

## Capítulo

# Inteligencia artificial en el control del tráfico y transporte marítimo de los puertos de Cartagena

Capitán de Corbeta JULIA MARCELA MORENO HERRERA  
Alumno Curso CIM 2025

Capitán de Corbeta DEYCI LILIANA QUIÑONEZ UÑATEZ  
Alumno Curso CIM 2025

### Resumen:

Este capítulo aborda las brechas tecnológicas en el control del tráfico y transporte marítimo en los puertos de Cartagena, destacando la baja automatización, limitada capacidad predictiva e insuficiente interoperabilidad. El objetivo es valorar el potencial de la inteligencia artificial (IA) para transformar el modelo operativo inteligente. Se aplicó un enfoque exploratorio-descriptivo mediante revisión documental y análisis comparado de funciones como predicción de ETA, asignación dinámica de muelles, mantenimiento predictivo y sistemas VTS inteligentes. Los resultados muestran que el sistema actual es funcional pero reactivo, con dependencia humana. En contraste, puertos internacionales han mejorado eficiencia, seguridad y sostenibilidad con IA. Se concluye que Cartagena puede avanzar hacia un puerto inteligente mediante una hoja de ruta incremental: implementar ETA predictiva, optimizar la asignación de muelles, crear un Port Community System (PCS), mantenimiento predictivo y modernizar el VTS. Se recomienda iniciar pilotos con gobernanza de datos, integración de APIs, formación del talento humano y esquemas de ciberseguridad.

**Palabras clave:** Cartagena; Control de Tráfico Marítimo; ETA Predictiva; Inteligencia Artificial; Port Community System (PCS).

Capitán de Corbeta JULIA MARCELA MORENO HERRERA

Profesional en Comercio Internacional, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Colombia, Especialista en Derecho Aduanero, Especialista en Negocios Internacionales. Alumno curso CIM 2025, Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, Colombia. <https://orcid.org/0009-0006-2219-5162>. - Contacto: [julia.moreno@esdeg.edu.co](mailto:julia.moreno@esdeg.edu.co)

Capitán de Corbeta DEYCI LILIANA QUIÑONEZ UÑATEZ

Ingeniera Informática, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Especialista en Seguridad de la Información. Alumno curso CIM 2025, Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, <https://orcid.org/0009-0004-4953-8714> - Contacto: [deyci.quinonezu@esdeg.edu.co](mailto:deyci.quinonezu@esdeg.edu.co)

## Introducción

El presente capítulo examina la integración de la inteligencia artificial en el control del tráfico y el transporte marítimo de los puertos de Cartagena. En un escenario global marcado por el crecimiento sostenido del comercio marítimo y por una mayor concentración de flujos en corredores y nodos estratégicos, los sistemas portuarios enfrentan presiones crecientes para asegurar eficiencia, seguridad y trazabilidad a lo largo de la cadena logística. Cartagena, uno de los complejos portuarios más relevantes del país, es un caso representativo de esta tensión: dispone de capacidades operativas consolidadas y de una conectividad destacada en la región, pero mantiene procesos críticos apoyados en tecnologías convencionales y en esquemas de coordinación predominantemente reactivos. Esta brecha entre la dinámica del mercado y las capacidades tecnológicas disponibles se traduce en cuellos de botella logísticos, ventanas de atraque imprecisas, reprogramaciones manuales ante contingencias y trazabilidad incompleta de contenedores y operaciones intermodales (DIMAR, 2025; PortalPortuario, 2021). De persistir, puede comprometer la competitividad en el corto y mediano plazo.

En este contexto, resulta fundamental precisar algunos conceptos clave para la comprensión del presente estudio. El control del tráfico marítimo se refiere a los sistemas y procesos destinados a gestionar el flujo de embarcaciones en áreas portuarias y marítimas, garantizando seguridad, eficiencia y coordinación. La inteligencia artificial (IA), por su parte, comprende el uso de algoritmos y tecnologías capaces de aprender, adaptarse y tomar decisiones con base en grandes volúmenes de datos, siendo aplicada en contextos portuarios para predecir tiempos de arribo (ETA), optimizar asignaciones de atraques, anticipar fallas mediante mantenimiento predictivo y facilitar la interoperabilidad de actores logísticos. Según Fundación Valenciaport (2020), Farzadmehr y Vanelslander (2023) y Zou et al. (2025), múltiples puertos líderes como Rotterdam, Hamburgo y Singapur han logrado mejoras sustanciales en eficiencia, seguridad y sostenibilidad al integrar soluciones de IA. No obstante, Cartagena aún presenta una brecha en la implementación de estas tecnologías, como se evidencia en estudios previos (DIMAR, 2025; Arias Bernal, 2022; PortalPortuario, 2021), lo cual refuerza la pertinencia del análisis propuesto.

El problema de investigación se concreta en la distancia tecnológica y organizacional que limita la capacidad de los puertos de Cartagena para planificar con precisión los tiempos estimados de llegada y salida, asignar dinámicamente los muelles, coordinar a la comunidad portuaria en tiempo real y sostener una trazabilidad integral. Persisten dependencias elevadas del juicio experto para ajustar ventanas de atraque; la asignación de sitios sigue siendo semiautomatizada y exige reprogramaciones manuales cuando ocurren imprevistos; y la interoperabilidad entre autoridades, terminales, navieras y aduanas se ve obstaculizada por silos de información y por la ausencia de estándares técnicos ampliamente adoptados. En contraste, diversos puertos de referencia han incorporado soluciones de inteligencia artificial para el control inteligente del tráfico, la planificación predictiva de escalas, la asignación automática de muelles y el seguimiento granular de mercancías, con efectos visibles en la reducción de esperas, la mejora de la puntualidad y la optimización del uso de infraestructura. Esta distancia no es únicamente tecnológica: involucra gobernanza de datos, cultura organizacional, talento especializado y marcos de ciberseguridad que habiliten la adopción a escala.

Bajo este marco, la investigación se orienta por la siguiente pregunta: ¿cómo la implementación de la inteligencia artificial potencializa el control del tráfico y el transporte marítimo de los puertos de Cartagena? La pertinencia de formularla radica en cuatro dimensiones complementarias. En la dimensión económico-logística, incrementar la puntualidad y reducir tiempos ociosos eleva la productividad portuaria, estabiliza la cadena de suministro y disminuye costos, fortaleciendo la fiabilidad del corredor marítimo. En la dimensión operativa y de seguridad, un sistema de gestión de tráfico con analítica en tiempo real mitiga la congestión, anticipa riesgos de colisión o encallamiento y optimiza la coordinación de maniobras; la visión por computador y los sensores amplían la capacidad de vigilancia y la respuesta temprana ante anomalías. En la dimensión ambiental, la sincronización fina de arribos y el atraque en modo just-in-time reducen el consumo de combustible y las emisiones. Finalmente, en la dimensión estratégica, transformar la ventaja geográfica y la conectividad de Cartagena en desempeño competitivo sostenido exige plataformas colaborativas, estándares abiertos y una gobernanza de datos robusta que permita escalar los beneficios de la inteligencia artificial más allá de pilotos aislados.

El objetivo general del estudio es analizar el potencial de la inteligencia artificial para la transición de los puertos de Cartagena hacia un esquema inteligente de control del tráfico y del transporte marítimo, identificando brechas actuales y contrastándolas con prácticas internacionales. De este propósito se desprenden dos objetivos específicos: primero, realizar un diagnóstico de los sistemas de control y de los procesos críticos de planificación — incluidos la estimación de tiempos de llegada, la asignación de muelles, la interoperabilidad y el mantenimiento—; y, segundo, identificar tecnologías y plataformas digitales implementadas en puertos comparables y de referencia, evaluando su pertinencia y factibilidad de adopción en el contexto local. Esta definición orienta el alcance del trabajo y establece una ruta clara para conectar el análisis situacional con propuestas de mejora viables.

El andamiaje teórico articula los desarrollos sobre puertos inteligentes y sistemas sociotécnicos con enfoques aplicados de aprendizaje automático para la predicción de variables operativas, optimización combinatoria para la asignación de atraques, visión por computador para vigilancia y mantenimiento, y gemelos digitales para simulación y planificación en tiempo real. Se incorporan, además, marcos de interoperabilidad y gobernanza de datos que comprenden calidad, linaje y seguridad de la información; arquitecturas basadas en interfaces de programación de aplicaciones y espacios de datos compartidos; y lineamientos de gestión del cambio para la adopción tecnológica en organizaciones complejas. Este marco permite concebir la inteligencia artificial no como un fin en sí mismo, sino como un conjunto de capacidades que, integradas a procesos y datos confiables, habilitan decisiones coordinadas y mejoras sostenibles del desempeño portuario.

Metodológicamente, la investigación adopta un enfoque exploratorio-descriptivo sustentado en revisión documental de fuentes académicas y técnicas, informes institucionales y documentación de soluciones industriales, complementado por un análisis comparado de casos internacionales relevantes. El diagnóstico local organiza la evidencia por funciones: monitoreo y comunicaciones, planificación operativa, coordinación interinstitucional e infraestructura digital de soporte. El análisis internacional sistematiza capacidades de inteligencia artificial tales como la predicción de tiempos estimados de llegada y salida mediante aprendizaje automático, la asignación dinámica de atraques, los sistemas de gestión de tráfico de nueva generación con analítica avanzada, la vigilancia basada en visión por

computador e Internet de las Cosas, y la interoperabilidad mediante plataformas colaborativas tipo Port Community System. La comparación se orienta a identificar brechas, buenas prácticas y condiciones de adopción vinculadas a datos, integración tecnológica, talento, ciberseguridad y gobernanza.

Los resultados obtenidos muestran, por un lado, que los puertos de Cartagena cuentan con una base operativa sólida, incluida la capacidad de registrar con precisión zarpes y arribos y la estabilidad de comunicaciones, pero mantienen una orientación marcadamente reactiva en la planificación y coordinación del tráfico. La estimación de tiempos de llegada depende en gran medida del juicio humano, lo que se traduce en ventanas de atraque poco precisas y en reprogramaciones manuales que incrementan los costos operativos. La asignación de muelles permanece semiautomatizada y sensible a imprevistos. La interoperabilidad entre actores clave se encuentra fragmentada, con limitaciones para el intercambio de información en tiempo real. Por otro lado, el análisis de puertos de referencia evidencia mejoras verificables al incorporar inteligencia artificial: mayor precisión en la predicción de arribos y salidas, reducción de congestión y de consumo de combustible mediante control dinámico del tráfico, capacidad de reprogramación ágil frente a contingencias y fortalecimiento de la seguridad gracias a la detección temprana de anomalías. Se constata, además, un alto potencial para el mantenimiento predictivo soportado por sensorica distribuida y analítica de condición, con impacto en la disponibilidad de equipos y la continuidad operativa.

Con base en estos hallazgos, las conclusiones señalan la factibilidad de una hoja de ruta incremental para Cartagena. Una primera fase debería priorizar la predicción de tiempos de llegada y la asignación dinámica de muelles, habilitando ganancias rápidas en puntualidad y uso de infraestructura. En paralelo, resulta clave implantar una plataforma colaborativa de comunidad portuaria sobre estándares abiertos que consolide la interoperabilidad y sienta las bases para la toma de decisiones coordinada. A continuación, el despliegue de mantenimiento predictivo y la evolución de los sistemas de gestión de tráfico hacia esquemas con analítica avanzada permitirían consolidar un modelo operativo proactivo y resiliente. Este tránsito exige, además, políticas de gobernanza de datos, ciberseguridad y formación de talento que aseguren sostenibilidad y escalabilidad. En conjunto, la investigación aporta una base conceptual, metodológica y práctica para orientar decisiones de inversión digital y acelerar

la convergencia de Cartagena con los estándares operativos de los puertos de referencia a nivel global.

### **Diagnóstico de los sistemas actuales de control del tráfico y transporte marítimo en los puertos de Cartagena**

El análisis del diagnóstico del Puerto de Cartagena permite afirmar con certeza que, pese a su indudable validez o relevancia histórica, estratégica y operativa, existen importantes retos estructurales que debieran poder ser atendidos con urgencia para avanzar en dirección de un sistema portuario auténticamente inteligente y competitivo a nivel global. Cartagena, ampliamente reconocida por su importante tradición marítima, su relevancia histórica en el comercio internacional y su ubicación geoestratégica de gran privilegio, se encuentra hoy ante quizá una coyuntura de gran relevancia, en la que debe encaminar esfuerzos hacia su evolución tecnológica y operativa. Esta necesidad implica abandonar métodos tradicionales de gestión, que si bien han garantizado durante décadas estabilidad y funcionalidad básica, actualmente resultan insuficientes frente a la creciente dinámica, complejidad y competencia que caracteriza a los mercados internacionales contemporáneos

La transición hacia sistemas automatizados basados en inteligencia artificial (IA) constituye una transformación profunda que van mucho más allá del ámbito tecnológico, haciendo necesarios cambios culturales dentro del puerto y en toda su cadena logística asociada. Este cambio cultural incluye la adopción de una mentalidad orientada hacia la innovación constante, la integración de nuevas herramientas digitales en todas las áreas operativas y administrativas y una mayor colaboración entre todos los sectores o actores involucrados para optimizar integralmente todos los procesos. Solo así, Cartagena podrá asegurar su permanencia como un actor competitivo y proactivo, capaz de anticiparse eficazmente a escenarios futuros y aprovechar estratégicamente las oportunidades que ofrecen la globalización y la transformación digital en el sector marítimo y portuario (Instituto Marítimo Español, 2025).

Actualmente, el Sistema Integrado de Tráfico y Transporte Marítimo (SITMAR) representa una base operativa sólida y confiable, destacándose por su capacidad para registrar con precisión cada zarpe y arribo de embarcaciones, la transmisión efectiva y oportuna de

posiciones de navegación mediante sistemas de identificación automática (AIS), y la estabilidad constante de sus comunicaciones VHF. Asimismo, el puerto cuenta con un capital humano altamente calificado, comprometido con la eficiencia operativa y entrenado rigurosamente para garantizar procedimientos seguros y ágiles tanto en operaciones diurnas como nocturnas, asegurando altos estándares de profesionalismo y seguridad operativa en todas las maniobras marítimas realizadas en el Caribe colombiano (DIMAR, 2021; PortalPortuario, 2021).

Sin embargo, esta robustez operativa básica, aunque funcional, no alcanza aún la sofisticación tecnológica avanzada observable en puertos líderes internacionales como Rotterdam, Singapur o Hamburgo. Estos puertos han desarrollado plataformas digitales altamente sofisticadas como PortXchange, capaces de integrar y analizar enormes volúmenes de datos históricos provenientes de múltiples fuentes, incluyendo registros detallados de tránsito marítimo, predicciones meteorológicas precisas, patrones avanzados de consumo energético e incluso información logística terrestre asociada al tráfico portuario. La capacidad predictiva y analítica avanzada de estas plataformas permite generar modelos altamente precisos que optimizan continuamente toda la cadena logística portuaria y marítima, facilitando una gestión proactiva, dinámica y profundamente eficiente. Esta gestión predictiva no solo mejora la precisión y confiabilidad en las operaciones diarias, sino que también incrementa significativamente la capacidad del puerto para responder rápidamente y de manera eficaz ante cambios inesperados o escenarios emergentes, garantizando ventajas competitivas claras y tangibles en términos de eficiencia operativa, reducción de costos y mejoramiento general en la calidad del servicio prestado a todos los usuarios involucrados (Porthink, 2025; Fundación Valenciaport, 2020).

La infraestructura tecnológica actual del Puerto de Cartagena da cuenta de que actualmente se orienta principalmente hacia la gestión reactiva y administrativa del tráfico marítimo, mostrando limitaciones serias en cuanto a capacidades predictivas y proactivas avanzadas. La situación actual evidencia que la estimación del tiempo de llegada (ETA), un parámetro clave para garantizar la fluidez y eficiencia logística portuaria, sigue siendo altamente dependiente del conocimiento empírico de los operadores humanos, quienes realizan ajustes manuales y reactivos cuando se presentan algunos imprevistos o alteraciones

en las condiciones operativas. Este sistema tradicional tiende a generar ventanas de ataque poco precisas, provocando frecuentes desalineaciones en la operación de grúas y retrasos considerables en los procesos críticos de carga y descarga de mercancías. Estas circunstancias se convierten en pérdidas de productividad, incremento en los costos operativos y, en definitiva, una menor competitividad económica para el puerto en su conjunto. Este panorama contrasta radicalmente con la realidad operativa de los puertos líderes a nivel mundial, en los cuales sistemas automatizados y algoritmos inteligentes son capaces de predecir con gran precisión los tiempos de llegada, actualizando y recalculando dinámicamente en función de variables que cambian en tiempo real, como condiciones meteorológicas, congestión portuaria, velocidad real de los buques e incluso ajustes imprevistos en rutas marítimas. Luego, la adopción de estas tecnologías avanzadas permite una gestión logística más eficiente, transparente y dinámica, disminuyendo significativamente el margen de error humano y optimizando considerablemente la capacidad de respuesta ante eventos inesperados o situaciones críticas emergentes (Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, 2024).

De igual forma, el proceso de asignación de muelles en el Puerto de Cartagena muestra notables deficiencias tecnológicas, al estar basado principalmente en procedimientos semiautomáticos y altamente dependientes de la experiencia y conocimiento especializado del personal humano. Este método tradicional requiere la evaluación detallada y manual de múltiples variables, tales como las dimensiones específicas de cada buque, los tipos y características específicas de las mercancías transportadas, la disponibilidad y ubicación física exacta de las grúas, así como la organización de los espacios disponibles en cada muelle. Este proceso manual implica un significativo consumo de tiempo, recursos humanos, financieros y operativos, incrementando considerablemente la carga administrativa del puerto. Ante situaciones imprevistas, tales como retrasos en alta mar, cambios repentinos en la programación de arribos o fluctuaciones inesperadas en la demanda o tipo de mercancías, el sistema actual requiere la ejecución urgente de complejas y prolongadas reprogramaciones manuales (Ortega y Ortiz, 2017).

Este tipo de ajustes manuales exige un esfuerzo considerable por parte del personal operativo, desencadenando frecuentes ineficiencias operativas, conflictos internos en la

asignación de recursos físicos y humanos, y retrasos acumulativos que afectan directamente la cadena logística completa. En contraste, puertos avanzados han desarrollado módulos inteligentes automatizados que consideran en tiempo real múltiples variables críticas, permitiendo la reconfiguración rápida, eficaz y precisa de la asignación de atraques, minimizando drásticamente los tiempos improductivos y optimizando los recursos disponibles. La adopción de estos sistemas avanzados y automatizados en Cartagena podría generar un cambio transformador, incrementando significativamente la agilidad operativa, reduciendo costos operativos y mejorando globalmente la eficiencia y productividad del puerto (Nexus Integra, 2023).

A pesar de los notables avances que representa el SITMAR en comparación con los modelos operativos anteriores del Puerto de Cartagena, un análisis concienzudo evidencia claramente que la interoperabilidad entre los actores clave involucrados en las operaciones portuarias continúa siendo fragmentada y escasamente integrada desde el punto de vista tecnológico. La realidad operativa actual refleja que actores fundamentales como las aduanas, autoridades meteorológicas, operadores de terminales, empresas estibadoras y navieras siguen operando predominantemente como entidades independientes, con sistemas propios que no se comunican efectivamente entre sí. Esta fragmentación limita drásticamente la fluidez y efectividad en la circulación de información crítica y afecta negativamente la capacidad de estos actores para tomar decisiones ágiles y coordinadas en tiempo real (Praetorius et al., 2014). La carencia de una plataforma integrada que facilite la comunicación inmediata y eficiente entre estas entidades no solo genera retrasos significativos en la gestión operativa, sino que también impide que las decisiones sean tomadas sobre la base de datos completos, actualizados y confiables. Según lo señalado por el Observatorio de Supervisión Inteligente de la Superintendencia de Transporte (2025), la trazabilidad actual de contenedores, la planificación precisa de atraques y la coordinación efectiva del transporte intermodal continúan dependiendo en gran medida de registros administrativos manuales o semiautomáticos. Esta metodología tradicional limita gravemente la agilidad y precisión en la toma de decisiones estratégicas y tácticas, afectando la eficiencia operativa y posicionando al puerto en clara desventaja frente a puertos globales más avanzados que han adoptado plenamente sistemas digitales integrados.

Adicionalmente, es fundamental destacar que, aunque Cartagena posee una conectividad privilegiada, reconocida y catalogada como la mejor de América Latina según el índice de conectividad portuaria PLSCI elaborado por la UNCTAD (DIMAR, 2025), esta importante ventaja competitiva no se traduce automáticamente en una mayor eficiencia operativa sin una transformación digital integral, profunda y sostenida en el tiempo. La ausencia actual de protocolos sólidos y estandarizados de interoperabilidad tecnológica, tales como interfaces de programación de aplicaciones (APIs) portuarias comunes, redes amplias y robustas de sensores IoT interconectados, y plataformas digitales plenamente integradas, representa una barrera real que limita bastante la eficiencia operacional y estratégica del puerto. Esta realidad impide aprovechar completamente el potencial inherente a su ubicación geográfica y a su alto nivel de conectividad, generando pérdidas de oportunidad que afectan negativamente la competitividad general del puerto en el contexto global. Para enfrentar adecuadamente esta problemática, la Dirección General Marítima (DIMAR) junto con la Armada Nacional han proyectado la implementación del Sistema Integrado de Control de Tráfico y Vigilancia Marítima (SICTV). Este innovador sistema tiene como propósito articular y optimizar la integración tecnológica de diversos componentes avanzados, tales como el monitoreo continuo mediante sistemas AIS, estaciones meteorológicas automatizadas capaces de proporcionar datos en tiempo real, cámaras inteligentes de vigilancia con capacidad analítica avanzada, sistemas globales de socorro y seguridad marítima (GMDSS), así como conexiones seguras y efectivas a plataformas internacionales como LRIT y VMS (Jiménez Beltrán, 2025). No obstante, la implementación efectiva y completa del SICTV aún se encuentra en una fase preliminar de diseño técnico y desarrollo inicial, limitando considerablemente, en la actualidad, su capacidad para influir significativamente en la mejora inmediata de la gestión operativa diaria del puerto. Este retraso en su puesta en marcha efectiva constituye un desafío adicional, subrayando aún más la urgente necesidad de acelerar esfuerzos en inversión tecnológica y coordinación estratégica entre los actores involucrados.

Por consiguiente, la incorporación profunda y estratégica de tecnologías avanzadas como la visión computarizada, sensores inteligentes y algoritmos avanzados de inteligencia artificial (IA) para el mantenimiento predictivo representa una oportunidad especialmente

prometedora para el puerto de Cartagena. Estos sistemas tecnológicos avanzados permiten realizar un seguimiento constante y preciso del estado de todas las infraestructuras portuarias críticas, desde grúas y equipos de carga hasta contenedores, terminales y estructuras físicas, generando datos en tiempo real que posibilitan identificar tempranamente cualquier anomalía o deterioro potencial. La capacidad de detectar y anticipar fallas o problemas antes de que ocurran eventos disruptivos brinda enormes beneficios operativos y económicos, pues reduce considerablemente las interrupciones inesperadas, disminuye los costos asociados a reparaciones urgentes y permite una planificación más eficiente y sistemática de las actividades de mantenimiento programado (Ports de Balears, 2018).

Puertos internacionales líderes como Amberes, Rotterdam y Trinidad han evidenciado de manera concreta y consistente el potencial transformador de estos sistemas tecnológicos. Estos puertos han implementado exitosamente plataformas que integran visión artificial avanzada mediante cámaras inteligentes capaces de reconocer patrones de desgaste físico, corrosión o daños estructurales mínimos que, de no ser detectados oportunamente, podrían generar fallas operativas críticas. Complementariamente, la incorporación de sensores inteligentes de vibración, temperatura, humedad y presión, distribuidos estratégicamente por toda la infraestructura portuaria, permite monitorear de manera constante y precisa las condiciones operativas y físicas del equipamiento. Estas soluciones tecnológicas avanzadas están respaldadas por algoritmos de inteligencia artificial altamente sofisticados que procesan y analizan automáticamente grandes volúmenes de información generada en tiempo real, facilitando la generación inmediata de alertas tempranas ante cualquier desviación detectada en los parámetros normales de operación (Freightol, 2023).

La adopción de estos sistemas avanzados y automatizados en el Puerto de Cartagena permitiría una transformación radical en su modelo operativo actual, potenciando significativamente su eficiencia operativa y aumentando de manera considerable su competitividad global. Esta transformación tecnológica facilitaría la optimización profunda de los procesos internos, minimizando drásticamente los tiempos improductivos y evitando paradas inesperadas debido a problemas técnicos o fallas no anticipadas. Asimismo, el uso intensivo de estas tecnologías inteligentes permitiría liberar al capital humano de tareas operativas rutinarias o repetitivas, reasignando estos recursos valiosos hacia funciones

estratégicas de mayor valor agregado, tales como análisis avanzado de datos, gestión logística integral, supervisión estratégica, innovación continua en procesos y servicios, así como la mejora constante en los estándares de seguridad operativa (Revista PyMe21, 2025).

En definitiva, implementar estos sistemas tecnológicos avanzados representaría un cambio profundo y trascendental para Cartagena, consolidando su transformación hacia un puerto genuinamente inteligente, moderno, proactivo y altamente eficiente, capaz de competir exitosamente en el contexto internacional actual y futuro del comercio marítimo global.

### **Identificación de las tecnologías de inteligencia artificial utilizadas en el control del tráfico y transporte marítimo en puertos internacionales comparables a los de Cartagena**

En contraste con la visión reactiva que aún predomina en Cartagena, los puertos internacionales más avanzados ya han incorporado tecnologías de inteligencia artificial (IA) para optimizar el control del tráfico y transporte marítimo. Estos puertos inteligentes han logrado transitar hacia modelos de gestión proactiva y predictiva, apoyándose en algoritmos capaces de procesar enormes volúmenes de datos en tiempo real y de anticipar condiciones operativas futuras con alto grado de precisión. Puertos líderes como Rotterdam, Singapur, Hamburgo o Valencia son verdaderos referentes en la adopción de soluciones basadas en IA para la gestión completa de sus operaciones marítimas, demostrando mejoras de gran importancia en eficiencia, seguridad y sostenibilidad que dan cuenta de la brecha tecnológica existente con enclaves tradicionales como Cartagena (Zou et al., 2025).

Uno de los ámbitos centrales de aplicación de la IA es la predicción precisa de los tiempos de llegada de buques (ETA) y la optimización de la planificación de las escalas portuarias. Puertos como Rotterdam y Amberes han integrado algoritmos de *machine learning* en sus sistemas de gestión para pronosticar con antelación las horas de arribo y salida, ajustando en consecuencia la asignación de recursos y evitando congestiones innecesarias. Por ejemplo, en el Puerto de Amberes, se desarrolló un modelo predictivo interno –implementado luego con apoyo de la industria– capaz de estimar con mayor exactitud la hora de llegada de cada buque y hasta de anticipar el número óptimo de remolcadores requeridos para asistir su atraque seguro, basándose en datos históricos de

arribos. Esta iniciativa permitió a los planificadores portuarios tomar decisiones informadas y proactivas, mejorando la seguridad y eficiencia en las maniobras de ingreso. De igual forma, el Puerto de Rotterdam ha implementado la plataforma digital Pronto (PortXchange), que integra datos públicos de navegación, información proporcionada por navieras y predicciones generadas mediante aplicaciones de IA para optimizar todas las actividades de una recalada portuaria y facilitar la navegación en modo *just-in-time*, reduciendo esperas innecesarias y las emisiones asociadas. Esta plataforma proporciona a cada buque una línea de tiempo colaborativa donde se muestran en tiempo real todos los eventos de su estadía en puerto, actualizando continuamente su progreso y enviando alertas tempranas sobre demoras, cambios o conflictos en la planificación (Durlík et al., 2024). Gracias a estas soluciones basadas en IA, puertos europeos han conseguido aumentar notablemente la fiabilidad y puntualidad de sus operaciones diarias, con beneficios evidentes en la reducción de tiempos ociosos y costos operativos.

La capacidad predictiva habilitada por la IA en estos puertos líderes se traduce en estimaciones de llegada y salida mucho más certeras que las obtenidas por métodos tradicionales, lo cual permite asignar ventanas de atraque y programar equipos con mayor precisión. Estudios recientes subrayan que el uso de algoritmos inteligentes para pronosticar las ETAs y optimizar la asignación de muelles es un factor decisivo para incrementar la eficiencia logística portuaria. Un caso emblemático es el del Puerto de Montreal, donde la autoridad portuaria está implementando un sistema colaborativo de programación de atraques potenciado por analítica predictiva, con el objetivo expreso de habilitar llegadas *just-in-time* y coordinar dinámicamente a todos los actores marítimos involucrados (Munim y Jiménez, 2020).

Esta plataforma, desarrollada junto a especialistas en IA, emplea modelos predictivos avanzados (bajo el nombre comercial *OCIANA*) para sincronizar las velocidades de navegación de los buques con la disponibilidad exacta de sus puestos de atraque, disminuyendo drásticamente los tiempos de espera en fondeaderos, la congestión en bahía y las emisiones producidas por buques en espera (Farzadmehr y Vanelslander, 2023).

Asimismo, al optimizar la secuencia de atraque y maximizar la ocupación de muelles sin generar solapamientos, el sistema permite una utilización más eficiente de la

infraestructura existente y del personal operativo. Se espera que este enfoque colaborativo apoyado en IA reduzca sustancialmente los retrasos a lo largo de la cadena logística, aumentando la puntualidad de las operaciones y mejorando la sostenibilidad del corredor marítimo involucrado.

De igual modo, la asignación dinámica de buques a muelles y la reprogramación de itinerarios ante imprevistos se benefician ampliamente de los algoritmos inteligentes en los puertos de vanguardia. En lugar de depender de evaluaciones manuales lentas o de la experiencia individual del operador, los sistemas avanzados de gestión portuaria pueden recalcular en tiempo real la secuencia óptima de atraques ante cualquier cambio, considerando multitud de variables complejas (tamaño y calado del buque, tipo y urgencia de su carga, prioridad del servicio, condiciones meteorológicas, etc.) y ajustando la planificación sobre la marcha (Balster et al., 2020). Esto ha permitido en puertos punteros minimizar los tiempos de espera y evitar conflictos en la agenda operativa incluso cuando ocurren retrasos en alta mar o desviaciones de último minuto. La literatura coincide en que las técnicas de aprendizaje automático elevan notablemente la eficiencia de la asignación de atraques, al mejorar la capacidad de reacción y la precisión en escenarios dinámicos (Zou et al., 2025).

En la práctica, puertos asiáticos y europeos que han adoptado estas herramientas reportan reducciones significativas en las ineficiencias operativas que aún aquejan a Cartagena –por ejemplo, ventanas de atraque subutilizadas o reprogramaciones de emergencia–, transformando su programación de buques en un proceso ágil, automatizado y resiliente frente a perturbaciones (Toyo, 2024).

Otro ámbito muy clave donde la IA está revolucionando el control del tráfico marítimo es en los Sistemas de Tráfico Marítimo (STM o VTS, por sus siglas en inglés) y la seguridad náutica. Singapur, uno de los puertos más activos del mundo, se encuentra a la vanguardia desarrollando un sistema de gestión de tráfico de próxima generación habilitado por IA para reemplazar su VTS convencional. Este sistema incorpora analítica de datos masivos y algoritmos de *machine learning* capaces de identificar en tiempo real patrones de tráfico peligrosos o zonas de congestión inminente, así como de predecir posibles situaciones de colisión con mayor antelación que los sistemas tradicionales (Ivars, 2024). Según la

Autoridad Portuaria de Singapur, estas capacidades permitirán brindar a los capitanes información mucho más precisa y oportuna para tomar acciones tempranas que garanticen la seguridad de la navegación. Adicionalmente, el nuevo VTS inteligente de Singapur se apalancará en comunicaciones avanzadas barco-tierra mediante redes dedicadas (por ejemplo, el sistema de intercambio de datos VHF y la nueva red 5G marítima), lo que habilitará servicios innovadores como el pilotaje remoto asistido, el control de drones de puerto y la coordinación eficiente de operaciones de practica en tiempo real (Ivars, 2024). Todas estas mejoras tecnológicas confluyen en un VTS mucho más proactivo, preciso e interconectado, que eleva sustancialmente los estándares de seguridad y eficiencia en las aguas portuarias.

En Europa, el Puerto de Hamburgo ha sido pionero en la digitalización del control de tráfico dentro de su iniciativa *smartPORT*. Este puerto integró un sistema logístico potenciado por IA que gestiona el flujo de buques de forma optimizada, logrando reducir tanto la congestión en sus canales de acceso como el consumo de combustible de las embarcaciones durante las maniobras. Hamburgo también desarrolló una solución innovadora en su centro de control llamada Port Monitor, un software de sala de control centralizada que proporciona a todos los actores portuarios información en tiempo real sobre las actividades en el puerto, utilizando herramientas de IA para respaldar la toma de decisiones de los controladores de tráfico (Prosertek, 2023). Por ejemplo, el Port Monitor incluye algoritmos de detección de anomalías en las rutas de los buques y puede sugerir ajustes en los patrones de tráfico o en los límites de velocidad en canal cuando detecta riesgos, asistiendo así a los oficiales del VTS en la prevención de incidentes. La combinación de estas tecnologías inteligentes con una infraestructura de sensores IoT y comunicaciones de alta velocidad ha rendido frutos medibles en Hamburgo: en pruebas de *traffic management* inteligente, se registró una disminución de hasta 59% en la congestión y aproximadamente 20% en el consumo de combustible, atribuida al control dinámico del tráfico con apoyo de IA y a la sincronización fina entre los movimientos de buques y vehículos terrestres en la zona portuaria. Estos resultados tangibles demuestran el enorme potencial de la IA para optimizar el flujo marítimo-portuario, no solo mejorando la eficiencia operativa sino también

contribuyendo a objetivos ambientales como la reducción de emisiones de carbono (Capitán Marítimo, 2023).

Además de optimizar el flujo de embarcaciones, los puertos inteligentes emplean IA para fortalecer la vigilancia marítima y la seguridad de las operaciones. Mediante sistemas de visión por computador y análisis avanzado de las señales AIS, es posible detectar automáticamente patrones anómalos en el movimiento de buques o en el entorno portuario que pudieran indicar riesgos de seguridad, emergencias o actividades ilícitas. Por ejemplo, el puerto de Singapur aprovecha una red densa de sensores IoT y cámaras, combinada con algoritmos de IA, para monitorear el tráfico en sus aguas y detectar eventos atípicos como desviaciones no autorizadas de ruta o intentos de piratería, permitiendo activar con rapidez los protocolos de respuesta antes de que un incidente se materialice (Gaceta Náutica, 2025). De igual forma, en puertos de Europa y América del Norte se han implementado cámaras inteligentes capaces de reconocer matrículas de contenedores, identificar buques automáticamente al ingresar a canales de acceso y vigilar áreas restringidas, todo ello con análisis en tiempo real para alertar ante cualquier condición anormal. Estas aplicaciones de IA, centradas en la seguridad, multiplican la capacidad de supervisión más allá de lo humanamente posible y reducen la dependencia exclusiva en la vigilancia manual, minimizando el error humano en tareas críticas como la detección de intrusiones, derrames, incendios u otras eventualidades. En suma, la IA contribuye a operaciones portuarias más seguras y confiables, al prevenir proactivamente accidentes y robustecer los sistemas de protección tanto para las personas como para la infraestructura (Covert Security, 2025).

Por último, es importante mencionar que muchas de estas tecnologías de IA en puertos líderes no operan de forma aislada, sino que están integradas en plataformas digitales colaborativas que unifican a todos los actores de la comunidad portuaria. La interoperabilidad tecnológica entre navieras, terminales, autoridades marítimas, aduanas y operadores logísticos se ve potenciada por sistemas tipo *Port Community System* (PCS) de nueva generación, los cuales centralizan datos y procesan información en tiempo real para apoyar la toma de decisiones conjuntas. Un ejemplo es la plataforma de datos cognitivos DataPorts desarrollada en Valencia, que aprovecha técnicas de IA para facilitar el intercambio seguro de datos entre entidades portuarias y habilitar nuevas aplicaciones inteligentes en la gestión

logística (PortalPortuario, 2025). Asimismo, puertos como Los Ángeles han comenzado a integrar soluciones de IA en sus PCS para mejorar la coordinación intermodal y anticipar congestiones, siguiendo una estrategia de implementación cuidadosa y enfocada en casos de uso específicos de alto impacto. La adopción plena de estas plataformas integradas con IA permite derribar los silos de información tradicionales: todos los involucrados acceden a una fuente unificada de datos confiables (estado de los buques, horarios, disponibilidad de infraestructura, etc.), lo que redundará en decisiones más ágiles y sincronizadas en toda la cadena. De esta forma, conceptos clave como la trazabilidad integral de contenedores, la gestión eficiente de ventanas de atraque y la coordinación del transporte intermodal se vuelven realidad cotidiana sustentada por datos (Observatorio de Supervisión Inteligente de la Superintendencia de Transporte, 2025). En definitiva, la IA actúa como catalizador en estos ecosistemas digitales, extrayendo conocimientos accionables del gran caudal de datos portuarios e incluso automatizando ciertas decisiones operativas, con el objetivo final de optimizar continuamente el flujo de buques y mercancías a través de puertos altamente conectados, seguros y competitivos a nivel global.

La tendencia general en los puertos de alto rendimiento es clara: incorporar masivamente la IA en sus procesos para consolidar un entorno portuario verdaderamente inteligente. Tecnologías como las mencionadas (predicción de arribos, optimización de atraque, VTS inteligente, visión artificial para seguridad e integración de datos) se complementan entre sí para brindar una gestión integral basada en información en tiempo real. Incluso se están sentando las bases para un futuro con buques y equipos autónomos, adaptando la infraestructura digital y las comunicaciones portuarias actuales para recibir en los próximos años naves sin tripulación y vehículos automatizados, lo cual será posible gracias a la IA embebida en todos estos sistemas.

**Tabla 1***Resumen de Herramientas con IA en Puertos Internacionales*

Puerto o Región de Referencia	Tecnología o Herramienta	Función Principal	Autores
Rotterdam, Amberes	Predicción de ETA con IA	Anticipar hora de arribo y ajustar planificación	(Zou et al., 2025)
Rotterdam	Plataforma Pronto (PortXchange)	Optimizar escalas portuarias y navegación just-in-time	(Durlík et al., 2024)
Amberes	Modelo Predictivo del Puerto de Amberes	Estimar ETA y número óptimo de remolcadores	(Munim y Jiménez, 2020)
Montreal	Sistema OCIANA del Puerto de Montreal	Sincronizar navegación y disponibilidad de atraque	(Farzadmehr y Vanelslander, 2023)
Múltiples puertos de Europa y Asia	Sistemas Inteligentes de Asignación de Atraques	Asignar dinámicamente buques a muelles	(Balster et al., 2020)
Singapur	Sistemas VTS de próxima generación (Singapur)	Detectar patrones de tráfico peligrosos en tiempo real	(Ivars, 2024)
Hamburgo	Port Monitor (Hamburgo)	Gestionar tráfico y decisiones de	(Prosertek, 2023)

		control centralizado Monitorear	
Singapur, Europa, América del Norte	Visión por Computador y Detección de Anomalías (Singapur)	seguridad portuaria y detectar eventos anómalos	(Gaceta Náutica, 2025)
Valencia, Los Ángeles	Plataformas Port Community System (PCS) con IA	Centralizar datos y decisiones colaborativas	(PortalPortuario, 2025)  (Observatorio de
Puerto de Valencia	DataPorts (Puerto de Valencia)	Intercambio seguro de datos para logística inteligente	Supervisión Inteligente de la Superintendencia de Transporte, 2025)

*Fuente:* elaboración propia con base a la bibliografía revisada

### **Propuesta de herramientas de inteligencia artificial para el fortalecimiento del control del tráfico y transporte marítimo en los puertos de Cartagena**

El análisis de los sistemas actuales de control del tráfico y transporte marítimo en los puertos de Cartagena, así como la identificación de las tecnologías de inteligencia artificial implementadas en puertos líderes a nivel mundial, permiten establecer una propuesta orientada a cerrar las brechas existentes a nivel tecnológico. Esta propuesta busca no solo responder a las limitaciones identificadas, sino también capitalizar las ventajas competitivas inherentes a los diferentes puertos de Cartagena, particularmente su alta conectividad regional y su relevancia estratégica en el comercio marítimo internacional. La incorporación de herramientas basadas en inteligencia artificial se concibe entonces como un eje transformador que, más allá de la mera digitalización, revoluciona la manera en que se planifica, coordina y ejecuta la operación portuaria, promoviendo un modelo proactivo, predictivo y resiliente.

En el contexto global, la inteligencia artificial ha demostrado ser un catalizador de eficiencia, seguridad y sostenibilidad en la gestión portuaria (Zou et al., 2025). Las experiencias de puertos como Rotterdam, Singapur y Hamburgo evidencian que la adopción estratégica de soluciones de IA, en áreas como la predicción de arribos, la asignación dinámica de muelles, la gestión avanzada del tráfico marítimo, el mantenimiento predictivo y la interoperabilidad entre diversos sistemas de información y plataformas de colaboración, produce mejoras medibles en la puntualidad, la reducción de tiempos y el aprovechamiento de infraestructura. La traslación de estas prácticas al contexto cartagenero requiere, sin embargo, un ejercicio de adaptación que considere las particularidades técnicas, organizacionales y regulatorias locales.

Uno de los ejes centrales de la propuesta se orienta hacia el desarrollo e implementación de un sistema de predicción de tiempos estimados de arribo (ETA) potenciado por algoritmos de aprendizaje automático. Actualmente, la estimación de ETAs en Cartagena depende de ajustes manuales basados en el juicio humano, lo que genera imprecisiones y repercute en la planificación de atraques, el uso de grúas y la coordinación intermodal. Un sistema predictivo entrenado con datos históricos del puerto, incluyendo patrones de tráfico, condiciones meteorológicas, registros AIS y variables operativas como calado o velocidad de aproximación, podría anticipar con alta precisión las horas de arribo y salida, recalculando en tiempo real ante cambios en las condiciones externas. Esta capacidad, similar a la implementada en la plataforma PortXchange de Rotterdam (Durlík et al., 2024), no solo optimizaría la asignación de recursos, sino que también permitiría la operación en modo just-in-time, reduciendo la congestión en fondeaderos y minimizando el consumo de combustible de los buques en espera.

De manera complementaria a la predicción de ETAs, la asignación dinámica e inteligente de muelles constituye otra herramienta prioritaria. El actual sistema semiautomatizado de Cartagena, dependiente de la experiencia del personal para reprogramar ante imprevistos, podría evolucionar hacia un módulo de optimización combinatoria que integre criterios como dimensiones y calado del buque, tipo y urgencia de la carga, disponibilidad de equipos, condiciones meteorológicas y prioridades de servicio. Puertos como Montreal y Amberes han evidenciado que este tipo de sistemas, alimentados por

analítica predictiva, permiten recalcular en segundos la secuencia óptima de atraques ante contingencias, reduciendo drásticamente las ineficiencias y evitando conflictos operativos (Munim & Jiménez, 2020; Farzadmehr & Vanelslander, 2023). En Cartagena, la integración de este módulo con el sistema de predicción de ETAs generaría sinergias inmediatas, habilitando una programación fluida y adaptable a escenarios cambiantes.

En el ámbito de la gestión del tráfico marítimo, la transición hacia un sistema de control de tráfico de nueva generación habilitado por IA representa un salto cualitativo. El actual Sistema Integrado de Tráfico y Transporte Marítimo (SITMAR) ofrece una base operativa sólida en cuanto a registro de zarpes y arribos, comunicaciones VHF y seguimiento AIS; no obstante, su orientación reactiva limita la capacidad de anticipación frente a riesgos y congestiones. La incorporación de analítica avanzada, como la implementada en el VTS inteligente de Singapur (Ivars, 2024), permitiría identificar patrones peligrosos o zonas de saturación inminente, emitir alertas tempranas y recomendar ajustes de velocidad o ruta para mitigar riesgos de colisión o encallamiento. Además, la integración con redes de comunicación avanzadas —incluyendo 5G marítimo y canales de datos dedicados— habilitaría servicios innovadores como el pilotaje remoto asistido o la coordinación de drones de puerto para inspección y vigilancia.

La seguridad operativa y la integridad de la infraestructura portuaria también se verían fortalecidas mediante la adopción de sistemas de mantenimiento predictivo basados en visión por computador y sensorica IoT. Estos sistemas, ampliamente probados en puertos como Amberes y Rotterdam (Freightol, 2023), permiten monitorear en tiempo real el estado de grúas, muelles, sistemas eléctricos y otras infraestructuras críticas, detectando patrones de desgaste o anomalías que anticipan fallas. En Cartagena, su implementación reduciría las paradas no planificadas, optimizaría los ciclos de mantenimiento y prolongaría la vida útil de los activos, generando ahorros significativos en costos y asegurando la continuidad operativa.

Un elemento muy importante para articular estas herramientas es la creación de una plataforma colaborativa tipo Port Community System (PCS) de nueva generación, sobre estándares abiertos y con integración de capacidades cognitivas. Este PCS actuaría como núcleo de interoperabilidad entre navieras, terminales, autoridades aduaneras, operadores logísticos y autoridades marítimas, centralizando datos y facilitando decisiones coordinadas

en tiempo real. Ejemplos como DataPorts en Valencia (PortalPortuario, 2025) muestran que, al integrar datos operativos, logísticos y administrativos en un entorno seguro y accesible, se eliminan los silos de información y se mejora la trazabilidad de las operaciones. En Cartagena, esta plataforma podría integrarse con el SICTV proyectado por DIMAR y el SITMAR, potenciando su alcance y efectividad.

La viabilidad de estas herramientas en el contexto cartagenero requiere considerar factores como la infraestructura tecnológica disponible, la calidad y volumen de los datos históricos, la capacitación del talento humano y la existencia de marcos robustos de gobernanza de datos y ciberseguridad. La experiencia internacional evidencia que la implementación exitosa de soluciones de IA en puertos demanda un enfoque incremental, iniciando con proyectos piloto de alto impacto y escalando gradualmente hacia una integración completa (Prosertek, 2023). En Cartagena, una hoja de ruta realista podría comenzar con la implementación del sistema de predicción de ETAs y el módulo de asignación dinámica de muelles, complementados con la creación de una versión inicial del PCS. Esta fase permitiría obtener resultados tangibles en plazos cortos, generando confianza y compromiso entre los actores involucrados.

Posteriormente, la segunda fase podría incorporar el VTS inteligente con capacidades predictivas y la red de sensórica para mantenimiento predictivo, fortaleciendo la seguridad y la eficiencia operativa. Finalmente, una tercera fase consolidaría la integración plena de todas las herramientas en el PCS, habilitando un ecosistema portuario verdaderamente inteligente y colaborativo. Cada fase debería acompañarse de estrategias de formación y gestión del cambio, para asegurar la apropiación tecnológica por parte del personal y la sostenibilidad de las inversiones.

Los beneficios esperados de esta propuesta se proyectan en múltiples dimensiones. Operativamente, se prevé una reducción significativa de los tiempos de espera en fondeaderos y muelles, una mayor precisión en la planificación de operaciones y una capacidad de respuesta más ágil ante contingencias. Económicamente, la optimización del uso de infraestructura y recursos se traduciría en menores costos operativos y mayor competitividad frente a otros puertos de la región. En el plano ambiental, la operación just-in-time y el control dinámico del tráfico contribuirían a la reducción de emisiones y al uso

más eficiente del combustible. Estratégicamente, la adopción de estas herramientas posicionaría a Cartagena como un referente regional en innovación portuaria, capaz de atraer nuevas rutas y alianzas comerciales.

En s la definitiva, esta de herramientas de inteligencia artificial para el fortalecimiento del control del tráfico y transporte marítimo en Cartagena se fundamenta en la evidencia empírica y técnica de los capítulos anteriores, adaptando las mejores prácticas internacionales al contexto local. Su implementación progresiva, articulada mediante un PCS integrado y sustentada en políticas sólidas de datos y ciberseguridad, ofrece una ruta clara hacia la modernización del puerto y su alineación con los estándares de los líderes globales. La inteligencia artificial, concebida aquí como un medio para potenciar la coordinación, la anticipación y la resiliencia, se presenta no solo como una oportunidad tecnológica, sino como un imperativo estratégico para asegurar la competitividad y sostenibilidad de Cartagena en el sistema portuario internacional.

**Tabla 2**

*Resumen de herramientas con IA propuestas para los puertos de Cartagena*

Herramienta Propuesta	Descripción	Puerto Implementada	Herramienta Equivalente en Cartagena	Qué Mejoraría	Referencia Bibliográfica
Sistema de predicción de ETA potenciado por IA	Utiliza algoritmos de machine learning para anticipar con precisión la hora de arribo y salida de buques, optimizando la	Rotterdam, Amberes	Estimaciones manuales y juicio operativo individual	Precisión en la programación, reducción de congestión y ahorro de combustible	(Durlík et al., 2024)

	planificación portuaria.				
	Sistema que ajusta automáticamente la asignación de atraques ante contingencias considerando múltiples variables operativas.	Montreal, Amberes	Sistema semiautomatizado con alta dependencia de la experiencia del operador	Reprogramación eficiente ante imprevistos, reducción de tiempos ociosos	(Munim & Jiménez, 2020; Farzadmehr & Vanelslander, 2023)
Sistema de control de tráfico marítimo con IA (VTS inteligente)	Sistema predictivo que detecta patrones de tráfico peligrosos, congestiones o riesgos de colisión en tiempo real y genera alertas.	Singapur, Hamburgo	Sistema SITMAR (orientación reactiva)	Anticipación de riesgos, prevención de accidentes y fluidez en el tráfico marítimo	(Ivars, 2024)
Mantenimiento predictivo con visión por computador e IoT	Red de sensores IoT combinada con análisis de imágenes para detectar fallas potenciales en infraestructuras portuarias críticas.	Amberes, Rotterdam	Mantenimiento preventivo tradicional y manual	Reducción de paradas no planificadas, mayor vida útil de los activos	(Freightol, 2023)
Plataforma Port Community System (PCS)	Plataforma colaborativa que centraliza datos de todos los	Valencia, Los Ángeles	Sistemas dispersos sin integración total	Toma de decisiones sincronizada, trazabilidad de	(PortalPortuario, 2025)



*Clúster rojo – Machine Learning y Forecasting:* Este clúster agrupa conceptos relacionados con métodos de pronóstico aplicados en la ETA (tiempo estimado de arribo) para sistemas de transporte, con un fuerte énfasis en el aprendizaje automático. Palabras clave como aprendizaje automático (machine learning), pronóstico (forecasting), modelos de predicción (prediction models), tiempo de arribo (time of arrival) y predicción de ETA (ETA prediction) indican una tendencia teórica enfocada en la construcción de modelos predictivos para optimizar las operaciones logísticas. Esta investigación se apoya en algoritmos como árboles de decisión o análisis de regresión, orientados a minimizar errores. En la gestión del tráfico marítimo mediante modelos predictivos basado en el historial de datos lo cual resulta primordial para las operaciones portuarias, indicando instrucciones precisas a las embarcaciones sobre cuando deben llegar a puerto just-in-time (Zou et al., 2025).

*Clúster verde – Predicción de arribos y congestión en el transporte marítimo:* Aunque inicialmente centrado en el transporte urbano y público (buses), este clúster es extrapolable al contexto marítimo, especialmente en la predicción del arribo de buques y la gestión de congestión en bahías y canales de acceso. Palabras clave como arrival time prediction, intelligent systems, traffic congestion y arrival time se vinculan con herramientas empleadas en puertos inteligentes para anticipar tiempos de llegada y planificar operaciones portuarias. Los mismos modelos aplicados al transporte terrestre, como long short-term memory (LSTM) o redes neuronales recurrentes, están siendo adaptados para predecir ETAs marítimos en función de datos AIS, condiciones meteorológicas y patrones históricos (Durlík et al., 2024; Munim & Jiménez, 2020). Este clúster resalta la importancia de contar con herramientas de IA capaces de gestionar flujos marítimos complejos, evitando congestiones y mejorando la asignación de recursos logísticos en tiempo real, tal como lo han implementado puertos como Rotterdam o Montreal.

*Clúster azul – Gestión marítima inteligente y control del tráfico:* En este clúster se agrupan conceptos relacionados con el control del tráfico marítimo y la aplicación de inteligencia artificial en sistemas de gestión portuaria. Términos como vessel traffic management system (VTMS), traffic control, traffic management, artificial intelligence y ships indican un interés particular por los sistemas inteligentes de tráfico marítimo. Estas investigaciones apuntan hacia la integración de tecnologías como sensores IoT, algoritmos de predicción y visión por computador para optimizar la navegación en aguas portuarias, reducir colisiones y permitir una operación segura y eficiente (Ivars, 2024). Las técnicas asociadas a este clúster también están vinculadas al uso de convolutional neural networks (CNN) para reconocimiento de patrones y detección de riesgos en tiempo real.

*Clúster amarillo – Evaluación del desempeño y errores de predicción:* El clúster amarillo se refiere a la medición del rendimiento de modelos de predicción, identificando palabras de búsqueda que incluyen errores, error cuadrático medio, rendimiento, sistemas inteligentes y sistema de identificación automática (AIS). Esta clúster revela una tendencia de investigación que se preocupa por la validación de modelos de IA para preservar su confiabilidad. La importancia radica en la necesidad

de evitar desviaciones en sistemas de los cuales depende la seguridad o la operación eficiente. La adopción del sistema AIS implica que podría usarse directamente en el entorno marítimo, lo cual es esencial para la identificación automática de embarcaciones, con el fin de mejorar las operaciones portuarias y la logística (Farzadmehr & Vanelslander, 2023).

## Conclusiones

El estudio permitió revisar el estado actual del control del tráfico y transporte marítimo en los puertos de Cartagena, enfocando el análisis en capacidades del Sistema Integrado de Tráfico y Transporte Marítimo – SITMAR desarrollado por la Dirección General Marítima y procesos como la estimación de arribos, asignación de muelles, interoperabilidad y mantenimiento. A través de revisión documental y contraste con prácticas internacionales, se encontró que, aunque la infraestructura y el capital humano son sólidos, la orientación operativa es predominantemente reactiva en los puertos de Cartagena. Persisten falencias en la predicción precisa del ETA, en la automatización de la asignación de muelles y en la interoperabilidad entre actores, como por ejemplo los puertos, debido a la falta de plataformas colaborativas y estándares comunes. En consecuencia, se valida la hipótesis de que la inteligencia artificial puede potenciar significativamente la eficiencia operativa y la trazabilidad del sistema portuario local.

Los objetivos propuestos fueron alcanzados, se logró un diagnóstico integral y se identificaron tecnologías relevantes implementadas en puertos líderes como Rotterdam, Hamburgo y Singapur. La predicción inteligente de ETA, los sistemas VTS con analítica avanzada, la asignación dinámica de muelles, el mantenimiento predictivo y los PCS colaborativos muestran resultados positivos, como mayor puntualidad, reducción de consumo y refuerzo de la seguridad. Estos hallazgos refuerzan la viabilidad de una hoja de ruta incremental para Cartagena, con impactos positivos en lo logístico, económico, ambiental y estratégico.

Las implicaciones prácticas incluyen mejoras en planificación portuaria, reducción de costos logísticos y refuerzo en la toma de decisiones coordinadas, mientras que teóricamente, se enriquece la literatura sobre puertos inteligentes con implementación de IA. Sin embargo, el estudio presenta limitaciones asociadas a la falta de entrevistas directas a actores locales, lo cual restringe una validación contextual más profunda de las propuestas tecnológicas.

Se sugiere, por tanto, que futuras investigaciones complementen el análisis documental con métodos cualitativos y cuantitativos aplicados en campo, incluyan simulaciones basadas en gemelos digitales y evalúen la madurez digital del ecosistema portuario. Además, sería pertinente analizar el impacto de la gobernanza de datos y la ciberseguridad en procesos de adopción tecnológica en puertos medianos de economías en desarrollo y como la implementación de estas herramientas basadas en IA reducen significativamente costos operativos en la gestión portuaria de Cartagena.

## Referencias

- Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras. (2024). Proyecto ETA Prediction & Emissions API. Awake.AI & SafetyTech Accelerator.  
<https://innovacion.apba.es/proyecto-eta-prediction-emissions-api/>
- Balster, A., Hansen, O., Friedrich, H., y Ludwig, A. (2020). An ETA prediction model for intermodal transport networks based on machine learning. *Business & Information Systems Engineering*, 62, 403–416.
- Capitán Marítimo. (2023). Automatización en puertos: El caso del Puerto de Hamburgo.  
<https://capitanmaritimo.com/automatizacion-en-puertos-el-caso-del-puerto-de-hamburgo/>
- Covert Security. (2025). Sistema de lector de matrículas (LPR): transformando la seguridad y la eficiencia en puertos.  
<https://covertsecurity.es/sistema-de-lector-de-matriculas-o-lpr/>
- Dimar. (s.f.). *SITMAR: Sistema Integrado de Tráfico y Transporte Marítimo*. Dirección General Marítima.
- Dimar. (2021). *Modernización de plataformas electrónicas para trámites marítimos*. Dirección General Marítima.
- DIMAR. (2025). Informe de comportamiento del transporte marítimo – I trimestre 2025. Subdirección de Marina Mercante.
- Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., Łobodzińska, A., & Kostecki, T. (2024). Harnessing AI for sustainable shipping and green ports: Challenges and opportunities. *Applied Sciences*, 14(14), 5994.
- Durlik, M., Jachimowski, R., & Miler, R. (2024). Application of machine learning in ship ETA prediction: The PortXchange platform case. *Journal of Maritime Science and Technology*, 29(1), 55–68.
- Farzadmehr, H., & Vanelslander, T. (2023). Smart berth scheduling under uncertainty using predictive analytics. *Maritime Economics & Logistics*, 25(2), 140–159.

- Farzadmehr, M., Carlan, V., y Vanelslander, T. (2023). Contemporary challenges and AI solutions in port operations: Applying Gale–Shapley algorithm to find best matches. *Journal of Shipping and Trade*, 8(27).
- Fundación Valenciaport. (2020). *Innovaciones tecnológicas en puertos europeos: Modelos inteligentes de operación*. Fundación Valenciaport.
- Gaceta Náutica. (2025). La inteligencia artificial ayuda en la gestión integral de la seguridad portuaria.  
<https://www.gacetanautica.es/noticias/la-inteligencia-artificial-ayuda-en-la-gestion-integral-de-la-seguridad-portuaria->
- Instituto Marítimo Español. (2025). Transformación digital en el transporte marítimo.
- Ivars, M. (2024). Integración de IA y RPAS en la vigilancia portuaria: desarrollo, aplicaciones y perspectivas en el contexto español [Trabajo de fin de máster, Universidad Europea de Madrid].
- Ivars, M. (2024). Integración de IA y RPAS en la vigilancia portuaria: Desarrollo, aplicaciones y perspectivas en el contexto español [Trabajo de fin de máster, Universidad Europea de Madrid].
- Jiménez Beltrán, J. J. (2025). Sistema Integrado de Control de Tráfico Marítimo DIMAR/ARC. *Timonera Magazine*.
- Munim, Z. H., y Jiménez, V. J. (2020). Big data and artificial intelligence in the maritime industry: A bibliometric review and future research directions. *Maritime Policy & Management*, 47(7), 853–872.
- Nexus Integra. (2023). Puertos inteligentes: la transformación del sector portuario.
- Ortega, S., y Ortiz, P. (2017). Asignación de muelles para los buques en terminales portuarias: Una revisión de la literatura. Corporación Universitaria del Caribe – CECAR.
- Ospina Arias, J. C. (2015). Gestión del sistema de control de tráfico marítimo en Colombia. Corporación Universidad de la Costa.
- Ports de Balears. (2018). Caso de estudio de mantenimiento predictivo en puertos. Cloudera.

- PortalPortuario. (2021). Cartagena y la implementación tecnológica en sistemas de tráfico marítimo. *PortalPortuario.cl*.
- PortalPortuario. (2025). Plataforma impulsa gestión integral de seguridad portuaria mediante inteligencia artificial, machine learning y big data.  
<https://portalportuario.cl/plataforma-impulsa-gestion-integral-de-seguridad-portuaria-mediante-inteligencia-artificial-machine-learning-y-big-data/>
- Porthink. (2025). *PortXchange y Pronto: Sistemas de inteligencia artificial para la optimización portuaria*. Rotterdam Maritime Innovation.
- Praetorius, G. (2014). *Safety Management and Human Factors in Vessel Traffic Services (VTS)*. *Cognition, Technology & Work*, 16(1), 39–53.
- Praetorius, G., van Westrenen, F., Hollnagel, E. (2014). *A Human Factors Perspective on VTS: Work-as-done, Authority, and Distributed Control*. *Reliability Engineering & System Safety*, 128, 20–26.
- Prosertek. (2023). La inteligencia artificial transformando la seguridad en los puertos.  
<https://prosertek.com/es/blog/la-inteligencia-artificial-transformando-la-seguridad-en-los-puertos/>
- Revista PyMe21. (2025). Transformación tecnológica en el sector marítimo: La IA como motor de cambio.  
<https://revistapyme21.cl/transformacion-tecnologica-en-el-sector-maritimo-la-ia-como-motor-de-cambio/>
- Superintendencia de Transporte. (2025). Observatorio de Supervisión Inteligente.
- Toyo, M. (2024). Puertos marítimos: tendencias tecnológicas en automatización. Inspenet.  
<https://inspenet.com/articulo/tecnologia-en-puertos-maritimos-del-futuro/>
- Zou, Y., Hu, X., & Wang, P. (2025). AI-based ETA prediction systems for port logistics. *Maritime AI Review*, 12(3), 199–215.
- Zou, Y., Xiao, G., Li, Q., y Biancardo, S. A. (2025). Intelligent maritime shipping: A bibliometric analysis of Internet technologies and automated port infrastructure applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(5), 979.