





# Systematic Literature Review on the operational efficiency of Logistic in Port Management: analysis of Simulation and Linear Programming methodologies





Gomez Cancino Nallely Milagros<sup>1</sup>; Tanga Huaman, Emely Susan Milagros<sup>2</sup>; Segura Peña, Lidia Victoria<sup>3</sup>; Torres Mayanga, Paulo Cesar<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup>First to fourth Author's Universidad Tecnológica del Perú, Perú, [U20307454@utp.edu.pe](mailto:U20307454@utp.edu.pe), [U20207470@utp.edu.pe](mailto:U20207470@utp.edu.pe), [C19365@utp.edu.pe](mailto:C19365@utp.edu.pe), [C22786@utp.edu.pe](mailto:C22786@utp.edu.pe)

**Abstract-** Efficient port management is important for maritime trade. In the optimization of logistic processes, this study examines the use of methodologies such as Simulation and Mixed Integer Linear Programming (MILP). It is highlighted that these methodologies are effective in identifying and correcting inefficiencies, which contributes to cost reduction. In addition, the importance of optimizing resources is analyzed, as this maximizes productivity. This systematic review suggests that an integrated approach that combines both Simulation and MILP methodologies would facilitate adaptability to changing market demands. Finally, it is essential to continue exploring new technologies and analyzing data for better results and operational efficiency.

**Keywords-** operational efficiency, logistics, methodologies, optimization, port management.

# Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) sobre la eficiencia operativa de la Logística en la Gestión Portuaria: análisis de las metodologías de Simulación y Programación Lineal

Gomez Cancino Nallely Milagros<sup>1</sup>; Tanga Huaman, Emely Susan Milagros<sup>2</sup>; Segura Peña, Lidia Victoria<sup>3</sup>; Torres Mayanga, Paulo Cesar<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup>First to fourth Author's Universidad Tecnológica del Perú, Perú, [U20307454@utp.edu.pe](mailto:U20307454@utp.edu.pe), [U20207470@utp.edu.pe](mailto:U20207470@utp.edu.pe), [C19365@utp.edu.pe](mailto:C19365@utp.edu.pe), [C22786@utp.edu.pe](mailto:C22786@utp.edu.pe)

**Resumen-** La gestión portuaria eficiente es importante para el comercio marítimo. En la optimización de procesos logísticos, este estudio examina el uso de metodologías como la Simulación y la Programación lineal de enteros mixtos (MILP). Se destaca que estas metodologías son efectivas para identificar y corregir ineficiencias, lo que contribuye a la reducción de costos. Además, se analiza la importancia de optimizar los recursos, ya que esto maximiza la productividad. Esta revisión sistemática sugiere que un enfoque integral que combine tanto la metodología de Simulación como la MILP facilitaría la adaptabilidad de las cambiantes demandas del mercado. Por último, es fundamental seguir explorando nuevas tecnologías y analizar datos para obtener mejores resultados y eficiencia operativa.

**Palabras clave-** eficiencia operativa, logística, metodologías, optimización, gestión portuaria.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria portuaria ha experimentado cambios significativos debido a factores como las tensiones geopolíticas, las variaciones en las políticas comerciales globales y la creciente demanda de eficiencia en la cadena de suministro. Estos desafíos han afectado de manera crítica la operación de los puertos, generando problemas como el aumento en el tiempo de almacenamiento de contenedores, retrasos en el tránsito marítimo y mayores costos de combustibles debido a la necesidad de acelerar la navegación [1][2][3]. Como consecuencia, la eficiencia operativa de los puertos se ha visto comprometida, afectando no solo la rentabilidad de las operaciones, sino también la competitividad de las terminales en el comercio internacional.

Entre las principales deficiencias logísticas identificadas se encuentran la gestión inadecuada del almacenamiento, los problemas de tráfico marítimo, la deficiente planificación de rutas de acceso y la congestión en la asignación de muelles [4][5]. Estos factores impactan directamente en los costos operativos y en los niveles de servicio ofrecidos, subrayando la necesidad de optimizar los procesos logísticos dentro de la gestión portuaria. En este contexto, el enrutamiento eficiente de buques, la reducción de tiempo de carga y descarga, y la asignación óptima de recursos como grúas y vehículos

internos son elementos críticos para lograr una operación más eficiente [6], [7].

La optimización de la logística portuaria se ha abordado mediante el uso de diversas metodologías, destacándose especialmente la Simulación y la programación lineal de Enteros mixtos (MILP). Estas técnicas permiten analizar escenarios operativos, prever cuellos de botella y mejorar la toma de decisiones estratégicas. La simulación ofrece una representación dinámica y flexible de los procesos portuarios, siendo ideal para gestionar situaciones complejas y de alta incertidumbre. Por otro lado, la MILP proporciona soluciones óptimas en problemas estructurados con restricciones claramente definidas, como la programación de atraques y la asignación de recursos críticos [5], [7].

La importancia de optimizar la eficiencia operativa en los puertos va más allá de la simple reducción de costo. Una gestión logística eficiente permite disminuir tiempo de permanencia de buques, aumentar la rotación de contenedores, mejorar el aprovechamiento de la infraestructura existente y ofrecer servicios más competitivos. Estos factores son esenciales para fortalecer la posición estratégica de los puertos en el mercado global.

Además, las tendencias actuales en la logística portuaria apuntan a la integración de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA), machine learning y el análisis avanzado de datos. La combinación de técnicas de optimización tradicionales como la MILP con algoritmos inteligentes permite el desarrollo de puertos inteligentes, capaces de adaptarse de manera autónoma a cambios en la demanda y condiciones operativas [8], [9]. Esta sinergia tecnológica no solo mejora la eficiencia, sino que también abre nuevas oportunidades para la automatización, sostenibilidad y la resiliencia de las operaciones portuarias.

En este contexto, el presente estudio tiene como finalidad realizar una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) sobre el uso de metodologías de simulación y programación en la optimización de la eficiencia operativa en la gestión portuaria. Se busca identificar los principales desafíos

logísticos, analizar la efectividad de las metodologías aplicadas en función de la complejidad de los problemas, y explorar cómo la incorporación de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático puede fortalecer la competitividad de los puertos frente a un mercado en constante cambio. El documento se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe la metodología empleada, detallando la estrategia de búsqueda y los criterios de selección de estudios; en la Sección 3 se presentan los resultados, incluyendo el análisis de los datos relevantes y la respuesta a las preguntas de investigación formuladas; la Sección 4 discute los hallazgos en función de la naturaleza de los problemas logísticos y la eficacia de las metodologías evaluadas; finalmente, en la Sección 5 se sintetizan las conclusiones y se proponen recomendaciones orientadas a mejorar la gestión logística en la industria portuaria.

#### METODOLOGÍA

Para garantizar la rigurosidad y la relevancia de esta revisión sistemática, se aplicó el modelo PICOC para la formulación de las preguntas de investigación y la estrategia de búsqueda de literatura. Asimismo, se utilizó el diagrama de flujo PRISMA para organizar el proceso de selección de estudios. [10].

Para guiar la construcción de la estrategia se empleó el modelo PICOC, que permitió definir con precisión los elementos de interés; tales como Población, Intervención, Comparación, Resultados y Contexto, como se presenta en la Tabla I.

TABLA I  
METODOLOGÍA PICOC

P	I	C	O	C
Eficiencia operativa en el área logística	La implementación de metodologías de optimización	Metodologías de optimización más utilizadas para la eficiencia operativa	Resultados de eficiencia operativa de las metodologías más utilizadas	Gestión portuaria

Este enfoque facilitó delimitar el campo de análisis, asegurando que los estudios seleccionados respondieran directamente a los objetivos planteados en la revisión.

#### A. Pregunta PICO y sus componentes

Con base en los elementos anteriormente mencionados, se planteó la siguiente pregunta principal de investigación. **¿Qué metodologías de optimización se utilizan para determinar los resultados de eficiencia operativa en el área logística de la gestión portuaria?**

A partir de esta pregunta general, se derivaron las siguientes preguntas específicas:

TABLA II  
PREGUNTAS PICO

P	RQ1:	¿Cómo se ha definido la eficiencia operativa en el área logística?
I	RQ2:	¿Qué modelos o enfoques de las metodologías de optimización se han desarrollado en la logística portuaria?

C	RQ3:	¿Cómo se comparan las metodologías de optimización en términos de eficacia y naturaleza del problema?
O	RQ4:	¿Cómo se refleja la eficiencia operativa al aplicar las metodologías de optimización?

Estas preguntas guiaron la recopilación, el análisis y la categorización de la literatura revisada.

#### B. Palabras claves pertinentes

Para realizar una búsqueda precisa en la base de datos Scopus, se seleccionaron palabras clave específicas para cada componente PICOC. Estas palabras clave y sus sinónimos permitieron ampliar el alcance de los resultados relevantes, como se muestra en la siguiente tabla 3:

TABLA III  
PALABRAS CLAVE PARA LA REVISIÓN SISTEMÁTICA

COMP.	PALABRAS CLAVE	KEYWORDS
P	Logistic Area	Logistics Area, Logistic Department
I	Optimization methodology	Optimization Methodology, Optimization Methodologies, Optimal Methodologies
C	Methodology	Methodology, methods
O	Operational Efficiency	Operational efficiency, operative efficiency, operational effectiveness, operational performance
C	Port management	Port Management, Harbor Operations, Port Administration

La correcta elección de términos y su combinación optimizó la relevancia de los estudios recuperados.

#### C. Ecuación de búsqueda

La estrategia de búsqueda combinó los términos anteriores mediante operadores booleanos "AND" y "OR", y se aplicaron filtros para asegurar la pertinencia de los resultados, resultando en la siguiente ecuación: ( TITLE-ABS-KEY ( port AND management OR logistic AND optimization ) ) AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025 AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025 AND ( LIMIT-TO ( PUBSTAGE,"final" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA,"ENGI" ) ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"MATH" ) ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"BUSI" ) ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"COMP" ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE,"ar" ) ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE,"English" ) ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE,"Chinese" ) ) OR LIMIT-TO ( LANGUAGE,"Spanish" ) ) ) AND ( LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Optimization" ) ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Maritime Transportation" ) ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Ships" ) ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Port Operation" ) ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Containers" ) ) OR LIMIT-TO (

EXACTKEYWORD,"Port Terminals" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Shipping" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Algorithm" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Ports And Harbors" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Costs" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Simulation" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Efficiency" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD,"Logistics" ) )

La búsqueda se realizó el 3 de octubre de 2024 exclusivamente en la base de datos Scopus, recuperándose un total de 237 artículos iniciales.

#### D. Criterios de inclusión y exclusión

Para asegurar la calidad y pertinencia de los estudios, se establecieron los siguientes criterios:

Criterios de Inclusión:

CI1: Publicaciones entre 2019 y 2024

- CI2: Área temática de Ingeniería, computación, Matemáticas, Negocios o Gestión.
- CI3: Tipo de documento: artículos de investigación
- CI4: Fase de publicación finalizada.
- CI5: Uso de palabras clave pertinentes.
- CI6: Redacción en inglés, español o chino.

Criterios de Exclusión:

- CE1: Artículos sin Identificador de Objeto Digital (DOI)
- CE2: Artículos sin acceso libre y gratuito
- CE3: Artículos no relacionados directamente con el área de logística portuaria.

Estos criterios permitieron refinar la selección hacia estudios de alta relevancia y calidad metodológica.

#### E. Proceso de selección

La selección de artículos se estructuró siguiendo el flujo del modelo PRISMA. Inicialmente se recuperaron 237 artículos. Posteriormente, en la primera etapa de cribado, se eliminaron 132 artículos por no disponer de acceso libre y uno por acceso incierto, quedando 104 artículos para revisión de resúmenes. De estos, 53 artículos fueron descartados por no abordar específicamente la eficiencia operativa en logística portuaria. En una segunda etapa, se revisaron en su totalidad los 51 artículos restantes, de los cuales 28 fueron excluidos por no ajustarse a los objetivos de la revisión. Finalmente, se integraron 23 artículos seleccionados, junto con un artículo adicional encontrado en Researchgate, alcanzando un total de 24 artículos analizados [11].

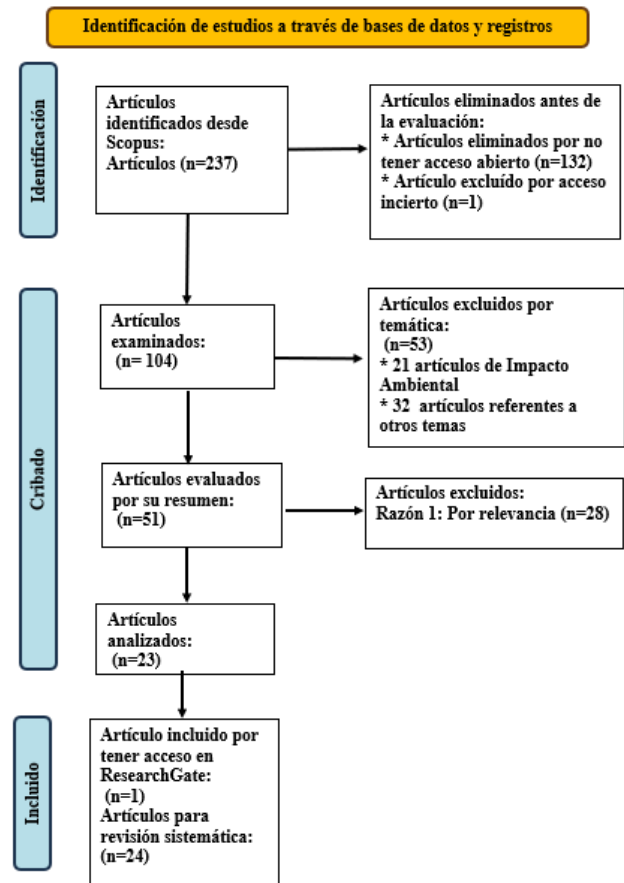


Fig. 1 Diagrama del flujo PRISMA.

### III. RESULTADOS

Este estudio sistematizó los hallazgos de 24 artículos seleccionados tras aplicar la metodología de búsqueda basada en PICOC y el flujo PRISMA. Los resultados se presentan a continuación, organizados de acuerdo a los aspectos principales de análisis.

La distribución anual de las publicaciones es mostrada en la Figura 2, la cual evidencia un creciente interés por el tema de optimización logística portuaria en los últimos años. El año 2023 concentra el mayor número de artículos revisados, mientras que en 2019 se identificó solo un estudio relacionado con la asignación de ataques [12].



Fig.2 Cantidad de publicaciones por año

Este aumento progresivo refleja la preocupación de la comunidad científica y profesional por fortalecer la eficiencia operativa ante la evolución constante del comercio marítimo y la globalización de las cadenas de suministro.

Con respecto a los estudios más citados y su respectivo impacto, la Figura 3 presenta el número de citas recibidas por los artículos analizados. Aunque una proporción significativa de los artículos presenta escaso número de citas, destacan trabajos como el realizado por Naumov et al, [13], que mostro una alta cantidad de referencias, señalando su relevancia en el campo. Este patrón sugiere que, si bien la temática está en una tendencia de expansión, existe una concentración de influencia en pocos estudios, lo que podría guiar futuras investigaciones hacia enfoques consolidados.



Fig. 3 Artículos más citados.

Por otro lado, en esta área es importante destacar los principales desafíos identificados, los cuales se resumen en la Tabla IV. Los resultados muestran que el desafío más reportado es la gestión de almacenamiento, derivada de problemas de capacidad y planificación [2], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]. El tráfico marítimo y la asignación de muelles también emergen como factores críticos que afectan directamente los costos operativos y el tiempo de respuesta portuario [19], [20], [21], lo cual se relaciona con un problema fundamental que impacta la eficiencia operativa, ya que está vinculado a los costos de espera y demora en la carga y descarga de los navíos [4].

Estos hallazgos refuerzan la necesidad de estrategias de optimización que aborden no solo la operación individual de terminales, sino también la coordinación interinstitucional y la planificación de infraestructura.

TABLA IV  
DESAFÍOS EN LA LOGÍSTICA PORTUARIA

Desafíos	Artículos
Atrake de los buques (congestión)	[1], [21], [22]
Cambios en la red vial	[15]
Cargos de sobrestadías	[23]
Enrutamiento	[4], [24]
Falta de comunicación	[11], [19]
Gestión del almacenamiento	[2], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]
Insuficiente capacidad de transporte	[25], [26], [27]
Manipulación de contenedores	[26]

Tardanza de carga y descarga	[13], [25]
Tiempo de permanencia de buques	[23], [28]
Tráfico marítimo	[3], [29], [19], [30], [1], [11]
Asignación de muelles	[21], [20], [2], [18]

#### A. Resultados de las preguntas PICO

En esta sección se presentan los resultados organizados de acuerdo a las preguntas de investigación formuladas bajo la estrategia PICOC.

Posterior a la identificación de los desafíos, se analizó el tipo de metodologías de optimización empleadas en los estudios seleccionados. La Figura 4 evidencia que la simulación es la técnica más frecuentemente utilizada, seguida de la programación lineal de enteros mixtos (MILP).

La simulación destaca por su flexibilidad para modelar escenarios dinámicos, evaluar alternativas bajo condiciones de incertidumbre y facilitar la toma de decisiones estratégicas [5], [16]. Por otro lado, la MILP sobresale en contextos donde la asignación óptima de recursos bajo restricciones matemáticas es prioritaria [4]. Esto responde directamente a la pregunta de investigación principal, confirmando que ambas metodologías constituyen pilares fundamentales en la optimización de procesos logísticos portuarios.

Los resultados de los artículos analizados se representan en la figura 5, la cual muestra que la eficiencia operativa se define principalmente como la reducción de costos logísticos, tiempos de operación y periodos de permanencia de los buques [15], [16], [29]. Además, algunos autores incluyen en el concepto sobre la optimización del uso de equipamientos portuarios, como grúas de muelle y vehículos internos [16], [31]. Estos resultados confirman que, para la mayoría de los estudios, mejorar la eficiencia implica no solo gestionar costos, sino también maximizar la utilización de los recursos disponibles, lo que impacta directamente en la competitividad de los puertos.

Asimismo, otra solución relevante en los artículos es la Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP), que puede ayudar a determinar la mejor manera de asignar recursos limitados, las restricciones de enrutamiento y las interacciones con las operaciones de carga y almacenamiento [4], maximizando así la capacidad operativa y minimizando los tiempos de espera.

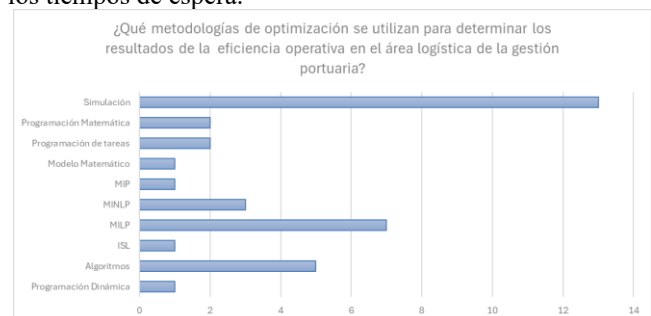


Fig. 4 Metodologías de optimización en la logística portuaria.

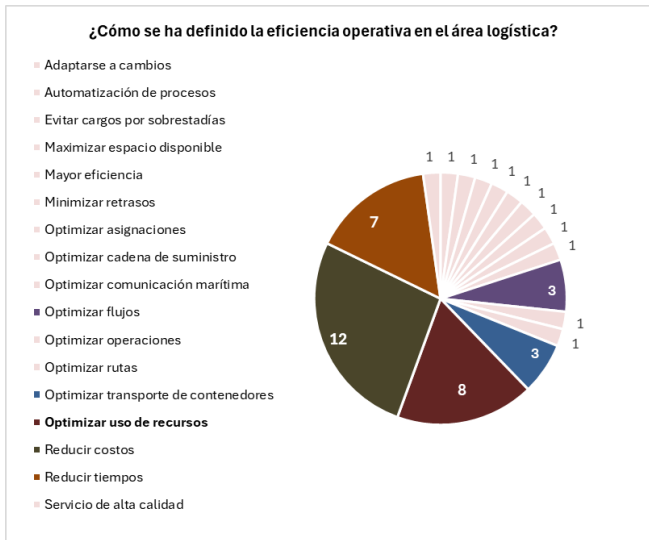


Fig. 5 Definición de la eficiencia operativa en el área logística.

En la Figura 6, relativo a la RQ2, se presentan los modelos y enfoques de las metodologías de optimización implementadas en la logística portuaria y, entre las más comunes se encuentra el Algoritmo Genético (AG), que está relacionado con la metodología de Simulación y MILP. En la investigación de Zhao et al.,[25] mencionan que el AG fue utilizado para optimizar las soluciones, y los resultados finales fueron obtenidos a través de la simulación. Además, el enfoque heurístico está relacionado con la Simulación y Programación, ya que se integra con estas para abordar los terminales de transporte, relacionándose de manera efectiva con la simulación [13]. Asimismo, el modelo Multiobjetivo está estrechamente ligado a la Simulación, dado que, en conjunto, fortalecen la efectividad de las soluciones ofrecidas ante eventos disruptivos no planificados. Esto permite minimizar el impacto en el sistema portuario de manera más eficiente [28].

Un caso práctico en donde se destaca la aplicación de metodologías de optimización en la logística portuaria se encuentra en el desarrollo de modelos de Programación con Restricciones (CP) para la planificación de atraque en puertos dependientes de las mareas. Según el estudio presentado en el artículo “Planificación de atraque y recuperación de interrupciones en tiempo real: un estudio de simulación para un puerto de mareas”, estos modelos fueron diseñados para reducir el tiempo de espera de los buques en un puerto de río europeo, considerando variables complejas como las llegadas cíclicas, las ventanas de marea y el calado de las embarcaciones [21].

La implementación de esta metodología permitió generar planes de atraque más eficientes y realistas, adaptados a las condiciones operativas específicas del puerto. En términos operativos, la herramienta desarrollada facilita la asignación anticipada y optimizada de espacios en el muelle, reduciendo los tiempos de espera y aumentando la rotación de buques. Como resultado, se logró un mejor aprovechamiento de la infraestructura existente, lo que no solo mejora la eficiencia continua en el puerto, sino que también sirve de soporte para

la toma de decisiones estratégicas sobre posibles expansiones futuras mediante simulaciones realistas [21]. Este caso demuestra cómo los modelos de optimización no solo ofrecen soluciones teóricas, sino que pueden traducirse en herramientas concretas de soporte a la decisión, con impacto directo en la competitividad y capacidad operativa de los puertos [21].

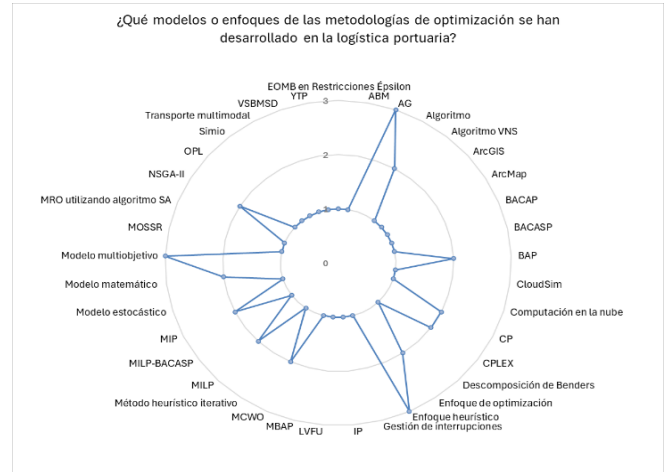


Fig. 6 Modelos o enfoques de las metodologías de optimización en la logística portuaria.

En la Figura 7, alusivo a la RQ3, se comparan diversas metodologías de optimización en términos de eficacia, lo que nos ayuda a evaluar la opción más apropiada para abordar el problema presentado. Como se observa en la gráfica, las metodologías más utilizadas son la Simulación y la Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP). De éstas, la simulación obtiene mayor puntuación, posicionándose como la más adecuada. Esto se debe a que permite representar situaciones del mundo real usando un conjunto de datos, como los volúmenes, tiempos de carga u descarga en terminales, entre otros, con la finalidad de prescribir la cantidad necesaria de buques para mejorar el rendimiento y que ofrece una solución más realista y óptima [20]. Por otro lado, la metodología MILP resulta esencial porque modifica las restricciones de la relación espacio-tiempo, lo que mejora el rendimiento y produce soluciones más precisas, brindando beneficios significativos en términos de eficacia [1]. La gráfica muestra que estas 2 metodologías cumplen con los 3 términos de eficacia, en comparación con los demás que solo cumplen con una.

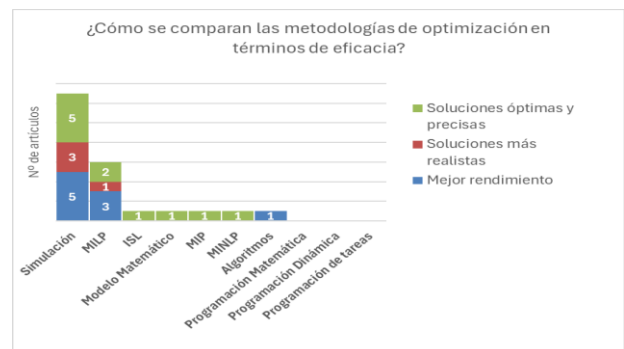


Fig. 7 Comparación de las metodologías de optimización en términos de eficacia.

Asimismo, en la Figura 8, se analizan las metodologías de optimización dependiendo de la naturaleza del problema que abordan. La gráfica destaca las características específicas de cada tipo de problema, evidenciando que la simulación es la metodología más versátil, lo que la hace especialmente adecuada para enfrentar problemas complejos y dinámicos. Su capacidad para modelar situaciones del mundo real es crucial, especialmente en problemas de incertidumbre y de variabilidad, que son los más frecuentes, por ende, es de mayor relevancia [20], [26]. Otras metodologías, como el MILP, son efectivas para problemas estructurados que involucran restricciones matemáticas, mostrando su importancia en contextos de congestión de tráfico en la asignación de muelles, en donde se gestionan recursos como las grúas [12]. Este análisis permite seleccionar la metodología más adecuada según la naturaleza del problema, facilitando la toma de decisiones con la finalidad que sea más informada y efectiva.

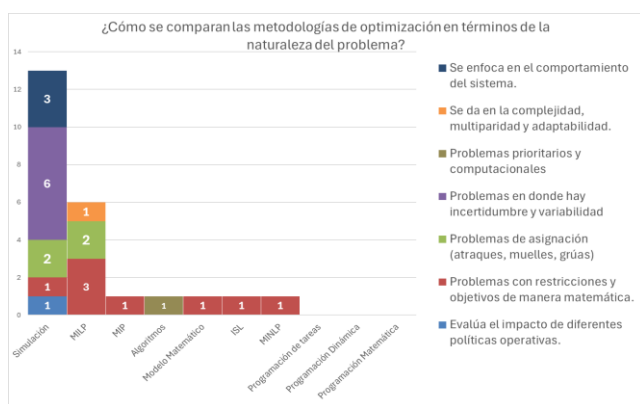


Fig. 8 Metodologías de optimización en términos de la naturaleza del problema.

Por último, en la Figura 9, referente a la RQ4, se analizan como se refleja la eficiencia operativa tras identificar los desafíos mencionados en los artículos revisados y la metodología aplicada a cada caso. Uno de los resultados más significativos es la disminución de costos, que tiene una mayor frecuencia en comparación con los demás. Esto se logró mediante el aumento de las tarifas del servicio trenbarco, una mejor utilización de los recursos, y la optimización del rendimiento, lo cual está relacionado con el número de contenedores y la mejora del transporte intermodal, garantizando así las entregas el mismo día [25], [26]. Otro resultado importante es la mejor eficiencia operativa, este resultado permitió equilibrar el servicio con los parámetros de la demanda en las terminales, optimizando el uso de recursos disponibles, así como la manipulación eficiente de las máquinas en los muelles y se mejoró el nivel de servicio del puerto [15].

La aplicación de metodologías de optimización también aporta a la eficiencia operativa desde una perspectiva estratégica, como lo demuestra el caso del Puerto de Shuwaikh en Kuwait. Allí se desarrolló un sistema automatizado basado en programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) para proyectar el impacto de un crecimiento del 1.8% en la demanda de carga. El modelo predijo que el

puerto alcanzaría su capacidad máxima en ocho años, lo que permitió planificar con anticipación la expansión necesaria para el año 2025 [11]. Esta herramienta facilitó la toma de decisiones informadas en aspectos fundamentales como el diseño de infraestructuras, la asignación presupuestaria y la modernización de equipos. Asimismo, facilitó el monitoreo de indicadores operativos críticos, anticipando cuellos de botella y garantizando la continuidad del servicio sin pérdida de eficiencia, incluso en escenarios de crecimiento sostenido. De este modo, el modelo no solo optimiza la planificación futura, sino que fortalece la gestión operativa en tiempo real [11].

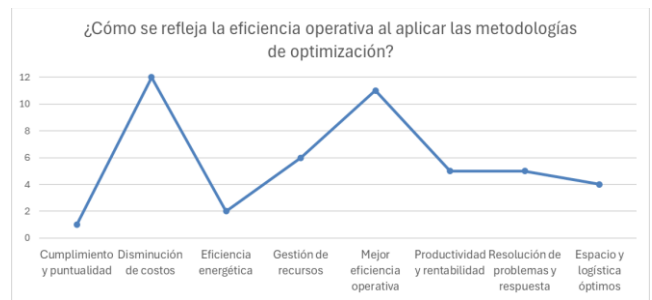


Fig. 9 Eficiencia operativa de metodologías de optimización.

Estos resultados reafirman el papel crucial que juegan las herramientas de optimización en la toma de decisiones estratégicas para el desarrollo sostenible de los puertos.

#### IV. DISCUSIÓN

La presente revisión sistemática permitió identificar y analizar las metodologías de optimización aplicadas en la logística portuaria, enfocándose en su impacto sobre la eficiencia operativa. Los resultados obtenidos confirman que tanto la simulación como la programación lineal de enteros mixtos (MILP) son herramientas clave para abordar los desafíos actuales en la gestión portuaria.

El análisis de la Figura 4 evidenció que la simulación es la metodología más utilizada, gracias a su capacidad para modelar diversas condiciones operativas y evaluar estrategias bajo escenarios dinámicos. Esto respalda su amplio uso en estudios recientes que buscan replicar la complejidad de las operaciones portuarias. La MILP, por su parte, destaca como una herramienta efectiva para optimizar problemas estructurados que involucran restricciones específicas de espacio, tiempo y recursos [1], [4]. Un aspecto fundamental de la simulación es su capacidad de abordar diversos problemas y replicar situaciones del mundo real [20], convirtiéndolo así en una herramienta útil para todos los actores del sector marítimo, especialmente las navieras, y en un enfoque de valor añadido para todos los puertos de la cadena de transporte [17]. Como se menciona en la Figura 4, muchos artículos destacan la simulación como una solución preferida, ya que representa de manera abstracta y simplificada un sistema, ajustándose al nivel necesario para cumplir los objetivos [18]; sin embargo, implementar la metodología de simulación es altamente costosa [24]. Por otro lado, la Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP) se considera una herramienta relevante para abordar problemas que surgen ante cambios significativos en la

demanda de transporte, especialmente cuando es necesario ajustar la estrategia de almacenamiento debido a la falta de espacio [14]. La referencia [4], afirma que al permitir la asignación óptima de recursos limitados y abordar restricciones de enrutamiento, la metodología MILP maximiza la capacidad operativa y minimiza los tiempos de espera. Pero, si se implementan estas metodologías en los puertos, no solo se optimizan las operaciones de línea [15], sino que también se vuelven más competitivos en un mercado global, donde la rapidez y la eficiencia son cruciales para satisfacer las demandas del comercio marítimo. Las metodologías de optimización, como la simulación y la Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP), se alinean con los puntos mencionados en la introducción. En esta última, se enfatiza la relevancia de estas herramientas para abordar ineficiencias operativas en la logística portuaria. Por lo tanto, la interrelación entre la teoría presentada en la introducción y los hallazgos prácticos refuerzan la idea de que la adopción de estas metodologías no solo es beneficiosa, sino esencial para la competitividad en el mercado global. Asimismo, se observa que los puertos que invierten en la capacitación y tecnología logran optimizar sus operaciones de manera más efectiva.

La RQ1, se enfoca en la definición de la eficiencia operativa en la logística portuaria, dado que es tema de gran importancia. Tal como se indica en la Figura 5, los estudios convergen en considerar la reducción de costos y tiempos como los principales indicadores de desempeño [15], [16], [29]. De acuerdo con Zhao et al., Duan, Li y Yang [29], es fundamental porque el costo total del servicio de la ruta de envío influye directamente a la productividad y la velocidad. Esta perspectiva se complementa con la necesidad de gestionar cuidadosamente los costos de combustible de los camiones y el alquiler de contenedores en las terminales [15]. La reducción de estos costos no solo optimiza la eficiencia operativa, sino que posiciona a los puertos de manera más competitiva en el contexto global de la cadena de transporte marítimo [17]. No obstante, la eficiencia operativa no solo se define por el costo total de la asignación, sino también por el tiempo total de permanencia de los buques en la terminal [22]. Por otro lado, la optimización del uso de recursos, como las grúas de muelle, vehículos internos y grúas de patio en terminales de contenedores, es otro enfoque importante para la eficiencia operativa, ya permite reducir los tiempos de inactividad y maximizar la productividad, lo que a su vez mejora las operaciones portuarias [16]. En este sentido, la reducción de costos, mencionada como un aspecto clave en la discusión, también se destaca en la introducción. Esto refuerza la idea de que una gestión eficiente de los costos no solo optimiza la eficiencia operativa, sino que también impacta directamente en la competitividad de los puertos en el contexto global. Además, la introducción menciona que la eficiencia operativa se puede definir como la capacidad para maximizar la producción utilizando recursos de manera óptima, como las grúas y vehículos en las terminales, que permite reducir los tiempos de inactividad y mejorar la productividad [5]. Así, tanto en la introducción como en los resultados, se enfatiza que potenciar la rentabilidad y la disminución en los tiempos de espera van a ser esenciales para manejar un mayor volumen de contenedores con menos

recursos. Esta coherencia entre ambas secciones subraya la importancia de adoptar un enfoque integral hacia la eficiencia operativa en la logística portuaria.

La RQ2, se centra en modelos o enfoques de las metodologías de optimización que se han desarrollado. Para profundizar, es relevante explorar enfoques de algoritmos de detección de errores autónomos y procedimientos de recuperación de fallos en la gestión portuaria [15]. Por ello, los hallazgos de la Figura 6 confirman que, además de simulación y MILP, existen propuestas basadas en algoritmos genéticos (AG) [25], [28], heurísticas y modelos multiobjetivo. Este modelo está vinculado con la metodología de Simulación y Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP), siendo especialmente eficaz para abordar temas complejos. Su capacidad para explorar a fondo diversos escenarios que permite desarrollar modelos precisos, cuyos resultados son validados mediante la simulación, garantizando mayor confiabilidad y robustez en las soluciones propuestas [25]. En cambio, otros autores se basan en el enfoque heurístico que desempeña un papel crucial al integrarse con la simulación y la programación, este modelo ha sido utilizado para enfrentar desafíos relacionados con el transporte, demostrando su efectividad en la resolución de problemas complejos y ofreciendo soluciones viables al adaptarse a situaciones dinámicas, convirtiéndolo en una herramienta valiosa en la optimización [13]. Por otro lado, el modelo Multiobjetivo se destaca por su estrecha relación con la Simulación, ya que ambos trabajan en conjunto para mejorar la efectividad de las soluciones ante eventos disruptivos no planificados. Además, puede minimizar el impacto en el sistema portuario, permitiendo a las terminales adaptarse más rápidamente a situaciones inesperadas [28]. La capacidad de manejar múltiples objetivos simultáneamente es fundamental en un entorno donde las decisiones deben equilibrar costos, tiempos y recursos. A medida que el sector enfrenta desafíos cada vez mayores, estas metodologías se vuelven esenciales para garantizar la eficiencia y la resiliencia en la logística portuaria. Por otro lado, en la introducción se menciona que existen diferentes modelos y enfoques utilizados para mejorar la eficiencia operativa, como el algoritmo de búsqueda, la automatización de equipos tecnológicos y el análisis de diseño de terminales [7]. Este enfoque complementa los métodos y enfoques discutidos en la Figura 6 como el Algoritmo Genético, modelo multiobjetivo y enfoque heurístico; mostrando cómo diferentes técnicas pueden integrarse para abordar la complejidad de la logística portuaria. Además, estos modelos y enfoques resaltan la importancia de investigar y aplicar metodologías que no solo aborden la eficiencia operativa, sino que también garanticen resiliencia y adaptabilidad ante los crecientes desafíos del sector portuario. La combinación de modelos complejos y soluciones prácticas se vuelve esencial para asegurar la efectividad en la logística portuaria.

La RQ3, muestra que la simulación se adapta mejor a entornos operativos inciertos, mientras que MILP es más adecuada para resolver asignaciones determinísticas de recursos [1], [4], [20]

Primero, se evalúa la eficacia, un aspecto clave para identificar la metodología más adecuada para resolver el problema, proporcionando soluciones viables y efectivas. En

la Figura 7, se destacan las metodologías de Simulación y Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP), siendo la Simulación la que obtienen la mayor puntuación en rendimiento y precisión en las soluciones más óptimas. Es necesario examinar el impacto del número de buques, su velocidad y la prevención de la congestión en las vías fluviales para optimizar el rendimiento [20]. Sin embargo, la metodología MILP es la segunda con mayor puntuación, y al igual que la Simulación, abarca los 3 términos de eficacia. Resulta esencial para ajustar las restricciones de la relación espacio-tiempo, lo que no solo mejora el rendimiento, si no también intenta encontrar soluciones óptimas para mejorar la eficiencia del transporte [1]. La evaluación de estas metodologías en función de su eficacia no solo ayuda a seleccionar la más adecuada para cada situación, sino que también resalta la necesidad de un enfoque integral en la optimización logística portuaria [16]. En la mayoría de los artículos, la utilización de la Simulación y del MILP pueden ofrecer soluciones más realistas, soluciones óptimas y precisas, y un mejor rendimiento en su implementación, maximizando la eficacia de las operaciones de transporte de contenedores en las operaciones portuarias [15]. Según lo mencionado en la introducción, este análisis permite determinar si la metodología seleccionada es la que ofrece soluciones óptimas; por lo que, su comparación es crucial para mejorar la eficiencia operativa del puerto marítimo [32]. Por ende, ambas secciones se complementan; puesto que, la introducción señala el interés de realizar una comparación general para la toma de decisiones, mientras que los resultados de la Figura 7, ofrecen un análisis detallado de como las metodologías específicas pueden contribuir a la eficacia en el contexto logístico portuario. Integrar estos enfoques puede reforzar la importancia de una evaluación para la selección de la metodología más adecuada y mejorar la gestión del sistema.

Por consiguiente, se evalúa la naturaleza del problema. Como se menciona en la Figura 8, la Simulación sobresale por su versatilidad, convirtiéndose en una opción adecuada para abordar problemas complejos y dinámicos. Esta metodología es eficaz en situaciones donde los sistemas enfrentan retrasos debido a incertidumbres, como eventos imprevistos, falta de técnicas de gestión adecuadas o ineficiente manejo del tiempo, que generan la necesidad de estimaciones fiables y realistas [20]. Estos tipos de problemas, particularmente aquellos relacionados con políticas operativas y restricciones, son frecuentes en el ámbito logístico. La Simulación, al optimizar el movimiento de trenes y facilitar el acceso a los contenedores, contribuyendo significativamente a mejorar la eficiencia del servicio multimodal [26]. No obstante, metodologías como el MILP son particularmente efectivas para abordar problemas con restricciones, así como la asignación de atraques, muelles y grúas, donde una gestión eficiente de recursos puede determinar el éxito operativo [12]. De acuerdo con la introducción, los problemas sencillos se pueden resolver con métodos analíticos, mientras que los más complejos requieren de simulaciones o enfoques heurísticos. Por ende, la selección del modelo se basa en la complejidad del sistema logístico y en los objetivos específicos del análisis [5]. Este estudio comparativo permite a los gestores elegir la metodología más

adecuada según la naturaleza del problema, lo cual es crucial para mejorar el rendimiento operativo y la eficiencia en las terminales portuarias. La elección de la metodología correcta no solo afecta el resultado inmediato, sino que también influye en la adaptación a futuros desafíos en un entorno logístico en constante evolución.

Las metodologías de optimización como la Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP) y la Simulación son herramientas útiles en el ámbito portuario, pero presentan limitaciones [28]. MILP enfrenta desafíos como alta complejidad computacional y dificultad para manejar incertidumbre, ya que requiere simplificaciones que pueden llevar a soluciones no óptimas [2]. Además, tiene un sesgo de publicación hacia modelos exitosos. La simulación, aunque más flexible para modelar incertidumbre, requiere datos precisos y puede generar resultados variables debido a su carácter estocástico [21]. La optimización dentro de la simulación no siempre garantiza soluciones óptimas. En términos de eficacia, MILP es adecuado para problemas lineales y bien definidos, mientras que la simulación es mejor para situaciones dinámicas y con incertidumbre. Por ello, en muchos casos, un enfoque híbrido que combine ambas técnicas puede ser la alternativa más eficiente para optimizar las operaciones portuarias [31].

Finalmente, en la RQ4, se refiere a los resultados de la eficiencia operativa tras la implementación de las metodologías de optimización. En la Figura 9, se examinan los resultados de los artículos revisados, destacándose los logros obtenidos al enfrentar los desafíos señalados mediante la implementación de dichas metodologías. La disminución de costos es el aspecto con mayor puntuación, seguido de cerca por la mejora en la eficiencia operativa. Según Zhao, Zhu y Wang, la aplicación de la metodología de simulación permitió una reducción de costos del 24.57%, lo que implica una maximización en la utilización de recursos y aumento en las tarifas del servicio tren-barco [25]. Además de la dificultad para gestionar el costo unitario de los recursos, la simulación ofrece mejorar la eficiencia operativa, rendimiento y el tiempo de servicio, lo que contribuye a la reducción de costos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que factores como la duración del viaje y la congestión pueden provocar un aumento en estos costos [26]. Además, la mejora en la eficiencia operativa es otro resultado crucial. Este avance ha facilitado un equilibrio entre el servicio ofrecido y los parámetros de demanda en las terminales, lo que ha llevado al uso óptimo de los recursos portuarios [23]. La manipulación eficiente de los equipos en los muelles ha sido importante para aumentar el nivel de servicio del puerto, lo que, a su vez, contribuye a una experiencia más positiva para los clientes [3]. Es importante considerar que, a pesar de los resultados alentadores, la implementación de estas mejoras debe ser continua y adaptativa. La metodología de simulación actúa como un catalizador para maximizar el uso de recursos y mejorar la rentabilidad, respaldando así la disminución de costos y optimizando la eficiencia operativa, ya que son objetivos destacados de la introducción. También, no solo proporciona una experiencia más positiva para los clientes, sino que, optimiza el uso de recursos, como se mencionó previamente. La adecuada manipulación de los equipos en los muelles demuestra que la aplicación de estas metodologías

puede elevar el nivel de servicio en el puerto. Sin embargo, es importante considerar que factores externos, como la duración del viaje, influyen a los costos y, por ende, en la eficiencia operativa. Por lo tanto, es esencial monitorear y evaluar las mejoras implementadas para asegurar su efectividad a largo plazo.

Las metodologías de Simulación y Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP) son esenciales en la optimización de operaciones portuarias, pero cada una tiene sus ventajas y limitaciones [17]. La simulación permite modelar la incertidumbre y la dinámica de sistemas complejos, siendo útil para evaluar diferentes escenarios y planificar operaciones en condiciones reales [18]. Sin embargo, requiere datos precisos y sus resultados pueden ser variables, lo que demanda múltiples ejecuciones para obtener conclusiones confiables. En cambio, MILP es eficaz para problemas bien definidos y deterministas, como la asignación de muelles o la programación de grúas, ofreciendo soluciones óptimas en estos casos [1]. No obstante, su alta complejidad computacional y la dificultad para manejar la incertidumbre son limitaciones importantes [23]. En resumen, mientras que MILP es ideal para problemas estructurados, la simulación es más flexible para ambientes inciertos, por lo que un enfoque híbrido que combine ambas metodologías podría constituir la alternativa más eficaz para optimizar la eficiencia operativa en entornos portuarios.

#### V. CONCLUSIÓN

Esta revisión sistemática de la literatura ha revelado que la implantación de metodologías como la Simulación y la Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP), resulta fundamental para mejorar la eficiencia operativa en la gestión portuaria. Los hallazgos indican que las metodologías no solo corrigen e identifican ineficiencias, sino que también contribuyen en la reducción de costos y mejora la competitividad de los puertos. La Simulación se posiciona como la herramienta más versátil para modelar escenarios dinámicos y de alta incertidumbre, lo que la convierte en una metodología esencial en la planificación y optimización de operaciones portuarias complejas. Por su parte, la MILP ha demostrado ser altamente efectiva en problemas estructurados, permitiendo alcanzar soluciones óptimas en la asignación de recursos y planificación de actividades logísticas bajo restricciones específicas.

Asimismo, se confirma que la eficiencia operativa en el ámbito portuario no puede definirse únicamente en términos de costos, sino que debe considerar también variables como el tiempo de permanencia de buques, la optimización del uso de equipamientos y la capacidad de adaptación a cambios en la demanda. De esta forma, el enfoque integral en la gestión de recursos emerge como un factor clave para maximizar la productividad y mejorar la competitividad en el comercio marítimo internacional.

Finalmente, la revisión sistemática resalta la importancia de un enfoque integral en la aplicación de las metodologías de optimización. La combinación de Simulación y Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP) no solo permite abordar problemas específicos, sino que también facilita una visión holística de la logística portuaria.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones no solo continúen profundizando en la combinación de técnicas de simulación y MILP, sino que también exploren enfoques híbridos con algoritmos inteligentes que permitan mejorar la capacidad predictiva, la adaptabilidad y la toma de decisiones estratégicas en entornos portuarios de alta complejidad. De esta forma, se contribuirá al diseño de sistemas logísticos más robustos, competitivos y preparados para enfrentar las dinámicas del comercio marítimo actual y futuro.

#### VI. REFERENCIAS

- [1] Y. Song, B. Ji, and S. S. Yu, "Variable Neighborhood Search for Multi-Port Berth Allocation with Vessel Speed Optimization," *J Mar Sci Eng*, vol. 12, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.3390/JMSE12040688.
- [2] H. Hu, J. Mo, and L. Zhen, "Integrated optimization of container allocation and yard cranes dispatched under delayed transshipment," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 158, 2024, doi: 10.1016/j.trc.2023.104429.
- [3] Z. Elmi et al., "An epsilon-constraint-based exact multi-objective optimization approach for the ship schedule recovery problem in liner shipping," *Comput Ind Eng*, vol. 183, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109472.
- [4] S. Mallah, A. Aloullal, O. Kamach, M. Masmoudi, K. Kouiss, and A. Chebak, "Modeling the Bulk Port Belt-Conveyor Routing Problem Considering Interactions with Storage Spaces and Loading Operations," *IEEE Access*, vol. 11, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3305572.
- [5] Ashury, Sumardi, T. Rachman, and Mursalim, "Operational Performance Model of Container Cranes in Stevedoring Process at The New Container Terminal Makassar 2," *Journal of Law and Sustainable Development*, vol. 11, no. 12, 2023, doi: 10.55908/sdgs.v11i12.2149.
- [6] S. Olteanu, D. Costescu, A. Ruscă, and C. Oprea, "A genetic algorithm for solving the quay crane scheduling and allocation problem," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/400/4/042045.
- [7] M. Panaitescu, F. V. Panaitescu, R. A. Daineanu, D. Dinu, and M. Zus, "Tools for analysing operational optimization in a container ship terminal," *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, vol. 14, no. 3, 2022, doi: 10.54684/ijmmt.2022.14.3.198.
- [8] P. Alzate et al., "Operational efficiency and sustainability in smart ports: a comprehensive review," *Marine Systems and Ocean Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 120–131, Oct. 2024, doi: 10.1007/S40868-024-00142-Z/FIGURES/3.
- [9] A. Paraskevas, M. Madas, V. Zeimpekis, and K. Fouskas, "Smart Ports in Industry 4.0: A Systematic Literature Review," 2024. doi: 10.3390/logistics8010028.

- [10] A. Nishikawa-Pacher, "Research Questions with PICO: A Universal Mnemonic," Publications, vol. 10, no. 3, 2022, doi: 10.3390/publications10030021.
- [11] A. Khalafallah, N. Almashan, and N. Abdel Haleem, "Port Construction Planning: Automated System for Projecting Expansion Needs," *J Waterw Port Coast Ocean Eng*, vol. 146, no. 6, 2020, doi: 10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000603.
- [12] J. F. Correcher, F. Perea, and R. Alvarez-Valdes, "The berth allocation and quay crane assignment problem with crane travel and setup times," *Comput Oper Res*, vol. 162, 2024, doi: 10.1016/j.cor.2023.106468.
- [13] V. Naumov, I. Taran, Y. Litvinova, and M. Bauer, "Optimizing resources of multimodal transport terminal for material flow service," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, 2020, doi: 10.3390/su12166545.
- [14] D. Ambrosino and H. Xie, "Optimization approaches for defining storage strategies in maritime container terminals," *Soft comput*, vol. 27, no. 7, 2023, doi: 10.1007/s00500-022-06769-7.
- [15] E. Y. C. Wong, A. H. Tai, and S. So, "Container drayage modelling with graph theory-based road connectivity assessment for sustainable freight transportation in new development area," *Comput Ind Eng*, vol. 149, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106810.
- [16] L. Cai, W. Li, B. Zhou, H. Li, and Z. Yang, "Robust multi-equipment scheduling for U-shaped container terminals concerning double-cycling mode and uncertain operation time with cascade effects," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 158, 2024, doi: 10.1016/j.trc.2023.104447.
- [17] A. Abdelshafie, B. Rupnik, and T. Kramberger, "Simulated Global Empty Containers Repositioning Using Agent-Based Modelling," *Systems*, vol. 11, no. 3, 2023, doi: 10.3390/systems11030130.
- [18] D. Gattuso and D. S. Pellicanò, "HUs Fleet Management in an Automated Container Port: Assessment by a Simulation Approach," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 14, 2023, doi: 10.3390/su151411360.
- [19] Z. Ahmad, T. Acarer, and W. Kim, "Optimization of Maritime Communication Workflow Execution with a Task-Oriented Scheduling Framework in Cloud Computing," *J Mar Sci Eng*, vol. 11, no. 11, 2023, doi: 10.3390/jmse11112133.
- [20] H. An, F. Bahamaish, and D. W. Lee, "Simulation and optimization for a closed-loop vessel dispatching problem in the middle east considering various uncertainties," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 20, 2021, doi: 10.3390/app11209626.
- [21] J. J. van der Steeg, M. Oudshoorn, and N. Yorke-Smith, "Berth planning and real-time disruption recovery: a simulation study for a tidal port," *Flex Serv Manuf J*, vol. 35, no. 1, 2023, doi: 10.1007/s10696-022-09473-8.
- [22] J. F. Correcher, T. Van den Bossche, R. Alvarez-Valdes, and G. Vanden Berghe, "The berth allocation problem in terminals with irregular layouts," *Eur J Oper Res*, vol. 272, no. 3, 2019, doi: 10.1016/j.ejor.2018.07.019.
- [23] H. Bouzekri, G. Alpan, and V. Giard, "Integrated Laycan and Berth Allocation and time-invariant Quay Crane Assignment Problem in tidal ports with multiple quays," *Eur J Oper Res*, vol. 293, no. 3, 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2020.12.056.
- [24] B. Kang, B. Kim, and S. Hong, "Simulation Optimization of Collaborative Handshake Operations for Twin Overhead Shuttle Cranes in a Rail-Based Automated Container Terminal Under Demand Uncertainty," *IEEE Access*, vol. 11, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3323613.
- [25] J. Zhao, X. Zhu, and L. Wang, "Study on scheme of outbound railway container organization in rail-water intermodal transportation," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 4, 2020, doi: 10.3390/su12041519.
- [26] A. El Yaagoubi et al., "A logistic model for a french intermodal rail/road freight transportation system," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 164, 2022, doi: 10.1016/j.tre.2022.102819.
- [27] J. Li, K. Jing, M. Khimich, and L. Shen, "Optimization of Green Containerized Grain Supply Chain Transportation Problem in Ukraine Considering Disruption Scenarios," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 9, 2023, doi: 10.3390/su15097620.
- [28] A. D. de León, E. Lalla-Ruiz, B. Melián-Batista, and J. M. Moreno-Vega, "A simulation-optimization framework for enhancing robustness in bulk berth scheduling," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 103, 2021, doi: 10.1016/j.engappai.2021.104276.
- [29] S. Zhao, J. Duan, D. Li, and H. Yang, "Vessel Scheduling and Bunker Management With Speed Deviations for Liner Shipping in the Presence of Collaborative Agreements," *IEEE Access*, vol. 10, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3211311.
- [30] J. Wawrzyniak, M. Drozdowski, and É. Sanlaville, "A Container Ship Traffic Model for Simulation Studies," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 32, no. 4, 2022, doi: 10.34768/amcs-2022-0038.
- [31] J. F. Correcher, T. Van den Bossche, R. Alvarez-Valdes, and G. Vanden Berghe, "The berth allocation problem in terminals with irregular layouts," *Eur J Oper Res*, vol. 272, no. 3, 2019, doi: 10.1016/j.ejor.2018.07.019.
- [32] P. Legato and R. Trunfio, "A simulation modelling paradigm for the optimal management of logistics in container terminals," in *21st European Conference on Modelling and Simulation: Simulations in United Europe, ECMS 2007, 2007*. doi: 10.7148/2007-0479.