

Estado actual en la implementación de la metodología Building Information Modeling (BIM) aplicada a la infraestructura vial en Colombia

Current status of the implementation of the Building Information Modeling (BIM) methodology applied to road infrastructure in Colombia.

Paula Jezreel Fonseca¹, Neiran Sebastián Pérez Corredor² y Harol León Zambrano Urbano³

¹ <https://orcid.org/0000-0002-4887-8926>. Estudiante Programa de Ingeniería Civil, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, pjfonsecar@udistrital.edu.co

² <https://orcid.org/0009-0001-3519-2300>. Estudiante Programa de Ingeniería Civil, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, nsperezc@udistrital.edu.co

³ <https://orcid.org/0000-0002-7395-2286>. Profesor Facultad Tecnológica, Programa de Ingeniería Civil, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, hlzambranou@udistrital.edu.co

Fecha de recepción: 10/09/2024

Fecha de aceptación del artículo: 05/12/2024



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.12141>

Como citar: Estado actual en la implementación de la metodología Building Information Modeling (BIM) aplicada a la infraestructura vial en Colombia. (2024). Avances Investigación en Ingeniería, 21(2) (junio-diciembre). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.12141>

Resumen

La metodología Building information Modeling (BIM) en la infraestructura vial es un área en desarrollo en el mundo, que ha demostrado tener gran potencial en el sector del transporte. Este artículo ofrece una revisión exhaustiva y actualizada de la bibliografía, acompañada de un análisis crítico de las áreas de investigación relacionadas con el BIM en infraestructura vial durante todo el ciclo de vida. Se busca impulsar la investigación y las aplicaciones en Colombia mediante una comparación global. Entre 2019 y 2024 se revisaron 61 publicaciones, incluyendo artículos de revistas, actas de conferencias e informes. Los resultados muestran un aumento en el uso de BIM en la infraestructura de transporte, destacando la urgente necesidad de un formato de intercambio neutral y un esquema estándar que promuevan la interoperabilidad. Es importante mantener una colaboración continua entre la academia y la industria para superar los desafíos y maximizar el potencial de BIM en este campo.

Palabras clave: BIM, CIM, gestión de activos viales, infraestructura vial, modelado 3D.

Abstract

The Building Information Modeling (BIM) methodology in road infrastructure is a developing area worldwide, with significant potential demonstrated in the transportation sector. This article aims to provide a comprehensive and updated review of the literature, accompanied by a critical analysis of research areas related to BIM in road infrastructure throughout the entire life cycle. This seeks to promote research and applications in Colombia through a global comparison. A total of 61 publications from 2019 to 2024 were reviewed, including journal articles, conference proceedings, and reports. The results show an increase in the use of BIM in transportation infrastructure, highlighting the urgent need for a neutral exchange format and a standard scheme to promote interoperability. Most importantly, continuous collaboration between academia and industry is essential to overcome challenges and maximize the potential of BIM in this field.

Keywords: BIM, CIM, Road Asset Management, Road Infrastructure, 3D Modeling.

1. Introducción

La infraestructura vial desempeña un papel crucial en el desarrollo económico y social de un país, aportando en áreas de comercio y conectividad. En Colombia, la inversión en infraestructura de transporte para 2024 ascendió aproximadamente a 13,2 billones de pesos, administrados por el Ministerio de Transporte, el Instituto Nacional de Vías (Invías), la Aeronáutica Civil y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) [1].

En la mayoría de las obras civiles se utilizan metodologías convencionales que resultan en retrasos, incremento en los costos y pérdida de información. Además, en el caso de los proyectos viales, que suelen ser obras públicas, existe una falta de transparencia en su gestión. La metodología BIM integra todas las disciplinas de un proyecto, usando un formato abierto Industry Foundation Classes (IFC), lo cual permite tener un mayor control de la información en cada fase del ciclo de vida de un proyecto.

El avance en la metodología BIM se ha utilizado principalmente en edificaciones verticales. Sin embargo, ante sus beneficios ha sido necesario aplicarla a otras áreas de la ingeniería civil. En el mundo se ha querido implementar en la infraestructura vial. El índice global de competitividad señala que Colombia ocupa el lugar 109, entre 137 países, en calidad de infraestructura [2]. La metodología BIM no se puede confundir como un simple modelado de software. El modelado 3D de un proyecto es una visualización a la cual se le puede incluir información sobre materiales, tiempos, costos, sostenibilidad, mantenimiento del activo, etc. [3].

Este artículo propone una revisión bibliográfica de los avances más recientes en infraestructura vial, contextualizando el uso del BIM en los ámbitos nacional e internacional. Se analiza la implementación

de esta metodología en las etapas de un proyecto de infraestructura vial: planificación, diseño, construcción, mantenimiento y rehabilitación, destacando la forma como BIM permite un mayor control en cada una de estas fases [2]. Por último, se compara la aplicación de estos avances en casos estudiados en Colombia y en el resto del mundo, para finalmente definir beneficios y limitaciones que aporta el BIM en las obras viales.

2. Metodología

Este artículo de revisión se desarrolló mediante una metodología de cuatro fases:

- **Búsqueda de referencias.** Se hizo una búsqueda exhaustiva de fuentes relacionadas con BIM en infraestructura vial, abarcando artículos científicos, libros especializados y documentos técnicos de relevancia y reconocimiento en el sector.
- **Clasificación de publicaciones.** Se encontraron 61 artículos, que se clasificaron de acuerdo con las fases de un proyecto de infraestructura vial: planificación, diseño, construcción, mantenimiento y rehabilitación.
- **Evaluación de artículos.** Se calificaron los artículos en una escala de 1 al 5, considerando el número de citas, el año de publicación y la relevancia para el tema en estudio.
- **Selección final.** Se seleccionaron 50 artículos, con una puntuación superior a 3.

Tabla 1. Clasificación preliminar de publicaciones.

Nº referencia	Puntaje cantidad de veces citada (20 %)	Puntaje en relación con el tema (1-5) 60 %	Puntaje año (20%)	Puntaje total
[5]	5	5	3	4,6
[6]	5	4	5	4,4
[7]	5	4	4	4,2
[3]	5	4	4	4,2
[8]	5	4	4	4,2

3. Antecedentes y contexto

Entre 2012 y 2017 se aplicó BIM en proyectos de infraestructura vial en Europa, con un aumento de implementación que pasó de 20 a 52 % en este periodo [4]. Esta metodología se desarrolló primero en Estados Unidos en 2003 y se hizo obligatoria en 2012 [8] [9]. Existen guías recomendadas en países como China, Noruega y Canadá. En Colombia tienen iniciativas de su desarrollo en obras públicas y privadas. [10]. En el año 2022, Colombia tenía una participación BIM del 6,8 % del total de empresas en América Central y del Sur. Según la estrategia nacional BIM 2020-2026, para este año el país debía cumplir con un uso BIM del 10 al 25 % en contratos de obras públicas [11], [12].

De acuerdo con la revisión bibliográfica se puede definir a esta metodología como un proceso colaborativo y digital que permite la creación, gestión y uso de modelos tridimensionales de información de construcción durante el ciclo de vida de un proyecto, facilitando la cooperación entre las partes interesadas, incluyendo propietarios, arquitectos, ingenieros, contratistas y proveedores. Además, esta metodología proporciona una base para la toma de decisiones mediante el intercambio de información estructurada, fomentando la coordinación de los datos a través de un entorno de datos común, CDE (por su sigla en inglés).

El CDE se debe usar como la única fuente de información en un proyecto, la cual generalmente se basa en la nube, se utiliza para recopilar, gestionar y distribuir documentación y modelos gráficos al equipo de un proyecto. Esto ayuda a evitar duplicaciones y errores [13]. Entre sus características, el CDE incluye un repositorio de datos, *software*, servidores, medidas de seguridad, regulación de información, niveles de acceso, procedimientos de gestión y protocolos de seguridad [14].

La metodología BIM abarca 10 dimensiones (10D). Las últimas tres aún están en proceso de desarrollo: 8D, se enfoca en la prevención de riesgos laborales mediante la seguridad y salud ocupacional [14]; 9D, aborda la construcción optimizada o sin desperdicios (*lean construction*), y 10D, se centra en la industrialización de la construcción. Esta última busca la digitalización completa de los proyectos, mejorando la productividad y rendimiento mediante la gestión avanzada y el uso de nuevas tecnologías en los procesos constructivos, como los módulos prefabricados [15], [16].

Dada la cantidad de *softwares* usados en las dimensiones, y con el fin de no perder información en el modelo, la Buildingsmart creó un formato abierto y neutral, estandarizado conocido como IFC, que facilita el intercambio de datos y la interoperabilidad entre las disciplinas [17].

La evolución del IFC hacia la infraestructura vial se incorporó en la versión 4.1, que introdujo la alineación de vías para facilitar la colocación de elementos e interconexión de infraestructuras. Posteriormente, se lanzó la versión 4.2, enfocada en puentes, que fue anulada con la llegada del formato estandarizado IFC 4.3, que abarca carreteras, ferrocarriles, puertos y vías navegables. Además, esta versión incluye varios cambios en la jerarquía y nomenclatura del esquema [18]. Actualmente, la Buildingsmart se encuentra desarrollando los formatos IFC 4.4 y 4.5.

Según el elemento, el formato puede variar para construir el modelo federado en el CDE, que unifica los modelos por área mediante vínculos, como se define en el Plan de Ejecución BIM (BEP), que detalla la colaboración de los participantes del proyecto para cumplir los estándares del Employer's Information Requirements (EIR), abarcando a los agentes involucrados, los entregables, los procesos de intercambio de información y la Model Element Table (MET), que especifica el nivel de detalle (LOD) requerido para los objetos BIM [10], [15], [18], [19].

El LOD (nivel de detalle) representa la cantidad de información en un modelo, sin asegurar su relevancia para el proyecto, mientras que el LOD (nivel del desarrollo)

define la madurez de información de un modelo BIM, indicando la cantidad de información relevante para tomar decisiones en un proyecto. Según [13], los diseños de carretera deben alcanzar un LOD 300, debido a que este nivel se enfoca en describir el elemento del modelo específico, no en el modelo completo en sí.

La norma vigente en Colombia es la NTC-ISO 19650-1 de 2021, la cual organiza y digitaliza la información relacionada con proyectos civiles que emplean BIM, gestionando los datos a través del modelado y enfocándose en la seguridad de la información [20]. La Cámara Colombiana de la Construcción (Camacol) y el BIM Forum Colombia llevaron a cabo la primera "Encuesta Nacional BIM 2023". En este estudio participaron 643 empresas del sector, cuyos resultados mostraron que el 49 % ya están utilizando la metodología BIM en sus procesos [21].

4. Tecnología, software e Industria 4.0

La metodología BIM depende, en gran medida, de diversos *softwares* especializados que se adaptan a las necesidades específicas de cada etapa del proyecto. A continuación, se presentan los más comunes, categorizados según su uso.

Tabla 2. Clasificación de *software* según su aplicación en BIM.

Uso	Softwares	Referencia
Creación de modelos 3D para infraestructura vial	Civil 3D, OpenRoad, Power Civil, InRoads, ISTRAM, CLIP, Allplan, Sketchup	[11], [22], [23], [24], [25], [26]
Modelado de elementos específicos de carretera	Revit, Sketchup	[24], [25]
Creación de un modelo federado	Navisworks	[3]
Detección de interferencias	Navisworks, Infracore	[13]
Gestión de costos	Presto, Construcontrol, Aconex Cost, Vico Office	[23]

Uso	Softwares	Referencia
Planificación y programación	Schedule Planner, Vico Office, Navisworks	[23]
Visualización de modelos	BIM 360, Autodesk Construction Cloud, Synchro, Tekla, Solibri	[23], [27]
Gestión documental	A360, Project Wise, Aconex Documental, BIM 360, Autodesk Construction Cloud	[23], [27], [28]
Gestión de datos SIG	ArGIS, Pix4D, Agisoft	[8], [24]
Análisis estructural	Sofistik, Robot Structural Analysis, SCIA, STAAD, Structural Bridge Analysis, LEAP, Bocad, StruCad	[13], [20]

La metodología BIM se integra con otras tecnologías que permiten la construcción de modelos complejos que definen el comportamiento real de un objeto, entre las cuales puede estar el uso de drones, también conocidos como RPAS (Remote Pilote Aircraft system), que junto a escáneres LiDAR [6] se utilizan para el levantamiento del terreno y fotogrametría [30], ofreciendo un posicionamiento preciso, generando beneficios principalmente en la fase de diseño, pues permite evaluar sitios con grandes dimensiones y áreas de riesgo o zonas poco accesibles, obteniendo modelos tridimensionales. Mediante un entorno 5D, con el *software* BIGMonitores permite incluir cartografía e información del terreno, gráficos de control y seguimiento y evaluación de costos. [31]

La georreferenciación es esencial en los proyectos BIM, con el uso de modelos BIM-GIS que se enfocan principalmente en proyectos de infraestructura [6]. Esta tecnología se utiliza como método de prefactibilidad para la ubicación del eje de la vía y conocer el entorno en cuanto a impactos ambientales como agua, ruido y bosques [32]. La tecnología GIS integra datos espaciales y no espaciales, como niveles de contaminación y tráfico [33] al modelo BIM, lo cual es aplicable a la seguridad vial. En este contexto, BIM-GIS se utiliza para analizar

autopistas y carreteras urbanas, en las que la vinculación con el SIG es crucial debido a la precisión de los aspectos geométricos [34]. Así mismo, es necesario tener en cuenta los marcos de referencia del país. Esta compatibilidad de coordenadas debe estar entre programas GIS y *software* BIM [24].

La integración BIM-GIS usando LiDAR, conocido por su alta precisión y extensa recopilación de datos en 3D, es útil para el Facility Management (FM) de los datos en la nube [24]. Las herramientas de toma de decisiones basadas en GIS se utilizan para la evaluación de sitios de construcción, el análisis de horarios de trabajo alternativos y la simulación del flujo de la red de transporte para la respuesta ante desastres.

La construcción inteligente se basa en la integración de modelos BIM con tecnologías avanzadas como Big Data, IoT (Internet of Things), Blockchain y Digital Twins, permitiendo un control y gestión más eficientes de los proyectos de infraestructura. Los dispositivos IoT proporcionan datos en tiempo real y permiten intervenciones inmediatas, utilizando sensores que captan datos en el pavimento y metodologías como LiDAR y BIM para una mejor gestión. Un caso de estudio en la calle 30 de Madrid, España, utilizó modelos híbridos BIM-GIS y sensores IoT para desarrollar una plataforma que

ofrece datos en tiempo real, integrados en SQL para mejorar la gestión de instalaciones [24], [33].

El uso de Big Data en combinación con BIM facilita la gestión de activos de infraestructura de manera más eficiente y reduce costos mediante el monitoreo activo en tiempo real y el análisis predictivo. El *blockchain* en la construcción inteligente permite la trazabilidad de la información en los contratos, incrementando la transparencia y resolviendo problemas de control de responsabilidad [33], [35].

La tecnología de gemelos digitales recrea la entidad física, estableciendo una plataforma de gestión visual inteligente para la construcción. La integración de gemelos digitales con BIM conduce a una mayor eficiencia, menor tasa de errores, mejor calidad de la construcción y mayor disponibilidad de información [36]. En la fase de operación y mantenimiento, el modelo de registros y gestión de activos utiliza herramientas BIM y sistemas de gestión de transporte para una representación virtual conectada con el activo físico, transfiriendo datos como tiempo, temperatura, humedad, presión, entre otros, al gemelo digital. La integración de Big Data e IoT, que da lugar a un Digital Twin, se considera el nivel más avanzado de BIM [13], [35].

5. Etapas del ciclo de vida

La metodología CIM (Civil Integrated Management) se aplica durante todo el ciclo de vida de una infraestructura, desde la planeación hasta la operación, facilitando una gestión eficiente y coordinada del proyecto. CIM amplía el alcance de BIM al integrar, no solo la modelización de la información del edificio, sino también la gestión de datos y procesos en proyectos de infraestructura civil, como carreteras y puentes. CIM también aborda las desventajas de los métodos tradicionales, como la falta de registros e inconsistencias en el modelo, proporcionando un marco claro

para el intercambio de información [4], [13], [37], [38], [39].

5.1. Planeación y diseño

Durante la etapa de planeación con métodos tradicionales, usualmente no se tiene en cuenta el factor natural en los proyectos viales [40]. No obstante, la integración de herramientas de toma de decisiones basadas en SIG permite la evaluación de sitios de construcción, el análisis de horarios de trabajo alternativos y la simulación del flujo de la red de transporte para la respuesta ante desastres [39]. El BIM facilita un análisis exhaustivo del entorno, evaluando aspectos como elevación, pendiente, orientación e hidrología de la superficie, y calculando las cantidades de movimiento de tierra necesarias [4], [41]. Según [42], la implementación de un modelo integrado CIM (Civil integrated Management) para la estabilidad de taludes permite ahorrar más del 15 % en tiempo y recursos durante el ciclo de vida del proyecto [13], [32].

La fase de diseño se considera fundamental en el desarrollo de proyectos de ingeniería, ya que en esta etapa se analizan las posibles alternativas de diseño para una detección temprana de inconsistencias y finalmente plantear diversas soluciones [10], [43], [44]. En la metodología tradicional existen errores en esta etapa que provocan reprocesos, costos imprevistos y disputas en la construcción, lo que puede, incluso, llevar a demandas [45].

BIM emplea modelos 3D y reglas paramétricas que facilitan una interacción efectiva entre los elementos del dibujo, permitiendo que cualquier cambio en el modelo se refleje de inmediato en todas las vistas [13], [35]. Las empresas constructoras están adoptando tecnologías de microprogramación para optimizar y automatizar procesos específicos durante la etapa de modelado, con ayuda de plataformas BIM como Dynamo en Revit, Scripts en Civil 3D y Autodesk Forge en Navisworks. Estos modelos 3D se complementan con información legal,

operativa y ambiental, entre otros aspectos [4], [33], [46].

Es necesario implementar normas de diseño geométrico específicas para cada país [47] en el ciclo de vida de una carretera, enfrentando restricciones naturales, regulatorias y de seguridad [41]. Para implementar un modelo de manera efectiva se necesitan conocimientos técnicos, un marco regulatorio, herramientas en desarrollo constante y criterios claros para su diseño y detalle. [48] Está demostrado que la implementación inicial de BIM implica un alto costo. Por ejemplo, en un caso específico en Estados Unidos se observó un incremento del 70 % en los costos por metro cuadrado al introducir BIM por primera vez [38].

La programación de una obra vial se beneficia significativamente con la adopción de la metodología BIM, porque facilita el seguimiento del proceso constructivo, organiza los equipos, evita conflictos y aumenta la productividad durante la fase de construcción. Además, permite la simulación del proceso de construcción, previniendo y coordinando los recursos necesarios, lo cual se traduce en una reducción de gastos y una optimización de recursos [4], [43].

En la elaboración de presupuestos realizados con BIM, estudios de la Universidad de Stanford han demostrado que, en comparación con la metodología tradicional, ofrece un 40 % más de exactitud en la estimación de cantidades de obra y costos [10], [38]. Esto se debe a que BIM utiliza herramientas tecnológicas que automatizan el cálculo de cantidades, reduciendo un 80 % del tiempo en la estimación de costos, lo que mejora significativamente la precisión [4], [29].

Según el Art. 59, BIM puede reducir la duración de los proyectos en un 7 %. Además, permite hacer comparaciones de costos para elegir la mejor opción antes de intervenir en fases posteriores del proyecto, eliminando

un 40 % de los cambios no presupuestados y un ahorro financiero del 10 % del valor del contrato, debido a la detección de conflictos, teniendo en cuenta que detectar un fallo en la fase de construcción cuesta diez veces más que en la fase de diseño [29], [32], [49].

La metodología BIM-LCA permite simular y evaluar el grado de sostenibilidad de un proyecto desde las fases tempranas y durante todo el ciclo de vida de las obras viales, generando certificaciones energéticas y calculando el impacto ambiental, como se hace con la metodología ACV (análisis del ciclo de vida) [14], [17], [29]. Esta metodología no solo permite evaluar la sostenibilidad de las construcciones, sino que también incentiva prácticas de reciclado de pavimento, lo cual es crucial en la fase de diseño [50], [51]. Un estudio de caso mostró que optimizar la cantidad de fresado y mezcla en caliente usando BIM redujo los costos en un 12 % [35].

En esta fase, los datos BIM ayudan a calcular el volumen de suelo necesario y, al superponer esta información con la caracterización ambiental, se promueve la reutilización del terreno, resultando en un diseño más sostenible [51]. Así mismo, la metodología busca optar por materiales más sostenibles [29]. Se ha observado que el consumo de energía de los pavimentos de concreto es menor al del pavimento asfáltico.

En los últimos años, se ha observado que el 90 % de los accidentes de seguridad se deben al descuido en la gestión de la seguridad y a la imperfección del sistema de gestión [40]. Para abordar esta problemática, se han desarrollado diversos métodos para medir y mejorar la seguridad vial. Uno de estos es el International Road Assessment Programme (IRAP), que optimiza la codificación de las carreteras evaluando su diseño y condiciones, así como el diseño y la construcción de medidas de seguridad vial [34].

Durante la etapa de diseño es posible probar diversos escenarios mediante el análisis de ingeniería de tráfico y realizar simulaciones en tiempo real para evaluar y verificar las medidas de seguridad [13], [38]. Además, los modelos 3D dinámicos permiten simular trayectorias, verificar la distancia de visibilidad y garantizar la seguridad de los usuarios. La identificación de riesgos incluye la evaluación detallada de atributos, como señales y balizamiento, y modelados con herramientas como SketchUp [25], [41]. Igualmente, el uso de BIM facilita la simulación de inundaciones en 3D y la evaluación de daños, considerando factores ambientales, contribuyendo así a una mejora integral de la seguridad en proyectos de infraestructura [38].

Para asegurar un uso adecuado de las herramientas BIM es esencial mantener un flujo de trabajo eficiente y transparente [37]. Este flujo debe facilitar la participación de todos los miembros del proyecto, especificando sus funciones y el software que deben utilizar [52], [53]. Al seleccionar el software, se deben considerar factores como el nivel de conocimiento del ecosistema, la calidad del soporte disponible, la capacidad de adaptación a condiciones locales, los requisitos de licitación del cliente y la compatibilidad con las plataformas utilizadas por todas las fases del proyecto [13].

5.2. Construcción

En la etapa previa, se identifican soluciones para problemas potenciales durante la construcción [18], que comienza con la ejecución física del trabajo, en la que BIM asegura que no se agoten materiales y se minimice el desperdicio innecesario, así como las omisiones, errores y conflictos de coordinación [4], [37]. Además, se ha optado por utilizar productos prefabricados para incrementar la eficiencia en esta etapa, debido a un mayor control de calidad y facilidad de instalación [44].

Durante la fase de construcción, se usa el CDE, que permite acceder al modelo BIM desde cualquier dispositivo, facilitando la verificación de medidas, unidades y otra información necesaria [5], [13], [44]. Esto permite un control de calidad mediante el monitoreo del avance y el estado de la obra con tecnologías como el escaneo láser. Además, se considera la seguridad a través del estudio y vigilancia de los desplazamientos de los obreros y medios en movimiento [31].

El uso de BIM en la etapa de construcción ofrece una notable reducción en el riesgo cuando se promueve la colaboración entre las partes involucradas. La investigación ha demostrado que problemas claves como la pérdida de documentación, la mala comunicación y la calidad deficiente se pueden mitigar con esta metodología [4], [44], [54]. Adicionalmente, la gestión de activos se vuelve más estratégica cuando los modelos se desarrollan con BIM, debido a la reducción de solicitudes de información y órdenes de cambio, y la organización de tareas repetitivas se optimiza durante esta etapa [4], [41]. Para asegurar el uso adecuado de BIM, el contratista debe imponer un marco de comunicación entre disciplinas y garantizar un conocimiento uniforme de la metodología [44].

La metodología BIM contribuye a la transparencia al establecer estándares claros y facilitar el intercambio accesible de información entre las partes involucradas. En España se ha desarrollado una guía que ofrece directrices sobre cómo incluir requisitos BIM en los pliegos de licitación [14], [23].

Particularmente en la construcción de carreteras, la automatización en la recolección de datos en las plantas de producción de asfalto facilita la incorporación de nuevos materiales, el control de temperatura, la reducción de errores de fabricación y el control de calidad a futuro [26], [35], [44]. Para asegurar la calidad de lo construido,

es crucial definir el espesor de la capa de acuerdo con el diseño [30] y realizar un monitoreo constante de la salud de la estructura mediante sensores que recopilan información [4]. Así mismo, BIM permite gestionar planes de emergencia para eventos inesperados que podrían afectar la construcción, como precipitaciones, sismos o cambios en la geometría [41], [42]. Por otra parte, la simulación de la ubicación de grúas y maquinaria mediante BIM optimiza la planificación y ejecución de las actividades de construcción [4].

La construcción y el mantenimiento de pavimentos de asfalto para carreteras demandan recursos elevados, generan grandes cantidades de residuos y requieren transporte a largas distancias, lo que contribuye significativamente con el calentamiento global [50].

5.3. Mantenimiento y rehabilitación

En la fase de operación y mantenimiento de una red de transporte, enfocada en la dimensión 7D, cobra relevancia la gestión de la infraestructura vial, debido a que en esta etapa se empiezan a brindar los servicios para los cuales fue construido, consumiendo los recursos proyectados y permitiendo la adecuación y actualización de la infraestructura conforme lo requiera su uso o mantenimiento [15], [35], [37].

Factores como el tráfico, las capas de pavimento, los materiales, la capacidad de carga, las condiciones ambientales, las técnicas de construcción y la calidad influyen considerablemente en el mantenimiento. Según [4], el envejecimiento y deterioro son los problemas más graves en una red de transporte, por lo que es esencial contar con información fiable de los láseres, escáneres y drones para calcular los costos de mantenimiento y evaluar los riesgos de inversión. Estos métodos permiten registrar y analizar las inspecciones de la carretera, complementando el modelo desarrollado en etapas anteriores [24], [55]. Igualmente,

se identifican patologías en la estructura del pavimento debido a un análisis hidráulico deficiente durante la fase de diseño [41]. Por lo tanto, es necesario contar con una base de datos integral que almacene diversas fuentes y tipos de información, como dibujos de puentes, registros de inspección, actividades de rehabilitación, estado de los elementos, registros de sensores remotos y el historial de decisiones con una marca de tiempo y referencia [5].

La integración de tecnologías avanzadas como LiDAR y UAV está revolucionando el flujo de trabajo en la construcción y el mantenimiento de infraestructuras, facilitando el almacenamiento de datos sobre la condición estructural del pavimento y la optimización de los horarios de operación de inspección. Los drones, por ejemplo, son esenciales para identificar deterioros en el pavimento, tales como grietas y fallas en parches. Por otra parte, LiDAR resulta muy útil en aplicaciones específicas como el mapeo de puentes y la medición de subsidencia de pavimentos [39]. Además, las técnicas de escaneo láser, como el escáner láser móvil MLS (por su sigla en inglés) y el escáner láser terrestre TLS (por su sigla en inglés), permiten realizar ensayos no destructivos para dar información como ubicación, humedad, patología y deformación [26], [36]. Estas técnicas se utilizan especialmente para medir deflexiones en vigas de puentes bajo carga estática, evaluar la funcionalidad de los puentes de acuerdo con el programa National Bridge Inventory (NBI), cuantificar daños superficiales como pérdida de masa y formación de escamas [5]. En ese sentido, el Intelligent Pavement Assessment Vehicle no solo cumple estos procesos, sino que también permite la medición de deformaciones [26], [30], [35].

De manera complementaria, el IoT se emplea en sistemas de gestión de pavimentos PMS (por su sigla en inglés) para recopilar datos sobre el estado de la superficie de la carretera, así como el machine learning basado en algoritmos contribuye a detectar, localizar y clasificar los tipos de fallos [26], [36].

La planeación adecuada de las operaciones de mantenimiento y la periodicidad en las obras viales son fundamentales. Se basan en la integración de sistemas BMS (Building Management System) y DSS (Decision Support System) correlacionados para optimizar la eficiencia operativa y la toma de decisiones estratégicas. El BMS, que supervisa y controla diversos sistemas de infraestructura como la evaluación estructural, las patologías y la vulnerabilidad del material, proporciona datos sobre el estado y rendimiento de la infraestructura vial. Estos datos, a su vez, alimentan al DSS, que los procesa y analiza para ofrecer recomendaciones y predicciones. Los datos evaluados por el BMS se importan al software, generando tanto una visualización digital como un informe impreso [4], [5], [37], [55].

Los criterios empleados en la evaluación del desempeño se enfocan en cada alternativa, según el objetivo planteado. [5] se basó en tres pautas fundamentales: la funcionalidad, que abarca la eficiencia operativa y el nivel de mantenimiento requerido; la sostenibilidad, que se refiere a la duración del servicio a un costo razonable, y la confiabilidad, que implica el cumplimiento estructural conforme a la normativa vigente. En este contexto, se pueden crear indicadores que otorguen atención a los elementos con mayor importancia estructural y vulnerabilidad.

En la etapa de rehabilitación de una carretera la metodología BIM permite optimizar el proceso recopilando previamente la información necesaria, lo que facilita la ampliación o modificación de la vía [37]. En estos casos, es común que se deban demoler ciertos elementos que interfieren con el nuevo diseño, lo cual se gestiona eficientemente mediante un modelo 3D del entorno, que proporciona detalles precisos sobre la cantidad de material que se va a remover. En muchos casos, la renovación de la vía se presenta como una alternativa más eficaz que la reconstrucción completa, resultando posiblemente más económica y sencilla. Por otra parte, las reparaciones

o ajustes en los métodos de monitoreo se llevan a cabo con mayor facilidad, ya que el modelo BIM se puede actualizar con la información obtenida [4], [7], [37].

En Estados Unidos más del 40 % de las carreteras se encuentran en estado deficiente, con una calificación general de C, lo cual indica una condición mediocre que requiere atención urgente y una inversión de 2.588 billones de dólares para reparar los pavimentos. Este deterioro ha llevado a un gasto anual de 130 millones de dólares en la reparación de vehículos, debido a las malas condiciones de las vías [25], [35]. Según [7], la implementación de sistemas avanzados para la gestión de infraestructuras puede ofrecer una solución económica. El costo estimado para integrar un sistema que incluye hardware es notablemente bajo, menos de un centavo por metro cuadrado de la red vial total, lo cual es aproximadamente 150 veces menor que el costo de un tratamiento superficial sencillo.

6. Estudio del BIM en Colombia

En los países desarrollados, el avance en la implementación del BIM es notable, lo que refleja un alto grado de adopción y desarrollo de esta tecnología en diversas áreas, incluyendo la infraestructura vial. Estas naciones no solo han integrado BIM de manera efectiva en sus procesos constructivos, sino que también han impulsado la innovación y la investigación en esta área, estableciendo estándares que están siendo adoptados globalmente.

A continuación, se presentan los países que para 2024 se destacan como líderes en la adopción de BIM y aquellos que sobresalen por su investigación y desarrollo en la aplicación de BIM en proyectos de infraestructura vial [56], [57].

Tabla 3. Países líderes en BIM.

Implementación	Investigación	
Estados unidos	Estados unidos	22,8 %
Reino Unido	Finlandia	20,0 %
Francia	Reino unido	17,1 %
Alemania	Australia	11,4 %
Región escandinava	Noruega	8,5 %
Rusia	Brasil	8,5 %
Finlandia	Croacia	2,8 %
Australia	Dinamarca	2,8 %
Canadá	Emiratos Árabes	2,8 %

Un estudio de caso realizado por Shedwi en Canadá comparó la metodología tradicional con BIM en el proyecto del Puente Samuel-De Champlain. El estudio examinó las alternativas propuestas por el gobierno durante la fase de diseño, enfocándose en la comparación de costos y la estimación de tiempos entre ambas metodologías. Este puente, que enfrentaba serios problemas de congestión, requería la ampliación de sus vías. En el estudio se planteó un escenario en el que surgió un conflicto entre dos columnas durante la etapa de planificación. Con la metodología tradicional, corregir este error implicaría un sobre costo de \$1,422,358 y un retraso de 22 días. Por su parte, con el sistema BIM, la detección y corrección del error se realizaría de manera automática, sin generar sobre costos ni retrasos en el proyecto. [22]

En Estados Unidos, [8] y [10] muestra el viaducto Alaskan Way como un ejemplo destacado de la implementación exitosa de BIM. Esta vía, que conecta el norte y el sur de Seattle, sufrió daños significativos tras un terremoto de magnitud 7 en 2001, cuyo epicentro se localizó a 50 kilómetros de la ciudad. Esto impulsó a la Administración Federal de Carreteras a buscar soluciones para su remplazo y restaurar la movilidad en la zona, por lo que contrató a la

empresa de ingeniería Parson Brinckerhoff para desarrollar alternativas basadas en la metodología BIM, asegurando el cumplimiento de los más altos estándares de seguridad y estética.

El proyecto incluyó mesas de trabajo multidisciplinarias y el uso de diversas herramientas tecnológicas. AutoCAD Civil 3D se empleó para el diseño de servicios subterráneos, terraplenes y otras estructuras, así como para generar listas de materiales y dibujos del modelo de infraestructura. Revit se utilizó para diseñar elementos arquitectónicos, como estructuras de ventilación, mientras que 3Ds Max facilitó los estudios de alumbrado, sombras y visibilidad. La creación de un modelo federado en Navisworks permitió una toma de decisiones más eficiente y colaborativa.

Finalmente, se determinó que la construcción de un túnel era la opción más viable, mejorando significativamente la movilidad, el confort y la estética de Seattle. En términos de gestión, se destacaron la rapidez en la creación de soluciones, la mejora en la comunicación y la toma de decisiones, así como la precisión en la estimación presupuestal.

BIM no se ha limitado a los países desarrollados. En Latinoamérica, la infraestructura vial tradicionalmente se ha basado en obras públicas. Sin embargo, la adopción de esta metodología ha avanzado significativamente gracias a iniciativas gubernamentales que han establecido guías de uso específicas para cada país. En la tabla 4 se presentan los planes nacionales de las instituciones públicas de cada país y su duración.

Tabla 4. Planes nacionales de algunos países latinoamericanos.

País	Iniciativa BIM
Brasil	Comité de Gestión BIM (CG-BIM)
Chile	Planbim
Colombia	Grupo de Trabajo BIM
México	Unidad de Inversiones (UI)

Según la consultora McKinsey, el retraso en la productividad de la construcción le cuesta a la economía de América Latina y el Caribe (ALC) cerca de 50.000 millones de dólares al año. De acuerdo con la información proporcionada en [59], Chile, Brasil, México y Colombia se destacan como los principales pioneros en la adopción de BIM en América Latina. Cuya implementación ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia y reducir los costos en proyectos de construcción, lo que podría ayudar a mitigar las pérdidas económicas mencionadas [20].

En 2018, Brasil estableció el Comité de Gestión BIM, liderado por el Ministerio de Economía, para coordinar y estandarizar el uso de BIM en el sector público, incluyendo requisitos para adquisiciones gubernamentales y la creación de documentos técnicos. Para 2023 se habían desarrollado cinco proyectos piloto en diversas fases del ciclo de vida, con el propósito de mejorar continuamente las prácticas en infraestructura.

La estrategia nacional para el periodo 2017-2028 se centra en varios objetivos claves: aumentar la productividad de las empresas en 10 %, reducir los costos un 9,7 %, incrementar la adopción de BIM hasta alcanzar un aumento de diez veces en relación con el porcentaje del PIB de la construcción civil, y aumentar el PIB del sector de la construcción civil un 28,9 %. [58]

Desde 2018, el BIM Task Group México ha liderado la creación de comisiones dedicadas

a impulsar políticas públicas, establecer normatividad y estándares, actualizar los currículos académicos, transformar el sector empresarial y difundir los beneficios de la metodología BIM en el país. Este esfuerzo ha sido respaldado estratégicamente por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), a través de la Unidad de Inversiones (UI) y la Oficialía Mayor.

A pesar de que hasta 2023 no se había formalizado un mandato estatal para el uso de BIM, varias instituciones del sector público han adoptado esta metodología de manera voluntaria. Por su parte, el sector privado también ha implementado BIM en proyectos gubernamentales por iniciativa propia, demostrando su compromiso con la innovación y la eficiencia en la gestión de proyectos.

En el ámbito del gobierno local, destaca la formación de la Alianza de Nuevo León, un consorcio público-privado que busca implementar BIM en las obras públicas y privadas en dicho estado. Como parte de esta iniciativa, se espera el próximo lanzamiento de la Guía para licitaciones de obra pública en BIM, un documento que servirá de apoyo a las dependencias gubernamentales en la adopción de esta metodología, con el fin de generar infraestructura sostenible y mejorar la calidad de vida en las ciudades. [58]

En 2015, la Cámara Chilena de la Construcción (CChC), a través de la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), fundó el BIM Fórum Chile. Ese mismo año, Corfo, la agencia del Ministerio de Economía (Minecon), comenzó a promover el uso de BIM en el sector público, con el objetivo de mejorar la productividad en la industria de la construcción. Para alcanzar este objetivo, se lanzó la Iniciativa Planbim, que lidera la implementación estandarizada y transversal de BIM en el sector.

En 2016, se formalizó un convenio de colaboración entre siete entidades públicas y privadas, estableciendo dos metas principales: para 2020, exigir el uso de BIM en proyectos públicos, y para 2025, integrar BIM en los procesos de solicitud de permisos de edificación a través de la plataforma DOM en línea del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU).

Como resultado de los esfuerzos de Planbim, en 2019 se publicó el Estándar BIM para Proyectos Públicos y en 2022 se desarrolló la Matriz de Implementación BIM (Mibim) para evaluar el nivel de madurez BIM en las organizaciones. Los avances continuaron con la estandarización de las bases de licitación, la capacitación en metodología BIM, el seguimiento de proyectos piloto y el desarrollo de plataformas tecnológicas, como la Plataforma Automatizada de Revisión de Proyectos (PARPro), entre otras iniciativas. [58]

Entre 2018 y 2021 la adopción de la metodología BIM en Colombia creció solo un 11 %, lo que refleja un avance moderado en comparación con otros países [11]. La implementación de BIM en el país enfrenta varios desafíos, como la lentitud en la documentación, que se ve afectada por la falta de alineación con la normativa local, como se ha observado en proyectos como el Metro de Bogotá [4]. Además, el alto costo de los softwares necesarios para BIM presenta una barrera significativa, especialmente en un contexto económico en el que la moneda local no está a la par con el dólar [11]. Aunque se reconoce que BIM puede ser una herramienta eficaz para reducir la corrupción en la contratación de obras de infraestructura, un área en la que Colombia ocupa el puesto 99 entre 181 países, según Transparency International [23], su adopción sigue siendo limitada.

A pesar de estos desafíos, el gobierno colombiano ha establecido una estrategia nacional BIM para 2020-2026, cuyos porcentajes de adopción se detallan en la tabla 5. La estrategia tiene como objetivo

lograr una integración completa de BIM en los proyectos gubernamentales para 2026 [11] y busca un ahorro de costos de, al menos, el 10 % en promedio en proyectos de infraestructura pública desarrollados con esta tecnología.

Tabla 5. Porcentajes esperados del Plan BIM Colombia

% de implementación de BIM en proyectos de orden nacional en el PLAN BIM 2020-2026			
2023	2024	2025	2026
10-25 %	35-50 %	60-75 %	85-100 %

Para alcanzar las metas de implementación, la Estrategia BIM 2020-2026 define los ejes fundamentales y las acciones que se deben ejecutar a corto, mediano y largo plazo. Estos ejes son comunicación, liderazgo público, desarrollo de capacidades y marco colaborativo.

La Gobernanza BIM en Colombia es una estructura organizativa diseñada para promover e integrar la adopción de BIM en todo el país. Está supervisada por la Presidencia, la Vicepresidencia y el Departamento Nacional de Planeación; además, cuenta con el apoyo del Grupo de Trabajo BIM, el Ministerio de Vivienda, el Ministerio de Transporte y la Unidad de Planeación de Infraestructura. Estos entes colaboran para optimizar los procesos de construcción y la gestión de infraestructura mediante el uso de tecnologías BIM. [58]

Las entidades responsables de promover la adopción de BIM en Colombia establecen un modelo de triple hélice, que involucra la colaboración entre los sectores público, privado y académico, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Entidades responsables de la adopción de BIM.

Entidades públicas	Entidades privadas	Entidades de la academia
DNP	Amarilo	Colegio Mayor de Cundinamarca
FDN	Arpro	Pontificia Universidad Javeriana
Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Aspiros	Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Ministerio de Transporte	Camacol	Universidad de los Andes
UPIT	Cámara Colombiana de la Infraestructura	Universidad del Valle
ANI	Cemex	Universidad Industrial de Santander
EDU	Colegio de Arquitectos	Universidad Nacional
IDU	Construcciones Planificadas	
Invías	Constructora AR	
	Constructora Bolívar	

Estas alianzas han logrado algunos avances notables, como el premio Excelencia BIM Colombia que se otorgó al diseño de la doble calzada Avenida 34 en Medellín [23] y el ahorro del 5 % en la fase de construcción del metro de Bogotá gracias a la implementación BIM [10]. Sin embargo, a pesar de estos, Colombia aún ocupa el puesto 109 entre 137 países en calidad de infraestructura, según el Índice Global de Competitividad, lo que subraya la necesidad de seguir avanzando en la implementación de BIM para mejorar la infraestructura nacional [2].

La idea del metro de Bogotá se originó en 1942, durante la alcaldía de Carlos Sanz. Sin embargo, sólo hasta 2016 se autorizó la

creación de la Empresa Metro de Bogotá. Ese mismo año se determinó la mejor alternativa para el primer tramo de la primera línea del metro de Bogotá (PLMB-T1) a través de un estudio realizado por la firma Systra. En 2018 se aprobó el modelo transaccional recomendado por la Financiera de Desarrollo Nacional (FDN) para la PLMB-T1. El grupo de contratistas seleccionado para su construcción incluye a China Harbour Engineering Company Limited (CHEC) y Xi'An Rail Transportation Group Company Limited [60].

En el estudio de prefactibilidad se identificó la importancia de usar una nomenclatura estandarizada entre Navisworks, Civil 3D y Revit para evitar problemas de interferencias. Se debe georreferenciar el modelo en coordenadas Magna Sirgas para integrarlo correctamente con la primera línea del metro. Aunque el entorno urbano se modeló satelitalmente con Infracore, fue necesario un levantamiento topográfico para la factibilidad. Además, se recomendó separar los modelos por tramos y modelar la señalización con un LOD mínimo de 200. En las intersecciones con la PLMB, se requiere coordinación BIM para evitar interferencias. [61].

En los avances BIM de obras de 2023, se destacan varias actividades claves. En la primera línea se realizó la entrega parcial de modelos e información correspondientes al 100 % del proyecto, y se verificó el avance en los modelos de construcción en la fase de planeación, especialmente en el patio taller y el deprimido de la Calle 72, con un seguimiento y entregas quincenales. Además, se entregaron modelos as-built del patio taller y se llevó a cabo una armonización BIM en la intersección de la Av. 68 y la Av. 1.º de Mayo con el contratista MHC responsable de la ejecución de la Troncal 68. También se actualizó el BEP en su capítulo 2, correspondiente a la fase de construcción.

Por otra parte, en avances de la segunda línea metro de Bogotá (L2MB) se entregaron los modelos correspondientes a la etapa

de factibilidad y se revisaron para detectar posibles interferencias con el proyecto PLMB. Así mismo, se solicitó la armonización BIM en el sector de la calle 72, debido a un punto de convergencia entre PLMB y L2MB. En este contexto, se propone vincular el modelo del sector calle 72 (que incluye la estación 16, edificios de acceso, viaducto, deprimido y estación de bombeo) con la información entregada y compartida por parte de Empresa Metro de Bogotá, EMB [62].

Para marzo de 2024, las obras han alcanzado un avance del 30,86 %, que se desglosa en tres componentes: traslado anticipado de redes, realizado por el Distrito, que está 100 % completo; gestión predial, también a cargo del Distrito, que incluye la adquisición de 1.429 predios y está 98,88 % completa, y el contrato de concesión, que avanza al 21,51 %, según explicó el alcalde de la ciudad. De acuerdo con el cronograma, los trenes comenzarán a operar comercialmente en 2028 [60].

7. Ventajas y desventajas

Entre las ventajas en la aplicación de la metodología BIM en la infraestructura vial están las siguientes:

- La creación de un modelo 3D simplifica la presentación y visualización de planos individuales, contribuye a una mejor detección de conflictos, una mayor exactitud en la asignación de recursos y un manejo de la documentación más organizado. [11], [46]. Además, garantiza una reducción en costos y tiempos, lo que se traduce en un mayor rendimiento y un incremento en la rentabilidad [11], [46].
- Al implementar esta metodología, las empresas pueden añadir valor a sus proyectos mediante recorridos virtuales, los cuales permiten evaluar aspectos claves como seguridad, estética y confort de la infraestructura [44] y promover una mayor colaboración y comunicación entre los actores del proyecto. Esto se

logra mediante un modelo federado que proporciona información inmediata sobre costos, materiales, documentación, medidas, ensayos, estudios, detalles y planos, entre otros aspectos [11], [13].

- Durante la etapa de operación y mantenimiento mejora el control de los activos mediante tecnologías complementarias como IoT y Machine Learning [25], [39].

No obstante, la adopción de BIM presenta algunas desventajas que deben considerarse antes de su aplicación:

- Las nubes de puntos obtenidas a partir de escáneres o fotogrametrías no ofrecen una precisión muy alta, por lo que el levantamiento topográfico tradicional sigue siendo el preferido [34].
- La adopción de BIM implica un alto costo inicial, debido a la inversión en software, hardware y tecnologías complementarias. Además, requiere profesionales, que son escasos en el país y enfrentan un proceso de aprendizaje lento [2], [23], [40], [42].
- El modelado de infraestructura vial puede verse afectado por las formas irregulares de las carreteras en comparación con la sección transversal y la diversificación de la tipología de elementos como señalización o barandillas de seguridad, lo cual ha provocado retrasos en su aplicación [13], [24], [26], [54].
- La lenta adopción del BIM en el ámbito de las carreteras se debe a la falta de estandarización en los modelos y archivos de salida [4], [35], [49], [52].
- En cuanto a la infraestructura vial, el volumen de datos suele ser considerablemente mayor en comparación con las obras verticales. Esta magnitud de información frecuentemente resulta en tamaños de archivo extensos, que superan las

capacidades del hardware disponible para su gestión efectiva [4], [13], [38].

- En comparación con las edificaciones que suelen tener una vida útil superior a 50 años, los pavimentos flexibles o rígidos tienen una vida útil de 10 a 30 años. Esto puede hacer que los costos de implementación no se justifiquen para muchas empresas durante la operación [26].
- Algunos gobiernos establecen como barrera la falta de apoyo gubernamental, requisitos BIM y poca concienciación, falta de estándares y costos BIM. [9].

Aunque BIM presenta numerosos beneficios, como la reducción de costos y tiempos además de la mejora en la gestión de información, es necesario considerar la inversión inicial en software y capacitación, así como la adaptación a nuevas tecnologías y procesos; sin embargo, con una planificación adecuada y un enfoque estratégico, estas limitaciones pueden superarse, permitiendo que los proyectos de infraestructura vial aprovechen plenamente las ventajas que ofrece BIM.

8. Conclusiones

El uso de la metodología BIM en la infraestructura vial ha experimentado un crecimiento notable en los últimos años, destacándose por su capacidad para mejorar la eficiencia y transparencia en los proyectos. BIM facilita una gestión eficaz de la información durante el ciclo de vida de un proyecto. No obstante, para maximizar los beneficios de BIM es fundamental desarrollar un formato de intercambio neutral y un esquema estándar que promueva la interoperabilidad entre distintas disciplinas y herramientas de software.

Además, la academia puede contribuir con investigaciones y desarrollos innovadores, mientras que la industria ofrece casos prácticos y retroalimentación sobre la implementación de estas tecnologías, creando una sinergia esencial para impulsar la adopción de BIM y resolver problemas prácticos en el campo.

Referencias bibliográficas

1. V. de P. Dirección de Estudios Económicos, «Boletín Sectorial, 2024, un año de grandes inversiones en infraestructura de transporte», 2024, Accedido: 25 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: Informe-sectorial-No.6-Infraestructura-Transporte_0.pdf (findeter.gov.co).
2. D. Gómez-Parra y F. Sabogal-Tique, «Elaborar una guía de modelación para la implementación de la metodología BIM en la infraestructura vial en corredores viales tipo IDU de la localidad de Usaquén, Bogotá D.C.», Universidad Católica de Colombia, 2022, Accedido: 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/282cc784-7c91-4780-b71f-74a6db8d2342>.
3. S. Biancardo, N. Viscione, A. Cerbone, e I. Dessì Jr, «BIM-based design for road infrastructure: a critical focus on modeling guardrails and retaining walls», *Infrastructures (Basel)*, 2020, doi: 10.3390/infrastructures5070059.
4. A. Costin, A. Adibfar, H. Hu, y S. S. Chen, «Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations», *Autom Constr*, vol. 94, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.07.001.
5. M. Mohammadi, M. Rashidi, Y. Yu, y B. Samali, «Integration of TLS-derived Bridge Information Modeling (BrIM) with a Decision Support System (DSS) for digital twinning and asset management of bridge», *Elsevier*, 2023, Accedido: 4 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361523000313>.
6. L. Barazzetti, M. Previtali, y M. Scaioni, «Roads Detection and Parametrization in Integrated BIM-GIS Using LiDAR», *Infrastructures (Basel)*, vol. 5, n.o 7, 2020, doi: 10.3390/infrastructures5070055.
7. C. Oreto, L. Massotti, S. Antonio Biancardo, R. Veropalumbo, N. Viscione, y F. Russo, «BIM-Based Pavement Management Tool for Scheduling Urban Road Maintenance», *Infrastructures (Basel)*, 2021, doi: 10.3390/infrastructures6110148.
8. C. Aroca-Perdomo, «Implementación de metodología BIM en la estructuración de proyectos viales de tercer orden en el municipio de Baraya, Huila», Universidad Católica de Colombia, 2021, Accedido: 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/26716>.
9. M. Abuaddous, J. A. A. Al-Btoosh, M. A. K. A. Al-Btoush, y A. J. Alkherret, «Building information modeling strategy in mitigating variation orders in roads projects», *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 6, n.o 10, 2020, doi: 10.28991/cej-2020-03091596.
10. D. Limas Mendigaño, «Metodología Bim aplicada a la fase de prefactibilidad de un proyecto vial de tercer orden en Colombia», Universidad Santo Tomás, 2019.
11. R. L. Álvarez Vanegas y B. A. López Moreno, «Estado del arte del Building Information Modeling “BIM” en la construcción y los beneficios de su aplicación en los proyectos de infraestructura vial en Colombia.», Universidad Francisco José de Caldas, 2022, Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/29780>.

12. P. Castellanos, «Metodología BIM, retos para el sector constructor en Colombia», en obra. Accedido: 25 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.en-obra.com/es/noticias/metodologia-bim-lo-que-viene-para-el-sector-constructor-en-colombia>.
13. D. Šimenić, «Building Information Modeling (BIM) For Road Infrastructure: TEM Requirements and Recommendations», National Academics, 2021, Accedido: 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://trid.trb.org/View/1862688>.
14. C. Vera Galindo, «Aplicación de la metodología BIM a un proyecto de construcción de un corredor de transporte para un complejo industrial. Modelo BIM 5D Costes», Universidad De Sevilla, 2018.
15. J. R. Solorio Murillo, A. Sánchez Olguín, y J. F. Mendoza Sánchez, «Aspectos de la aplicación de BIM en proyectos de infraestructura vial», AMAAC, 2023, Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://memorias.amaac.mx/plugin-file.php/189/mod_resource/content/1/Art.%20Solorio%20et%20al.%20-%20Aspectos%20de%20BIM_compressed.pdf.
16. D. Pleyer y D. Zettler, «Dimensiones BIM en la práctica: de 3D a 10D», 3Dfindit. Accedido: 25 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dfindit.com/es/engiclopedia/bim-dimensiones>.
17. F. Lozano, J. C. Jurado, J. A. Lozano-Galant, A. de la Fuente, y J. Turmo, «Integration of BIM and Value Model for Sustainability Assessment for application in bridge projects», 2023. doi: 10.1016/j.autcon.2023.104935.
18. A. Justo, M. Soilán, A. Sánchez-Rodríguez, y B. Riveiro, «Scan-to-BIM for the infrastructure domain: Generation of IFC-complaint models of road infrastructure assets and semantics using 3D point cloud data», Autom Constr, vol. 127, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103703.
19. BIM Forum Colombia y Camacol, «Guías para la adopción BIM en las organizaciones», 2023.
20. A. V. Acero Vaca, «Estado del arte de la metodología BIM en la infraestructura de Colombia», Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021, Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/28736>.
21. Construdata, «Colombia es líder en la implementación de la metodología BIM», Construdata. Accedido: 25 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://construdata.com/noticias/colombia-es-li-der-en-implementacion-de-la-metodologia-bim-3934#:~:text=Este%20a%C3%B1o%2C%20la%20C%C3%A1mara%20Colombiana,BIM%20dentro%20de%20sus%20procesos>.
22. R. Shetwi, «Application of Building Information Modelling in a Large-Scale Transportation Infrastructure Project: a Case Study of New Champlain Bridge», Ecole polytechnique de Montreal, 2016, Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/213620191.pdf>.
23. J. G. Carreño, «Guía de lineamientos para la implementación de la metodología BIM (Building Information Modelling/ Management) aplicable en el desarrollo de infraestructura longitudinal de modalidades Asociación Público Privada-APP y Obra pública en Colombia», Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2020, Accedido: 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1668>

24. J. J. Cepa, R. M. Pavón, M. G. Alberti, y P. Caramés, «Towards BIM-GIS Integration for Road Intelligent Management System», *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 29, n.o 7, 2023, doi: 10.3846/jcem.2023.19514.
25. Á. M. Bazán, M. G. Alberti, A. A. Álvarez, y J. A. Trigueros, «New perspectives for bim usage in transportation infrastructure projects», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, n.o 20, 2020, doi: 10.3390/app10207072.
26. P. González, C. del Val, V. Jáuregui, y C. Gonzales, «Modelos de información de pavimentos (PIM): revisión de la metodología BIM aplicada a carreteras», *EuroBIM 2023*, 2023, Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9187291>.
27. L. Bello, «Impiego del BIM per la progettazione stradale in ambito urbano: il caso della Goccia di Bovisa», *Politecnico Di Milano*, 2022, Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/208661>.
28. Seys, «Evolución de BIM 360 a Autodesk Construction Cloud», *Seys*. Accedido: 25 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://seystic.com/evolucion-de-bim-360-a-autodesk-construction-cloud-la-revolucion-en-la-gestion-de-proyectos-de-construccion/#:~:text=An%C3%A1lisis%20de%20datos%20avanzado%3A%20Mientras,decisiones%20informadas%20basadas%20en%20datos>.
29. K. Rajendrakumar Patel, «Life cycle thinking-based evaluation framework for road infrastructure: A BIM-based approach», *University of Windsor*, 2020, Accedido: 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://search.proquest.com/openview/4158914cf651915d1b829605a3e55edc/1?pq-origsite=scholar&cbl=18750&diss=y>.
30. F. D'Amico et al., «A possible implementation of non-destructive data surveys in the definition of BIM models for the analysis of road assets», en *Transportation Research Procedia*, 2023. doi: 10.1016/j.trpro.2023.02.161.
31. M. Domínguez Sánchez, L. M. Segura Villegas, y H. S. Delgado Ortega, «Optimización de costos y tiempos mediante metodología BIM y drones en carreteras: una revisión de la literatura científica de los últimos 10 años», *Universidad Privada del Norte*, 2021, Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/26034>.
32. S. Sulistyowati y I. Handayani, «Implementation of Building Information Modelling (BIM) For Road Infrastructure in the Design Phase», *Teknika*, n.o 1, pp. 68-76, 2023, doi: 10.26623/teknika.v18i1.5601.
33. J. J. Cepa, R. M. Pavón, M. G. Alberti, A. Ciccone, y D. Asprone, «A Review on the Implementation of the BIM Methodology in the Operation Maintenance and Transport Infrastructure», *mdpi.com* JJ Cepa, RM Pavón, MG Alberti, A Ciccone, D Asprone *Applied Sciences*, 2023. *mdpi.com*, 2023, doi: 10.3390/app13053176.
34. E. Sabato, F. D'Amico, A. Tripodi, y P. Tiberi, «BIM & Road safety - Applications of digital models from in-built safety evaluations to asset management», en *Transportation Research Procedia*, 2023. doi: 10.1016/j.trpro.2023.02.240.
35. E. Belcher y Y. Abraham, «Lifecycle Applications of Building Information Modeling for Transportation Infrastructure Projects», *Buildings*, 2023, doi: 10.3390/buildings13092300.

36. X. Yang, J. Zhang, W. Liu, J. Jing, y H. Zheng, «Automation in road distress detection, diagnosis and treatment», Elsevier, 2024, Accedido: 22 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2097049824000064>.
37. S. P. Muñoz Pérez y J. R. Llamo Cubas, «Revisión sistemática de la implementación BIM basada en modelos de diseño para la construcción de obras viales», Cuaderno activa, vol. 14, n.o 1, 2022, doi: 10.53995/20278101.1053.
38. A. Pirdavani, S. Muzyka, V. Vandervoort, y S. Van Hoyer, «Application of building information modeling (BIM) for transportation infrastructure: a scoping review», en Transportation Research Procedia, 2023. doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.898.
39. A. Taheri y J. Sobanjo, «Civil Integrated Management (CIM) for Advanced Level Applications to Transportation Infrastructure: A State-of-the-Art Review», Infrastructures (Basel), 2024, doi: 10.3390/infrastructures9060090.
40. R. Duan, «Research on Information Management of Traffic Highway Construction Safety Based on BIM Technology», en IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/638/1/012119.
41. I. G. Khalil, A. Mohamed, y Z. Smail, «Building Information Modeling for rural road design: A case study», en Proceedings - 16th International Conference on Electronics Computer and Computation (ICECCO) , 2021. doi: 10.1109/ICECCO53203.2021.9663761.
42. M. M. Rodríguez, «Implementación de un modelo CIM (Civil Information Modeling) en la gestión del ciclo de vida de estabilidad de taludes en un proyecto de infraestructura vial en Colombia», Universidad Javeriana, 2022, Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/64137>.
43. M. Aranguri, A. Paolo, F. Culquicondor, y M. Ling, «Implementación de la tecnología BIM 5D y 6D en la especialidad de estructuras en el proyecto mejoramiento de la Av. César Vallejo-Trujillo, Trujillo, La Libertad», Universidad Privada Antenor Orrego, 2023, Accedido: 4 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/11153>.
44. H. Jallow, S. Renukappa, S. Suresh, y A. Alneyadi, «Building Information Modelling in Transport Infrastructure Sector», International Experts for Research Enrichment and Knowledge Exchange (IEREK), Cairo, Egypt, pp. 100-107, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-48465-1_12.
45. E. Belcher, Y. A.- Buildings, y undefined 2023, «Lifecycle Applications of Building Information Modeling for Transportation Infrastructure Projects», mdpi.com EJ Belcher, YS AbrahamBuildings, 2023•mdpi.com, 2023, doi: 10.3390/buildings13092300.
46. R. Kazaryan, E. Tregubova, y N. Galaeva, «Aspects of assessment of the efficiency of using information modeling technology for transport infrastructure by BIM-modeling», Elsevier, 2022, Accedido: 4 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146522005841>.

47. A. Zevallos, H. Yangali, y B. Eliel, «Diseño geométrico de las vías urbanas usando la metodología BIM en la Asoc. Lúculo, Distrito de Ate-Lima, 2020», Universidad César Vallejo, 2020, Accedido: 22 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60479>.
48. M. Zheleznov, L. Adamtsevich, P. Vorobiev, y A. Rybakova, «Analysis of building information modeling technologies for transport infrastructure objects at the stages of the life cycle», EDP SCIENCES, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202126305030.
49. J. J. Cepa, R. M. Pavón, M. G. Alberti, A. Ciccone, y D. Asprone, «A Review on the Implementation of the BIM Methodology in the Operation Maintenance and Transport Infrastructure», Applied Sciences, 2023, doi: 10.3390/app13053176.
50. C. Oreto et al., «BIM-LCA integration framework for sustainable road pavement maintenance practices», Witpress, vol. 6, n.o 1, pp. 1-11, 2022, doi: 10.2495/TDI-V6-N1-1-11.
51. F. D'Amico, A. Calvi, E. Schiattarella, M. Di Prete, y V. Veraldi, «BIM and GIS Data Integration: A Novel Approach of Technical/Environmental Decision-Making Process in Transport Infrastructure Design», en Transportation Research Procedia, 2020. doi: 10.1016/j.trpro.2020.02.090.
52. M. G. P. García, «Aplicación de la metodología Building Information Modeling (BIM) en el diseño de una glorieta en la carretera CV-310 PK 15+ 750 en la provincia de Valencia», Universitat politècnica de valencia, 2019, Accedido: 4 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/130864>.
53. H. Angie, «Estudio comparativo entre las metodologías convencional y BiM 4D en la optimización del tiempo programado para la ejecución de una obra de infraestructura vial en etapa de diseño, Arequipa 2021», Universidad Católica de Santa María, 2022, Accedido: 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/c9dbea93-767e-4221-945a-a608875e6913>.
54. N. Brenes Moya, «Implementación de la Metodología BIM en el diseño de proyectos de infraestructura vial de la Organización INTRA Consultores», Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020.
55. C. Oreto, S. A. Biancardo, N. Viscione, R. Veropalumbo, y F. Russo, «Road pavement information modeling through maintenance scenario evaluation», Wiley Online LibraryC Oreto, SA Biancardo, N Viscione, R Veropalumbo, F RussoJournal of Advanced Transportation, 2021•Wiley Online Library, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/8823117.
56. O. Nielsen, G. M. Jr, A. F. Filho, y PC Pellanda, «A Review of Global Efforts in BIM Adoption for Road Infrastructure», Infrastructures (Basel), ago. 2024, Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2412-3811/9/8/126>.
57. Chudasama, «Which Countries Lead the Global Adoption of BIM?» Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://caddraftingservices.in/blog/leading-countries-in-global-bim-adoption/>.
58. Red BIM de gobiernos latinoamericanos, «Estrategias BIM de los países miembros de la Red BIM de Gobiernos Latinoamericanos – BIM». Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://redbimgoblatam.com/2023/12/15/documento-estrategias-bim-de-los-paises-miembros-de-la-red-bim-de-gobiernos-latinoamericanos/>.

59. ESE, «Situación BIM en América Latina en 2023». Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://estudioese.com.uy/situacion-bim-en-america-latina-en-2023-7?nid=61>.
60. Metro Bogotá, «Historia | Metro de Bogotá». Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.metrodebogota.gov.co/historia>
61. Metro de Bogotá y Financiera de Desarrollo Nacional, «Realizar la estructuración integral del proyecto línea 2 del metro de Bogotá, incluyendo los componentes legal, de riesgos, técnico y financiero», 2022, Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.metrodebogota.gov.co/sites/default/files/proyecto/L2MB-ET1A-L00-IFU-A-0001_RG.pdf.
62. Inconet FIIC, «Implementación BIM en la construcción del metro de Bogotá». Accedido: 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=ZhzykBs4mB>.