
Simulación Logística Aplicada al Ferrocarril de Carga: Tendencias Internacionales, Vacíos de Investigación y Perspectivas para Panamá

Logistics Simulation Applied to Freight Rail: International Trends, Research Gaps, and Perspectives for Panamá

Ana Velasco-Jaén

Universidad de Panamá, Facultad de Administración de Empresas y Contabilidad, Panamá

ana-l.velasco@up.ac.pa

<https://orcid.org/0000-0002-9039-4095>

Josué M. González C.

Universidad de Panamá, Facultad de Economía, Panamá

josue-m.gonzalez-c@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0004-1327-5713>

Recibido: 9/2/2026 Aceptado: 10/5/2026

DOI <https://doi.org/10.48204/reicit.v6n1.10111>

RESUMEN

El ferrocarril de carga es un componente estratégico para la competitividad logística y la sostenibilidad ambiental; sin embargo, su participación modal sigue siendo limitada y la investigación sobre simulación logística aplicada a este modo en contextos latinoamericanos permanece fragmentada. Este artículo presenta una revisión bibliográfica narrativa con criterios sistemáticos de selección, con el objetivo de identificar tendencias internacionales en simulación logística ferroviaria, vacíos de investigación persistentes y proyecciones aplicables al caso de Panamá. Se consultaron ocho bases de datos (Scopus, Web of Science, Google Scholar, Redalyc, SciELO, Dialnet, Latindex y LILACS), mediante búsquedas en español e inglés realizadas entre mayo y septiembre de 2025. A partir del cribado de 150 registros, se incluyeron 34 estudios que abordaran simulación, intermodalidad o gobernanza

ferroviaria de carga, excluyendo literatura centrada exclusivamente en transporte de pasajeros. El análisis temático identificó 4 grupos: modelación operativa (T1), optimización de red (T2), integración intermodal (T3) y digitalización inteligente (T4), que convergen en 3 principios transversales: coordinación institucional, madurez digital e intermodalidad. Se identificaron vacíos en el costo total de propiedad (TCO), la última milla intermodal y la simulación adaptativa en línea. Se concluye que la competitividad del ferrocarril de carga depende de la articulación sistémica entre simulación, intermodalidad y gobernanza. Para Panamá, los hallazgos sugieren la viabilidad de incorporar simulación por eventos discretos (SED) y evaluación multicriterio en el diseño del nodo Divisa, así como marcos de gobernanza colaborativa con indicadores compartidos, contribuyendo a una agenda de investigación sobre simulación adaptativa en economías emergentes.

PALABRAS CLAVE: simulación logística, ferrocarril de carga, resiliencia, intermodalidad, análisis multicriterio.

ABSTRACT

Freight rail is a strategic component for logistical competitiveness and environmental sustainability; however, its modal share remains limited. This article conducts a narrative review with systematic criteria on logistics simulation applied to freight rail, with the aim of identifying international trends, research gaps, and projections applicable to Panama. Scopus, Web of Science, Google Scholar, Redalyc, Scielo, Dialnet, Latindex and LILACS were consulted (searches between May and September 2025). After screening 150 records, 34 studies were included through thematic analysis and theoretical triangulation. The results are organized into four groups (T1: operational modeling; T2: network optimization; T3: intermodal integration; T4: smart digitization) and converge on three cross-cutting principles: institutional coordination, digital maturity, and intermodality. Gaps remain in total logistics cost (TCO), intermodal last mile, and online adaptive simulation. It is concluded that for Panama, it is recommended to develop a digital twin (DES) of the Divisa node, incorporate fuzzy AHP and TCO in the ex-ante evaluation, apply TOC in phases, and formalize collaborative governance with shared KPIs. It is proposed to institutionalize a railway simulation laboratory and strengthen academia-industry cooperation to accelerate operational learning and avoid the fragmentation observed in other contexts.

KEYWORDS: logistics simulation; freight rail; resilience; intermodality; multi-criteria analysis.

INTRODUCCIÓN

El ferrocarril de carga ha constituido históricamente un articulador estructural del desarrollo territorial: acorta distancias económicas, reduce fricciones logísticas y modula flujos de mercancías a escala regional y transfronteriza. Su efecto sobre la relación espacio-tiempo reconfiguró morfologías urbanas y dinámicas productivas, tal como documenta la historiografía ferroviaria y la geografía del transporte (Soria, 2015). Al mismo tiempo, la literatura técnica y de política pública coincide en subrayar las externalidades ambientales favorables del ferrocarril frente a la carretera (menores emisiones, mayor eficiencia energética, mejor uso del suelo), rasgos que lo posicionan como pilar de estrategias de sostenibilidad y competitividad (Lérida, 2015; Muñoz, 2016).

No obstante, este potencial coexiste con limitaciones estructurales persistentes. A escala global, la participación del ferrocarril de carga presenta importantes diferencias entre regiones. En Europa, y particularmente en España, su participación es considerablemente menor en comparación con el promedio del continente, situación que se explica por la coexistencia de barreras técnicas entre países, los costos asociados a la fragmentación operativa y una planificación históricamente orientada al transporte de pasajeros en lugar del de mercancías (Lérida, 2015; Muñoz, 2016).

En América Latina, los retos adoptan otras formas, caracterizadas por concesionamientos incompletos, rezagos regulatorios, vulnerabilidad ante disrupciones sociales y naturales, pero convergen en un resultado similar: baja participación modal y altos costos logísticos (Obando-Tulcán et al., 2024; Ospina, 2025; Paredes, 2019).

Frente a este escenario, la simulación logística ha ganado relevancia como instrumento para anticipar cuellos de botella, evaluar alternativas de diseño y ponderar compromisos entre costo, tiempo, resiliencia y sostenibilidad. Su integración con inteligencia artificial y metodologías de evaluación multicriterio ha ampliado su alcance desde el análisis operativo hasta la toma de decisiones estratégicas (Alcaide, 2024; Kogler & Maxera, 2025; Pulido et al., 2021). Asimismo, las agendas globales de descarbonización y de Total Cost of Ownership

(TCO) exigen incluir externalidades socioambientales en la valoración de alternativas modales y de red (Stavroulakis & Papadimitriou, 2022).

Sin embargo, a pesar del creciente volumen de publicaciones, la simulación logística aplicada específicamente al ferrocarril de carga en economías con baja madurez digital y sin datos operativos robustos permanece subdesarrollada (Johansson, 2021; Fernández, 1997). Las revisiones existentes tienden a fragmentarse entre enfoques técnicos y análisis institucionales, sin marcos que articulen ambas dimensiones para contextos latinoamericanos emergentes.

Este vacío es especialmente relevante para Panamá, donde las decisiones de diseño del sistema ferroviario deben tomarse ex-ante, sin experiencia operativa acumulada. En este contexto, el presente artículo se formula a partir de la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué tendencias metodológicas caracterizan la simulación logística aplicada al ferrocarril de carga en la literatura internacional, qué vacíos persisten, y qué proyecciones se derivan para el diseño del sistema ferroviario de Panamá? El objetivo es revisar críticamente esa literatura con el fin de identificar tendencias internacionales, vacíos de investigación y proyecciones estratégicas aplicables al caso panameño, contribuyendo a un marco analítico integrador que articule simulación, intermodalidad y gobernanza. El artículo se organiza en cinco secciones: materiales y métodos, resultados del análisis temático, discusión, conclusiones y referencias.

MÉTODO Y MATERIALES

Esta revisión adopta un diseño narrativo estructurado (Baethge et al., 2019), que combina criterios sistemáticos de selección con síntesis interpretativa, apropiado para integrar evidencia heterogénea: teorías, modelos de simulación, estudios de caso y documentos de política y extraer principios transferibles a contextos sin implementación previa. El enfoque se sustenta en los criterios de rigor propuestos por Baethge et al. (2019) y Rother (2007), quienes establecen que una revisión narrativa de calidad debe declarar explícitamente sus fuentes, criterios de selección y procedimiento analítico. La revisión no fue preregistrada en repositorios de protocolos (PROSPERO u OSF).

Las búsquedas se ejecutaron entre mayo y septiembre de 2025 en ocho bases de datos: Scopus, Web of Science, Google Scholar, Redalyc, SciELO, Dialnet, Latindex y LILACS, complementadas con fuentes institucionales de la Presidencia de la República de Panamá

(2025a, 2025b) y el Banco Mundial (Pulido et al., 2021). No se estableció restricción de año de publicación; el corpus resultante comprende documentos entre 1961 y 2025. La estrategia combinó términos en español e inglés mediante los operadores booleanos AND y OR: ('ferrocarril de carga' OR 'rail freight') AND ('logistics simulation' OR 'simulación logística') AND ('intermodal transport' OR 'resilience'). Se aplicaron filtros de tipo de documento (artículos revisados por pares, tesis de posgrado e informes de organismos internacionales) y de idioma (español e inglés). La búsqueda se complementó con rastreo inverso de referencias.

Los criterios de elegibilidad se presentan en la Tabla 1. A partir de 150 registros identificados, se realizó el cribado de forma independiente en dos fases evaluación de título y resumen, revisión de texto completo y resolviendo discrepancias mediante consenso. El proceso resultó en 34 documentos incluidos.

Tabla 1
Criterios de elegibilidad

Categoría	Inclusión	Exclusión
Temática	Carga ferroviaria, intermodalidad, simulación logística, resiliencia, MCDM, TCO	Exclusivamente transporte de pasajeros
Documento	Artículos revisados por pares, tesis de posgrado, informes de organismos internacionales	Artículos de opinión, divulgación sin soporte metodológico, duplicados
Idioma	Español e inglés	Otros idiomas
Período	Sin restricción (1961-2025)	

Nota. MCDM = análisis de decisión multicriterio; TCO = costo total de propiedad (Total Cost of Ownership).

La extracción se realizó mediante una matriz con las siguientes variables por documento: autor y año, país, tipo de fuente, metodología empleada, hallazgos principales y relevancia para los objetivos de la revisión.

La síntesis integró análisis temático siguiendo las fases de Braun y Clarke (2006): codificación, agrupación en categorías y revisión hasta saturación temática, comparación sistemática entre grupos y triangulación de tres marcos teóricos aplicados en paralelo: la teoría de restricciones (Aguilera, 2000), el enfoque sistémico (von Bertalanffy, 1968; Forrester, 1961) y la teoría de redes en logística. No se aplicó metaanálisis dado la heterogeneidad metodológica del corpus. Siguiendo los protocolos de Baethge et al. (2019), se empleó la escala SANRA (Scale for the Assessment of Narrative Review Articles) para

evaluar la calidad de los artículos incluidos (Baethge et al., 2019), cuyos criterios incluyeron la declaración del objetivo, pertinencia de fuentes, claridad metodológica, validez de conclusiones y relevancia para la transferencia al contexto panameño.

RESULTADOS

Los resultados evidencian que la competitividad del transporte ferroviario de carga se encuentra condicionada por factores de carácter estructural. Entre ellos, destacan las diferencias técnicas entre países, que abarcan desde aspectos de infraestructura hasta sistemas de señalización y normativas operativas, lo que genera ineficiencias en la interoperabilidad y costos adicionales en los puntos de conexión internacional (Lérida, 2015). En el caso específico de España, estas limitaciones se agravan debido a decisiones históricas que privilegiaron el transporte de pasajeros, lo que ha incidido directamente en la baja participación del transporte ferroviario de mercancías en comparación con otros países europeos (Lérida, 2015; Muñoz, 2016).

En América Latina, aunque los contextos institucionales presentan particularidades, se identifican patrones similares caracterizados por fragmentación y falta de alineación entre los actores del sistema. En países como México, la estructura resultante de los procesos de concesión ha derivado en una débil articulación entre el Estado, los operadores y los usuarios, lo que limita la eficiencia del sistema ferroviario (Paredes, 2019). En el caso colombiano, la evidencia señala que los costos logísticos continúan siendo elevados, especialmente en el tramo final de distribución, y que el sistema presenta una alta sensibilidad frente a interrupciones, lo que impacta negativamente su desempeño y competitividad (Obando-Tulcán et al., 2024; Ospina, 2025).

A nivel global, se observa un avance significativo en el uso de modelos de simulación aplicados a cadenas de suministro; sin embargo, estos aún presentan limitaciones importantes, particularmente en su capacidad para adaptarse dinámicamente a escenarios de disrupción y aprendizaje en tiempo real (Kogler & Maxera, 2025; Stavroulakis & Papadimitriou, 2022). No obstante, persisten vacíos relevantes: la integración de la última milla en modelos ferroviarios (Lasso Rosada, 2022; Johansson, 2021), el desarrollo de modelos adaptativos en tiempo real (Kogler & Maxera, 2025) y la articulación entre

dimensiones técnicas e institucionales en un mismo marco analítico (Paredes, 2019; Ospina, 2025).

Desde el punto de vista metodológico, la simulación logística, especialmente mediante modelos de eventos discretos, se consolida como una herramienta clave para analizar el comportamiento de sistemas ferroviarios complejos, al permitir representar de forma detallada las interacciones entre los trenes y la infraestructura (Fernández, 1997).

Asimismo, la integración de estos modelos con sistemas automatizados de control y tecnologías digitales avanzadas contribuye a mejorar la capacidad de respuesta operativa frente a perturbaciones, fortaleciendo la gestión del sistema en entornos dinámicos (Fernández, 1997; Sánchez, 2021).

No obstante, persisten limitaciones relevantes en la incorporación de la última milla dentro de los modelos ferroviarios, así como en el desarrollo de enfoques integrados que permitan abordar de forma conjunta las dimensiones operativas y logísticas del sistema (Lasso Rosada, 2022; Mardešić et al., 2024).

El corpus se organiza en cuatro grupos temáticos: modelación operativa (T1, n = 8, 24%), optimización de red (T2, n = 7, 21%), integración intermodal (T3, n = 13, 38%) y digitalización avanzada (T4, n = 6, 17%). El grupo T3 concentra la mayor proporción del corpus, seguido de T1. El análisis transversal de los cuatro grupos permite identificar tres principios comunes: coordinación institucional, intermodalidad efectiva y madurez digital basada en simulación (Tabla 2).

Tabla 2

Síntesis por grupo temático de la revisión

Grupo	Descripción	Nº. Estudios	Peso (%)
T1 - Modelación operativa	Simulación y modelado directo de operaciones ferroviarias	8	24%
T2 - Optimización de red	Modelos matemáticos, heurísticos o de eficiencia logística	7	21%
T3 - Integración intermodal	Estudios de integración modal, política y gobernanza logística	13	38%
T4 - Digitalización / IA / Gemelo Digital	Aplicaciones inteligentes, AHP difuso, IA y simulación avanzada	6	17%
Total		34	100%

Nota. T1 = modelación operativa; T2 = optimización de red; T3 = integración intermodal; T4 = digitalización, inteligencia artificial y gemelo digital. Elaboración propia con base en 34 estudios analizados.

El proyecto ferroviario Panamá-David, con el nodo Divisa como punto de articulación logística, constituye el contexto de aplicación de los hallazgos de esta revisión (Construcción en Panamá, 2025; Presidencia de la República de Panamá, 2025a, 2025b). En particular, el nodo Divisa se configura como un punto crítico cuya eficiencia dependerá de su capacidad para integrar simulación, intermodalidad y gobernanza. La literatura incluida no identifica estudios de simulación ferroviaria de carga específicamente referidos al contexto panameño, lo que confirma el vacío identificado para contextos emergentes (Johansson, 2021; Berbey et al., 2016).

La Tabla 2 sintetiza la distribución temática del corpus, mientras que la Tabla 3 detalla los 34 estudios incluidos, evidenciando la diversidad metodológica y conceptual de la revisión.

Tabla 3

Estudios incluidos en la revisión (n = 34)

No	Autor y Año	País	Técnica/Modelo simulación	Objetivo	Resultados	G
1	Aguilera (2000)	Colombia	Teoría de Restricciones (TOC)	Aplicar TOC a la gestión logística y productiva	Presenta enfoque sistémico para eliminar cuellos de botella	T1
2	Alcaide (2024)	España	Simulación de eventos discretos (DES)	Modelar operación de líneas 5 y 6 del Metro de Madrid	Demuestra eficiencia y reducción de tiempos en líneas urbanas	T1
3	Berbey et al. (2016)	Panamá	Análisis descriptivo ferroviario	Identificar fundamentos y características del transporte ferroviario	Revisión contextual que destaca ventajas del modo férreo	T3
4	Ballou (2004)	EE. UU.	Modelos de optimización logística	Integrar la cadena de suministro y costos totales	Fundamenta análisis de costo total logístico (TCO)	T2
5	Bowersox (1969)	EE. UU.	Modelos de distribución física	Desarrollar principios de diseño logístico integral	Introduce la noción moderna de distribución y eficiencia modal	T1
6	Cakir & Canbolat (2008)	Turquía	AHP difuso / soporte web	Clasificar inventarios con criterios múltiples bajo incertidumbre	Implementa metodología multicriterio aplicable a	T4

					decisiones logísticas	
7	Closs, Bowersox & Goldsby (1996)	EE. UU.	Modelos sistémicos de cadena logística	Formular modelo integral de gestión logística	Propone integración sistémica logística-transporte	T3
8	Construcción en Panamá (2025)	Panamá	Análisis técnico-descriptivo	Describir el proyecto ferroviario Panamá-David	Define trazado, estaciones y potencial de conectividad nacional	T3
9	Durán-Micco et al. (2025)	Bélgica	Simulación de colaboración horizontal (DES)	Evaluar impacto de colaboración en redes logísticas	La colaboración reduce costos y aumenta resiliencia de red	T2
10	Fernández (1997)	España	Simulación dinámica y control de sistemas ferroviarios	Modelar dinámica de trenes y control de tráfico	Valida modelos de control predictivo y simulación de trenes	T1
11	Forrester (1961)	EE. UU.	Dinámica sistemas (SD) de	Modelar interrelaciones industriales	Base teórica de la simulación sistémica logística	T1
12	Habibi et al. (2023)	Australia	Simulación de resiliencia con propagación de interrupciones	Evaluar resiliencia de redes logísticas ante fallas	Introduce modelado de propagación de interrupciones	T4
13	Ioannidis (2016)	EE. UU.	Evaluación metodológica	Analizar calidad y redundancia en revisiones sistemáticas	Propone criterios de validez y rigor para revisiones	T2
14	Johansson (2021)	Suecia	Simulación multimodal carretera-ferrocarril	Mejorar eficiencia de transporte combinado	Identifica reducción de costos y emisiones mediante simulación	T3
15	Kogler & Maxera (2025)	Austria	Revisión integradora (DES + IA)	Revisar simulaciones discretas y aprendizaje automático en cadenas de suministro	Identifica tendencia a gemelos digitales y IA en logística	T4
16	Lasso Rosada (2022)	Colombia	Modelos optimización multimodal de	Evaluar problemas de última milla en transporte	Propone estrategias logísticas	T3

					intermodales urbanas	
17	Lérida (2015)	España	Análisis econométrico y de eficiencia		Analizar efectos de liberalización ferroviaria europea	Evidencia mejoras en eficiencia productiva T2
18	Linares-Espinós et al. (2018)	España	Metodología de revisión sistemática		Describir pasos y criterios PRISMA	Guía metodológica para revisiones sistemáticas T2
19	Mardešić et al. (2024)	Croacia	Simulación estocástica enrutamiento dinámico	/	Revisar VRP dinámico en logística urbana	Clasifica modelos estocásticos aplicables al transporte T2
20	Morales (2015)	México	Simulación de escenarios logísticos		Evaluar competitividad del ferrocarril frente al autotransporte	Determina ventajas del modo férreo con aumento del combustible T3
21	Muñoz (2016)	España	Simulación asistida por computadora (CAD/CAE)		Simular dinámica de vehículos ferroviarios	Obtiene perfiles de vibración y seguridad operacional T1
22	Navarro (2006)	España	Análisis SIG intermodal	/	Analizar red intermodal de transporte	Identifica enclaves estratégicos y corredores óptimos T3
23	Obando-Tulcán et al. (2024)	Colombia	Simulación de procesos logísticos (DES)		Modelar procesos del batallón logístico militar	Mejora la eficiencia en distribución y abastecimiento T1
24	Ospina (2025)	Colombia	Modelos de resiliencia intermodal		Evaluar resiliencia en red futura de transporte	Propuesta metodológica multicriterio e intermodal T3
25	Paredes (2019)	México	Análisis interdisciplinario / normativo		Evaluar servicio público ferroviario	Plantea marco regulatorio y eficiencia institucional T2
26	Polo-Navarro et al. (2014)	España	Simulación de sistemas inteligentes		Analizar impacto de ITS en redes de distribución	Confirma reducción de costos y mejora del flujo logístico T4
27	Presidencia Panamá (2025a)	Panamá	Comunicación institucional planificación	/	Anunciar trazado del ferrocarril nacional	Define corredores y estaciones estratégicas T3

28	Presidencia Panamá (2025b)	Panamá	Planificación estratégica	Desarrollo del Plan Maestro del tren Panamá-David	Marco institucional de ejecución del proyecto	T3
29	Pulido et al. (2021)	Global (BM)	Guía metodológica / modelado urbano	Definir principios para ferrocarriles urbanos sostenibles	Establece estándares técnicos financieros globales	y T3
30	Rother (2007)	Brasil	Comparativo metodológico	Diferenciar revisión sistemática vs narrativa	Define criterios de validez y sesgo	T2
31	Sánchez-Blanco (2021)	Francia / España	Simulación logística ferroviaria	Integrar transporte ferroviario en puertos mercantiles	Propone modelo DES para flujos portuarios	T1
32	Soria (2015)	España	Análisis histórico-institucional	Estudiar cambio del sistema ferroviario español	Destaca comunicación y gestión del cambio sectorial	T3
33	Stavroulakis & Papadimitriou (2022)	Grecia	Modelo de costo total (TCO)	Desarrollar marco de TCO en transporte marítimo	Transferible al análisis ferroviario de sostenibilidad	T2
34	von Bertalanffy (1968)	EE. UU.	Teoría general de sistemas	Fundar visión sistémica para modelar organizaciones	Base teórica para simulación y modelación integral	T1

Nota. DES = simulación por eventos discretos; TOC = teoría de restricciones; MCDM = toma de decisiones multicriterio; IA = inteligencia artificial. La clasificación por grupos (T1-T4) corresponde a la tipología analítica desarrollada en este estudio. Fuente: elaboración propia con base en la revisión de la literatura.

DISCUSIÓN

El presente estudio se propuso identificar tendencias internacionales en simulación logística ferroviaria, vacíos de investigación persistentes y proyecciones aplicables al caso de Panamá. El análisis del corpus de 34 documentos permite responder afirmativamente a este objetivo: se identificaron cuatro grupos temáticos, tres principios transversales y cuatro brechas críticas, cuya interpretación se desarrolla a continuación.

Los hallazgos permiten reinterpretar la baja participación del ferrocarril de carga no como una limitación tecnológica, sino como un problema de diseño sistémico. En Europa, las fricciones de interoperabilidad y la priorización histórica del pasajero generan

ineficiencias estructurales (Lérida, 2015; Muñoz, 2016), mientras que en América Latina estas se manifiestan en forma de fragmentación institucional y desalineación de incentivos (Paredes, 2019; Ospina, 2025). Aunque los mecanismos difieren, la convergencia de resultados sugiere la existencia de patrones sistémicos que trascienden los contextos regulatorios específicos, consistente con los planteamientos de la teoría general de sistemas sobre comportamientos emergentes en redes complejas (von Bertalanffy, 1968; Forrester, 1961).

En este sentido, los resultados confirman que los beneficios intrínsecos del ferrocarril, menores externalidades, mayor eficiencia energética, solo se materializan cuando el sistema logístico reduce fricciones en nodos y transbordos (Lérida, 2015; Muñoz, 2016; Paredes, 2019). La última milla emerge como el punto crítico donde se diluyen estas ventajas, debido a su escasa integración en la planificación ferroviaria. Esto coincide con lo documentado en estudios sobre transporte intermodal, donde representa la mayor proporción del costo logístico total (Lasso Rosada, 2022; Johansson, 2021).

La simulación logística, particularmente mediante modelos DES, se posiciona como herramienta clave para abordar esta complejidad. Su integración con inteligencia artificial y métodos multicriterio permite pasar del diagnóstico al control adaptativo del sistema (Alcaide, 2024; Cakir & Canbolat, 2008; Kogler & Maxera, 2025). Sin embargo, persisten limitaciones en el desarrollo de modelos adaptativos en tiempo real y en la integración interdisciplinaria entre ingeniería, economía y regulación (Kogler & Maxera, 2025; Paredes, 2019). En este sentido, herramientas como ARS y SIRO, así como el desarrollo de gemelos digitales, permiten trasladar la simulación desde un ejercicio analítico hacia un instrumento operativo en tiempo real (Fernández, 1997; Sánchez, 2021). Se identifican cuatro brechas críticas: (i) ausencia de marcos interdisciplinarios, (ii) subestimación del TCO, (iii) débil integración de la última milla y (iv) limitada simulación adaptativa (Stavroulakis & Papadimitriou, 2022; Lasso Rosada, 2022; Kogler & Maxera, 2025). Estas brechas podrían contribuir a explicar por qué proyectos ferroviarios técnicamente bien diseñados no alcanzan los niveles de competitividad esperados, hipótesis que requiere validación mediante estudios de caso longitudinales. Desde una perspectiva teórica, estos hallazgos se alinean con la Teoría de las Restricciones, que enfatiza el papel del eslabón crítico en el desempeño global (Aguilera, 2000), así como con los enfoques sistémicos que explican efectos no lineales en

redes logísticas complejas (Forrester, 1961; von Bertalanffy, 1968). En respuesta a esta heterogeneidad, el estudio propone un marco analítico 3×3 (Tabla 4) que articula coordinación institucional, integración intermodal y madurez digital, incorporando TCO y resiliencia como dimensiones transversales. A diferencia de enfoques que abordan la coordinación institucional (Paredes, 2019), la simulación técnica (Fernández, 1997) o la intermodalidad (Johansson, 2021) como dimensiones independientes, este marco permite tanto la evaluación ex-ante mediante MCDM como el seguimiento ex-post de la madurez operativa de un nodo logístico. Aplicado al caso panameño, este enfoque sugiere que el nodo Divisa debe diseñarse como un sistema integrado desde su fase inicial, incorporando simulación, evaluación multicriterio y gobernanza colaborativa (Fernández, 1997; Polo-Navarro et al., 2014; Pulido et al., 2021). Asimismo, el uso de TOC permite identificar restricciones críticas en cada fase del sistema (Aguilera, 2000), mientras que la incorporación de métricas como costo logístico, tiempo puerta a puerta y emisiones facilita la toma de decisiones basada en evidencia.

Tabla 4

Matriz 3×3 para el diseño y evaluación de nodos

	Nivel 1 (Incipiente)	Nivel 2 (Intermedio)	Nivel 3 (Avanzado)
Coordinación Institucional	Relación informal - Reglas tácitas - Sin KPI comunes - Decisiones aisladas	Acuerdos operativos básicos - MOU/mesas técnicas - KPI mínimos (OTD, demoras) - Escalada definida	Gobernanza colaborativa - Contrato operativo con incentivos - KPI compartidos y auditorías - Mejora continua conjunta
Integración Intermodal	Interfaz Frágil - Transferencias manuales - Sin ventanas de tiempo - Congestión urbana recurrente	Interfaz ordenada - Ventana de tiempo - Separación parcial de flujos - Preensamble limitado	Interfaz optimizada - Playas de preensamble - Acceso segregado pesados/livianos - Layout diseñado con simulación
Madurez digital-Simulación	Datos básicos offline - Hojas de cálculo - Reportes mensuales - Sin trazabilidad en tiempo real	DES offline y reporting - Modelos de eventos discretos - Tableros mensuales - Alertas manuales	Gemelo digital DES online - IA para predicción y colas - MCDM (AHP difuso) ex ante - Replanificación en operación

Nota. El marco integra tres dimensiones: coordinación institucional, integración intermodal y madurez digital. Uso ex ante: evaluación de alternativas mediante métodos multicriterio (p. ej., AHP difuso). Uso ex post: seguimiento de madurez operativa. La evaluación transversal incorpora criterios de costo total de propiedad (TCO) y resiliencia.

La convergencia del corpus sugiere que el desempeño del ferrocarril de carga depende de la capacidad de articular un sistema coherente donde simulación, intermodalidad y coordinación institucional operen de manera integrada desde su concepción. Estas limitaciones abren una nueva oportunidad de investigaciones que incluyan estudios de simulación DES aplicados específicamente al ferrocarril de carga en contextos latinoamericanos de baja madurez digital, validación del marco 3×3 mediante estudios de caso en nodos logísticos reales, construcción de modelos de TCO adaptados a las condiciones panameñas, y exploración de modelos de gobernanza colaborativa con KPI ferroviarios compartidos entre actores públicos y privados en el contexto centroamericano.

CONCLUSIONES

El presente estudio se propuso identificar tendencias internacionales en simulación logística ferroviaria, vacíos de investigación persistentes y proyecciones aplicables a Panamá. Los tres objetivos fueron abordados: se identificaron cuatro grupos temáticos (T1, T2, T3 y T4), cuatro brechas críticas y un marco analítico 3×3 transferible al diseño del nodo Divisa. El hallazgo central indica que la competitividad del ferrocarril de carga no depende de innovaciones tecnológicas aisladas, sino de la consistencia sistémica entre coordinación institucional, intermodalidad efectiva y madurez digital basada en simulación, condiciones recurrentemente asociadas al desempeño competitivo en los contextos revisados y consistentes con los postulados de la teoría general de sistemas (von Bertalanffy, 1968).

La contribución central es el marco 3×3, que integra por primera vez estas tres dimensiones en un instrumento operacionalizable de evaluación ex-ante para nodos logísticos ferroviarios en economías emergentes. Para Panamá, los hallazgos sugieren que el diseño del nodo Divisa se beneficiaría de incorporar simulación DES, evaluación con TCO y gobernanza colaborativa con indicadores compartidos desde su fase inicial. Futuras investigaciones deberían orientarse a validar el marco 3×3 mediante estudios de caso en nodos reales, desarrollar modelos DES específicos para el contexto ferroviario panameño; y construir modelos de TCO adaptados a las condiciones regulatorias de Panamá y Centroamérica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, C. I. (2000). Un enfoque gerencial de la teoría de las restricciones. *Estudios Gerenciales*, 1(77), 53-69.

- http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-59232000000400004
- Alcaide F., N. (2024). *Modelo de simulación de líneas 5 y 6 del Metro de Madrid* [Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Madrid].
https://oa.upm.es/82650/1/TFG_NICOLAS_ALCAIDE_FERNANDEZ.pdf
- Baethge, C., Goldbeck-Wood, S., & Mertens, S. (2019). SANRA-a scale for the quality assessment of narrative review articles. *Research Integrity and Peer Review*, 4(1), 5 (2019). <https://doi.org/10.1186/s41073-019-0064-8>
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro* (5ta Ed.). Pearson Educación. https://laclasseblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/05/logistica_administracion_de_la_cadena_de_suministro_5ta_edicion_-_ronald_h_ballou.pdf
- Berbey, A., Caballero, R., Alvarez, H., Laguardia, J., Batista, D., Solís, D., Sanz, J. de D., Galán, R., & Brunel, J. (2016). El Transporte ferroviario: fundamentos y algunas características más sobresalientes. *Prisma Tecnológico*, 3(1), 35-39.
<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/544>
- Bowersox, D. J. (1969). Physical Distribution Development, Current Status, and Potential. *Journal of Marketing*, 33(1), 63-70. <https://doi.org/10.1177/002224296903300111>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Cakir, O., & Canbolat, M. S. (2008). A web-based decision support system for multi-criteria inventory classification using fuzzy AHP methodology. *Expert Systems with Applications*, 35(3), 1367-1378. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.041>
- Closs, D., Bowersox, D. J., & Goldsby, T. J. (1996). *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process*. McGraw-Hill College.
https://archive.org/details/logisticalmanage0000bowe_y8w8
- Construcción en Panamá. (2025). *Tren Panamá-David-Frontera: el megaproyecto ferroviario que transformará la logística, conectividad y economía del país*.
<https://construccionenpanama.com/tren-panama-david-frontera/>
- Durán-Micco, J., Alaei, S., & Macharis, C. (2025). Evaluating the impact of horizontal collaboration in logistics systems: a simulation-based study. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 13(1). <https://doi.org/10.1080/21680566.2025.2475204>
- Fernández C., A. (1997). *Modelado, Simulación y Control de Sistemas Ferroviarios* [Tesis de Doctorado, Universidad Pontificia Comillas Madrid].
<https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/50476/TD00403.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press Cambridge, Mass.
http://www.lapropective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester-1961.pdf

- Habibi, F., Chakraborty, R. K., & Abbasi, A. (2023). Evaluating supply chain network resilience considering disruption propagation. *Computers & Industrial Engineering*, 183, 109531. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109531>
- Ioannidis, J. P. A. (2016). The Mass Production of Redundant, Misleading, and Conflicted Systematic Reviews and Meta-analyses. *The Milbank Quarterly*, 94(3), 485-514. <https://doi.org/10.1111/1468-0009.12210>
- Johansson, I. (2021). *Simulation Studies for Improved Efficiency in Road and Rail Freight Transports* [Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology]. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1554753/FULLTEXT01.pdf>
- Kogler, C., & Maxera, P. (2025). A literature review of supply chain analyses integrating discrete simulation modelling and machine learning. *Journal of Simulation*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/17477778.2025.2500393>
- Lasso Rosada, S. M. (2022). *Estudio del problema transporte multimodal en logística de la última milla* [Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/570c46cc-0c76-4503-8d46-f80d84f7d4cb/content>
- Lérida N., C. (2015). *La liberalización del sector ferroviario en Europa: Efectos sobre la Eficiencia Productiva y sobre los Mercados de Transporte* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia]. https://tecnicavialibre.es/documentos/Libros/CarlosLerida_Tesis.pdf
- Linares-Espinós, E., Hernández, V., Domínguez-Escrig, J. L., Fernández-Pello, S., Hevia, V., Mayor, J., Padilla-Fernández, B., & Ribal, M. J. (2018). Metodología de una revisión sistemática. *Actas Urológicas Españolas*, 42(8), 499-506. <https://doi.org/10.1016/j.acuro.2018.01.010>
- Mardešić, N., Erdelić, T., Carić, T., & Đurasević, M. (2024). Review of Stochastic Dynamic Vehicle Routing in the Evolving Urban Logistics Environment. *Mathematics*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/math12010028>
- Morales C., S. (2015). *Análisis de la posición competitiva del ferrocarril frente al autotransporte en un escenario de incremento del precio de combustible en los corredores logísticos de México* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7543/tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Muñoz P., A. (2016). *Simulación de la dinámica de un vehículo ferroviario mediante herramientas de ingeniería asistidas por ordenador* [Tesis de grado, Universidad de Extremadura]. <http://dehesa.unex.es/handle/10662/7015>
- Navarro M., J. G. (2006). Análisis con SIG de la red de transporte intermodal de rutas y enclaves estratégicos. *Cuadernos Geográficos*, 39(2), 203-219. <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/1508>
- Obando-Tulcán, M. Á., Castro-Cruz, J. S., Montoya-Cortés, M., & Cortés-Llanos, A. (2024). Modelo y simulación de los procesos logísticos del Batallón de Intendencia

- N.º 1, Las Juanas. *Brújula Semilleros de Investigación*, 12(24), 179-194.
<https://doi.org/10.21830/23460628.163>
- Ospina S., A. M. (2025). Metodología para la evaluación de resiliencia en el transporte de carga: caso de la red intermodal futura de Colombia. [Tesis de maestría Universidad de los Andes]. *Séneca Repositorio Institucional*. <https://hdl.handle.net/1992/75612>
- Paredes C., J. (2019). *El servicio público ferroviario de carga en México. Una valoración interdisciplinaria desde el Derecho Administrativo a 20 años de ser “actividad prioritaria” del desarrollo de la Administración Pública Federal* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24687.05284>
- Polo-Navarro, L., Ciprés-Bagüeste, D., & García-Milla, M. (2014). Análisis del impacto de un sistema inteligente de transporte sobre una red de distribución. *DYNA*, 89(2), 183-191. <https://doi.org/10.6036/5858>
- Presidencia de la República de Panamá. (2025a). *Presidente anuncia trazado de ruta del ferrocarril y la ubicación de las futuras estaciones*.
<https://www.presidencia.gob.pa/publicacion/presidente-anuncia-trazado-de-ruta-del-ferrocarril-y-la-ubicacion-de-las-futuras-estaciones->
- Presidencia de la República de Panamá. (2025b). *Se inicia desarrollo del Plan Maestro para el tren David-Frontera - Panamá*.
<https://www.presidencia.gob.pa/publicacion/se-inicia-desarrollo-del-plan-maestro-para-el-tren-david-frontera-panama>
- Pulido, D., Darido, G., Muñoz-Raskin, R. & Moody, J. (Eds.). (2021). *Manual para el desarrollo de ferrocarriles urbanos*. Grupo Banco Mundial. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1596-6>
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática X revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, 20(2), v-vi. <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>
- Sánchez-Blanco B., J. (2021). *Simulación del transporte ferroviario integrado en la logística de puertos mercantiles* [Tesis de grado, Universidad de Lille].
https://oa.upm.es/69258/1/TFG_JAIME_SANCHEZ_BLANCO_BOYER.pdf
- Soria C., C. H. (2015). *Estrategias de comunicación y cambio del sistema ferroviario en España (1992-2012)* [Tesis doctoral, Universidad de Valladolid].
<https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/16042/1/Tesis770-160218.pdf>
- Stavroulakis, P. J., & Papadimitriou, S. (2022). Total cost of ownership in shipping: a framework for sustainability. *Journal of Shipping and Trade*, 7(1), 14.
<https://doi.org/10.1186/s41072-022-00116-7>
- von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory, Foundations, Development, Applications*. George Braziller Inc., New York.
https://monoskop.org/images/7/77/Von_Bertalanffy_Ludwig_General_System_Theory_1968.pdf