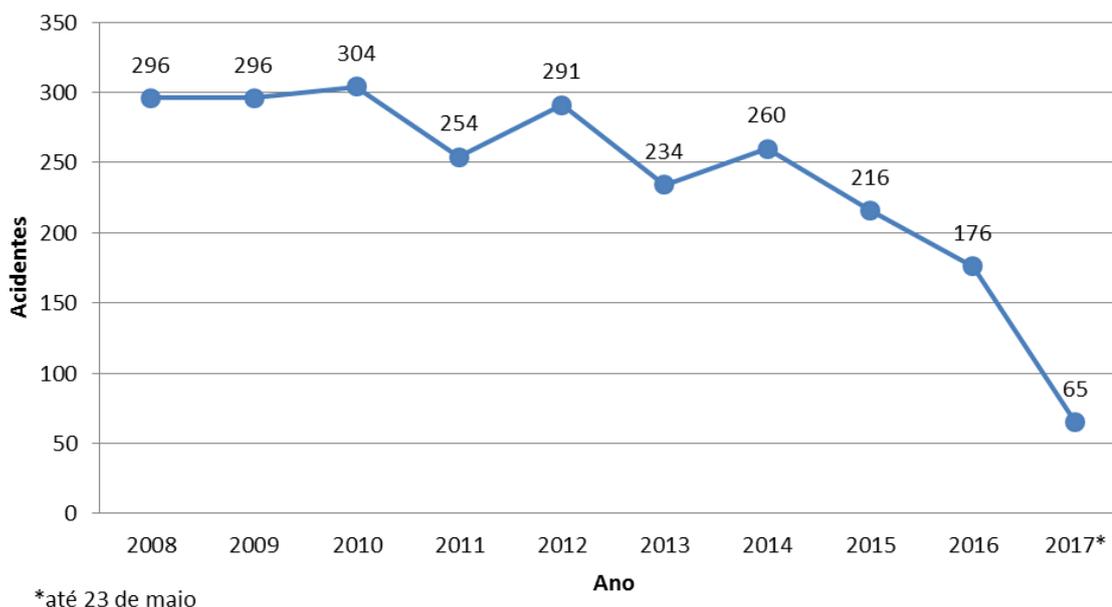
A consolidação do automóvel como principal meio de transporte dos grandes centros urbanos, fenômeno ocorrido em escala global ao longo dos últimos 50 anos, trouxe consigo algumas consequências negativas para as cidades do século XX e XXI. Com frotas motorizadas cada vez maiores, agravaram-se os problemas de poluição do ar, congestionamentos, intrusão visual e consumo excessivo de recursos não renováveis. Desse modo, os gestores e pesquisadores do trânsito têm somado esforços para pensar soluções para uma mobilidade urbana cada vez mais sustentável (HOBSBAWN, 1995; BRASIL, 2007; PORTO ALEGRE, 2008; GILL *et al.*, 2017).

Nesse contexto, a bicicleta surge como uma opção de transporte adequado às premissas do conceito de sustentabilidade. Diversos estudos apontam os benefícios na utilização desse modo de transporte, como a redução dos congestionamentos, redução das emissões de gases poluentes, diminuição das poluições visual e sonora, melhora da saúde dos usuários habituais e melhor aproveitamento do espaço urbano (ANDERSEN *et al.*, 2012; DUDUTA *et al.*, 2013; BERG, 2015; CHEN; SHEN, 2016). No entanto, a despeito de todas essas vantagens, a promoção do modo cicloviário é dificultada – principalmente nos países em desenvolvimento – pela percepção da [falta de] segurança, pois os ciclistas ainda constituem um grupo muito exposto aos riscos existentes no tráfego urbano (GILL *et al.*, 2017).

E o medo dos ciclistas não é injustificado: eles compõem um grupo de usuários fisicamente mais frágeis e trafegam em meio a um trânsito que, em todo mundo e, principalmente, nos países em desenvolvimento como o Brasil, tornou-se, além de um problema de engenharia, um problema de saúde pública. Segundo a WHO (2015), cerca de 3400 pessoas morrem diariamente no trânsito ao redor do mundo e cerca de 10 milhões ficam feridas ou incapacitadas em decorrência de acidentes de trânsito. Só no Brasil, anualmente, cerca de 47 mil pessoas sofrem acidentes fatais e 400 mil adquirem sequelas devido a algum acidente nas vias (BRASIL, 2017). No país, em 2014, em média 32 ciclistas foram internados por dia devido a acidentes, enquanto outros 1357 ciclistas morreram em consequência de alguma ocorrência de trânsito (BRASIL, 2015). Em Porto Alegre, dados da Empresa Pública de Transporte e Circulação (EPTC) mostram que, desde 2008, o número de acidentes

envolvendo ciclistas vem diminuindo na cidade, porém os índices observados ainda representam um ambiente hostil ao tráfego cicloviário. A Figura 2 mostra a evolução do número de acidentes na referida capital desde 2008.

Figura 2 – Evolução do número de acidentes com bicicleta em Porto Alegre



(fonte: elaborado pelo autor a partir de dados cedidos pela EPTC)

Em relação à Figura 2, é necessário pontuar que a cidade de Porto Alegre experimentou algumas mudanças em relação ao modo cicloviário a partir de 2012. Em setembro de 2012, foi implantado um sistema de compartilhamento de bicicletas na cidade, o *BikePOA*. Hoje com 410 bicicletas distribuídas em 41 estações, o programa deu início às suas operações com 50 bicicletas e 5 estações. No seu primeiro mês em funcionamento, já haviam sido contabilizadas 4.242 viagens realizadas e quase 6 mil usuários cadastrados (FAVERO, 2012; PORTO ALEGRE, 2012; PORTO ALEGRE, 2018). Dois anos mais tarde, em abril de 2014, o número de usuários cadastrados no sistema já havia atingido a marca de 100.000 registros e as viagens realizadas haviam sido cerca de 500.000 (FURTADO, 2014). Além disso, a partir de 2011, foi observado um aumento no número de quilômetros de infraestruturas cicloviárias construídas na cidade (FURTADO, 2014). Isso não é atribuído apenas ao atendimento da rede prevista no Plano Direto Cicloviário Integrado de Porto Alegre, mas também ao fato de que, em função da realização da Copa do Mundo de 2014, para a qual a cidade ganhou um dos postos de capital-sede, muitas obras foram realizadas na cidade. Desse modo, em respeito à Lei Complementar nº 626/2009, foram executados

quilômetros de ciclovia e ciclofaixa como contrapartida pela construção de empreendimentos considerados como Projetos Especiais de Impacto Urbano.

Entender a dinâmica do tráfego nas cidades e investigar as causas dos acidentes através do estudo dos elementos que influenciam na segurança viária são meios de obter parâmetros objetivos que auxiliem os gestores do trânsito a realizar intervenções no sentido de promover mais segurança nas vias. No entanto, a investigação dos acidentes envolvendo ciclistas, em muitos casos, é dificultada pela disponibilidade ou qualidade dos registros de acidentes. Bacchieri *et al.* (2005) afirmam que, no Brasil, outros estudos já identificaram o fenômeno do sub-registro nos dados de acidentes com bicicletas. O trabalho realizado por Andrade e Mello-Jorge (2001) na cidade de Londrina, Paraná, cruzou dados de atendimentos em prontos-socorros e de registros policiais e descobriu que dos 738 acidentes ocorridos com ciclistas naquele ano, apenas 8% foram registrados oficialmente. O estudo desenvolvido por Barros *et al.* (2003) na cidade de Pelotas, no Rio Grande do Sul, comparou informações de Boletins de Ocorrência (BO) com os registros de atendimentos no pronto-socorro municipal pelo período de dois anos. Os resultados apontaram a existência de 33% de sub-registros relativos aos acidentes com lesão corporal envolvendo ciclistas. Resultado mais expressivo fora obtido em estudo desenvolvido na Noruega por Hvoslef (1996): comparando registros hospitalares e estatísticas oficiais, o autor identificou que estas indicavam 847 acidentes envolvendo ciclistas e veículos automotores enquanto esse número era de 2000 nos relatórios de pronto-atendimento.

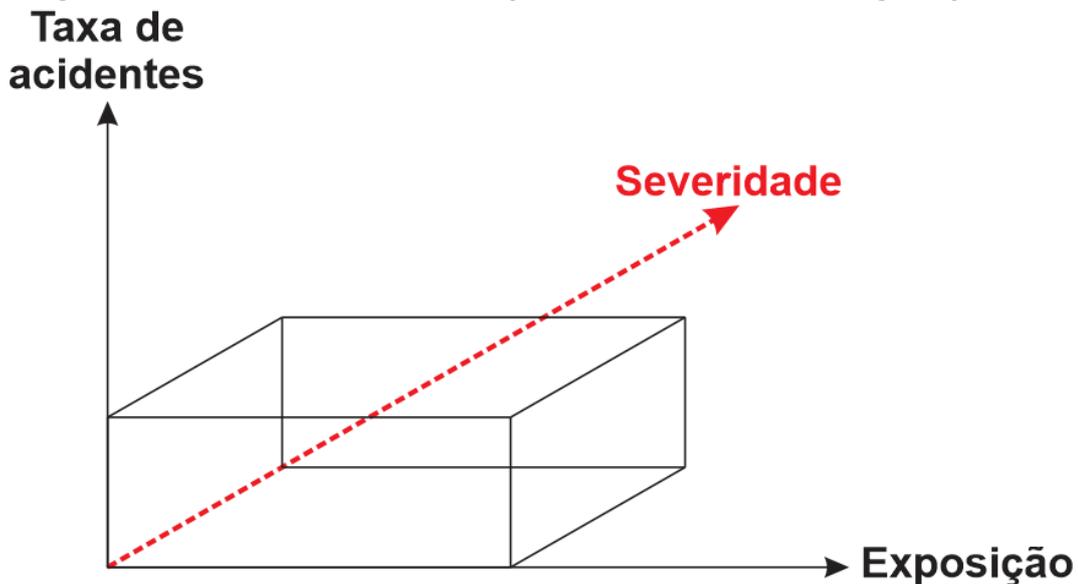
O sub-registro não esconde apenas informações relevantes para o estudo da frequência de acidentes, mas também a sua severidade. Barros *et al.* (2003) investigaram também os registros de acidentes com veículos automotores na cidade de Pelotas e identificaram que este fenômeno também pode ser diferenciado por modo de transporte: nas ocorrências envolvendo colisão entre veículos e pedestres ou veículos e ciclistas (classificadas como atropelamento), obteve-se proporções de 47% e 67% de sub-registros, respectivamente. Já para as colisões entre os veículos automotores, esse índice foi de 77%. É possível que o sub-registro dos acidentes de bicicleta advinha do fato de que os ciclistas tendam a reportar apenas aqueles acidentes de média ou alta gravidade, caso das ocorrências com ferimentos graves ou morte. Pequenas ocorrências sem danos ou com pequenos danos materiais tendem a ser ignoradas pelos usuários desse modo de transporte.

Uma alternativa para contornar o sub-registro dos acidentes é a obtenção de dados através de diferentes fontes, como BO, fichas de atendimento em pronto-socorro, bases de dados municipais, etc. No entanto, os diferentes órgãos operam com variados protocolos de registro de acidentes, o que pode dificultar a compatibilização dos dados para estudo. Além disso, o preenchimento dos dados da ocorrência muitas vezes é realizado por pessoas desprovidas de capacidade técnica para isso, o que aumenta a probabilidade de omissão ou erro nos dados registrados. Dessa forma, deve-se tentar tirar o maior proveito das informações disponíveis através de ferramentas que forneçam meios de interpretá-las. Uma forma de realizar isso é através da utilização de Modelos de Previsão de Acidentes (MPA).

Davis (2004) define a modelagem da segurança viária como o processo que utiliza um conjunto de ferramentas estatísticas que, a partir da frequência de acidentes observada em uma área específica, é capaz de determinar empiricamente como estratégias relacionadas ao projeto e operação do ambiente viário podem alterar as chances de novas ocorrências de trânsito. Os MPA consolidaram-se como ferramentas de apoio para análise de acidentes de trânsito devido aos seus bons resultados e também à versatilidade e abrangência para sua aplicação.

Elvik e Vaa (2009) afirmam que, além de em função da frequência, os acidentes podem ser medidos também em função da severidade. Os autores apontam a severidade como a terceira dimensão da relação entre taxa de acidentes e exposição ao risco, como ilustra a Figura 3. O volume do sólido representa a quantidade de usuários envolvidos em acidentes. Desse modo, percebe-se que reduzir a exposição ao risco, a taxa de acidentes ou a severidade dos mesmos são medidas que contribuem para a segurança viária.

Figura 3 – Sólido resultante da interação entre as dimensões da segurança viária



(fonte: adaptado de Elvik e Vaa, 2009)

Os primeiros modelos de previsão de acidentes foram desenvolvidos na década de 1980 e tinham como premissa a normalidade e homocedasticidade das ocorrências, ou seja, assumiam que os dados relativos aos acidentes assumiam uma distribuição normal e eram não dispersos. Com o passar do tempo, essas suposições foram refutadas devido à natureza aleatória dos acidentes e frente ao bom resultado dos modelos surgidos a partir da aplicação de outras metodologias. Os MPA mais recentes consagraram-se através da aplicação de modelos que assumiam distribuições do tipo Poisson e Binomial Negativa, esta última mais indicada para os casos onde verifica-se superdispersão – quando a variância é muito superior à média – dos dados de acidentes. Desse modo, os MPA costumam apresentar melhores resultados quando assumem a forma de modelos lineares generalizados em comparação às regressões lineares tradicionais (HAUER *et al.*, 1998; CARDOSO, 2006; ELVIK, 2006).

Cunto *et al.* (2012) explicam que não há critérios definidos para o processo de escolha das variáveis a serem incluídas num MPA: essa decisão deve ser tomada com base nos objetivos do estudo, na experiência do modelador, na literatura pertinente e em função das informações disponíveis sobre os acidentes que se quer investigar. Os autores afirmam que se deve manipular as variáveis de maneira a reduzir a influência dos fatores desconhecidos ou não controlados que comprometam os resultados do modelo.

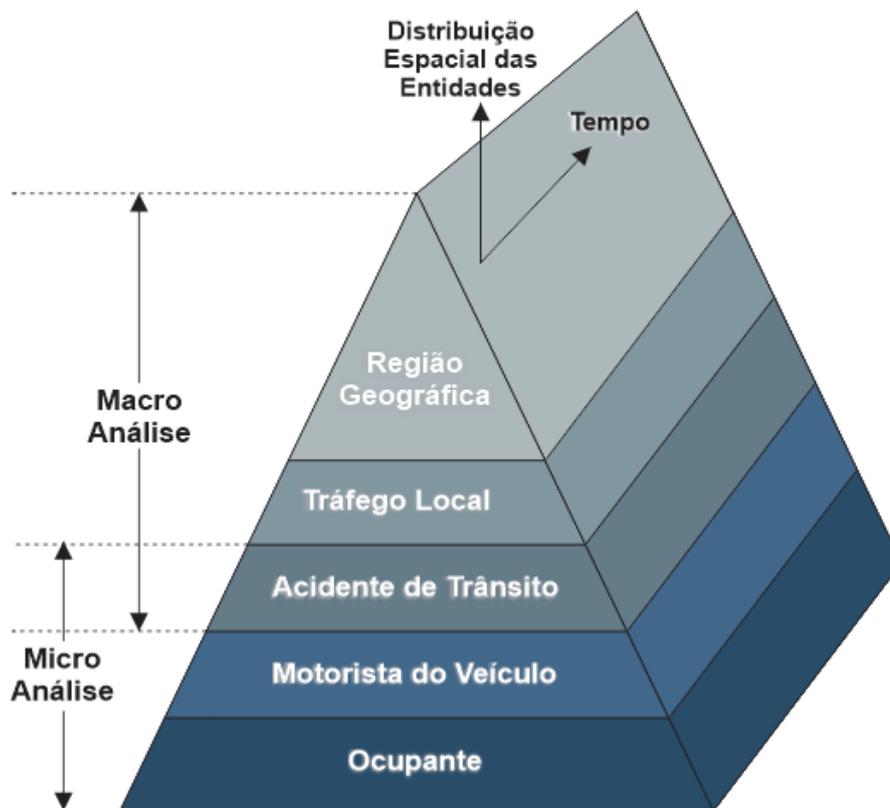
Em relação à definição da amostra que servirá de base para modelagem, de maneira semelhante à escolha das variáveis, não se verifica a existência de uma metodologia

consolidada ou de critérios objetivos para sua seleção. A amostragem deve permitir ao modelador a definição de grupos homogêneos que permitam a avaliação das variáveis. No entanto, a homogeneidade excessiva pode gerar amostras muito reduzidas, o que dificulta a obtenção de valores estatisticamente significativos dos parâmetros avaliados (LORD, 2006; CUNTO *et al.*, 2012).

Apesar de todas suas vantagens, os modelos tradicionais de predição de acidentes, a exemplo dos modelos generalizados de regressão linear, podem apresentar deficiências na análise de dados. Apesar de serem uma importante ferramenta de auxílio na investigação da influência dos diversos fatores que afetam a segurança viária, os modelos de previsão não são capazes de avaliar os fenômenos emergentes decorrentes da interação desses fatores. Estes tipos de modelo sofrem limitações no processo de estimação pelo fato de que cada registro corresponde a uma ocorrência com suas próprias características independentes, ignorando muitas das interações existentes entre os diversos elementos envolvidos em uma ocorrência. Uma saída para diminuir esta deficiência pode ser a inclusão de dados de diferentes naturezas, como informações socioeconômicas e do ambiente construído (HUAN; ABDEL-ATY, 2010; TORRES, 2016).

Os problemas de segurança viária podem ser analisados através de 5 dimensões, como mostrado na Figura 4. Essas 5 dimensões, combinadas à dimensão espaço-temporal, representam o cenário generalizado de uma investigação de acidentes (HUANG; ABDEL-ATY, 2010). A ênfase dada a cada dimensão na investigação de acidentes vai depender dos diferentes propósitos e objetivos de pesquisa. De acordo com Torres (2016), a análise voltada ao planejamento urbano pressupõe a investigação dos fatores geográficos e de exposição ao risco, o que caracteriza uma abordagem macroscópica – como é a deste trabalho. Siddiqui *et al.* (2012) lembram que são raros os estudos em nível macroscópico abordando a modelagem de acidentes envolvendo pedestres e ciclistas com vistas ao planejamento viário.

Figura 4 – As 5 dimensões de análise da segurança viária segundo Huang e Adel-Aty



(fonte: adaptado de Huang e Abdel-Aty, 2010)

De modo a realizar uma macroavaliação robusta acerca do cenário estudado, é possível lançar mão de ferramentas de dados georreferenciados para uma investigação multinível. Os *softwares* como o QGIS (*Quantum GIS*) são capazes de relacionar as informações georreferenciadas sobre a estrutura urbana e fatores socioeconômicos aos dados de acidentes utilizando o Sistema de Informação Geográfica (SIG). O Sistema de Informação Geográfica, do inglês *Geographic Information System* (GIS), é definido por Rosa (2005) como o

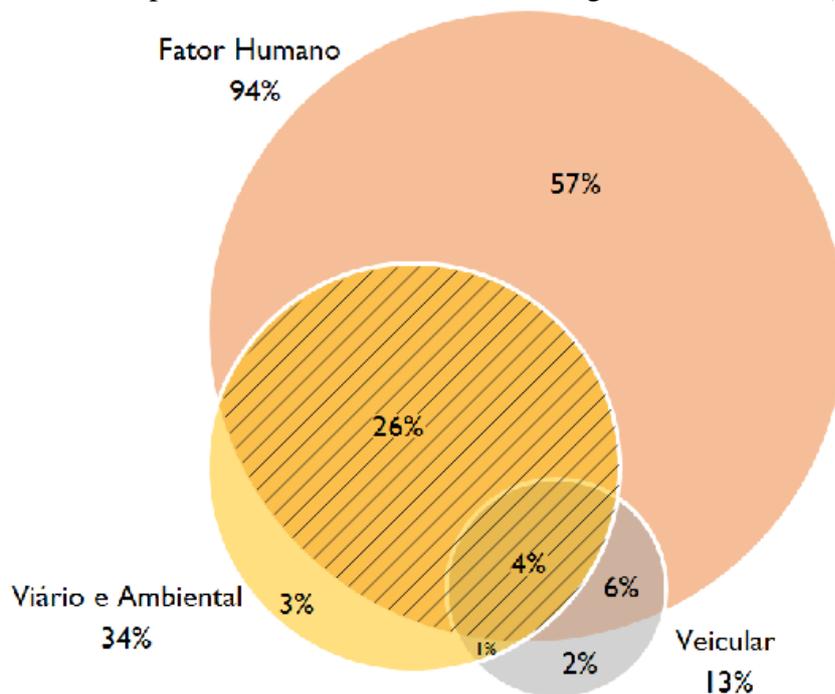
[...] sistema destinado à captura, armazenamento, checagem, integração, manipulação, análise e apresentação de referidos espacialmente na superfície terrestre. Portanto, o Sistema de Informação Geográfica é uma particularidade do Sistema de Informações no sentido amplo. Essa tecnologia automatiza tarefas até então realizadas manualmente e facilita a realização de análises complexas através da integração de dados de diversas fontes.

Druck *et al.* (2004) explicam que quando se dispõe de dados com localização precisa e representados em uma projeção cartográfica conhecida, é possível projetar estes dados em uma base georreferenciada a fim de caracterizar o cenário de estudo. Para isso, Torres (2016) diz que

[...] é necessário que sejam aplicadas técnicas de geoespacialização compatíveis com o tipo de informação disponível para cada base em formato de texto. Quando disponíveis as coordenadas geográficas, a simples representação espacial por ferramenta GIS é capaz de produzir uma base georreferenciada. As informações armazenadas sem coordenadas geográficas vinculadas, mas que dispõem de identificador (*Identity* ou ID) comum à base de dados georreferenciada, é possível realizar a união das características do texto ao arquivo já geoespacializado. Na falta de coordenadas geográficas atribuídas e de ID em comum, é necessário adotar recurso de geocodificação por endereço, disponível em ferramenta complementar do Quantum GIS 2.14 (QGIS) o qual busca nas principais bases web (*Google Maps* ou *Open Street Map*) localizar e georreferenciar a informação.

O cruzamento de dados da base georreferenciada e do banco de dados de acidente abre uma gama de possibilidades de análises, bem como possibilita o agrupamento desses dados em *buffers* (áreas de interesse) para modelagem de frequências e severidades de ocorrências de trânsito (DRUCK *et al.*, 2004; LEITE *et al.*, 2013; TORRES, 2016). Dessa forma, o SIG atua como importante ferramenta de auxílio no monitoramento e planejamento do tráfego urbano, municiando gestores e pesquisadores com ricas informações dos e relações entre elementos da estrutura urbana e acidentes registrados. As ferramentas de georreferenciamento são capazes, ainda, de investigar de forma holística os elementos componentes do sistema viário segundo a teoria da causalidade proposta por Treat *et al.* (1979). Segundo o autor, os acidentes viários são explicados por três entidades diferentes: o veículo, a via e o usuário. Essa relação está ilustrada na Figura 5.

Figura 5 – Componentes do sistema de trânsito segundo Treat *et al.* (1979)



(fonte: adaptado de Treat *et al.*, 1979)

3 FATORES QUE INFLUENCIAM A SEGURANÇA CICLOVIÁRIA

Neste item são apresentados elementos da estrutura urbana e socioeconômicos que apresentam relação com a ocorrência de acidentes de bicicleta segundo a literatura revisada. Esta revisão foi utilizada para embasar a investigação dos acidentes ciclovitários, explicada no item 4.3.

3.1 HIERARQUIA VIÁRIA

A hierarquia viária está diretamente relacionada à acidentalidade. A classificação viária é preditora dos limites de velocidade permitida nos segmentos viários, de modo que vias de hierarquia mais alta, como as vias arteriais, cujas características incluem maior número e largura das faixas, possibilitam o desenvolvimento de velocidades mais altas por parte dos veículos motorizados. Mukherjee *et al.* (2006) simularam as variações nas distâncias de arremesso dos ciclistas, pedalando a uma velocidade de 10km/h, após colidir com um carro, variando a velocidade do carro entre 15 e 65km/h. Os resultados demonstraram que a distância à qual os ciclistas seriam arremessados varia exponencialmente com a velocidade do veículo motorizado, o que permite supor que varia também a severidade do acidente. Foram realizados testes com variações de velocidade dos ciclistas, mas o efeito sobre o resultado foi insignificante, o que corrobora a natureza frágil dos usuários ciclistas e afirma a velocidade desenvolvida pelos veículos automotores como fator preponderante sobre a gravidade da colisão.

Além disso, vias arteriais oferecem capacidades maiores e, por conseguinte, verificam-se volumes mais altos de automóveis circulando nestes locais. Cunto *et al.* (2012) classificam o Volume Diário Média Anual (VDMA), ou seja, o volume que representa a média diária em um ano em uma via, como a variável de exposição que, usualmente, explica a maior parte da variação dos acidentes de trânsito em uma interseção. Estes aspectos estão relacionados ao aumento da frequência e da severidade de acidentes, em especial à severidade dos acidentes envolvendo pedestres e ciclistas (QUDDUS *et al.*, 2002; NOLAND; OH, 2004; ABDEL-ATY *et al.*, 2007; NYCDOT, 2010; UKKUSURI *et al.*, 2012; HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ; HARO-DE-LEÓN, 2014).

3.2 CHUVA

Em relação ao tráfego cicloviário nos grandes centros urbanos, a influência das condições de tempo sobre a segurança viária se manifesta, principalmente, através da presença de água na pista. Intuitivamente, a presença de líquidos sobre a superfície – quer seja devido à chuva, quer seja advindo de vazamentos de automóveis, dutos rompidos, lavagem de calçadas, etc. – indica maior risco para a circulação de bicicletas. Isso é verificado na dificuldade para realização de frenagens, no risco de aquaplanagem, na realização de movimentos bruscos para desviar de pontos de acúmulo d'água e na possibilidade de cair em buracos escondidos sob poças d'água. Além disso, a visibilidade dos motoristas dos veículos motorizados também é reduzida, aumentando a probabilidade de ocorrência de acidentes (FHWA, 1979; CHEN; SHEN, 2016).

No entanto, sob chuva, verifica-se um comportamento naturalmente mais defensivo dos condutores. O estudo desenvolvido por Shaheed *et al.* (2013) encontrou evidências que justificam essa hipótese, pois mostram que a condição seca da superfície viária pode contribuir na ocorrência de acidentes considerados fatais ou graves e leves, devido à conduta mais arriscada desenvolvida pelos condutores sob melhores condições de trafegabilidade. Este resultado é corroborado por Kaplan e Prato (2012) que afirmam ser a condição seca da superfície viária um fator significativo para o aumento da probabilidade de ocorrência de acidentes com morte. Os autores identificaram também que esta condição está concomitantemente associada a uma menor probabilidade de ocorrência de acidentes com ferimentos leves.

3.3 IDADE DO CICLISTA

A despeito de muitos autores já terem avaliado a relação entre a faixa etária das vítimas e residentes nas áreas de estudo e a acidentalidade, estudos dessa natureza nos países em desenvolvimento – caso do Brasil – ainda são escassos (BARTLETT, 2002; DUMBAUGH; LI; JOH, 2013). Jovens e idosos compõem um grupo cujas características os tornam mais suscetíveis aos riscos do trânsito: enquanto os jovens apresentam maior aceitabilidade para exposição ao perigo e menor experiência no tráfego, os idosos são fisicamente mais frágeis e requerem um tempo de reação maior para agir em situações inesperadas. Por essas razões, diversos autores indicam haver aumento no risco de

atropelamentos e acidentes fatais quando, entre os envolvidos num acidente, há crianças e idosos, tanto no deslocamento a pé como utilizando bicicleta (MELLO-JORGE; MARTINS, 2013; DUMBAUGH; LI; JOH, 2013; FUENTES; HERNANDEZ, 2013; MOHAMED *et al.*, 2013; POUR-ROUHOLAMIN; ZHOU, 2016).

Alguns trabalhos nesta área destacam de maneira clara a relação entre faixa etária de usuários vulneráveis e a acidentalidade no modo ciclovitário. Em trabalho realizado nos Estados Unidos, Dumbaugh, Li e Joh (2013) investigaram o registro de acidentes envolvendo pedestres e ciclistas no Condado de San Antonio-Bexar, Texas. Os autores identificaram que o número de atropelamentos com morte estava relacionado ao envolvimento de jovens e idosos nos respectivos acidentes. Fuentes e Hernandez (2013), em estudo desenvolvido na Cidade do México, avaliaram registros de acidentes entre os anos de 2008 e 2009 e identificaram que quão maior o número de residentes idosos em um determinado setor censitário, maior a densidade de atropelamentos da referida área. Em geral, com o passar da idade a debilidade física fica mais evidente, afetando atributos necessários para o tráfego em bicicletas como a visão, equilíbrio e capacidade muscular (SCHEPERS; WOLT, 2012).

Mello-Jorge e Martins (2013) destacam que a ocorrência de acidentes envolvendo bicicletas pode estar associada ao uso mais frequente por crianças na forma de lazer e transporte para a escola. O desconhecimento das leis de trânsito, a falta de destreza na condução do veículo e o desrespeito ao uso dos equipamentos de segurança entre esses usuários são fatores contribuintes para a ocorrência de lesões mais severas nos acidentes envolvendo crianças e adolescentes. O comportamento mais suscetível ao risco dos jovens pode ser identificado em estudo de ATSB (2006): entre 1996 e 2000, 60% dos ciclistas homens envolvidos em ocorrências fatais não utilizavam capacete no momento do acidente. A faixa etária dos 5 aos 19 anos representava 32% desse total, enquanto os outros 28% eram compostos pela faixa etária dos maiores de 20 anos.

3.4 RENDA

Segundo a Organização Mundial de Saúde, a renda média e a segurança viária tem relação evidenciada nos índices de acidentes de trânsito dos países em desenvolvimento, onde se verifica a ocorrência de mais acidentes com vítimas fatais (WHO, 2015). No entanto, esta relação também é verificada em outros contextos. A renda média tem influência sobre o

padrão de deslocamento das pessoas e há evidências de que regiões com rendas familiares mais altas apresentam menores taxas de ocorrência de acidentes. Em estudo desenvolvido sobre a segurança dos usuários de transporte ativo no entorno de escolas em Michigan, Estados Unidos, Savolainen *et al.* (2014) investigaram o banco de dados de acidentes envolvendo vítimas entre 5 e 14 anos de idade e comprovaram a relação entre as rendas familiares maiores e a menor frequência de acidentes. Os autores sugerem que, neste caso, as rendas mais altas podem estar influenciando no comportamento dos usuários, através do nível educacional mais elevado, e no padrão de deslocamento, através da maior taxa de utilização de veículos de passeio no trajeto entre casa e escola.

No Canadá, na província de Nova Escócia, Forbes e Habib (2015) também identificaram relação entre a renda média, o cenário viário-ambiental e os acidentes. De acordo com os autores, os bairros com menores rendas médias apresentavam também ambientes viários menos amigáveis aos usuários de transporte ativo, associados a maiores taxas de criminalidade e ao desenvolvimento de maiores velocidades dos veículos motorizados. Esse cenário resultou em maiores probabilidades de ocorrência de acidentes com risco de ferimentos graves.

3.5 SEMÁFOROS

Semáforos são dispositivos utilizados para ordenamento e controle dos movimentos permitidos, o que pode contribuir para organização do tráfego nas interseções e redução de acidentes. O controle semaforico pode ser identificado em diversas vias arteriais, onde o tráfego cicloviário é mais arriscado, ou em vias de menor hierarquia, geralmente associadas à instalação de faixas de travessia de pedestres (FTP) (BRASIL, 1997; WRI, 2015). Córdova Júnior e Nodari (2014), em estudo realizado na cidade de Porto Alegre, identificaram que diversos ciclistas desrespeitam a sinalização semaforica, o que pode ocasionar conflitos entre eles e os pedestres cruzando a via. Esse comportamento é muitas vezes decorrente do planejamento semaforico das áreas urbanas, cujos tempos são programados para proporcionar melhores condições para o tráfego motorizado. Desse modo, os ciclistas tendem a se sentirem prejudicados em seu trajeto e, por conta desse impedimento, desenvolvem o comportamento de avançar os sinais vermelhos (OREGON DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2011).

Nas interseções, locais onde o desenho viário, comumente, apresenta diversos pontos de conflito, o controle semafórico auxilia no controle dos movimentos permitidos e pode reduzir os riscos de acidente. Nestes pontos, devido à fragilidade física dos ciclistas, é recomendada a instalação de semáforos em lugar do aproveitamento das brechas, mesmo quando existentes, para realização do movimento de travessia (SENÇO, 2008; OREGON DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2011).

3.6 PARADAS DE ÔNIBUS

As paradas de ônibus podem constituir pontos de perigo para a ocorrência de acidentes com ciclistas. Devido aos movimentos de frenagem dos ônibus, a solicitação sobre o pavimento nestas áreas é maior, de modo que o mesmo começa a apresentar deformações ao longo do tempo que, apesar de não serem significativas para os outros veículos motorizados, podem oferecer risco aos ciclistas (FHWA, 1979; GONDIM, 2010). Além disso, as paradas de ônibus em Porto Alegre situam-se, de modo geral, no bordo direito da pista, região recomendada pelo Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997) para o tráfego cicloviário quando inexistir infraestrutura cicloviária na via. Desse modo, as paradas constituem pontos de conflito entre ciclistas e ônibus nas chegadas e partidas destes, bem como pontos de redução da visibilidade do ciclista nas ocasiões em que os veículos estiverem parados nestes locais. Andersen *et al.* (2012) atentam para os casos nos quais as ciclofaixas sobre a calçada situam-se em rota conflitante com as paradas. Os autores sugerem que sejam realizados estudos de fluxo de passageiros nestes locais a fim de destinar uma área de embarque e desembarque adequada; caso isso não seja possível, deve-se buscar realizar o desvio da ciclofaixa por trás da estrutura.

3.7 TURNO DO DIA

As condições de visibilidade no trânsito estão diretamente relacionadas à iluminação da via, a qual é significativamente influenciada pelo turno do dia. Diversos autores apontam a visibilidade como fator importante para a segurança dos ciclistas. Há evidências na literatura de que condições ruins de luminosidade nas vias estão relacionadas a maiores riscos de acidentes graves e fatais, como atropelamentos envolvendo usuários de transporte ativo

(ELVIK; VAA, 2009; GONDIM, 2010; KAPLAN e PRATO, 2012; TWISK; REURINGS, 2013; SHAKEED *et al.*, 2013).

Pour-Rouhlolamin e Zhou (2016) relatam maior probabilidade de ocorrência de acidentes graves, entre os usuários de transporte ativo, durante os períodos da noite e da madrugada, quando as condições de visibilidade tornam-se piores. Segundo ATSB (2006), a identificação do ciclista pelos outros usuários é um fator primordial para segurança cicloviária: na Austrália, no período entre os anos de 1996 e 2004, a principal causa (75%) de acidentes fatais envolvendo ciclistas foi a falta de percepção mútua entre ciclistas e outros usuários na via.

No contexto dos países em desenvolvimento, percebe-se ainda uma tolerância ao desrespeito das leis de trânsito em período noturno, fato atribuído à insegurança decorrente das altas taxas de criminalidade. Deve-se ainda ressaltar que, no Brasil, é possível – e, inclusive, mais comum – adquirir uma bicicleta sem os elementos de iluminação e percepção do ciclista, apesar destes serem itens obrigatórios segundo o Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997). De forma análoga, é como se fosse permitido por lei adquirir um carro de passeio sem os faróis dianteiros e traseiros. Dessa forma, delega-se ao usuário a decisão entre instalar ou não estes itens em seu veículo, o que pode influenciar na segurança de todos envolvidos no trânsito.

3.8 INTERSEÇÕES

Senço (2008) afirma que o estudo das interseções é de fundamental importância para o entendimento e mitigação dos acidentes, haja vista que, apesar de representarem parcela pequena da malha viária total dos centros urbanos, é nestes locais onde se percebe maior concentração de acidentes. Em estudo desenvolvido na Arábia Saudita, Al-Ghamdi (2013) identificou que as interseções concentravam 50% de todos os acidentes de trânsito registrados anualmente na capital Riyadh, sendo mais da metade deles classificados como severos.

Nas interseções viárias das grandes cidades é onde criam-se os principais pontos de conflito modal – como no caso entre veículos de passeio e bicicletas –, os quais, muitas vezes, tem interesses de manobra diferentes e desenvolvem velocidades incompatíveis. Além disso, nas áreas de interseção controladas semaforicamente, após a abertura do sinal verde pode-se criar conflitos devidos à diferença de velocidade na retomada de movimento entre os veículos

motorizados e a bicicleta. (ANDERSEN *et al.*, 2012). Áreas de interseção mal projetadas também podem ser fonte de conflito entre pedestres e ciclistas, devido a questões de visibilidade e imprudência.

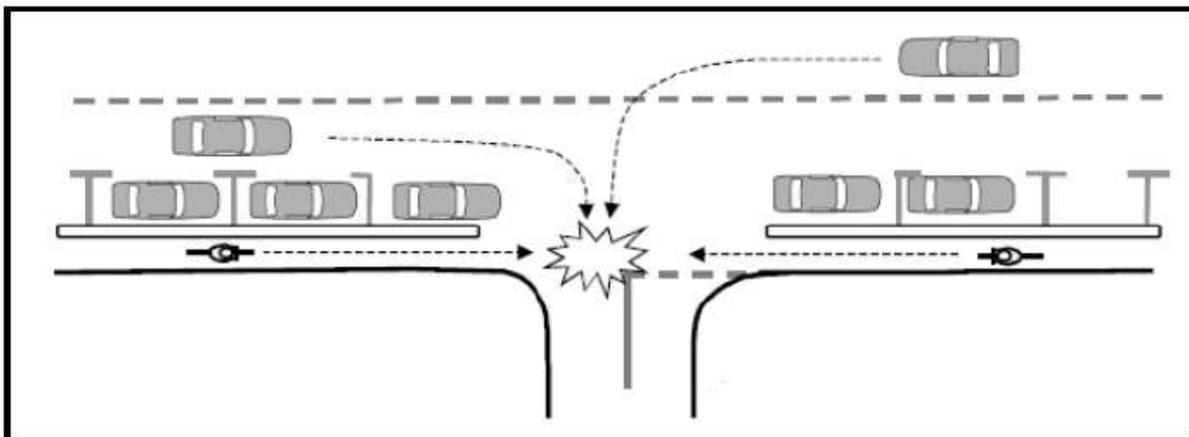
Por outro lado, outros estudos indicam resultados diferentes para a análise da influência das interseções sobre a segurança viária. Malhas viárias mais densas e com maior número de interseções provocam mais interrupções no tráfego, de modo a coibir o desenvolvimento de maiores velocidades por parte dos veículos motorizados, o que contribui para a redução da frequência dos acidentes envolvendo estes e os pedestres e ciclistas. Redes densas apresentam menores comprimentos médios de quadra, de forma que também se identifica relação entre o aumento do número de interseções e a diminuição da gravidade dos acidentes ocorridos em algumas regiões (LOVEGROVE e SAYED, 2006; ELVIK; VAA, 2009; MARSHALL e GARRICK, 2011; ZHANG *et al.*, 2015).

3.9 PONTOS DE TÁXI

Não foi localizado na literatura revisada estudo delimitado com análise específica da influência dos pontos de táxi urbanos sobre a segurança ciclovitária. Porém, é possível fazer esta relação a partir da observação da localização típica dos pontos de táxi da cidade de Porto Alegre. Eles situam-se nos bordos direitos da pista, de forma que, muitas vezes, as infraestruturas ciclovitárias – como, por exemplo, as ciclofaixas – ficam entre os pontos de táxi e a calçada, criando uma espécie de corredor para o ciclista. É possível associar esta situação à instalação de um estacionamento ao longo da via ciclável, o que, conforme a Figura 6, traz problemas de visibilidade para os motoristas e ciclistas (ANDERSEN *et al.*, 2012).

Soma-se a isso o fato de que, durante a espera por clientes, os taxistas frequentemente circulam entre os veículos e a calçada, no espaço onde transitam as bicicletas. Cria-se ainda com esta configuração uma área de conflito entre os ciclistas e os clientes que, eventualmente, embarquem nos táxis. Por fim, há o risco de ocorrer o fenômeno de *dooring* (abertura de portas, tradução livre), descrito pela literatura como o risco de que ocupantes de um veículo, ao desembarcarem, abram a porta sem verificar a passagem dos ciclistas, causando acidentes ou desviando a sua trajetória (ANDERSEN *et al.*, 2012; LUSK *et al.*, 2013).

Figura 6 – Redução da visibilidade devido aos estacionamentos paralelos à ciclofaixa



(fonte: adaptado de FORAN, c2002)

3.10 DECLIVIDADE

Devido à tecnologia da bicicleta, que funciona através de propulsão motora, não apenas as escolhas de rota dos ciclistas, mas também suas condições de segurança são afetadas pelo greide da via. Berg (2015) explica que o risco associado a uma rampa é função da sua declividade, desnível e comprimento totais, espaço disponível na rampa, tipo de usuário trafegando na rampa, além de outros fatores. Ele associa um fator de dificuldade a cada rampa, que é calculado em função da declividade, do desnível e do comprimento, sendo a declividade o fator preponderante.

A despeito de considerar trechos em rampa a partir de um valor de declividade igual a 1,25%, Berg (2015) afirma que valores significativos do fator de dificuldade são observados para rampas a partir de 2%. Em vias de aclive com aclives maiores do que 2%, já pode haver situações onde a visibilidade, tanto dos motoristas quanto dos ciclistas, seja prejudicada. O limite superior do fator de dificuldade é observado em rampas com greide igual a 10%, ou seja, para rampas com declividades superiores a esse limite há grande risco para o tráfego de ciclistas.

Para ciclistas, pedalar subidas muito íngremes ou extensas pode ser muito difícil e prejudicial para a destreza e manutenção do equilíbrio ao longo do resto do trajeto. Isso ocorre devido ao cansaço acumulado e é mais significativo para usuários mais velhos. Já situações de declive agudo dificultam a frenagem dos ciclistas de forma geral, aumentando o risco de acidentes ao pé da rampa. Às vias com inclinação acentuada está relacionada a maior

incidência de acidentes com ciclistas (FHWA, 1979; ELVIK; VAA, 2009; ANDERSEN *et al.*, 2012; BERG, 2015).

3.11 USO DO SOLO

Segundo Ewing e Cervero (2010), o projeto e a estrutura urbanos são decisivos para a determinação do padrão de viagens e para o fomento da utilização dos modos de transporte ativos. Desse modo, torna-se primordial o estudo de suas influências sobre a acidentalidade. Os autores determinam cinco dimensões sob à luz das quais pode ser analisada a estrutura urbana: densidade do uso do solo, diversidade do uso do solo, desenho urbano, distância ao destino e distância ao transporte coletivo. Neste trabalho, devido às características da pesquisa, serão avaliadas apenas as dimensões de densidade de uso do solo, diversidade do uso do solo e desenho urbano, denominadas 3D e preconizadas por Cervero e Kockelman (1997).

A densidade do uso do solo é definida por Ewing e Cervero (2010) como a medida que define o interesse por determinada área. Esse interesse pode ser mensurado através de fatores como população, número de unidades habitacionais, área útil construída e empregos ou através da densidade global, relativos à unidade de área líquida ou bruta. Segundo Dumbaugh e Rae (2009), a densidade populacional influencia positivamente na redução da frequência de acidentes totais de média ou alta gravidade. Em contrapartida, Zahabi *et al.* (2011) relacionam maiores índices de densidade populacional ao aumento da severidade de acidentes envolvendo ciclistas e veículos motorizados. Por sua vez, Chen e Shen (2016) atribuem à valores mais altos de densidade de empregos a ocorrência de acidentes menos severos com ciclistas. Estes resultados mostram que não há consenso acerca da influência da densidade de uso do solo sobre a frequência e severidade dos acidentes cicloviários.

A diversidade de uso do solo, de acordo com Ewing e Cervero (2010) representa o nível de heterogeneidade na utilização de uma área específica. Essa diversidade pode ser quantificada através do índice de entropia proposto por Cervero e Kockelman (1997), que traduz a parcela de ocupação que um determinado uso do solo exerce sobre a área total analisada, ponderada entre as diferentes categorias de usos nessa mesma área construída. Essa relação está expressa na equação (1), através do índice de diversidade. De acordo com essa

relação, o índice de diversidade varia entre o valor mínimo 0 e o máximo 1, que indicam usos homogêneos e heterogêneos, respectivamente.

$$I_{div} = \frac{|\sum Pi \times \ln(Pi)|}{\ln(i)} \quad (1)$$

Onde:

i = número de diferentes usos do solo na área de interesse;

Pi = proporção de unidades de cada tipo de uso do solo em relação ao total de unidades na área de interesse.

Assim como ocorre com a densidade de uso do solo, o índice de entropia não tem influência generalizada sobre a frequência e severidade dos acidentes ciclovitários. Enquanto Chen e Shen (2016) relacionam a entropia advinda de maiores proporções de usos residenciais, comerciais, industriais e de lazer à redução da severidade dos acidentes envolvendo carros e bicicletas, Zahabi *et al.* (2011) indicam que parcelas altas de uso misto residencial e comercial podem estar relacionadas ao aumento da severidade desse mesmo tipo de acidente.

O desenho urbano, última das 3 dimensões, é definida por Cervero e Kockelman (1997) como a dimensão que representa a forma de distribuição da malha viária em uma determina área. A mensuração dessa dimensão pode ser realizada, dentre outras formas, através das variáveis representativas do número de interseções e do tamanho do comprimento de quadra de uma região.

O número de interseções com quatro vias está relacionado ao aumento da frequência de acidentes envolvendo usuários não motorizados, caso dos ciclistas (WEDAGAMA *et al.*, 2006; DUMBAUGH; LI; JOH, 2013; ZHANG *et al.*, 2015). As áreas de interseção constituem maior risco pois propiciam maiores oportunidade de conflito. Por outro lado, um maior número de interseções contribui para um comprimento médio de segmento (quadra) menor dentro da área de análise. A maior conectividade proporcionada pelos segmentos curtos está relacionada à diminuição da frequência de acidentes com pedestres e ciclistas (Zhang *et al.*, 2015).

3.12 INTERAÇÃO COM VEÍCULOS MOTORIZADOS

Os ciclistas integram, juntamente com os pedestres, o grupo de usuários mais vulneráveis no trânsito. Por conta disso, os acidentes viários envolvendo ciclistas e veículos motorizados, como carros e motos, representam um grande risco para a parte mais frágil (RODRIGUES *et al.*, 2014). O Quadro 1 sintetiza os resultados da pesquisa realizada por ATSB (2006) que investigou os acidentes fatais envolvendo ciclistas na Austrália entre 1997 e 2004. A participação de veículos motorizados nos acidentes está relacionada a 86% dos casos de morte de ciclistas.

Quadro 1 – Circunstâncias da morte de ciclistas na Austrália entre 1997 e 2004

Evento	Outra parte envolvida no acidente	Percentual de óbitos
Colisão com	pedestres	1
	ciclistas ou outros veículos não-motorizados	0
	carros, utilitários, vans ou outros veículos motorizados	64
	veículos pesados de transporte	22
	veículos sobre trilhos	1
	objeto estacionário na via	4
Sem colisão		5
Desconhecido		3

(fonte: adaptado de ATSB, 2006)

Além de contribuírem para o aumento da severidade das colisões, os veículos pesados – como ônibus, caminhões e até mesmo veículos menores trafegando em alta velocidade – podem causar acidentes sem estabelecer contato com ciclistas. A partir de determinados limites de proporção entre dimensão e velocidade desenvolvida, os veículos automotores são capazes de exercer influência aerodinâmica sobre os ciclistas, gerando deslocamentos de ar suficientemente fortes para derrubá-los. Os veículos pesados podem também, a depender da estrutura do pavimento sobre o qual trafegam, gerar vibrações significativas para atrapalhar o equilíbrio dos usuários de bicicleta (FHWA, 1979; PARKIN; MEYERS, 2009).

3.13 DIA DA SEMANA

Nos grandes centros urbanos, como Porto Alegre, devido às viagens utilitárias decorrentes das atividades rotineiras dos habitantes, verificam-se volumes maiores de automóveis nas ruas nos dias úteis em comparação com os dias de final de semana (ATSB, 2006; LEITE *et al.*, 2013). Devido à relação entre volume de veículos motorizados e

acidentalidade, os dias úteis apresentam maiores taxas de acidentes com ciclistas. ATSB (2006) identificou, a partir da análise de registros de BO, que as quartas-feiras concentraram 15,5% dos acidentes cicloviários contra uma média de 12,55% de acidentes nos finais de semana no período entre 1991 e 2005 na Austrália.

CDOT (2012), analisando dados referentes a acidentes entre ciclistas e automóveis em Chicago, EUA, no período entre os anos de 2005 e 2010, não identificou diferenças significativas para ocorrência de acidentes nos dias da semana. No entanto, o autor indica que os acidentes ocorridos nas sextas-feiras tendem a apresentar graus de severidade mais altos. Os domingos, dias onde os volumes de carros nas vias são menores, há diminuição da frequência de acidentes.

3.14 ESTRUTURAS DEDICADAS AO TRÁFEGO CICLOVIÁRIO

Devido á sua vulnerabilidade física, ciclistas e pedestres estão mais suscetíveis a acidentes. Segundo OECD (2013), considerando o mesmo trajeto percorrido, ciclistas podem estar até 14,6 vezes mais expostos a acidentes fatais em comparação com ocupantes de automóveis. Uma das medidas apontada pela literatura com potencial para mitigar esse risco é a implementação de estruturas dedicadas ao tráfego cicloviário, como ciclovias e ciclofaixas (REYNOLDS *et al.*, 2009; TESCHKE *et al.*, 2012; OECD, 2013). De acordo com Reynolds *et al.* (2009), devido à separação física entre o tráfego motorizado e os ciclistas provida pela ciclovia, esta infraestrutura se mostra mais segura do que a ciclofaixa. Teschke *et al.* (2012) apontam que, tomando como referência um trajeto realizado através de vias sem infraestrutura exclusiva, o risco de ciclistas se acidentarem é aproximadamente 89% menor em vias com ciclovias e 50% menor em vias com ciclofaixas.

Duduta *et al.* (2013) afirmam que, entre os anos de 1998 e 2009, devido a um contínuo esforço para implementação de infraestruturas dedicadas aos ciclos, a cidade de Copenhagen viu seus índices de quilômetros percorridos por bicicleta mais que dobrar enquanto o número de lesões e fatalidades por milhões de quilômetros percorridos diminuiu de aproximadamente 200 para menos de 100. Os autores apontam experiência similar na cidade de Nova Iorque em 2010, onde após uma década de investimentos em estruturas dedicadas ao tráfego cicloviário, o *cycling risk indicator* (indicador de risco cicloviário, tradução livre), obtido através de

cálculos que envolvem a proporção entre o número de ciclistas lesionados e o número total de ciclistas, caiu de cerca de 375 para menos de 100.

3.15 ELEMENTOS NO ENTORNO DAS VIAS CICLÁVEIS

Devido à localização das vias cicláveis, costumeiramente no bordo direito das vias, a visibilidade dos ciclistas sobre a pista, bem como dos outros usuários sobre os próprios ciclistas, pode ser prejudicada pela presença de elementos como placas, lixeiras e contêineres, os quais, quando localizados próximos às faixas de rolamento, reduzem o campo de visão dos usuários. Ainda, a presença de vegetação sem poda ou de galhos que avançam sobre o bordo da faixa de rolamento, pode, além de comprometer a visibilidade, obrigar que o ciclista manobre para desviar destes obstáculos, aumentando a chance de acidente devido a estes movimentos inesperados – situação agravada quando estes desvios tem de ser realizados por meio de invasão das faixas destinadas ao tráfego de motorizados (GONDIM, 2010; ANDERSEN *et al.*, 2012).

3.16 HABILITAÇÃO DOS CONDUTORES

Em um estudo desenvolvido por Almeida *et al.* (2013) na cidade de Fortaleza, Ceará, foram analisadas as características das vítimas, vias e veículos envolvidos em acidentes de trânsito a fim de identificar os fatores de risco predominantes. Para tanto, foram coletados os dados referentes aos acidentes de trânsito com óbito, ocorridos entre janeiro de 2004 e dezembro de 2008 e, sobre este conjunto de dados, foram desenvolvidos modelos lineares generalizados para investigação dos fatores contribuintes. Os resultados demonstraram que condutores com menos tempo de habilitação estavam mais propensos a se envolverem em acidentes com óbito, bem como os condutores com habilitação em situação irregular.

O Quadro 2 resume os aspectos considerados no presente estudo e suas respectivas influências sobre a frequência e severidade dos acidentes de bicicleta de acordo com o referencial teórico.

Quadro 2 – Aspectos investigados e respectivas influências sobre os acidentes de bicicleta

Aspecto	Influência sobre a frequência de acidentes	Influência sobre a severidade de acidentes	Referência
Chuva	Aumenta/Diminui	Aumenta/Diminui	Shaheed <i>et al.</i> (2013), Chen; Shen (2016)
Comprimento médio de quadra	Aumenta/Diminui	Aumenta/Diminui	Dumbaugh; Li; Joh (2013), Zhang <i>et al.</i> (2015)
Declividade da via	Aumenta	-	Elvik; Vaa (2009), Berg (2015)
Densidade de domicílios	Aumenta/Diminui	Aumenta/Diminui	Ewing; Cervero (2010), Chen; Shen (2016)
Densidade de uso do solo	Aumenta/Diminui	Aumenta/Diminui	Cervero; Kockelman (1997), Ewing; Cervero (2010)
Densidade Populacional	Aumenta/Diminui	Aumenta/Diminui	Ewing; Cervero (2010), Zahabi <i>et al.</i> (2011)
Dia útil	Aumenta	Aumenta/Diminui	CDOT (2012), Leite <i>et al.</i> (2013)
Diversidade de uso do solo	Aumenta/Diminui	Aumenta/Diminui	Cervero; Kockelman (1997), Ewing; Cervero (2010)
Envolvimento de automóvel	Aumenta	Aumenta	ATSB (2006), Rodrigues <i>et al.</i> (2014)
Envolvimento de motocicleta	Aumenta	Aumenta	ATSB (2006), Rodrigues <i>et al.</i> (2014)
Envolvimento de veículo pesado	Aumenta	Aumenta	ATSB (2006), Rodrigues <i>et al.</i> (2014)
Falta de habilitação do condutor	Aumenta	Aumenta	Almeida <i>et al.</i> (2013)
Idade do ciclista (jovem ou idoso)	Aumenta	Aumenta	Dumbaugh; Li; Joh (2013), Fuentes; Hernandez (2013)
Infraestrutura cicloviária	Diminui	Diminui	Teschke <i>et al.</i> (2012), OECD (2013), Duduta <i>et al.</i> (2013)
Interseção	Aumenta	Aumenta	Al-Ghamdi (2013), Zhang <i>et al.</i> (2015)
Obstáculos na via	Aumenta	-	Andersen <i>et al.</i> (2012)
Paradas de ônibus	Aumenta	-	Andersen <i>et al.</i> (2012)
Pontos de táxi	Aumenta	-	Andersen <i>et al.</i> (2012), Lusk <i>et al.</i> (2013)
Renda domiciliar	Aumenta	Aumenta	WHO (2015), Forbes; Habib (2015)
Semáforos	Aumenta/Diminui	Aumenta/Diminui	ODT (2011), Córdova Jr.; Nodari (2014), WRI (2015)
Turno do dia (noite)	Aumenta	Aumenta	ATSB (2006), Pour-Rouhlolamin; Zou (2016)
Vias arteriais	Aumenta	Aumenta	Mukherjee <i>et al.</i> (2006), Cunto <i>et al.</i> (2012)

(fonte: elaborado pelo autor)

4 MÉTODO DE TRABALHO

Este capítulo descreve as metodologias utilizadas no desenvolvimento do trabalho. As etapas iniciais dizem respeito à definição do cenário de estudo, à coleta de dados e ao tratamento e organização desses dados. Em seguida, são explicados os procedimentos metodológicos para análise do cenário e para estimação do modelo. O método utilizado teve como base os trabalhos de Torres (2016) e Machado (2017).

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada e, por utilizar modelos econométricos, a forma de abordagem do problema caracteriza-se como pesquisa quantitativa. Já em relação aos objetivos, pode ser caracterizado como pesquisa explicativa, visto que busca identificar padrões e fatores contribuintes físicos e espaciais que tenham relação com acidentes de bicicleta ocorridos nos bairros de Porto Alegre e analisa a contribuição destes fatores sobre a acidentalidade.

O desenvolvimento do trabalho se deu através de Pesquisa Documental e Pesquisa *Expost-Facto*, dado que os dados analisados são oriundos de dados secundários obtidos de diferentes fontes, tanto os dados referentes à acidentalidade quanto aos elementos de estrutura urbana.

4.1 CENÁRIO ESTUDADO

O cenário estudado é a cidade de Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul, com território de 496,7 km² e população estimada, em 2017, de 1.484.941 habitantes (IBGE, 2017). Em 2010, ano do Censo utilizado para obtenção dos dados socioeconômicos deste trabalho, a cidade contava com 1.409.351 habitantes distribuídos em 508.456 domicílios.

Os dados referentes à estrutura urbana foram obtidos da plataforma DATAPOA e da Secretaria Municipal de Indústria e Comércio (SMIC) de Porto Alegre, ambas de livre acesso. Os dados de acidentes utilizados neste estudo são provenientes do banco de dados cedido pela Empresa Pública de Transporte e Circulação (EPTC) de Porto Alegre, órgão municipal responsável pela regulação e fiscalização das atividades relacionadas ao trânsito e transporte na cidade. Apesar de terem sido cedidos os dados referentes a todos os acidentes registrados no período compreendido entre 1º de janeiro de 2008 e 25 de maio de 2017, a pesquisa

delimitou o período compreendido entre 1º de janeiro de 2012 e 31 de dezembro de 2014 como limite de pesquisa. Essa delimitação se deve tanto devido à necessidade de compatibilização com outras fontes de dados, quanto à necessidade de realizar um tratamento estatístico mais rigoroso. As séries de dados referentes aos acidentes de trânsito, devido à natureza estocástica destes, sofrem os efeitos do fenômeno de regressão à média (HAUER, 2002; AASHTO, 2010). Este fenômeno parte da premissa de que, após períodos onde se observa altas frequências de registros, aumenta a probabilidade de que exista uma diminuição dos acidentes de forma natural no período seguinte – e vice-versa. Dessa forma, além da utilização de ferramentas estatísticas que possam auxiliar as análises acerca da segurança viária, é necessário delimitar períodos adequados de investigação a fim de que as inferências não sejam distorcidas pela regressão à média.

4.2 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

O presente trabalho utilizou dados do último Censo realizado em Porto Alegre, em 2010, e outros dados georreferenciados com informações acerca da infraestrutura urbana de Porto Alegre e dos acidentes envolvendo bicicletas entre os anos de 2012 e 2014. Devido à diversidade de fontes de obtenção desses dados e de formatos de arquivo, foi necessário realizar a compatibilização e conversão desses dados.

No que se refere aos formatos de arquivo, foram utilizados dois formatos específicos que são o *csv* e o *shapefile*. Os arquivos *csv* são arquivos de dados separados por vírgulas e que podem ser manipulados através dos *softwares* Bloco de Notas e Microsoft Excel 2007. Eles permitem armazenar e extrair dados de uma determinada ocorrência ou mesmo concatenar dados referentes a campos em comum entre ocorrências diferentes. Os arquivos *shapefile* carregam as informações de georreferenciamento e geram camadas de informação para análises espaciais. Alguns arquivos *shapefile* utilizados nesta pesquisa já estavam disponibilizados em sua forma original em bases de dados abertas, enquanto outros foram gerados a partir da combinação de arquivos *csv* ou de mais de um *shapefile*. O *software* utilizado para manipulação desses arquivos foi o Quantum GIS (QGIS) versão 2.14.8.

A base cartográfica utilizada foi da cidade de Porto Alegre desenhada em *shapefile*. De forma a compatibilizar os dados de pesquisa com os dados do Censo mais recente disponível, optou-se por utilizar a base cartográfica do ano de 2010. Nessa época, a cidade

contava com 78 bairros e mais uma Zona Indeterminada que, atualmente, está subdividida em outros bairros ou tem algumas de suas partes já incorporadas por bairros previamente existentes.

A base de dados referentes aos acidentes, cedida pela EPTC, utilizava o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) Gauss-Kruger 1940, Projeção Transversa de Mercator para Porto Alegre (TM-POA) ou o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), no fuso 22S, padrão adotado no Brasil. Outras fontes de dados estavam disponibilizadas em diferentes SRC, de modo que foi necessário lançar mão de ferramentas do próprio QGIS para converter essas coordenadas e compatibiliza-las no SRC World Geodetic System 1984 (WGS84). A partir daí obteve-se um único arquivo georreferenciado com todas informações coletadas consolidadas, com o que torna-se possível a visualização destes dados na base cartográfica e a associação de diferentes dados para extrair as informações que criarão as variáveis de estudo.

4.3 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

A etapa de especificação das variáveis consistiu em, a partir dos elementos investigados na revisão da literatura, desenvolver variáveis que representassem as características dos fatores que influenciam na segurança ciclovária. Em alguns casos, devido à dificuldade de representação de um determinado aspecto ou devido à disponibilidade dos dados coletados, algumas variáveis foram utilizadas como *proxys* (aproximações) para aspectos de interesse da pesquisa. O processo de especificação das variáveis levou em conta a disponibilidade de dados, a forma de interpretação do comportamento das variáveis e a adequação da variável à metodologia proposta (como, por exemplo, o modo como ela seria extraída a partir da ferramenta GIS utilizada). Os limites definidos para classificação das variáveis foram baseados na literatura revisada.

4.4 DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE ANÁLISE (*BUFFERS*)

As áreas de análise na investigação da prevalência de fatores associados a acidentes são chamadas de *buffers*. É a partir delas que são agrupados, analisados e extraídos os dados consolidados na etapa descrita em 4.2 para quantificar as variáveis preditoras dos acidentes. O QGIS permite criar diversas formas de *buffer*, de forma que é necessário analisar o tipo de

área de análise mais adequado para cada cenário investigado. Os mais comuns são os polígonos irregulares e o os círculos de raio definido.

4.5 MODELAGEM DA FREQUÊNCIA DE ACIDENTES

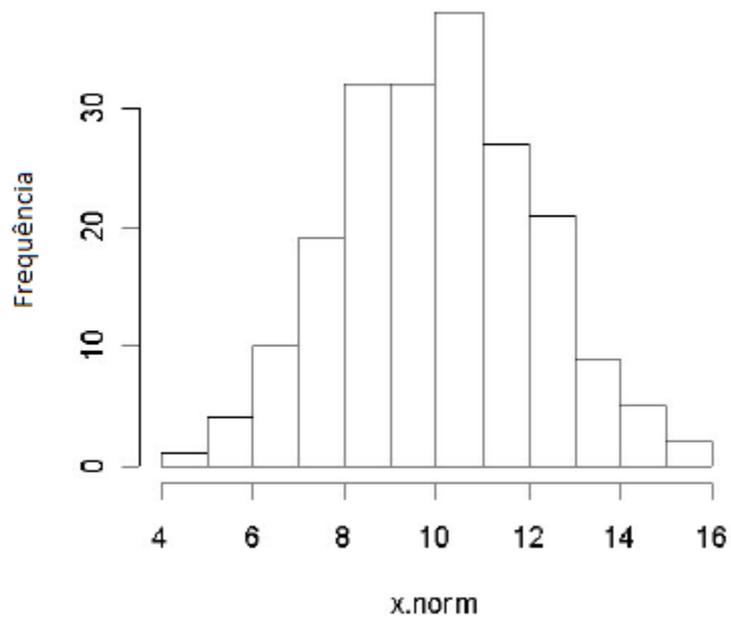
Neste item, é apresentada a metodologia utilizada para estimação dos modelos de frequência de acidentes através do modelo de regressão Binomial Negativo.

4.5.1 Análise de distribuição dos dados

As distribuições probabilísticas de Poisson e Binomial Negativa são as mais consagradas para modelagem de dados de contagem, como é o caso das frequências de acidente. Portanto, é necessário verificar, primeiramente, se os dados coletados não obedecem a uma distribuição Normal. Para a realização da análise de distribuição e dispersão dos dados utilizados nesse estudo foram utilizadas duas ferramentas: o histograma e *quantile plot* (gráfico Q-Q, ou Quantil-Quantil) através do *software* Microsoft Excel.

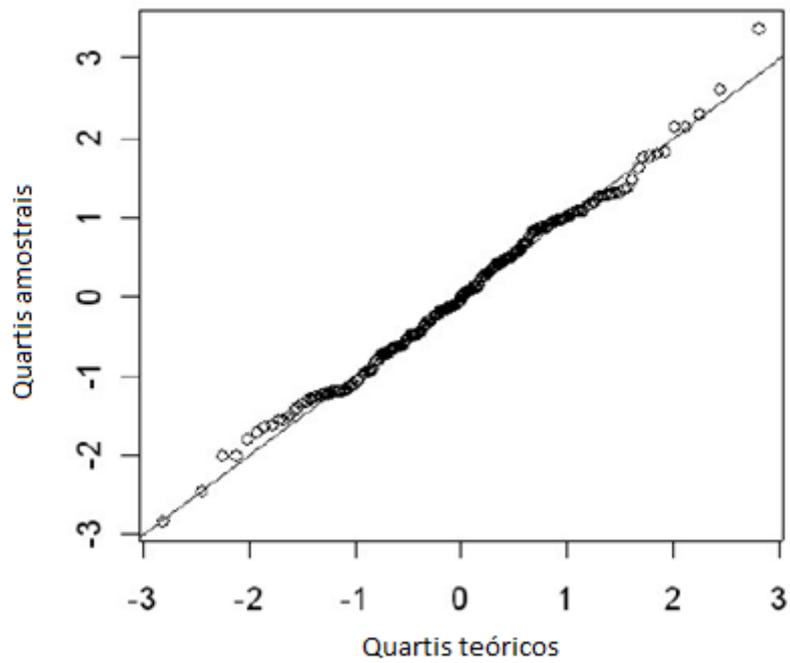
Inicialmente, foi necessário realizar a contagem de acidentes nas unidades de análise. A partir desses dados, é possível realizar a contagem de frequências de acidentes e a posterior normalização desses valores, necessários para utilização das ferramentas de análise de distribuição. Construídos o histograma e o gráfico Q-Q dos dados estudados, podem-se comparar os resultados obtidos com os resultados esperados para uma distribuição do tipo Normal de dados, ilustrada nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 – Aspecto do histograma para uma distribuição Normal



(fonte: adaptado de VICCI, 2005)

Figura 8 – Aspecto do qq-plot para uma distribuição Normal



(fonte: adaptado de VICCI, 2005)

4.5.2 Análise de multicolinearidade para os modelos de frequência de acidentes

A multicolinearidade é um fenômeno estatístico observado quando existe um alto grau de correlação entre as variáveis independentes. A multicolinearidade pode aumentar a variância dos coeficientes de regressão, o que traz efeitos negativos para a estimativa dos quadrados desses coeficientes e prejudica as conclusões do estudo (HAIR *et al.*, 2009). Desse modo, se não for eliminada a multicolinearidade, os coeficientes podem parecer insignificantes mesmo diante de uma relação significativa entre variável e resposta ou mesmo apresentar sinais trocados.

Segundo Montgomery, Peck e Vining (2006), a multicolinearidade pode acontecer devido: (i) ao método de coleta de dados utilizados, quando as amostras são coletadas somente no subespaço da região dos regressores definidos; (ii) às restrições inerentes ao modelo ou à população; (iii) à escolha do modelo, quando este apresenta variáveis linearmente dependentes (devido a fatores não observados ou fatores não incorporados no modelo); ou (iv) ao excesso de termos no modelo, quando este possui mais variáveis regressoras do que observações (nestes casos, é comum eliminar algumas variáveis regressoras para reduzir a multicolinearidade).

O diagnóstico da multicolinearidade pode ser realizado através da análise do Fator de Inflação de Variáveis (VIF, do inglês *Variance Inflation Factor*). Os valores de VIF indicam o incremento da variância de um determinado coeficiente quando os preditores estão correlacionados. Valores de VIF iguais a 1 indicam que não há multicolinearidade, valores entre 5 e 10 sugerem a presença de multicolinearidade e valores de VIF acima de 10 indicam que a multicolinearidade pode estar influenciando as estimativas de mínimos quadrados (HAIR *et al.*, 2009).

Para análise do VIF nesse estudo, atribuiu-se às áreas de análise dados referentes a cada variável analisada, de forma a consolidar a base de dados dessas áreas como unidade de agregação. Ou seja, para cada área de análise foi gerado um conjunto de dados referentes às variáveis investigadas na pesquisa. Esses conjuntos de dados foram convertidos em arquivos *csv* utilizados para aplicação da ferramenta de regressão linear do *software* IBM SPSS Statistics 19. O *software* retorna um relatório de parâmetros estatísticos no qual é possível verificar as variáveis que apresentaram VIF maior que 10. Estas variáveis eram eliminadas do

modelo e nova regressão era realizada para verificação dos novos valores de VIF. O processo foi repetido até que todos os valores de VIF maiores do que 10 fossem eliminados.

4.5.3 Estimação do modelo completo de frequência de acidentes

A modelagem da frequência de acidentes totais foi realizada através de modelos lineares generalizados, os quais são uma extensão dos modelos lineares tradicionais, porém não assumem que a relação entre as variáveis preditoras e a resposta seja necessariamente linear, podendo assumir qualquer forma monótona não linear (NELDER; WEDDERBURN, 1972).

O fenômeno da superdispersão é comumente observado na análise dos dados de acidentes de trânsito. Desse modo, precedeu à escolha da distribuição as análises de distribuição e dispersão dos dados. O modelo de Poisson é mais indicado quando há independência entre as observações, ou seja, quando a variância e a média da amostra são próximas ou iguais. A utilização do modelo Binomial Negativo é indicada quando os dados estão superdispersos, ou seja, quando a variância é maior do que a média. O modelo binomial negativo é um modelo de mistura, e sua variação mais conhecida, utilizada nesse trabalho, corresponde ao caso da distribuição Gama, que se coloca como uma alternativa ao modelo de Poisson quando se verifica superdispersão dos dados (LORD, 2006; LORD; MANNERING, 2010; MANNERING; BHAT, 2014).

O modelo Binomial Negativo difere do modelo de regressão de Poisson devido à adição de um parâmetro de modelagem da superdispersão. Desse modo, a ocorrência de acidentes n_{ij} para um segmento de análise i durante um período j é representado por (2) (LEE; MANNERING, 2002):

$$P(n_{ij}) = \frac{\exp(-\lambda_{ij})\lambda_{ij}^{n_{ij}}}{n_{ij}!} \quad (2)$$

Onde:

$P(n_{ij})$ = probabilidade de ocorrência de n_{ij} acidentes em um segmento viário i em um período de tempo j ;

λ_{ij} = valor previsto de n_{ij} , que representa o número esperado de acidentes por ano em um determinado segmento viário.

Por sua vez, λ_{ij} é definido no modelo Binomial Negativo conforme (3) (WASHINGTON; KARLAFTIS; MANNERING, 2003):

$$\lambda_{ij} = \text{EXP}(\beta\chi_{ij} + \varepsilon_{ij}) \quad (3)$$

Onde:

β = vetor de coeficiente de regressão desconhecido, que pode ser estimado por métodos de máxima verossimilhança padrão (GREENE; HENSHER, 2009; GREENE, 2012)

χ_{ij} = vetor de variáveis que descrevem a área de estudo;

$\text{EXP}(\varepsilon_{ij})$ = termo de erro de distribuição Gamma com média 1 e variância α^2 .

A estimação do modelo foi realizada após as tarefas descritas nos itens 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. O resultado dessas etapas foi um conjunto de dados compatibilizado, consolidado nas áreas de análise e livre de variáveis correlacionadas, o qual foi analisado através da ferramenta de estimação do modelo Binomial Negativo do *software* IBM SPSS Statistics 19. Os dados referentes à variável ao número total de acidentes de bicicleta em cada bairro devem representar a variável dependente. Todas as outras variáveis investigadas, resultantes da análise de multicolinearidade, devem ser inseridas como covariáveis.

A partir de então, foi repetido um processo de refinamento do modelo através da técnica de *backwards elimination* (eliminação regressa) (NETER *et al.*, 1996). A cada estimação do modelo no SPSS foi gerado um relatório que indicava o valor p de significância para cada variável. Estes valores foram analisados e, a cada rodada, a variável com valor p mais próximo de 1, ou seja, aquela com menor chance de apresentar significância no modelo, era eliminada. Esta alteração provocava alterações nos valores p das variáveis restantes na estimação seguinte, e o processo foi repetido iterativamente de modo que, no final, restassem apenas variáveis significativas dentro de um nível de confiança de 95%.

4.5.4 Cálculo dos efeitos marginais do modelo completo de frequência de acidentes

A estimação dos modelos de regressão linear generalizados permitem identificar os coeficientes relacionadas a cada uma das variáveis significativas. Esses coeficientes fornecem informações sobre o sentido da influência da variável independente – positivo ou negativo – e sobre a grandeza com que essa mesma variável contribui para os valores de resposta do modelo (GREENE; HENSHER, 2009). No entanto, pode ser difícil interpretar esses

resultados e suas influências sobre a frequência de acidentes quando essas variáveis apresentam discrepância entre suas ordens de grandeza (MACHADO, 2017).

Uma forma de contornar essa limitação é através da realização do cálculo dos efeitos marginais das variáveis do modelo. Os efeitos marginais indicam a variação observada nas variáveis significativas do modelo a partir do incremento de uma das variáveis independentes específicas. O efeito marginal das variáveis investigadas nos modelos de frequência de acidentes foi calculado através da equação (4) (MOTHAFER; YAMAMOTO; SHANKAR, 2016)

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

Onde:

x_{ij} = vetor das variáveis explanatórias que influenciam o acidente i no segmento j ;

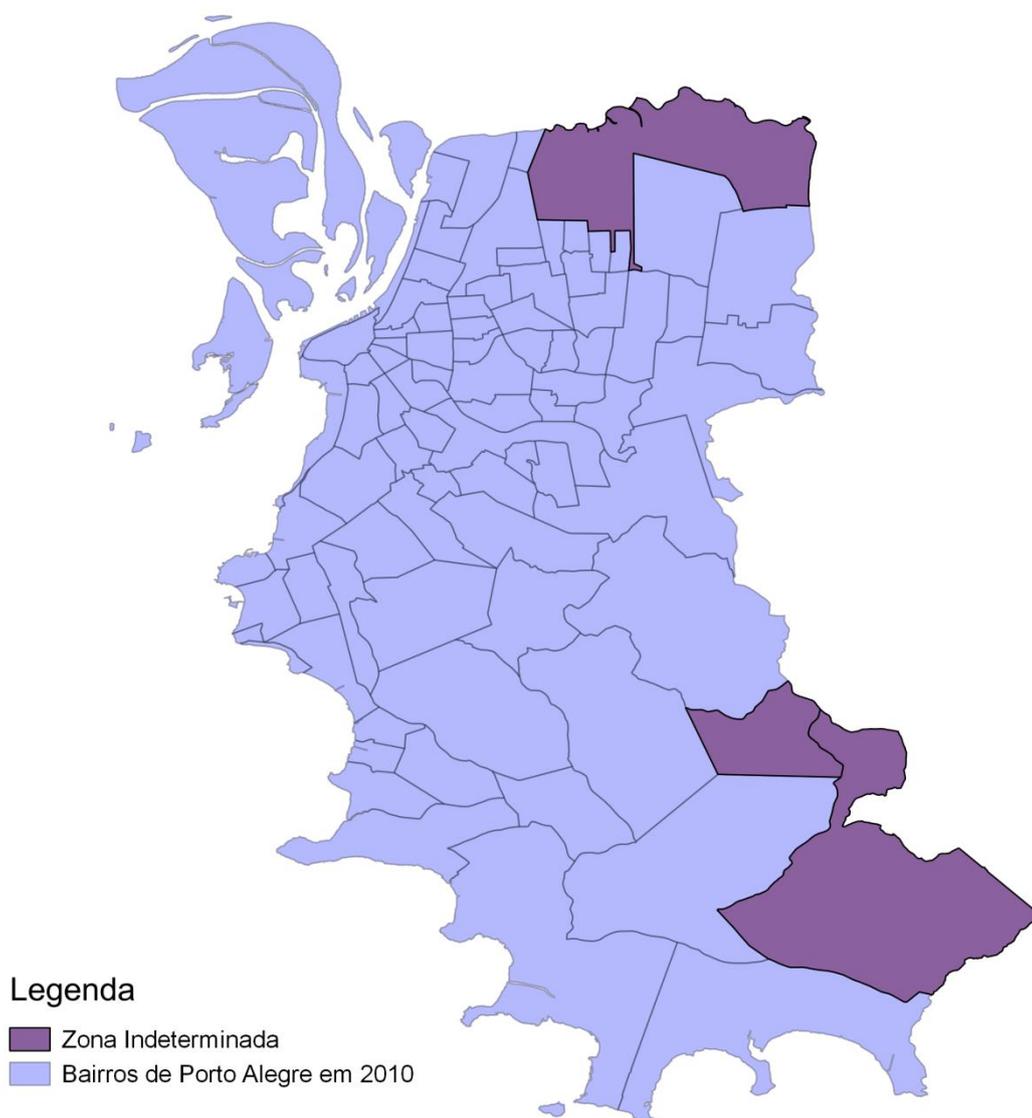
β_{ij} = vetor parâmetro correspondente ao acidente i no segmento j .

Os valores de incremento das variáveis foi determinado pelo tipo de variável, de acordo com Machado (2017): as variáveis do tipo *dummy* receberam incremento 1, as variáveis discretas receberam incremento igual a uma unidade e às variáveis contínuas foi atribuído valor de incremento igual a 10% da média de todos os valores registrados para as respectivas variáveis.

4.5.5 Estimação do modelo reduzido de frequência de acidentes totais

A base cartográfica utilizada no estudo representa o mapa de bairros da cidade de Porto Alegre em 2010. À época, a cidade contava com duas grandes regiões separadas fisicamente, uma na Zona Sul e outra na Zona Norte, que eram classificadas como Zonas Indefinidas ou Áreas sem Classificação. Estas áreas podem ser conferidas na Figura 9.

Figura 9 – Zonas Indefinidas (Áreas sem Classificação)



(fonte: elaborado pelo autor)

Essas áreas foram agrupadas na classificação do Censo 2010, porém os dados acerca dos acidentes e dos outros elementos investigados neste trabalho, por serem provenientes do banco de dados da EPTC – que leva em conta a divisão de bairros da cidade de Porto Alegre em 2017 – fazem distinção entre elas. Dessa forma, propôs-se o desenvolvimento de um outro modelo de frequência de acidentes desconsiderando estas zonas, que aparecem no modelo proposto no item 4.5.3 como um único bairro. Esse fato pode ser causador de discrepâncias nos resultados, haja vista que essas áreas tem características diferentes e, ao serem consideradas como uma única área de análise, distanciam o problema estudado da realidade.

O modelo reduzido utiliza então a mesma base de dados do modelo completo, exceto pela exclusão dos dados referentes à ZI. É buscado, através disso, realizar a comparação entre os modelos propostos a fim de verificar estas suposições.

4.5.6 Cálculo dos efeitos marginais do modelo reduzido de frequência de acidentes

Assim como proposto para o modelo completo de frequência de acidentes, os cálculos dos efeitos marginais para o modelo reduzido utilizam a metodologia descrita no item 4.5.4.

4.5.7 Comparação dos modelos de frequência de acidentes

Após a estimação dos modelos de frequência de acidentes, foi realizada a comparação entre os ajustes dos modelos estimados. Para realização desta etapa, foram utilizados os critérios *Akaike Information Criterion* (AIC) e *Bayesian Information Criterion* (BIC) (AKAIKE, 1974; SCHWARZ, 1978). Segundo Ortúzar e Willumsem (2011), estes critérios baseiam-se no princípio da parcimônia, de acordo com o qual quanto menor o número de pressupostos, maior será a precisão dos parâmetros restantes. Os critérios AIC e BIC são do tipo “menor, melhor” e são calculados através das equações (5) e (6).

$$AIC = -2(LLTOTAL) + 2k \quad (5)$$

$$BIC = -2(LLTotal) + \ln(N)k \quad (6)$$

Onde:

LLTotal = *log-likelihood* do modelo completo com variáveis significativas;

k = número de parâmetros estimados;

N = número de observações.

4.6 MODELAGEM DA SEVERIDADE DE ACIDENTES

Neste item, é apresentada a metodologia utilizada para estimação do modelo de severidade de acidentes. A consolidação das informações referentes às variáveis, diferentemente do que ocorre para os modelos de frequência de acidentes, não é realizada através da agregação por áreas de interesse (bairros). A unidade de agregação, neste caso, são os próprios acidentes registrados, de forma que a cada acidente do banco de dados são atribuídas as informações referentes ao bairro no qual ele foi registrado.

Para modelagem da severidade de acidentes foi desenvolvido um modelo *Logit* Multinomial. Para avaliação do grau de severidade dos acidentes, foi necessário criar um indicador *severidade*, extraído a partir do banco de dados de acidentes e que traduz estas informações: aos acidentes sem feridos ou vítimas fatais, apenas danos materiais, atribuiu-se o valor 1; aos acidentes com ao menos uma vítima ferida, independentemente do grau desses ferimentos – leves ou graves –, atribuiu-se o valor 2; e para aqueles acidentes que resultaram em ao menos uma vítima fatal, atribuiu-se o valor 3. O Quadro 3 sintetiza essas informações.

Quadro 3 – Graus e significados da variável severidade

Grau da variável <i>severidade</i>	Significado
1	Acidentes sem feridos, apenas com danos materiais
2	Acidentes com envolvimento de ao menos um ferido
3	Acidentes com envolvimento de ao menos uma vítima fatal

(fonte: elaborado pelo autor)

4.6.1 Análise de multicolinearidade para o modelo de severidade de acidentes

A análise de multicolinearidade do modelo de severidade foi realizada de forma similar à dos modelos de frequência de acidentes, descrita no item 4.5.2. A diferença entre os procedimentos fica por conta do banco de dados utilizado que, no caso da modelagem da severidade, continha 675 entradas referentes aos próprios acidentes, e pelo conteúdo da variável dependente. O *software* utilizado foi o *SPSS Statistics*.

4.6.2 Estimação do modelo de severidade de acidentes

A modelagem da severidade de acidentes foi realizada de forma a identificar o impacto de cada variável selecionada sobre os diferentes níveis de gravidade definidos para a variável *severidade*. Para realização dessa modelagem, foi utilizado o *software* Biogeme (BIERLAIRE, 2003), no qual a variável *severidade* foi inserido como fator de escolha e as variáveis independentes representaram os parâmetros de escolha.

O modelo utilizado foi o Modelo *Logit* Multinomial (do inglês *Multinomial Logit Model* – MNL). Segundo Ortúzar e Willumsen (2011), os MNL constituem modelos de escolha discreta onde apenas uma alternativa é selecionada e a probabilidade de escolha de cada alternativa é determinada pela atratividade desta opção. A atratividade, por sua vez, é composta pelos atributos observáveis da alternativa (fatores de escolha, representados pelas

variáveis independentes selecionadas) e a escolha de uma alternativa acontece através da maximização de sua utilidade. A utilidade, segundo os autores, é representada pela função utilidade, onde uma parcela da função representa os fatores observáveis e a outra parcela representa os fatores não observáveis. A função utilidade (7) é definida como

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \quad (7)$$

Onde:

U_{iq} = utilidade da alternativa i para o indivíduo q ;

V_{iq} = vetor função dos atributos observáveis da alternativa i e do indivíduo q ;

ε_{iq} = componente aleatória que representa os atributos não observáveis.

Ortúzar e Willumsen (2011) definem o vetor de atributos (8) por

$$V_{iq} = \sum_{k=1}^k \theta_{kj} X_{jkq} \quad (8)$$

Onde:

X_{jkq} = atributos observáveis;

θ_{kj} = parâmetros estimados para as alternativas.

Desse modo, a probabilidade de escolha de uma determinada alternativa é representada por (9) (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011)

$$P(k) = \frac{e^{U_k}}{\sum_x e^{U_x}} \quad (9)$$

Onde:

$P(k)$ = probabilidade de escolha da alternativa k ;

k = alternativa selecionada;

x = alternativas concorrentes a k ;

U_x = utilidade da alternativa x .

Os MNL são os modelos de escolha discreta mais simples e práticos. Sua estimação é realizada através da escolha de uma alternativa de referência, à qual se atribui parâmetro de escolha 0, enquanto os determinados níveis são calculados em relação a esta referência. Os MNL seguem o princípio de independência de alternativas irrelevantes, segundo o qual a razão entre quaisquer duas probabilidades de escolha não nulas não é afetada por alternativas

adicionais existentes, e utiliza o princípio da máxima verossimilhança para estimar os parâmetros do modelo (DOMECICH; MCFADDEN, 1975; ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Desse modo, os MNL são capazes de identificar as influências que uma mesma variável exerce em diferentes níveis de escolha de forma independente, como por exemplo sua contribuição para os diferentes graus de severidade.

Para tornar possível a estimação da influência das variáveis sobre os diferentes níveis de severidade, foram criados “espelhos” das variáveis com a letra F ao final de seus nomes. Por exemplo: para as variáveis *auto* e *intersec*, foram criados os espelhos *autoF* e *intersecF*. Esses espelhos representam a influência das variáveis sobre o grau de severidade 3 (por isso a legenda “F” de “fatais”). Esse artifício tem o seguinte efeito: o *software* Biogeme interpretará que as variáveis “normais” são relativas ao grau de severidade 2, enquanto as variáveis “F” são relativas ao grau de severidade 3.

A estimação através do *software* Biogeme é feita através da inserção das funções de utilidade para cada nível de severidade por meio de arquivo de texto – semelhante a um código de programação – enquanto as informações agregadas por acidente são inseridas por planilha Excel. O grau da variável *severidade* igual a 1, referente ao nível menos grave de severidade, foi tomado como referência para estimação dos níveis de severidade 2 e 3. Dessa forma, ao grau *severidade* 1, foi atribuída função utilidade nula.

A cada estimação do modelo, o *software* retorna um arquivo de texto no qual é possível avaliar os valores p dos coeficientes estimados para as funções utilidade. A partir da utilização da técnica *backwards elimination*, torna-se possível remover os coeficientes que apresentam menor significância e gerar uma nova estimativa. Este processo iterativo repetiu-se até que todos os coeficientes do modelo apresentassem significância dentro de um nível de confiança de 95%.

4.6.3 Cálculo dos efeitos marginais do modelo de severidade de acidentes

Ao contrário do que ocorre nos modelos de regressão linear generalizados, nos modelos *logit* os coeficientes estimados, em um primeiro momento, fornecem apenas informações sobre o sentido da influência exercida, percebida através dos seus sinais. Desse modo, para se obter informações acerca da intensidade dessa influência – variável entre indivíduos e dependente do valor da variável independente – é necessário o cálculo dos

efeitos marginais. Os efeitos marginais permitem identificar a variação na probabilidade de ocorrência de acidentes em cada nível de severidade em função dos incrementos realizados em cada variável estimada (GREENE; HENSHER, 2009; GREENE, 2012). A soma dos efeitos marginais, assim como as probabilidades associadas à escolha dos diferentes níveis de severidade, tem soma igual a 1 (100%). Decorre disso que a cada aumento na probabilidade de ocorrência de um nível de severidade está associada a redução da probabilidade de ocorrência de todos os outros níveis.

Segundo Ortúzar e Willumsen (2011), as probabilidades nos modelos *logit* multinomiais são calculadas por (10)

$$P_n = \frac{e^{\beta x_n}}{e^{\beta x_n} + e^{\beta x_{n+1}} + e^{\beta x_{n+2}}} \quad (10)$$

Onde:

P_n = probabilidade de ocorrência da severidade n ;

β = valor da utilidade associado à observação;

x = observação da variável.

Os efeitos marginais, segundo os autores, é resultado da diferença de probabilidade de ocorrência em cada nível de severidade considerando os valores antes e após os incrementos. Os efeitos marginais são calculados por (11)

$$Ef_{n|x} = \frac{P_{n|(x+a)} - P_{n|x}}{a} \quad (11)$$

Onde:

$Ef_{n|x}$ = efeito marginal de severidade n causado pela variável x ;

a = incremento aplicado à variável;

$P_{n|(x+a)}$ = probabilidade da faixa de severidade n , com o incremento de a na variável x ;

$P_{n|x}$ = probabilidade da faixa de severidade n , sem o incremento de a na variável x .

Após a realização desse processo para cada nível de severidade, o efeito marginal médio de cada variável é calculado como a média de todos os valores marginais dos acidentes observados para respectiva variável.

5 RESULTADOS

Neste item, são apresentados os resultados obtidos a partir da realização das etapas descritas nos itens 4.2, 4.4 e 4.5.

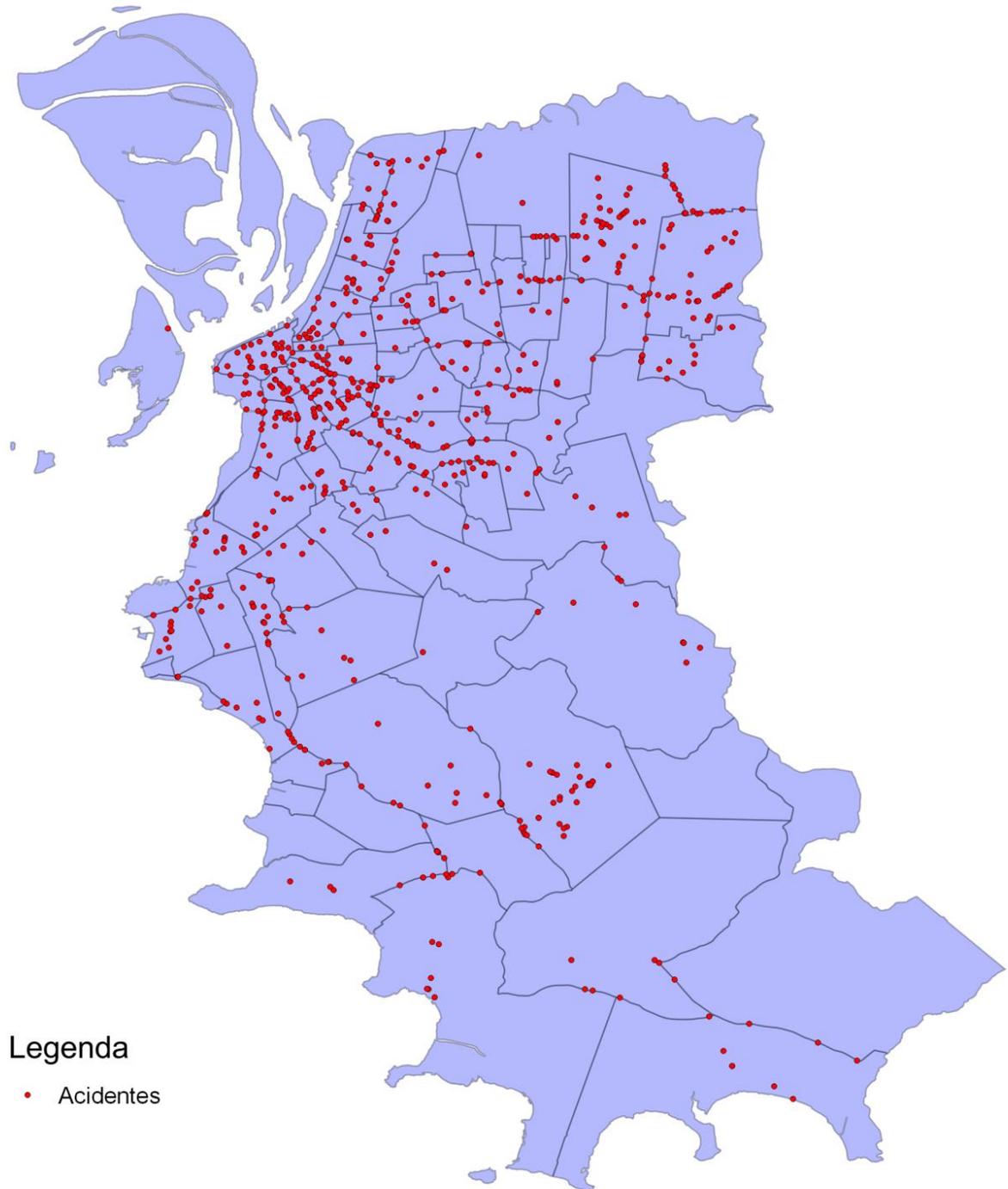
5.1 RESULTADO DA ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados de acidentes com bicicleta na cidade de Porto Alegre foram cedidos pela EPTC em uma planilha em formato *xlsx* (suportada pelo Microsoft Excel). O banco de dados contava com 2.392 registros de acidentes ocorridos no período entre 1º de janeiro de 2008 e 25 de maio de 2017. No entanto, devido à proposta de trabalho, foram filtrados os resultados compreendidos no período entre 1º de janeiro de 2012 e 31 de dezembro de 2014. Dessa forma, restaram 785 registros (32,8% do total de acidentes disponíveis).

Em um segundo momento, era necessário conferir as coordenadas que georreferenciariam esses pontos. Foram identificados 107 registros com problemas nas coordenadas, como informações incompletas ou inexistentes acerca da localização destes pontos. Após essa filtragem, obteve-se uma lista de 678 registros de acidentes, referente a 86,4% das 785 ocorrências do período estudado.

Uma análise mais cuidadosa sobre os dados restantes resultou na eliminação de mais 3 registros de acidentes. O primeiro foi retirado devido ao fato de que seu registro indicava um ponto na cidade metropolitana de Viamão, fora dos limites geográficos de Porto Alegre. Outro registro era de um acidente envolvendo bicicleta e carroça, de forma que se optou por eliminá-lo pelo mesmo não se enquadrar como dado componente de nenhuma das variáveis investigadas. O último registro foi eliminado por imprecisão, pois indicava acidente entre bicicleta e veículo cadastrado como “outro”. Por fim, restaram ao todo 675 registros de acidentes no banco de dados estudado. A distribuição espacial destes registros na base georreferenciada está representada na Figura 10.

Figura 10 – Mapa de localização dos acidentes investigados



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 RESULTADO DA DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

O Quadro 4 apresenta a síntese das variáveis criadas (especificadas a seguir), classificando-as em relação à dependência, tipo, unidade de agregação e fonte de obtenção.

Quadro 4 – Lista das variáveis investigadas, suas características e respectivas fontes

Variável	Unidade de mensuração	Tipo de variável	Unidade analisada	Fonte
> Dependente				
<i>acid_bici</i>	número de acidentes	discreta	bairro	EPTC - cedido
> Independente				
<i>Acidentalidade</i>				
auto	Envolvimento automóvel	<i>dummy</i>	acidente	EPTC - cedido
d_util	Dia útil	<i>dummy</i>	acidente	EPTC - cedido
local_acid	Cruzamento ou logradouro	<i>dummy</i>	acidente	EPTC - cedido
moto	Envolvimento motocicleta	<i>dummy</i>	acidente	EPTC - cedido
n_habil	Envolvimento não habilitado	<i>dummy</i>	acidente	EPTC - cedido
pesados	Envolvimento veic. Pesado	<i>dummy</i>	acidente	EPTC - cedido
tempo	Chuva ou seco	<i>dummy</i>	acidente	EPTC - cedido
turno	Dia ou noite	<i>dummy</i>	acidente	EPTC - cedido
vuln_bici	Envolvimento vulnerável	<i>dummy</i>	acidente	EPTC - cedido
<i>Estrutura Urbana</i>				
arterial	Proporção de vias arteriais (km/km)	contínua	bairro	EPTC - cedido
bikepoa	Nº de estações (nº/bairro)	discreta	bairro	DATAPOA
ciclovias	Proporção de vias exclusivas (km/km)	contínua	bairro	DATAPOA
comp_quadra	Comp. médio de quadra (m/segmento)	contínua	bairro	EPTC - cedido
contein	Nº de contêineres (nº/km)	contínua	bairro	DATAPOA
decliv	Proporção de rampas íngremes (km/km)	contínua	bairro	EPTC - cedido
dens_dom	Densidade de domicílios (dom./km ²)	contínua	bairro	IBGE
dens_pop	Densidade populacional (hab./km ²)	contínua	bairro	IBGE
intersec	Nº de interseções (nº/bairro)	discreta	bairro	EPTC - cedido
pto_bus	Nº de paradas de ônibus (nº/bairro)	discreta	bairro	EPTC - cedido
pto_taxi	Nº de pontos de táxi (nº/bairro)	discreta	bairro	DATAPOA
semáf	Nº de semáforos (nº/bairro)	discreta	bairro	EPTC - cedido
semáf_cruz	Prop. de semáf. em cruzamentos (nº/nº)	contínua	bairro	EPTC - cedido
<i>Socioeconômica</i>				
renda	Renda domiciliar média (R\$/dom.)	contínua	bairro	IBGE
<i>Uso do solo</i>				
dens_uds	Nº de estabelecimentos no bairro (nº estabelecimentos/km ²)	contínua	bairro	SMIC - livre acesso
div_uds	Índice de diversidade ou índice de entropia do bairro	contínua	bairro	SMIC - livre acesso

(fonte: elaborado pelo autor)

A variável *acid_bici* é proveniente do banco de dados de acidentes e denota o número de acidentes, dentro do período analisado e envolvendo ao menos um ciclista, contabilizados no bairro. É a variável de interesse (dependente) na modelagem da frequência de acidentes.

A variável *arterial* denota a proporção entre a extensão de vias arteriais de um bairro e a extensão viária total do respectivo bairro. Sua unidade de mensuração é km de via arterial/km total de vias no bairro.

A variável *auto* é proveniente do banco de dados de acidentes e denota o número de acidentes ciclovitários no qual esteve envolvido ao menos um automóvel. Foi obtida de forma binária, com o valor 1 significado que houve envolvimento de automóvel. Para efeitos de simplificação, foram contabilizados da mesma forma aqueles acidentes que envolveram veículos particulares ou em serviço (como, por exemplo, táxis).

A variável *bikepoa* denota o número de estações do serviço de compartilhamento de bicicleta da prefeitura que se encontram dentro da área dos respectivos bairros. De forma a compatibilizar os dados pesquisados, foram utilizadas as localizações das estações referentes ao mês de dezembro de 2014.

A variável *ciclovía* denota a proporção entre a extensão total de ciclovía de um bairro e a extensão total de vias no respectivo bairro. Ela indica a proporção de infraestrutura viária exclusiva para ciclistas dentro do bairro. No intuito de diminuir os ruídos devido à compatibilização das fontes, foram utilizados dados de ciclovias construídas até o ano de 2014. Sua unidade de mensuração é km de ciclovía/km total de vias no bairro.

A variável *comp_quadra* denota o comprimento médio de quadra de um bairro. É obtida através da relação da extensão viária total de um bairro e o número de segmentos viários no respectivo bairro. Sua unidade de mensuração é metros/segmento de via.

A variável *contein* denota o número de contêineres distribuídos por quilômetro de via de um bairro. É resultado da proporção entre o número total de contêineres de um bairro e a extensão viária total do respectivo bairro. Sua unidade de medida é número de contêineres/km de via no bairro.

A variável *d_util* é proveniente do banco de dados de acidentes e denota se uma determinada ocorrência aconteceu em dia útil ou não. Foi obtida de forma binária, com o

valor 1 indicando dia útil (período entre segunda-feira e sexta-feira). Para fins de refinamento, foram considerados dias não úteis os feriados nacionais e municipais. No entanto, não foram considerados eventos esporádicos como greves, espetáculos, etc.

A variável *decliv* denota a proporção de rampas consideradas muito íngremes para o tráfego cicloviário em um bairro e a extensão total de vias no respectivo bairro. Para fins de cálculo, foram considerados os valores absolutos de declividade – ou seja, trechos em aclive e declive – e selecionados aqueles que possuíam rampas com greide superior a 10%, com base no fator de dificuldade proposto por Berg (2015). Sua unidade de mensuração é km de rampa íngreme/km de via no bairro.

A variável *dens_uds* denota a densidade de uso do solo de um bairro. É obtida através da proporção entre o número de estabelecimentos que atraem ou geram viagens em um bairro e a área total do respectivo bairro. Foram considerados para cálculo desta variável o número de estabelecimentos comerciais, o número de estabelecimentos industriais, o número de espaços culturais, o número de estabelecimentos prestadores de serviço e o número de escolas. Sua unidade de mensuração é número de estabelecimentos atrativos/km² de bairro.

A variável *dens_dom* denota a densidade de domicílios em um bairro. É calculada através da proporção entre o número de domicílios em um bairro e a área total do respectivo bairro. Sua unidade de mensuração é número de domicílios/km² de bairro.

A variável *dens_pop* denota a densidade populacional de um bairro. É calculada através da proporção entre o número de habitantes em um bairro e a área total do respectivo bairro. Sua unidade de mensuração é número de habitantes/km² de bairro.

A variável *div_uds* denota a diversidade de ocupação e uso do solo de um bairro. Ela foi obtida através da metodologia descrita no item 3.11 e calculada pela equação (1).

A variável *intersec* denota o número de interseções existentes dentro de um bairro. Não houve diferenciação entre os diferentes tipos de interseção. Sua unidade de mensuração é número de interseções/bairro.

A variável *local_acid* é proveniente do banco de dados de acidentes e denota se uma determinada ocorrência aconteceu em uma área de interseção. Foi obtida de forma binária,

com o valor 1 significando área de interseção e 0 logradouro. Não houve diferenciação entre os diferentes tipos de interseção.

A variável *moto* é proveniente do banco de dados de acidentes e denota o número de acidentes ciclovitários no qual esteve envolvido ao menos uma motocicleta. Foi obtida de forma binária, com o valor 1 indicando envolvimento de motocicleta. Para efeitos de simplificação, foram contabilizados da mesma forma aqueles acidentes que envolveram veículos particulares ou em serviço (como, por exemplo, entregadores).

A variável *n_habil* é proveniente do banco de dados de acidentes e denota o número de acidentes ciclovitários no qual esteve envolvido ao menos um condutor de veículo motorizado sem habilitação para o mesmo. Foi obtida de forma binária, com o valor 1 indicado que o condutor estava sem permissão. Para fins de simplificação, não foram considerados os casos não informados e de habilitação não exigida.

A variável *pesados* é proveniente do banco de dados de acidentes e denota o número de acidentes ciclovitários no qual esteve envolvido ao menos um veículo motorizado de grande porte. Foi obtida de forma binária, com o valor 1 indicando envolvimento de veículo pesado. Para fins de simplificação, foram contabilizados de igual maneira os ônibus urbanos e interurbanos, os ônibus metropolitanos, as lotações e os caminhões.

A variável *pto_bus* denota o número de paradas de ônibus dentro de um bairro. Para fins de simplificação, não houve diferenciação entre as diferentes estruturas de paradas, como os corredores exclusivos, por exemplo.

A variável *pto_taxi* denota o número de pontos de táxi dentro de um bairro. Para fins de simplificação, não foi considerado se os pontos de táxi estavam próximos a infraestruturas ciclovitárias ou não.

A variável *renda* denota a renda média por unidade domiciliar em um bairro. Foi obtida através do Censo 2010. Sua unidade de mensuração é reais/domicílio no bairro.

A variável *semaf* denota o número de pontos semaforicos dentro de um bairro. Sua unidade de mensuração é número de semáforos/bairro.

A variável *semaf_cruz* denota o número de semáforos em um bairro que estão em área de interseção. É calculada pela proporção entre número de semáforos em cruzamentos de um

bairro e o número total de semáforos no respectivo bairro. Sua unidade de mensuração é número de semáforos em cruzamento/número total de semáforos no bairro.

A variável *tempo* é proveniente do banco de dados de acidentes e denota se uma ocorrência aconteceu sob tempo chuvoso. Foi obtida de forma binária, com o valor 1 indicando se o acidente aconteceu sob chuva. Para fins de simplificação, aqueles acidentes registrados sob a condição de tempo nublado receberam valor 0.

A variável *turno* é proveniente do banco de dados de acidentes e denota se uma ocorrência aconteceu de dia ou de noite. Foi obtida de forma binária, com o valor 1 indicando dia. Para fins de classificação, o período diurno considerado contemplou a janela entre as 6:00 e as 18:00.

A variável *vuln_bici* é proveniente do banco de dados e denota se houve envolvimento de ciclista vulnerável (jovens ou idosos) no acidente. Foi obtida de forma binária, com o valor 1 indicando que houve envolvimento de vulnerável. Para fins de classificação, foi utilizado o critério de classificação etária do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015) para jovens e idosos, sendo estes menores que 18 anos e maiores que 60 anos, respectivamente.

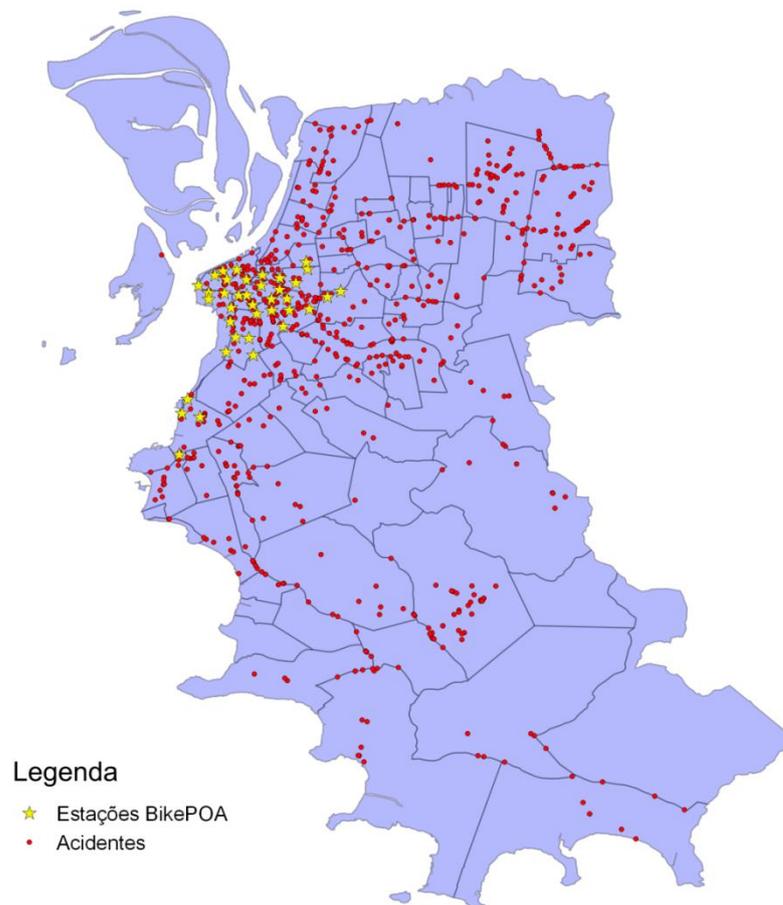
5.3 RESULTADO DA DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA

Para esse trabalho, foram avaliadas quatro possibilidades de definição das áreas de análise: (i) em torno das estações de compartilhamento de bicicletas; (ii) em torno dos próprios registros de acidentes; (iii) em torno das vias dedicadas ao tráfego cicloviário; e (iv) divisão da área de análise segundo os limites dos bairros de Porto Alegre.

- (i) A delimitação da área de análise em torno das estações de compartilhamento de bicicletas tornaria a análise incompleta, apesar de oferecerem uma perspectiva interessante para análise dos acidentes com bicicleta por englobarem uma área de suposto interesse para os usuários desse modo de transporte. Devido ao fato de que a implantação das estações BikePOA ainda está restrita às zonas centrais, o número de acidentes que não seriam considerados nas áreas de análise, mesmo utilizando raios extensos, seria muito

grande, prejudicando o objetivo do trabalho. Isso pode ser conferido na Figura 11, onde estão localizadas as estações e os acidentes;

Figura 11 – Distribuição dos acidentes e das estações de compartilhamento

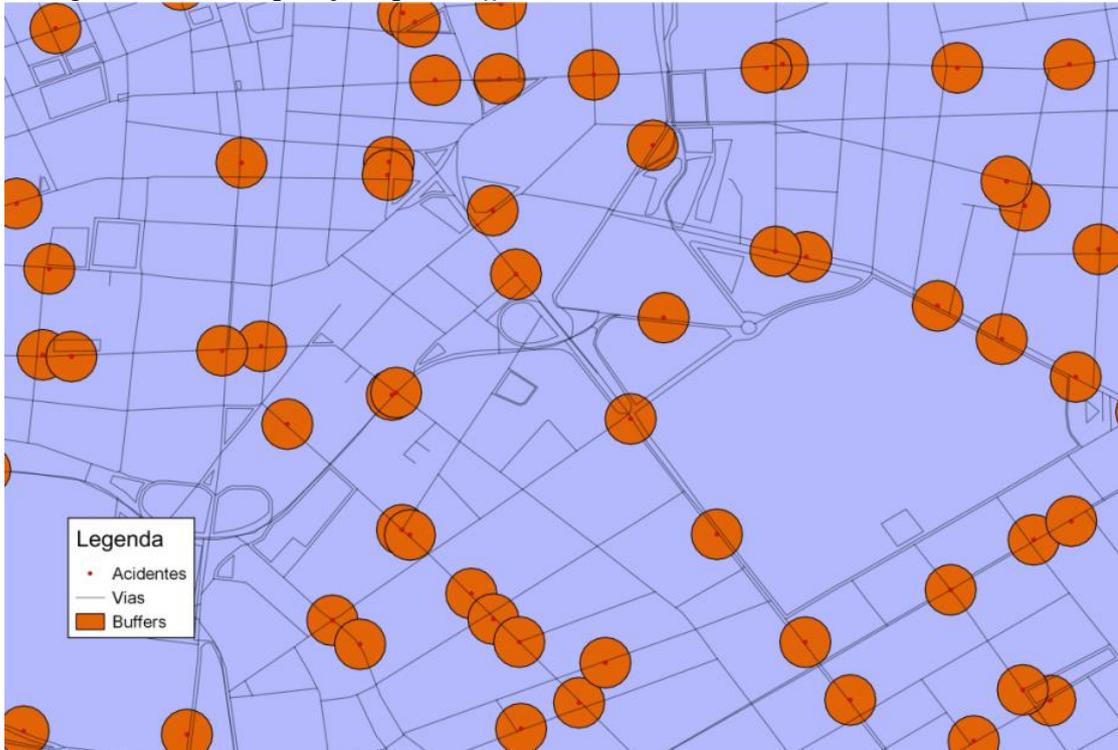


(fonte: elaborado pelo autor)

- (ii) Supõe-se que as áreas de análise em torno dos próprios acidentes seriam o de maior potencial na análise da influência dos elementos de estrutura urbana. No entanto, devido à concentração espacial dos acidentes de bicicleta verificada no estudo, constatou-se um alto número de sobreposições entre os *buffers*, mesmo para raios menores. Segundo Torres (2016), o raio da área de análise (*buffer ring*) de 150m tem o melhor desempenho no que diz respeito ao *trade-off* entre ajuste e qualidade do modelo de acidentes com pedestres. Intuitivamente, seria possível imaginar que a área de influência para modos mais rápidos, como a bicicleta, deveria apresentar raios maiores. A Figura 12 mostra, porém, que um

raio de 100m já produz grande número de sobreposições, o que traria prejuízo para a análise;

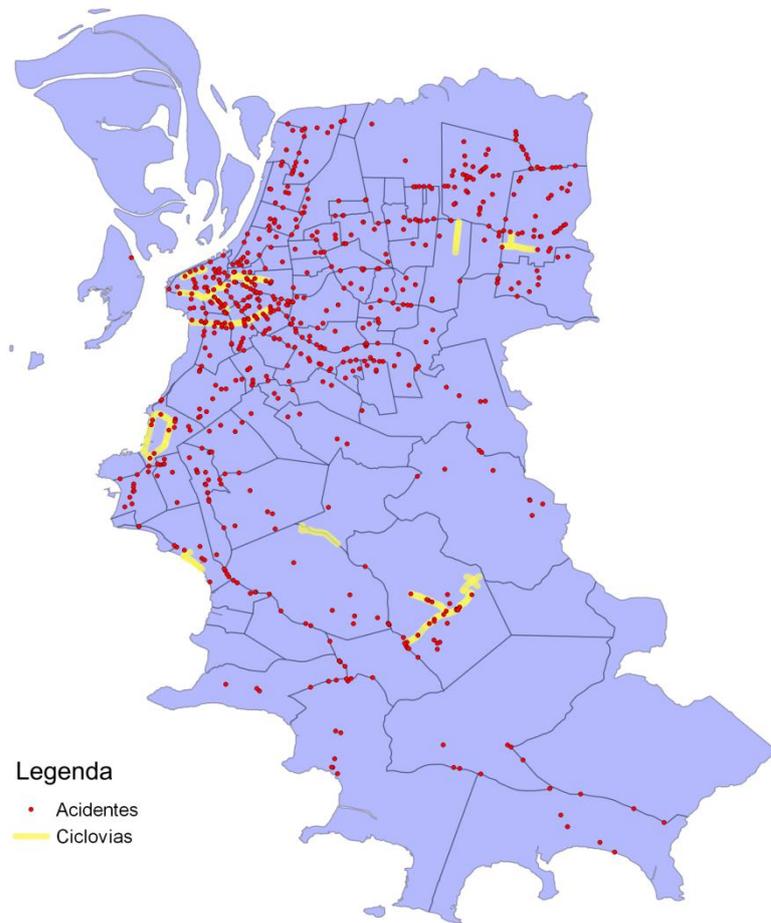
Figura 12 – Sobreposições para *buffer* com raio de 100m em torno dos acidentes



(fonte: elaborado pelo autor)

- (iii) Assim como os *buffers* em torno dos próprios acidentes, a opção de delimitar uma área de análise em torno das infraestruturas dedicadas à bicicleta (ciclovias, neste caso) seria interessante para avaliar a acidentalidade nestas áreas que concentram o fluxo ciclovário. No entanto, assim como ocorrido com a proposta de delimitação da área de análise em torno das estações de compartilhamento, essa alternativa foi frustrada devido ao curto alcance potencial destas áreas de análise. Haja vista que a cidade de Porto Alegre, em 2014, contava com poucos quilômetros construídos de ciclovia, a contagem de acidentes, assim como a construção do modelo, seriam prejudicadas. A distribuição das ciclovias e acidentes pode ser conferida na Figura 13;

Figura 13 – Distribuição dos acidentes e das infraestruturas cicloviárias no mapa



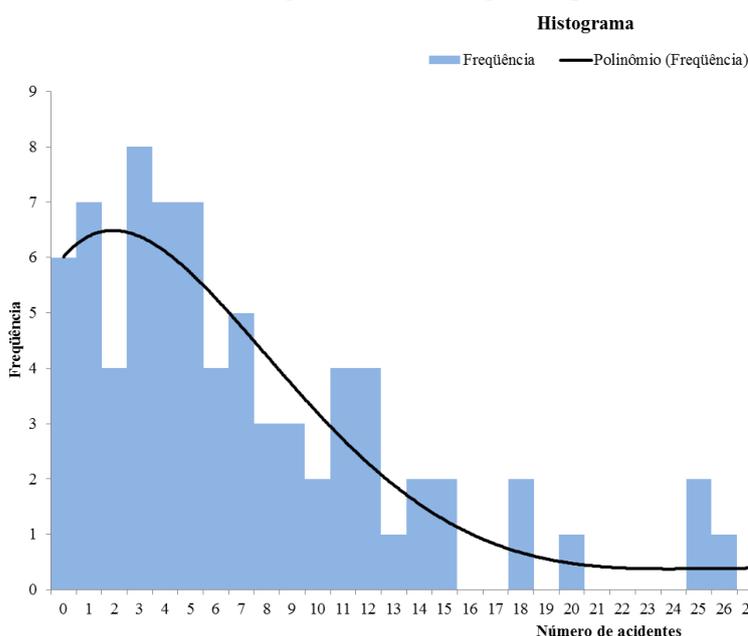
(fonte: elaborado pelo autor)

- (iv) Os *buffers* em formatos poligonais irregulares, segundo os limites dos bairros da cidade, foram os escolhidos para realizar as análises espaciais. Este formato possibilita o cruzamento dos dados de estrutura urbana e socioeconômicos de forma mais apropriada, apesar de não traduzir da forma mais fidedigna os padrões de uso do solo (por exemplo, todo o peso de um estabelecimento que atraia viagens e que esteja situado muito próximo à divisa entre dois bairros, terá todo seu peso contado apenas para um bairro, quando sabemos que esta influência se dá de forma mais diluída). Conquanto, outros trabalhos que investigaram a relação entre ambiente construído e acidentalidade já utilizaram os limites espaciais dos bairros como área de interesse, tendo obtido resultados satisfatórios (DUMBAUGH; RAE, 2009).

5.4 RESULTADO DA ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS

A análise de distribuição dos dados foi realizada através de histograma e gráfico Q-Q com auxílio do *software* Microsoft Excel. Após a agregação dos dados de acidentes por unidade de análise (bairro), foi gerado um gráfico de frequências, ilustrado na Figura 14. Ao contrário do que se observa no histograma de uma distribuição Normal, para a qual se espera um aspecto simétrico na distribuição das colunas, percebe-se que a distribuição dos dados dos acidentes investigados tem forte assimetria à esquerda.

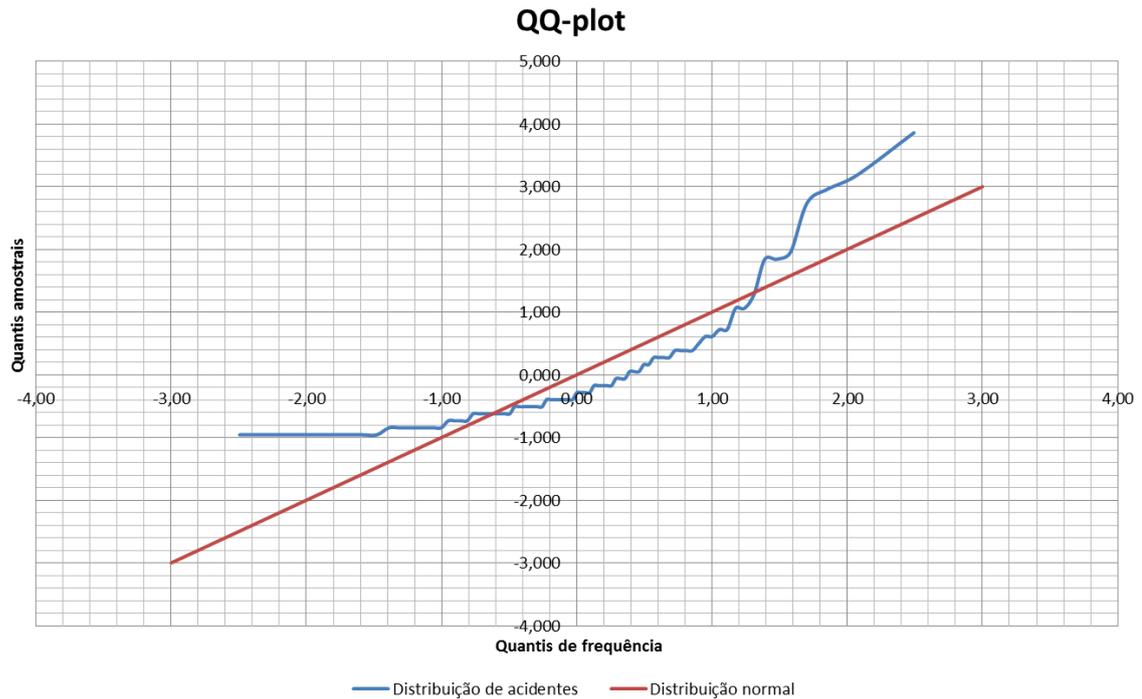
Figura 14 – Histograma para os dados de acidentes



(fonte: elaborado pelo autor)

Para corroborar os resultados obtidos através da análise do histograma, foi gerado um gráfico Q-Q, ilustrado na Figura 15. Assim como esperado, percebe-se que os dados utilizados estão distribuídos de forma assimétrica em torno da reta principal. A reta principal é uma referência cujo significado é a adequação a uma distribuição Normal.

Figura 15 – Gráfico Q-Q para os dados de acidentes



(fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos resultados obtidos através do histograma e do gráfico Q-Q, identifica-se o comportamento não-normal dos dados investigados. A observação desses resultados somada à identificação de grande disparidade entre a variância e a média do conjunto de dados embasou a decisão pela utilização do modelo Binomial Negativo.

Foram gerados relatórios estatístico-descritivos para os três conjuntos de dados da pesquisa, sintetizados nas Tabelas 1, 2 e 3.

Nas Tabelas 1 e 2, que dizem respeito aos modelos de frequência de acidentes, a análise é realizada para os dados agrupados segundo as áreas de interesse e, portanto, para a unidade de análise “bairro”.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas dos dados do modelo completo de frequência de acidentes

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
acid_bici	8,54	0	43	8,927
arterial	0,13	0,000	0,327	0,081
auto	6,11	0	26	6,030
bikepoa	0,48	0	6	1,290
ciclovia	0,00	0,000	0,002	0,000
comp_quadra	110,84	60,049	550,140	63,721
contein	0,70	0,000	8,311	1,843
d_util	6,47	0	33	7,044
decliv	0,00	0,000	0,027	0,005
dens_uds	787,42	0,943	6777,674	1104,584
dens_dom	2446,17	33,425	13055,263	2220,112
dens_pop	6795,69	163,333	30605,263	5292,383
div_uds	0,34	0,094	0,753	0,170
intersec	217,58	70	1705	273,533
local_acid	1,48	0	10	2,012
moto	1,14	0	13	2,194
n_habil	0,16	0	2	0,436
pesados	0,92	0	7	1,421
pto_bus	72,41	22	637	86,482
pto_taxi	4,67	0	47	6,791
renda	5701,55	770,10	18870,00	3916,479
semaf	18,20	0	78	18,014
semaf_cruz	0,49	0,00	1,00	0,277
tempo	0,14	0	1	0,348
turno	5,29	0	25	5,531
vuln_bici	1,67	0	11	2,217

(fonte: elaborado pelo autor)

É possível perceber que alguns dados apresentam limites mínimo e máximo demasiado dispersos, pois, devido às características muito diferentes de alguns bairros (unidade de análise) da cidade, alguns valores como renda, densidade de domicílios e pontos de ônibus comportam-se como se fossem *outliers*, situando-se muito distantes da média.

Tabela 2 – Estatísticas descritivas dos dados do modelo reduzido de frequência de acidentes

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
acid_bici	8,10	0	37	8,069
arterial	0,13	0,000	0,327	0,081
auto	5,92	0	26	5,824
bikepoa	0,49	0	6	1,297
ciclovia	0,00	0,000	0,002	0,000
comp_quadra	118,19	60,490	551,398	64,102
contein	0,71	0,000	8,311	1,854
d_util	6,14	0	33	6,456
decliv	0,00	0,000	0,027	0,053
dens_uds	797,14	0,943	6777,674	1108,329
dens_dom	2470,35	33,425	13055,263	2223,989
dens_pop	6868,94	163,333	30605,263	5286,179
div_uds	0,35	0,094	0,753	0,170
intersec	198,51	70	1183	216,080
local_acid	1,44	0	10	1,984
moto	0,99	0	9	1,739
n_habil	0,14	0	2	0,386
pesados	0,85	0	5	1,249
pto_bus	65,17	22	318	58,167
pto_taxi	4,63	0	47	6,825
renda	5710,96	770,10	18870,00	3940,930
semaf	17,55	0	78	17,169
semaf_cruz	0,49	0,00	1,00	0,279
tempo	0,13	0	1	0,336
turno	5,05	0	25	5,137
vuln_bici	1,58	0	11	2,067

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Tabela 3, referente ao modelo de severidade, os dados são analisados segundo as características agrupadas para cada acidente, portanto os acidentes são a unidade de análise.

Tabela 3 – Estatísticas descritivas os dados do modelo de severidade de acidentes

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
<i>severidade</i>	2,10	1	3	0,488
<i>arterial</i>	0,15	0,000	0,327	0,077
<i>auto</i>	0,72	0	1	0,451
<i>bikepoa</i>	0,87	0	6	1,745
<i>ciclovias</i>	0,00	0,000	0,002	0,000
<i>comp_quadra</i>	102,62	60,049	320,176	4,812
<i>contein</i>	0,94	0,000	8,311	1,950
<i>dia_util</i>	0,76	0	1	0,429
<i>decliv</i>	0,00	0,000	0,027	0,004
<i>dens_uds</i>	963,34	0,943	6777,674	1427,659
<i>dens_dom</i>	2782,63	33,425	13055,263	2377,157
<i>dens_pop</i>	7069,50	163,333	30605,263	5310,489
<i>div_uds</i>	0,32	0,094	0,753	0,182
<i>intersec</i>	317,95	70	1183	334,817
<i>local_acid</i>	0,17	0	1	0,379
<i>moto</i>	0,13	0	1	0,340
<i>n_habil</i>	0,02	0	1	0,138
<i>pesados</i>	0,11	0	1	0,311
<i>pto_bus</i>	99,35	22	318	81,848
<i>pto_taxi</i>	7,10	0	47	9,690
<i>renda</i>	4538,43	770,10	18870,00	3326,886
<i>semaf</i>	26,51	0	78	22,370
<i>semaf_cruz</i>	0,51	0,00	1,00	0,248
<i>tempo</i>	0,02	0	1	0,127
<i>turno</i>	0,62	0	1	0,486
<i>vuln_bici</i>	0,20	0	1	0,397

(fonte: elaborado pelo autor)

5.5 RESULTADO DA ANÁLISE DE MULTICOLINEARIDADE DO MODELO COMPLETO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES

A análise de multicolinearidade foi realizada através da avaliação do parâmetro VIF para o conjunto de dados agrupados nos bairros. Os resultados dessa análise podem ser conferidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de VIF para o modelo completo de frequência de acidentes

Variável	Estatísticas de multicolinearidade			
	Regressão inicial		Regressão final	
	Tolerância	VIF	Tolerância	VIF
<i>arterial</i>	0,41	2,43	0,43	2,33
<i>auto</i>	0,03	29,79	0,12	8,45
<i>bikepoa</i>	0,19	5,31	0,20	4,92
<i>ciclovia</i>	0,28	3,53	0,31	3,21
<i>comp_quadra</i>	0,42	2,38	0,46	2,17
<i>contein</i>	0,23	4,32	0,27	3,66
<i>d_util</i>	0,02	62,05	-	-
<i>decliv</i>	0,59	1,69	0,63	1,58
<i>dens_uds</i>	0,13	7,45	0,13	7,43
<i>dens_dom</i>	0,03	34,66	-	-
<i>dens_pop</i>	0,03	29,07	0,19	5,27
<i>div_uds</i>	0,27	3,73	0,28	3,58
<i>intersec</i>	0,07	13,43	-	-
<i>local_acid</i>	0,27	3,72	0,29	3,51
<i>moto</i>	0,10	9,80	0,23	4,31
<i>n_habil</i>	0,28	3,63	0,28	3,56
<i>pesados</i>	0,16	6,22	0,34	2,92
<i>pto_bus</i>	0,10	9,71	0,19	5,32
<i>pto_taxi</i>	0,10	9,70	0,11	9,17
<i>renda</i>	0,56	1,77	0,61	1,64
<i>semaf</i>	0,13	7,82	0,16	6,24
<i>semaf_cruz</i>	0,48	2,08	0,50	2,01
<i>tempo</i>	0,70	1,43	0,75	1,34
<i>turno</i>	0,05	20,46	-	-
<i>vuln_bici</i>	0,11	8,90	0,14	7,39

(fonte: elaborado pelo autor)

Na primeira avaliação, as variáveis *auto*, *d_util*, *dens_dom*, *dens_pop*, *intersec* e *turno* apresentaram valores de VIF maiores do que 10. A análise dos índices de correlação permitiu inferir que os pares de variáveis *dens_dom* x *dens_pop* e *auto* x *d_util* apresentavam alto grau de correlação. A primeira relação pode ser explicada intuitivamente, já que uma maior concentração de domicílios está relacionada com uma maior concentração de habitantes. Já a segunda relação explica-se pelo fato de que, tendo em vista que a variável *auto* diz respeito à frota de veículos particulares e de serviço, seja esperado um maior volume de automóveis em dias úteis, em função do deslocamento rotineiro dos habitantes. Foi feita a opção de manter as variáveis *dens_pop* e *auto* dada a relevância dessas variáveis em relação à acidentalidade.

Em uma segunda avaliação, dentre as variáveis que ainda apresentaram VIF maiores do que 10, foram identificados valores de correlação altos entre os pares *intersec* x *pto_bus* e *moto* x *turno*. A primeira relação é explanada por Andersen *et al.* (2012), que afirma que as paradas de ônibus não devem ser instaladas próximas aos cruzamentos. Os autores explicam que os ônibus em espera afetam a segurança dos ciclistas tornando-os menos visíveis para os outros veículos na via. Além disso, ciclistas estacionados, esperando para realizar a travessia, podem afetar as operações de embarque e desembarque ou perder a atenção durante a travessia conferindo se há ônibus às suas costas. Já para a correlação entre *moto* e *turno*, não foram encontradas evidências diretas na literatura. Conquanto, é possível afirmar que esta relação é esperada, haja vista o maior volume de motocicletas transitando nas vias durante os períodos diurno e vespertino, em comparação aos horários noturnos, devido às atividades rotineiras da população nas áreas urbanas. Desse modo, por haver já outras variáveis que avaliavam de forma indireta o risco nas interseções, optou-se por manter a variável *pto_bus* e a variável *moto*. As variáveis removidas do modelo foram: *d_util*, *dens_dom*, *intersec* e *turno*, restando outras 21 variáveis.

5.6 RESULTADO DA ESTIMAÇÃO DO MODELO COMPLETO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES

O modelo de frequência de acidentes totais foi obtido através da aplicação das ferramentas de análise de modelos lineares generalizados do SPSS Statistics 19, no qual é possível escolher a opção de distribuição Binomial Negativa com a função de ligação Gamma. Em seguida, foram analisados os valores p referentes a cada variável, dos quais se apontava o maior deles. A técnica de *backwards elimination* foi então utilizada, de forma que após a eliminação da variável de maior valor p, um novo modelo era gerado. O processo foi repetido iterativamente com o objetivo de que restassem no modelo apenas variáveis com um nível de confiança acima de 95%. Ao fim da modelagem, as únicas variáveis significativas foram *auto* e *arterial* que, apesar de não estar dentro do intervalo de confiança estabelecido, tem valor p estatisticamente aceitável. O modelo de frequência de acidentes está resumido na Tabela 5.

Tabela 5 – Modelo de frequência de acidentes

Variável	Coefficiente Beta	Qui-quadrado de Wald	valor p
<i>(Intercepto)</i>	0,572	4,204	0,040
<i>arterial</i>	2,756	2,468	0,116
<i>auto</i>	0,134	30,503	0,000
Critérios de ajuste			
	<i>AIC</i>	457,260	
	<i>BIC</i>	464,370	

(fonte: elaborado pelo autor)

A metodologia aplicada resultou num modelo de frequência de acidentes composto por duas variáveis significativas em níveis de confiança distintos. A variável *arterial* (valor p = 0,116), cujo significado é a proporção entre as vias arteriais e as vias totais dentro de um bairro, e a variável *auto* (valor p = 0,000), que representa os acidentes de bicicleta nos quais houve envolvimento de ao menos um veículo automotor, compõem o modelo completo. O modelo completo de frequência de acidentes é ilustrado pela equação:

$$acid_bici = 0,572 + 2,756 \times arterial + 0,134 \times auto$$

Onde: a representação de cada variável pode ser encontrada no Quadro 4.

Dumbaugh e Rae (2009) identificaram que vias arteriais contribuem para o aumento da frequência e severidade dos acidentes, conclusão corroborada por outros autores (ZAHABI *et al.*, 2011; DUMBAUGH; LI; JOH, 2013; FUENTES; HERNANDEZ, 2013). As vias arteriais comportam maiores volumes de tráfego motorizado devido às suas dimensões, além de permitirem o desenvolvimento de velocidades mais altas. De acordo com o Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997), a velocidade sugerida para as vias arteriais é de 60km/h, valor incompatível com a velocidade média desenvolvida por um ciclista, que é de 12km/h. Segundo a Organização Mundial de Saúde (WHO, 2015), velocidades altas estão diretamente relacionadas à frequência e severidade de acidentes, principalmente quando há usuários vulneráveis envolvidos na ocorrência. Os autores apresentam ainda evidências empíricas de que a mobilidade orientada aos automóveis atua de maneira a reduzir a segurança viária. O que se observa é que o aumento das condições de fluidez para o tráfego motorizado resulta em maiores taxas de acidentes para os usuários de transporte ativo, que são mais vulneráveis.

Outro aspecto relevante sobre a variável *auto* diz respeito ao registro de acidentes com bicicletas. Acidentes envolvendo veículos motorizados e ciclistas tendem a apresentar graus

de severidade médio ou alto. Por outro lado, as ocorrências de acidentes com bicicleta apresentam altas taxas de sub-registro devido ao fato de que, normalmente, os ciclistas não fazem o Boletim de Ocorrência para acidentes sem danos ou com pequenas lesões. Dessa forma, cria-se um viés na análise desses registros, que ficam inflacionados sob o ponto de vista da existência ou não de relação entre a ocorrência e o envolvimento de automóveis (BARROS *et al.*, 2003; BACCHIERI *et al.*, 2005). Esta suposição ganha corpo ao considerarmos que esta variável apresentou, na primeira avaliação da multicolinearidade, valor VIF acima de 10 e permaneceu no conjunto de variáveis investigadas, o que pode ter influenciado a estimativa dos coeficientes.

5.7 RESULTADO DO CÁLCULO DOS EFEITOS MARGINAIS DO MODELO COMPLETO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES

Após a estimação do modelo completo de frequência de acidentes, foram calculados os efeitos marginais das variáveis presentes no modelo. Estes resultados aparecem na Tabela 6.

Tabela 6 – Efeitos marginais para o modelo completo de frequência de acidentes

Variável	Valor do coeficiente	Incremento	Tipo de variável	Efeito marginal
<i>arterial</i>	2,756	0,013	contínua	27,29
<i>auto</i>	0,134	1	<i>dummy</i>	1,39
<i>Constante</i>	0,572			

(fonte: elaborado pelo autor)

O incremento dos efeitos marginais foram função do tipo de variável. Para *arterial*, o incremento teve valor igual a 10% da média dos valores dessa variável relativos a cada acidente. Já para *auto*, do tipo *dummy*, o incremento foi igual a 1.

O cálculo dos efeitos marginais do modelo completo de frequência de acidentes obteve valores de 27.29 e 1,39 para os efeitos das variáveis *arterial* e *auto*, respectivamente. Observando o incremento da variável *arterial* (0,013), é possível inferir que, de acordo com esses resultados, o aumento de 1,3% na proporção de vias arteriais em relação à malha viária de um bairro resulta na probabilidade de ocorrência de 27 acidentes envolvendo ciclistas nessa área. Essa conclusão encontra amparo na literatura revisada, a qual associa as vias artérias à frequência e severidade dos acidentes cicloviários, e reforça a importância do

planejamento do desenho urbano para promoção da segurança viária, sendo desejável evitar que as rotas cicláveis coincidam com vias dessa hierarquia.

5.8 RESULTADO DA ANÁLISE DE MULTICOLINEARIDADE DO MODELO REDUZIDO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES

A análise de multicolinearidade do modelo de frequência de acidentes sem a zona indefinida foi realizado através dos mesmos procedimentos que o modelo completo. Antes disso, foi verificado se a exclusão dos dados referentes à ZI alterava o tipo de distribuição dos dados, mas não se observou alteração substancial no histograma e no gráfico Q-Q. A Tabela 7 demonstra os valores encontrados para as verificações dos valores de VIF das variáveis para esse modelo.

Apesar de, na primeira avaliação, as mesmas variáveis – em relação ao modelo completo – terem acusado valores de VIF superiores a 10, ao final do processo, foram eliminadas as variáveis: *auto*, *d_util*, *dens_dom* e *turno*. Chama a atenção desde esse momento a eliminação da variável *auto* para este modelo desde a etapa de verificação de multicolinearidade, enquanto no modelo completo ela foi a variável de maior significância.

Tabela 7 – Valores de VIF para o modelo reduzido de frequência de acidentes

Variável	Estatísticas de colinearidade			
	Regressão inicial		Regressão final	
	Tolerância	VIF	Tolerância	VIF
arterial	0,41	2,46	0,42	2,37
auto	0,02	42,26	-	-
bikepoa	0,19	5,40	0,20	4,89
ciclovía	0,28	3,59	0,31	3,19
comp_quadra	0,42	2,38	0,45	2,24
contein	0,23	4,41	0,27	3,65
d_util	0,02	58,59	-	-
decliv	0,59	1,69	0,67	1,49
dens_uds	0,14	7,40	0,14	7,36
dens_dom	0,03	35,42	-	-
dens_pop	0,03	30,13	0,18	5,41
div_uds	0,22	4,57	0,25	3,94
intersec	0,12	8,31	0,14	7,15
local_acid	0,26	3,91	0,40	2,52
moto	0,16	6,23	0,35	2,86
n_habil	0,35	2,86	0,36	2,79
pesados	0,21	4,83	0,36	2,75
pto_bus	0,10	9,70	0,14	7,21
pto_taxi	0,10	9,71	0,10	9,71
renda	0,49	2,02	0,57	1,75
semaf	0,12	8,02	0,17	5,80
semaf_cruz	0,45	2,20	0,50	1,98
tempo	0,72	1,38	0,79	1,26
turno	0,06	17,93	-	-
vuln_bici	0,13	7,66	0,24	4,16

(fonte: elaborado pelo autor)

5.9 RESULTADO DA ESTIMAÇÃO DO MODELO REDUZIDO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES

A exclusão da Zona Indeterminada do banco de dados de acidentes resultou na eliminação de 43 ocorrências, ou seja, 6,4% dos registros, que eram aqueles acidentes situados na área roxa da Figura 9. O processo iterativo para obtenção do modelo final foi igual ao utilizado para o modelo completo. O modelo final apresentou as variáveis *arterial*, *local_acid* e *vuln_bici*, todas significativas a um nível de confiança de 95%. Apenas o

coeficiente beta não demonstrou valor p significativo a um nível de confiança de 80%. O resultado está sintetizado na Tabela 8.

Tabela 8 – Modelo reduzido de frequência de acidentes

Variável	Coeficiente Beta	Qui-quadrado de Wald	valor p
<i>(Intercepto)</i>	0,378	1,603	0,205
<i>arterial</i>	4,608	7,226	0,007
<i>local_acid</i>	0,209	9,063	0,003
<i>vuln_bici</i>	0,284	18,806	0,000
Critérios de ajuste			
	<i>AIC</i>	451,170	
	<i>BIC</i>	460,600	

(fonte: elaborado pelo autor)

Durante o processo iterativo de construção do modelo reduzido, foi observado que na simulação imediatamente anterior a que resultou no modelo final, a variável *pto_bus* aparecia com um valor p igual a 0.141, ou seja, poderia ser considerada significativa a um nível de 86% de confiança. Esse resultado parcial está demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado parcial do modelo reduzido de frequência de acidentes

Variável	Coeficiente Beta	Qui-quadrado de Wald	valor p
<i>(Intercepto)</i>	0,205	0,416	0,519
<i>arterial</i>	4,883	7,907	0,005
<i>local_acid</i>	0,183	6,657	0,010
<i>pto_bus</i>	0,004	2,171	0,141
<i>vuln_bici</i>	0,200	5,893	0,015
Critérios de ajuste			
	<i>AIC</i>	450,830	
	<i>BIC</i>	462,610	

(fonte: elaborado pelo autor)

A metodologia aplicada resultou num modelo de frequência de acidentes composto por três variáveis significativas com nível de confiança a 95%. A variável *arterial* (valor p = 0.007), a variável *local_acid* (valor p = 0.003), que indica se o acidente aconteceu em uma interseção, e a variável *vuln_bici* (valor p = 0,000), que indica se houve pelo menos um ciclista situado fora da faixa etária entre 18 e 60 anos envolvido no acidente, compõem o modelo, como indicado na Tabela 8.

O modelo reduzido de frequência de acidentes é ilustrado pela equação:

$$acid_bici = 0,205 + 4,883 \times arterial + 0,183 \times local_acid + \\ +0,004 \times pto_bus + 0,2 \times vuln_bici$$

Onde: a representação de cada variável pode ser encontrada no Quadro 4.

A variável *arterial* aparece neste modelo reduzido assim como figurou no modelo completo. Isso indica que a presença de vias de maior hierarquia podem trazer maior risco para os usuários de bicicleta, contribuindo para a ocorrência de acidentes. Nessas vias, a velocidade relativa entre ciclistas e veículos motorizados é mais acentuada, o que incorre em risco para os usuários de bicicleta.

O sinal positivo da variável *local_acid* indica que as áreas no entorno de interseções são mais suscetíveis à ocorrência de acidentes ciclovitários, ou seja, há maiores chances de ocorrências nos cruzamentos. A revisão da literatura, especificamente o exposto no item 3.8, demonstrara que as áreas de interseção podem contribuir de diferentes formas para a acidentalidade. Ao mesmo tempo em que a presença de cruzamentos aumenta as possibilidades de conflito entre os diferentes usuários da via, as malhas viárias mais densas tendem a reduzir o comprimento médio de quadra e, por conseguinte, as velocidades desenvolvidas nestas áreas. É possível supor que o desempenho agregador de risco dessa variável, dentro do cenário de análise do trabalho, seja explicado por um comportamento menos defensivo observado no trânsito nos países em desenvolvimento, o que aumenta o potencial de ocorrência de acidentes nas interseções.

A variável *vuln_bici* tem contribuição positiva (sinal positivo) para a frequência de acidentes, ou seja, tende a aumentar a probabilidade de ocorrência de acidente. Isso pode ser explicado pela maior exposição ao risco verificada nos usuários jovens ou pelo menor reflexo e vigor físico observado nos usuários mais idosos. De acordo com a literatura revisada, o envolvimento de usuários vulneráveis está relacionado a um maior risco de atropelamento e de ocorrência de acidentes fatais (DUMBAUGH; LI; JOH, 2013).

5.10 RESULTADO DO CÁLCULO DOS EFEITOS MARGINAIS DO MODELO REDUZIDO DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES

Os efeitos marginais também foram calculados para o modelo reduzido de frequência de acidentes, de forma igual ao que foi realizado para o modelo completo. Os resultados, sintetizados na Tabela 10.

Tabela 10 – Efeitos marginais para o modelo reduzido de frequência de acidentes

Variável	Valor do coeficiente	Incremento	Tipo de variável	Efeito marginal
<i>arterial</i>	4,608	0,013	contínua	43,03
<i>local_acid</i>	0,209	1	<i>dummy</i>	2,10
<i>vuln_bici</i>	0,284	1	<i>dummy</i>	2,97
<i>Constante</i>	0,378			

(fonte: elaborado pelo autor)

Os efeitos marginais calculados para as variáveis significativas do modelo reduzido de frequência de acidentes tiveram valores de 43,03, 2,10 e 2,97 para as variáveis *arterial*, *local_acid* e *vuln_bici*, respectivamente. Esse resultado não está alinhado com o que afirma a teoria da causalidade proposta por Treat *et al.* (1979), segundo a qual os acidentes podem ser analisados através dos três componentes dos sistemas de trânsito – o veículo, a via e o usuário –, sendo este último o fator mais relevante para um acidente. Esta teoria está ilustrada na Figura 5.

A análise dos coeficientes do modelo reduzido de frequência de acidentes, aliados aos resultados obtidos para os coeficientes marginais desse mesmo modelo, revelam que o impacto dos aspectos viário-ambientais – representados, nesse caso, pelas variáveis *arterial* e *local_acid* – sobre a acidentalidade ciclovária é maior do que o impacto observado para os fatores humanos. Esses resultados podem indicar a necessidade de revisão da teoria, cujo pressuposto pode não refletir a real contribuição de cada fator para os acidentes com bicicleta.

5.11 RESULTADO DA COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE FREQUÊNCIA DE ACIDENTES

Os modelos completo e reduzido de frequências de acidentes foram avaliados segundo os critérios AIC e BIC. Os parâmetros dos critérios foram calculados através do *software*

SPSS Statistics 19. A Tabela 11 sintetiza os dados comparados, incluindo nesta comparação o modelo reduzido de frequência de acidentes explicado no item 5.7.

Tabela 11 – Comparação entre modelos completo e reduzido de frequência de acidentes

Modelo	AIC	BIC
Completo de frequência de acidentes	457,26	464,37
Reduzido de frequência de acidentes	451,17	460,6
Reduzido parcial de frequência de acidentes	450,83	462,61

(fonte: elaborado pelo autor)

Como os critérios AIC e BIC são do tipo “menor é melhor”, os valores encontrados indicam que os melhores ajustes estão nos modelos reduzidos de frequência de acidentes. Esse resultado pode indicar que a exclusão das Zona Indefinidas do cenário estudado foi benéfica para a precisão do modelo de frequência de acidentes, devido à possíveis distorções causadas pela indevida agregação de dados heterogêneos relativas à essa área.

5.12 RESULTADO DA ANÁLISE DE MULTICOLINEARIDADE DO MODELO DE SEVERIDADE DE ACIDENTES

A análise de multicolinearidade do modelo de severidade de acidentes foi realizado através dos mesmos procedimentos que os modelos de frequência de acidentes. A Tabela 12 demonstra os valores encontrados para as verificações dos valores de VIF das variáveis para esse modelo.

Tabela 12 – Valores de VIF para o modelo de severidade de acidentes

Variável	Estatísticas de colinearidade			
	Regressão inicial		Regressão final	
	Tolerância	VIF	Tolerância	VIF
arterial	0,36	2,77	0,39	2,57
auto	0,23	4,40	0,23	4,36
bikepoa	0,26	3,83	0,43	2,31
comp_quadra	0,53	1,87	0,68	1,47
contein	0,20	4,96	0,22	4,48
dia_util	0,96	1,04	0,97	1,03
decliv	0,73	1,36	0,85	1,17
dens_uds	0,09	11,55	0,15	6,52
dens_dom	0,10	10,08	-	-
dens_pop	0,09	10,84	0,29	3,49
div_uds	0,15	6,67	0,16	6,28
intersec	0,16	6,39	0,33	3,00
local_acid	0,89	1,13	0,89	1,12
moto	0,30	3,35	0,30	3,33
n_habil	0,88	1,13	0,88	1,13
pesados	0,36	2,81	0,36	2,79
pto_bus	0,08	11,85	-	-
pto_taxi	0,07	14,18	-	-
renda	0,36	2,80	0,43	2,32
semaf	0,12	8,01	0,31	3,23
semaf_cruz	0,37	2,68	0,44	2,28
tempo	0,98	1,03	0,98	1,02
turno	0,92	1,08	0,94	1,06
vuln_bici	0,91	1,09	0,92	1,09

(fonte: elaborado pelo autor)

Durante as avaliações estatísticas, o *software* SPSS Statistics exibiu o mesmo aviso para cada iteração: “Avertência: Para os modelos com variável dependente severidade, as seguintes variáveis são constantes ou possuem correlações omissos : *ciclovía*. Eles serão excluídos da análise”. Desse modo, a variável *ciclovía* não foi considerada no modelo de severidade de acidentes.

Ao fim da análise de multicolinearidade, foram eliminadas as variáveis *dens_dom*, *pto_bus* e *pto_taxi*. Todas as outras variáveis restantes apresentaram valores de VIF menores do que 10 e compuseram o modelo de severidade de acidentes.

5.13 RESULTADO DA ESTIMAÇÃO DO MODELO DE SEVERIDADE DE ACIDENTES

O MNL resultante da estimação do modelo de severidade de acidentes apresentou 18 variáveis significativas a um nível de confiança de 95%. Essas variáveis e seus respectivos coeficientes e valor p estão sintetizados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores dos coeficientes do modelo de severidade de acidentes

Variável	Valor do coeficiente	Valor p
<i>arterial</i>	-4,140	0,02
<i>auto</i>	0,793	0,03
<i>autoF</i>	-1,440	0,00
<i>comp_quadraF</i>	-0,091	0,00
<i>dens_pop</i>	-0,0001	0,05
<i>dens_popF</i>	-0,0001	0,01
<i>dia_utilF</i>	-0,803	0,00
<i>intersecF</i>	-0,001	0,00
<i>local_acid</i>	-5,350	0,00
<i>local_acidF</i>	23,70	0,00
<i>moto</i>	1,550	0,02
<i>motoF</i>	-1,280	0,03
<i>pesadosF</i>	-1,860	0,00
<i>semaf</i>	0,022	0,00
<i>semafF</i>	0,013	0,02
<i>semaf_cruzF</i>	-0,777	0,04
<i>turnoF</i>	-0,507	0,00
<i>vuln_bici</i>	1,290	0,02
<i>Constante</i>	1,920	0,00
<i>ConstanteF</i>	-7,200	0,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Das 18 variáveis significativas para a estimação da severidade de acidentes, 7 foram relativas à severidade 2 (acidentes com ferimentos) e outras 11 foram referentes ao nível de severidade 3 (acidentes com vítimas). A análise dos resultados dos coeficientes é facilitada pela observação do Quadro 5. Nele, a coluna da esquerda representa a influência das variáveis sobre o grau de severidade 2, enquanto a da direita corresponde ao grau de severidade 3. Na linha superior, estão as variáveis com sinal positivo, ou seja, que contribuem para o aumento da severidade dos graus 2 e 3, enquanto a linha inferior diz respeito às variáveis que contribuem para não ocorrência destes graus de severidade. As variáveis *dens_pop* e *intersec*, devido aos seus coeficientes muito baixos (0,0001), não foram inseridas no Quadro.

Quadro 5 – Contribuição das variáveis sobre os graus de severidade 2 e 3

	Severidade 2 (feridos)	Severidade 3 (fatais)
Aumenta (+)	<p>auto moto semaf vuln_bici</p>	<p>local_acid semaf</p>
Diminui (-)	<p>arterial local_acid</p>	<p>auto comp_quadra dia_util moto pesados semaf_cruz turno</p>

(fonte: elaborado pelo autor)

Dentre as variáveis que diziam respeito ao nível de severidade 2, as que apresentaram sinal positivo, ou seja, que atuam no sentido de aumentar a probabilidade de ocorrência de um acidente com feridos, foram as variáveis *auto*, *moto*, *semaf* e *vuln_bici*. Nesse grupo identifica-se a presença de duas variáveis relativas a modos motorizados de transporte, uma variável referente a elemento de estrutura urbana e uma variável ligada a um fator socioeconômico. É possível interpretar esse resultado como um indicativo da dificuldade em modelar e prever a severidade de acidentes: esse fenômeno emerge da interação de diversos fatores de naturezas diferentes e nem sempre é possível interpreta-los e investiga-los de forma independente (ELVIK, 2006; DUMBAUGH; ERA. 2009; ZAHABI *et al.*, 2011).

Nas variáveis relacionadas ao grau de severidade 3, aquelas que apresentaram sinal positivo foram *local_acid* e *semaf*. A variável *local_acid* traduz a ocorrência de acidentes em interseções, áreas que oferecem alto risco de ocorrência de acidentes graves para o tráfego cicloviário (SENÇO, 2008; ANDERSEN *et al.*, 2012; AL-GHAMDI, 2013). O sinal da variável *semaf* é, num primeiro momento, inesperado, pois representa o número de semáforos na área de ocorrência do acidente analisado. Portanto, como esses dispositivos são usados para controle da velocidade e dos fluxos, intuitivamente a variável deveria contribuir para diminuição da ocorrência de acidentes de alta gravidade. Uma interpretação possível para este resultado pode ser a ocorrência de atropelamentos de ciclistas na aproximação das áreas semaforizadas, onde há risco dos automóveis atingi-los por trás devido à diferença da ação de

frenagem entre eles (ANDERSEN *et al.*, 2012). Além disso, segundo Córdova Júnior e Nodari (2014), observa-se, em Porto Alegre, um comportamento imprudente por parte dos ciclistas, cuja reação, muitas vezes, é de ignorar a sinalização semafórica. Portanto, frente a essas evidências, é possível afirmar que a contrariedade do resultado do sinal da variável *semaf* com a literatura revisada é, de certa forma, esperada, por conta do cenário estudado, já que o desrespeito às leis de trânsito e à sinalização é, de modo geral, mais observada em países em desenvolvimento.

A análise do Quadro 5 apresenta resultados que condizentes com a literatura revisada, bem como oferece contrapontos que indicam a necessidade de uma investigação mais minuciosa. As variáveis *auto*, *moto* e *pesados*, todas relativas a modos de transporte motorizados, apareceram no quadrante inferior direito, o que representa que elas contribuem para não ocorrência de acidentes fatais, o que não é condizente com o referencial teórico (ATSB, 2006; RODRIGUES *et al.*, 2014). De modo semelhante, as variáveis *arterial* e *local_acid* apareceram no quadrante inferior esquerdo, contrariando o indicado na literatura revisada, já que o tráfego cicloviário em vias de alta hierarquia, bem como em áreas de interseção, representa risco para os ciclistas (MUKHERJEE *et al.*, 2006; ZHANG *et al.*, 2015). No entanto, o resultado da variável *local_acid* pode ser justificado pela sua presença também no quadrante direito superior, o que pode indicar que sua presença no quadrante inferior esquerdo (menores chances de ocorrência de acidentes com feridos) é compensada pelo risco de acidentes fatais nos cruzamentos (SENÇO, 2008; ANDERSEN *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2015).

O Quadro 5 permite ainda visualizar que, no contexto estudado, a variável *comp_quadra* contribuiu para a diminuição das ocorrências de alto grau de severidade (fatais). De acordo com o exposto no Quadro 2, a literatura apresenta diferentes resultados para influência do comprimento médio de quadra sobre a segurança viária, porém, de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, menores comprimentos de quadra tendem a prover melhores condições de segurança para os ciclistas (ELVIK; VAA, 2009). O resultado obtido através da modelagem da severidade de acidentes também permite apontar que a presença de semáforos em cruzamentos, organizando as manobras e protegendo os modos de transporte ativos, aumenta a segurança cicloviária, já que a variável *semaf_cruz* aparece no quadrante inferior direito (WRI, 2015).

5.14 RESULTADO DO CÁLCULO DOS EFEITOS MARGINAIS DO MODELO DE SEVERIDADE DE ACIDENTES

O cálculo dos efeitos marginais do modelo de severidade resultou em valores discriminados de acordo com os graus de severidade 1 (acidentes sem vítimas, apenas com danos materiais), 2 (acidentes com vítimas) e 3 (acidentes com vítimas fatais). Os resultados do cálculo dos efeitos marginais está sintetizado na Tabela 14. As colunas dos “Coef. Sev.” dizem respeito aos coeficientes de severidade das variáveis e de seus espelhos “F”, os quais exercem influência sobre os níveis de severidade 2 e 3, respectivamente. As 3 colunas mais à direita representam os valores dos efeitos marginais sobre os diferentes níveis de severidade.

Tabela 14 – Efeitos marginais para o modelo de severidade de acidentes

Variável	Coef. Sev. 2	Coef. Sev. 3	Incremento	Tipo de variável	Média	Efeito Marg. Sev. 1	Efeito Marg. Sev. 2	Efeito Marg. Sev. 3
<i>arterial</i>	-4,14		0,015	contínua	0,15	0,270	-0,270	0,000
<i>auto</i>	0,79	-1,44	1	<i>dummy</i>	0,72	-0,038	0,038	0,000
<i>comp_quadra</i>		-0,09	1,026	contínua	10,26	0,000	0,000	0,000
<i>dens_pop</i>	0,00	0,00	706,95	contínua	7069,50	0,000	0,000	0,000
<i>dia_util</i>		-0,80	1	<i>dummy</i>	0,76	0,000	0,000	0,000
<i>intersec</i>		0,00	1	discreta	317,95	0,000	0,000	0,000
<i>local_acid</i>	-5,35	23,70	1	<i>dummy</i>	0,17	-0,074	-0,753	0,827
<i>moto</i>	1,55	-1,28	1	<i>dummy</i>	0,13	-0,056	0,056	0,000
<i>pesados</i>		-1,86	1	<i>dummy</i>	0,11	0,000	0,000	0,000
<i>semaf</i>	0,02	0,01	1	discreta	26,51	-0,001	0,001	0,000
<i>semaf_cruz</i>		-0,78	0,051	contínua	0,51	0,000	0,000	0,000
<i>turno</i>		-0,51	1	<i>dummy</i>	0,62	0,000	0,000	0,000
<i>vuln_bici</i>	1,29		1	<i>dummy</i>	0,20	-0,051	0,051	0,000

(fonte: elaborado pelo autor)

O resultado do cálculo dos efeitos marginais das variáveis que compuseram esse modelo indica que várias delas contribuem pouco para a alteração da probabilidade de ocorrência de todos os 3 graus de severidade de um acidente, como *comp_quadra*, *dens_pop*, *dia_util*, *intersec*, *pesados*, *semaf*, *semaf_cruz* e *turno*. Esses resultados são inconsistentes com o que foi encontrado na literatura revisada, a qual indica que estes fatores influenciam para severidade dos acidentes. É possível, portanto, que este resultado indique uma irrelevância relativa, haja vista os resultados expressivos das variáveis

A variável *auto* indica que envolvimento de carros no acidente aumenta a probabilidade de acidentes com ferimentos em 3,8% (Efeito Marg. Sev. 2 = 0,038) ao passo que diminui a probabilidade de acidentes sem vítimas na mesma intensidade (Efeito Marg. Sev. 1 = -0,038). A análise da variável *moto* mostra que a presença de motocicletas nos acidentes ciclovitários aumenta a probabilidade de ocorrências com vítimas em 5,6% (Efeito Marg. Sev. 2 = 0,056). Resultado semelhante é indicado pela variável *vuln_bici*, que indica que usuários vulneráveis, quando envolvidos em acidentes de bicicleta, tem 5,1% (Efeito Marg. Sev. 2 = 0,051) de chances maiores de se machucarem. Esses resultados são corroborados na literatura revisada (ATSB, 2006; RODRIGUES *et al.*, 2014), que indica que a interação com os veículos motorizados está relacionada a um maior risco para os ciclistas.

A variável que apresentou o comportamento mais impactante sobre o grau de severidade de um acidente ciclovitário foi a *local_acid*. Sua análise indica que a ocorrência de acidentes envolvendo bicicletas nas áreas de interseção tem 82,7% de chances de resultarem em fatalidade (Efeito Marg. Sev. 3 = 0,827), enquanto a chance dessas ocorrências resultarem em vítimas com ferimento reduz em 75,3% (Efeito Marg. Sev. 2 = -0,753). Esses resultados parecem ser complementares, indicando que os acidentes ciclovitários em interseções apresentam grandes chances de serem fatais para os ciclistas. Esse resultado esta em conformidade com o encontrado na literatura, segundo o qual as áreas de interseção concentram as maiores taxas de ocorrência e severidade nos acidentes ciclovitários (WEDAGAMA *et al.*, 2006; SENÇO, 2008; ANDERSEN *et al.*, 2012; AL-GHAMDI, 2013; DUMBAUGH *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2015).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A promoção dos modos de transporte ativo, como a bicicleta, proporcionam reduções nas altas taxas de acidentes viários observadas nos centros urbanos ao redor do mundo. No entanto, este é um ciclo vicioso, no qual a própria promoção da mobilidade ativa depende da percepção de segurança dos usuários mais expostos aos riscos. Ou seja, quanto maior o número de pessoas caminhando e pedalando nas ruas, mais seguros serão esses espaços, o que por sua vez irá estimular que mais pessoas se locomovam de forma ativa. Desse modo, entender a contribuição dos elementos do ambiente construído e dos fatores socioeconômicos para o aumento da segurança cicloviária é essencial para aumentar as chances de sucesso das intervenções e políticas públicas de segurança no trânsito.

Este trabalho teve como objetivo geral a verificação da relação entre as características da estrutura urbana, dos fatores socioeconômicos e das características específicas dos acidentes que exercem influência sobre a frequência e severidade dos acidentes viários envolvendo bicicletas. Concomitantemente, o trabalho propôs-se a realizar comparar os ajustes dos modelos de frequência estimados e a analisar os efeitos marginais dos elementos investigados nos modelos de frequência e severidade de acidentes.

A pesquisa teve início através da revisão da literatura, onde foram identificadas os elementos que exercem influência sobre a segurança cicloviária. Após essa etapa, o trabalho prosseguiu com a coleta de dados de infraestrutura urbana e dados socioeconômicos georreferenciados, além dos dados referentes aos acidentes com bicicleta ocorridos entre os anos de 2012 e 2014. Os dados coletados, por serem oriundos de fontes diversas, precisaram ser organizados e compatibilizados em um banco de dados único, o qual foi projetado sobre a base cartográfica da cidade de Porto Alegre.

Em seguida foram definidas variáveis que representassem os elementos identificados a partir da literatura revisada e que permitissem a análise a partir do georreferenciamento dos dados disponíveis. Essa etapa gerou a definição de três tipos de variáveis: *dummy*, contínuas e discretas. Foram definidas 25 variáveis independentes, além de duas variáveis dependentes: uma relativa ao número de acidentes (variável de interesse dos modelos de frequência) e uma relativa ao grau de severidade de cada registro (variável de interesse do modelo de severidade).

A agregação dos dados segundo as áreas de interesse foi realizada de duas formas: para o modelo de frequência de acidentes, os dados foram reunidos em unidades de análise representadas pelos limites dos bairros da cidade (79 para a base cartográfica utilizada, que seguiu a divisão territorial da cidade de Porto Alegre em 2010); já para o modelo de severidade de acidentes, as unidades de análise foram os próprios acidentes de forma independente.

A modelagem aconteceu de acordo com as seguintes etapas:

- (i) análise de distribuição e multicolinearidade dos dados, através da qual eram selecionadas as variáveis candidatas para cada modelo;
- (ii) estimação dos coeficientes, onde eram obtidos os modelos;
- (iii) comparação de ajuste, realizada para os modelos de frequência de acidentes;
- (iv) cálculos dos efeitos marginais das variáveis dos modelos.

A análise da frequência de acidentes foi realizada através da criação de dois modelos. O primeiro, denominado completo, levou em conta todos os bairros na estimação dos coeficientes. O segundo, chamado reduzido, excluiu a área denominada Zona Indeterminada da análise a fim eliminar possíveis discrepâncias geradas pela qualidade dos dados dessa zona e possibilitar a comparação dos resultados obtidos. A posterior comparação entre os modelos foi feita através dos índices de ajuste AIC e BIC e elas mostraram que o modelo restrito estava melhor ajustado ao cenário estudado. As variáveis selecionadas nestes modelos estão sintetizadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Síntese das variáveis significativas dos modelos de frequência de acidentes

Modelo	Variável	Descrição
Completo de Frequência	<i>arterial</i>	Proporção entre km de vias arteriais e km de vias totais de um bairro
	<i>auto</i>	Nº de acidentes com bicicleta nos quais houve envolvimento de ao menos um automóvel
Reduzido de Frequência	<i>arterial</i>	Proporção entre km de vias arteriais e km de vias totais de um bairro
	<i>local_acid</i>	Nº de acidentes com bicicleta que ocorreram em áreas de interseção
	<i>vuln_bici</i>	Nº de acidentes com bicicleta nos quais houve envolvimento de ao menos um ciclista vulnerável (menor de 18 ou maior que 60 anos)

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados dos modelos de frequência demonstraram que todas as variáveis significativas contribuíram no sentido do aumento na frequência de acidentes (sinal positivo), com destaque para a variável *arterial*. Este resultado, aliado aos valores de efeito marginal desta variável, demonstram a importância do planejamento viário na hora de determinar as rotas cicláveis. Estas rotas devem ser pensadas de modo a evitar que sigam através de ou cruzem as vias arteriais, pois a presença delas pode ser muito arriscada para os ciclistas. Quando essa situação for inevitável, deve-se dar prioridade às ciclovias em lugar das ciclofaixas, pois aquelas possuem segregação física que pode proteger os ciclistas, além de reduzir os efeitos aerodinâmicos e vibratórios decorrentes dos motorizados trafegando a elevadas velocidades. Já a presença da variável *vuln_bici* no modelo reduzido de frequência de acidentes indica que ações voltadas para os grupos mais vulneráveis de ciclistas podem resultar em condições mais seguras de tráfego. Uma alternativa para atingir esse objetivo pode ser a realização de ações educativas voltadas para esse público.

A análise da severidade de acidentes foi realizada através da estimação de um Modelo de Regressão Binomial Negativo. As variáveis selecionadas para este modelo estão sintetizadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Síntese das variáveis significativas dos modelos de severidade de acidentes

Modelo	Variável	Descrição
Severidade	<i>arterial</i>	Proporção entre km de vias arteriais e km de vias totais de um bairro
	<i>auto</i>	Nº de acidentes com bicicleta nos quais houve envolvimento de ao menos um automóvel
	<i>comp_quadra</i>	Extensão média de segmento de quadra no bairro
	<i>dens_pop</i>	Densidade populacional do bairro
	<i>dia_util</i>	Nº de acidentes ocorridos em dias úteis
	<i>intersec</i>	Número de interseções no bairro
	<i>local_acid</i>	Nº de acidentes com bicicleta que ocorreram em áreas de interseção
	<i>moto</i>	Nº de acidentes com bicicleta nos quais houve envolvimento de ao menos uma moto
	<i>pesados</i>	Nº de acidentes com bicicleta nos quais houve envolvimento de ao menos um veículo pesado
	<i>semaf</i>	Número de semáforos no bairro
	<i>semaf_cruz</i>	Proporção entre semáforos em cruzamentos e semáforos totais do bairro
	<i>turno</i>	Nº de acidentes com bicicleta que ocorreram no período matutino
	<i>v_bici</i>	Nº de acidentes com bicicleta nos quais houve envolvimento de ao menos um ciclista vulnerável (menor de 18 ou maior que 60 anos)

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados obtidos no modelo de severidade, analisados conjuntamente com os resultados obtidos para os efeitos marginais das variáveis selecionadas, indicaram que a prevalência da variável *local_acid* sobre a gravidade das ocorrências. De acordo com os resultados encontrados, as áreas de interseção aumentam em até cerca de 83% as chances de um acidente com bicicleta ter uma vítima fatal. Concomitantemente a este resultado, verificou-se a contribuição positiva para a segurança cicloviária da variável *semaf_cruz*, a qual indica que a sinalização semafórica nos cruzamentos pode reduzir o risco de ocorrência de acidentes fatais. Essa combinação de resultados indica que o tratamento semafórico de cruzamentos pode ser uma alternativa para redução de acidentes nas áreas de interseção. Ainda assim, o número de variáveis que não apresentaram contribuição significativa para nenhum dos níveis de severidade foi alto, fato que denota a necessidade de uma investigação mais rigorosa sobre estes resultados a fim de oferecer mais subsídios para a tomada de decisão acerca das intervenções que visam melhorar a segurança cicloviária.

De modo geral, os objetivos do trabalho foram atingidos: foram identificados fatores que tem prevalência sobre a ocorrência e a gravidade dos acidentes envolvendo ciclistas na área estudada. Foi possível também, através da análise dos coeficientes das variáveis dos modelos de frequência e severidade e dos resultados dos cálculos dos efeitos marginais, interpretar a influência dos elementos investigados sobre a segurança cicloviária. Os resultados sugeriram que as áreas de interseção compõem o elemento mais perigoso para o tráfego cicloviário, mas outros fatores como a interação com o tráfego motorizado, a presença de vias arteriais e a idade do ciclista (manifestada através dos usuários mais vulneráveis) também podem aumentar a insegurança e o risco nas viagens de bicicleta. Dessa forma, são fornecidos subsídios para o planejamento viário, possibilitando a antecipação de riscos, de forma a ajudar a atuação dos gestores e técnicos da engenharia de tráfego na promoção da segurança cicloviária.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a análise desagregada de algumas variáveis a fim de investigar de forma independente alguns aspectos dos acidentes que não foram contemplados nesse estudo. Por exemplo, a variável *vuln_bici*, que agrega dados relativos a acidentes ocorridos com jovens e idosos. Há indícios na literatura que indicam que a influência da idade do ciclista sobre a frequência e severidade dos acidentes com bicicleta pode ser diferente para esses dois grupos de usuários.

Outro aspecto interessante seria a análise dos dados segundo outras unidades de análise. A agregação dos dados em áreas de interesse em torno dos próprios acidentes pode resultar em dados mais significativos, porém esta análise requer um esforço maior na solução do problema de sobreposição dos *buffers*. Além disso, é possível realizar outras abordagens do mesmo problema através da definição de variáveis que representem aspectos não contemplados neste trabalho.

Por fim, sugere-se a inclusão de dados sobre volumes de veículos motorizados e dados sobre volume de tráfego cicloviário nas modelagens, os quais são de grande importância para um entendimento mais profundo dos resultados dos fenômenos relativos à ocorrência e severidade de acidentes.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **Highway Safety Manual**. American Association Of State Highway and Transportation Officials, 1st ed. Washington, D.C., 2010.

ABY, K. A. **Examining pedestrian-injury severity using alternative disaggregate models**. *Research in Transportation Economics*, v. 43, n.1, 2013.

ABDEL-ATY, M. *et al.* **Geo-spatial and log-linear analysis of pedestrian and bicyclist crashes involving school-aged children**. *Journal of Safety Research*. V. 38, p. 571-579, 2007.

AKAIKE, H. **A new look at the statistical model identification**. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 19, n. 6, 1974.

AL-GHAMDI, A. S. **Analysis of traffic accidents at urban intersections in Riyadh**. *Accident Analysis and Prevention*, v. 35, n. 5, 2013.

ALMEIDA, R. L. F. de; FILHO, J. G. B.; BRAGA, J. U.; MAGALHÃES, F. B.; MACEDO, M. C. M.; SILVA, K. A. **Via, homem e veículo: fatores de risco associados à gravidade dos acidentes de trânsito**. *Revista de Saúde Pública*, 47(4): 718-731, 2013.

ANDERSEN, T.; BREDAL, F.; WEINREICH, M.; JENSEN, N.; RIISGAARD-DAM, M.; NIELSEN, M. K. **Collection of Cycle Concepts 2012**. [S. l.]: Cycling Embassy of Denmark, 2012.

ANDRADE, S. M.; MELLO-JORGE, M. H. P. **Acidentes de transporte terrestre em cidade da região sul do Brasil: avaliação da cobertura e qualidade dos dados**. *Caderno de Saúde Pública*, 17:1449-56, 2001.

AUSTRALIAN TRANSPORT SAFETY BUREAU (ATSB). **Deaths of cyclists due to road crashes**. *ATSB Safety Report*, Austrália, 2006.

BACCHIERI, G.; GIGANTE, D. P.; ASSUNÇÃO, M. C. **Determinantes e padrões de utilização da bicicleta e acidentes de trânsito sofridos por ciclistas trabalhadores da cidade de Pelotas, Rio Grande do Sul**. *Cad Saúde Pública*, 21(5):1499-508, 2005.

BARROS, A. J.; AMARAL, R.; OLIVEIRA, M. S. B.; LIMA, S. C.; GONÇALVES, E. V. **Acidentes de trânsito com vítimas: sub-registro, caracterização e letalidade**. *Cad Saúde Pública*, 19(4):979-86, 2003.

BARTLETT, S. **The problem of children`s injuries in low-income countries: a review**. *Health policy and planning*, v. 17, n.1, 2002.

BERG, C. van den. **Brief Dutch Design Manual for Bicycle and Pedestrian Bridges**. *CROW design guide*. Holanda, 2015.

BIERLAIRE, M. **Biogeme: a free package for the estimation of discrete choice models**. *Proceedins of the 3rd Swiss Transportation Research Conference*, Ascona, Suíça, 2003.

BRASIL. Presidência da República. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei n. 9.503**, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Brasília, DF, 1997. Não paginado. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503.htm>. Acesso em: 21 jun. 2017.

_____. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana. **Plano de Mobilidade por Bicicleta nas Cidades**. Brasília, DF, 2007. Disponível em: <http://www.livrosgratis.com.br/arquivos_livros/mdc00007.pdf>. Acesso em: 28 set. 2017.

_____. Ministério da Saúde. **Base de dados do DATASUS**. Informações de Saúde (TABNET): estatísticas vitais. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://datasus.saude.gov.br/informacoes-de-saude>>. Acesso em: 3 fev. 2018.

_____. DETRAN – DF. **Boletim anual de acidentes com vítimas fatais**. Departamento de Trânsito do Distrito Federal. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.detran.df.gov.br/odetran/estatisticas-do-transito.html>>. Acesso em: 13 jan. 2018.

CARDOSO, G. **Modelos para previsão de acidentes em vias arteriais urbanas**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2006.

CDC. **Web-based injury statistics query and reporting system (WISQARS)**. Centers for Disease Control and Prevention. National Center for Injury Prevention and Control, 2017. Disponível em: <<http://www.cdc.gov/injury/wisqars/index.html>>. Acesso em: 7 set. 2017.

CDOT. **City of Chicago 2012 Bicycle Crash Analysis: summary report and recommendations**. Chicago Department of Transportation, Illinois, 2012.

CERVERO, R.; KOCKELMAN, K. **Travel demand and the 3ds: density, design and diversity**. *Transportation Research Part C: emerging technologies*. V. 2, n. 3, p. 199-219, 1997.

CHEN, P.; SHEN, Q. **Built environment effects on cyclist injury severity in automobile-involved bicycle crashes**. *Accident Analysis and Prevention*, 86, 239-246, 2016.

CÓRDOVA JÚNIOR, R. S.; NODARI, C. T. **Investigação dos fatores que influenciam na segurança ciclovária em áreas urbanas**. *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Curitiba, 2014.

CUNTO, F. J. C.; NETO, M. M. de C.; BARREIRA, D. S. **Modelos de previsão de acidentes de trânsito em interseções semaforizadas de Fortaleza**. *TRANSPORTES*, v. 20, n. 2, 2012.

DAVIS, G. A. **Possible aggregation biases in Road Safety Research and a Mechanism Approach to Accident Modeling**. *Accident Analysis and Prevention*, v. 36, 2004.

DOMECICH, T. A.; MCFADDEN, D. **Urban travel demand: a behavioral analysis**. *Transportation Research*, North Holland, 1975.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. **Análise espacial de dados geográficos**. Embrapa Cerrados. Brasília, EMBRAPA, 2004.

DUDUTA, N.; ADRIAZOLA-STEIL, C.; HIDALGO, D. **Saving lives with sustainable transport:** traffic safety impacts os sustainable transport policies. 2013.

DUMBAUGH, E.; RAE, R. **Safe urban form:** revisiting the relationship between community design and traffic safety. *Journal of the American Planning Association*. V. 75, n. 3, p. 309-329, 2009.

DUMBAUGH, E.; LI, W.; JOH, K. **The built environment and the incidence of pedestrian and cyclist crashes.** *Urban Design International*. V. 18, n. 3, p. 217-228, 2013.

ELVIK, R. **Laws of accident causation.** *Accident Analysis and Prevention*, v. 38, n. 4, p. 742-747, 2006.

ELVIK, R.; VAA, T. **The handbook of road safety measures.** Oxford: Elsevier, 2009.

EWING, R.; CERVERO, R. **Travel and the built environment.** *Journal of the American Planning Association*, v. 76, n. 3, p. 265-294, 2010.

EWING, R.; DUMBAUGH, E. **The built environment and traffic safety:** a review of empirical evidence. *Journal of Planning Literature*, v. 23, n. 4, p. 347-367, 2009.

FAVERO, D. Portal Terra. **RS: em menos de 1 mês, aluguel de bikes tem 6 mil usuários.** Porto Alegre, RS, não paginado, 21 out. 2012. Disponível em: <<http://noticias.terra.com.br/brasil/cidades/rs-em-menos-de-1-mes-aluguel-de-bikes-tem-6-mil-usuarios,00385a3ed745b310VgnCLD200000bbcecb0aRCRD.html>>. Acesso em: 17 abril 2014.

FHWA. **A bikeway criteria digest: the ABCD's of bikeways.** U.S. Department of Transportation. *Federal Highway Association*, Washington, DC, 1979.

FORAN, S. **Provision of Cycle Facilities:** National Manual for Urban Areas. [S. l.: s. n.], c2002.

FORBES, J. J.; HABIBI, M. A. **Pedestrian Injury Severity Levels in the Halifax Regional Municipality, Nova Scotia, Canada:** Hierarchical Oredered Probit Modeling Approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1, n. 2519, 2015.

FUENTES, C. M.; HERNANDEZ, V. **Spatial environmental risk factores for pedestrian injury collisions in Ciudad Juárez, Mexico (2008-2009):** implications for urban planning. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, v. 20, n. 2, 2013.

FURTADO, C. Empresa Pública de Transporte e Circulação. **Cultura do uso de bicicletas reduz acidentes.** Porto Alegre, RS, não paginado, 2014. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/portal_pmpa_novo/default.php?p_noticia=168543&CULT>. Acesso em: 18 abril 2014.

GILL, G.; SAKRANI, T.; CHENG, W.; ZHOU, J. **Investigation of influential factors for bicycle crashes using a spatiotemporal model.** *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 42, n. 2, 2017.

GONDIM, M. F. **Cadernos de desenho: ciclovias**. Editora da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

GÖTSCHI, T.; GARRARD, J.; GILES-CORTI, B. **Cycling as a part of daily life: a review of health perspectives**. *Transport Reviews*, v. 36, n.1, 2016.

GREENE, W. H. **Econometric Analysis**. Nova Jérsei, v. 97, 2012.

GREENE, W. H.; HENSHER, D. **Modeling ordered choices**. [s.l: s.n], 2009.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Bookman Editora, 2009.

HAUER, E. **Observational Before-After Studies in Road Safety**. 1st ed, Pergamon, 2002.

HAUER, E.; JERRY, C. N. N.; LOVELL, J. **Estimation of safety at signalized intersections**. *Transportation Research Record*, TRB, Washington, D.C., n. 1185, 1998.

HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, V.; HARO-DE-LEÓN, L. DE. **La relación entre la centralidade urbana y los atropellamientos em Ciudad Juárez, México**. Hacia la promoción de la salud. V. 19, n. 2, p. 81-94, 2014.

HOBBSAWN, E. **A era dos extremos: o breve século XX**. 2. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1995. Disponível em: <<http://historialecionada.com/2013/04/07/cinco-livros-de-historia-que-todos-deveriam-ler/>>. Acesso em 3 jan. 2017.

HUANG, H.; ABDEL-ATY, M. **Multilevel data and Bayesian analysis in traffic safety**. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, n. 6, p. 1556-1565, 2010.

HVOSLEF, H. **Traffic enforcement: could it be better? What does the traffic increase?** *Nordiska trafiksaekerhetsdagar*, v. 1, Noruega, 1996.

IBGE. **Síntese de Indicadores Sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estudos e Pesquisa – Informação Demográfica e Socioeconômica, n. 35. Rio de Janeiro, 2015.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>>. Acesso em 22 dez. 2017.

INTERFACE FOR CYCLING EXPERTISE. **Cycling-Inclusive Policy Development: a handbook**. Utrecht, NL: Interface for Cycling Expertise; Transport Policy Advisory Services; Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, 2009. Disponível em: <http://www.bikepartners.nl/index.php?option=com_content&task=view&id=167&Itemid=168>. Acesso em: 1 jan. 2018.

JUHRA, C.; WIESKÖTTER, B.; CHU, K.; TROST, L.; WEISS, U.; MESSERSCHMIDT, M.; MALCYZ, A.; HECKWOLF, M.; RASCHKE, M. **Bicycle accidents – do we only see the tip of the iceberg?** A prospective multi-centre study in a large German city combining medical and police data. *Injury*, v. 43, 2012.

- KAPLAN, S.; PRATO, C. G. **Risk factors associated with bus accident severity in the United States: a generalized ordered logit model.** *Journal of Safety Research*, v. 43, n. 3, 2012.
- LEE, J.; MANNERING, G. F. **Impact of roadside features on the frequency and severity of run-off-roadway accidents: an empirical analysis.** *Accident Analysis and Prevention*, v. 34, 2002.
- LEITE, M. E.; NETO, N. F. dos S.; ANTUNES, S. S. F. **Análise especial dos acidentes de trânsito com ciclistas utilizando o Sistema de Informação Geográfica.** *Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde*, 2013.
- LITMAN, T.; FITZROY, S. **Safe travels: evaluating mobility management traffic safety impacts.** Victoria Transport Policy Institute. V. 15, n. 6, 2016.
- 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, 2006.
- 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, 2010.
- LOVEGROVE, G.; SAYED, T. **Using macrolevel collision prediction models in road safety planning applications.** *Transportation Research Record*, v. 1950, n. 1, 2006.
- LUSK, A. C.; MORENCY, P.; MIRANDA-MORENO, L.F.; WILLETT, W. C.; DENNERLEIN, J. T. **Bicycle guidelines and crash rates on cycle tracks in the United States.** *American Journal of Public Health*, 103(7), 1240-1248, 2013.
- MACHADO, R. C. **Prevalência de fatores associados à ocorrência de acidentes viários no entorno de pontos de parade de ônibus.** 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- MANNERING, F. L.; BHAT, C. R. **Analytic methods in accident research: methodological frontier and future directions.** *Analytic Methods in Accident Research*, 2014.
- MARSHALL, W. E.; GARRICK, N. W. **Does street network design affect traffic safety?** *Accident Analysis and Prevention*, v. 43, n. 3, 2011.
- MELLO-JORGE, M. H. P.; MARTINS, C. B. G. **A criança, o adolescente e o trânsito: algumas reflexões importantes.** *Revista da Associação Médica Brasileira*, v. 59, n. 3, 2013.
- MOHAMED, M. G.; SAUNIER, N.; MIRANDA-MORENO, L. F.; UKKUSURI, S. V. **A clustering regression approach: a comprehensive injury severity analysis of pedestrian-vehicle crashes in New York, US and Montreal, Canada.** *Safety Science*, v. 54, 2013.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINNING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis.** 4th ed., Hoboken: John Wiley, 2016.

MOTHAFER, G. I. M. A.; YAMAMOTO, T.; SHANKAR, V. N. **Evaluating crash type covariances and roadway geometric marginal effects using the multivariate Poisson-Gamma mixture model.** *Analytic Methods in Accident Research*, v.9, 2016.

MUHKERJEE, S.; CHAWLA, A.; MOHAN, D.; CHANDRAWAT, S.; AGRAWAL, V. **Throw distance variations in bicycle crashes.** *Transportation Research and Injury Prevention Programme*. Indian Institute of Technology, Nova Délhi, 2006.

NELDER, J. A.; WEDDERBURN, R. W. M. **Generalized linear models.** *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, v. 135, n. 3, 1972.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear regression models.** Homewood, 3rd ed, Chicago, 1996, 720 p.

NOLAND, R. B.; OH, L. **The effect of infrastructure and demographic change on traffic-related fatalities and crashes: a case study of Illinois country-level data.** *Accident Analysis and Prevention*. V. 36, n. 4, p. 525-532, 2004.

NYCDoT. **The New York pedestrian safety study & action plan.** New York City Department of Transportation, New York, EUA, 2010.

OECD. **International Road Traffic and Accident Database.** Annual Reports, 2005.

OECD. **Cycling, health and safety.** Organization for Economic Co-operation and Development. Paris, 2013.

OREGON DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Bicycle and Pedestrian Design Guide.** 3rd. ed. [Salem, Oregon, USA: s. n.], 2011.

ORTÚZAR, J. de D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport.** 4th Edition. Wiley, 2011.

PARKIN, J.; MEYERS, C. **The effect of cycle lanes on the proximity between motor traffic and cycle traffic.** *Accident Analysis and Prevention*. V. 42, p. 159-165, 2009.

PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Plano Diretor Cicloviário Integrado de Porto Alegre: relatório final.** Porto Alegre, 2008. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/eptc/default.php?p_secao=227>. Acesso em: 7 abr. 2017.

_____. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Cinco empresas interessadas em oferecer aluguel de bicicletas.** Porto Alegre, RS, 2012. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/portal_pmpa_novo/default.php?p_noticia=154650&ALU>. Acesso em: 15 abril 2014.

_____. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **BikePoa.** Porto Alegre, RS, 2018. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/eptc/default.php?p_secao=228>. Acesso em: 10 abril 2014.

POUR-ROUHOLAMIN, M.; ZHOU, H. **Investigating the risk factors associated with pedestrian injury severity in Illinois.** *Journal of Safety Research*, v. 57, 2016.

QUDDUES, M. A. *et al.* **An Analysis of motorcycle injury and vehicle damage severity using ordered probit models.** *Journal of Safety Research*. V. 33, p. 445-462, 2002.

- REYNOLDS, C. CO.; HARRIS, M.A.; TESCHKE, K.; CRIPTON, P. A.; WINTERS, M. **The impact of transportation infrastructure on bicycling injuries and crashes: a review of the literature.** *Environmental Health*, 8:47, 2009.
- RODRIGUES, C. L.; ARMOND, J. de E.; GORIOS, C.; SOUZA, P. C. **Acidentes que envolvem motociclistas e ciclistas no município de São Paulo: caracterização e tendências.** *Revista Brasileira de Ortopedia e Traumatologia*, 49(6):602-606, 2014.
- ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto.** EDUFU, 6. ed. Uberlândia, 2005.
- SAVOLAINEN, P. T.; MCARTHUR, A.; GATES, T. J. **Spatial analysis of child pedestrian and bicycle crashes:** development of a safety performance function for areas adjacent to schools. *TRB Annual Meeting*, 2014.
- SCHEPERS, P.; WOLT, K. K. **Single-bicycle crash types and characteristics.** *Cycling Research International*, v. 2, 2012.
- SCHWARZ, G. **Estimating the dimension of a model.** *The Annals of Statistics*, v. 6, n. 2, 1978.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de projetos rodoviários.** São Paulo: Pini, 2008.
- SHAHEED, M. S.; GKRTZA, K.; ZHANG, W.; HANS, Z. **A mixed logit analysis of two-vehicle crash severities involving a motorcycle.** *Accident Analysis and Prevention*, v. 61, 2013.
- SIDDIQUI, C.; ABDEL-ATY, M.; CHOI, K. **Macroscopic spatial analysis of pedestrian and bicycle crashes.** *Accident Analysis and Prevention*, n. 45, 2012.
- TESCHKE, K.; HARRIS, M. A.; REYNOLDS, C. C. O.; WINTERS, M.; BABUL, S.; CHIPMAN, M.; CUSIMANO, M. D.; BRUBACHER, J. R.; HUNTE, G.; FRIEDMAN, S. M.; MONRO, M.; SHEN, M.; VERNICH, L.; CRIPTON, P. A. **Route infrastructure and the risk of injuries to bicyclists:** a case-crossover study. *American Journal of Public Health*, v. 102, n. 12, 2012.
- TORRES, T. B. **Prevalência de fatores associados a acidentes viários no entorno de escolas.** 2016. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- TREAT, J. R.; TUMBAS, N. S.; MCDONALD, S. T.; SHINAR, D.; HUME, R. D.; MAYER, R. E.; STANSIFER, R. L.; CASTELLAN, N. J. **Tri-level study of the cause of traffic accidents:** final report. *Vision Research*, v. 42, n. 21, 1979.
- TWISK, D. A. M.; REURINGS, M. **An epidemiological study of the risk of cycling in the dark:** the role of visual perception, conspicuity and alcohol use. *Accident Analysis and Prevention*, v. 60, 2013.
- UKKUSURI, S. *et al.* **The role of built environment on pedestrian crash frequency.** *Safety Science*. V. 50, n. 4, p. 1141-1151, 2012.
- VICCI, V. **Fitting distributions with R.** *Free Software Foundation*, v. 2, 2005.

WASHINGTON, S. P.; KARLAFTIS, M. G.; MANNERING, F. **Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis**. Chapman and Hall/CRC, 1st ed., 2003.

WEDAGAMA, D. M. P.; BIRD, R. N.; METCALFE, A. V. **The influence of urban land-use on non-motorised transport casualties**. *Accident Analysis and Prevention*, v. 38, n. 6, 2006.

WHO. **Global status report on road safety**. World Health Organization, Geneva: WHO Press, 2015.

WRI. **Segurança em sistemas prioritários para ônibus**. World Resources Institute, Brasil, 2015.

YAN, X.; MA, M.; HUANG, H.; ABDEL-ATY, M.; WU, C. **Motor vehicle-bicycle crashes in Beijing: irregular maneuvers, crash patterns, and injury severity**. *Accident Analysis and Prevention*, 43:1751-1758, 2011.

ZAHABI, S. A. H.; STRAUSS, J.; MANAUGH, K.; MIRANDA-MORENO, L. **Estimating potential effect of speed limits, built environment, and other factors on severity of pedestrian and cyclist injuries in crashes**. *Transportation Research Record*. V. 2247, n. 1, p. 81-90, 2011.

ZHANG, Y. *et al.* **Investigating the associations between road network structure and non-motorist accidents**. *Journal of Transport Geography*. V. 42, p. 34-47, 2015.