

La sostenibilidad integral en puentes vehiculares en Colombia: retos y oportunidades. Un enfoque desde el pensamiento complejo*

Edwin Giovanni Sepúlveda Concha^a ■ Jhon Muñoz Echavarría^b
■ Carlos Mauricio Bedoya^c

Resumen: Este artículo examina la sostenibilidad integral en la construcción de puentes vehiculares en Colombia, por lo que aborda los retos y oportunidades en la aplicación de criterios ambientales, sociales y económicos en el sector. Mediante un análisis bibliométrico basado en 78 publicaciones (2003-2023), se identifican tendencias clave y vacíos en la literatura. Se observa que, aunque a nivel internacional se han desarrollado metodologías avanzadas para la evaluación de la sostenibilidad, en Colombia su implementación sigue siendo limitada, con un enfoque predominante en aspectos técnicos y normativos. Se destaca la necesidad de fortalecer la normativa nacional con la incorporación de herramientas de análisis multicriterio y modelos de ciclo de vida en la toma de decisiones. Asimismo, enfatiza en la importancia de incentivar la innovación en materiales sostenibles y en fomentar la participación de comunidades locales en la planificación de infraestructuras. Los resultados sugieren que la transición hacia una infraestructura vial más sostenible requiere una mayor articulación entre regulaciones ambientales y de construcción, así como la implementación de incentivos financieros para promover prácticas sostenibles. Este estudio proporciona un marco de referencia para futuras investigaciones y políticas públicas que impulsen el desarrollo de puentes vehiculares más resilientes y sostenibles en Colombia.

Palabras clave: sostenibilidad integral; diseño de puentes; construcción de puentes; puentes vehiculares; puentes en Colombia

* Artículo de investigación.

- a Especialista en Ingeniería Sismorresistente. Director General de Triángulo Ingeniería SAS, Rionegro, Colombia.
Correo electrónico: esepulvedac@unal.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6365-6137>
- b Magíster en Estudios Urbano Regionales. Universidad Nacional de Colombia. Profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
Correo electrónico: jmunoz@unal.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1945-0290>
- c Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
Correo electrónico: cmbedoya@unal.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9702-5076>

Recibido: 17/09/2024 **Aceptado:** 14/03/2025 **Disponible en línea:** 22/10/2025

Cómo citar: E. G. Sepúlveda Concha, J. Muñoz Echavarría, y C. M. Bedoya Montoya, «La sostenibilidad integral en puentes vehiculares en Colombia: retos y oportunidades. Un enfoque desde el pensamiento complejo: Challenges and opportunities. An approach from complex thinking», Cien. Ing. Neogranadina, vol. 35, n.º 2, pp. 27–64, oct. 2025.

Comprehensive Sustainability in Vehicular Bridges in Colombia: Challenges and Opportunities. A Complex Thinking Approach

Abstract: This study examines integral sustainability in vehicular bridge construction in Colombia, addressing the challenges and opportunities in applying environmental, social, and economic criteria in the sector. Through a bibliometric analysis of 78 publications (2003-2023), key trends and gaps in literature are identified. While advanced methodologies for sustainability assessment have been developed internationally, their implementation in Colombia remains limited, with a predominant focus on technical and regulatory aspects. The article highlights the need to strengthen national regulations by incorporating multi-criteria analysis tools and life cycle models in decision-making processes. It also emphasizes the importance of promoting innovation in sustainable materials and encouraging local community participation in infrastructure planning. The findings suggest that transitioning to a more sustainable road infrastructure requires greater alignment between environmental and construction regulations, as well as financial incentives to promote sustainable practices. This study provides a reference framework for future research and public policies that foster the development of more resilient and sustainable vehicular bridges in Colombia.

Keywords: Comprehensive Sustainability; Bridge Design; Bridge Construction; Vehicular Bridges; Bridges in Colombia

A sustentabilidade integral em pontes veiculares na Colômbia: Desafios e oportunidades. Uma abordagem a partir do pensamento complexo

Resumo: Este artigo analisa a sustentabilidade integral na construção de pontes veiculares na Colômbia, abordando os desafios e oportunidades na aplicação de critérios ambientais, sociais e econômicos no setor. Através de uma análise bibliométrica baseada em 78 publicações (2003-2023), são identificadas tendências-chave e lacunas na literatura. Observa-se que, embora metodologias avançadas para avaliação da sustentabilidade tenham sido desenvolvidas internacionalmente, sua implementação na Colômbia ainda é limitada, com foco predominante em aspectos técnicos e normativos. O artigo destaca a necessidade de fortalecer as regulamentações nacionais, incorporando ferramentas de análise multicritério e modelos de ciclo de vida nos processos de tomada de decisão. Além disso, enfatiza a importância de incentivar a inovação em materiais sustentáveis e promover a participação das comunidades locais no planejamento da infraestrutura. Os resultados sugerem que a transição para uma infraestrutura viária mais sustentável requer maior articulação entre regulamentos ambientais e de construção, bem como a implementação de incentivos financeiros para promover práticas sustentáveis. Este estudo fornece um referencial para futuras pesquisas e políticas públicas que impulsionem o desenvolvimento de pontes veiculares mais resilientes e sustentáveis na Colômbia.

Palavras-chave: sustentabilidade integral; projeto de pontes; construção de pontes; pontes veiculares; pontes na Colômbia

Introducción

En el marco de la creciente conciencia global sobre la importancia de la sostenibilidad en el desarrollo de infraestructuras viales, esta revisión bibliográfica se centra en la temática específica de “La sostenibilidad integral en puentes vehiculares en Colombia”. Ante la constante demanda de modernización y expansión de la red vial en el país, es esencial examinar de forma crítica la literatura existente para comprender las experiencias pasadas, las lecciones aprendidas y las tendencias actuales en la construcción y gestión sostenible de puentes.

El sector de la construcción, reconocido como uno de los más importantes y generadores de empleo, despliega un impacto económico, ambiental y social significativo, a su vez, manifiesto en la emisión de gases de efecto invernadero, por lo que se subraya la necesidad imperante de incorporar cada vez más productos y procesos que consideren criterios de renovabilidad y que se rijan por la innovación. Para abordar estos desafíos, es esencial adoptar un enfoque integral en las etapas de planificación, diseño y construcción de este tipo de estructuras, con el objetivo primordial de contar con puentes que no solo cumplan su función primaria, sino que también sean sostenibles en el sentido más amplio de la palabra.

Desde la ingeniería de puentes se ha experimentado un avance considerable en las últimas décadas mediante la incorporación de tecnologías innovadoras, materiales más resistentes y métodos de análisis sofisticados. Esto ha permitido la construcción de puentes más seguros y eficientes, capaces de soportar cargas significativas y resistir condiciones climáticas adversas. Sin embargo, se evidencia la necesidad de involucrar la rigurosidad técnica en el enfoque de la sostenibilidad.

Al considerar que el puente es un componente esencial de la infraestructura del país, su impacto es significativo en la conectividad, la movilidad y los desarrollos económico y social, lo cual ha planteado desafíos en términos de sostenibilidad integral y complejidad sistémica en Colombia.

La sostenibilidad integral, en este contexto, implica considerar no solo la eficiencia estructural,

sino también una serie de factores interconectados que abarcan aspectos económicos, sociales, ambientales y culturales. Desde la conservación del entorno natural, la inclusión social y la seguridad, hasta la evaluación del ciclo de vida, estabilidad, durabilidad estructural, adaptabilidad y resiliencia, se busca equilibrar todos estos aspectos en la ejecución de este tipo de proyectos.

Alcance y metodología

Alcance

Realizar una búsqueda sistemática, secuencial y organizada de la documentación técnica y científica más relevante en temas de sostenibilidad en proyectos de infraestructura, en específico aplicada a los puentes vehiculares en el territorio colombiano, además, de las estrategias y herramientas desde la sostenibilidad, en otros territorios, que se puedan aplicar de acuerdo con lecciones aprendidas en el ámbito nacional [1].

La información más relevante permite identificar retos y oportunidades para contar con un panorama general claro, de acuerdo con una clasificación bibliográfica y un análisis bibliométrico, a partir de una jerarquización, clasificación de subtemas y variables que tengan relación directa con la sostenibilidad integral de puentes vehiculares en Colombia. Se establece, entonces, una metodología de análisis temporal, espacial, con la que se evalúa el por qué, el para qué y con qué herramientas se han logrado armonizar con éxito sistemas de planeación, ejecución y mantenimiento de puentes en el mundo y su aplicabilidad al entorno colombiano [2].

Metodología

Se desarrolla desde la generalidad hasta llegar a la particularidad, partiendo del objeto y la pregunta de investigación. Es transversal al análisis, a partir de los conceptos de los objetivos y las preguntas de investigación (figura 1).

Paso 1: se definen los términos principales, objetos y conceptos que hacen parte del proyecto de investigación y, a partir de ellos, se construyen ecuaciones de búsquedas iniciales para que,

de acuerdo con la globalidad de los términos y los hallazgos, se puedan establecer interrelaciones entre ellos y comenzar con un análisis más particular. Es en este momento cuando se definen los eventuales motores de búsqueda y se documenta la cantidad de resultados obtenidos en esta etapa.

Paso 2: se establecen, de acuerdo con la ecuación de búsqueda, diferencias e interconexiones, tanto en inglés como en español, y de acuerdo con el análisis preliminar de buscadores, cuáles serán: 1) los buscadores adecuados, 2) las ecuaciones de búsqueda principales, y 3) cómo se filtran los resultados, de acuerdo con la disciplina, la especialidad o el área específica del conocimiento. Se documentan los resultados según estas ecuaciones de búsqueda.

Paso 3.1 - Filtro 1: se realiza un primer análisis a partir de los títulos de las publicaciones del paso anterior, en el que se identifica una pertinencia inicial de la publicación con la investigación que se desarrolla, dando pie a una nueva etapa de aceptación-rechazo. Se documentan estos resultados y se cuantifican.

Paso 3.2 - Filtro 2: a partir de los resultados anteriores se realiza una lectura del resumen y las conclusiones de las publicaciones, según el anterior paso, y se efectúa una nueva etapa de aceptación-rechazo, según análisis de pertinencia.

Paso 3.3 - Filtro 3: a partir de los resultados anteriores se realiza la lectura de ciertos contenidos que se consideren importantes al interior de las publicaciones del anterior paso, y se ejecuta una nueva etapa de aceptación-rechazo, según análisis de pertinencia.

Paso 4: se genera la matriz bibliométrica, en la que se cuenta, como mínimo, con los siguientes criterios: Id, código interno, código digital publicación (DOI, ISBN, etc.), nombre de la publicación, autores y tipo de publicación. En esta matriz se definen también jerarquías y se dan atributos adicionales por publicación, según el análisis del autor y las jerarquías que se adicionan a la matriz bibliométrica y que dan otros atributos importantes para el análisis, por ejemplo: dónde se publica, año, país, continente y fuente (motor de búsqueda).

Paso 5: se realizan gráficos de acuerdo con la matriz y sus categorías, jerarquías y demás que el

autor considere pertinentes e importantes a la hora de efectuar su análisis.

Paso 6: análisis de resultados: discusión y conclusiones. Se analizan los atributos, objetos y características de los artículos, y se enuncian posturas personales según los resultados obtenidos. Se analizan y sintetizan los resultados de los estudios, destacando las similitudes, diferencias y lagunas en la investigación.

Desarrollo y resultados

Como el objeto de esta investigación son los puentes vehiculares en Colombia y la pregunta de investigación parte de los retos y oportunidades de la sostenibilidad integral [3], [4] aplicada al objeto de investigación, se utiliza la metodología como sigue:

Estrategias de búsqueda

Se establecen los siguientes conceptos generales, como ecuación de búsqueda inicial, la cual se realiza sin una clasificación específica ("All fields"): Sostenibilidad AND "puentes en Colombia". Se encuentra un total de 16 728 publicaciones.

Se identifican de manera inicial los siguientes buscadores con las publicaciones más relevantes: Scopus, Science Direct, Scielo, Google Scholar, Dialnet y Web of Science. A partir de allí se establecen las ecuaciones de búsqueda iniciales y se definen los buscadores a usar en el proyecto de investigación. Las ecuaciones de búsqueda, a partir de la búsqueda inicial, fueron las siguientes: "Puentes en Colombia", "Sostenibilidad de puentes vehiculares", "Sostenibilidad integral en puentes", "Análisis multicriterio" y "Análisis de ciclo de vida".

Y los buscadores que finalmente se utilizan son los siguientes: Scopus, Science Direct y Google Scholar. Se encuentran un total de 1287 publicaciones.

Filtrado de la información bibliográfica

Se cuenta con una cantidad significativa de publicaciones, para lo cual se hace necesario proceder a crear un nuevo filtro por especialidades, áreas del conocimiento y disciplinas: construcción, puentes, ingeniería civil, patología, diseño estructural, vulnerabilidad estructural, desastres en construcción, carreteras e infraestructura.

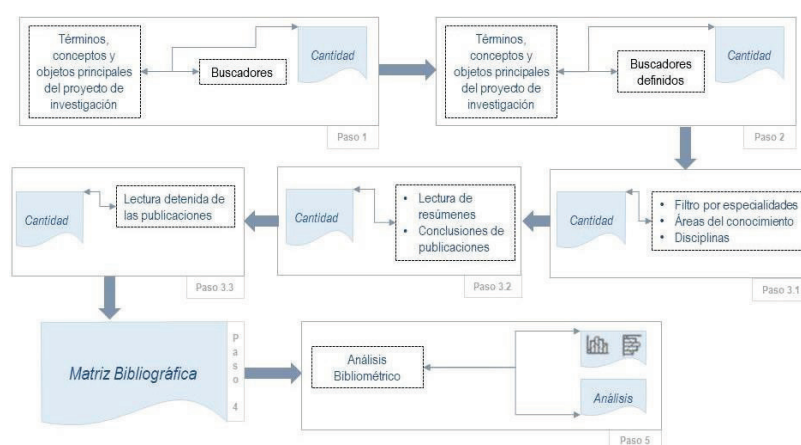
Además, se definen finalmente las siguientes ecuaciones de búsqueda, en las que se tienen en cuenta los anteriores filtros: Puentes AND Colombia, Construcción AND Sostenibilidad, Puentes AND Sostenibilidad, Sostenibilidad, comprehensive AND sustainability AND bridges, Construcción AND Puentes AND Sostenibilidad, Construcción AND Puentes AND Colombia, multicriteria AND bridges AND life cycle AND sustainability, Sostenibilidad AND Infraestructura AND Construcción. En esta fase se cuenta con 278 resultados.

Posteriormente se lee el resumen y las conclusiones de las publicaciones, según el anterior paso,

y se efectúa una nueva etapa de aceptación-rechazo, a criterio del autor, de acuerdo con la pertinencia de la publicación con la investigación. La congruencia de los artículos se clasifica así: baja, media-baja, media, alta y muy alta. De nuevo se cuantifican las publicaciones, llegando a 143.

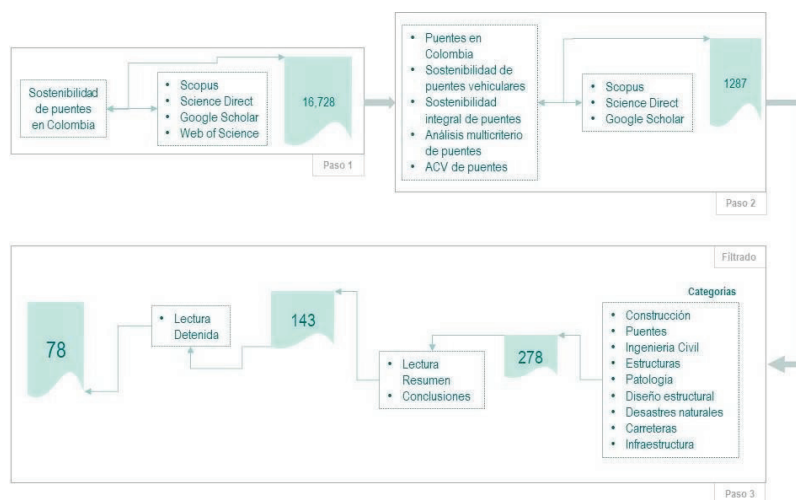
Luego se leen algunas publicaciones para comprender la aplicabilidad de estas al proyecto de investigación; se entra en una etapa final de aceptación y rechazo, partiendo de los resultados de la etapa anterior y tomando solo publicaciones con pertinencia media, alta y muy alta, y se llega finalmente a 78 publicaciones.

Figura 1. Flujograma conceptual del análisis bibliográfico y bibliométrico



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Flujograma aplicado del análisis bibliográfico y bibliométrico



Fuente: elaboración propia.

Generación de la matriz bibliográfica

Se genera la matriz bibliométrica (Ver en Discusión), en la que se hace la clasificación, jerarquización y definición de atributos. Se establecen las siguientes categorías:

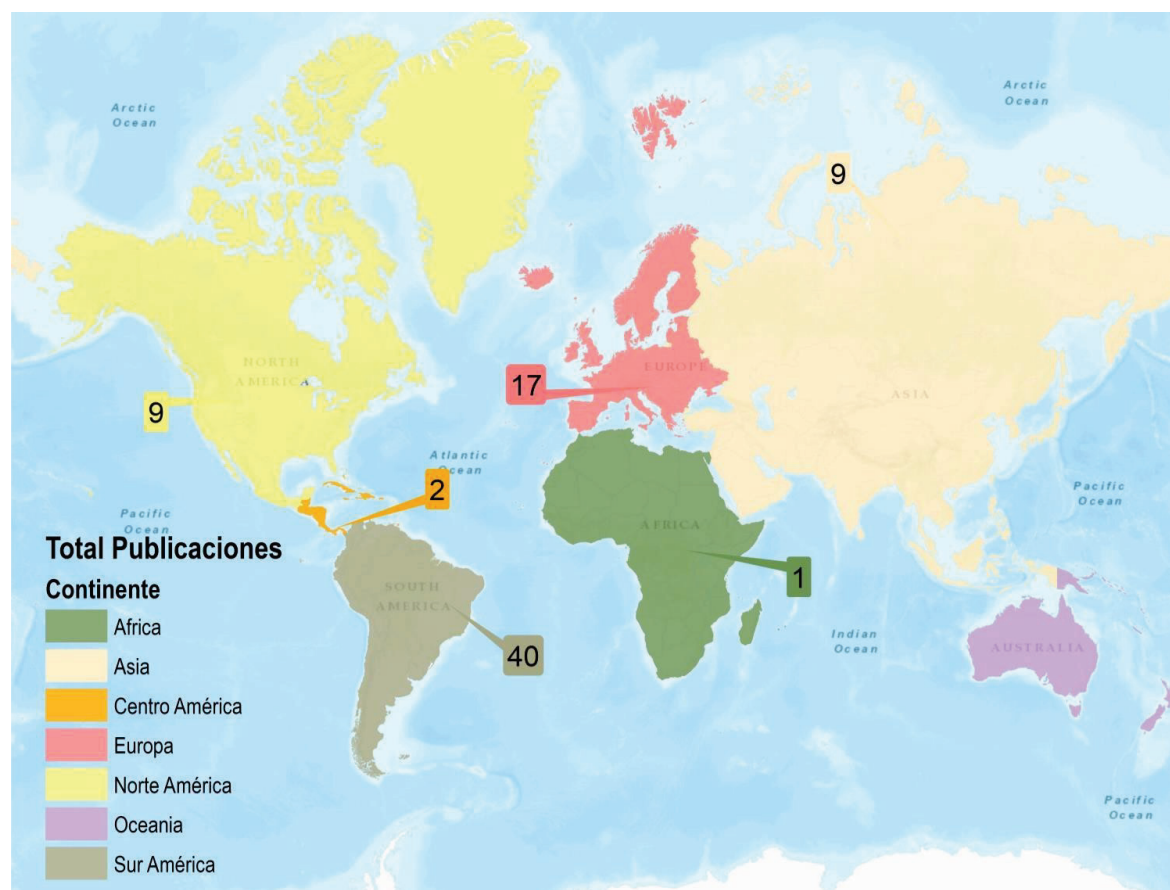
- Id: orden en la matriz
- Código: código interno para fácil acceso del autor
- DOI: código digital
- Nombre de la publicación
- Autor(es)
- Tipo de publicación
- Tema

- Revista / *Journal* / Revista donde se publica
- Año de publicación
- País
- Continente
- ¿Trata sobre puentes en Colombia?
- Ecuación de búsqueda
- Pertinencia
- Fuente

Análisis bibliométrico

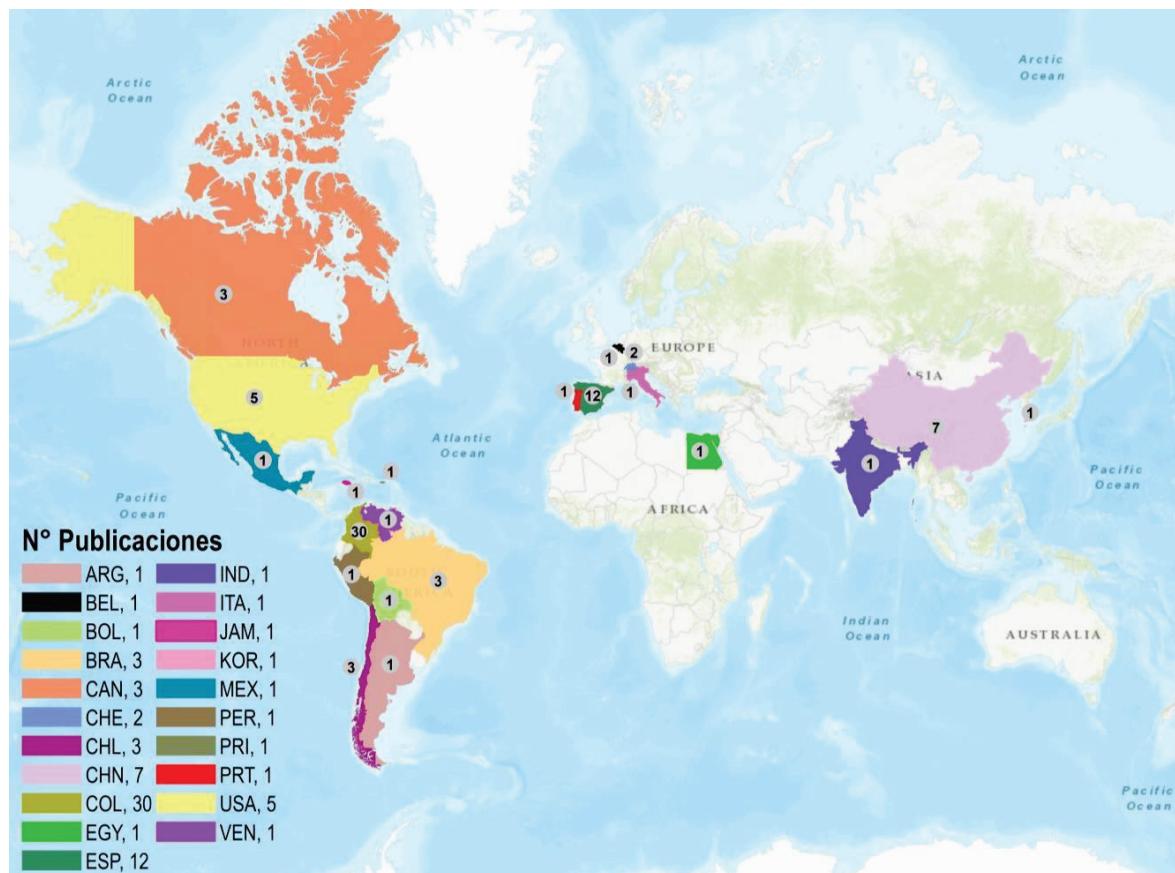
A partir de la información de la matriz bibliográfica, de manera gráfica se analizan atributos, objetos y características de las publicaciones, y se enuncian posturas según los resultados obtenidos:

Figura 3. Espacialización de datos de publicaciones por continente



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Espacialización de datos de publicaciones por país

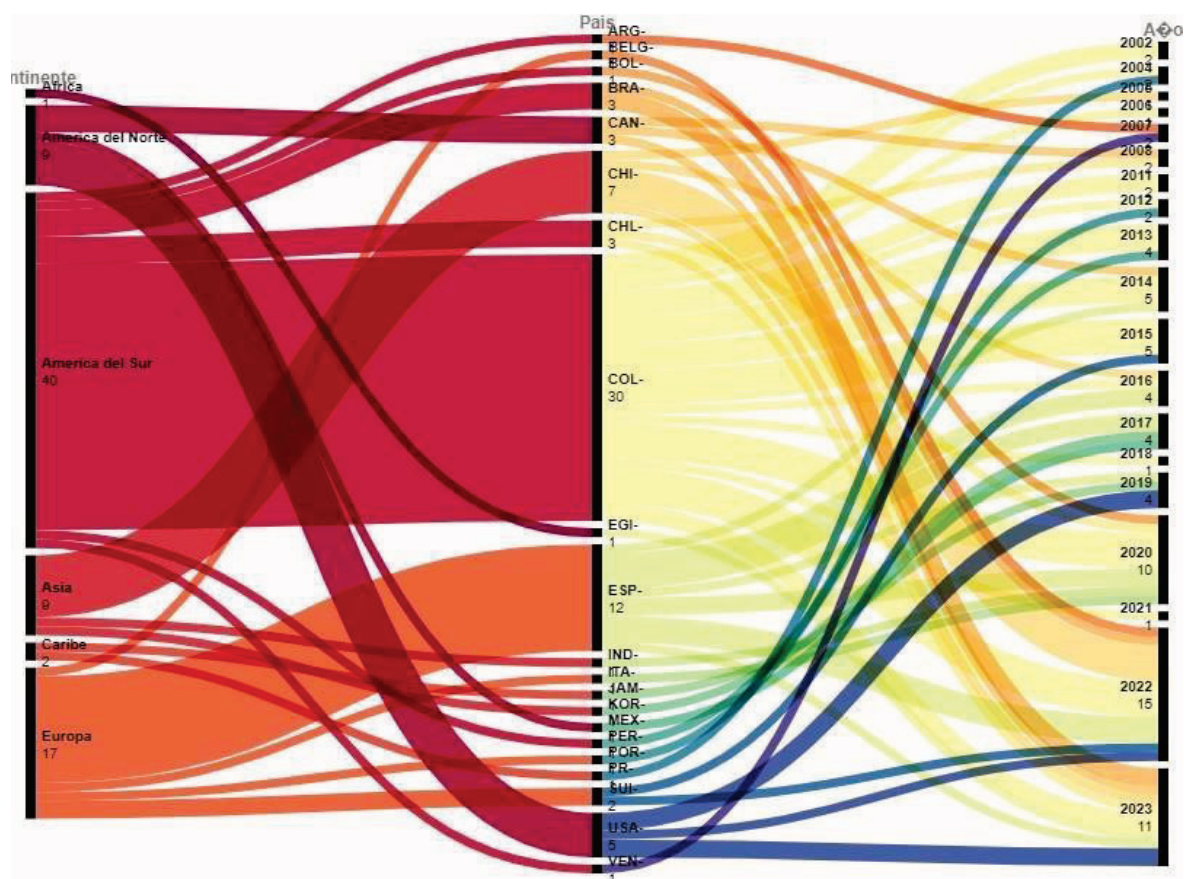


Fuente: elaboración propia.

Se usan también gráficos aluviales, los cuales son útiles para identificar cambios en una estructura de red y en patrones y tendencias:

El 82,05 % de las publicaciones son artículos, y el 17,95 % restante, trabajos de grados, normativas, libros y guías.

El estudio de conceptos de sostenibilidad y análisis de ciclo de vida [5] en puentes se concentra en el siguiente orden: Europa, 23 %; Asia, 11 %; Norteamérica, 12 %, y Suramérica, 9 %.

Figura 5. Gráfico aluvial de año-país-continente

Fuente: elaboración propia.

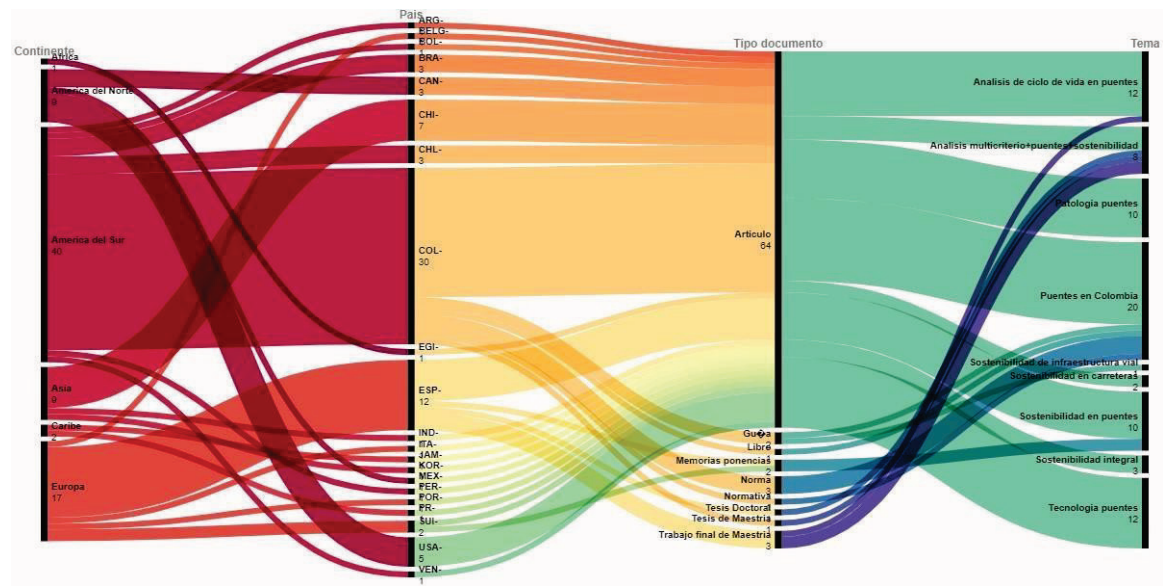
Tabla 1. Análisis espacial (país-continente) por cantidad de publicaciones y porcentajes

Continente	País	Publicaciones		Porcentaje	
		por país	Por continente	por país	Por continente
Norteamérica	EUA	5		6 %	
	Canadá	3	9	4 %	12 %
	México	1		1 %	
	Colombia	30		38 %	
	Chile	3		4 %	
Suramérica	Brasil	3		4 %	
	Bolivia	1	40	1 %	51 %
	Venezuela	1		1 %	
	Perú	1		1 %	
	Argentina	1		1 %	

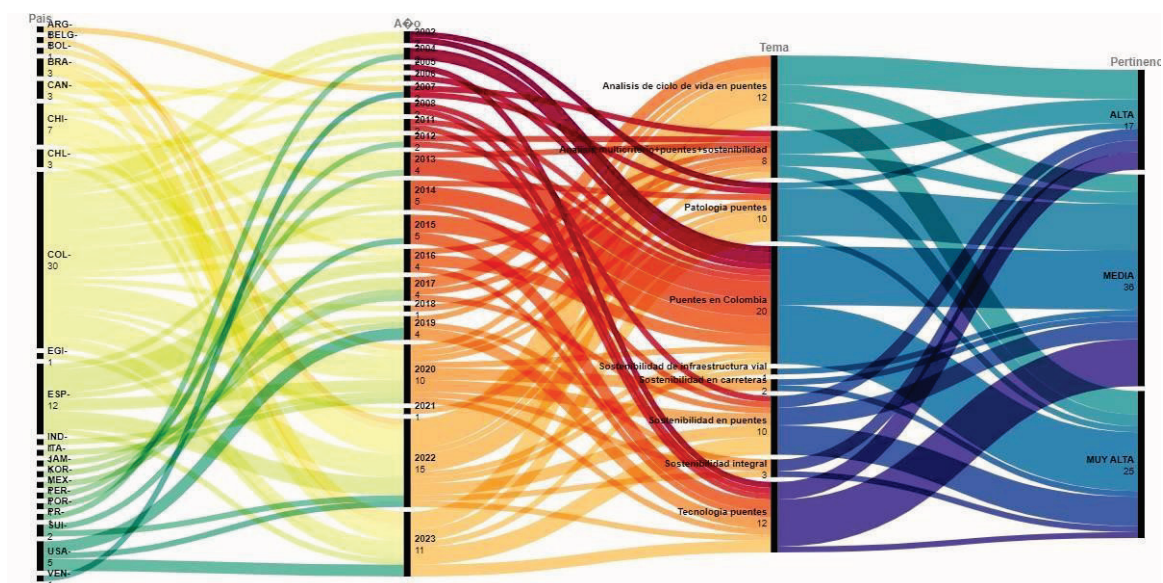
Centroamérica y el Caribe	Jamaica	1	2	1 %	3 %
	Puerto Rico	1		1 %	
África	Egipto	1	1	1 %	1 %
	España	12		15 %	
Europa	Suiza	2		3 %	
	Bélgica	1	17	1 %	22 %
	Portugal	1		1 %	
	Italia	1		1 %	
	China	7		9 %	
Asia	Corea	1	9	1 %	12 %
	India	1		1 %	
Oceanía	NA	0	0	0 %	0 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Gráfico aluvial de país-continente-tipo de publicación-tema



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Gráfico aluvial de año-tema-país-pertinencia

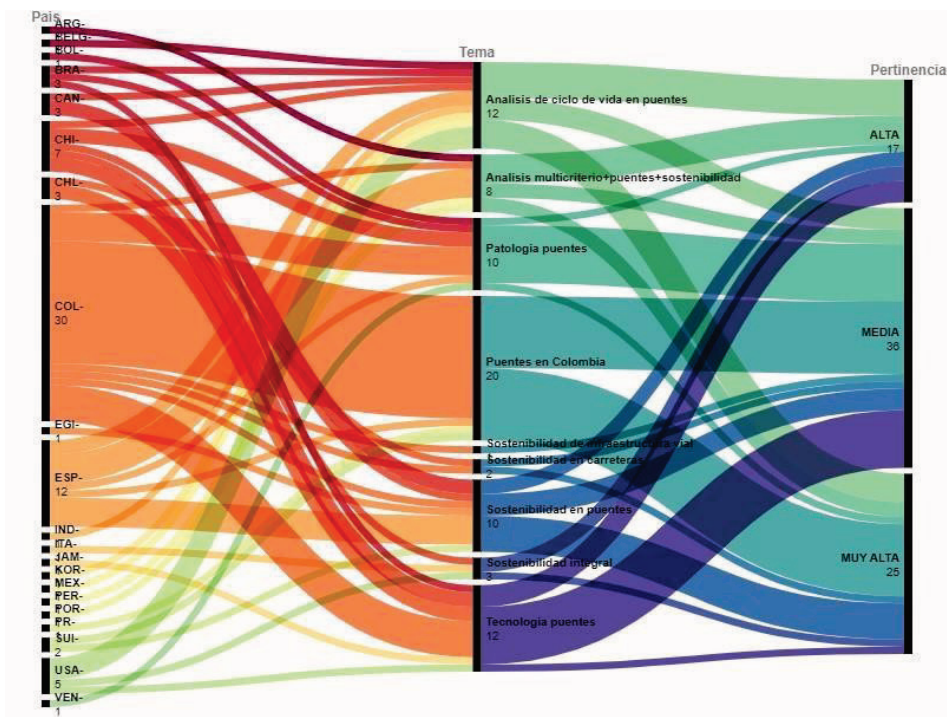
Fuente: elaboración propia.

Es claro que todos los temas se interrelacionan y se hablan de manera constante en las últimas dos décadas, aunque es importante anotar que el 80 % de las publicaciones se concentran en la última década, tratando los siguientes temas en orden de importancia: análisis de ciclo de vida de puentes, sostenibilidad de puentes, patologías en puentes y análisis multicriterio para la sostenibilidad de puentes [6].

De puentes en Colombia se ha hablado bastante desde año 2015 hacia atrás; en años posteriores se habla más de los conceptos de sostenibilidad y Análisis de Ciclo de Vida (ACV) [3].

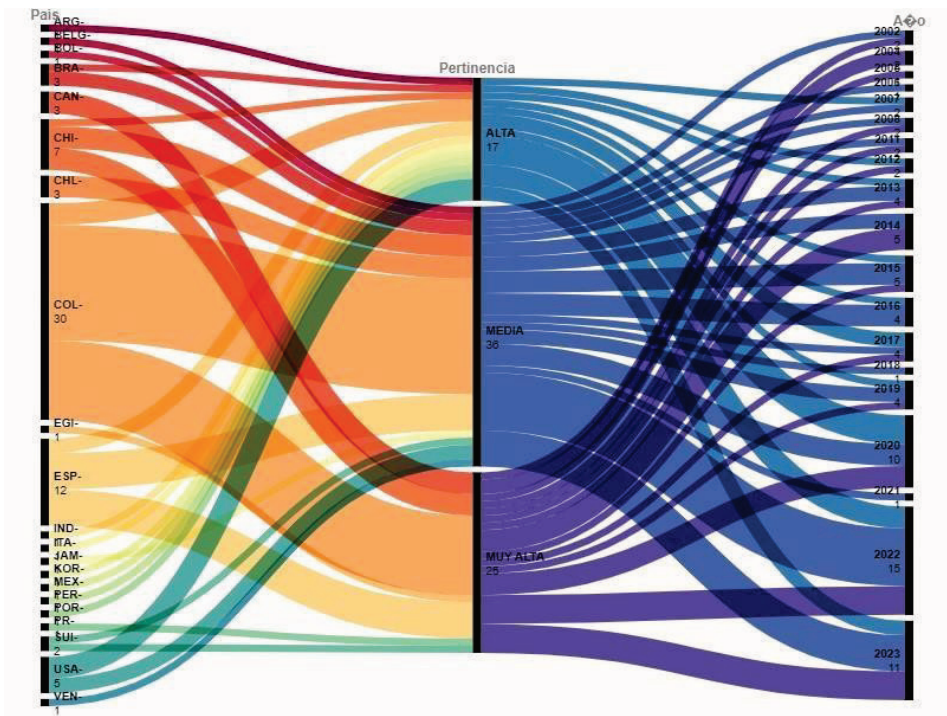
El gráfico es coherente con las publicaciones con conceptos de sostenibilidad, que corresponden a una pertinencia muy alta con países de Europa, Asia y Norteamérica, principalmente.

Figura 8. Gráfico aluvial de año-tema-país-pertinencia



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Gráfico aluvial de año-pertinencia-país



Fuente: elaboración propia.

Las publicaciones de (en su orden) Colombia, España, Estados Unidos y China tienen pertinencia alta con el estudio que se adelanta.

Análisis de relevancia de términos con el objeto de investigación

Todas las publicaciones se ingresan a la herramienta Mendeley, validando que se carguen de forma adecuada los datos, para un correcto análisis. Realizado este trabajo, se genera el archivo *.ris, el cual se importa al *software* de análisis vos viewer®, que sirve como herramienta para analizar

temas y conceptos, y la intercomunicación de estos con estudios y referencias de todos los documentos que se analizan. Los resultados de las gráficas del vos viewer® se muestran a continuación:

Se muestra una interrelación importante entre el objeto de estudio –el puente– y conceptos como sostenibilidad, ciclo de vida, diseño estructural e impacto ambiental [7]. Se observan conceptos que aportan, pero que no se encuentran totalmente interrelacionados, como los siguientes: diseño sostenible, sostenibilidad de puentes y vulnerabilidad sísmica.

Figura 10. Red bibliométrica de la fortaleza de términos de las publicaciones con el objeto de estudio



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Red bibliométrica de la fortaleza de términos con la tendencia por años

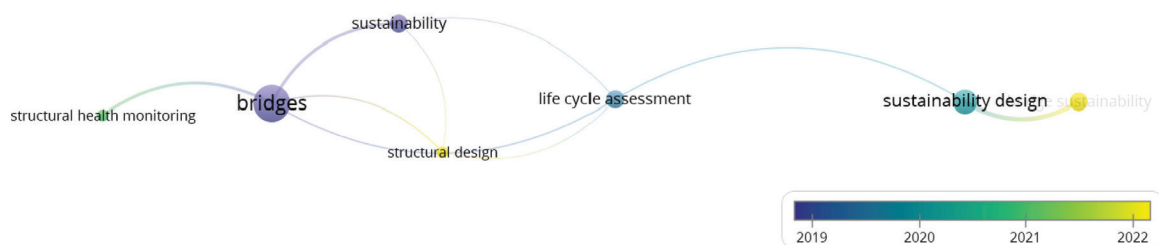
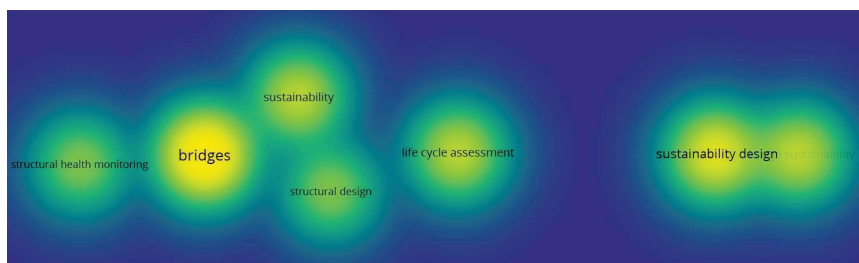


Figura 12. Radiografía de la red bibliométrica por densidades según la fortaleza de términos



Fuente: elaboración propia.

La incorporación de los conceptos de diseño estructural, sostenibilidad de puentes, monitoreo estructural y diseño sostenible,

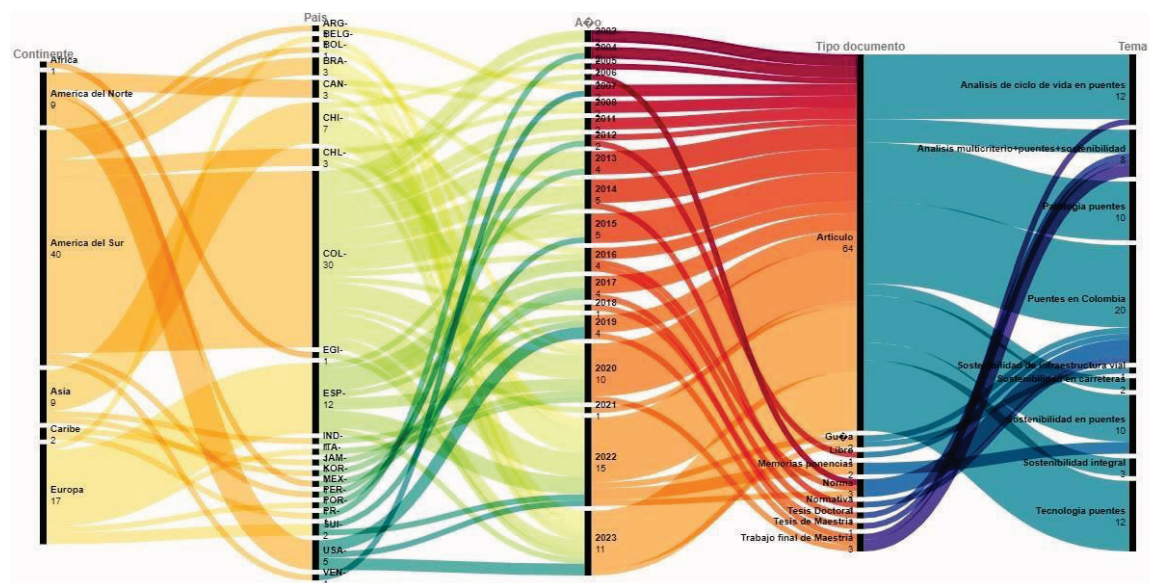
aplicados en específico a puentes, se viene dando sobre todo desde hace cinco años [3], [8], [9], aproximadamente.

Discusión

Se consolidan los conceptos interrelacionados en nuevas gráficas aluviales que se vinculan a

partir de las figuras anteriormente mostradas y, de acuerdo con los resultados obtenidos, se discuten los resultados.

Figura 13. Gráfica aluvial-espacial, temporal, tipo publicación y tema



Fuente: elaboración propia.

El análisis bibliográfico realizado ha permitido identificar tendencias clave en la sostenibilidad de puentes vehiculares, así como los desafíos que enfrenta su implementación en el contexto colombiano. A pesar de los avances en el desarrollo de metodologías y marcos conceptuales que buscan integrar criterios ambientales, sociales y económicos en la infraestructura vial [3], [10], la aplicación de estos enfoques sigue siendo limitada. En Colombia, la discusión sobre la sostenibilidad en puentes ha estado relegada principalmente a aspectos técnicos y normativos [11], [12], sin un abordaje integral que contemple su impacto a largo plazo en el desarrollo territorial y social. Aun así, existen algunos casos de aplicación de conceptos de sostenibilidad en Colombia, entre los que están los siguientes:

- **Puente Pumarejo (Barranquilla, Atlántico):** este puente, uno de los más largos de Colombia, integró criterios de sostenibilidad en su construcción, al priorizar el uso de cementos con bajo impacto ambiental, minimizar residuos

y optimizar la eficiencia energética en la obra. Aunque no fue diseñado con un enfoque completamente sostenible, representa un avance en la implementación de materiales innovadores con menor huella de carbono.

- **Puentes modulares en zonas rurales (Invías - Programa Colombia Rural):** como respuesta a la necesidad de disponer de infraestructura resiliente en regiones con baja conectividad, el Instituto Nacional de Vías (Invías) ha promovido la construcción de puentes modulares sostenibles, utilizando acero reciclado y materiales de bajo impacto ambiental. Estos proyectos han mejorado la movilidad en zonas afectadas por el conflicto y el aislamiento; también han demostrado que la sostenibilidad en infraestructura puede integrarse en escalas pequeñas.

Los resultados evidencian que, aunque la sostenibilidad en infraestructura ha ganado relevancia en la última década, su adopción en la planificación y ejecución de puentes vehiculares aún enfrenta

obstáculos considerables. Un factor determinante en esta brecha es la falta de normativas estandarizadas que incorporen de manera explícita criterios de sostenibilidad en los procesos de licitación y construcción. Si bien se han desarrollado guías y documentos técnicos que proponen la incorporación de estos principios, su implementación sigue siendo parcial y dependiente de la voluntad política y de la capacidad técnica de las entidades responsables [13].

El análisis bibliométrico indica que la literatura internacional ha avanzado de manera significativa en la evaluación de la sostenibilidad de puentes, abordando no solo el impacto ambiental de los materiales y métodos constructivos, sino también la eficiencia energética, la adaptabilidad de las estructuras y su integración con los entornos urbano y rural. En contraste, los estudios en Colombia siguen centrados en la estabilidad estructural y el análisis de patologías [14], [15], sin vincular estos elementos con estrategias de sostenibilidad. Esto sugiere la necesidad de fortalecer la investigación local y de establecer mecanismos que permitan la transferencia de conocimientos entre la academia y el sector constructor.

Uno de los principales retos identificados es la falta de una cultura de sostenibilidad en el diseño y el mantenimiento de puentes vehiculares. La visión predominante sigue orientada a la solución de problemas inmediatos [2], en lugar de una planificación a largo plazo que considere el ciclo de vida de la infraestructura. En este sentido, la integración de herramientas de análisis multicriterio en la toma de decisiones podría mejorar la selección de materiales y de técnicas constructivas que reduzcan el impacto ambiental y optimicen los costos a lo largo de la vida útil de las estructuras [5].

Otro aspecto crítico es la ausencia de incentivos financieros que fomenten la adopción de tecnologías y materiales sostenibles en la construcción de puentes. A diferencia de otros países donde

existen políticas de financiamiento y certificaciones específicas para infraestructura sostenible, en Colombia estas iniciativas han sido limitadas. Esto dificulta que las empresas constructoras y los entes gubernamentales opten por soluciones innovadoras que, aunque pueden representar una inversión inicial más alta, generan beneficios ambientales y económicos a largo plazo.

Si bien hay esfuerzos incipientes para integrar la sostenibilidad en proyectos de infraestructura vial en Colombia, estos aún no se han sistematizado ni convertido en un estándar dentro del sector. La documentación de experiencias exitosas en otras regiones podría servir como referencia para adaptar y replicar modelos efectivos en el país. Además, la participación de la comunidad y los actores locales en la planificación y ejecución de proyectos es fundamental para garantizar que las infraestructuras no solo sean sostenibles desde el punto de vista ambiental, sino también funcionales y socialmente aceptadas.

El análisis de tendencias globales sugiere que el futuro de la sostenibilidad en puentes vehiculares estará determinado por la digitalización de los procesos de diseño y construcción, el uso de materiales inteligentes y la optimización energética de las infraestructuras. Estos avances posicionan a los puentes como actores clave dentro de la denominada Quinta Revolución Industrial, en el ámbito de la infraestructura vial. Para que estas innovaciones puedan ser efectivamente implementadas en el contexto colombiano, resulta imperativo consolidar un marco regulatorio más sólido, acompañado de incentivos que fomenten tanto la investigación aplicada como la adopción de soluciones sostenibles en el sector vial [16]. La integración de estos factores no solo facilitaría la transición hacia infraestructuras más resilientes y eficientes, sino que también garantizaría su viabilidad económica y su alineación con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo.

Tabla 2. Matriz bibliométrica

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
1	978-958-716-399-5	Ingeniería de puentes - Reseña histórica, tipología, diagnóstico y recuperación	Édgar Muñoz	Puentes en Colombia	Libro	Pontificia Universidad Javeriana	2012	COL-	Sí	Google Scholar
2	NA	Norma colombiana de diseño de puentes - LRFD-ccp14	República de Colombia - Ministerio de Transportes - Asociación de Ingeniería Sísmica	Puentes en Colombia	Normativa	Inviás	2014	COL-	Sí	Google Scholar
3	10.6036/8177	Evaluación económica y ambiental de diseños estructurales de edificaciones mediante análisis de ciclo de vida basado en entradas y salidas	Julio César Contreras Jiméñez ¹ , Fernando Morales Mendoza ² , Ramón Corona Armenta ³ , Oscar Montaño Arango ³ y Joselito Medina Marín ³	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México) Universidad Autónoma de Yucatán (México) Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (México)	2017	MEX-	No	Google Scholar
4	NA	Guía de diseño programa Vive Colombia - Vías Verdes 2022	Inviás	Sostenibilidad de infraestructura vial	Guía	Inviás	2022	COL-	Sí	Google Scholar
5	NA	Mapa de carreteras de Colombia 2022	Inviás	Puentes en Colombia	Norma	Inviás	2022	COL-	Sí	Google Scholar

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
6	NA	Metodología para la evaluación de la sostenibilidad de los proyectos de infraestructura de transporte Aika	Inviás	Puentes en Colombia	Guía	Inviás	2023	COL-	Sí	Google Scholar
7	ND	Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia	Édgar Muñoz ¹ y Edgar Valbuena ²	Puentes en Colombia	Artículo	Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.	2004	COL-	Sí	Google Scholar
8	ND	Concesiones viales en Colombia. Historia y desarrollo	Wilman Muñoz Prieto*	Puentes en Colombia	Artículo	Revista Temura	2002	COL-	Sí	Google Scholar
9	10.1016/j.rimni.2015.07.001	Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes ccp-14	M. A. Salgado-Gálvez ^a , G. A. Bernal ^b y O. D. Cardona ^b Centre	Puentes en Colombia	Artículo	Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería	2015	COL-	Sí	Google Scholar
10	10.4067/S0718-50732013000100003	Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia	Édgar Muñoz David Gómez	Puentes en Colombia	Artículo	Revista ingeniería de construcción	2013	COL-	Sí	Google Scholar

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
11	ND	La infraestructura de puentes en las vías secundarias del departamento de Antioquia	John Mario García Giraldo Jaime Ospina Giraldo Edir Amparo Graciano Gómez	Puentes en Colombia	Artículo	Revista EIA	2014	COL-	Sí	Google Scholar
12	NA	Manual de mantenimiento de carreteras	Invías	Puentes en Colombia	Norma	Invías	2016	COL-	Sí	Google Scholar
13	NA	Manual para la inspección visual de puentes y pontones	Invías	Puentes en Colombia	Norma	NA	2006	COL-	Sí	Google Scholar
14	ND	Uso de la metodología BRIM (Bridge Information Modeling) como herramienta para la planificación de la construcción de un puente de concreto en Colombia	Juan Sebastián Gaitán Cardona ¹ , Adriana Gómez Cabrera	Puentes en Colombia	Artículo	Ciencia e Ingeniería Neogranadina	2014	COL-	Sí	Google Scholar
15	NA	Estudio de diferentes tipologías de puentes desde el punto de vista de su sostenibilidad	Iván Herrera de Argila	Análisis multicriterio+puentes+sostenibilidad	Trabajo final de maestría	NA	2020	ESP-	No	Google Scholar

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
16	ND	Gestión de riesgo en gerenciamiento de puentes con modelos de decisión multicriterio discretas	Jorge Galarraga, Marcelo Hertz	Análisis multicriterio+puentes+sostenibilidad	Artículo	Mecánica Computacional	2007	ARG-	No	Google Scholar
17	ND	Metodología de análisis multicriterio con aplicación al crecimiento sostenible en la Unión Europea	María Victoria Hermenegildo Chávez	Análisis multicriterio+puentes+sostenibilidad	Artículo	Revista de investigación de la Facultad de Ciencias de Administrativas, UNMSM	2013	PER-	No	Google Scholar
18	NA	Aplicación de la toma de decisión multicriterio al diseño sostenible de puentes de hormigón	Vicent Penadés Plà	Análisis multicriterio+puentes+sostenibilidad	Trabajo final de maestría	UPV	2017	ESP-	No	Google Scholar
19	ND	Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia	Édgar Muñoz ¹ y Edgar Valbuena ²	Puentes en Colombia	Artículo	Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.	2004	PR-	Sí	Google Scholar
20	ND	Sostenibilidad en el sector de la construcción. Sostenibilidad en estructuras y puentes ferroviarios	Raquel Valdivieso Fernández	Análisis multicriterio+puentes+sostenibilidad	Tesis doctoral	UPM	2016	ESP-	No	Google Scholar

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
21	NA	Sistema computacional de análisis de la vulnerabilidad en puentes de la red vial nacional en Colombia utilizando el modelo de jerarquización analítica	Óscar Leonardo Celis Fonseca, Jhonny Alexander Rodríguez Bayona	Análisis multicriterio+puentes+sostenibilidad	Tesis de maestría	Universidad Santo Tomás de Aquino	2018	COL-	Sí	Google Scholar
22	NA	Estudio de las causas de colapso de algunos puentes en Colombia	Édgar Muñoz	Patología de puentes	Artículo	ND	2002	COL-	Sí	Google Scholar
23	10.1016/j.econ.2020.106724	A New socio-economic Indicator to Measure the Performance of Bioeconomy Sectors in Europe	Idiano D'Adamo, Pasquale Marcello Falcone*, Piergiuseppe Morone	Sostenibilidad integral	Artículo	Ecological Economics	2020	ITA-	No	Scopus
24	10.1016/j.res.2018.11.016	Life-cycle management of deteriorating civil infrastructure considering resilience to lifetime hazards: A general approach based on renewal-reward processes	David Y. Yang, Dan M. Frangopol	Sostenibilidad integral	Artículo	Reliability Engineering and System Safety	2019	USA-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
25	10.1016/j.rimni.2015.07.001	Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14	M. A. Salgado-Gálvez ² , G. A. Bernal ^{1a} y O. D. Cardona	Puentes en Colombia	Artículo	Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería	2016	ESP-	Sí	Scopus
26	10.4028/www.scientific.net/KEM.668.218	Modular footbridges of Guadua angustifolia Kunth	Fabián Augusto Lamus Baéz ¹ , a, Carlos Felipe Urazán Bonells ² , ^a y Sofía Andrade Pardo ³ , ^a	Puentes en Colombia	Artículo	Key Engineering Materials	2015	SUI-	Sí	Scopus
27	ISSN 0121-1129 Y 2357-5328	Evaluación de técnicas no destructivas en elementos de concreto para puentes	Ricardo Alfredo Cruz, Luz Amparo Quintero Ortiz, Carlos Andrés Galán Pinilla, Elkin Javier Espinosa García	Puentes en Colombia	Artículo	Revista Facultad de Ingeniería UIS	2015	COL-	Sí	Scopus
28	ND	Análisis de la interacción humano-estructura en puentes peatonales de Santiago de Cali	Jhon Anderson Sánchez, Daniel Gómez, Peter Thomson	Puentes en Colombia	Artículo	DYNA	2013	COL-	Sí	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
29	ISSN: 2011-3188	Puentes de trapezio en la región del Viejo Caldas (Colombia): un legado de la carpintería de armar europea en la segunda mitad del siglo XIX	Jorge Galindo Díaz, Gilberto Flórez Restrepo, Laura María Henao	Puentes en Colombia	Artículo	DEARQ - Universidad de los Andes	2013	COL-	Sí	Scopus
30	ND	Vibration analyses for the local and global evaluation of bridges as a tool for structural retrofit	Fabián A. Consuegra, Camilo Santos	Tecnología en puentes	Artículo	Revista de Construcción	2015	COL-	Sí	Scopus
31	10.1088/1757-899X/844/1/012026	Benefits of the instrumentation, monitoring and control systems (IMC) of bridges in Colombia, from an economic point of view through a case study	J. D. Castro, L. Suárez, I. C. Cerón	Tecnología en puentes	Artículo	Expotecnología 2019 "Research, Innovation and Development in Engineering"	2020	COL-	Sí	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
32	10.1590/S1983-419520240003000004	Bridge Information Modeling (BRIM) used in the operation and maintenance of Civil Engineering Structures (CESS)	Thalyta de Miranda Lanna Rios ^a Luiz Reynaldo de Azevedo Cardoso ^a Beatriz Montelato ^b Tiely Zurlo Moghno ^b	Tecnología en puentes	Artículo	Ibracon Structures and Materials Journal	2023	BRA-	No	Scopus
33	ND	Comportamiento estructural y criterios de diseño de los puentes extradosados: visión general y estado del arte	José Benjumea ¹ , Gustavo Chio ² , Esperanza Maldonado ³	Tecnología en puentes	Artículo	Revista ingeniería de construcción	2023	CHL-	No	Scopus
34	ISSN 0254-0770	Evaluation of the corrosion in a railroad bridge as it contributes to the structural evaluation, diagnose and propose of rehabilitation	Rosa E. Malavé Miguel Sánchez Oladis de Rincón William Campos Zaida Castro Antonio J. Acosta Dayrol López	Patología de puentes	Artículo	Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia	2007	VEN-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
35	10.18687/LACCEI2019.1.1.62	Model of implementation of the brim methodology for the optimization of the planning and execution of armed concrete bridges on rivers	José Villanes ¹ , Luis Maesaka ¹ y Elsa Carrera ¹	Tecnologías en puentes	Artículo	17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities", 24-26 July 2019, Jamaica	2019	JAM-	No	Scopus
36	10.3989/ic.13.087	Damage identification of RC bridge decks under fatigue loading	C. Zanuy (*), L. F. Maya-Duque (**), J. M. Gallego (*), P. de la Fuente (*)	Patología de puentes	Artículo	Revista Informes de la construcción	2014	ESP-	No	Scopus
37	10.3390/infrastructures8030052	Influence of Corrosion on Dynamic Behavior of Pedestrian Steel Bridges-Case Study	Susana Barrios 1, Andrés Guzmán ¹ y Albert Ortiz ²	Patología de puentes	Artículo	Journal Infraestructures	2023	COL-	Sí	Scopus
38	10.1016/j.matchemphys.2022.126694	Mechanistic modelling of atmospheric corrosion of carbon steel in Port-Louis by electrochemical characterization of frust layers	Yashwantraj Seechurn, Julían A. Wharton Baboo, Y. R. Surnam	Patología de puentes	Artículo	Materials Chemistry and Physics	2022	CHI-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
39	ND	Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente en acero basado en confiabilidad estructural	Édgar Muñoz ^{*1} , Federico Nuñez, Jorge A. Rodríguez, Alfonso Ramos, Camilo Otálora	Tecnología en puentes	Artículo	Revista Ingeniería de la Construcción	2008	CHL-	Sí	Scopus
40	10.1007/s41024-023-00299-x	An integrated framework for non-destructive evaluation of bridges using UAS: a case study	Sergio Pérez Jimeno ¹ · José Capa Salinas ² · Javier Alexander Pérez Caicedo ³ · Manuel Alejandro Rojas Manzano ³	Patología de puentes	Artículo	Journal of Building Pathology and Rehabilitation	2023	BRA-	Sí	Scopus
41	10.1016/j.engstruct.2019.02.055	Probabilistic life-cycle optimization of durability-enhancing maintenance actions: Application to FRP strengthening planning	David Y. Yanga ^b , Dan M. Frangopol ^a , Jin-Guang Teng ^b	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	Engineering Structures	2023	USA-	No	Scopus
42	10.1016/j.j.res.2019.106724	A metamodeling based seismic life-cycle cost assessment framework for highway bridge structures	Shivang Shekhara, Jayadipta Ghosh ^b	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	Reliability Engineering and System Safety	2020	IND-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
43	10.1016/j.engstruct.2018.10.067	State of the practice of FRP composites in highway bridges	Yail J. Kim	Tecnología en puentes	Artículo	Engineering Structures	2019	USA-	No	Scopus
44	10.1016/j.engstruct.2023.116533	Multi-criteria robust optimization for bridge adaptation strategies targeting superstructure unseating under coastal natural hazards	Deming Zhu ^a , You Dong ^a , Liang Liu ^{b*}	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	Engineering Structures	2023	USA-	No	Scopus
45	/10.1016/j.eiar.2017.02.003	Life cycle assessment based environmental impact estimation model for pre-stressed concrete beam bridge in the early design phase	Kyong Ju Kim, Won Gun Yun*, Namho Cho, Jikwang Ha	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	Environmental Impact Assessment Review	2017	KOR-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
46	10.1016/j.compstruct.2021.114697	Durability of components of FRP-concrete bonded reinforcement systems exposed to chloride environments	Jianglin Li, Zihua Mai, Jianhe Xie*, Zhongyu Lu*	Patología de puentes	Artículo	Composite Structures	2022	CHI-	No	Scopus
47	10.1016/j.jress.2021.108100	Life-cycle optimization of structural systems based on cumulative prospect theory: Effects of the reference point and risk attitudes	Minghui Cheng ^a , Dan M. Frangopol ^{b*}	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	Reliability Engineering and System Safety	2022	USA-	No	Scopus
48	10.1016/j.eswa.2012.01.032	A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures	H. Gervásio ^a , L. Simões da Silva	Análisis multicriterio+puentes+sostenibilidad	Artículo	Expert Systems with Applications	2012	POR-	No	Scopus
49	10.1016/j.jclepro.2021.129724	Multi-criteria decision-making applied to the sustainability of building structures based on Modern Methods of Construction	Antonio J. Sánchez-Garrido ^{a*} , Ignacio J. Navarro ^a , Víctor Yepes ^b	Análisis multicriterio+puentes+sostenibilidad	Artículo	Journal of Cleaner Production	2022	ESP-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
50	10.1016/j.jclepro.2022.132558	Environmental performance analysis of railway infrastructure using life cycle assessment: Selecting pavement projects based on global warming potential impacts	Filipe Batista Ribeiro ^a , Filipe Almeida Correa do Nascimento ^b , Marcelino Aurelio Vieira da Silva	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	Journal of Cleaner Production	2022	BRA-	No	Scopus
51	10.1016/j.jclepro.2022.134740	Life-cycle maintenance strategy of bridges considering reliability, environment, cost and failure probability co ₂ emission reduction: A bridge study with climate scenarios	Yinshan Liu ^a , Bo Pang ^b , ^a Yuanfeng Wang ^a , Chengcheng Shia, Boqun Zhang ^a , Xiaohui Guo ^a , Shuowen Zhou ^c , Jingjing Wang ^d	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	Journal of Cleaner Production	2022	CHI-	No	Scopus
52	10.1016/j.aei.2008.03.001	Pareto multi-criteria decision making	Donald E. Grierson*	Sostenibilidad en puentes	Artículo	Advanced Engineering Informatics	2008	CAN-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
53	10.1016/j.asej.2023.102152	Decision support system to select the optimum construction techniques for bridge piers	Dina M. Ors ^a , Ahmed M. Ebid ^a , ⁿ , Ibrahim M. Mahdi ^a , Hisham A. Mahdi ^{a, b}	Sostenibilidad en puentes	Artículo	Ain Shams Engineering Journal	2023	EGI-	No	Scopus
54	10.1016/j.ijsbe.2014.08.002	Integrating a fuzzy-logic decision support system with bridge information modelling and cost estimation at conceptual design stage of concrete box-girder bridges	Nizar Markiz ⁿ , Ahmad Jrade ^l	Sostenibilidad en puentes	Artículo	International Journal of Sustainable Built Environment	2014	CAN-	No	Scopus
55	10.1016/j.istruc.2023.02.124	Risk-based optimization of seismic mitigation devices constrained by user-defined components importance	Jian Zhong ⁿ , Yuntao Zhu ^a , Yutao Pang ^{b*} , Xinche Yuan ^c , You Dong ^d , Xinzhong Dang ^e , Kewen Xu ^f	Sostenibilidad en puentes	Artículo	Structures	2023	CHI-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
56	10.6036/10816	Mejora de la evaluación de la sostenibilidad de puentes en entornos agresivos mediante la decisión grupal multicriterio	Ignacio J. Navarro ¹ , José V. Martí ^{1,2} , Víctor Yepes ^{1,2}	Sostenibilidad en puentes	Artículo	DYNA	2023	ESP-	No	Scopus
57	10.3390/su12030872	Sustainable Decision-Making in Road Development: Analysis of Road Preservation Policies	Angie Ruiz* y José Guevara	Sostenibilidad en puentes	Artículo	SUSTAINABILITY	2020	COL-	Sí	Scopus
58	10.3390/su14063370	A Parametric Approach to Optimizing Building Construction Systems and Carbon Footprint: A Case Study Inspired by Circularity Principles	Muheeb Al-Obaidy ^{1*} , Luc Courard ² y Shady Attia ¹	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	SUSTAINABILITY	2022	BELG-	No	Scopus
59	10.3390/su141710688	Analytic Network Process-Based Sustainability Life Cycle Assessment of Concrete Bridges in Coastal Regions	In Coastal Regions Ignacio J. Navarro, José V. Martí y Víctor Yepes*	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	SUSTAINABILITY	2022	ESP-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
60	10.3390/ su152015049	Potential Integration of Bridge Information Modeling and Life Cycle Assessment/ Life Cycle Costing Tools for Infrastructure Projects within Construction 4.0: A Review	Ahmad Jadei ¹ , Farnaz Jalaei ¹ , *, Jieying Jane Zhang ² , Saeed Jalilzadeh Eirdmoua ¹ y Farzad Jalaei ²	Análisis de ciclo de vida en puentes	Artículo	Sustainability	2023	CAN-	No	Scopus
61	ND	Rebalancing Risk Allocation in Infrastructure: A collective effort to improve collaboration between the public and private sectors	World Economic Forum	Sostenibilidad en puentes	Memorias de ponencias	World Economic Forum	2022	SUI-	No	Scopus
62	10.3989/ic.6135	Conexiones territoriales y sociales de los puentes sobre el río Bogotá, Colombia	Manuela Agudelo Salamanca (*), Patricia Hernández Lamas (**), Beatriz Cabau Anchuelo (**), Jorge Bernabeu Larena (**)	Puentes en Colombia	Artículo	Informes de la Construcción	2020	COL-	Sí	Scopus

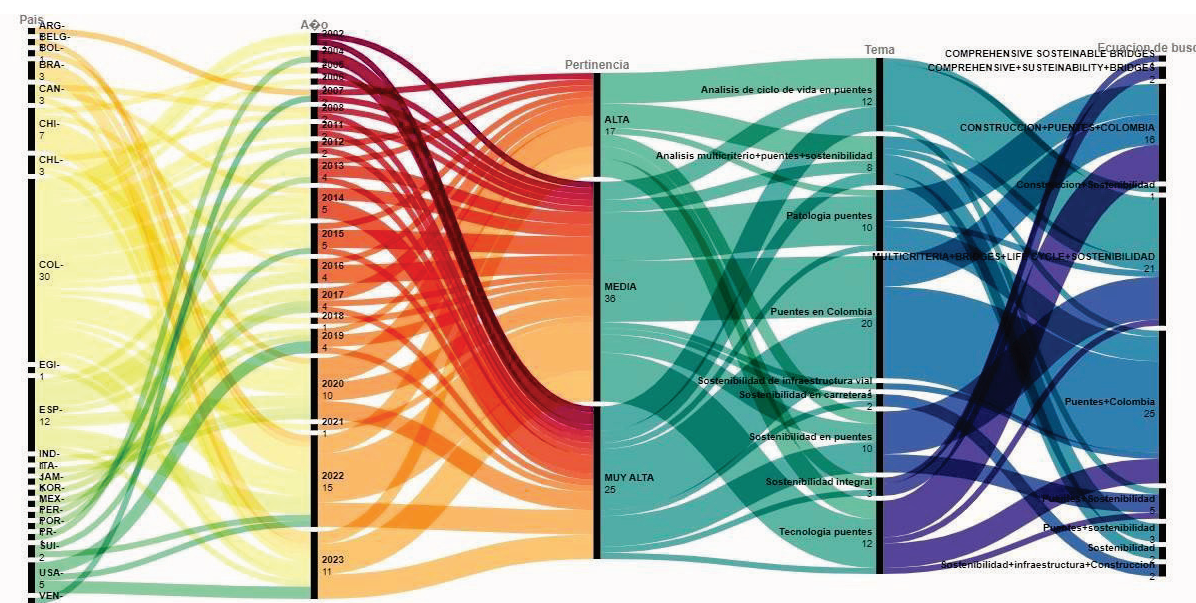
Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
63	10.4067/S0718-50732013000100003	Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia	Édgar Muñoz ^{1,2*} , David Gómez ^{3*}	Puentes en Colombia	Artículo	Revista Ingeniería de Construcción (RIC)	2011	COL-	Sí	Scopus
64	10.15446/dyna.v88n216.88247	Identification and analysis of pathological defect appearance in superstructures of reinforced-concrete bridges in Chapare region, Bolivia	Joaquín Humberto Aquino Rocha ^a y Rolando Ibarra Villanueva ^b	Patología de puentes	Artículo	DYNA	2020	BOL-	No	Scopus
65	10.15446/dyna.v88n217.91879	Use of unmanned aircraft systems for bridge inspection: a review•	Didier Aldana-Rodríguez ^a , Diego Leonardo Ávila-Granados ^b y Jorge Armando Villalba-Vidales ^a	Patología de puentes	Artículo	DYNA	2021	COL-	No	Scopus
66	10.15446/dyna.v90n225.104694	Weighted Average Bridge Inspection Methodology (WABIM)•	Cristhian Camilo Amariles-López y Cristian Camilo Osorio-Gómez	Patología de puentes	Artículo	DYNA	2022	COL-	Sí	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
67	ND	Determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación	Édgar Muñoz ^{*1} , David Gómez [*] , Federico Núñez ^{**} y Carlos Flórez [*]	Tecnología en puentes	Artículo	Revista Ingeniería de la Construcción (RIC)	2011	COL-	Sí	Scopus
68	NA	Green and Blue Space Conceptual Framework	Planning Department HKSARG	Tecnología en puentes	Artículo	NA	2016	CHI-	No	Scopus
69	10.1016/j.engstruct.2005.02.021	Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges	J. M. Ko, Y. Q. Ni	Tecnología en puentes	Artículo	Engineering Structures	2005	CHI-	No	Scopus
70	10.37467/revvisual.v9.3683	Eco puentes: una estrategia sostenible para la biodiversidad	Mariana Gómez Macías ¹ , María Claudia Vera Guarnizo ² , Yeimy Gisela Montaño Cabrera ³	Tecnología en puentes	Artículo	VISUAL Review	2022	COL-	Sí	Scopus
71	NA	Análisis de ciclo de vida de carreteras: una visión crítica	María Herrero Ribó	Análisis de ciclo de vida en puentes	Trabajo final de maestría	Universidad Politécnica de Cataluña	2019	ESP-	No	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
72	10.2174/1874836801711010095	Sustainability Assessment in Singular Structures, Foundations and Structural Rehabilitation in Spanish Legislation	Pilar Mercader Moyano ¹ , Jesús Roldán Porras ² y Antonio Ramírez de Arellano Agudo ³	Sostenibilidad en puentes	Artículo	The Open Construction and Building Technology Journal	2017	ESP-	No	Scopus
73	10.3390/app10207368	Sustainability Analysis of the M-30 Madrid Tunnels and Madrid Río after 14 years of Service Life	Lucía López de Abajo, Ana Patricia Pérez Fortes, Marcos G. Alberti, Jaime C. Gálvez* y Tomás Ripa	Sostenibilidad en puentes	Artículo	Applied Sciences	2020	ESP-	No	Scopus
74	ND	ANP-Based sustainability-oriented indicator for bridges in aggressive environments	Navarro, Ignacio J. (1); Martí, José V. (1); Yepes, Víctor (1)	Sostenibilidad en puentes	Memorias de ponencias	26th International Congress on Project Management and Engineering Terrassa, 5th-8th July 2022	2022	ESP-	No	Scopus
75	ND	Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project	Carlos Bedoya**, Luis Dzul**	Tecnología en puentes	Artículo	Revista Ingeniería de Construcción (RIC)	2015	COL-	Sí	Scopus

Id	DOI/ISBN	Nombre	Autor/ Entidad	Tema	Tipo	Revista/Evento/ Universidad/ Entidad/Journal	Año	País	Trata sobre Colombia	Fuente
76	10.1016/j.rser.2021.111811	Assessing the CO ₂ reduction target gap and sustainability for bridges in China by 2040	Yinshan Liu ^a , Yuanfeng Wang ^{a,*} , Chengcheng Shi ^a , Weijun Zhang ^a , Wei Luo ^a , Jingjing Wang ^b , Keping Li ^{c,**} , Ngai Yeung ^{d,e} , Steve Kite	Sostenibilidad integral	Artículo	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2022	CHI-	Sí	Scopus
77	10.3390/su12218930	Teaching Multi- Criteria Decision Making Based on Sustainability Factors Applied to Road Projects	Gabriela Paredes y Rodrigo F. Herrera	Sostenibilidad en carreteras	Artículo	SUSTAINABILITY	2020	CHI-	Sí	Scopus
78	10.14483/22487638.16194	Analysis of the impact of the construction sector on Colombian economy	Jorge Andrés Sarmiento Rojas, Juan Sebastián González Sanabria, Carlos Gabriel Hernández Carrillo ³	Sostenibilidad en carreteras	Artículo	Tecnura - Revista de la U. Distrital	2020	COL-	Sí	Scopus

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Gráfica aluvial: espacial, temporal, tipo publicación y tema

Fuente: elaboración propia.

Las publicaciones sobre sostenibilidad, análisis de ciclo de vida y avances tecnológicos en puentes evidencian que Colombia tiene la oportunidad de aprovechar el conocimiento existente para evitar la repetición de errores [8] y optimizar la aplicación de estos enfoques en el desarrollo de su infraestructura vial.

En este sentido, la sostenibilidad en puentes vehiculares no debe concebirse solo como una respuesta a los desafíos ambientales, sino como un pilar fundamental en la evolución de la infraestructura del país [16]. La integración de innovaciones tecnológicas, el fortalecimiento de políticas públicas coherentes y una mayor conciencia sobre la importancia del desarrollo sostenible permitirán avanzar hacia un modelo de infraestructura que no solo satisfaga las demandas actuales de conectividad, sino que también promueva la resiliencia y el bienestar de las generaciones futuras.

Conclusiones y desafíos

El concepto de sostenibilidad integral aplicado a los puentes vehiculares ha sido poco explorado en la literatura académica y en la práctica constructiva en Colombia. Aunque existen aproximaciones

parciales que abordan aspectos ambientales y estructurales, el enfoque holístico que integre criterios económicos, sociales y culturales sigue siendo un reto. La sostenibilidad de puentes vehiculares no debe limitarse a la eficiencia energética o al uso de materiales ecológicos, sino que debe abarcar todo el ciclo de vida de la infraestructura, considerando su impacto en las comunidades y el entorno.

En Colombia, la documentación sobre infraestructura vial ha estado históricamente enfocada en la evaluación de patologías, análisis de colapsos y fallas estructurales [17], con un número considerable de publicaciones en las últimas dos décadas. Sin embargo, estos estudios han estado desvinculados del concepto de sostenibilidad. Es fundamental armonizar este conocimiento previo con metodologías contemporáneas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y los Métodos de Análisis Multicriterio (Mives, AHP) [5], que permiten evaluar la viabilidad de los proyectos desde un enfoque integral. Solo de esta manera se podrá consolidar un modelo de infraestructura vial resiliente, eficiente y alineado con los compromisos nacionales e internacionales en materia de desarrollo sostenible.

Los hallazgos tienen implicaciones directas en la planificación y ejecución de infraestructura

sostenible en Colombia. Para garantizar un enfoque integral en la sostenibilidad de puentes vehiculares, se proponen las siguientes estrategias:

- Desarrollo de normativas específicas: es imperativo establecer lineamientos concretos dentro del Código Colombiano de Puentes y otras normativas nacionales que incluyan criterios de sostenibilidad en el diseño, construcción y mantenimiento de la infraestructura vial. La creación de certificaciones nacionales para infraestructura sostenible puede garantizar que los proyectos cumplan con estándares claros y medibles.
- Implementación de métodos multicriterio: la adopción de herramientas como Mives y ACV facilitaría una mejor toma de decisiones en la planificación de los puentes, garantizando un equilibrio entre costos, impacto ambiental y beneficio social. La evaluación multicriterio permitiría jerarquizar opciones de diseño y materiales con base en su desempeño en términos de sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo.
- Incentivos financieros para infraestructura sostenible: es recomendable que el Gobierno implemente incentivos económicos y fiscales que promuevan la adopción de materiales reciclados, tecnologías de construcción de bajo impacto y prácticas sostenibles en la ejecución de proyectos viales. Las políticas de financiamiento deben priorizar proyectos que integren criterios sostenibles desde la etapa de diseño.
- Capacitación del sector: es necesario fortalecer los programas de formación académica y profesional en universidades y entidades gubernamentales, con el fin de ampliar el conocimiento y la aplicación de metodologías de sostenibilidad en la construcción de puentes. La integración de la sostenibilidad en los planes de estudio de ingeniería civil es clave para asegurar que los futuros profesionales adopten una visión integral desde el inicio de sus carreras.
- Monitoreo y seguimiento de proyectos existentes: sería muy importante contar con un sistema de monitoreo que evalúe el desempeño

ambiental, económico y social de los puentes construidos bajo criterios sostenibles, permitiendo realizar ajustes y mejoras en su operación a largo plazo. La recopilación de datos sobre la vida útil de los materiales, el impacto en la movilidad y la eficiencia energética de los puentes permitiría mejorar la toma de decisiones en futuras construcciones.

Desde una perspectiva fenomenológica, la sostenibilidad en la construcción de puentes no solo debe entenderse como una optimización de recursos, sino como un cambio en la concepción misma de la infraestructura dentro del tejido social. Esto implica reconsiderar los materiales utilizados, la planificación territorial y la integración de la sostenibilidad como un eje central del diseño estructural desde sus primeras etapas. Además, la participación ciudadana debe jugar un rol crucial en la toma de decisiones, asegurando que las comunidades impactadas tengan voz en los procesos de planificación y ejecución de proyectos.

En términos de investigación futura, este estudio abre la posibilidad de profundizar en varias líneas de estudio:

- La integración de nuevos materiales, como concreto autorreparable y polímeros reforzados, para reducir la huella ambiental en la infraestructura vial.
- El uso de tecnologías digitales como el Modelo de Información de Construcción (BRIM por sus siglas en inglés) para mejorar la eficiencia en la planificación y construcción de puentes sostenibles.
- Evaluaciones de impactos sociales y económicos de proyectos de infraestructura sostenible en comunidades vulnerables en Colombia.
- Análisis de los costos a largo plazo de implementar prácticas sostenibles en comparación con los modelos convencionales de construcción.

En el contexto colombiano queda en evidencia que, a pesar de los esfuerzos del gobierno colombiano por fortalecer la sostenibilidad en la

infraestructura vial mediante normativas y estrategias recientes, su implementación efectiva aún enfrenta importantes desafíos. La falta de obligatoriedad en la aplicación de criterios de sostenibilidad en los procesos de licitación y regulación del sector limita la adopción de modelos innovadores y la integración de tecnologías de bajo impacto ambiental. Sin embargo, en congresos recientes relacionados con la política pública de contratación estatal para infraestructura vial en el país, se ha socializado la incorporación de criterios de calificación y ponderación en cuanto a la aplicación de conceptos de sostenibilidad [16].

Aunque iniciativas como el plan nacional de desarrollo, la normativa del Invías y la Estrategia Nacional de Economía Circular han introducido directrices clave, su ejecución sigue dependiendo en gran medida de la voluntad de los actores involucrados y de la disponibilidad de recursos. Para consolidar una infraestructura vial verdaderamente sostenible es crucial desarrollar mecanismos

de certificación específicos para puentes sostenibles y articular de manera más efectiva las políticas ambientales con las regulaciones de construcción, garantizando así un marco normativo sólido y aplicable en todas las fases de desarrollo de estos proyectos.

Es así como queda en claro que el desarrollo de puentes sostenibles en Colombia no debe ser un criterio opcional, sino una necesidad urgente para garantizar infraestructuras resilientes, eficientes y alineadas con las necesidades ambientales y sociales del país. La consolidación de estos enfoques permitirá no solo mejorar la calidad y durabilidad de los puentes vehiculares, sino también contribuir a un desarrollo más equitativo, resiliente y ambientalmente responsable. Si bien se ha dicho que no hay incentivos aplicados a la sostenibilidad en puentes, es factible que los beneficios utilizados en edificaciones por el uso de ecomateriales y buenas prácticas sostenibles puedan ser llevados al ámbito de la infraestructura vial.

Referencias

- [1] J. Anderson Sánchez, D. Gómez y P. Thomson, “Análisis de la interacción humano-estructura en puentes peatonales de Santiago de Cali”, *DYNA*, vol. 80, pp. 86-94, 2013.
- [2] J. Mario, G. Giraldo, J. Ospina Giraldo y A. Graciano Gómez, “La infraestructura de puentes en las vías secundarias del departamento de Antioquia”, *Revista EIA*, vol. 11- 22, 2014.
- [3] Invias. (2024, sept. 8). “Metodología para la evaluación de la sostenibilidad de los proyectos de infraestructura de transporte AIKA”. [Internet]. Disponible en <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/cnsc/sostenibilidad/13155-metodologia-para-la-evaluacion-de-la-sostenibilidad-de-los-proyectos-de-infraestructura-de-transporte-aika>
- [4] Invias. (2024, sept. 8). “Manual para la inspección visual de puentes y pontones”. [Internet]. Disponible en <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/976-manual-para-la-inspeccion-visual-de-puentes-y-pontones>
- [5] M. V. Hermenegildo Chávez y Y. Rueda, “Metodología de análisis multicriterio aplicación al crecimiento sostenible en la unión europea”, *Gestión en el tercer milenio*, 16-31, 2013, doi:10.15381/gtm.v16i31.8668
- [6] P. Vicent y P. Plà, “Aplicación de la toma de decisión multi-criterio al diseño sostenible de puentes de hormigón”, Trabajo final de maestría, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. 2017.
- [7] E. Maldonado, G. Chio, J. R. Casas y J. Canas, “Evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica de puentes en Bucaramanga (Colombia)”, *Segundo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica*, Granada, España, mayo de 2011.
- [8] J. Zapata Álvarez, N. Doried, J. Toro, L. María y Q. Gaviria, “Prototipo de matriz multicriterio para soluciones viales. Caso: Intercambio vial de Mayorca”, Trabajo de grado de ingeniería civil, Corporación Universitaria Minuto de Dios, Medellín, Colombia, 2022.

- [9] J. P. Ainchil, L. Gonzalo y R. Schneider, “Estudio de diferentes tipologías de puentes desde el punto de vista de su sostenibilidad”, Iván Herrera de Argila Enginyeria de Camins Canals i Ports Treball final de màster, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelonatech, Barcelona, España, 2020.
- [10] J. Pablo, V. Sánchez, D. Restrepo, J. Manuel y G. Sierra, “Análisis de alternativas para la intersección de la carrera 43a con la calle 4 sur”, Trabajo de grado de ingeniería civil, Universidad EIA, Envigado, Colombia, 2021.
- [11] J. Carrillo, L. A. Londoño, J. Alejandra y M. Figueroa, “Statistical Assessment of Bridge Collapse in Colombia by Blast Loading”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 24-2, 2014, doi:10.18359/rcin.399
- [12] E. E. Muñoz, “Estudio de las causas del colapso de algunos puentes en Colombia”, *Revista Ingeniería y Universidad*, Pontificia Universidad Javeriana, vol. 6-1, 2002.
- [13] J. Sebastián, G. Cardona y A. G. Cabrera, “Using The Methodology BRIM (Bridge Information Modeling) as a Tool for Planning the Construction of a Concrete Bridge in Colombia”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 24-2, 2014, doi:10.18359/rcin.398
- [14] E. Muñoz y D. Gómez, “Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia”. *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 28-1, pp. 37-62, 2013. doi:10.4067/S0718-50732013000100003
- [15] E. Muñoz y R. E. Valbuena, “Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia”, *Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 4-2, 2004.
- [16] Colombia Compra Eficiente. (2024, diciembre). “Guía de Contratación Pública Sostenible y Socialmente Responsable”. [Internet]. Disponible en https://www.colombiacompra.gov.co/sites/cce_public/files/cce_documents/guia_de_contratacion_publica_sostenible_y_socialmente_responsable_2024.pdf
- [17] E. E. Muñoz, *Ingeniería de puentes*, Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana, 2010.