ReGeo ISSN: 2177-3246

TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINISTROS RODOVIÁRIOS COM SUPORTE DE SIG: UMA ABORDAGEM BIBLIOMÉTRICA

GIS-SUPPORTED ROAD CRASH ANALYSIS TECHNIQUES: A BIBLIOMETRIC APPROACH

TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE SINIESTROS VIALES CON APOYO DE SIG: UN ENFOQUE BIBLIOMÉTRICO

https://doi.org/10.56238/revgeov17n10-063

Data de submissão: 12/09/2026 **Data de publicação:** 12/10/2026

Roberta Pimenta Cunha dos Santos
Mestra em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: rpimenta.ppgm@gmail.com

Rodrigo Nogueira de Vasconcelos
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: rnv@uefs.br

Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: wrocha@uefs.br

Andréa de Almeida Brito
Doutora em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial
Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
E-mail: britoda@gmail.com

Gilney Figueira Zebende
Doutor em Física
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: gfzebende@uefs.br

RESUMO
Os sinistros rodoviários constituem um problema persistente de saúde pública e planejamento de transportes, cuja análise exige integrar dimensão espacial, exposição ao tráfego e heterogeneidade temporal. Este estudo mapeou a evolução das técnicas estatísticas empregadas com suporte de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na análise de sinistros rodoviários e examinou, em particular, o uso de relações funcionais do tipo potência. Foi realizada análise bibliométrica da produção indexada na Scopus entre 1990 e 2025, complementada por síntese temática crítica. A busca recuperou 652 registros; após triagem, 219 artigos compuseram o corpus bibliométrico e 50 foram selecionados para leitura temática. As métricas foram processadas no Bibliometrix e a estrutura conceitual foi examinada por rede de co-ocorrência no VOSviewer. O corpus reuniu 132 fontes e 715 autores; 101 artigos (46,1%) foram publicados entre 2020 e 2025. A trajetória metodológica evoluiu da geocodificação e

gestão de registros para estatística espacial, análise de redes, modelos bayesianos, aprendizado de máquina e abordagens espaço-temporais. A rede de co-ocorrência apresentou 102 termos distribuídos em seis clusters. A síntese temática mostrou que relações de potência aparecem sobretudo como funções de exposição–frequência e elasticidades em modelos log-lineares, não devendo ser confundidas com memória de longo alcance em séries temporais. Os resultados oferecem uma visão histórica e metodológica do campo e apontam como prioridades a padronização de dados, a validação espaço-temporal e a comparação transparente entre modelos.

Palavras-chave: Segurança Viária. Sistemas de Informações Geográficas. Bibliometria. Análise Espacial. Lei de Potência.

ABSTRACT

Road crashes remain a persistent public-health and transport-planning problem whose analysis requires the integration of spatial structure, traffic exposure, and temporal heterogeneity. This study mapped the evolution of statistical techniques supported by Geographic Information Systems (GIS) for road-crash analysis and examined, in particular, the use of power-type functional relationships. A bibliometric analysis of Scopus-indexed literature from 1990 to 2025 was complemented by a critical thematic synthesis. The search retrieved 652 records; after screening, 219 articles formed the bibliometric corpus and 50 were selected for thematic reading. Bibliometric indicators were processed with Bibliometrix, whereas conceptual structure was examined through a term co-occurrence network in VOSviewer. The corpus comprised 132 sources and 715 authors; 101 articles (46.1%) were published between 2020 and 2025. Methodological development progressed from geocoding and record management to spatial statistics, network analysis, Bayesian models, machine learning, and spatiotemporal approaches. The co-occurrence network contained 102 terms distributed across six clusters. The thematic synthesis showed that power relationships are mainly used as exposure–frequency functions and elasticities in log-linear models and should not be conflated with long-range dependence in time series. The study provides a historical and methodological synthesis of the field and identifies data standardization, spatiotemporal validation, and transparent model comparison as priorities for future research.

Keywords: Road Safety. Geographic Information Systems. Bibliometrics. Spatial Analysis. Power Law.

RESUMEN

Los siniestros viales constituyen un problema persistente de salud pública y planificación del transporte cuyo análisis requiere integrar la estructura espacial, la exposición al tráfico y la heterogeneidad temporal. Este estudio cartografió la evolución de las técnicas estadísticas empleadas con apoyo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para analizar siniestros viales y examinó, en particular, el uso de relaciones funcionales de tipo potencia. Se realizó un análisis bibliométrico de la producción indexada en Scopus entre 1990 y 2025, complementado por una síntesis temática crítica. La búsqueda recuperó 652 registros; después del cribado, 219 artículos integraron el corpus bibliométrico y 50 fueron seleccionados para lectura temática. Los indicadores fueron procesados con Bibliometrix y la estructura conceptual se examinó mediante una red de coocurrencia en VOSviewer. El corpus reunió 132 fuentes y 715 autores; 101 artículos (46,1 %) se publicaron entre 2020 y 2025. La evolución metodológica avanzó desde la geocodificación y gestión de registros hacia la estadística espacial, el análisis de redes, los modelos bayesianos, el aprendizaje automático y los enfoques espacio-temporales. La red de coocurrencia presentó 102 términos distribuidos en seis clústeres. La síntesis mostró que las relaciones de potencia aparecen principalmente como funciones exposición–frecuencia y elasticidades en modelos log-lineales y no deben confundirse con la dependencia de largo

alcance en series temporales. Los resultados ofrecen una síntesis histórica y metodológica del campo y señalan como prioridades la estandarización de datos, la validación espacio-temporal y la comparación transparente entre modelos.

Palabras clave: Seguridad Vial. Sistemas de Información Geográfica. Bibliometría. Análisis Espacial. Ley de Potencia.

1 INTRODUÇÃO

A segurança viária permanece entre os desafios globais mais relevantes de saúde pública. O Global status report on road safety 2023 estimou 1,19 milhão de mortes anuais por sinistros de trânsito e identificou essas lesões como a principal causa de morte entre pessoas de 5 a 29 anos (WHO, 2023). A magnitude do problema exige abordagens capazes de ultrapassar a simples contagem de eventos e representar simultaneamente exposição, localização, contexto viário, severidade e variação temporal. Nesse quadro, a análise científica de sinistros tornou-se progressivamente orientada por dados e por métodos que procuram distinguir padrões sistemáticos de variações aleatórias.

Os dados de sinistros apresentam propriedades estatísticas que dificultam inferências simplificadas. Contagens são discretas, frequentemente superdispersas e sujeitas à regressão à média, enquanto fatores não observados podem produzir heterogeneidade entre locais e períodos (Hauer, 1986; Lord; Mannering, 2010; Mannering; Shankar; Bhat, 2016). Para severidade, diferentes estruturas probabilísticas e de escolha discreta podem produzir conclusões distintas quando os pressupostos do modelo não são adequadamente avaliados (Savolainen *et al.*, 2011). Assim, a seleção do método deve responder à estrutura dos dados, à escala espacial e à pergunta de segurança, e não apenas ao desempenho preditivo.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) ampliaram esse repertório ao permitir geocodificar ocorrências, relacioná-las à rede viária e integrar atributos de tráfego, infraestrutura e ambiente. Aplicações clássicas avançaram da identificação visual de pontos críticos para técnicas de densidade, autocorrelação espacial, análise em redes e modelos espaço-temporais (Anderson, 2009; Loo, 2006; Harirforoush; Bellalite, 2019). Revisões recentes mostram que KDE, Getis-Ord Gi*, taxas de sinistros, Bayes empírico e aprendizado de máquina figuram entre os procedimentos recorrentes, ao mesmo tempo em que permanecem lacunas de padronização, qualidade dos dados e validação comparativa (Endashaw *et al.*, 2025).

A incorporação de aprendizado de máquina e inteligência artificial deslocou parte da literatura da descrição de hotspots para previsão de frequência, risco e severidade. Esse avanço, porém, não elimina problemas de interpretabilidade, desbalanceamento de classes, validação externa e dependência espacial. Revisões de métodos de aprendizado de máquina para severidade mostram ganhos potenciais, mas também grande heterogeneidade de dados, métricas e protocolos de avaliação (Santos; Dias; Amado, 2022). Dessa forma, a evolução tecnológica deve ser analisada conjuntamente com a evolução das perguntas científicas e dos pressupostos estatísticos empregados.

Uma questão adicional é o uso do termo “lei de potência”. Na literatura de segurança viária, relações do tipo potência aparecem em funções que vinculam exposição, fluxo ou velocidade à

frequência ou à gravidade dos sinistros; em escala logarítmica, os expoentes podem ser interpretados como elasticidades (Ceder; Livneh, 1982; Cameron; Elvik, 2010). Esse uso é conceitualmente distinto da detecção de memória de longo alcance ou escalonamento em séries temporais de fluxo de tráfego, investigada por métodos como a análise de flutuação destendenciada multifractal (Shang; Lu; Kamae, 2008). Distinguir essas duas perspectivas é necessário para evitar que uma forma funcional não linear seja tratada, por si só, como evidência de um sistema temporal com memória longa.

Diante dessa trajetória, este estudo tem como objetivo geral caracterizar a evolução científica e metodológica das análises de sinistros rodoviários com suporte de SIG entre 1990 e 2025. Especificamente, busca-se: (i) quantificar a evolução temporal da produção, das fontes, da autoria e da colaboração internacional; (ii) identificar periódicos e publicações de maior influência no corpus; (iii) sintetizar a transição das técnicas de gestão e geocodificação para estatística espacial, análise em redes, métodos bayesianos e aprendizado de máquina; (iv) mapear a estrutura temática por co-ocorrência de termos; e (v) examinar criticamente como relações do tipo potência foram empregadas nos estudos selecionados, distinguindo funções exposição–risco de abordagens de memória e escalonamento temporal. Essa combinação de bibliometria e síntese temática permite relacionar crescimento quantitativo, mudança metodológica e lacunas conceituais do campo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A compreensão científica dos sinistros rodoviários evoluiu de descrições centradas em características individuais e consequências do trauma para uma perspectiva sistêmica, na qual exposição, comportamento, veículo, infraestrutura e ambiente interagem em múltiplas escalas. Estudos históricos sobre álcool, propensão individual, mortalidade e prevenção de lesões ajudaram a estruturar o campo (Holcomb, 1938; Tillmann; Hobbs, 1949; Spain; Bradess; Eggston, 1951; Glanville, 1955; Haddon Jr., 1968; Sevitt, 1968; Chorba, 1991). Em paralelo, trabalhos sobre fluxo, motorização e segurança buscaram regularidades quantitativas e efeitos da organização do sistema viário (Smeed; Bennett, 1949; Greenshields, 1970; Svalastoga, 1970; Cromak, 1975; Sivak, 1983; Evans, 1986). No Brasil, a literatura também reconheceu precocemente os sinistros de trânsito como problema de saúde coletiva e de transformação social associado à motorização e à velocidade (Marin; Queiroz, 2000).

Essa evolução científica foi acompanhada por uma mudança normativa e institucional que passou a tratar mortes e lesões no trânsito como eventos evitáveis e passíveis de intervenção sistêmica. Relatórios e programas internacionais e nacionais consolidaram metas de redução, monitoramento e gestão baseada em evidências, com ênfase na Década de Ação e nos objetivos de segurança viária até 2030 (Nações Unidas Brasil, 2011; WHO, 2018, 2021, 2023, s.d.; OPAS, 2016, 2019). Bases

estatísticas e orientações técnicas mantidas por órgãos como o Department for Transport do Reino Unido e o Deutscher Verkehrssicherheitsrat também exemplificam a institucionalização do uso continuado de dados na gestão da segurança (DfT, s.d.; DVR, s.d.). Esse contexto reforça que métodos analíticos não são um fim em si mesmos: sua utilidade depende da capacidade de transformar registros heterogêneos em evidências comparáveis para prevenção e priorização de intervenções.

Do ponto de vista estatístico, a frequência de sinistros é tipicamente uma variável de contagem rara e não negativa, frequentemente superdispersa e afetada por heterogeneidade espacial e temporal. A consolidação de modelos de Poisson, binomial negativa, Bayes empírico e estruturas hierárquicas permitiu superar limitações da regressão linear e reduzir vieses como a regressão à média (Hauer, 1986; Hauer; Ng; Lovell, 1988; Ng; Hung; Wong, 2002; Mitra, 2009; Lord; Mannering, 2010; Mannering; Shankar; Bhat, 2016). A exposição ao tráfego e a forma funcional da relação entre fluxo e frequência também são centrais para funções de desempenho de segurança, como demonstram estudos sobre fluxo horário, curvatura, congestionamento, velocidade e configuração de vias (Ceder; Livneh, 1982; Haynes *et al.*, 2007; Wang; Quddus; Ison, 2009; Elvik, 2005; Cameron; Elvik, 2010; Kononov; Lyon; Allery, 2011; Van der Horst *et al.*, 2017).

A severidade constitui uma dimensão distinta da frequência e exige modelos compatíveis com respostas ordinais, multinomiais ou probabilísticas, além de atenção à heterogeneidade não observada (Savolainen *et al.*, 2011). A partir da década de 2010, algoritmos de aprendizado de máquina passaram a complementar modelos estatísticos tradicionais, utilizando ponderação de atributos, classificação, mineração de dados e modelos ensemble para capturar interações e não linearidades (Polat; Durduran, 2012; Rodrigues; Ribeiro; Nogueira, 2015; Farhangi *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2024). Revisões recentes mostram, contudo, que ganhos preditivos dependem de tratamento adequado do desbalanceamento, validação externa, seleção de métricas e interpretabilidade (Santos; Dias; Amado, 2022), o que impede considerar métodos de IA automaticamente superiores em qualquer contexto.

A incorporação dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) alterou a escala e a natureza das perguntas de segurança viária ao possibilitar geocodificação, integração de camadas, vinculação de eventos à rede e análise da vizinhança. A literatura de geoinformação fornece a base conceitual para representação e análise espacial desses dados (Câmara; Monteiro; Davis, 2001; ESRI, s.d.). Aplicações pioneiras mostraram a transição de bancos tabulares para sistemas georreferenciados de apoio à decisão e controle de qualidade dos registros (Faghri; Raman, 1995; Kim; Levine, 1996; Austin; Tight; Kirby, 1997; Liang; Ma'soem; Hua, 2005). Posteriormente, sistemas de gestão e validação espacial de acidentes ampliaram o uso de SIG em diferentes redes e países (Mendoza *et al.*, 2001; Lai; Chan, 2004; Loo, 2006; Erdogan *et al.*, 2008).

A identificação de hotspots tornou-se uma das aplicações mais difundidas do SIG. KDE, autocorrelação espacial, Getis-Ord Gi*, agrupamentos, Network KDE e combinações com critérios estatísticos passaram a representar concentração, dependência e risco em escalas distintas (Anderson, 2009; Gundogdu, 2010; Plug; Xia; Caulfield, 2011; Bíl *et al.*, 2016; Mohaymany *et al.*, 2013; Harirforoush; Bellalite, 2019; Dereli; Erdogan, 2017). Estudos recentes ampliaram esse repertório com Bayes empírico espaço-temporal, Moran's I, análise multicritério, inteligência geoespacial e abordagens preditivas em diferentes contextos nacionais (Erdogan; Dereli; Senol, 2022; Alam; Tabassum, 2023; Bilaşco; Man, 2024; Khatun *et al.*, 2024; Mahato *et al.*, 2024; Mesic *et al.*, 2024; Iamtrakul; Chayphong, 2025). A literatura também mostra aplicações em acidentes de pedestres, planejamento sustentável e previsão apoiada por SIG (Mohammadi *et al.*, 2023; Mohammed *et al.*, 2023; Moreno-Ponce; Pérez-Zuriaga; García, 2025), enquanto Kazmi *et al.* (2022) exemplificam a integração entre agrupamento espaço-temporal e estimativa de densidade.

A diversidade de métodos geoespaciais implica escolhas analíticas que podem alterar a identificação de áreas críticas. O uso de distância euclidiana em eventos restritos a uma rede, a escolha da largura de banda do kernel, a unidade de agregação e a precisão da geocodificação podem modificar hotspots e rankings de prioridade. Por isso, métodos baseados em rede e procedimentos de validação foram desenvolvidos para aproximar a estatística da estrutura real da infraestrutura (Loo, 2006; Mohaymany *et al.*, 2013; Bíl *et al.*, 2016). Revisões recentes convergem ao mostrar que a robustez depende da integração entre qualidade de dados, exposição, estrutura da rede, estabilidade temporal e validação dos resultados, e não apenas da sofisticação algorítmica (Endashaw *et al.*, 2025).

Outra vertente relevante diz respeito à dependência temporal e à complexidade. A inferência em séries de segurança viária precisa considerar autocorrelação, mudanças de regime e não estacionariedade, pois erros serialmente dependentes podem distorcer incertezas e testes estatísticos (Commandeur *et al.*, 2013). Estudos de tráfego investigaram correlações de longo alcance e comportamento multiescala por diferentes formulações (Shang; Lu; Kamae, 2008; Wu; Sun; Gao, 2008; Li; Yu, 2021). O conceito de sistemas complexos também é utilizado em outras áreas para descrever fenômenos emergentes produzidos por múltiplas interações (Garcia, 2017). De forma complementar, métodos de correlação de longo alcance e correlação cruzada foram empregados fora da segurança viária em séries climáticas, epidemiológicas e financeiras (Vassoler; Zebende, 2012; Filho *et al.*, 2015; Zebende *et al.*, 2021; Guedes *et al.*, 2022), oferecendo referências metodológicas, mas não evidência direta sobre a distribuição dos sinistros.

As relações do tipo potência devem, portanto, ser definidas com precisão. Uma formulação E(Y)=alpha X^beta estabelece uma relação não linear entre uma resposta esperada e uma medida de

exposição; após transformação logarítmica, beta pode ser interpretado como elasticidade. Relações históricas entre motorização e mortalidade, fluxo e acidentes, velocidade e trauma e volume e frequência utilizaram estruturas desse tipo (Smeed; Bennett, 1949; Ceder; Livneh, 1982; Wang; Quddus; Ison, 2009; Mitra, 2009; Cameron; Elvik, 2010; Kononov; Lyon; Allery, 2011). Funções de desempenho de segurança e modelos de contagem também incorporam relações log-lineares de exposição (Dereli; Erdogan, 2017; Erdogan; Dereli; Senol, 2022). Essa formulação não equivale, por si só, à existência de memória longa em uma série temporal, distinção essencial para a síntese desenvolvida neste estudo.

A evolução metodológica do campo pode ser investigada por bibliometria e mapeamento científico, que permitem quantificar produção, autoria, fontes, citações e relações temáticas. O Bibliometrix fornece um fluxo reprodutível para análise bibliométrica em R (Aria; Cuccurullo, 2017), enquanto o VOSviewer permite construir redes de co-ocorrência, coautoria e citação (Van Eck; Waltman, 2010). A interpretação desses indicadores deve reconhecer diferenças de cobertura entre bases e o efeito da idade da publicação sobre o número de citações (Mongeon; Paul-Hus, 2016). Para revisões que incluem triagem estruturada, princípios de transparência e rastreabilidade associados ao PRISMA também são úteis para documentar decisões de seleção (Page *et al.*, 2021).

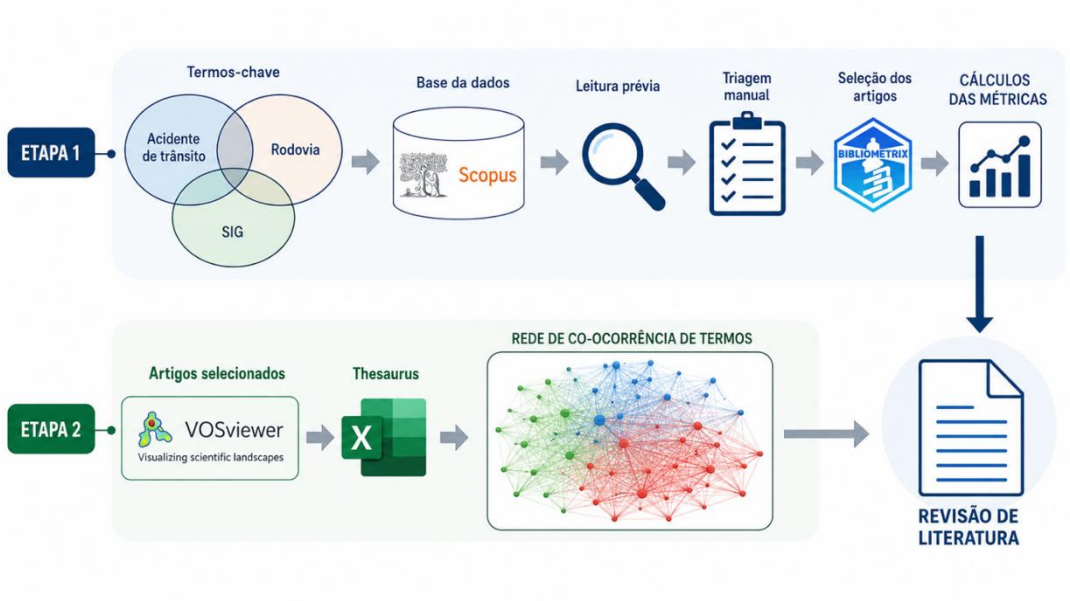
A literatura recente confirma que o campo se tornou simultaneamente mais espacial, mais preditivo e mais heterogêneo. Revisões de SIG e de aprendizado de máquina sintetizam uma ampla variedade de métodos, mas também evidenciam problemas recorrentes de padronização, comparabilidade e validação (Santos; Dias; Amado, 2022; Endashaw *et al.*, 2025). Essa heterogeneidade justifica uma análise histórica que não trate a evolução técnica como substituição linear de métodos antigos por novos, mas como acúmulo de ferramentas orientadas por perguntas distintas: localização, explicação, inferência, priorização e previsão.

Com base nesse arcabouço, a presente revisão adota três premissas: (i) a adequação de uma técnica deve ser avaliada em função da estrutura dos dados e da escala espacial; (ii) avanços preditivos precisam ser acompanhados por validação, interpretabilidade e controle de incerteza; e (iii) relações de potência devem ser classificadas segundo sua formulação matemática específica, distinguindo elasticidade exposição-frequência de memória de longo alcance. Essas premissas conectam a evolução histórica, os métodos de SIG, a estatística de segurança viária e a análise bibliométrica empregadas nas seções seguintes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo combinou análise bibliométrica quantitativa do corpus com síntese temática crítica das técnicas estatísticas identificadas. O fluxo compreendeu definição dos termos, busca na Scopus, triagem por elegibilidade, exportação e tratamento dos metadados, cálculo de indicadores bibliométricos, seleção da amostra temática e construção da rede de co-ocorrência (Figura 1). O relato da identificação e triagem foi organizado de forma inspirada no PRISMA 2020, sem caracterizar o estudo como revisão sistemática de efetividade (Page *et al.*, 2021).

Figura 1. Fluxo analítico do estudo: busca, triagem, análise bibliométrica, síntese temática e rede de co-ocorrência de termos.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.1 ETAPA 1: ESTRATÉGIA DE BUSCA

A estratégia de busca foi definida a partir de três blocos conceituais: sinistros de trânsito, rodovias e SIG. Foram elegíveis artigos revisados por pares, em qualquer idioma, publicados em estágio final e disponíveis na Scopus até 31 de dezembro de 2025. A busca inicial recuperou 652 registros. O escopo temporal da análise foi fixado em 1990–2025 porque os primeiros registros elegíveis do corpus ocorreram no início da década de 1990.

A string aplicada à Scopus foi: (“traffic accident*” OR “traffic collision” OR “road accident*” OR “road traffic*” OR “car accident*” OR “road traffic accident*” OR “road crash*”) AND (“highway*” OR “road*” OR “freeway*” OR “motorway”) AND (“GIS” OR “Geospatial Information System” OR “Spatial Information System” OR “Geographic Information Science” OR “GIScience”). A mesma expressão foi aplicada à Web of Science apenas como verificação comparativa de cobertura; os registros dessa base não foram combinados ao corpus analítico.

Os 652 registros foram submetidos à triagem manual por título e resumo, com consulta ao texto completo quando o método não estava suficientemente descrito. Foram excluídos trabalhos de revisão, estudos centrados exclusivamente em mortalidade hospitalar, estudos sem dados georreferenciados de sinistros e aplicações fora do recorte rodoviário definido. Ao final, 219 artigos permaneceram elegíveis e compuseram o corpus bibliométrico. Como a análise principal utilizou apenas a Scopus, não houve etapa de combinação entre bases nem remoção de duplicatas interbase; por isso, esses campos aparecem como "NA" no fluxograma (Figura 2).

A opção pela Scopus foi mantida por sua ampla cobertura multidisciplinar e pela disponibilidade de metadados adequados à análise bibliométrica. A comparação com a Web of Science foi utilizada apenas como verificação de sensibilidade da cobertura, não como fonte adicional de registros. Essa decisão melhora a consistência dos metadados, mas constitui uma limitação de abrangência, pois a cobertura de periódicos difere entre bases (Mongeon; Paul-Hus, 2016).

Os metadados dos 219 artigos foram exportados em formato CSV e importados no pacote Bibliometrix, em ambiente R, para cálculo de indicadores de produção, fontes, autoria, colaboração e citações (Aria; Cuccurullo, 2017). A análise descritiva incluiu período, número de fontes e documentos, taxa de crescimento, autores, coautoria, colaboração internacional e citações globais. Os indicadores foram também estratificados por décadas para examinar mudanças ao longo do tempo.

O Quadro 1 apresenta as perguntas de pesquisa que orientaram o estudo (RTA: road traffic accidents, isto é, sinistros de trânsito rodoviário), respondidas, respectivamente, nas seções 4.1 a 4.9. As métricas bibliométricas foram interpretadas de forma descritiva; contagens de citações foram utilizadas como indicador de influência no corpus, reconhecendo-se o viés temporal que favorece artigos mais antigos.

Quadro 1. Perguntas de pesquisa que orientaram o estudo.

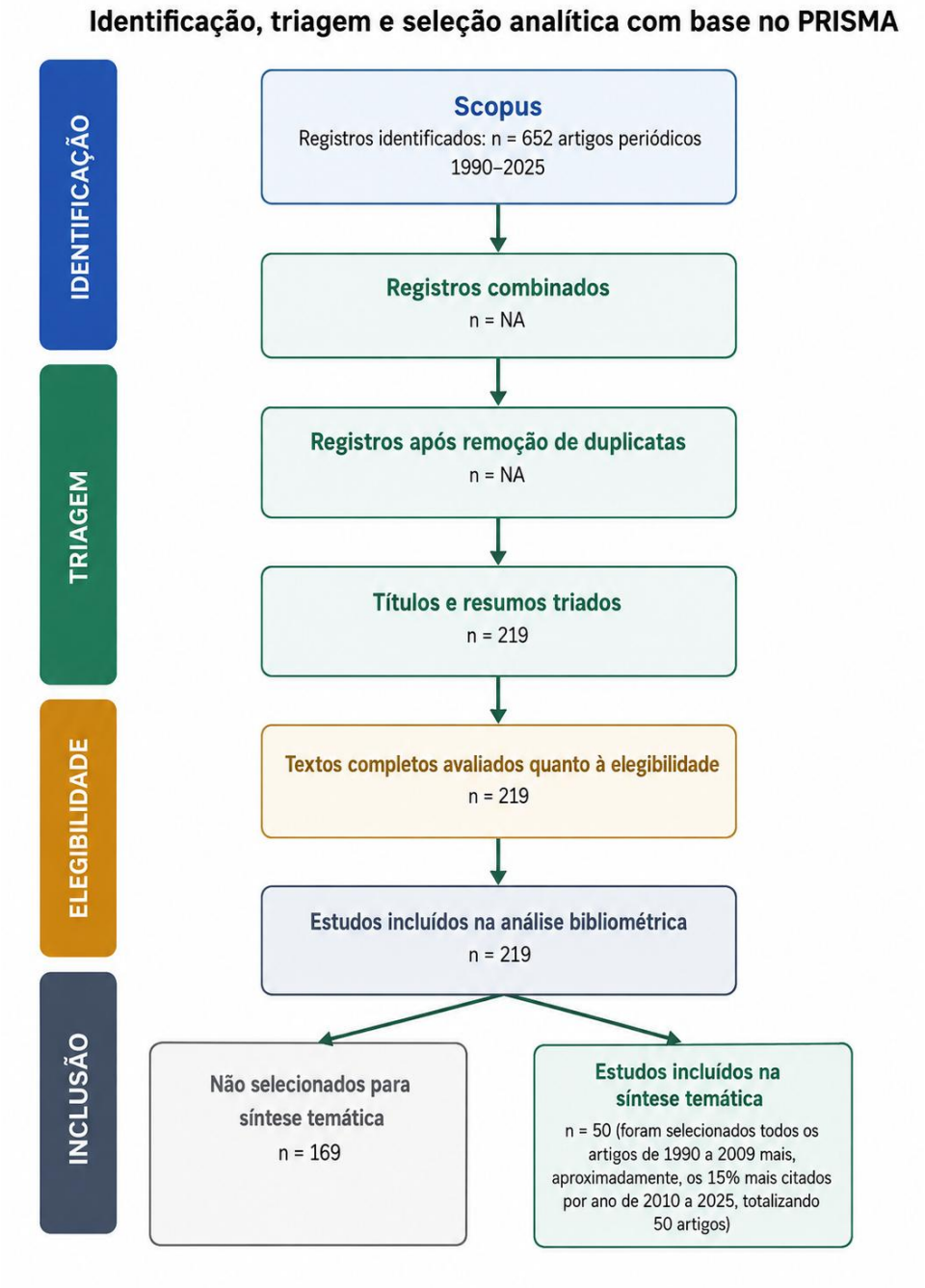
Nº	**Questões de pesquisa**
1	Qual é a tendência temporal das publicações científicas sobre a análise estatística dos RTA a partir de uma abordagem baseada em SIG?
2	Quais países mais contribuíram para a pesquisa em RTA?
3	Quais são os periódicos mais relevantes nesse campo de pesquisa?
4	Quais são os artigos científicos mais influentes?
5	Quais autores mais contribuíram para o desenvolvimento desse campo científico?
6	Quais são as técnicas estatísticas apoiadas por SIG mais utilizadas nos estudos de RTA?
7	Quais são os termos predominantes nas publicações científicas sobre RTA?
8	As publicações analisam as variações dos acidentes de trânsito sob a perspectiva de uma lei de potência?
9	Como as relações descritas por leis de potência são interpretadas estatisticamente nos modelos analisados?

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.2 ETAPA 2: SELEÇÃO PARA SÍNTESE TEMÁTICA

Para a síntese temática das técnicas, selecionaram-se 50 artigos do corpus de 219. A amostra incluiu todos os artigos publicados entre 1990 e 2009 e, para 2010–2025, aproximadamente 15% dos artigos mais citados em cada ano, desde que apresentassem ao menos uma citação. Assim, 169 documentos permaneceram no corpus bibliométrico, mas não foram incluídos na leitura temática aprofundada. O procedimento e as quantidades de cada etapa são apresentados na Figura 2.

Figura 2. Fluxo de identificação, triagem e seleção analítica do corpus: 652 registros identificados na Scopus, 219 estudos elegíveis para a análise bibliométrica e 50 selecionados para a síntese temática.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Além das métricas descritivas e da síntese temática, foi realizada análise de co-ocorrência de termos para identificar a estrutura conceitual do corpus completo de 219 artigos. Essa etapa buscou revelar associações entre temas, métodos e aplicações recorrentes na literatura.

3.3 ETAPA 3: REDE DE CO-OCORRÊNCIA DE TERMOS E PALAVRAS

A rede de co-ocorrência foi construída no VOSviewer 1.6.20 a partir dos metadados dos 219 artigos (Van Eck; Waltman, 2010). Foi adotado limiar mínimo de cinco ocorrências por termo. Um tesauro elaborado manualmente em planilha eletrônica foi utilizado para unificar sinônimos, variantes ortográficas e formas equivalentes; termos sem conteúdo analítico para a pergunta de pesquisa foram suprimidos. Os clusters resultantes foram interpretados com base na proximidade, nas ligações e na recorrência dos termos, sem atribuir causalidade às associações da rede.

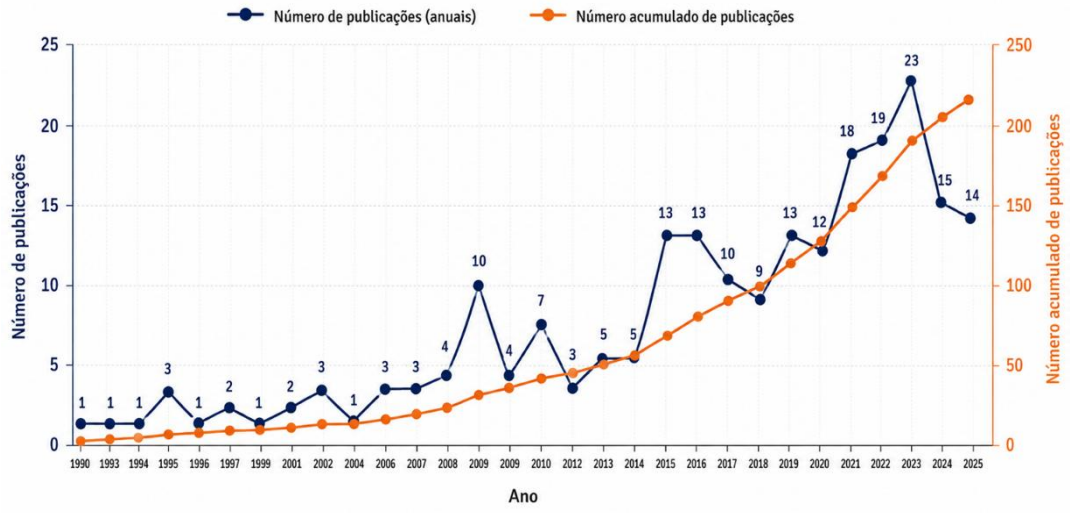
4 RESULTADOS

4.1 TENDÊNCIA DAS PUBLICAÇÕES

Após a triagem, 219 artigos publicados entre 1990 e 2025 compuseram o corpus bibliométrico, em concordância com o fluxo apresentado na Figura 2 e com as métricas gerais da Tabela 1.

A produção anual mostra crescimento de longo prazo, embora com oscilações entre anos (Figura 3). O maior valor anual ocorreu em 2023, com 23 publicações. A curva acumulada evidencia aceleração sobretudo a partir da década de 2010, compatível com a expansão das aplicações de análise espacial, disponibilidade de dados georreferenciados e métodos computacionais.

Figura 3. Número anual de publicações e número acumulado de artigos do corpus indexado na Scopus, 1990–2025.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores, com base em Scopus e Bibliometrix.

A Tabela 1 sintetiza as métricas gerais e por período. O corpus reuniu 132 fontes, 219 artigos e 715 autores. O número de autores cresceu de 21 em 1990–1999 para 373 em 2020–2025, acompanhando o aumento do volume de publicações e da coautoria.

O período 2020–2025 concentrou 101 artigos (46,1% do corpus), média de 16,8 publicações por ano e 3,93 coautores por documento. A maior taxa de crescimento relativa ocorreu em 2000–2009 (22,28%), quando a base ainda era pequena. A colaboração internacional atingiu 23,73% em 2020–2025, valor superior ao observado em 2010–2019 (15,85%) e semelhante ao de 2000–2009 (23,08%) (Tabela 1).

Tabela 1. Indicadores bibliométricos gerais e por período para o corpus de 219 artigos.

Indicadores	1990–2025	1990–1999	2000–2009	2010–2019	2020–2025
Fontes (periódicos)	132	9	17	68	61
Artigos	219	10	26	82	101
Taxa de crescimento anual (%)	8,04	0	22,28	13,99	4,56
AUTORES					
Autores	715	21	75	253	373
Autores de documentos de autoria única	18	3	5	7	3
COLABORAÇÃO DOS AUTORES					
Coautores por documento	3,55	2,2	3,31	3,29	3,93
Coautoria internacional (%)	19,63	0	23,08	15,85	23,73

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, com base em Scopus e Bibliometrix.

4.2 COLABORAÇÃO DAS PUBLICAÇÕES POR PAÍS

Entre os países com maior participação no corpus, os Estados Unidos apresentaram 55 artigos (25,1%), seguidos por China e Índia, com 42 artigos cada (19,2%), Irã (31; 14,2%), Peru (24; 11,0%) e Reino Unido (22; 10,0%) (Figura 4). Coreia do Sul, Malásia, Jordânia e Tailândia completaram os dez primeiros. Como um mesmo artigo pode envolver autores de mais de um país, essas participações não são mutuamente exclusivas e não devem ser somadas como percentuais do total.

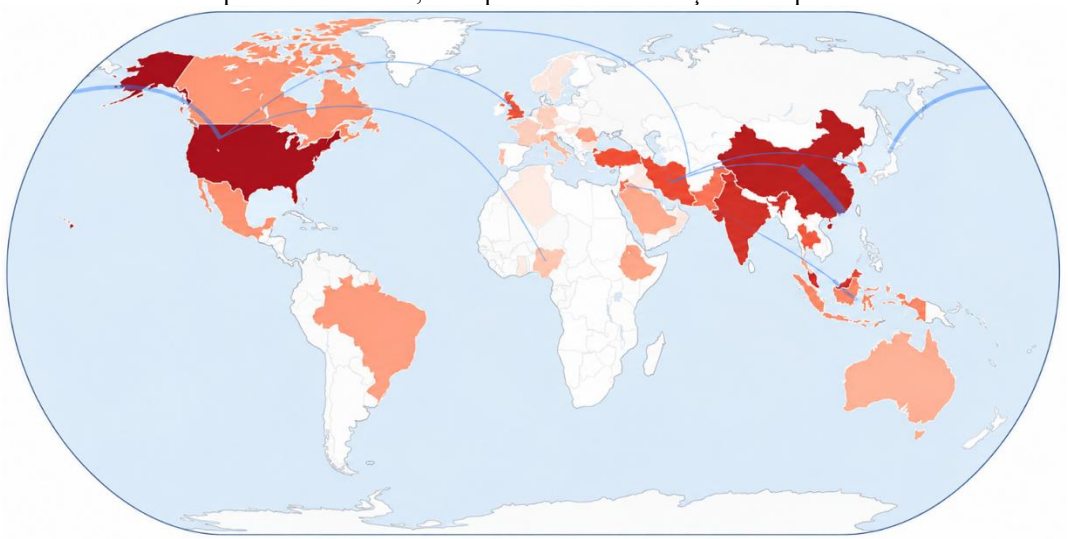
Figura 4. Dez países com maior participação na produção científica do corpus sobre análise de sinistros rodoviários com suporte de SIG.



Fonte: Scopus e Bibliometrix.

A rede de coautoria internacional (Figura 5) mostra que os Estados Unidos mantiveram conexões com Coreia do Sul, Reino Unido, Nigéria e Irã; a China apresentou vínculo mais intenso com Hong Kong, e a Malásia com Indonésia e Jordânia. A espessura das linhas representa a frequência de colaboração e permite distinguir volume de produção de integração efetiva entre países.

Figura 5. Rede internacional de coautoria. A intensidade do preenchimento representa o volume de publicações e a espessura das linhas, a frequência de colaboração entre países.

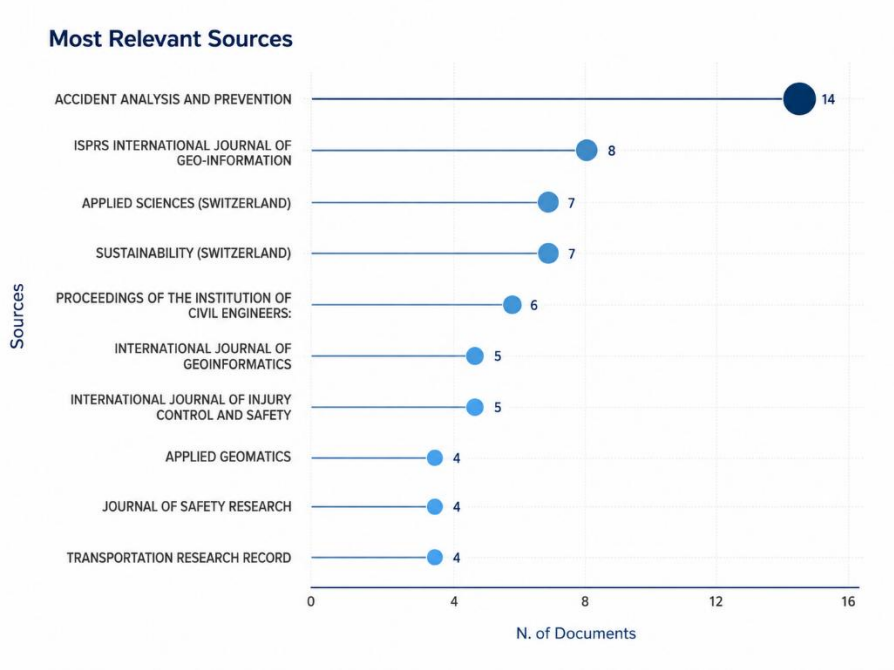


Fonte: Scopus e Bibliometrix.

4.3 PERIÓDICOS MAIS RELEVANTES SOBRE RTA

A produção encontra-se distribuída por 132 periódicos, mas um conjunto relativamente pequeno concentra maior número de documentos, como mostra a Figura 6.

Figura 6. Dez periódicos com maior número de documentos no corpus até 2025.



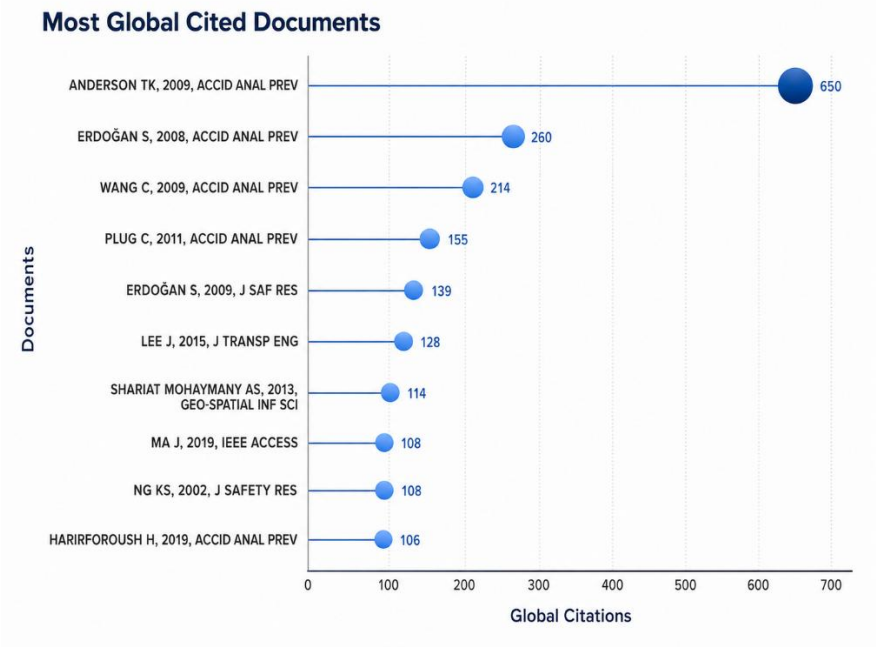
Fonte: Scopus e Bibliometrix.

Accident Analysis & Prevention liderou com 14 artigos, equivalentes a 6,4% dos 219 documentos do corpus. ISPRS International Journal of Geo-Information apresentou 8 artigos, enquanto Applied Sciences e Sustainability registraram 7 cada. Proceedings of the Institution of Civil Engineers registrou 6 artigos, International Journal of Geoinformatics e International Journal of Injury Control and Safety Promotion, 5 cada, enquanto Applied Geomatics, Journal of Safety Research e Transportation Research Record aparecem com 4 artigos cada entre as dez fontes mostradas na Figura 6. A concentração em periódicos de segurança viária, geoinformação e análise aplicada evidencia o caráter interdisciplinar do tema.

4.4 ARTIGOS MAIS INFLUENTES SOBRE RTA

Entre os dez artigos mais citados globalmente, Anderson (2009) ocupou a primeira posição, com 650 citações, seguido por Erdogan *et al.* (2008), com 260, e Wang, Quddus e Ison (2009), com 214 (Figura 7). Esses três trabalhos reuniram 1.124 das 1.982 citações contabilizadas entre os dez primeiros, ou 56,7% das citações desse subconjunto — e não do corpus completo. O décimo artigo da lista, Harirforoush e Bellalite (2019), registrou 106 citações.

Figura 7. Dez documentos do corpus com maior número de citações globais acumuladas até 2025.



Fonte: Scopus e Bibliometrix.

A influência de Anderson (2009) está associada à combinação de KDE e K-means para identificar e tipificar hotspots, exemplificando a transição de mapas descritivos para classificação espacial orientada a padrões.

Erdogan *et al.* (2008) demonstraram a operacionalização de um sistema de análise de sinistros auxiliado por SIG, com transformação de registros em dados georreferenciados para identificação de áreas críticas. O trabalho ilustra a consolidação do SIG como infraestrutura de integração entre base de dados e tomada de decisão.

Wang, Quddus e Ison (2009) combinaram modelagem de contagem e estrutura espacial para investigar congestionamento e frequência de sinistros na M25, enquanto Plug, Xia e Caulfield (2011) enfatizaram visualização espaço-temporal e exploração multiescala. Em conjunto, esses estudos ampliaram o foco de localização para explicação de heterogeneidade espacial e temporal.

A presença, entre os trabalhos influentes, de modelos espacialmente variáveis e de procedimentos de autocorrelação reforça que fatores associados a sinistros podem não operar de forma estacionária no espaço. Essa característica motivou o uso posterior de abordagens locais, hierárquicas e espaço-temporais.

A evolução posterior incorporou modelos bayesianos e de aprendizado de máquina para severidade e risco, permitindo representar relações não lineares e efeitos condicionais. Entretanto, a literatura metodológica ressalta que maior flexibilidade preditiva precisa ser acompanhada por

validação, avaliação de heterogeneidade e interpretação dos preditores (Savolainen *et al.*, 2011; Santos; Dias; Amado, 2022).

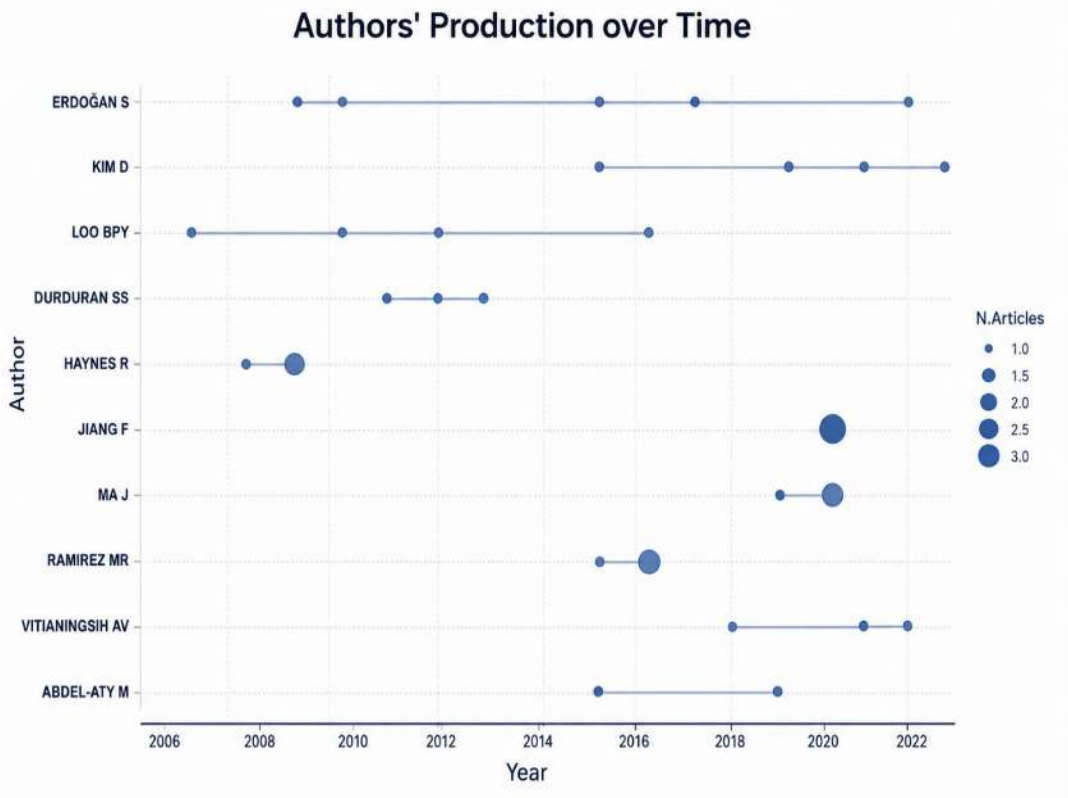
Mohaymany *et al.* (2013) adaptaram a estimação de densidade à estrutura de rede, enquanto Ma *et al.* (2019) empregaram XGBoost associado a análise em grade. Esses exemplos sintetizam a passagem de métodos de densidade e estatística espacial para arquiteturas preditivas com maior capacidade de integração de variáveis.

Ng, Hung e Wong (2002) combinaram SIG e regressão binomial negativa para estimar risco de sinistros, e Harirforoush e Bellalite (2019) integraram NKDE a critérios de priorização de hotspots. A coexistência desses enfoques entre os trabalhos mais citados confirma que visualização, estatística de contagem e análise em redes permanecem complementares.

4.5 CONTRIBUIÇÃO E PRODUTIVIDADE DOS AUTORES

A Figura 8 apresenta a distribuição temporal da produção dos autores mais recorrentes, permitindo distinguir continuidade de publicação e episódios de produção concentrada em anos específicos.

Figura 8. Produção temporal dos principais autores, 1990–2025. O tamanho dos círculos representa o número de artigos e as linhas indicam os anos de atividade no corpus.



Fonte: Scopus e Bibliometrix.

Erdogan, Kim D. e Loo B. P. Y. apresentam trajetórias distribuídas por vários anos, enquanto outros autores concentram maior número de documentos em períodos curtos (Figura 8). A figura permite descrever continuidade e concentração temporal, mas não sustenta inferências sobre "desinteresse" ou redução de contribuição científica fora do corpus; por isso, interpretações causais sobre interrupções individuais foram evitadas.

4.6 TÉCNICAS ESTATÍSTICAS COM SUPORTE DE UM SIG MAIS UTILIZADAS

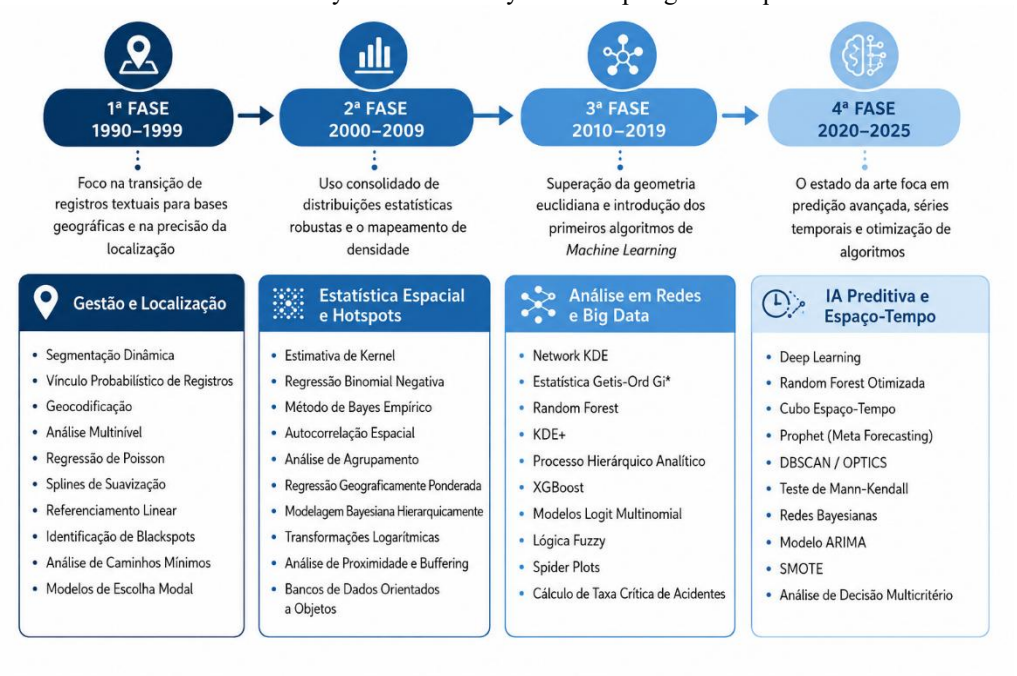
Na década de 1990, a síntese temática indica predomínio de geocodificação, integração de registros e uso do SIG como infraestrutura de gestão. O foco estava em localizar ocorrências e vincular bancos de dados tabulares à rede viária, criando as condições para análises espaciais posteriores.

Entre 2000 e 2009, cresceram os métodos destinados a responder onde os sinistros se agrupam e como fatores variam espacialmente: regressão binomial negativa, KDE, autocorrelação espacial, GWR e abordagens bayesianas passaram a aparecer de forma recorrente. Exemplos do período incluem Ng, Hung e Wong (2002), Loo (2006), Haynes *et al.* (2007), Erdogan *et al.* (2008), Anderson (2009) e Wang, Quddus e Ison (2009).

Em 2010–2019, o campo incorporou análise explicitamente restrita à rede, ferramentas de ranking de hotspots e métodos de aprendizado de máquina. NKDE, visualização multiescala e modelos baseados em árvores ampliaram a capacidade de representar topologia e não linearidade (Plug; Xia; Caulfield, 2011; Mohaymany *et al.*, 2013; Bíl *et al.*, 2016; Harirforoush; Bellalite, 2019).

Em 2020–2025, a literatura tornou-se mais orientada à previsão, integração de grandes volumes de dados e análise espaço-temporal, incluindo ensembles de aprendizado de máquina, deep learning e cubos espaço-tempo (Ma; Huang; Tang, 2021; Mesic *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024). Revisões recentes confirmam esse deslocamento, mas também apontam necessidade de maior padronização de dados e comparação entre métodos (Santos; Dias; Amado, 2022; Endashaw *et al.*, 2025).

Figura 9. Síntese temporal das técnicas mais recorrentes e metodologicamente representativas por período, 1990–2025. SMOTE: Synthetic Minority Oversampling Technique.



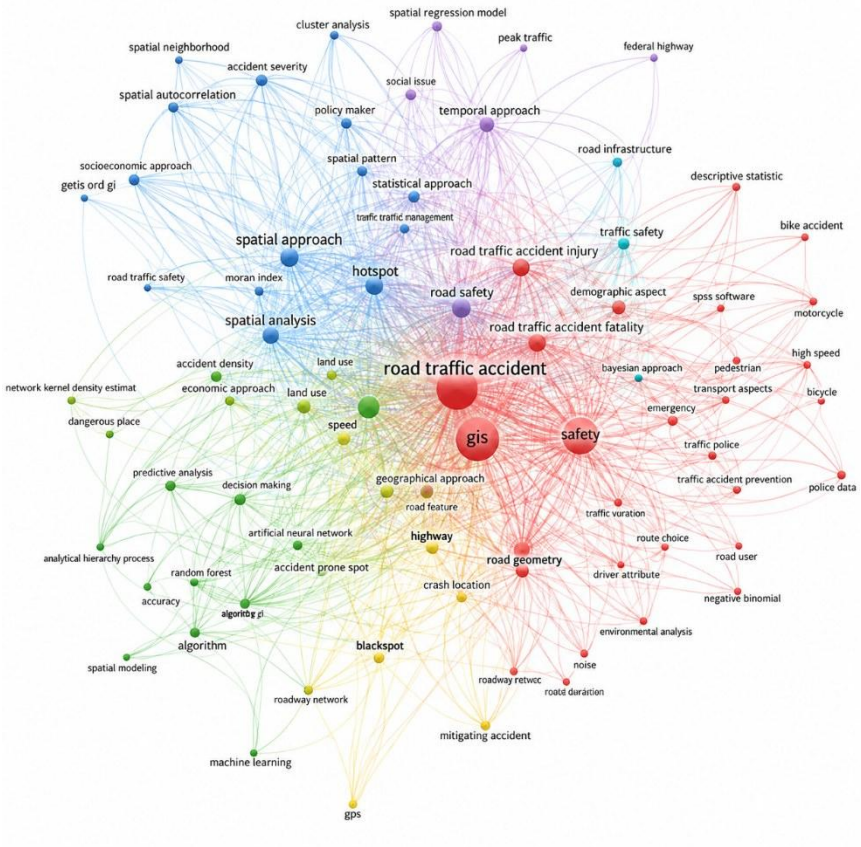
Fonte: Elaborada pelos próprios autores

A Figura 9 sintetiza essa transição: de “onde ocorreu?” na fase de geocodificação, para “onde e por que se concentra?” com estatística espacial, e finalmente para “onde, quando e com que severidade poderá ocorrer?” nas abordagens preditivas contemporâneas. A sequência representa uma tendência dominante do corpus, não uma substituição completa de técnicas anteriores.

4.7 REDE DE CO-OCORRÊNCIA DE TERMOS E PALAVRAS

A rede de co-ocorrência do corpus completo reuniu 102 termos distribuídos em seis clusters (Figura 10). Entre os núcleos de maior peso estavam “road traffic accident” (202 ocorrências), “traffic accident data” (110), “crash risk” (95), “spatial approach” (77), “traffic safety” (25) e “temporal approach” (23). Os três núcleos dominantes — road traffic accident, crash risk e spatial approach — concentraram a maior parcela das associações, evidenciando a articulação entre descrição do evento, modelagem do risco e análise espacial.

Figura 10. Rede de co-ocorrência de termos e métodos nos 219 artigos do corpus, 1990–2025. O tamanho dos nós representa frequência e as cores, os seis clusters temáticos identificados pelo VOSviewer.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores

Os seis clusters foram interpretados de acordo com os termos predominantes e suas conexões:

- Cluster 1 (road traffic accident – em vermelho):

O Cluster 1 reúne análise descritiva, características da via, usuários, fatores demográficos e registros de ocorrência, representando a base empírica e georreferenciada da investigação de sinistros.

- Cluster 2 (crash risk – em verde):

O Cluster 2 concentra modelagem de risco e métodos preditivos, incluindo redes neurais, Random Forest, regressões, lógica fuzzy, AHP e análise multicritério, com forte presença de variáveis de via, velocidade e ambiente.

- Cluster 3 (spatial approach - em azul escuro):

O Cluster 3 é dominado por estatística espacial e severidade, com Moran's I, Getis-Ord Gi*, análise de clusters e identificação de hotspots/coldspots, caracterizando o eixo de dependência e heterogeneidade espacial.

- Cluster 4 (traffic accident data – em amarelo):

O Cluster 4 associa dados de sinistros à identificação de áreas críticas em redes rodoviárias, com KDE, NKDE, Getis-Ord Gi*, GPS e variáveis de infraestrutura. O conteúdo reforça a importância da representação da rede para estimar densidade e priorizar segmentos.

- Cluster 5 (temporal approach – em lilás):

O Cluster 5 reúne abordagens temporais e espaço-temporais, períodos de pico, interseções e efeitos socioeconômicos, aproximando a análise de sinistros de problemas de previsão e persistência de risco ao longo do tempo.

- Cluster 6 (traffic safety – em azul claro):

O Cluster 6 associa segurança viária, rodovias de alta velocidade, inferência bayesiana, DBSCAN e resposta de emergência, compondo um eixo de prevenção e apoio à decisão baseado em modelagem probabilística e mineração de dados.

4.8 VARIÁVEIS DE SINISTROS RODOVIÁRIOS NA PERSPECTIVA DE UMA LEI DE POTÊNCIA

Na amostra temática, seis publicações — organizadas em cinco linhas analíticas — apresentaram relações matemáticas compatíveis com funções de potência ou elasticidade log-log: Ng, Hung e Wong (2002), Haynes *et al.* (2007), Wang, Quddus e Ison (2009), Mitra (2009), Dereli e Erdogan (2017) e Erdogan, Dereli e Şenol (2022). A classificação foi feita pela forma funcional ou pela interpretação do coeficiente de exposição, mesmo quando "power law" não aparecia como conceito central do título.

Ng, Hung e Wong (2002) modelaram contagens de sinistros por regressão binomial negativa, adequada à superdispersão, em formulação log-linear. Quando preditores positivos entram em

logaritmo, seus coeficientes podem ser interpretados como elasticidades, produzindo uma relação do tipo potência na escala original.

Haynes *et al.* (2007) empregaram transformação logarítmica de medidas de exposição em modelos de contagem para representar relações não lineares entre características territoriais e sinistros. A transformação não prova, isoladamente, uma "lei universal", mas fornece uma forma funcional útil para estimar respostas proporcionais em escalas distintas.

Wang, Quddus e Ison (2009) compararam especificações de contagem e relações entre congestionamento, fluxo e frequência de sinistros. O estudo dialoga com funções de potência previamente usadas para relacionar exposição ao tráfego e risco, ao mesmo tempo em que incorpora dependência espacial.

Mitra (2009) empregou uma estrutura bayesiana espacial para interseções, na qual a exposição ao tráfego é incorporada em escala logarítmica. Nessa parametrização, o coeficiente associado ao logaritmo do volume representa a variação proporcional esperada na frequência de sinistros, isto é, uma elasticidade.

Dereli e Erdogan (2017) e Erdogan, Dereli e Şenol (2022) utilizaram funções de desempenho de segurança e procedimentos espaciais/empíricos bayesianos para estimar risco esperado e identificar locais críticos. Esses trabalhos foram agrupados na mesma linha temática por compartilharem a lógica de estimar frequência esperada em função da exposição e de características espaciais.

4.9 INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA DA LEI DE POTÊNCIA

A interpretação estatística mais consistente para esse subconjunto é a de função de potência/elasticidade, e não a afirmação de que todos os sinistros "seguem uma lei de potência". Se $E(Y)=\alpha X^{\beta}$, então $\log E(Y)=\log \alpha+\beta \log X$; β representa a elasticidade da frequência esperada em relação a X. Essa forma é compatível com funções de desempenho de segurança e outros modelos log-lineares de contagem.

A vantagem dessa parametrização é acomodar contagens não negativas e relações não lineares em escala original sem recorrer à regressão linear simples. Entretanto, a distribuição probabilística do erro, a superdispersão e a heterogeneidade espacial continuam exigindo modelos adequados, como binomial negativa, estruturas bayesianas ou efeitos espaciais (Lord; Mannering, 2010).

Haynes *et al.* (2007) empregaram transformação logarítmica de medidas de exposição em modelos de contagem para representar relações não lineares entre características territoriais e sinistros. A transformação não prova, isoladamente, uma "lei universal", mas fornece uma forma funcional útil para estimar respostas proporcionais em escalas distintas.

Em modelos log-log, $\beta>1$ indica resposta mais que proporcional; $0<\beta<1$ indica resposta menos que proporcional. Essa leitura é útil para comparar sensibilidade do risco a mudanças na exposição, desde que o intervalo de dados e a incerteza do coeficiente sejam considerados.

A distinção conceitual é importante para a agenda futura: relações exposição–frequência do tipo potência devem ser testadas quanto à forma funcional e estabilidade, enquanto hipóteses de memória de longo alcance em séries temporais requerem métodos específicos de escalonamento. Tratar essas duas evidências como equivalentes poderia superestimar as conclusões sobre "complexidade" do sistema de trânsito.

5 DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam uma mudança estrutural na análise de sinistros com suporte de SIG: o campo evoluiu de geocodificação e gestão de registros para estatística espacial, análise em redes e, mais recentemente, modelos preditivos e espaço-temporais. Essa trajetória não representa abandono dos métodos clássicos. Ao contrário, KDE, regressões de contagem e procedimentos bayesianos permanecem relevantes porque respondem a problemas distintos e frequentemente são combinados com aprendizado de máquina e novas fontes de dados. A literatura metodológica converge com esse achado ao enfatizar que a escolha do modelo deve ser determinada pela estrutura dos dados e pela finalidade da inferência (Lord; Mannering, 2010; Endashaw *et al.*, 2025).

O Quadro 2 sintetiza as funções predominantes por período. A trajetória indica quatro movimentos: organização e geocodificação dos dados (1990–1999), estatística espacial e hotspots (2000–2009), análise em redes e métodos preditivos (2010–2019) e integração de IA, séries temporais e modelagem espaço-temporal (2020–2025).

Quadro 2. Finalidades predominantes das técnicas de análise de sinistros rodoviários e principais contribuições metodológicas por período.

Período	Finalidade do uso do método	Principal contribuição
1990–1999	Transição de bancos de dados textuais para sistemas de informações geográficas (GIS-T) e validação de registros policiais.	Melhoria significativa na precisão da localização dos acidentes, redução do esforço manual e aprimoramento do armazenamento dos dados (FAGHRI; RAMAN, 1995; AUSTIN; TIGHT; KIRBY, 1997).
2000–2009	Identificação de pontos críticos de acidentes (black spots) e compreensão da não estacionariedade espacial e dos fatores associados às relações de causa e efeito.	Mudança do foco de análise de "onde ocorreu" para "quão perigoso é, estatisticamente, determinado local" (ANDERSON, 2007; 2009).
2010–2019	Análise da rede viária e integração de critérios de decisão multicritério.	Maior precisão na identificação de agrupamentos espaciais (clusters) em áreas urbanas densas, contribuindo para o aprimoramento da gestão de recursos públicos (RODRIGUES; RIBEIRO; NOGUEIRA, 2015; MA et al., 2019).
2020–2025	Modelagem proativa e preditiva, com ênfase em tendências de longo prazo, avaliação da severidade em tempo real e otimização meta-heurística de algoritmos.	Ampliação da capacidade de realizar intervenções preventivas e emitir alertas de risco em tempo real para veículos inteligentes (KAZMI et al., 2022; BILASCO; MAN, 2024; MORENO-PONCE; PÉREZ-ZURIAGA; GARCÍA, 2025).

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O crescimento do corpus foi acompanhado por aumento expressivo de coautoria e diversidade de fontes. A concentração de 46,1% dos artigos em 2020–2025 mostra que a produção recente responde à maior disponibilidade de dados georreferenciados e capacidade computacional. Entretanto, a aceleração das publicações não deve ser interpretada como medida direta de maturidade: protocolos, escalas, definições de hotspot e métricas de desempenho permanecem heterogêneos, problema também identificado por Endashaw *et al.* (2025).

A predominância de Accident Analysis & Prevention entre as fontes e entre os documentos mais citados sugere um núcleo disciplinar forte em segurança viária, coexistindo com periódicos de geoinformação e aplicações computacionais. O padrão interdisciplinar é coerente com a própria natureza do problema: análises espaciais eficazes dependem de engenharia de transportes, estatística, ciência de dados e representação geográfica. Anderson (2009) é emblemático dessa convergência ao integrar densidade espacial e agrupamento.

A estrutura geográfica da produção revela liderança de Estados Unidos, China e Índia, mas também mostra redes de colaboração assimétricas. Esse resultado merece ser interpretado à luz do peso desproporcional dos sinistros em países de baixa e média renda. A OMS estimou 1,19 milhão de mortes anuais e destacou que a redução global ainda é insuficiente para a meta de 2030 (WHO, 2023). Assim, maior diversidade geográfica de dados, coautoria e validação externa é necessária para evitar que modelos desenvolvidos em contextos específicos sejam generalizados sem teste.

A expansão de aprendizado de máquina amplia a capacidade de capturar relações complexas, mas não elimina desafios clássicos de modelagem. Desbalanceamento de classes, vazamento de informação, escolha de métricas e perda de interpretabilidade podem inflar desempenho aparente; por

isso, comparações devem incluir validação temporal ou espacial e, quando possível, modelos estatísticos de referência (Santos; Dias; Amado, 2022). Em segurança viária, a utilidade operacional de um modelo depende tanto da capacidade de generalização quanto de sua acurácia local.

A rede de co-ocorrência reforça essa leitura ao aproximar termos de risco, análise espacial, dados de sinistros e abordagem temporal. Os seis clusters mostram que o campo não se organiza em uma única escola metodológica: descrição, modelagem espacial, predição, infraestrutura de dados e segurança coexistem. Essa multiplicidade favorece abordagens híbridas, mas também amplia a necessidade de vocabulário metodológico preciso e de documentação reprodutível.

A análise das relações de potência constitui o principal ajuste conceitual desta revisão. Os artigos identificados não demonstram que todas as variáveis de sinistros obedecem universalmente a uma lei de potência; em sua maioria, utilizam funções log-lineares nas quais volume de tráfego ou outra exposição entra como preditor e o coeficiente assume interpretação de elasticidade. Essa formulação é estatisticamente útil, mas distinta da evidência de correlação de longo alcance em séries de fluxo (Shang; Lu; Kamae, 2008). A distinção evita extrapolações indevidas e cria uma agenda mais testável para pesquisas futuras.

O estudo possui limitações. A análise bibliométrica foi restrita à Scopus; a amostra temática de 50 artigos utilizou citação como parte do critério de seleção e, portanto, favorece trabalhos antigos e de maior visibilidade; os indicadores de país e influência dependem da cobertura e da indexação da base; e a classificação das técnicas foi realizada a partir da leitura dos documentos selecionados. Pesquisas futuras devem integrar bases complementares, registrar protocolos reprodutíveis de classificação, comparar técnicas no mesmo conjunto de dados e testar estabilidade espacial e temporal. Em especial, relações do tipo potência devem ser avaliadas por comparação de formas funcionais e incerteza dos expoentes, e não presumidas a priori.

6 CONCLUSÃO

Este estudo caracterizou a evolução das técnicas estatísticas com suporte de SIG aplicadas a sinistros rodoviários entre 1990 e 2025 e examinou criticamente a presença de relações do tipo potência na literatura selecionada. O corpus bibliométrico reuniu 219 artigos, 132 fontes e 715 autores, com forte expansão no período 2020–2025 e crescente diversificação das abordagens analíticas.

A trajetória metodológica avançou da geocodificação e gestão de registros para estatística espacial, análise em redes, modelos bayesianos, aprendizado de máquina e abordagens espaço-temporais. Esse avanço foi cumulativo: métodos tradicionais de contagem, densidade e autocorrelação permanecem relevantes e são frequentemente integrados a técnicas preditivas mais recentes.

A síntese temática mostrou que as relações denominadas ou interpretadas como “potência” aparecem principalmente como funções de exposição–frequência ou elasticidades em modelos log-lineares. Portanto, não há suporte no corpus para afirmar que sinistros rodoviários são, de modo geral, “mais bem caracterizados” por uma lei de potência. A contribuição do estudo é explicitar essa distinção e indicar que a hipótese deve ser testada caso a caso, com comparação entre formas funcionais e avaliação de estabilidade.

As principais limitações decorrem da utilização exclusiva da Scopus para o corpus bibliométrico e do critério de citação empregado na síntese temática. Futuras revisões devem integrar bases adicionais, explicitar procedimentos de deduplicação, ampliar a validação temática e comparar métodos sob protocolos comuns. Para a segurança viária aplicada, a agenda mais promissora combina qualidade dos dados, representação adequada da rede, validação espaço-temporal, interpretabilidade e integração responsável entre modelos estatísticos e aprendizado de máquina.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do edital CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 –Presente, Passado e Futuro da Biodiversidade do Semiárido: Inventários, Monitoramento, Impactos das Mudanças Climáticas e Implicações para o Uso e Conservação da Flora, Fauna e Fungos. W.J.F.R. foi apoiado por bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (processo nº 314954/2021-0), Projeto Prospecta 4.0 –CNPq (processo nº 407907/2022-0) e pelo projeto 30202010010121001 –CTBIO –FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS –CTBio-CIMATEC SERTÃO). Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (INCT IN-TREE), financiado pelo CNPq (408930/2024-1), pela CAPES (88887.195651/2025-00) e pela FAPESP. Financiamento adicional foi fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), por meio do programa Bioeconomia, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, no âmbito da Chamada nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Termo de Outorga nº PPF0003/2023. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio institucional, bem como ao SENAI CIMATEC pela contribuição no desenvolvimento científico e tecnológico voltado à inovação aplicada.R.N.V. foi apoiado pelo INCT IN-TREE e agradece a bolsa SET-G 30202010010121001 –CTBIO –FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia doSemiárido (UEFS –CTBio-CIMATEC SERTÃO), vinculado a Projetos Especiais.

REFERÊNCIAS

ALAM, M. S.; TABASSUM, N. J. Spatial pattern identification and crash severity analysis of road traffic crash hot spots in Ohio. Heliyon, v. 9, n. 5, e16303, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16303.

ANDERSON, T. K. Comparison of spatial methods for measuring road accident 'hotspots': a case study of London. Journal of Maps, v. 3, n. 1, p. 55-63, 2007. DOI: https://doi.org/10.1080/jom.2007.9710827.

ANDERSON, T. K. Kernel density estimation and K-means clustering to profile road accident hotspots. Accident Analysis & Prevention, v. 41, n. 3, p. 359-364, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.12.014.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007.

AUSTIN, K.; TIGHT, M.; KIRBY, H. The use of geographical information systems to enhance road safety analysis. Transportation Planning and Technology, v. 20, n. 3, p. 249-266, 1997. DOI: https://doi.org/10.1080/03081069708717592.

BÍL, M. *et al.* The KDE+ software: a tool for effective identification and ranking of animal-vehicle collision hotspots along networks. Landscape Ecology, v. 31, p. 231-237, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s10980-015-0265-6.

BILAȘCO, Ș.; MAN, T.-C. GIS-Based Spatial Analysis Model for Assessing Impact and Cumulative Risk in Road Traffic Accidents via Analytic Hierarchy Process (AHP) - Case Study: Romania. Applied Sciences, v. 14, n. 6, art. 2643, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/app14062643.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; DAVIS, C. Geoinformática: teoria e aplicações. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/. Acesso em: 28 fev. 2025.

CAMERON, M. H.; ELVIK, R. Nilsson's Power Model connecting speed and road trauma: applicability by road type and alternative models for urban roads. Accident Analysis & Prevention, v. 42, n. 6, p. 1908-1915, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.05.012.

CEDER, A.; LIVNEH, M. Relationships between road accidents and hourly traffic flow - I: analyses and interpretation. Accident Analysis & Prevention, v. 14, n. 1, p. 19-34, 1982. DOI: https://doi.org/10.1016/0001-4575(82)90004-5.

CHORBA, T. L. Assessing technologies for preventing injuries in motor vehicle crashes. International Journal of Technology Assessment in Health Care, v. 7, n. 3, p. 296-314, 1991. DOI: https://doi.org/10.1017/S0266462300005687.

COMMANDEUR, J. J. F. *et al.* On statistical inference in time series analysis of the evolution of road safety. Accident Analysis & Prevention, v. 60, p. 424-434, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.11.006.

CROMAK, J. R. The need for standardization in reporting collision damage and injury in traffic accidents. In: COLLISION DATA WORKSHOP CONFERENCE, 1975, Rosslyn, Virginia. Proceedings [...]. Rosslyn, 1975.

DEPARTMENT FOR TRANSPORT (DfT). Research and statistics. London: Department for Transport, s.d. Disponível em: https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-transport/about/statistics. Acesso em: 16 ago. 2026.

DERELI, M. A.; ERDOGAN, S. A new model for determining the traffic accident black spots using GIS-aided spatial statistical methods. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 103, p. 106-117, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.05.031.

DEUTSCHER VERKEHRSSICHERHEITSRAT (DVR). Deutscher Verkehrssicherheitsrat. Bonn: DVR, s.d. Disponível em: https://www.dvr.de/. Acesso em: 16 ago. 2026.

ELVIK, R. Speed and road safety: synthesis of evidence from evaluation studies. Transportation Research Record, v. 1908, n. 1, p. 59-69, 2005. DOI: https://doi.org/10.1177/0361198105190800108.

ENDASHAW, D. K. *et al.* A systematic review on GIS-based road traffic accidents analysis and road safety audit. Computational Urban Science, v. 5, art. 53, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s43762-025-00221-w.

ERDOGAN, S.; YILMAZ, I.; BAYBURA, T.; GULLU, M. Geographical information systems aided traffic accident analysis system case study: City of Afyonkarahisar. Accident Analysis & Prevention, v. 40, n. 1, p. 174-181, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.05.004.

ERDOĞAN, S.; DERELI, M. A.; ŞENOL, H. İ. A GIS-based assessment of long-term traffic accidents using spatiotemporal and empirical Bayes analysis in Turkey. Applied Geomatics, v. 14, n. 2, p. 147-162, 2022.

ESRI. History of GIS. Redlands: Esri, s.d. Disponível em: https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/history-of-gis. Acesso em: 16 ago. 2026.

EVANS, L. Double pair comparison - a new method to determine how occupant characteristics affect fatality risk in traffic crashes. Accident Analysis & Prevention, v. 18, n. 3, p. 217-227, 1986. DOI: https://doi.org/10.1016/0001-4575(86)90006-0.

FAGHRI, A.; RAMAN, N. A GIS-based traffic accident information system. Journal of Advanced Transportation, v. 29, n. 3, p. 321-334, 1995. DOI: https://doi.org/10.1002/atr.5670290305.

FARHANGI, F. *et al.* Spatial modelling of accidents risk caused by driver drowsiness with data mining algorithms. Geocarto International, v. 37, 2022. DOI: https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1831626.

FILHO, A. M. S. *et al.* Correlação cruzada da dengue nos três biomas da Bahia. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE BIOMATEMÁTICA, 2015. Anais [...]. 2015.

GARCIA, L. Sistemas complexos: uma nova abordagem para a promoção da atividade física em populações. Revista Brasileira de Atividade Física & Saúde, v. 22, n. 6, p. 499-500, 2017.

GLANVILLE, W. H. Road safety and traffic research in Great Britain. Journal of the Operations Research Society of America, v. 3, n. 3, p. 283-299, 1955. DOI: https://doi.org/10.1287/opre.3.3.283.

GREENSHIELDS, B. D. Traffic and highway research and how it can be improved. Science, v. 168, n. 3932, p. 674-678, 1970. DOI: https://doi.org/10.1126/science.168.3932.674.

GUEDES, E. F. *et al.* Efficiency and long-range correlation in G-20 stock indexes: a sliding windows approach. Fluctuation and Noise Letters, v. 21, n. 4, art. 2250033, 2022. DOI: https://doi.org/10.1142/S021947752250033X.

GUNDOGDU, I. B. Applying linear analysis methods to GIS-supported procedures for preventing traffic accidents: case study of Konya. Safety Science, v. 48, n. 6, p. 763-769, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.02.016.

HADDON JR., W. The changing approach to the epidemiology, prevention, and amelioration of trauma: the transition to approaches etiologically rather than descriptively based. American Journal of Public Health and the Nation's Health, v. 58, n. 8, p. 1431-1438, 1968. DOI: https://doi.org/10.2105/AJPH.58.8.1431.

HARIRFOROUSH, H.; BELLALITE, L. A new integrated GIS-based analysis to detect hotspots: a case study of the city of Sherbrooke. Accident Analysis & Prevention, v. 130, p. 62-74, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.08.015.

HAUER, E. On the estimation of the expected number of accidents. Accident Analysis & Prevention, v. 18, n. 1, p. 1-12, 1986.

HAUER, E.; NG, J. C. N.; LOVELL, J. Estimation of safety at signalized intersections. Transportation Research Record, n. 1185, p. 48-61, 1988.

HAYNES, R.; JONES, A.; KENNEDY, V.; JEWELL, T. District variations in road curvature in England and Wales and their association with road-traffic crashes. Environment and Planning A, v. 39, n. 5, p. 1222-1237, 2007. DOI: https://doi.org/10.1068/a38106.

HOLCOMB, R. L. Alcohol in relation to traffic accidents. Journal of the American Medical Association, v. 111, n. 12, p. 1076-1085, 1938. DOI: https://doi.org/10.1001/jama.1938.02790380018006.

IAMTRAKUL, P.; CHAYPHONG, S. GIS-based analysis of spatio-temporal clustering of road traffic accidents in Bangkok Metropolitan Region (BMR), Thailand from 2012 to 2021. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, v. 31, art. 101489, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101489.

KAZMI, S. S. A.; AHMED, M.; MUMTAZ, R.; ANWAR, Z. Spatiotemporal clustering and analysis of road accident hotspots by exploiting GIS technology and kernel density estimation. The Computer Journal, v. 65, n. 2, p. 155-176, 2022. DOI: https://doi.org/10.1093/comjnl/bxz158.

KHATUN, M. S. *et al.* Identification and analysis of accident black spots using Geographic Information System (GIS): a study on Kushtia-Jhenaidah national highway (N704), Bangladesh. Heliyon, v. 10, n. 3, e25952, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25952.

KIM, K.; LEVINE, N. Using GIS to improve highway safety. Computers, Environment and Urban Systems, v. 20, n. 4-5, p. 289-302, 1996. DOI: https://doi.org/10.1016/S0198-9715(96)00022-1.

KONONOV, J.; LYON, C.; ALLERY, B. K. Relation of flow, speed, and density of urban freeways to functional form of a safety performance function. Transportation Research Record, v. 2236, n. 1, p. 11-19, 2011. DOI: https://doi.org/10.3141/2236-02.

LAI, P. C.; CHAN, W. Y. GIS for road accident analysis in Hong Kong. Geographic Information Sciences, v. 10, n. 1, p. 58-67, 2004. DOI: https://doi.org/10.1080/10824000409480655.

LI, R.; YU, J. Clustering framework based on multi-scale analysis of traffic flow time series. Journal of Physics: Conference Series, v. 1952, n. 4, art. 042056, 2021. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1952/4/042056.

LIANG, L. Y.; MA'SOEM, D. M.; HUA, L. T. Traffic accident application using geographic information system. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, v. 6, p. 3574-3589, 2005.

LOO, B. P. Y. Validating crash locations for quantitative spatial analysis: a GIS-based approach. Accident Analysis & Prevention, v. 38, n. 5, p. 879-886, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.02.012.

LORD, D.; MANNERING, F. The statistical analysis of crash-frequency data: a review and assessment of methodological alternatives. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 44, n. 5, p. 291-305, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.02.001.

MA, J. *et al.* Analyzing the leading causes of traffic fatalities using XGBoost and grid-based analysis: a city management perspective. IEEE Access, v. 7, p. 148059-148072, 2019. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946401.

MA, Q.; HUANG, G.; TANG, X. GIS-based analysis of spatial-temporal correlations of urban traffic accidents. European Transport Research Review, v. 13, art. 50, 2021. DOI: https://doi.org/10.1186/s12544-021-00509-y.

MAHATO, R. K. *et al.* A spatial autocorrelation analysis of road traffic accidents by severity using Moran's I spatial statistics: a study from Nepal 2019-2022. BMC Public Health, v. 24, art. 3086, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s12889-024-20586-7.

MANNERING, F. L.; SHANKAR, V.; BHAT, C. R. Unobserved heterogeneity and the statistical analysis of highway accident data. Analytic Methods in Accident Research, v. 11, p. 1-16, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.amar.2016.04.001.

MARIN, L.; QUEIROZ, M. S. A atualidade dos acidentes de trânsito na era da velocidade: uma visão geral. Cadernos de Saúde Pública, v. 16, n. 1, p. 7-21, 2000. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-311X2000000100002.

MENDOZA, A. *et al.* Geographic Information System-based accident data management for Mexican federal roads. Transportation Research Record, v. 1746, n. 1, p. 74-83, 2001. DOI: https://doi.org/10.3141/1746-10.

MESIC, A. *et al.* Identifying emerging hot spots of road traffic injury severity using spatiotemporal methods: longitudinal analyses on major roads in Ghana from 2005 to 2020. BMC Public Health, v. 24, art. 1609, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s12889-024-18915-x.

MITRA, S. Spatial autocorrelation and Bayesian spatial statistical method for analyzing intersections prone to injury crashes. Transportation Research Record, v. 2136, n. 1, p. 92-100, 2009. DOI: https://doi.org/10.3141/2136-11.

MOHAMMADI, A.; KIANI, B.; MAHMOUDZADEH, H.; BERGQUIST, R. Pedestrian Road Traffic Accidents in Metropolitan Areas: GIS-Based Prediction Modelling of Cases in Mashhad, Iran. Sustainability, v. 15, n. 13, art. 10576, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/su151310576.

MOHAMMED, S. *et al.* GIS-based spatiotemporal analysis for road traffic crashes; in support of sustainable transportation planning. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, v. 20, art. 100836, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100836.

MOHAYMANY, A. S. *et al.* A GIS-based method for detecting high-crash-risk road segments using network kernel density estimation. Geo-spatial Information Science, v. 16, n. 2, p. 113-119, 2013. DOI: https://doi.org/10.1080/10095020.2013.766396.

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. Scientometrics, v. 106, p. 213-228, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5.

MORENO-PONCE, L. A.; PÉREZ-ZURIAGA, A. M.; GARCÍA, A. Predictive Models and GIS for Road Safety: Application to a Segment of the Chone-Flavio Alfaro Road. Sustainability, v. 17, n. 11, art. 5032, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/su17115032.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Década de Ação pela Segurança no Trânsito 2011-2020 é lançada oficialmente hoje (11) em todo o mundo. 2011. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/56643-decada-de-acao-pela-seguranca-no-transito-2011-2020-e-lancada-oficialmente-hoje-11-em-todo-o. Acesso em: 10 ago. 2026.

NG, K. S.; HUNG, W. T.; WONG, W. G. An algorithm for assessing the risk of traffic accident. Journal of Safety Research, v. 33, n. 3, p. 387-410, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/S0022-4375(02)00033-6.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). Segurança no trânsito nas Américas. Washington, DC: OPAS, 2016.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). Estado de la seguridad vial en la Región de las Américas. Washington, DC: OPAS, 2019.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, v. 372, n. 71, 2021. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

PLUG, C.; XIA, J. C.; CAULFIELD, C. Spatial and temporal visualisation techniques for crash analysis. Accident Analysis & Prevention, v. 43, n. 6, p. 1937-1946, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.007.

POLAT, K.; DURDURAN, S. S. Automatic determination of traffic accidents based on KMC-based attribute weighting. Neural Computing and Applications, v. 21, n. 6, p. 1271-1279, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/s00521-011-0559-9.

RODRIGUES, D. S.; RIBEIRO, P. J. G.; NOGUEIRA, I. C. S. Safety classification using GIS in the decision-making process for priority road interventions. Journal of Transport Geography, v. 43, p. 101-110, 2015.

SANTOS, K.; DIAS, J. P.; AMADO, C. A literature review of machine learning algorithms for crash injury severity prediction. Journal of Safety Research, v. 80, p. 254-269, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsr.2021.12.007.

SAVOLAINEN, P. T.; MANNERING, F. L.; LORD, D.; QUDDUS, M. A. The statistical analysis of highway crash-injury severities: a review and assessment of methodological alternatives. Accident Analysis & Prevention, v. 43, n. 5, p. 1666-1676, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.03.025.

SEVITT, S. Death after road traffic accidents. Medicine, Science and the Law, v. 8, n. 4, p. 271-287, 1968. DOI: https://doi.org/10.1177/002580246800800411.

SHANG, P.; LU, Y.; KAMAE, S. Detecting long-range correlations of traffic time series with multifractal detrended fluctuation analysis. Chaos, Solitons & Fractals, v. 36, n. 1, p. 82-90, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.06.019.

SIVAK, M. Society's aggression level as a predictor of traffic fatality rate. Journal of Safety Research, v. 14, n. 3, p. 93-99, 1983. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-4375(83)90019-1.

SMEED, R. J.; BENNETT, G. T. Research on road safety and traffic flow. Road Engineering Division. The Institution of Civil Engineers Engineering Division Papers, v. 7, n. 3, p. 1-38, 1949. DOI: https://doi.org/10.1680/idivp.1949.12842.

SPAIN, D. M.; BRADESS, V. A.; EGGSTON, A. A. Alcohol and violent death: a one-year study of consecutive cases in a representative community. Journal of the American Medical Association, v. 146, n. 4, p. 334-335, 1951. DOI: https://doi.org/10.1001/jama.1951.63670040001007.

SVALASTOGA, K. Differential rates of change and road accidents in Western Europe and North America. Acta Sociologica, v. 13, p. 73-95, 1970.

TILLMANN, W. A.; HOBBS, G. E. The accident-prone automobile driver: a study of the psychiatric and social background. American Journal of Psychiatry, v. 106, n. 5, p. 321-331, 1949. DOI: https://doi.org/10.1176/ajp.106.5.321.

VAN DER HORST, A. R. A. *et al.* An evaluation of speed management measures in Bangladesh based upon alternative accident recording, speed measurements, and DOCTOR traffic conflict observations. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, v. 46, p. 390-403, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.05.006.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3.

VASSOLER, R.; ZEBENDE, G. F. DCCA cross-correlation coefficient apply in time series of air temperature and air relative humidity. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, v. 391, n. 7, p. 2438-2443, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.12.015.

WANG, C.; QUDDUS, M. A.; ISON, S. G. Impact of traffic congestion on road accidents: a spatial analysis of the M25 motorway in England. Accident Analysis & Prevention, v. 41, n. 4, p. 798-808, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.04.002.

WANG, X. *et al.* Prediction and interpretive of motor vehicle traffic crashes severity based on random forest optimized by meta-heuristic algorithm. Heliyon, v. 10, n. 16, e35595, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35595.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Global status report on road safety 2018. Geneva: World Health Organization, 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Global plan for the Decade of Action for Road Safety 2021-2030. Geneva: World Health Organization, 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Global status report on road safety 2023. Geneva: World Health Organization, 2023. ISBN 978-92-4-008651-7.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Road traffic injuries. Geneva: World Health Organization, s.d. Disponível em: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries. Acesso em: 16 ago. 2026.

WU, J. J.; SUN, H. J.; GAO, Z. Y. Long-range correlations of density fluctuations in the Kerner-Klenov-Wolf cellular automata three-phase traffic flow model. Physical Review E, v. 78, n. 3, art. 036103, 2008. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.036103.

ZEBENDE, G. F. *et al.* Uma visão hora a hora da autocorrelação em dados de temperatura e umidade relativa do ar na Bahia. Revista Brasileira de Climatologia, v. 29, 2021.