anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
TRANSPORTES
ISSN: 2237-1346
anpet.org.br/transportes

Avaliação do impacto da fiscalização eletrônica de velocidade e de avanço semafórico na segurança viária: um estudo “antes” e “depois” utilizando o Método Empírico de Bayes

Assessment of the impact of electronic speed and red-light camera enforcement on road safety: a before-and-after study using the Empirical Bayes Method

Paulo Bruno Souza Nunes[1], **Flávio José Craveiro Cunto**[1]

[1]Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

Contato: paulo.nunes@det.ufc.br (PBSN); flaviocunto@det.ufc.br (FJCC)

Recebido:
15 de agosto de 2024
Revisado:
29 de outubro de 2024
Aceito:
16 de novembro de 2024
Publicado:
13 de março de 2025
Editor de Área:
Sara Ferreira, Universidade do Porto, Portugal

Palavras-chave:
Segurança viária.
Método empírico de bayes.
Krigagem universal.
Estudos “antes” e “depois”.

Keywords:
Road safety.
Empirical bayes method.
Universal kriging.
Before-and-after studies.

DOI: 10.58922/transportes.v33.e3040

OPEN ACCESS
CC BY

RESUMO

Estratégias automatizadas de fiscalização de infrações são comumente empregadas em interseções semaforizadas com o objetivo de minimizar sinistros de trânsito. O real impacto destas estratégias pode variar entre jurisdições e carece de estudos observacionais que permitam lidar com desafios metodológicos como o fenômeno de regressão à média e a limitação temporal do período observado. Este trabalho avalia os efeitos da fiscalização eletrônica de velocidade e avanço semafórico em interseções semaforizadas no desempenho da segurança viária utilizando o Método Empírico de Bayes (EB). Utilizando um período total de análise de 2010 a 2019, foi desenvolvida uma Função de Desempenho de Segurança Viária (FDSV) para os sinistros com vítimas de 2011 em função do fluxo veicular (VDMA) e do número de faixas, para uma amostra com 176 interseções de Fortaleza. A FDSV (2011) foi transferida para os outros anos da análise através da correção do intercepto obtida pelo método proposto no Highway Safety Manual. Os resultados indicaram uma redução de 21% (8%, 33%; IC=95%) nos sinistros com vítimas feridas e fatais, sendo similar ao encontrado com a utilização de um grupo de comparação e ligeiramente melhor do que o encontrado na literatura internacional. Os resultados e a aplicação da metodologia contribuem para reforçar a eficácia da instalação de dispositivos de fiscalização em interseções semaforizadas, além de contribuir para o aperfeiçoamento dos estudos observacionais do tipo “antes” e “depois” no cenário brasileiro.

ABSTRACT

Automated enforcement strategies are commonly employed at signalized intersections to minimize traffic incidents. The actual impact of these strategies can vary between jurisdictions and lacks observational studies that address methodological challenges such as the regression-to-the-mean phenomenon and the time limitation of the observed period. This study evaluates the effects of electronic speed and red-light enforcement at signalized intersections on road safety performance using the Empirical Bayes (EB) Method. Using a total analysis period from 2010 to 2019, a Safety Performance Function (SPF) was developed for crashes with victims in 2011 based on vehicle flow (AADT) and the number of lanes, using a sample of 176 intersections in Fortaleza. The SPF (2011) was transferred to the other years of the analysis by adjusting the intercept correction obtained using the method proposed in the Highway Safety Manual. The results indicated a 21% reduction (8%, 33%; CI=95%) in crashes with injured and fatal victims, similar to the findings from using a comparison group and slightly better than those found in the international literature. The results and the application of the methodology help reinforce the effectiveness of installing enforcement devices at signalized intersections and contribute to improving ‘before-and-after’ observational studies in the Brazilian context.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2023), cerca de 1,35 milhão de pessoas morrem e aproximadamente 50 milhões sofrem ferimentos devido a sinistros de trânsito anualmente. Neste cenário, as interseções viárias merecem destaque em função da natural confluência de diferentes trajetórias potencialmente conflitantes. Estudos apontam que, no ambiente urbano, cerca de 50% dos sinistros ocorrem nesses locais, com alta severidade frequentemente associada (FHWA, 2021;Gu et al., 2023).

A instalação de semáforos tem apresentado resultados promissores na redução da gravidade dos sinistros, embora possa aumentar a frequência de sinistros com danos materiais (Ahmed e Abdel-Aty, 2015 ; Claros, Sun e Edara, 2016; Reyad, Sacchi e Sayed, 2017). Após a instalação do semáforo, eventos de avanços do estágio de vermelho, excesso de velocidade, além das trocas sistemáticas de preferência da corrente veicular, representam as situações de maior risco de sinistros (Elvik, 2011; Penã, 2011). Desta forma, os dispositivos de fiscalização eletrônica de avanço semafórico e excesso de velocidade (DFE) têm inerente potencial para o reforço do comportamento adequado nas proximidades do semáforo e consequente melhoria do desempenho da segurança viária (DSV). De acordo com McCartt e Hu (2014) e Kumphong et al. (2019), a instalação de DFE aumenta em torno de 86% o respeito ao ciclo semafórico e reduz em aproximadamente 85% os excessos de velocidade, respectivamente.

Tradicionalmente, os estudos observacionais do tipo “antes” e “depois” (EAD) com o emprego de séries históricas de sinistros de trânsito têm sido utilizados para avaliar o DSV de entidades após a aplicação de intervenções em interseções viárias (Hoye, 2015; Hu e Cicchino, 2017; Ko et al., 2017). Para o caso da implantação de DFE, Christie et al. (2003) e De Pauw et al. (2014), encontraram resultados corroborando a hipótese da redução da severidade dos sinistros.

Ressalta-se que, de maneira geral, existe uma predominância de EAD do tipo simples (Naïve) e com Grupo de Comparação (CG) os quais não consideram formalmente aspectos como o fenômeno de regressão à média, além de possuir limitações temporais em relação a amostra estudada e não incluir fatores que podem ser controlados e incorporados, como o fluxo veicular. Os EAD com Método Empírico de Bayes (EAD/MEB) superam as limitações descritas acima, as quais podem, dentre outros problemas, superestimar o efeito das intervenções (Hauer et al., 2002).

No Brasil, aplicações de EAD com MEB para avaliação do DSV ainda não são encontradas. Este cenário, em parte, ocorre pela relativa complexidade da aplicação do método, o qual exige o desenvolvimento de Funções de Desempenho de Segurança Viária (FDSV), as quais, por sua vez, demandam informações detalhadas sobre as condições de fluxo veicular (VDMA) e de geometria dos locais analisados (Cunto, Nodari e Barbosa, 2014). Além do desafio metodológico de aplicar o EAD/MEB, o verdadeiro impacto da instalação de DFE no cenário nacional pode não corresponder aos resultados obtidos em estudos internacionais, em função de especificidades locais como proporção de excesso de velocidade, grau de saturação da rede e nível de obediência dos condutores locais.

Na cidade de Fortaleza, os DFEs são utilizados para monitorar o avanço semafórico e a velocidade dos veículos. Cabe ressaltar que os condutores são alertados sobre a presença desses equipamentos por meio de sinalização vertical adequada. Essa sinalização visa informar os motoristas da necessidade de reduzir a velocidade e respeitar os sinais de trânsito, promovendo uma condução mais segura.

Em vista do exposto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito da instalação de DFE na frequência de sinistros de trânsito com vítimas feridas e fatais em interseções semaforizadas de

Fortaleza/CE com o método empírico de Bayes. O trabalho realizou ainda uma análise comparativa entre os resultados obtidos com o MEB, o EAD/Naïve e o EAD/GC.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Li, Graham e Majumdar (2013) aplicaram EAD/Naïve para avaliar o impacto dos DFE nos sinistros do Reino Unido. Os autores utilizaram uma amostra de 771 interseções e nove anos de observações, comparando a frequência e severidade dos sinistros de trânsito. Os resultados sugeriram uma redução de 27,5% na frequência dos sinistros após a instalação dos dispositivos.

Walden et al. (2012), no Texas, encontraram uma redução de 43% nos sinistros do tipo colisões transversais ao aplicar o EAD/Naïve para 56 interseções semaforizadas. Observou-se ainda que os sinistros do tipo colisões traseiras, relacionados ao avanço em sinal vermelho aumentaram em 5%, entretanto, não foram informados seus respectivos intervalos de confiança (IC).

Nestes trabalhos, não foram considerados o volume veicular no período pré e pós-instalação dos equipamentos, tornando assim impossível considerar o efeito dessa alteração na ocorrência dos sinistros. É importante destacar também que os EAD/Naïve apresentam limitações metodológicas significativas, pois não permitem a separação dos efeitos da intervenção dos efeitos de outras variáveis que podem influenciar os indicadores de segurança viária ao longo do tempo (Hauer et al., 2002).

A utilização de interseções onde a intervenção não foi implementada, permite uma melhor análise se comparada ao método Naïve, por permitir o controle de todos os fatores que foram alterados do período "antes" para "depois", diferentes da intervenção implantada. Esta é a lógica fundamental do Estudo "antes e depois" com o Grupo de Comparação (EAD/GC) (Hauer, 1997). Retting e Kyrychenko (2002) utilizaram o EAD/GC em Oxnard, Califórnia para avaliar o efeito da instalação de DFE na frequência de sinistros. Foram utilizadas três cidades como grupos de comparação e os resultados indicaram uma redução de 29% (95% IC=16,6%; 39,1%) no número de sinistros com ferimentos graves e fatais, e de 7% (95% IC =1,30%; 12,5%) no número total de sinistros.

Os efeitos de DFE foram analisados por Lord e Geedipally (2014) em 90 interseções de Chicago, entre 2008 e 2009. Utilizando o EAD/GC, a análise revelou uma redução de 3%, não significativa (α = 5%) nos sinistros com lesões durante um período de três anos antes e três anos depois da instalação dos equipamentos.

Apesar de apresentar estrutura mais robusta quando comparada aos EAD/Naïve, os estudos com o EAD/GC enfrentam limitações que devem ser consideradas ao interpretar seus resultados. Dentre os principais desafios observados encontram-se: a) ausência de confirmação das premissas básicas do experimento, ou seja, da estimativa do valor esperado ($E\{\omega\}$) próximo a 1, b) Ausência de estimativas da variância da razão entre os sinistros antes e depois entre o GC e o grupo tratado ($VAR\{\omega\}$) e; c) o não tratamento do potencial viés de seleção que gera o fenômeno de regressão à média.

A utilização do EAD/MEB permite, dentre outros aspectos, ampliar a série histórica de sinistros analisados, considerar formalmente variáveis medidas e com sua influência no DSV incorporada (modelagem), além de levar em consideração possíveis vieses de seleção (fenômeno de regressão à média) (Hauer et al., 2002; Persaud e Lyon, 2007; Elvik, 2008). O EAD/MEB é aplicado com o auxílio de uma FDSV, utilizada para modelar a relação entre a frequência de sinistros das entidades selecionadas e variáveis dependentes, como o fluxo veicular, extensão do segmento, número de faixas, dentre outras (Hauer et al., 2002). Por meio da combinação do número de sinistros estimados pelo modelo escolhido com o número de sinistros registrados nos locais tratados, é possível obter

uma melhor estimativa da frequência de sinistros no período depois, caso a implantação não tivesse ocorrido.

A maioria dos estudos com a aplicação do MEB em foco no DSV dos DFE disponíveis, foram realizados em jurisdições de países desenvolvidos utilizando amostras de 24 a 253 interseções semaforizadas, com um período de estudo total em média de, aproximadamente, três anos. A Tabela 1 traz um resumo destes principais estudos.

Tabela 1: Estudos com EAD/MEB na literatura.

Autor	Local	Sinistro-alvo	#Interseções	θ	IC 95%	Redução
Mahmassani et al. (2017)	Chicago	Vítimas feridas ou fatais	85	0.84	0,81;0,87	16%
Claros, Sun e Edara. (2016)	Missouri	Vítimas feridas ou fatais	24	0,93	0,90;0,96	7%
Contini e El-Basyouny (2016)	Edmonton	Total de colisões	50	0,82	0,75;0,88	18%
Llau et al (2015)	Flórida	Vítimas feridas ou fatais	20	0,81	0,62;0,99	19,1%
de Pauw et. al. (2014)	Flanders	Vítimas feridas ou fatais	253	0,86	0,73;1,02	14%
Lord e Geedipally (2014)	Chicago	Vítimas feridas ou fatais	90	1,05	1,01;1,09	-

É possível destacar que os estudos mencionados anteriormente utilizaram o EAD/MEB para controlar formalmente outros fatores que poderiam influenciar o DSV, como o VDMA e as características geométricas da interseção. Essas pesquisas forneceram evidências de que os DFE são eficazes na redução de sinistros com lesões graves e fatais. No entanto, é importante ressaltar a ausência de estudos semelhantes no Brasil, tornando-se essencial a realização de pesquisas que considerem condições específicas relativas a aspectos de comportamento de condução, bancos de dados de sinistros viários, além de atributos de geometria, fluxo veicular e tipo de controle semafórico.

3. MÉTODO

O presente estudo considerou interseções semaforizadas que tiveram a instalação de DFE no período entre 2014 a 2017, entretanto, o período total de análise, incluindo períodos de observações "antes" e "depois" teve início em 2010 e término em 2019. Neste estudo, o período mínimo antes da intervenção foi de 4 anos (2010-2013), enquanto o período mínimo após a intervenção foi de 2 anos (2018-2019). Ressalta-se que houve locais em que o aparelho foi desinstalado e, desta forma, considerou-se somente o período "depois" em que houve o funcionamento do dispositivo.

Para aplicação do EAD/MEB são necessárias informações do VDMA, de cada interseção, referente ao período de estudo. O fluxo veicular foi estimado a partir de diversas fontes de dados disponíveis como: a) contagens manuais de curta duração expandidas; b) dados de 160 equipamentos de fiscalização eletrônica e; c) séries históricas de laços indutivos do Centro de Controle de Tráfego em Área (CTA). O banco de dados inicial consolidado continha informação de fluxo veicular de 325 interseções para os anos 2010 a 2019. Esta base inicial foi utilizada juntamente com a técnica de Krigagem Universal para a estimativa dos fluxos veiculares de toda a série histórica (2010 a 2019) das interseções tratadas e das interseções utilizadas para o desenvolvimento e transferência temporal das FDSVs.

A Krigagem Universal é uma técnica geoestatística que utiliza um método de interpolação fundamentado em regressão, aproveitando um conjunto de dados observados e ponderando-os conforme as covariâncias espaciais, possibilitando o cálculo de pesos que levam a estimativas mais precisas (Bailey e Gatrell, 1995). A Krigagem é amplamente utilizada em diversos setores

da engenharia e no planejamento de transporte para resolver questões relacionadas à escassez de dados. Diversos estudos confirmaram que a Krigagem é mais eficaz na modelagem do VDMA do que abordagens não espaciais (Eom et al., 2006; Kim et al., 2016; Mathew e Pulugurtha, 2021)

A estimativa do fluxo veicular pela krigagem (modelagem), para cada interseção, envolveu variáveis como o número de faixas e a presença de semáforos, com validação baseada em correlações e as seguintes métricas de erro: Média e Mediana do Erro Absoluto em Porcentagem (MAPE e MedAPE, Mean Absolute Percentage Error and Median of Absolute Percentage Error, respectivamente) e Raiz Quadrada do Erro Quadrado Médio (RMSE, Root Mean Squared Error) (Hollander e Liu, 2008). Detalhes sobre esse processo podem ser encontrados em Nunes, Cunto e Marques (2023).

Após a estimação dos fluxos veiculares, foram desenvolvidas FDSV para aplicação do método ao longo do período de análise (2010 a 2019). Para isso foram utilizados dados dos sinistros com vítimas feridas e fatais do Sistema de Informações de Acidentes de Trânsito (SIAT-FOR) e da Plataforma Vida.

Desenvolveu-se inicialmente uma FDSV base para o ano de 2011, devido ser o ano com o maior número de observações de dados de tráfego disponíveis. A partir de 176 interseções semaforizadas que não foram tratadas com DFE, utilizou-se modelos lineares generalizados com distribuição binomial negativa. O modelo Binomial Negativo é frequentemente utilizado para modelar contagens de eventos que ocorrem em um intervalo fixo, especialmente quando há superdispersão nos dados.

A fórmula matemática do modelo linear generalizado com a distribuição binomial negativa utilizada para as FDSV, em interseções, é expressa por Hakkert, Hocherman e Mensah (1996), Sawalha e Sayed (2006) e AASHTO (2010):

$$Y = \alpha \left[\Pi_i (A_i)^{\beta_i} \right] . e^{\Sigma_j \left(\gamma_j B_j \right)} \tag{1}$$

em que,

Y : número esperado de acidentes em um intervalo de tempo (ano);

A e B : vetores de variáveis preditoras; e

α , β , γ : vetores de coeficientes do modelo.

A avaliação da qualidade do ajuste da FDSV2011 considerou indicadores como o AIC, os logaritmos da verossimilhança, o parâmetro de dispersão e gráficos de resíduos acumulados (cure plots).

A partir da FDSV2011 foram desenvolvidas as FDSV para os anos de 2010 a 2019 utilizando a método de transferência temporal, através do fator de calibração $\left(Cx\left(i \right) \right)$ para ajuste da FDSV para as condições locais (Equação 2), conforme descrito no Highway Safety Manual (AASHTO, 2010). Essa abordagem determina o ajuste do intercepto FDSV base, permitindo a incorporação de mudanças em fatores não controlados que influenciam na segurança viária ao longo dos anos. Presume-se que as variáveis da FDSV mantenham constantes suas influências ao longo do tempo (coeficientes do modelo), embora outros fatores, como a fiscalização, as condições meteorológicas e as alterações no método de coleta e tratamentos de dados de sinistros viários, por exemplo, possam ter mudado.

$$Cx\left(i \right) = \frac{\sum_{todos\ os\ locais\left(i \right)}^{sinistros\ observados}}{\sum_{todos\ os\ locais\left(i \right)}^{sinistros\ modelados}} \tag{2}$$

Por fim, as estimativas do efeito dos DFE nos sinistros com vítimas feridas e fatais e seus respectivos intervalos de confiança foram estimados com a aplicação das quatro etapas do EAD/MEB descritas a seguir (Hauer et al.,2002):

Etapa 1 - Estimativa de $\lambda(j)$ e $\pi(j)$

O valor de $\lambda(j)$ representa a segurança de uma entidade tratada j no período "depois", refletindo o nível de segurança observado nas entidades após a implementação do tratamento e sendo obtido pelo registro histórico dos sinistros viários (SIAT/FOR).

O valor de $\pi(j)$ estima a segurança da entidade tratada no período "depois", caso o tratamento não tivesse sido aplicado. Representa o nível de segurança que as entidades teriam experimentado no cenário sem tratamento. Para estimar o valor de $\pi(j)$ faz-se necessário considerar o número esperado de sinistros para a entidade j no período anterior, o qual é estimado pelo MEB (Equações 3 a 6) e corrigido pelos fatores diferentes da implantação (não conhecidos) que possam ter sido modificados (r_C), de acordo com a Equação 6.

$$E\{\kappa \mid K\} = \alpha \,.E\{\kappa\}_{antes} + (1-\alpha).K \tag{3}$$

$$\alpha = [1 + VAR\{K\} / E\{\kappa\}_{antes}]^{-1} \tag{4}$$

$$VAR\{K\} = b\left(E\{\kappa\}_{antes}^{2}\right) \tag{5}$$

$$r_C = E\{\kappa\}_{depois} / E\{\kappa\}_{antes} \tag{6}$$

Em que:

α = peso utilizado no cálculo do número esperado de sinistros;

$E\{\kappa \mid K\}$ = número esperado de sinistros para o período anterior à intervenção dados os sinistros observados K no mesmo período;

$E\{\kappa\}_{antes}$ = soma número esperado de sinistros para o período anterior à intervenção (entidades similares) - Valores obtidos a partir da FDSV2011 e o fator de calibração Cx para cada ano;

b = parâmetro de superdispersão dispersão da distribuição binomial negativa estimada no processo de maximização da verossimilhança com o Método de Newton-Rapshon;

$K =$ número observado de sinistros para o período anterior à intervenção;

$E\{\kappa\}_{depois}$ = soma do número previsto de sinistros para o período depois da intervenção - Valores obtidos a partir da FDSV2011 e o fator de calibração Cx para cada ano.

Com estes parâmetros estimados, $\pi(j)$ pode ser estimado por:

$$\pi(j) = E\{\kappa / K\} \cdot r_C \tag{7}$$

Etapa 2 - Estimativa da $VAR\{\hat{\lambda}(j)\}$ e $VAR\{\hat{\pi}(j)\}$

$VAR\{\lambda(j)\}$: assume-se que o número de sinistros observados em uma determinada entidade é compatível com a distribuição de Poisson (Hauer et al., 2002). Sob essa premissa, a variância de $\lambda(j)$ é igual ao próprio valor de $\lambda(j)$.

A $VAR\{\pi(j)\}$ é estimada pela Equação 8 abaixo:

$$VAR\{\pi(j)\} = R_c^2 \times VAR\{\kappa(j)\} \tag{8}$$

Ressalte-se que com o objetivo de avaliar o efeito global da intervenção (entidades compostas), as demais etapas são aplicadas com a utilização dos somatórios de $\lambda(j)$, $\pi(j)$, $VAR\{\lambda(j)\}$ e $VAR\{\pi(j)\}$.

Etapa 3 - Estimativa de δ e θ

Na etapa são estimados o valor que representa a redução (ou aumento) na frequência esperada de sinistros alvo por unidade de tempo (δ) , além do θ, que é a razão entre a segurança com o tratamento e o que teria sido sem o tratamento. Intervenções bem sucedidas apresentam valores de θ e seus intervalos de confiança menores que 1. Por outro lado, o valor de $(1-\theta)x100$ pode ser empregado para calcular a porcentagem de redução na frequência esperada de sinistros após a intervenção. As expressões para as estimativas de δ e θ estão apresentadas abaixo.

$$\delta = \pi - \lambda \tag{9}$$

$$\theta = (\lambda / \pi) / \left[1 + VAR\{\pi\} / \pi^2\right] \tag{10}$$

Etapa 4 - Estimativa de $VAR\{\hat{\delta}\}$ e $VAR\{\hat{\theta}\}$

Na quarta etapa, através da utilização dos valores de $\lambda(j)$ e $\pi(j)$ da primeira etapa e $VAR\{\lambda(j)\}$ e $VAR\{\pi(j)\}$ da segunda etapa, é possível estimar $VAR\{\hat{\delta}\}$ e $VAR\{\widehat{\theta}\}$, conforme as Equações 11 e 12.

$$VAR\{\hat{\delta}\} = VAR\{\hat{\pi}\} + VAR\{\hat{\lambda}\} \tag{11}$$

$$VAR\{\hat{\theta}\} = \theta^2[\left(VAR\{\hat{\lambda}\} / \lambda^2\right) + \left(VAR\{\hat{\pi}\} / \pi^2\right)]/[1 + \left(VAR\{\hat{\pi}\} / \pi^2\right)]^2 \tag{12}$$

Para verificar eficácia da implantação é necessário enfatizar a importância de considerar o grau de variabilidade do valor de θ ($VAR\{\theta\}$). Se a variância for alta, a estimativa de θ pode afetar a confiança na eficácia do tratamento (incluir valores de θ em torno de 1). Além disto, deve-se analisar os intervalos de confiança para verificar a faixa em que θ pode variar. Desta forma, foram estimados intervalos de confiança de 66% e 95% para o indicador θ.

Os resultados encontrados com o EAD/MEB foram comparados com as análises do tipo Naïve e com o Grupo de Comparação. Para o EAD/CG foram definidas interseções de comparações pareadas, considerando a similaridade geométrica e operacional além da proximidade espacial, ou seja, para cada interseção tratada foi selecionada uma interseção similar, porém sem tratamento. Maiores detalhes sobre os métodos empregados em cada uma das abordagens (Naïve e CG) podem ser encontrados em Hauer et al. (2002).

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO EB E RESULTADOS

Para aplicação do EAD/MEB foram desenvolvidas e avaliadas três FDSV distintas para estimação de sinistros para o ano de 2011, a partir de 176 interseções. O primeiro modelo foi construído considerando apenas a variável VDMA. No segundo modelo, além de VDMA, foi incluído o número

de faixas e, por fim, o terceiro modelo foi expandido para incluir não apenas VDMA e número de faixas, mas também o número de pistas da via como parâmetros de predição. A Tabela 2 apresenta as variáveis utilizadas e a estatística descritiva:

Tabela 2: Variáveis utilizadas para a FDSV.

Parâmetros de Predição	Min	Mediana	Média	Máx
Sinistros Totais com Vítimas	0,0	1,0	1,2	10,0
Nº de Faixas	8,0	12,0	11,7	20,0
Nº de Pistas	3,0	6,0	5,4	9,0
VDMA	7917	30774	32391	76182

Para cada um desses modelos, foram estimados os parâmetros de AIC, X_2, $X_2 crítico$ e -2l e realizadas análises dos resultados obtidos. Na análise comparativa dos três modelos de previsão de sinistros desenvolvidos, observou-se que o modelo 2 (VDMA + número de faixas) apresentou os melhores resultados de ajuste (menores AIC e verossimilhança significativamente maior). Além disso, o valor X_2 do modelo 2 foi inferior ao valor do $X_2 crítico$, o que reforça a adequação do modelo aos dados experimentais e a validade de suas previsões.

A análise dos resíduos para o modelo proposto foi realizada com o Cure Plot (gráfico de resíduos acumulados (Figura 1). Pela análise do gráfico Cure Plot, a FDSV2011 apresentou-se satisfatória, com os resíduos acumulados (linhas contínuas) oscilando em torno de zero, caracterizando um comportamento de "random walk". Os resíduos não ultrapassaram os limites de dois desvios-padrões (linha tracejada) e terminaram próximos a zero, indicando uma boa adequação do modelo. A FDSV2011 utilizada encontra-se na expressão abaixo.

$$E(K) = 1,7277689\, x 10^{-5} \; .VDMA^{0,9553143} \; .e^{(0,0929628 \; .Nfaixas)} \tag{13}$$

em que:

$E(K)$: número esperado de sinistros com vítimas no ano de 2011 para interseções semaforizadas.

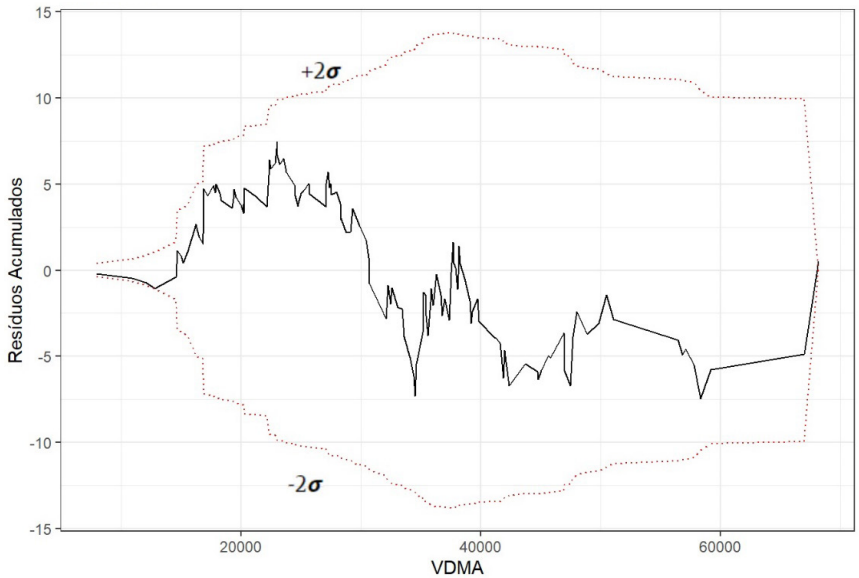


Figura 1. Cure plot - Modelo 2.

No processo de transferência temporal da FDSV é importante considerar diversos fatores que podem impactar a precisão das previsões, como mudanças no processo de coleta do banco de dados e outros ajustes relevantes. Esses fatores são formalmente incorporados através da correção do intercepto para o ano a ser transferido. Desta forma, de posse da FDSV2011, foram calibradas FDSVs temporalmente para os outros anos em estudo, e foram estimados os coeficientes de calibração C_x conforme descrito na seção de metodologia (Equação 1).

O valor de C_x foi então aplicado ao valor de intercepto na FDSV2011, resultando na estimação de novas FDSV, ajustada para os anos analisados. A Tabela 3 apresenta os valores de bem como os valores de intercepto da FDSV para cada ano específico.

Tabela 3: Valores de C_x e intercepto para cada ano.

Ano	Sinistros Modelados	Sinistros Observados	C_x	Intercepto
2010	214	240	1,121	1,9377E-05
2011	-	-	-	1,7277E-05
2012	215	259	1,205	2,0814E-05
2013	220	194	0,882	1,5236E-05
2014	225	133	0,591	1,0213E-05
2015	229	274	1,197	2,0673E-05
2016	236	330	1,398	2,4159E-05
2017	242	267	1,103	1,9063E-05
2018	250	221	0,884	1,5273E-05
2019	253	223	0,881	1,5229E-05

A Tabela 4 apresenta as interseções avaliadas, com os seus respectivos valores de $\lambda(j)$, $\pi(j)$, $VAR\{\lambda(j)\}$ e $VAR\{\pi(j)\}$ (Etapas 1 e 2).

Tabela 4: Valores de $\lambda(j)$, $\pi(j)$, $VAR\{\lambda(j)\}$ e $VAR\{\pi(j)\}$ para as 36 interseções analisadas.

Locais		Período "antes"							Período "depois"				Etapas 01 e 02			
Id	Cruzamento	ΣK	Meses	E{k} - antes	Var{k}	α (MEB)	E{κ/K}	Var{k}	Σλ	Meses	E{k} - depois	Rc	π(j)	Var{π(j)}	λ(j)	Var{λ(j)}
1	AV. SILAS MUNGUBA X AV. BERNARDO MANOEL	18	49	12,4	13,76	0,47	15	8	48	70	15,84	1,28	20	13	48	48
2	AV. SILAS MUNGUBA X AV. GERMANO FRANCK	13	49	12,9	14,98	0,46	13	7	14	64	15,49	1,20	16	10	14	14
3	AV. CARNEIRO DE MENDONÇA X AV. LINEU MACHADO	4	53	12,3	13,44	0,48	8	4	1	23	4,89	0,40	3	1	1	1
4	AV. THOMAZ COELHO X AV. CASTELO DE CASTRO	10	53	15,7	22,08	0,42	12	7	7	66	17,50	1,11	14	9	7	7

Tabela 4: Continuação...

Locais		Período "antes"							Período "depois"				Etapas 01 e 02			
Id	Cruzamento	ΣK	Meses	E{k} - antes	Var{k}	α (MEB)	E{κ/K}	Var{k}	Σλ	Meses	E{k} - depois	Rc	π(j)	Var{π(j)}	λ(j)	Var{λ(j)}
5	AV. GODOFREDO MACIEL X AV. GERMANO FRANCK	4	54	12,4	13,73	0,47	8	4	8	65	15,13	1,22	10	6	8	8
6	AV. DEP. MOREIRA DA ROCHA X AV. RUI BARBOSA	17	54	9,3	7,79	0,55	13	6	2	65	11,30	1,21	16	9	2	2
7	AV. EDUARDO GIRÃO X AV. SILVA JUNIOR	10	54	12,5	13,99	0,47	11	6	5	65	14,70	1,18	13	8	5	5
8	RUA JULIO ABREU X RUA OITO DE SETEMBRO	5	57	12,1	13,04	0,48	8	4	5	62	13,06	1,08	9	5	5	5
9	AV. SANTOS DUMONT X RUA ALMEIDA PRADO	2	57	12,7	14,43	0,47	7	4	3	50	12,33	0,97	7	4	3	3
10	AV. COSTA E SILVA X RUA CEL TIBÚRCIO	15	58	15,2	20,78	0,42	15	9	12	61	15,06	0,99	15	8	12	12
12	RUA GUILHERME ROCHA X RUA PADRE MORORÓ	2	58	11,6	12,12	0,49	7	3	4	61	13,08	1,12	8	4	4	4
13	AV. JOSÉ BASTOS X RUA DELMIRO DE FARIAS	10	59	14,2	18,04	0,44	12	7	5	60	15,39	1,08	13	8	5	5
14	AV. 13 DE MAIO X AV. UNIVERSIDADE	14	60	14,9	19,95	0,43	14	8	10	59	14,44	0,97	14	8	10	10
15	AV. PONTES VIEIRA X RUA VICENTE LEITE	7	60	12,5	13,96	0,47	10	5	4	37	8,53	0,68	7	2	4	4
16	AV. GODOFREDO MACIEL X RUA ANT BANDEIRA	12	61	14,5	18,77	0,44	13	7	7	58	14,42	1,00	13	7	7	7
17	AV. DOM LUIS X AV. VIRGILIO TAVORA	10	56	14,2	18,05	0,44	12	7	12	63	15,23	1,07	13	8	12	12
18	AV. JOVITA FEITOSA X AV. HUMBE MONTE	16	64	16,9	25,47	0,40	16	10	13	55	14,21	0,84	14	7	13	13
19	AV. BEZERRA DE MENEZES X RUA RIBEIRO DA SILVA	10	67	16,2	23,58	0,41	13	7	1	52	12,66	0,78	10	5	1	1
20	AV. RAUL BARBOSA X RUA MAJOR ARAÚJO AGUIAR	0	67	16,9	25,49	0,40	7	4	6	52	12,57	0,74	5	2	6	6

Tabela 4: Continuação...

Locais		Período "antes"							Período "depois"				Etapas 01 e 02			
Id	Cruzamento	ΣK	Meses	E{k} - antes	Var{k}	α (MEB)	E{κ/K}	Var{k}	Σλ	Meses	E{k} - depois	Rc	π(j)	Var{π(j)}	λ(j)	Var{λ(j)}
21	RUA VERBENA X RUA VITAL BRASIL	10	70	15,3	20,82	0,42	12	7	6	49	10,71	0,70	9	3	6	6
22	AV. SANTOS DUMONT X AV. DESEMBARGADOR MOREIRA	10	55	14,1	17,89	0,44	12	7	15	57	13,00	0,92	11	6	15	15
23	AV. EDUARDO GIRÃO X RUA JÚLIO CÉSAR	10	71	16,3	23,80	0,41	13	7	4	48	11,38	0,70	9	4	4	4
24	AV. EDUARDO GIRÃO X RUA DAMASCENO GIRÃO	3	74	17,3	26,69	0,39	9	5	1	45	10,60	0,61	5	2	1	1
25	AV. RAIMUNDO GIRÃO X AV. RUI BARBOSA	5	51	11,4	11,62	0,50	8	4	7	68	13,92	1,22	10	6	7	7
26	AV.CEL CARVALHO X RUA HERMES P PARAHYBA	13	74	17,4	27,06	0,39	15	9	6	45	15,27	0,88	13	7	6	6
27	AV. EDUARDO GIRÃO X AV. DOS EX EXPEDICIONÁRIOS	26	76	19,1	32,77	0,37	23	15	14	43	10,63	0,56	13	5	14	14
28	RUA ANSELMO NOGUEIRA X RUA EMÍLIO DE MENEZES	26	76	16,8	25,15	0,40	22	13	6	43	9,16	0,55	12	4	6	6
29	AV. HIST. RAIMUNDO GIRÃO X RUA ILDEFONSO ALBANO	5	53	16,0	23,01	0,41	10	6	8	66	13,80	0,86	8	4	8	8
30	RUA ISAC AMARAL X RUA JOAQUIM NABUCO	6	77	15,7	22,01	0,42	10	6	0	25	4,96	0,32	3	1	0	0
31	AV. EDUARDO GIRÃO X AV. LUCIANO CARNEIRO	21	77	19,4	33,62	0,37	20	13	12	42	10,28	0,53	11	4	12	12
32	AV. ABOLIÇÃO X AV DES. MOREIRA	16	80	20,5	37,50	0,35	18	11	12	39	8,66	0,42	7	2	12	12
33	AV. DEP PAULINO ROCHA X AV. POMPÍLIO GOMES	9	83	19,0	32,38	0,37	13	8	1	5	0,59	0,03	0	0	1	1
34	AV. PONTES VIEIRA X AV VIRGÍLIO TÁVORA	8	83	19,3	33,43	0,37	12	8	4	36	7,97	0,41	5	1	4	4

Tabela 4: Continuação...

Locais		Período "antes"								Período "depois"			Etapas 01 e 02			
Id	Cruzamento	ΣK	Meses	E{k} - antes	Var{k}	α (MEB)	E{κ/K}	Var{k}	Σλ	Meses	E{k} - depois	Rc	π(j)	Var{π(j)}	λ(j)	Var{λ(j)}
35	AV. PRESIDENTE COSTA E SILVA X CIDADE JARDIM	23	85	20,2	36,46	0,36	22	14	4	34	6,79	0,34	7	2	4	4
36	RUA TORRES CÂMARA X RUA TIBÚRCIO CAVALCANTE	9	86	17,5	27,30	0,39	12	8	2	33	6,08	0,35	4	1	2	2
													368	187	292	292
													Σπ(j)	Σ Var{π(j)}	Σλ(j)	Σ Var{λ(j)}

A Tabela 5 traz os resultados da aplicação das etapas 3 e 4, com a aplicação do EAD/MEB, além do Naïve e GC.

Tabela 5: Resultados EAD/MEB, EAD/Naïve e EAD/GC com intervalo de confiança e desvio padrão.

	EAD/Naïve	EAD/GC	EAD/MEB
δ	39	88	76
θ	0,88	0,76	0,79
Redução	0,12	0,24	0,21
$VAR\{\hat{\delta}\}$	603,55	1635,51	479,09
desv $\{\hat{\delta}\}$	24,57	40,44	21,89
$VAR\{\hat{\theta}\}$	0,00	0,01	0,00
desv $\{\hat{\theta}\}$	0,07	0,08	0,06
95% de confiança			
δ	-10,39	7,61	31,79
	87,88	169,38	119,35
θ	0,74	0,59	0,67
	1,02	0,93	0,92
Redução	0,26	0,41	0,33
	-0,02	0,07	0,08
66% de confiança			
δ	14,18	48,05	53,68
	63,31	128,94	97,46
θ	0,81	0,68	0,73
	0,95	0,85	0,86
Redução	0,19	0,32	0,27
	0,05	0,15	0,14

O EAD/MEB apresenta uma estimativa de θ de 0,79 (redução de 21%) com um desvio padrão baixo, indicando alta precisão e confiabilidade, e um intervalo de confiança relativamente estreito que reforça a consistência da estimativa. Sobre a variabilidade dos resultados de θ é possível então afirmar que em 95% das vezes em que esse experimento for repetido, os valores de θ estarão entre (0,67 e 0,92).

Em contraste, o Método Naïve, com uma estimativa de θ de 0,88, exibe maior variância e um intervalo de confiança mais amplo, o qual inclui o valor de 1 (efeito nulo da intervenção) para o nível de significância de 95%. Os resultados obtidos pela aplicação do EAD/GC $\left(\theta = 0,76\right)$ considerando sua variabilidade, sugerem uma considerável similaridade com as estimativas de redução obtidas através do EAD/MEB.

Em relação aos EAD/MEB disponíveis em outras jurisdições, os resultados encontrados para Fortaleza, indicam que os DFE tiveram desempenho relativamente similar. Ao todo, cinco estudos (Mahmassani et al., 2017; Claros, Sun e Edara, 2016; Contini e El-Basyouny, 2016; Llau et al., 2015; de Pauw et al., 2014) encontraram reduções entre (7% a 19,1%), menores do que o resultado encontrado, enquanto um dos estudos sugere que o efeito da DFE foi superestimado (Lord e Geedipally, 2014). Dentre os fatores que podem estar associados a essas diferenças, algumas hipóteses podem ser levantadas em relação ao contexto deste trabalho (vias urbanas de Fortaleza):

a) Perfil de velocidade nas proximidades da interseção semaforizada: em locais com menor adensamento do uso do solo, menor densidade de interseções por km de via e velocidade limite maior, é possível que o perfil de velocidade média nas proximidades do semáforo sejam maiores e consequentemente, em caso de sinistros, as severidades tendem a aumentar. O efeito do DFE nestas situações pode ser maior;
b) A configuração geral do projeto de sinalização horizontal e vertical do dispositivo em conjunto com a geometria da interseção podem facilitar a visualização do dispositivo e consequentemente aumentar a taxa de obediência à fiscalização;
c) O nível de comunicação/divulgação a respeito da instalação e operação dos DFE entre as autoridades gestoras do tráfego e os usuários em geral contribui para a mudança de forma mais duradoura e espacialmente mais abrangente (general deterrence) do comportamento violador dos condutores.

Em Fortaleza, as intervenções de instalação de DFE aconteceram predominantemente em regiões de médio a alto adensamento populacional (9807 hab/km^2) e com elevada densidade de interseções semaforizadas (3,46 semaf./km^2). Quanto ao projeto executivo do dispositivo, existe uma padronização com placas de advertência no braço semafórico, no totem do dispositivo de fiscalização e ao longo da via e, com relação à divulgação, não são feitas campanhas regulares de comunicação com foco na presença de fiscalização eletrônica na cidade.

5. CONCLUSÕES

A implantação de interseções semaforizadas em áreas urbanas tem se mostrado mais eficaz em reduzir colisões transversais, implicando, entretanto, no aumento da frequência de sinistros do tipo colisão traseira. Considerando trajetórias e cinemáticas envolvidas nesse tipo de sinistro, é válido também, sustentar que, de maneira geral estes dispositivos atuam na redução dos sinistros de maior severidade. Entretanto, ainda não existe consenso sobre o efeito da implantação de dispositivos de fiscalização eletrônica de avanço semafórico e de excesso de velocidade para o cenário brasileiro. Além disso, ainda não foram encontrados, em jurisdição nacional, nenhum estudo do tipo antes e depois com a aplicação do método empírico de Bayes, considerado, dentre os métodos de EAD, aquele com maior robustez para tratar com fenômenos complexos como o viés de seleção.

A aplicação do método empírico de Bayes em quatro etapas, conforme proposto por Hauer et al., (2002), em 36 interseções semaforizadas em Fortaleza, careceu de informações consideravelmente detalhadas além do desenvolvimento de FDSV para todos os anos do estudo (2010 a 2019). Fez-se necessária a aplicação de técnicas de interpolação espacial (Krigagem Universal) para construir uma série histórica dos fluxos veiculares nos 36 locais estudados além dos 176 locais utilizados para o desenvolvimento da FDSV.

O desenvolvimento das FDSV para os anos do estudo foi efetivado através da recalibração do intercepto da FDSV base (2011) utilizando o método proposto no Highway Capacity Manual. Sobre este aspecto ressalta-se que, existem pesquisas que questionam esse método de transferência por assumir que o parâmetro de dispersão da FDSV base é o mesmo para todos os outros anos, ou seja, que a distribuição dos dados para os outros anos tem a mesma dispersão do ano base. Neste estudo assumiu-se que essa premissa era verdadeira.

No que diz respeito da aplicação do Método EB, os resultados mostraram que a fiscalização eletrônica de velocidade e de avanço semafórico em Fortaleza teve um impacto de 21% (95% IC = 0,08; 0,33) na redução de ocorrências com vítimas feridas e fatais nas interseções analisadas.

Na comparação com os métodos EAD/Naïve e EAD/GC, observou-se uma subestimação do efeito da fiscalização pelo método Naïve, o qual ainda incluiu o valor 1, em seu intervalo de confiança (95%), não sendo possível portanto, por esse método, afirmar que houve redução. Os métodos GC e EB apresentaram resultados similares, incluindo intervalos de confiança comparáveis (95%).

Os resultados podem ser analisados sob duas óticas. A primeira, de natureza metodológica, considera o esforço computacional e o custo de aquisição de dados necessários à aplicação adequada do EAD/MEB. Com resultados similares entre GC e MEB, parece razoável que esse estudo venha a validar novos estudos utilizando o método EAD/GC. Entretanto, sob uma ótica fenomenológica, o EAD/MEB será sempre superior ao EAD/GC por considerar formalmente fatores como o fluxo veicular, número de faixas, além de potenciais vieses de seleção.

A redução observada com o Método EB, sugere que as medidas implementadas tiveram um impacto positivo na segurança, alinhando-se com a literatura existente, embora os resultados possam variar dependendo do contexto e da metodologia específica adotada. A análise revelou que a intervenção foi eficaz em melhorar a segurança, com um impacto ligeiramente superior quando comparado a alguns estudos similares na área. Dentre os esforços adicionais relacionados a esse trabalho, ressaltam-se os seguintes potenciais desdobramentos:

a) A krigagem universal é formalmente recomendada para fenômenos contínuos. Desta forma, considera-se importante desenvolver e comparar outros métodos de imputação de dados de fluxo veicular que considerem de forma mais adequada a natureza desses dados;
b) Ampliar a avaliação do efeito da fiscalização eletrônica de velocidade e avanço semafórico, tendo como sinistro alvo as colisões traseiras e transversais em interseções semaforizadas. Nesse caso é necessário elaborar uma nova FDSV para tal tipo de sinistro;
c) Avaliar a consistência dos resultados obtidos em outras jurisdições brasileiras e internacionais através da meta-análise;

Este trabalho demonstrou a eficácia da fiscalização eletrônica de velocidade e de avanço semafórico, com a utilização do método empírico de Bayes. Espera-se contribuir para consolidar a compreensão da eficácia dos DFE baseada em evidências, fomentar a utilização desse tipo de estudo comparativo em diversas regiões do país, reforçar a necessidade de dados integrados

sobre sinistros e atributos físicos e operacionais de vias e incentivar a construção do referencial teórico de EAD mais avançados.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Paulo Bruno Souza Nunes: Administração de projetos, Conceitualização, Curadoria de dados, Escrita — rascunho original, Investigação, Metodologia, Programas, Recursos; Flávio José Craveiro Cunto: Análise formal, Escrita — revisão e edição, Supervisão, Validação, Visualização.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

Nada a declarar.

USO DE TECNOLOGIA ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Foi utilizado o ChatGPT para correções de erros gramaticais.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Brasil, sob o Código de Financiamento 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP). Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido por essas instituições.

REFERÊNCIAS

AASHTO (2010) *Highway Safety Manual.* Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Ahmed, M.M. e M. Abdel-Aty (2015) Evaluation and spatial analysis of automated red-light running enforcement cameras. *Transportation Research Part C, Emerging Technologies*, v. *50*, p. 130-140. DOI: 10.1016/j.trc.2014.07.012.

Bailey, T.C. e A.C. Gatrell (1995). *Interactive Spatial Data Analysis.* Harlow, England: Prentice Hall.

Christie, S.M.; R.A. Lyons; F.D. Dunstan et al. (2003) Are mobile speed cameras effective? A controlled before and after study. *Injury Prevention*, v. *9*, n. 4, p. 302-326. DOI: 10.1136/ip.9.4.302. PMid:14693888.

Claros, B.; C. Sun e P. Edara (2016) Safety effectiveness and crash cost benefit of red light cameras in Missouri. *Traffic Injury Prevention*, v. *18*, n. 1, p. 70-76. DOI: 10.1080/15389588.2016.1188203. PMid:27348043.

Contini, L. e K. El-Basyouny (2016) Lesson learned from the application of intersection safety devices in Edmonton. *Accident; Analysis and Prevention*, v. *94*, p. 127-134. DOI: 10.1016/j.aap.2016.05.023. PMid:27286175.

Cunto, F.J.C.; Nodari, C.T. e Barbosa, H.M. (2014) Transferência de modelos de previsão de acidentes entre cidades brasileiras. *Transportes*, v. 22, n. 3, p. 76-85. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v22i3.790>.

De Pauw, E.; S. Daniels; T. Brijs et al. (2014) To brake or to accelerate? Safety effects of combined speed and red light cameras. *Journal of Safety Research*, v. *50*, p. 59-65. DOI: 10.1016/j.jsr.2014.03.011. PMid:25142361.

Elvik, R. (2008) The predictive validity of empirical Bayes estimates of road safety. *Accident Analysis & Prevention*, v. 40, n. 5, p. 1964-1969. DOI: 10.1016/j.aap.2008.05.008.

Elvik, R. (2011) Developing an accident modification function for speed enforcement. *Safety Science*, v. *49*, n. 6, p. 920-925. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.02.016.

Eom, J.K.; M.S. Park; T.Y. Heo et al. (2006) Improving the prediction of annual average daily traffic for non freeway facilities by applying a spatial statistical method, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. *1968*, n. 1, p. 20-9. DOI: 10.1177/0361198106196800103.

FHWA (2021) Intersection safety. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/research>. (acesso em 15/08/2024).

Gu, Y.; D. Liu; R. Arvin et al. (2023) Predicting intersection crash frequency using connected vehicle data: a framework for geographical random forest. *Accident Analysis & Prevention*, v. *179*, p. 106880. DOI: 10.1016/j.aap.2022.106880. PMid:36345113.

Hakkert, A.S.; L. Hocherman e A. Mensah (1996) *Levels of safety on interurban roads. Transportation Research Record*, v. 1553, n. 1, p. 95-102. DOI: 10.1177/036119819615530011 4.

Hauer, E. (1997) *Observational before-after studies in road safety.* Oxford: Pergamon Press, Elsevier Science Ltd.

Hauer, E.; D. Harwood; F. Council et al. (2002) Estimating safety by the empirical Bayes method: a tutorial. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. *1784*, n. 1, p. 126-131. DOI: 10.3141/1784-16.

Hollander, Y. e R. Liu (2008) The principles of calibrating traffic microsimulation models. *Transportation*, v. *35*, n. 3, p. 347-362. DOI: 10.1007/s11116-007-9156-2.

Hoye, A. (2015) *Safety Effects of Section Control: An Empirical Bayes Evaluation.* Oslo: Institute of Transport Economics, Department of Safety, Security and Environment.

Hu, W. e J.B. Cicchino (2017) Effects of turning on and off red light cameras on fatal crashes in large U.S. cities. *Journal of Safety Research*, v. *61*, p. 141-148. DOI: 10.1016/j.jsr.2017.02.019. PMid:28454859.

Kim, S.; D. Park; T.-Y. Heo et al. (2016) Estimating vehicle miles traveled (VMT) in urban areas using regression kriging. *Journal of Advanced Transportation*, v. *50*, n. 5, p. 769-785. DOI: 10.1002/atr.1374.

Ko, M.; S.R. Geedipally; T.D. Walden et al. (2017) Effects of red light running camera systems installation and then deactivation on intersection safety. *Journal of Safety Research*, v. *62*, p. 117-126. DOI: 10.1016/j.jsr.2017.06.010. PMid:28882258.

Kumphong, J.; T. Satiennam; W. Satiennam et al. (2019) Change of motorcycle speed under speed enforcement camera on urban arterial in Khon Kaen City, Thailand. *International Journal of GEOMATE*, v. *16*, n. 56, p. 159-164. DOI: 10.21660/2019.56.4746.

Li, H.; D.J. Graham e A. Majumdar (2013) The impacts of speed cameras on road accidents: an application of propensity score matching methods. *Accident Analysis & Prevention*, v. *60*, p. 148-157. DOI: 10.1016/j.aap.2013.08.003. PMid:24056286.

Llau, A.F.; N.U. Ahmed; H.M.R.U. Khan et al. (2015) The impact of red light cameras on crashes within Miami–Dade County, Florida. *Traffic Injury Prevention*, v. 16, n. 8, p. 773-780. DOI: 10.1080/15389588.2015.1023896.

Lord, D. e S.R. Geedipally (2014) *Safety Effects of the Red-light Camera Enforcement Program in Chicago, Illinois. Final version*. Illinois: Chicago Tribune. Research Report prepared for the Chicago Tribune.

Mahmassani, H.S.; J.L. Schofer; B.L. Johgnson et al. (2017) *Chicago Red Light Enforcement. Best Practices and Program Road Map.* Evanston: Northwestern University, The Transportation Center.

Mathew, S. e S.S. Pulugurtha (2021) Comparative assessment of geospatial and statistical methods to estimate local road annual average daily traffic. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, v. *147*, n. 7, p. 04021035. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000542.

McCartt, A.T. e Hu, W. (2014) Effects of red light camera enforcement on red light violations in Arlington County, Virginia. *Journal of Safety Research*, v. 48, p. 57-62. DOI: 10.1016/j.jsr.2013.12.00.

Nunes, P.B.S.; F.J.C. Cunto e S.F. Marques (2023) Estimação do volume de tráfego em interseções de fortaleza com base na Krigagem Universal. In: *Anais do congresso de pesquisa e ensino em transportes*. Santos: ANPET. Anais eletrônicos. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2023/trabalhos/estimacao-do-volume-de-trafego-em-intersecoes-de-fortaleza-com-base-na-krigagem?lang=pt-br>. (acesso em: 21/08/2024)

OMS (2023) *Global Status Report on Road Safety 2023*. Geneva: OMS. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684>. (acesso em 04/07/2024).

Peña, C.C. (2011) *Caracterização e análise dos acidentes em interseções: Estudo de caso em rodovias de Santa Catarina. Dissertação (mestrado).* Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

Persaud, B. e Lyon, C. (2007) Empirical Bayes before–after safety studies: lessons learned from two decades of experience and future directions. *Accident Analysis & Prevention*, v. 39, n. 3, p. 548-558. DOI: 10.1016/j.aap.2006.09.009.

Retting, R.A. e S.Y. Kyrychenko (2002) Reductions in injury crashes associated with red light camera enforcement in Oxnard, California. *American Journal of Public Health*, v. *92*, n. 11, p. 1822-5. DOI: 10.2105/AJPH.92.11.1822. PMid:12406815.

Reyad, P.; E. Sacchi e T. Sayed (2017) Traffic conflict–based before–after study with use of comparison groups and the empirical Bayes method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. *2659*, n. 1, p. 15-25. DOI: 10.3141/2659-02.

Sawalha, Z. e T. Sayed (2006) Traffic accident modeling: some statistical issues. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. *33*, n. 9, p. 1115-1124. DOI: 10.1139/l06-056.

Walden, T.D.; S.R. Geedipally; M. Ko et al. (2012) *Evaluation of automated traffic enforcement systems in Texas.* Austin: Traffic Operations Division, Texas Department of Transportation. Disponível em: <http://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/trf/red_light/auto_traffic.pdf>. (acesso em 04/07/2024).