SIOP 2026 | COQUIMBO
XI Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria

XI SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

SIMULACIÓN DE OPERACIONES EN TERMINALES PORTUARIAS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA SOBRE PARADIGMAS, RIGOR METODOLÓGICO Y BRECHAS DE INVESTIGACIÓN

AGUSTÍN OLIVARES[1], SEBASTIAN GONZALES-ROSSI[2], JULIÁN URREJOLA[2] Y JUAN PABLO ARAYA[2]

RESUMEN

Este trabajo presenta una revisión sistemática de literatura (SLR) sobre el uso de modelos de simulación en operaciones de terminales portuarias, siguiendo PRISMA 2020, con un propósito práctico: identificar qué debería exigir una empresa portuaria al encargar un estudio de simulación. A partir de 702 registros identificados en Scopus y Web of Science (búsqueda del 1 de mayo de 2026), se incluyeron 86 estudios únicos publicados entre 2015 y 2025. Predomina la simulación de eventos discretos (76,7%) sobre los modelos basados en agentes (15,1%), la dinámica de sistemas (5,8%) y los híbridos (2,3%). El 91,9% de los estudios trata terminales de contenedores, solo uno (1,2%) terminales de granel sólido y ninguno terminales multipropósito; la producción se concentra en Asia-Pacífico (45,3%) y Europa (44,2%), con apenas tres estudios latinoamericanos (3,5%). El rigor metodológico es limitado: el 44,2% de los estudios no reporta validación, solo el 23,3% realiza análisis de sensibilidad y el 34,9% integra optimización, con diferencias marcadas entre regiones (51,3% en Asia-Pacífico frente a 18,4% en Europa). El 39,5% considera la sostenibilidad, pero solo el 7,0% la trata como objetivo principal del modelo. Estos resultados se traducen en un conjunto de exigencias mínimas para la contratación de estudios de simulación —validación contra datos de la propia terminal, análisis de sensibilidad y declaración explícita de simplificaciones— y advierten que la evidencia publicada para terminales multipropósito y graneleras, predominantes en el sistema portuario chileno, es marginal.

Palabras clave: simulación portuaria, revisión sistemática, simulación de eventos discretos, validación de modelos, terminales multipropósito, América Latina

---

[1]Instructor, Escuela de Ingeniería. Universidad Católica del Norte, agustin.olivares@ce.ucn.cl
[2]Estudiante, Escuela de Ingeniería. Universidad Católica del Norte

1 INTRODUCCIÓN

Las terminales portuarias son sistemas complejos y estocásticos en los que interactúan procesos de atraque, transferencia de carga, patio y transporte terrestre. La simulación ha sido, desde hace más de cinco décadas, una de las principales herramientas para apoyar decisiones de diseño y operación en este dominio, dada la dificultad de representar dicha complejidad mediante modelos puramente analíticos (Steenken, Voß y Stahlbock, 2004). Revisiones previas han documentado en detalle el uso de simulación en terminales de contenedores desde una perspectiva de investigación de operaciones (Angeloudis y Bell, 2011) y desde un enfoque bibliométrico de largo plazo (Dragović, Tzannatos y Park, 2017).

Sin embargo, la literatura existente presenta vacíos relevantes: (i) no distingue sistemáticamente entre paradigmas de simulación (eventos discretos, agentes, dinámica de sistemas e híbridos) y su asociación con el objetivo del modelo; (ii) rara vez cuantifica el rigor metodológico de los estudios (validación, análisis de sensibilidad); y (iii) no examina de forma comparativa la incorporación de sostenibilidad y optimización según la región geográfica o el nivel de desarrollo económico del país de aplicación. Este trabajo aborda estos vacíos mediante una SLR que sintetiza 86 estudios publicados entre 2015 y 2025, clasificados según paradigma de simulación, tipo de terminal, horizonte temporal, integración de optimización, validación, análisis de sensibilidad, sostenibilidad y contexto geográfico-económico.

Más allá de su valor como mapa de la literatura, la revisión busca responder una pregunta práctica que enfrentan las empresas y autoridades portuarias: si se va a encargar un estudio de simulación para una terminal, ¿qué se debe exigir y cómo saber si el resultado es confiable? Los indicadores de rigor que aquí se cuantifican —validación, análisis de sensibilidad y base en datos reales— son precisamente los que permiten responderla. Por ello, los resultados se acompañan de su consecuencia práctica, y la sección 4 los traduce en exigencias metodológicas aplicables a la contratación de estudios de simulación y discute su transferibilidad a las terminales multipropósito y graneleras que predominan en el sistema portuario chileno.

2 METODOLOGÍA

Esta revisión sigue los lineamientos PRISMA 2020 para la búsqueda, selección y reporte de revisiones sistemáticas (Page et al., 2021), adaptados al ámbito de ingeniería y gestión de operaciones siguiendo el proceso de tres etapas -planificación, desarrollo y reporte- propuesto por Tranfield, Denyer y Smart (2003) para revisiones sistemáticas fuera del campo biomédico.

2.1 Identificación

La búsqueda se ejecutó el 1 de mayo de 2026 en dos bases de datos bibliográficas, Scopus y Web of Science (WoS), obteniendo 702 registros (522 de Scopus y 180 de WoS). La consulta combinó términos de tipo de terminal (contenedores, granel sólido y líquido, GNL, RoRo, carga general, multipropósito, cruceros, entre otros), buscados en el título, con términos de paradigma

de simulación, buscados en título, resumen y palabras clave[1]. Los filtros de ventana temporal, tipo de documento e idioma no se incorporaron a la consulta, sino que se aplicaron posteriormente sobre los registros exportados.

2.2 Cribado y elegibilidad

Sobre los 702 registros se aplicaron secuencialmente los criterios de la Fase 1 (Tabla 1): tipo de documento, restringido a artículos de revista y revisiones con revisión por pares (305 excluidos: 210 conference papers, 81 proceedings papers, 13 capítulos de libro y 1 nota); ventana temporal 2015-2025 (156 excluidos); eliminación de duplicados entre Scopus y WoS (56); e idioma inglés (21 excluidos: 20 en chino y 1 en alemán). Los 164 registros restantes se cribaron por título y resumen, excluyéndose 11 (5 que no empleaban DES, ABM o SDM como método central, 3 en que la simulación era secundaria a un método de optimización pura y 3 revisiones de literatura). De los 153 registros que superaron el cribado, 42 (27,5%) no pudieron obtenerse en texto completo mediante suscripciones institucionales ni acceso abierto, por lo que 111 pasaron a la evaluación de texto completo (Fase 2). En esta fase se aplicaron criterios de inclusión centrados en: (a) uso de un modelo de simulación (DES, ABM, SDM o híbrido) aplicado a operaciones de terminal portuaria; (b) exclusión de estudios basados exclusivamente en modelos matemáticos/analíticos sin componente de simulación; y (c) reporte suficiente de las variables de extracción (paradigma, herramienta, validación, entre otras).

2.3 Estudios incluidos

De los 111 registros evaluados en Fase 2, 87 fueron incluidos y 24 excluidos (20 por no utilizar DES/ABM/SDM como método central, 1 por tratarse de un simulador de procesos específico de un dominio no portuario y 3 por información insuficiente en el texto completo para confirmar elegibilidad). Durante la extracción de datos se detectó que un par de los 87 registros incluidos correspondía a la misma publicación (título, DOI y atributos idénticos), que había eludido la deduplicación automática por diferencias menores de formato entre las exportaciones de Scopus y Web of Science. Tras eliminar el duplicado, la muestra analítica final quedó en 86 estudios únicos, utilizada en el resto de este trabajo. La Tabla 1 resume el flujo completo de selección siguiendo la estructura del diagrama PRISMA 2020.

---

[1] *Cadena en WoS: TI=("container terminal" OR "bulk terminal" OR "dry bulk terminal" OR "liquid bulk terminal" OR "liquid terminal" OR "oil terminal" OR "LNG terminal" OR "ro-ro terminal" OR "roro terminal" OR "roll-on roll-off terminal" OR "general cargo terminal" OR "multipurpose terminal" OR "cruise terminal" OR "ferry terminal" OR "port terminal" OR "seaport terminal" OR "marine terminal" OR "intermodal terminal") AND TS=("discrete-event simulation" OR "discrete event simulation" OR "agent-based simulation" OR "agent based simulation" OR "multi-agent simulation" OR "multiagent simulation" OR "system dynamics" OR "ABM" OR "DES" OR "multiparadigm simulation" OR "multi-paradigm simulation" OR "simulation model" OR "simulation modelling" OR "simulation modeling" OR "simulation-based" OR "simulation based"). En Scopus se usó la misma cadena con TITLE() en lugar de TI= y TITLE-ABS-KEY() en lugar de TS=.*

Un segundo revisor re-evaluó de forma independiente una submuestra de 49 de los 153 registros que superaron el cribado por título y resumen, confirmando en todos ellos el cumplimiento del criterio de inclusión. La codificación de variables en texto completo fue realizada por un revisor por estudio; los casos dudosos se resolvieron por discusión entre los autores hasta alcanzar consenso, sin calcularse un índice formal de concordancia para esta etapa.

Tabla 1: Flujo de identificación y selección de estudios (PRISMA)

Etapa	n
Registros identificados (Scopus 522 + WoS 180)	702
Excluidos por tipo de documento	−305
Excluidos por año fuera de 2015-2025	−156
Duplicados eliminados (Scopus–WoS)	−56
Excluidos por idioma distinto del inglés	−21
Registros cribados por título y resumen	164
Excluidos en cribado por título y resumen	−11
Registros buscados en texto completo	153
Texto completo no disponible	−42
Evaluados en texto completo (Fase 2)	111
Excluidos en Fase 2	−24
Incluidos para extracción de datos	87
Duplicado identificado en extracción de datos	−1
Muestra analítica final (n)	86

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos de extracción del SLR.

2.4 Variables de extracción y análisis

Para cada estudio incluido se extrajeron variables relativas al paradigma de simulación principal -clasificado siguiendo la taxonomía de eventos discretos (DES), basado en agentes (ABM), dinámica de sistemas (SDM) e híbrido (Borshchev y Filippov, 2004)-, tipo de terminal, uso de datos de una terminal real, horizonte temporal, integración de optimización y método utilizado, validación y método de validación, análisis de sensibilidad, inclusión de animación, consideración de sostenibilidad, región geográfica, clasificación económica del país (desarrollado/en desarrollo) y herramienta de software. El análisis se realizó mediante estadística descriptiva y tablas de contingencia (cruces de variables), usando R (paquetes dplyr, ggplot2, sf) y Python (pandas, matplotlib) para la generación de las visualizaciones. No se aplicó un instrumento formal de evaluación de calidad o de riesgo de sesgo de los estudios incluidos: el rigor metodológico se aproxima mediante dos indicadores reportados —validación y análisis de sensibilidad—, por lo que la revisión tiene un carácter de mapeo de la evidencia más que de evaluación de su calidad.

3 RESULTADOS

3.1 Panorama general del corpus

La producción anual muestra una tendencia creciente, con un mínimo de 3 estudios en 2019 y un máximo de 15 en 2025. Dado que la búsqueda se ejecutó en mayo de 2026, el año 2025 está cubierto completo, aunque puede estar levemente subestimado por el desfase de indexación de las bases; las publicaciones con fecha 2026 adelantadas en línea quedaron fuera por el criterio de ventana temporal. Con esa salvedad, la serie sugiere un interés sostenido y en expansión por la simulación aplicada a terminales portuarias durante la última década.

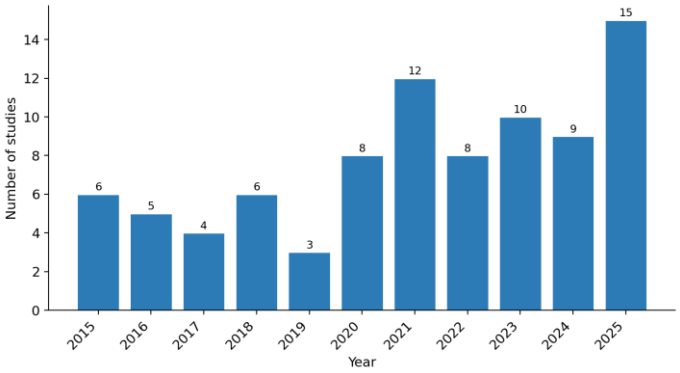


Figura 1: Publicaciones incluidas por año (n=86).

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al paradigma de simulación, la simulación de eventos discretos (DES) domina ampliamente el corpus (76,7%), seguida por el modelado basado en agentes (ABM, 15,1%), dinámica de sistemas (SDM, 5,8%) y modelos híbridos (2,3%). Este predominio de DES es consistente con revisiones previas sobre simulación en terminales de contenedores (Angeloudis y Bell, 2011; Dragović, Tzannatos y Park, 2017) y se explica por la naturaleza discreta de los eventos de arribo, atraque y transferencia de carga que caracterizan la operación portuaria.

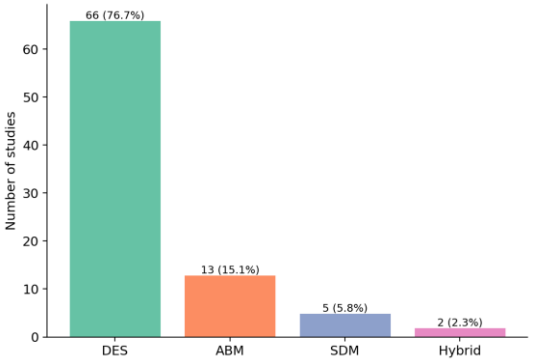


Figura 2: Paradigma de simulación principal utilizado (n=86).

Fuente: elaboración propia.

Respecto al alcance de aplicación, el 58,1% de los estudios se basa en una terminal real específica, el 32,6% utiliza datos reales con simplificaciones operativas ("parcial") y solo el 9,3%

emplea una terminal genérica o hipotética. Esto indica que la mayoría de la investigación busca relevancia práctica directa, aunque un tercio de los estudios sacrifica parte del realismo operativo para simplificar el modelo. Para quien encarga un estudio, esto significa que la mayoría de los modelos publicados se construyó con datos de una terminal concreta, pero no necesariamente comparable a la propia: la evidencia es específica de cada caso y no constituye un estándar transferible sin recalibración.

En cuanto al tipo de terminal, el 91,9% de los estudios se concentra en terminales de contenedores, mientras que RoRo (5,8%), granel seco (1,2%) y granel líquido (1,2%) están claramente subrepresentados. Ningún estudio modela una terminal multipropósito, pese a que la cadena de búsqueda incluía explícitamente ese término. Para un sistema portuario como el chileno, dominado por terminales multipropósito y graneleras, esto implica que la evidencia publicada para respaldar decisiones en ese tipo de terminal es marginal (ver sección 4.2).

3.2 Distribución geográfica

La producción científica se concentra casi por completo en Asia-Pacífico (45,3%, 39 de 86) y Europa (44,2%, 38 de 86; porcentajes sobre el total de 86 estudios, mientras la Figura 3 los expresa sobre los 83 con región informada), mientras que América Latina (3,5%), Medio Oriente (2,3%) y Norteamérica (1,2%) están marcadamente subrepresentadas. Esta asimetría geográfica limita la generalización de los hallazgos metodológicos a contextos portuarios distintos del asiático-pacífico y europeo, y constituye en sí misma un vacío de investigación relevante para regiones como América Latina.

Los tres estudios latinoamericanos corresponden a terminales de contenedores modeladas con simulación de eventos discretos: la evaluación de la expansión de una terminal en Ensenada, México (López-González et al., 2020); el almacenamiento sostenible de contenedores refrigerados en un puerto del Caribe colombiano (Moros-Daza et al., 2024); y la evaluación de layouts de una terminal de contenedores vacíos en el sur de Chile con criterios de eficiencia y seguridad (Vera-Carrasco, Palma y Muñoz-Herrera, 2025). Los tres validan su modelo —con datos históricos, juicio experto o el equipo de operaciones de la terminal— y realizan análisis de sensibilidad, un estándar superior al promedio del corpus; ninguno, sin embargo, aborda terminales graneleras o multipropósito.

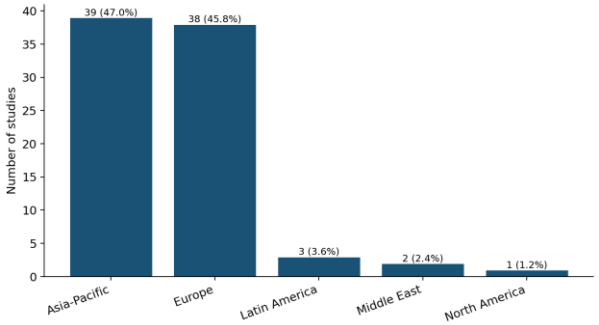


Figura 3: Distribución de estudios incluidos por región (n=83, excluye 3 sin región especificada).

Fuente: elaboración propia.

Al cruzar la región con la integración de optimización se observa una brecha metodológica notable: el 51,3% de los estudios de Asia-Pacífico integra algún método de optimización, frente a solo el 18,4% en Europa (Figura 4 y Tabla 2). Dado el tamaño muestral reducido (n=3 y n=2), los valores de América Latina y Medio Oriente deben interpretarse con cautela.

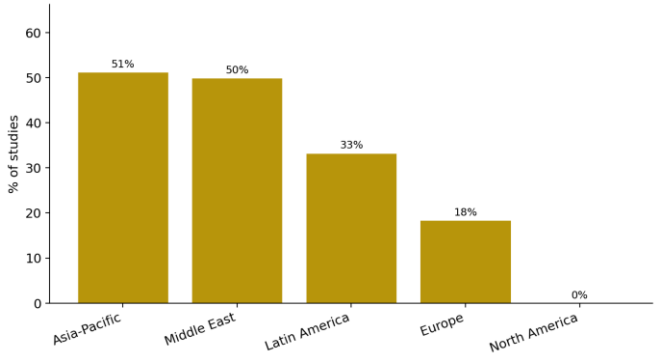


Figura 4: Porcentaje de estudios que integran optimización, por región.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2: Indicadores metodológicos clave por región

Región	n	% Optim.	% Sensib.	% Val. (Sí)	% Sosten.
Asia-Pacífico	39	51,3%	20,5%	30,8%	41,0%
Europa	38	18,4%	21,1%	26,3%	44,7%
América Latina*	3	33,3%	100,0%	100,0%	33,3%
Medio Oriente*	2	50,0%	0,0%	50,0%	0,0%
Norteamérica*	1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

*Tamaños muestrales muy pequeños (n≤3); porcentajes referenciales. Fuente: elaboración propia.

3.3 Rigor metodológico: validación y sensibilidad

Solo el 23,3% de los estudios (20 de 86) reporta haber realizado un análisis de sensibilidad, sin una tendencia clara de mejora a lo largo del tiempo. Este porcentaje es consistente con observaciones de otras revisiones que señalan un déficit generalizado de análisis de sensibilidad en estudios de simulación aplicada (Dragović, Tzannatos y Park, 2017). En la práctica, un modelo sin análisis de sensibilidad entrega un único resultado sin indicar cuánto cambia ante variaciones razonables de demanda, productividad o tiempos de ciclo, que son precisamente los supuestos más inciertos en una decisión de inversión.

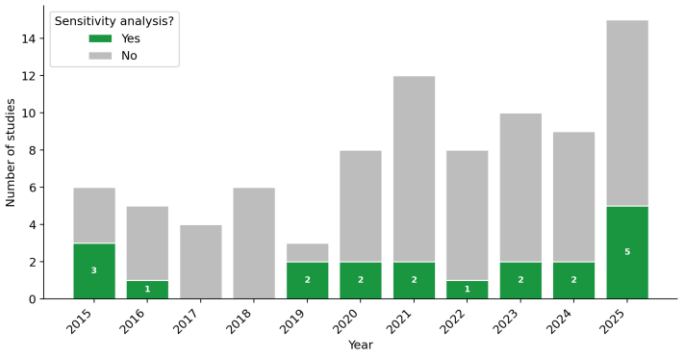


Figura 5: Análisis de sensibilidad a lo largo del tiempo (n=86).

Fuente: elaboración propia.

En relación con la validación de los modelos, el 32,6% reporta una validación completa ("Sí"), 19,8% una validación parcial y 44,2% no reporta validación; el 3,5% restante (3 estudios) no reporta el estatus de validación con claridad suficiente para clasificarlo (los porcentajes no suman exactamente 100% por redondeo). La consecuencia práctica es directa: un modelo no validado que respalda el dimensionamiento de un sitio o la compra de equipamiento traslada a quien decide un riesgo que nadie cuantificó.

El cruce entre validación y base en terminal real (Figura 6) muestra que los modelos construidos íntegramente sobre una terminal real validan en la mayor proporción (48%, 24 de 50), lo que sugiere que el acceso a datos completos de una terminal real facilita -aunque no garantiza- la validación del modelo. La relación no es estrictamente monótona: de los 28 estudios con datos reales pero simplificaciones operativas ("parcial"), solo 1 (4%) valida por completo, 7 validan parcialmente y 20 no reportan validación, una proporción de validación completa menor incluso que la de las terminales genéricas o hipotéticas (3 de 8; porcentaje referencial dado el tamaño reducido). El acceso parcial a datos reales, por tanto, no se traduce por sí solo en una validación más rigurosa.

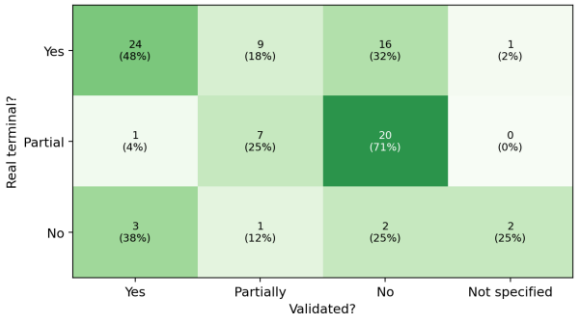


Figura 6: Validación cruzada con base en terminal real (porcentaje de fila; terminal real n=50, parcial n=28, genérica n=8).

Fuente: elaboración propia.

Entre los estudios validados (n=27 menciones de método, algunos con más de un método), el uso de datos históricos o reales es el método dominante (12 menciones), seguido por el juicio de expertos (5) y la comparación con otros modelos o simulaciones (4).

3.4 Integración de optimización

Solo el 34,9% de los estudios (30 de 86) integra algún método de optimización junto con la simulación; en 3 de ellos el método no se especifica. Entre los 27 restantes, la metaheurística (agrupando algoritmos evolutivos, OptQuest, recocido simulado, entre otros) es el enfoque más utilizado (11 estudios), seguida por la programación matemática (5) y el aprendizaje por refuerzo (5 estudios: 4 de aprendizaje por refuerzo clásico y 1 de aprendizaje por refuerzo profundo).

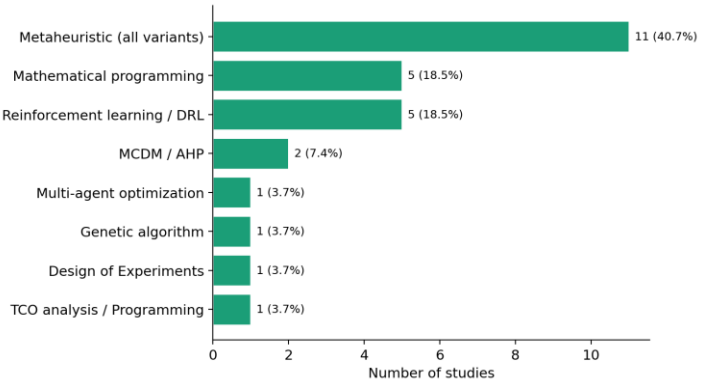


Figura 7: Métodos de optimización utilizados (estudios con optimización especificada, n=27).

Fuente: elaboración propia.

Al cruzar la integración de optimización con el horizonte temporal del modelo (Figura 8), se observa que los modelos de horizonte operacional integran optimización en mayor proporción (50,0%, 14 de 28) que los de horizonte estratégico (17,9%, 5 de 28), lo que es consistente con la naturaleza táctico-operativa de la mayoría de los problemas de optimización abordados (asignación de grúas, ruteo de AGV, despacho de camiones).

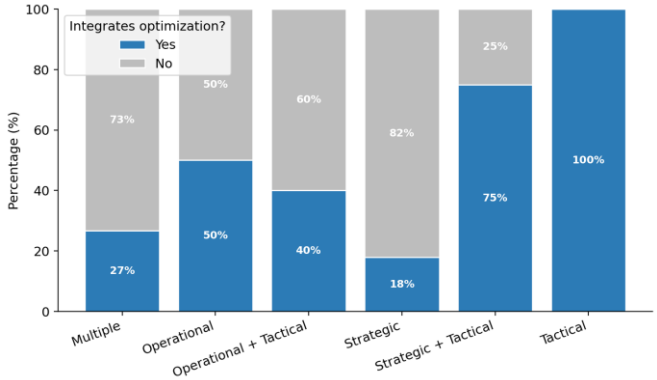


Figura 8: Integración de optimización según horizonte temporal del modelo.

Fuente: elaboración propia.

3.5 Sostenibilidad

El 39,5% de los estudios (34 de 86) considera explícitamente algún aspecto de sostenibilidad (emisiones, consumo energético, electrificación de equipos, entre otros) en su modelo de simulación, aunque solo 6 estudios (7,0%) la tratan como objetivo principal del modelamiento; el resto la incorpora como una métrica secundaria dentro de un modelo diseñado con otro propósito. Esta brecha entre sostenibilidad mencionada y sostenibilidad como objetivo de diseño sugiere que la simulación aplicada a terminales portuarias está, por ahora, mejor preparada para reportar los efectos ambientales de decisiones tomadas por otras razones que para optimizar activamente hacia metas de descarbonización. Aunque el 39,5% es considerablemente mayor que el observado para optimización, la mayoría de los estudios (60,5%) aún no incorpora esta dimensión, pese a la creciente presión regulatoria y de la industria marítima por reducir la huella ambiental de las operaciones portuarias.

3.6 Subprocesos estudiados

A nivel de subproceso específico, el ruteo/despacho de vehículos guiados automáticamente (AGV) es el más estudiado (14 menciones), seguido por la gestión de tráfico (12), y en menor medida la planificación de patio, la asignación de atraque y la programación de grúas pórtico (4-5 menciones cada una). La distribución por región (Figura 9) sugiere que estos subprocesos operativos se estudian de forma relativamente similar entre Asia-Pacífico y Europa, sin una especialización regional marcada.

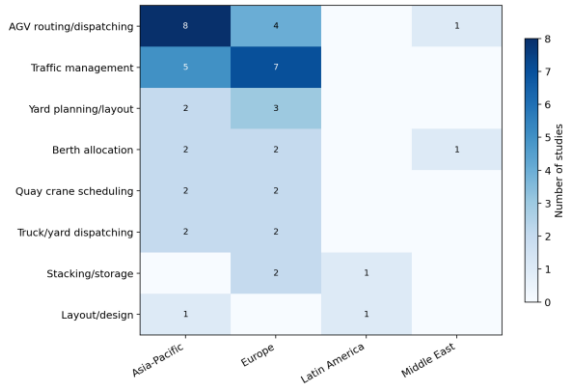


Figura 9: Subprocesos más estudiados por región (top 8 categorías).

Fuente: elaboración propia.

3.7 Síntesis: paradigma, objetivo del modelo y contexto económico

El cruce entre paradigma de simulación y objetivo del modelo confirma que DES se utiliza para la mayoría de los objetivos (evaluación de desempeño, planificación de capacidad y optimización), mientras que ABM y SDM se concentran en objetivos de evaluación múltiple y sostenibilidad, respectivamente, lo que es consistente con las capacidades de cada paradigma para representar comportamiento individual (ABM) o retroalimentación agregada de largo plazo (SDM) (Borshchev y Filippov, 2004).

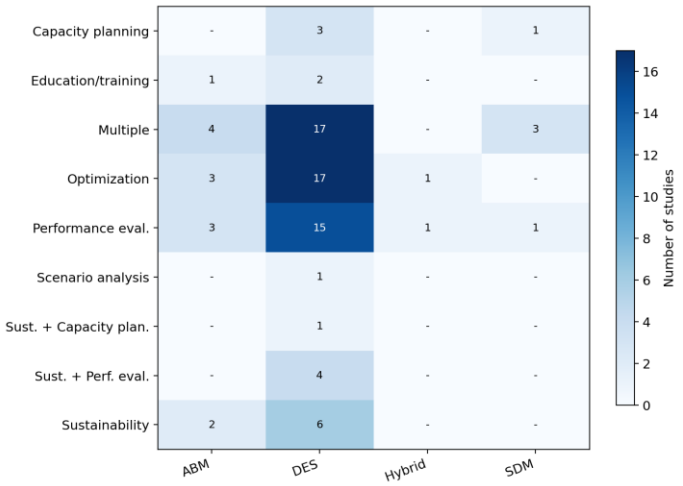


Figura 10: Paradigma de simulación cruzado con el objetivo del modelo.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la comparación según la clasificación económica del país (Figura 11) —43 estudios de países desarrollados y 36 de países en desarrollo; los 7 no clasificables, que incluyen los 2 estudios con optimización que completan el total de 30, se excluyen— muestra que los países en desarrollo integran optimización en una proporción considerablemente mayor (52,8%, 19 de 36) que los desarrollados (20,9%, 9 de 43), y reportan con más frecuencia validación completa (36,1% frente a 25,6%) y análisis de sensibilidad (30,6% frente a 16,3%), con niveles similares de sostenibilidad (38,9% frente a 41,9%). Esta comparación no es independiente de la regional: 30 de los 36 estudios de países en desarrollo provienen de Asia-Pacífico (20 de China) y 36 de los 43 de países desarrollados, de Europa. Región y nivel de desarrollo están fuertemente confundidos y el tamaño de la muestra no permite separar sus efectos; el único contraste disponible, dentro de Asia-Pacífico (57% frente a 33%, con solo 6 estudios de países desarrollados), no es concluyente. La brecha de optimización debe leerse como un rasgo de la producción asiática —en particular china—, probablemente asociado a terminales automatizadas y problemas tácticos, más que como un efecto atribuible por separado a la región o al nivel de desarrollo.

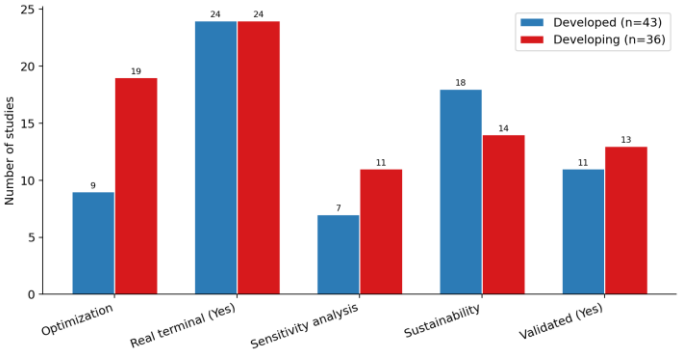


Figura 11: Comparación metodológica entre países desarrollados y en desarrollo.

Fuente: elaboración propia.

4 IMPLICACIONES PARA LA CONTRATACIÓN DE ESTUDIOS DE SIMULACIÓN

4.1 Exigencias mínimas para el mandante

Los resultados permiten formular un conjunto de exigencias que una empresa o autoridad portuaria puede incorporar en los términos de referencia de un estudio de simulación. Cada una responde a una brecha cuantificada en esta revisión:

(1) Validación contra datos de la propia terminal. El modelo debe reproducir indicadores observados (estadía de naves, productividad de grúas, ocupación de patio, tiempos de ciclo de camiones) en un período histórico definido, informando el error. El 44,2% de los estudios publicados no reporta validación, y los que usan datos reales simplificados validan por completo en solo 1 de 28 casos.

(2) Análisis de sensibilidad sobre los supuestos críticos. Demanda, mezcla de carga, productividades y disponibilidad de equipos deben variarse en rangos plausibles, informando si la recomendación cambia. Solo el 23,3% de los estudios lo hace.

(3) Declaración explícita de simplificaciones. Qué procesos se modelaron en detalle, cuáles se agregaron u omitieron y por qué. Un tercio del corpus (32,6%) trabaja con datos reales simplificados sin que ello se traduzca en mejor validación.

(4) Justificación del paradigma. DES es el estándar para operaciones de muelle, patio y puerta; ABM o SDM se justifican cuando el problema involucra comportamiento de actores heterogéneos o dinámicas agregadas de largo plazo (sección 3.7).

(5) Distinguir evaluación de optimización. Si el estudio promete la configuración "óptima", debe declarar el método de optimización y cómo se acopló a la simulación; de lo contrario, se trata de una comparación de escenarios. Solo el 34,9% del corpus integra optimización, y en 3 de esos estudios el método no se especifica.

(6) Sostenibilidad como objetivo, cuando corresponda. Si la decisión tiene un componente de emisiones o energía, este debe ser objetivo o restricción del modelo y no solo un indicador reportado al final: apenas el 7,0% de los estudios la trata como objetivo principal.

4.2 Transferibilidad a terminales multipropósito y graneleras

Ningún estudio del corpus modela una terminal multipropósito, solo uno trata granel sólido y los tres casos latinoamericanos son de contenedores: la literatura ofrece un respaldo marginal para el tipo de terminal que predomina en el sistema portuario chileno. Los modelos DES desarrollados para contenedores son transferibles en su lógica general —colas de atraque, asignación de recursos, flujo muelle-patio-puerta—, pero no en sus parámetros ni en varios de sus supuestos. En terminales multipropósito, un mismo sitio atiende naves y cargas heterogéneas con productividades muy distintas, la secuencia de atraque depende del tipo de carga y de ventanas comerciales, y el almacenamiento combina explanadas, bodegas y silos; en terminales graneleras predominan procesos de flujo continuo (correas, cargadores de naves) condicionados por el stock, la meteorología y el transporte terrestre, que suelen requerir enfoques híbridos. Quien modela hoy una terminal multipropósito o granelera en Chile lo hace, por tanto, sin evidencia publicada comparable que sirva de referencia de parámetros o de validación. Este

es el resultado más relevante de la revisión para la práctica portuaria nacional, y hace aún más necesarias las exigencias de la sección 4.1: la validación contra datos propios es, en ese contexto, el único respaldo disponible.

5 DISCUSIÓN

Los resultados confirman el predominio histórico de la simulación de eventos discretos en el estudio de terminales portuarias, en línea con la literatura previa (Steenken, Voß y Stahlbock, 2004; Angeloudis y Bell, 2011). Sin embargo, este trabajo aporta evidencia cuantitativa novedosa sobre tres brechas metodológicas que las revisiones anteriores no habían cuantificado de forma sistemática: (i) una integración limitada de optimización (34,9%), con una brecha marcada entre Asia-Pacífico y Europa; (ii) un uso escaso de análisis de sensibilidad (23,3%) y una proporción considerable de estudios sin validación reportada (44,2%); y (iii) una incorporación aún mayormente secundaria de la sostenibilidad (39,5% la menciona, pero solo 7,0% la trata como objetivo principal), pese a su relevancia creciente para la industria portuaria.

Respecto de revisiones posteriores a las de Angeloudis y Bell (2011) y Dragović, Tzannatos y Park (2017), Kastner, Pache y Jahn (2019) sistematizaron la optimización basada en simulación en terminales de contenedores, centrándose en los problemas abordados y las metaheurísticas empleadas, y Klar, Fredriksson y Angelakis (2023) revisaron el concepto de gemelo digital aplicado a puertos. A diferencia de ambas, este trabajo cubre todos los paradigmas de simulación y tipos de terminal, y cuantifica el rigor metodológico y su variación regional. La ausencia de estudios de gemelos digitales en el corpus debe interpretarse con cautela: la cadena de búsqueda no incluyó ese término y exigía el tipo de terminal en el título, por lo que probablemente se trata de un efecto de la estrategia de búsqueda y no de un hallazgo sobre el campo.

La marcada subrepresentación de América Latina (3,5% de los estudios) constituye una limitación relevante de la base de evidencia disponible y, al mismo tiempo, una oportunidad de investigación: la aplicación de los paradigmas y prácticas metodológicas identificados en este SLR -en particular la integración de optimización y sostenibilidad- a terminales portuarias latinoamericanas representa una línea de trabajo con alto potencial de contribución, tanto académica como práctica. Esta oportunidad es especialmente clara en terminales multipropósito y graneleras, donde la evidencia publicada es prácticamente inexistente (sección 4.2).

Como toda revisión sistemática, este estudio presenta limitaciones. La búsqueda se restringió a dos bases de datos (Scopus y WoS) y a artículos de revista, excluyendo actas de congresos —entre ellas las de la Winter Simulation Conference, relevante en este campo— y literatura gris; además, los términos de tipo de terminal se buscaron solo en el título. Por otra parte, 42 de los 153 registros que superaron el cribado (27,5%) no pudieron recuperarse en texto completo, y no puede descartarse que su inclusión alterara las distribuciones reportadas. La codificación de variables fue realizada por un revisor por estudio, sin índice formal de concordancia, y la clasificación de subprocesos y métodos de optimización conserva un grado de interpretación. Finalmente, no se aplicó un instrumento de evaluación de calidad o riesgo de sesgo: los indicadores de validación y sensibilidad describen lo que los estudios reportan, no la calidad de su ejecución.

6 CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una revisión sistemática de 86 estudios sobre simulación de operaciones portuarias, siguiendo la estructura PRISMA 2020. Los hallazgos muestran un campo dominado por la simulación de eventos discretos aplicada mayoritariamente a terminales de contenedores, con una integración aún limitada de optimización, validación formal y sostenibilidad, y una concentración geográfica de la producción científica en Asia-Pacífico y Europa. Estas brechas -metodológicas y geográficas- delimitan agendas de investigación concretas: modelos híbridos que integren optimización y sostenibilidad de forma sistemática, mayor rigor en la validación y el análisis de sensibilidad, y una mayor producción de estudios aplicados a terminales de regiones subrepresentadas como América Latina. Para la práctica portuaria, el mensaje principal es que un estudio de simulación no es confiable por el solo hecho de existir: validación contra datos propios, análisis de sensibilidad y declaración de simplificaciones deben exigirse explícitamente, con mayor razón en terminales multipropósito y graneleras.

REFERENCIAS

Angeloudis, P. y Bell, M.G.H. 2011. A review of container terminal simulation models. Maritime Policy & Management, 38(5), 523-540.

Borshchev, A. y Filippov, A. 2004. From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society, Oxford, Inglaterra.

Dragović, B., Tzannatos, E. y Park, N.K. 2017. Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool. Flexible Services and Manufacturing Journal, 29, 4-34.

Kastner, M., Pache, H. y Jahn, C. 2019. Simulation-based optimization at container terminals: a literature review. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), 28, 111-135.

Klar, R., Fredriksson, A. y Angelakis, V. 2023. Digital twins for ports: derived from smart city and supply chain twinning experience. IEEE Access, 11, 71777-71799.

López-González, A., Medina-León, S.V., González-Angeles, A., Mendoza-Muñoz, I. y Gil-Samaniego-Ramos, M. 2020. Assessment of a container terminal expansion using simulation. DYNA, 87(214), 129-138.

Moros-Daza, A., Castro, D., Bonifacio, J., Amaya-Mier, R. y Voß, S. 2024. Greening container terminals: an innovative and cost-effective solution for sustainable reefer container storage. Journal of Cleaner Production, 466, 142664.

Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., et al. 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71.

Steenken, D., Voß, S. y Stahlbock, R. 2004. Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. OR Spectrum, 26(1), 3-49.

Tranfield, D., Denyer, D. y Smart, P. 2003. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. British Journal of Management, 14(3), 207-222.

Vera-Carrasco, C., Palma, C.D. y Muñoz-Herrera, S. 2025. From efficiency to safety: a simulation-based framework for evaluating empty-container terminal layouts. Journal of Marine Science and Engineering, 13(8), 1424.