

ANÁLISE COMPARATIVA DE ALTERNATIVAS METODOLÓGICAS PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS RURAIS DE PISTA SIMPLES

César Luís Andriola
Andrey Zuriel Ebeling Bonatto
Christine Tessele Nodari
Daniel Sergio Presta García
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Laboratório de Sistemas de Transportes (LASTRAN)

RESUMO

Este trabalho trata do processo de identificação de pontos críticos em rodovias. O resultado da identificação de pontos críticos é altamente dependente da qualidade e quantidade de dados disponíveis, bem como das alternativas metodológicas utilizadas. Nesse trabalho, foram analisadas as combinações de 5 métodos de segmentação da rede viária, 8 medidas de desempenho e 2 métodos de triagem, resultando em 80 combinações de alternativas metodológicas para a identificação de pontos críticos. Essas combinações foram avaliadas por meio de quatro critérios quantitativos: *Site Consistency Test*, *Method Consistency Test*, *Total Rank Differences Test* e *Total Score Test*. Os melhores resultados foram encontrados para as medidas de desempenho baseadas em Métodos de Previsão de Acidentes (MPAs) e no método Empírico de Bayes (EB), para diferentes combinações de segmentação e triagem. Os métodos de segmentação analisados apresentaram resultados distintos, dependendo do critério de avaliação utilizado. Em relação à triagem, apesar de recomendado pelo Highway Safety Manual (HSM), o *Sliding Window Method* se mostrou inferior ao *Simple Ranking Method*.

ABSTRACT

This paper deals with the process of identifying road hotspots. The result of identifying hotspots depends on the quality and quantity of available data, as well as on the methodological alternatives used. In this work, the combinations of 5 road network segmentation methods, 8 performance measures and 2 screening methods were analyzed, resulting in 80 combinations of methodological alternatives for the identification of hotspots. These combinations were evaluated using four quantitative tests: *Site Consistency Test*, *Method Consistency Test*, *Total Rank Differences Test* e *Total Score Test*. The best results were found for the performance measures that are based on Safety Performance Functions (SPFs) and the Bayes' Empirical Method (EB), for different combinations of segmentation and screening. The segmentation methods analyzed showed different results, depending on the evaluation test used. Regarding the screening methodology, although recommended by the Highway Safety Manual (HSM), the *Sliding Window Method* proved to be inferior to the *Simple Ranking Method*.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de segurança viária (RISM, sigla em inglês), primeiro pilar proposto pela ONU no Plano de Ação Global para a Década - 2011 a 2020 (WHO, 2011), é composta de diversos procedimentos que auxiliam a tomada de decisão das autoridades no que se refere à segurança viária (Persia *et al.*, 2016). Segundo o *Highway Safety Manual* (HSM), a gestão de segurança viária pode ser dividida nas seguintes etapas cíclicas: (i) seleção de pontos críticos, (ii) diagnóstico, (iii) seleção de contramedidas, (iv) avaliação econômica, (v) priorização de projetos e (iv) avaliação da efetividade dos projetos (AASHTO, 2010).

Esse trabalho trata da etapa de seleção de pontos críticos, que é a base para as outras etapas da gestão de segurança viária. A seleção de pontos críticos envolve a identificação, análise e ranqueamento dos locais críticos, sendo particularmente crucial para o alcance dos melhores benefícios a partir dos escassos recursos disponíveis (Lee *et al.*, 2019). Erros nessa etapa são as principais causas de falsos positivos (investigar a segurança de um local onde não é necessário) e falsos negativos (não investigar a segurança de um local onde é necessário) (Montella, 2010).

De forma prática, a etapa de seleção de pontos críticos em segmentos rodoviários pode ser

dividida em três subetapas, que exigem tomada de decisão, devido à diversidade de alternativas metodológicas: (i) segmentação da rede viária, (ii) seleção das medidas de desempenho, e (iii) aplicação do método de triagem. Na próxima seção, as alternativas metodológicas avaliadas são descritas em detalhe, incluindo considerações sobre seu uso e avaliação na literatura.

Na revisão da literatura internacional foram identificados trabalhos que avaliaram o desempenho dos diferentes métodos de segmentação e das diferentes medidas de desempenho na etapa de seleção de pontos críticos. No entanto, não foram identificados trabalhos avaliando o efeito dos métodos de triagem utilizados, parte relevante da etapa de seleção de pontos críticos. No Brasil, o único trabalho identificado foi o de Xavier e Cunto (2017), que avaliou o desempenho de diversas medidas de desempenho para interseções urbanas semaforizadas.

Nesse contexto, o presente trabalho avaliou o desempenho, na etapa de seleção de pontos críticos, da combinação de diferentes alternativas metodológicas de segmentação da rodovia, medidas de desempenho e triagem. Foram analisadas 80 combinações (5 métodos de segmentação x 8 medidas de desempenho x 2 métodos de triagem) para a realidade brasileira. Foram estudadas rodovias rurais de pista simples, que representam grande parte da acidentalidade de rodovias brasileiras, segundo dados da Polícia Rodoviária Federal (DPRF, 2020).

2. IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS

Segundo o HSM, a etapa de identificação de pontos críticos, chamada pelo manual de *Network Screening*, contempla as seguintes etapas: (i) estabelecimento do foco, (ii) identificação de uma rede e estabelecimento de uma população de referência, (iii) seleção de medidas de desempenho, (iv) seleção do método de triagem e (v) avaliação dos resultados (AASHTO, 2010). No entanto, para a avaliação de segmentos rodoviários, o esforço prático pode ser dividido em 3 etapas principais, que influenciam significativamente o resultado da análise, e em que o presente estudo se baseia: (i) segmentação da rede viária, (ii) seleção das medidas de desempenho e (iii) aplicação do método de triagem.

2.1. Métodos de segmentação da rede viária

A segmentação da rede, no contexto do estudo da segurança viária, é considerada a primeira e mais importante etapa da identificação de pontos críticos (Ghadi e Török, 2019), sendo a base para a aplicação das medidas de desempenho. Tendo em vista que os acidentes de trânsito sofrem influência das características da via, a segmentação busca, geralmente, produzir segmentos homogêneos em relação as mesmas. No entanto, a implementação desse tipo de segmentação pode se tornar inviável pela quantidade de variáveis necessárias (Fitzpatrick *et al.*, 2006). Nesse sentido, o presente trabalho busca avaliar, além de metodologias de segmentação homogêneas, outras alternativas menos exigentes, conforma apresentado a seguir:

- Segmentação Homogênea segundo o HSM (Seg-1): a rede viária é dividida em segmentos homogêneos segundo mudanças no VDMA, presença de curvas, greide e outras características geométricas e de entorno (AASHTO, 2010).
- Segmentação Homogênea segundo o DNIT (Seg-2): a rede viária é dividida em segmentos homogêneos segundo mudanças no relevo (plano, ondulado e montanhoso), quantidade de pistas (simples e dupla) e entorno (rural e urbano) (DNIT, 2015).
- Segmentação a cada duas tangentes e duas curvas (Seg-3): a rede viária é segmentada de modo a possuir em cada segmento duas curvas e duas tangentes, evitando a presença de pequenos segmentos que podem ocorrer com uma única curva (Cafiso *et al.*, 2018).
- Segmentação por VMDA constante (Seg-4): a rede viária é dividida em segmentos

homogêneos em relação ao VDMA, sem sofrer influência de outras variáveis.

- Segmentação por comprimento constante (Seg-5): a rede viária é dividida em segmentos de igual comprimento. Para esse trabalho, o comprimento escolhido foi de 1 km, de modo a ser maior que o mínimo recomendado pelo HSM, mas pequeno o suficiente para garantir a homogeneidade, conforme discutem Ghadi e Török (2019).

Os métodos apresentados foram ordenados conforme sua complexidade, que depende majoritariamente dos dados necessários. As segmentações homogêneas exigem um maior esforço nesse sentido, por necessitarem de um maior número de informações relacionadas à geometria e entorno da rodovia, sendo a segmentação homogênea do DNIT menos exigente. A segmentação a cada duas tangentes e duas curvas se torna complexa por exigir informações sobre a planimetria da rodovia. As segmentações por VDMA e comprimentos constantes são menos exigentes, por não necessitarem de dados precisos de geometria ou entorno da rodovia.

Apesar do desenvolvimento de novos métodos de segmentação, poucos estudos buscaram avaliar o desempenho dos mesmos. Dentre esses, o estudo de Cafiso *et al.* (2018) investigou a influência da segmentação na estimação de Modelos de Previsão de Acidentes (MPAs), com os melhores resultados obtidos para a Seg3 e Seg5 descritas anteriormente. No contexto da identificação de pontos críticos, Ghadi e Török (2019) avaliaram diferentes métodos de segmentação e diferentes medidas de desempenho, obtendo como resultados um melhor desempenho, de forma geral, para o método de segmentação espacial desenvolvido pelo autor.

2.2. Medidas de Desempenho

A partir da definição do tipo de segmentação empregada, é necessário definir a medida de desempenho que será utilizada para avaliar os segmentos e ranqueá-los segundo sua segurança. As medidas de desempenho são tradicionalmente referidas na literatura como métodos de análise de pontos críticos (MIPC) (Manepalli e Bham, 2016), embora sejam de fato apenas uma das etapas da análise de pontos críticos. O HSM apresenta 13 medidas de desempenho, sendo 8 destas consideradas no presente trabalho, por apresentarem resultados em listas classificatórias e avaliarem acidentes de todos os tipos, conforme discutido por Xavier e Cunto (2017). Essas 8 medidas de desempenho são descritas a seguir, conforme o HSM:

- Frequência Média de Acidentes (FMA): o segmento com o maior número de acidentes totais ou o maior número de acidentes de determinada severidade ou tipo é ranqueado como mais crítico, e assim sucessivamente.
- Taxa de Acidentes (TAC): essa medida normaliza a frequência de acidentes com a exposição, medida por meio do volume de tráfego.
- Unidade Padrão de Severidade (UPS): essa medida aloca pesos diferentes aos acidentes, dependendo da severidade (acidentes fatais, com feridos ou com danos materiais). Nesse trabalho foram utilizados pesos referentes aos custos por severidade de IPEA (2015).
- Índice Relativo de Severidade (IRS): essa medida adiciona custos monetários para cada tipo de acidente, e o custo total dos acidentes é calculado para cada segmento. Nesse trabalho foram utilizados os custos apresentados em DNIT (2004).
- Excesso Previsto na Frequência Média de Acidentes Usando os Modelos de Previsão de Acidentes (EMPA): essa medida compara a frequência de acidentes observada com a frequência de acidentes prevista utilizando um Modelo de Previsão de Acidentes (MPA). Nesse trabalho foi utilizado o MPA proposto por Thomazi (2018) para rodovias de pista simples rurais do estado de Santa Catarina.
- Frequência Média de Acidentes Esperada ajustada pelo Método Empírico de Bayes

(EB): nessa medida, a frequência média de acidentes observada e a frequência média de acidentes previstas usando um MPA são consideradas conjuntamente, utilizando o Método Empírico de Bayes, de modo a calcular uma frequência de acidentes que leva em consideração o viés da regressão à média.

- Unidade Padrão de Severidade ajustada pelo Método Empírico de Bayes (UPS-EB): nessa medida os acidentes observados e previstos são considerados por severidade, usando MPAs específicos, com pesos para cada severidade, conforme medida UPS.
- Excesso Esperado na Frequência Média de Acidentes ajustado pelo Método Empírico de Bayes (EEB): essa medida compara o resultado da medida EB com a frequência de acidentes prevista utilizando um MPA.

Do mesmo modo que alguns métodos de segmentação são mais complexos que outros, as medidas de desempenho também seguem essa tendência, principalmente em relação aos dados necessários. Essas informações incluem: acidentes por local e por data (1), volume de tráfego (2), acidentes por severidade e por local (3), custos por severidade de acidente (4), acidentes por tipo e local (5), custos por tipo de acidente (6), características geométricas e operacionais da via (7) e MPA calibrado e parâmetro de superdispersão (8). A Tabela 1 apresenta as medidas de desempenho analisadas nesse trabalho associados aos dados necessários.

Tabela 1 - Medidas de desempenho e dados necessários

Medida de Desempenho	FMA	TAC	UPS	IRS	EMPA	EB	UPS-EB	EEB
Dados Necessários	1	1,2	3,4	5,6	1,8	1,3,7,8	2,3,7,8	1,3,7,8

A literatura existente considera medidas que utilizam o método Empírico de Bayes como o estado da arte da análise de pontos críticos (Ambros *et al.*, 2016), o que é corroborado por estudos que buscam comparar o desempenho das diferentes medidas de desempenho. Esses estudos apresentam a medida de desempenho EB como a melhor (Cafiso e Di Silvestro, 2011; Cheng *et al.*, 2018; Elvik, 2008; Ghadi e Török, 2019; Manepalli e Bham, 2016; Montella, 2010; Yu *et al.*, 2014), ou empatada com a segunda melhor (Ambros *et al.*, 2016; Cheng e Washington, 2008). Em estudos que não avaliaram a EB, a medida de desempenho FMA é considerada a melhor na maioria dos casos (Cheng e Jia, 2014; Wang *et al.*, 2018), além de geralmente ter o segundo melhor resultado quando a EB também é avaliada (Cheng *et al.*, 2018; Cheng e Washington, 2008; Elvik, 2008; Ghadi e Török, 2019; Montella, 2010). Outra medida de desempenho bastante avaliada é a TAC, onde na maioria dos casos é considerada a pior (Cheng e Jia, 2014; Cheng *et al.*, 2018; Cheng e Washington, 2008; Elvik, 2008; Ghadi e Török, 2019; Manepalli e Bham, 2016), o que é alarmante pelo fato de várias agências de transportes utilizarem a mesma.

Apesar de existir certa constância nos resultados apresentados, principalmente em relação aos dois melhores métodos (EB e FMA), as análises de pontos críticos são dependentes de diversos elementos. Desses, os principais se referem ao tipo e qualidade dos dados disponíveis no país de estudo, entre eles: comportamento do motorista, fluxo de tráfego, dados de acidentes, método de segmentação e método de triagem utilizados. As diferenças citadas ainda são pouco estudadas e podem levar a resultados discrepantes, e fazer com que os resultados de um contexto não possam ser transferidos para outro.

2.3. Métodos de triagem da rodovia

O processo de triagem ranqueia, a partir das medidas de desempenho, os segmentos conforme seu potencial de melhoria e sua distribuição de acidentes. Ela pode ser interpretada como a

forma em que as medidas de desempenho são aplicadas nos segmentos analisados. O HSM propõe os seguintes métodos de triagem da rodovia: *Sliding Window*, *Simple Ranking* e *Peak Search*, onde os dois primeiros são considerados consistentes com todas as medidas de desempenho apresentadas pelo manual, e são descritos a seguir:

- *Sliding Window (Tri-1)*: Nesse método, uma janela conceitual de comprimento específico (300 metros nesse trabalho) é movida ao longo do segmento em análise, do início ao fim, em incrementos constantes (100 metros nesse trabalho). A medida de desempenho escolhida para avaliar o segmento é aplicada para a janela em cada uma das posições possíveis, e os resultados da análise de cada posição são registrados. De todas as posições possíveis, a janela que possuir maior potencial para melhoria (ex: maior frequência de acidentes) é escolhida para representar todo o segmento.
- *Simple Ranking (Tri-2)*: Nesse método, as medidas de desempenho são aplicadas para todo o segmento (ex: frequência de todos os acidentes do segmento). Segundo o manual, apesar da simplicidade, esse método não é tão confiável quanto o *Sliding Window*.

As 2 alternativas de triagem apresentadas nessa subseção, em conjunto com as 5 alternativas de segmentação e as 8 medidas de desempenho apresentadas, formam 80 combinações (2 x 5 x 8) metodológicas de análises de pontos críticos. O desempenho dessas combinações foi avaliado utilizando os critérios descritos na próxima seção. Além disso, para garantir uma comparação equivalente entre segmentos de diferentes comprimentos, o resultado da aplicação de cada combinação foi dividido pelo comprimento do mesmo.

3. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para a avaliação do desempenho das diferentes combinações metodológicas apresentadas anteriormente, foram utilizados quatro critérios de avaliação, descritos a seguir, sendo três destes propostos por Cheng e Washington (2008): *Site Consistency Test*, *Method Consistency Test* e *Total Rank Differences Test*. Segundo os autores, esses critérios fornecem uma maior compreensão do desempenho dos diferentes métodos de identificação de pontos críticos, ao contrário da tradicional avaliação realizada por meio de falsos positivos e falsos negativos. Além dos critérios apresentados, foi utilizado o critério *Total Score Test*, proposto por Montella (2010), combinando os critérios anteriores.

- ***Site Consistency Test***

O *Site Consistency Test* (T1) mede a habilidade da combinação específica em identificar consistentemente locais críticos em períodos de tempo sucessivos (2017 e 2018-2019 no presente trabalho). O critério parte do princípio que um segmento considerado crítico em um período também terá um desempenho inferior no período seguinte, caso não ocorram mudanças significativas na infraestrutura. Em uma perspectiva matemática, o método identifica os segmentos críticos no primeiro período e soma o número de acidentes ocorridos nesses mesmos segmentos no segundo período. No presente estudo, os acidentes foram definidos proporcionalmente ao comprimento do segmento e à duração do período, permitindo avaliar o desempenho de diferentes métodos de segmentação.

- ***Method Consistency Test***

Enquanto o critério anterior utiliza o número de acidentes no segundo período para avaliar o desempenho da combinação específica, o *Method Consistency Test* (T2) mede o número de segmentos que foram identificados como críticos em ambos os períodos. Quanto maior esse número, mais consistente a combinação avaliada é. No presente estudo, foi considerada a taxa

de segmentos considerados críticos em ambos os períodos, de modo a avaliar o desempenho de combinações que possuam diferentes métodos de segmentação, assim como no critério anterior.

- **Total Rank Difference Test**

O *Total Rank Difference Test* (T3) baseia-se no *Method Consistency Test*. O critério calcula a soma das diferenças entre o ranqueamento dos segmentos considerados críticos no primeiro período e o ranqueamento desses mesmos locais no segundo período. Quanto menor a diferença identificada, menos os segmentos variaram de posição, e mais consistente a combinação avaliada é. Tendo em vista que o resultado apresentado pelo critério depende do número de segmentos avaliados, este permite a comparação entre diferentes métodos de segmentação apenas se o número de segmentos for igual.

- **Total Score Test**

O *Total Score Test* (T4) combina os três critérios anteriores, de modo a fornecer um índice sintético, conforme Equação 1, assumindo que todos os critérios utilizados tem o mesmo peso:

$$T4_j = \frac{100}{3} \times \left[\left(\frac{T1_j}{\max_j T1} \right) + \left(\frac{T2_j}{\max_j T2} \right) + \left(1 - \frac{T3_j - \min_j T3}{\max_j T3} \right) \right] \quad (1)$$

Os critérios anteriores fornecem medidas absolutas de efetividade, enquanto o T4 fornece uma medida relativa, ao levar em conta todos os métodos que estão sendo comparados. Nesse critério, o método *j* avaliado é mais confiável na medida em que se aproxima de 100%.

4. CONSTRUÇÃO E DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS

A construção da base de dados para a presente análise foi realizada em 4 etapas principais: (i) filtragem dos dados de acidentes, (ii) reconstituição da geometria planimétrica, (iii) reunião dos dados de acidentes e geometria em SIG e (iv) consolidação dos dados existentes. Os dados necessários para a construção desta base, bem como suas fontes, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados necessários para a construção da base de dados

Dados necessários	Fonte
Acidentes por tipo, severidade, local e data	DPRF (2020)
Volume de tráfego	DNIT (2020)
Custo de acidentes por severidade	IPEA (2015)
Custo de acidentes por tipo	DNIT (2004)
Características geométricas, operacionais e de entorno das rodovias	DNIT (2015) e Autores
MPA calibrado	Thomazi (2018)

- **Etapa 1: filtragem dos dados de acidentes**

A construção da base de dados se iniciou com a filtragem dos acidentes ocorridos em segmentos de rodovias federais rurais de pista simples, que fazem parte do escopo desse trabalho, a partir da base de dados original da Polícia Rodoviária Federal (DPRF, 2020). Foram considerados os acidentes ocorridos entre os anos de 2017 e 2019, que possuem a informação de localização georreferenciada, permitindo seu manuseio em um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

- **Etapa 2: reconstituição da geometria planimétrica**

A segunda etapa envolveu a reconstituição da geometria planimétrica da rede viária a partir de imagens de satélite no *software* SAEPRO, seguindo o procedimento descrito por Andriola *et al.* (2019). Após essa reconstituição, a ferramenta ROCA (Bíl *et al.*, 2018), disponível para ArcGIS, foi utilizada de modo a serem obtidas as informações das curvas reconstituídas (raio, desenvolvimento e azimute) em SIG.

- **Etapa 3: reunião dos dados de acidentes e geometria em SIG**

A terceira etapa envolveu a consolidação, em uma mesma base em SIG, das informações obtidas a partir das duas etapas anteriores (acidentes e geometria planimétrica). A rede viária consolidada foi então dividida em subsegmentos de no máximo 10 metros, cada um contendo informações de geometria (raio, desenvolvimento e azimute) e de acidentes (tipo, severidade e data). Estes subsegmentos atuaram como blocos construtivos na divisão da rede viária, a partir das cinco metodologias de segmentação apresentadas anteriormente. Em relação ao seu tamanho, este foi escolhido de modo a ser pequeno o suficiente para garantir as corretas segmentações e grande o suficiente para reduzir o posterior esforço computacional.

- **Etapa 4: consolidação dos dados existentes**

Na última etapa, um algoritmo na linguagem de programação Python foi desenvolvido para consolidar todos os dados existentes para cada subsegmento, visto que a quantidade de informações obtida inviabilizava outras alternativas, como o uso de planilhas eletrônicas. Esses dados incluem a base construída na etapa anterior (subsegmentos com geometria planimétrica e acidentes), informações do programa BR-LEGAL (tipo de pista, relevo, velocidade regulamentada, largura de faixa e acostamento, e tipo de pavimento), além de dados de acessos, terceiras faixas e volumes de tráfego. A partir dessa base, outro algoritmo foi utilizado para a execução das 80 diferentes combinações de métodos de segmentação da rede viária, medidas de desempenho e métodos de triagem.

A base de dados construída possui 1527 quilômetros de rodovias federais rurais de pista simples do estado do Rio Grande do Sul, incluindo as rodovias BR116, BR158, BR285, BR290 e BR472, que apresentam características diversas em relação à geometria e entorno. Essa rede foi dividida conforme as cinco metodologias de segmentação apresentadas anteriormente, sendo que, para cada caso, os segmentos possuem todas as informações apresentadas na última etapa da seção anterior, além dos acidentes ocorridos entre os anos de 2017 e 2019. Além disso, foram definidos segmentos mínimos de 160 metros e máximos de 10 quilômetros, seguindo as recomendações de Ambros *et al.* (2018). A Tabela 3 apresenta as principais informações relativas à rede analisada, enquanto a Tabela 4 apresenta, para cada metodologia de segmentação, a distribuição dos segmentos e acidentes.

Tabela 3 - Estatística descritiva das variáveis relacionadas à rede viária

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
VDMA	702,78	7945,01	3597,76	1448,99
Largura da Faixa (m)	2,40	8,00	3,42	0,41
Largura do Acostamento (m)	0,00	4,20	2,19	0,95
Raio (m)	45,42	1200,00	375,02	260,13

Tabela 4 - Estatística descritiva das variáveis relacionadas às segmentações

Variáveis	Segmentação				
	Seg-1	Seg-2	Seg-3	Seg-4	Seg-5
Comprimento do segmento					
Mínimo (km)	0,16	0,19	0,22	0,29	1,00
Máximo (km)	10,00	10,00	10,00	10,00	1,00
Médio (km)	0,75	2,05	2,99	8,38	1,00
Desvio Padrão	1,19	2,81	3,39	2,81	0,00
Total (km)	1524,72	1518,72	1524,49	1525,70	1527,05
Número de segmentos	2023	740	510	182	1527
Frequência de acidentes					

Mínimo	0	0	0	0	0
Máximo	19	41	33	54	18
Médio	0,81	2,21	3,21	9,00	1,07
Desvio Padrão	1,62	4,05	4,24	7,80	1,49
Total	1637	1636	1637	1638	1638
Frequência de acidentes com feridos/fatais					
Mínimo	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Máximo	16/3	24/5	28/4	29/5	17/3
Médio	0,48/0,04	1,31/0,12	1,89/0,18	5,31/0,50	0,63/0,06
Desvio Padrão	1,11/0,23	2,63/0,42	2,87/0,49	5,04/0,85	1,11/0,25
Total	966/91	966/91	966/91	966/91	966/91

5. RESULTADOS

Cada uma das 80 combinações possíveis (5 métodos de segmentação x 8 medidas de desempenho x 2 métodos de triagem) foi testada para os períodos de 2017 e 2018-2019, e avaliada pelos quatro critérios apresentados na seção 3, de modo a identificar os segmentos pertencentes aos 5% mais críticos. Os quatro critérios de avaliação, por suas características, permitem comparar as diferentes medidas de desempenho e métodos de triagem, enquanto os critérios T1 e T2 também permitem comparar as diferentes metodologias de segmentação, por resultarem no número de acidentes por quilômetro e na porcentagem de segmentos críticos, respectivamente. Em relação à apresentação dos resultados, nas tabelas desta seção, as cores verde e vermelho representam os melhores e piores resultados, respectivamente, para cada segmentação específica.

5.1. Aplicação do *Site Consistency Test* (T1)

Conforme apresentado na Tabela 5, para o *Site Consistency Test*, as medidas de desempenho EMPA, EB, UPS-EB e EEB obtiveram os melhores resultados para as segmentações homogêneas em relação às características da rede (Seg-1, Seg-2), e em relação à geometria horizontal (Seg-3), combinadas com a Tri-2. Além disso, a medida FMA obteve bons resultados para todas as segmentações, combinadas com a Tri-2. Por outro lado, apesar das medidas de desempenho TAC, UPS e IRS obterem bom resultado para as segmentações Seg-1, Seg-2 e Seg-3, combinadas com a Tri-2, estas apresentaram os piores resultados para as combinações restantes. Em relação ao método de triagem, a Tri-2 foi superior à Tri-1 em 85% dos casos.

Tabela 5 - Resultados do *Site Consistency Test*

Segmentação	Triagem	FMA	TAC	UPS	IRS	EMPA	EB	UPS-EB	EEB
Seg-1	Tri-1	1,00	0,69	0,98	0,86	1,01	1,05	0,95	1,08
	Tri-2	1,88	1,11	1,47	1,72	1,91	1,90	1,75	1,83
Seg-2	Tri-1	1,05	0,65	0,95	0,81	1,00	0,92	0,90	0,93
	Tri-2	2,02	1,76	1,38	1,76	2,27	1,72	1,46	2,18
Seg-3	Tri-1	1,04	0,69	0,57	0,85	0,92	0,90	0,87	0,89
	Tri-2	2,14	1,86	2,08	2,22	2,28	2,12	1,66	2,14
Seg-4	Tri-1	1,21	0,46	0,71	0,86	1,07	1,05	1,46	1,00
	Tri-2	1,68	1,36	1,37	0,88	1,53	1,21	1,24	1,79
Seg-5	Tri-1	1,45	1,27	1,34	0,95	1,51	1,43	1,36	1,40
	Tri-2	1,64	1,36	1,19	0,88	1,32	1,35	1,39	1,35

5.2. Aplicação do *Method Consistency Test* (T2)

Do mesmo modo que para o T1, segundo o critério *Method Consistency Test*, apresentado na Tabela 6, para as segmentações Seg-1, Seg-2 e Seg-3 as melhores medidas de desempenho foram EMPA, EB, UPS-EB e EEB, com destaque para a medida UPS-EB, especialmente para a triagem Tri-1. Além disso, diferentemente do critério anterior, a medida de desempenho TAC obteve bom resultado para essas segmentações. Para a segmentação Seg-4 as melhores medidas de desempenho foram FMA e EEB, e para a segmentação Seg-5 foram UPS-EB e FMA, ambos os casos para a triagem Tri-2. Por outro lado, de modo similar ao ocorrido no critério anterior, as medidas de desempenho UPS e IRS tiveram o pior resultado, para a maioria das combinações. Em relação ao método de triagem, a Tri-1 foi superior à Tri-2 em 70% dos casos.

Tabela 6 - Resultados do *Method Consistency Test*

Segmentação	Triagem	FMA	TAC	UPS	IRS	EMPA	EB	UPS-EB	EEB
Seg-1	Tri-1	0,19	0,22	0,17	0,14	0,20	0,25	0,24	0,20
	Tri-2	0,17	0,15	0,15	0,11	0,17	0,16	0,19	0,17
Seg-2	Tri-1	0,31	0,38	0,31	0,22	0,31	0,27	0,36	0,22
	Tri-2	0,27	0,20	0,20	0,18	0,27	0,27	0,27	0,24
Seg-3	Tri-1	0,19	0,35	0,23	0,08	0,23	0,23	0,38	0,23
	Tri-2	0,19	0,31	0,19	0,23	0,27	0,23	0,38	0,19
Seg-4	Tri-1	0,44	0,33	0,11	0,11	0,44	0,33	0,44	0,33
	Tri-2	0,56	0,44	0,33	0,44	0,44	0,33	0,44	0,56
Seg-5	Tri-1	0,25	0,25	0,10	0,09	0,25	0,23	0,22	0,17
	Tri-2	0,29	0,25	0,13	0,12	0,22	0,26	0,30	0,22

5.3. Aplicação do *Total Rank Difference Test* (T3)

Conforme apresentado na Tabela 7, os resultados da aplicação do critério *Total Rank Difference Test* seguem a tendência dos critérios anteriores, com os melhores resultados obtidos pelas medidas de desempenho EMPA, EB, UPS-EB e EEB, com destaque para as medidas EB e UPS-EB. Além disso, as medidas de desempenho FMA e TAC também apresentaram resultados comparáveis às medidas de desempenho anteriores, para a maioria das segmentações. Em relação ao método de triagem, a Tri-1 foi geralmente superior à Tri-2 para as segmentações Seg-1, Seg-2 e Seg-3, enquanto a Tri-2 foi superior à Tri-1 nos casos restantes.

Tabela 7 - Resultados do *Total Rank Difference Test*

Segmentação	Triagem	FMA	TAC	UPS	IRS	EMPA	EB	UPS-EB	EEB
Seg-1	Tri-1	68175	68582	77323	92673	84929	60402	57160	82681
	Tri-2	105988	110495	91518	109566	109761	78132	74970	113992
Seg-2	Tri-1	6921	6357	5061	9544	6619	5343	4994	5937
	Tri-2	16946	17150	14252	20321	14556	11037	8695	14545
Seg-3	Tri-1	4178	2242	3083	3321	3232	3357	1908	2582
	Tri-2	5067	4423	4378	6328	3906	4958	3825	4193
Seg-4	Tri-1	314	114	563	369	368	292	160	324
	Tri-2	121	182	212	326	118	104	120	154
Seg-5	Tri-1	38588	36819	42815	49428	37932	30945	27672	40545
	Tri-2	37275	33371	48757	48391	40942	26142	21394	42593

5.4. Aplicação do *Total Score Test* (T4)

O critério *Total Score Test* produz um indicador sintético a partir dos resultados dos critérios anteriores, permitindo uma análise unificada do desempenho das combinações avaliadas. Nesse contexto, segundo a Tabela 8, as medidas de desempenho EMPA, EB, UPS-EB e EEB obtiveram, geralmente, os melhores resultados, independente da segmentação analisada. Além disso, a medida de desempenho FMA esteve entre as melhores medidas para as segmentações Seg-4 e Seg-5. Essas medidas de desempenho foram seguidas pela TAC, com desempenho similar em alguns casos, e pelas medidas UPS e IRS, de pior desempenho na grande maioria dos casos. Em relação ao método de triagem, a Tri-2 foi superior à Tri-1 em 75% dos casos.

Tabela 8 - Resultados do *Total Score Test*

Segmentação	Triagem	FMA	TAC	UPS	IRS	EMPA	EB	UPS-EB	EEB
Seg-1	Tri-1	73,5	71,7	66,8	56,5	70,1	84,1	81,9	71,9
	Tri-2	74,2	56,8	68,7	62,9	74,7	81,3	84,6	72,2
Seg-2	Tri-1	73,1	74,0	74,6	57,4	72,8	69,7	77,8	65,1
	Tri-2	66,9	56,8	56,0	49,7	74,5	72,1	72,2	71,2
Seg-3	Tri-1	53,3	71,6	55,5	45,0	59,8	58,8	79,4	62,8
	Tri-2	64,7	73,9	67,4	62,5	79,5	68,3	80,9	69,3
Seg-4	Tri-1	70,1	61,3	26,1	40,4	64,2	61,8	83,9	58,9
	Tri-2	96,9	80,7	72,3	63,1	87,6	75,9	82,0	97,0
Seg-5	Tri-1	78,9	76,4	57,7	43,9	80,4	82,1	81,5	67,8
	Tri-2	87,8	80,5	53,7	46,1	71,7	86,6	94,9	71,2

6. DISCUSSÃO

Os critérios de avaliação de desempenho T1 e T2, conforme abordado anteriormente, permitem a comparação das diferentes metodologias de segmentação. Segundo o critério T1, as segmentações que dividem a rede viária a partir de características da mesma, como as segmentações Seg-1, Seg-2 e Seg-3, tiveram o melhor desempenho geral, especialmente quando combinadas com o método de triagem Tri-2, em que as medidas de desempenho são aplicadas para todo o segmento em análise. Além disso, para essas segmentações, as melhores medidas de desempenho foram a EMPA e EEB, o que é intuitivo, pois essas medidas se baseiam nas características da rede viária, indo ao encontro com o exposto na literatura apresentada anteriormente. Para o critério de avaliação de desempenho T2, os diferentes métodos de segmentações apresentaram resultados similares, com exceção da segmentação Seg-4, que apresentou o melhor resultado para a maioria das combinações de medida de desempenho e método de triagem. No entanto, esse resultado deve ser considerado com cautela, tendo em vista o número baixo de segmentos nesse caso, em relação aos outros métodos de segmentação.

Em relação às medidas de desempenho, o critério T4 permite observar que, independente da segmentação, as medidas de desempenho EMPA, EB, UPS-EB e EEB, com destaque para as medidas EB e UPS-EB, obtiveram bom desempenho. Esse resultado é corroborado pela literatura apresentada, que considera o método Empírico de Bayes o estado da arte na análise de pontos críticos (Ambros *et al.*, 2016). Também é importante destacar o bom resultado da medida de desempenho FMA para as segmentações Seg-4 e Seg-5, pois a mesma se torna relevante em locais sem informações acuradas sobre as características geométricas e de entorno da rede viária, comuns em países emergentes.

Os métodos de triagem tiveram resultados diversos, dependendo do critério utilizado. Para o

critério T1, a triagem Tri-2 obteve o melhor resultado em 85% dos casos, enquanto para o critério T3, a triagem Tri-1 obteve melhor resultado em 70% dos casos. Em relação ao critério T2, não houveram diferenças claras entre os dois métodos de triagem. No entanto, o critério T4 mostra que, apesar da triagem Tri-1 ser recomendada pelo HSM (AASHTO, 2010), a triagem Tri-2 obtém melhor resultado em 75% dos casos, o que é positivo em termos práticos, pois o método exige menor esforço técnico para produzir análises de pontos críticos consistentes.

No contexto brasileiro, apesar da extensa quantidade de dados necessária, a aplicação das medidas de desempenho EB e UPS-EB se torna viável no momento em que a segmentação proposta pelo DNIT apresenta desempenho comparável à segmentação homogênea segundo o HSM, tendo em vista a existência de dados de geometria para parte das rodovias federais brasileiras. Por outro lado, em locais que não possuam informações detalhadas sobre a rede viária, a combinação de FMA, Seg-4 ou Seg-5 e Tri-2, se mostra como importante alternativa, pois com informações georreferenciadas de acidentes e geometria simplificada é possível realizar uma análise de pontos críticos consistente. Além disso, a aplicação das diversas medidas de desempenho em conjunto é recomendada, pois o esforço metodológico adicional pode ser compensado pela qualidade da análise resultante (Sørensen e Elvik, 2007), tendo em vista que a correta identificação dos locais críticos leva a uma melhor disposição de recursos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho buscou avaliar a combinação de diferentes alternativas metodológicas para a identificação de pontos críticos, envolvendo 5 metodologias de segmentação da rede viária, 8 medidas de desempenho e 2 metodologias de triagem, resultando em 80 combinações. Essa análise é específica para o contexto brasileiro e depende da qualidade das informações de entrada disponíveis, conforme Tabela 2. Para a avaliação do desempenho das combinações analisadas, foram utilizados 4 critérios de avaliação quantitativos: *Site Consistency Test*, *Method Consistency Test*, *Total Rank Differences Test* e *Total Score Test*.

Os resultados demonstraram um melhor desempenho para as combinações que envolvem as medidas de desempenho EB e UPS-EB, especialmente para as segmentações homogêneas (Seg-1 e Seg-2). Além dessas, as medidas de desempenho FMA e TAC também apresentaram bons resultados para determinadas combinações de segmentação e triagem, sendo que sua simplicidade facilita a aplicação em países emergentes. Em relação ao método de triagem, apesar do HSM considerar o método *Sliding Window* superior, e da possibilidade de identificar locais críticos dentro dos próprios segmentos críticos, este obteve desempenho inferior em relação ao *Simple Ranking*. Esses resultados podem auxiliar no processo de *Network Screening* em rodovias brasileiras, permitindo ao profissional da área melhores escolhas metodológicas a partir dos dados disponíveis.

A existência de informações sobre as características das rodovias federais brasileiras, a partir do programa BR-Legal, abre a possibilidade, a partir do seu uso em conjunto com SIG, da realização de análises de pontos críticos consistentes no Brasil, por meio da aplicação das medidas de desempenho EMPA, EB, UPS-EB ou EEB, combinadas com a segmentação Seg-2, do próprio DNIT. Para os locais em que não existam informações detalhadas sobre as características da rede viária, a combinação da medida de desempenho FMA com as segmentações Seg-4 ou Seg-5 e a triagem Tri-2, permite a realização de uma análise de pontos críticos consistente, apesar da limitação de dados. No âmbito acadêmico, a análise das metodologias apresentadas para diferentes tipos de rodovias, além da utilização de métodos de segmentação espaciais, pode contribuir com o conhecimento existente sobre o tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2010) *Highway safety manual*. (1st ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Ambros, J.; P. Havránek; V. Valentová; Z. Krivánková e R. Striegler (2016) Identification of Hazardous Locations in Regional Road Network – Comparison of Reactive and Proactive Approaches. *Transportation Research Procedia*, 14, 4209–4217. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.392
- Ambros, J.; C. Jurewicz; S. Turner e M. Kieć (2018) An international review of challenges and opportunities in development and use of crash prediction models. *European Transport Research Review*, 10(2). doi:10.1186/s12544-018-0307-7
- Andriola, C. L.; T. B. Torres e D. S. P. García (2019) Influência dos parâmetros geométricos de rodovias na frequência e severidade de acidentes viários em curvas: o caso da BR 116. *TRANSPORTES*, 27(3), 1–14. doi:10.14295/transportes.v27i3.1997
- Bíl, M.; R. Andrášik; J. Sedoník e V. Cícha (2018) ROCA – An ArcGIS toolbox for road alignment identification and horizontal curve radii computation. *PLoS ONE*, 13(12). doi:10.1371/journal.pone.0208407
- Cafiso, S.; C. D’Agostino e B. Persaud (2018) Investigating the influence of segmentation in estimating safety performance functions for roadway sections. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(2), 129–136. doi:10.1016/j.jtte.2017.10.001
- Cafiso, S. e G. Di Silvestro (2011) Performance of Safety Indicators in Identification of Black Spots on Two-Lane Rural Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2237(1), 78–87. doi:10.3141/2237-09
- Cheng, W. e X. Jia (2014) Comprehensive evaluation of the alternative hotspot identification criteria: Accident count and accident rate. *Advances in Transportation Studies*, 73–84. doi:10.4399/97888548728996
- Cheng, W.; G. S. Gill; L. Loera; X. Wang e J. H. Wang (2018) Evaluation of the impact of traffic volume on site ranking. *Journal of Transportation Safety & Security*, 10(5), 491–505. doi:10.1080/19439962.2017.1321074
- Cheng, W. e S. Washington (2008) New criteria for evaluating methods of identifying hot spots. *Transportation Research Record*, (2083), 76–85. doi:10.3141/2083-09
- DPRF (2020) Acidentes. Departamento De Polícia Rodoviária Federal. Obtido 1 de fevereiro de 2020, de <https://portal.prf.gov.br/dados-abertos-acidentes>
- DNIT (2004) *Custos de acidentes de trânsito nas rodovias federais*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2015) Guia Prático: Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária – BR-LEGAL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Obtido 10 de fevereiro de 2020, de <http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/programa-br-legal>
- DNIT (2020) Plano Nacional de Contagem de Tráfego. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Obtido 10 de fevereiro de 2020, de <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnc/Modelagem>
- Elvik, R. (2008) Comparative analysis of techniques for identifying locations of hazardous roads. *Transportation Research Record*, (2083), 72–75. doi:10.3141/2083-08
- Fitzpatrick, K.; W. Schneider; J. Carvell; K. Fitzpatrick e W. Schneider (2006) *The TRB Highway Safety Manual Using the Rural Two-Lane Highway Draft Prototype Chapter*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research* (Vol. Board).
- Ghadi, M. e A. Török (2019) A comparative analysis of black spot identification methods and road accident segmentation methods. *Accident Analysis and Prevention*, 128, 1–7. doi:10.1016/j.aap.2019.03.002
- IPEA (2015) *Acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras: caracterização, tendências e custos para a sociedade*. Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, DF.
- Lee, A. S.; W. H. Lin; G. S. Gill e W. Cheng (2019) An enhanced empirical bayesian method for identifying road hotspots and predicting number of crashes. *Journal of Transportation Safety and Security*, 11(5), 562–578. doi:10.1080/19439962.2018.1450314
- Manepalli, U. R. R. e G. H. Bham (2016) An evaluation of performance measures for hotspot identification. *Journal of Transportation Safety & Security*, 8(4), 327–345. doi:10.1080/19439962.2015.1048015
- Xavier, V. J. M. e F. J. C. Cunto (2017) Comparative Analysis of Performance Measures for Network Screening: A Case Study of Brazilian Urban Areas. *Journal of Advanced Transportation*, 2017. doi:10.1155/2017/4360414
- Montella, A. (2010) A comparative analysis of hotspot identification methods. *Accident Analysis and Prevention*, 42(2), 571–581. doi:10.1016/j.aap.2009.09.025
- Persia, L.; D. S. Usami; F. De Simone; V. F. D. L. Beaumelle; G. Yannis; A. Laiou; S. Han; K. Machata; L. Pennisi; P. Marchesini e M. Salathè (2016) Management of Road Infrastructure Safety. *Transportation Research Procedia* (Vol. 14, p. 3436–3445). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.303

- Sørensen, M. e R. Elvik (2007) *Black spot management and safety analysis of road networks*. Institute of transport economics. Oslo.
- Thomazi, K. R. (2018) *Elaboração de Modelos de Previsão de Acidentes de Trânsito em Rodovias Rurais de Pista Simples do Estado de Santa Catarina com Base no Highway Safety Manual (Hsm)*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Wang, K.; S. Zhao; J. N. Ivan; I. Ahmed e E. Jackson (2018) Evaluation of hot spot identification methods for municipal roads. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1–19. doi:10.1080/19439962.2018.1504262
- WHO. (2011) *Saving Millions of lives: Decade of action for road safety 2011-2020*. WHO publication (Vol. 11). World Health Organization.
- Yu, H.; P. Liu; J. Chen e H. Wang (2014) Comparative analysis of the spatial analysis methods for hotspot identification. *Accident Analysis & Prevention*, 66, 80–88. doi:10.1016/j.aap.2014.01.017

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

Andrey Zuriel Ebeling Bonatto (andrey.bonatto@gmail.com)

Christine Tessele Nodari (piti@producao.ufrgs.br)

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

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

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

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