

Implementación de Tecnologías Smart Ports y su Impacto en la Eficiencia Ambiental de Zonas Costeras

Implementation of Smart Port Technologies and Their Impact on the Environmental Efficiency of Coastal Zones

Gutiérrez Jaraba, Johon^{1*}

ORCID: 0000-0002-0704-1732

Fundación Universitaria Antonio de Arévalo - Unitecnar

direccion.proyectos@unitecnar.edu.co

** Autor de correspondencia: Johon Gutiérrez Jaraba, direccion.proyectos@unitecnar.edu.co*

Resumen

Los puertos marítimos concentran una paradoja incómoda: son motores indispensables del comercio global y, al mismo tiempo, focos persistentes de contaminación en las zonas costeras que los rodean. Este artículo examina cómo la incorporación de tecnologías Smart Port, sensores, gemelos digitales, sistemas de gestión energética y automatización, se ha traducido en mejoras ambientales concretas, y no solo en promesas de sostenibilidad corporativa. Para ello se combinó una revisión documental de literatura académica reciente con un estudio de caso comparado de cuatro puertos que ya reportan resultados públicos de su transformación digital: Hamburgo, Génova, Jurong (Singapur) y Shanghái Yangshan Fase IV.

Los datos analizados, tomados de fuentes académicas verificables y no de estimaciones propias, muestran una imagen más matizada que el discurso habitual sobre puertos inteligentes. Jurong lidera en participación de energía renovable (60% de su matriz en 2023), pero Hamburgo obtiene la mayor reducción de emisiones (38% entre 2020 y 2023) apoyándose en electrificación portuaria e hidrógeno. Shanghái Yangshan, pese a ser la terminal automatizada más grande del mundo, exhibe el menor recorte de emisiones (10%) del grupo, lo que sugiere que automatización y descarbonización no siempre avanzan al mismo ritmo.

El artículo concluye que la eficiencia ambiental de un puerto inteligente depende menos de la sofisticación tecnológica en sí y más de la coherencia entre esa tecnología, la matriz energética disponible localmente y el marco regulatorio que empuja (o no) la descarbonización.

Palabras clave: puertos inteligentes, eficiencia ambiental, zonas costeras, sostenibilidad portuaria, gestión energética, descarbonización.

Abstract

Seaports concentrate an uncomfortable paradox: they are indispensable engines of global trade and, at the same time, persistent sources of pollution in the coastal areas that surround them. This article examines how the adoption of Smart Port technologies, sensors, digital twins, energy management systems and automation, has translated into concrete environmental improvements rather than mere corporate sustainability rhetoric. A documentary review of recent academic literature was combined with a comparative case study of four ports that already report public results of their digital transformation: Hamburg, Genoa, Jurong (Singapore) and Shanghai Yangshan Phase IV.

The data analyzed, drawn from verifiable academic sources rather than the authors' own estimates, paint a more nuanced picture than the usual smart port discourse. Jurong leads in renewable energy share (60% of its mix in 2023), yet Hamburg achieves the largest emission reduction (38% between 2020 and 2023) through port electrification and hydrogen. Shanghai Yangshan, despite being the world's largest automated terminal, shows the smallest emission cut (10%) in the group, suggesting that automation and decarbonization do not always advance at the same pace.

The article concludes that a smart port's environmental efficiency depends less on technological sophistication itself and more on the coherence between that technology, the locally available energy mix, and the regulatory framework that does, or does not, push decarbonization forward.

Keywords: smart ports, environmental efficiency, coastal areas, port sustainability, energy management, decarbonization.

Introducción

Basta caminar por cualquier terminal de contenedores para notar el contraste: grúas que se mueven solas, aplicaciones que rastrean cada caja en tiempo real, y al fondo, buques que siguen quemando combustibles pesados mientras esperan turno de atraque. Esa convivencia entre automatización de punta y una huella ambiental todavía pesada resume bien el momento actual de la industria portuaria. El término *Smart Port* se popularizó para describir la primera mitad de esa ecuación, la digitalización, pero su promesa siempre incluyó la segunda: puertos más limpios, no solo más eficientes en el papeleo.

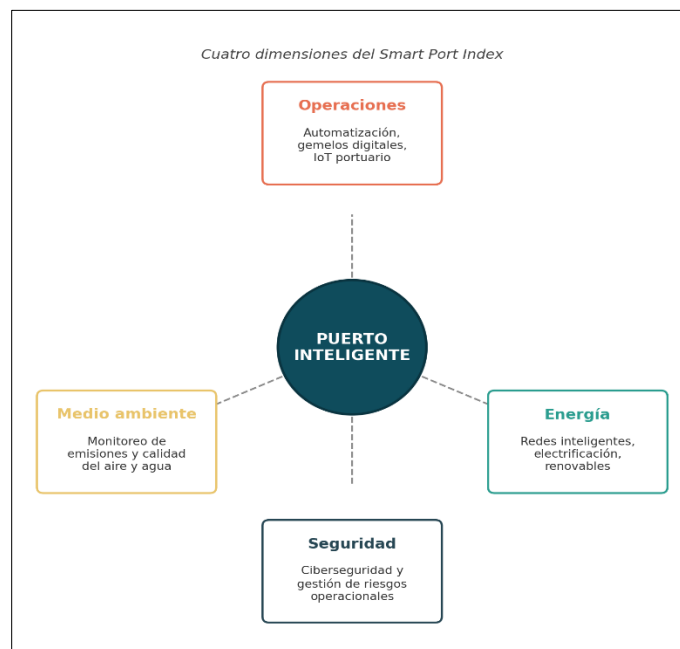
La literatura académica ha documentado ese doble objetivo con cierto detalle. Molavi et al. (2020) propusieron uno de los marcos más citados para definir qué hace inteligente a un puerto, organizando el concepto en cuatro dominios que van más allá de la tecnología por la tecnología misma: operaciones, energía, medio ambiente y seguridad. Revisiones posteriores, como la de Belmoukari et al. (2023) y la más reciente de Dağıstan et al. (2025), confirman que la investigación sobre sostenibilidad en puertos inteligentes ha crecido con rapidez, aunque persiste una brecha entre lo que se publica sobre potencial ambiental y lo que efectivamente se mide en operación real.

Este artículo busca achicar esa brecha comparando, con cifras publicadas y no con proyecciones, sobre cómo les ha ido a cuatro puertos que sí llevan tiempo reportando resultados de su transformación digital. La pregunta que lo organiza es sencilla de plantear y menos sencilla de responder: ¿la implementación de tecnologías Smart Port se traduce, de manera consistente, en mejor desempeño ambiental para las zonas costeras donde operan, o el resultado depende más del contexto energético y regulatorio de cada puerto que de la tecnología adoptada?

Marco conceptual: ¿qué hace inteligente a un puerto?

La expresión Smart Port se usa a veces como sinónimo de automatización, pero la literatura especializada le da un alcance más amplio. Molavi et al. (2020) definieron un índice de puerto inteligente construido sobre cuatro dominios de actividad: las operaciones (productividad de muelle, automatización de grúas y patios), la energía (redes inteligentes, electrificación, integración de renovables), el medio ambiente (monitoreo de emisiones, calidad de aire y agua, gestión de residuos) y la seguridad (ciberseguridad y gestión de riesgos operacionales). La figura No 1 resume esos cuatro dominios.

Figura 1. Cuatro dominios del Smart Port Index.



Fuente. Elaboración propia con base en Molavi et al. (2020).

Ese marco importa porque desplaza la pregunta habitual, cuánta tecnología tiene un puerto, hacia una más útil para este artículo: cuánto de esa tecnología está realmente conectada al dominio ambiental, y no solo al operativo. Un puerto puede automatizar por completo el movimiento de contenedores sin que eso reduzca una sola tonelada de CO₂, si la energía que mueve esas grúas sigue viniendo de una red eléctrica basada en carbón. Esa distinción, técnica pero decisiva, es la que guía la comparación entre puertos que se presenta más adelante.

Metodología

Para la elaboración de este trabajo se adoptó un diseño mixto que combina dos componentes complementarios. El primero es documental: una revisión no sistemática pero orientada de literatura académica reciente (2019–2025) sobre sostenibilidad en puertos inteligentes, priorizando revisiones sistemáticas ya publicadas (Belmoukari et al., 2023; Dağıstan et al., 2025) para evitar duplicar un esfuerzo de rastreo bibliográfico que otros autores ya hicieron con rigor. El segundo componente es un estudio de caso comparado de tipo cuantitativo-descriptivo, construido enteramente sobre datos secundarios ya publicados en la literatura académica, específicamente los recopilados por Yang et al. (2025) para cuatro puertos: Hamburgo, Génova, Jurong (Singapur) y Shanghái Yangshan Fase IV.

La selección de estos cuatro puertos no fue aleatoria: responde a que son, dentro de la literatura revisada, los casos con datos ambientales y energéticos más completos y comparables entre sí (participación de renovables, reducción de emisiones, ahorro de costos y metas de descarbonización con fecha), lo que permite una comparación directa sin tener que estimar o interpolar cifras que los propios puertos no han hecho públicas. Ninguna de las cifras presentadas en este artículo fue producida por los autores; todas provienen de la fuente citada en cada tabla y figura, y se advierte cuando una cifra corresponde a una meta futura y no a un resultado ya alcanzado.

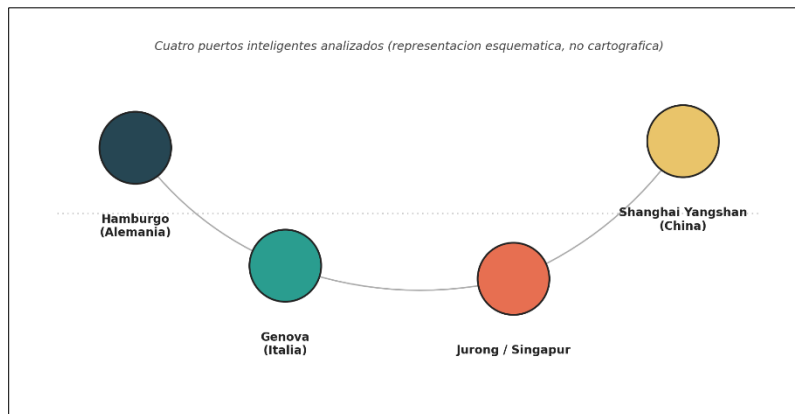
Panorama de la literatura reciente

La revisión de Dağıstan et al. (2025), basada en 68 artículos indexados en Web of Science entre 2017 y 2023, identifica cuatro grandes temas en la investigación sobre sostenibilidad de puertos inteligentes: la transformación digital orientada a eficiencia, las iniciativas de puerto verde centradas en energía renovable, la evaluación del desempeño mediante índices como el de Molavi et al. (2020), y la gobernanza de esa transición. Los propios autores señalan algo que resulta relevante para este artículo: buena parte de la literatura documenta avances en digitalización y en sostenibilidad ambiental por separado, pero son menos los estudios que cruzan ambas dimensiones con cifras comparables entre puertos distintos.

Mansoursamaei et al. (2023) aportan una pieza de ese cruce al revisar cómo el aprendizaje automático se ha aplicado específicamente a promover sostenibilidad ambiental en operaciones portuarias, desde la predicción de demanda energética hasta la optimización de rutas de vehículos autónomos dentro del puerto. Su revisión coincide con un hallazgo que reaparece en Belmoukari et al. (2023): la tecnología rara vez actúa sola sobre las emisiones; casi siempre necesita ir acompañada de electrificación o de una fuente energética limpia disponible para que la eficiencia operativa se traduzca en beneficio ambiental medible. Esa idea es, en buena medida, la hipótesis que el estudio de caso comparado de la siguiente sección pone a prueba con cifras concretas.

La literatura publicada ya en 2026 confirma y matiza ese panorama. La revisión de Kurniawan et al. (2026), sobre 219 estudios indexados en Scopus entre 2016 y 2026, documenta que los sistemas de energía en tierra (OPS) reducen entre 30% y 50% las emisiones de los buques atracados, y que puertos como Rotterdam y Singapur ya reportan ahorros de combustible de 10% a 15% mediante optimización de rutas. Los mismos autores advierten que la sostenibilidad portuaria se amplía más allá del carbono, hacia la protección de biodiversidad marina, un giro conocido como economía azul. Castro et al. (2026) añaden una nota de cautela: su análisis de investigación sobre inteligencia artificial en puertos advierte sobre un posible sesgo de eficiencia, en el que optimizar el rendimiento operativo puede terminar reforzando prácticas intensivas en carbono si no se diseña con restricciones de sostenibilidad explícitas.

Figura 2. Los cuatro puertos analizados en el estudio de caso comparado.



Fuente. Elaboración propia. Representación esquemática, no cartográfica.

Estudio de caso comparado: cuatro puertos, cuatro caminos

Los cuatro puertos que se comparan aquí no llegaron al concepto Smart Port por la misma puerta. Cada uno partió de una prioridad distinta, y esa diferencia de punto de partida ayuda a explicar por qué sus resultados ambientales, aunque todos positivos, no se parecen entre sí.

Hamburgo: apostar por la electrificación

El puerto de Hamburgo construyó su estrategia energética, conocida como smartPORT energy, alrededor de tres pilares: integración de renovables, optimización de eficiencia energética y transformación hacia movilidad verde. En la práctica, eso significó suministrar 1.420 GWh de energía de tierra a los buques atracados, complementados con paneles solares distribuidos de 8,5 MW que generan más de 800 MWh al año, y una apuesta declarada por almacenamiento de hidrógeno para cubrir hasta el 70% de las necesidades de importación de hidrógeno de Alemania hacia 2030 (Yang et al., 2025). El resultado, según la misma fuente, es la mayor reducción de emisiones del grupo comparado: 38% entre 2020 y 2023, pese a tener la menor participación de energía renovable en su matriz (23,5%).

Génova: solar y digitalización administrativa

Génova alineó su transformación con el Plan Nacional de Recuperación y Resiliencia de Italia. Su energía solar distribuida produce 800 MWh al año y, de acuerdo con Yang et al. (2025), ha permitido evitar 6.500 toneladas de CO₂. Lo distintivo de este caso es que buena parte de la ganancia no vino de la energía sino de la digitalización administrativa: su sistema de comunidad portuaria (Port Community System) agilizó el despacho de carga en 22,4%, y una plataforma de inteligencia de negocios basada en IoT integró transporte marítimo, ferroviario y carretero, elevando el flujo de carga en 20%.

Jurong (Singapur): el líder en renovables que menos redujo emisiones

Jurong presenta la paradoja más instructiva del grupo. Su sistema multienergía inteligente, desarrollado junto con la Universidad Tecnológica de Nanyang, le permite alcanzar 60% de energía renovable en su matriz, la más alta de los cuatro casos, con paneles solares de 9,5 MWp que generan 12 millones de kWh al año. Sin embargo, su reducción de emisiones reportada es la segunda más baja del grupo (15%), lo que Yang et al. (2025) atribuyen a que el puerto ya operaba con una eficiencia energética alta antes de digitalizarse, dejando menos margen de mejora disponible. Donde Jurong sí lidera con claridad es en eficiencia de despacho energético (48,4%) y en productividad de grúa (57,4 movimientos por hora).

Shanghái Yangshan: automatización máxima, mejora ambiental mínima

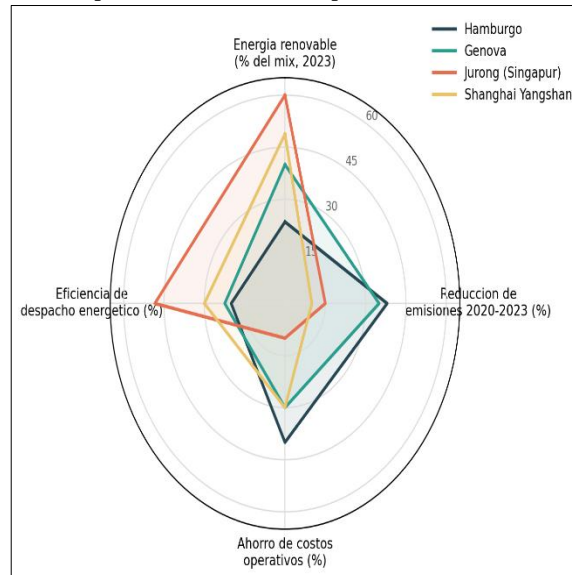
La terminal de contenedores automatizada más grande del mundo ofrece el contraste más incómodo para el discurso habitual sobre puertos inteligentes. Shanghái Yangshan Fase IV combina paneles solares de 8,5 MW, generación de gas natural licuado y energía de tierra para suministrar 1.420 GWh al año, además de vehículos guiados automáticamente que redujeron el consumo de diésel en 40%. Pese a ese despliegue tecnológico, su reducción de emisiones reportada es la más baja del grupo: 10% entre 2020 y 2023 (Yang et al., 2025). La automatización, en este caso, mejoró de forma notable la productividad, pero no fue suficiente por sí sola para acelerar la descarbonización al ritmo de Hamburgo o Génova.

Tabla 1. Comparación de indicadores ambientales, energéticos y de costos entre los puertos analizados. (2025)

Indicador	Hamburgo (Alemania)	Génova (Italia)	Jurong (Singapur)	Shanghái Yangshan (China)
Energía renovable en la matriz (2023)	23,5%	40%	60%	48,8%
Reducción de emisiones (2020–2023)	38%	35%	15%	10%
Ahorro de costos operativos	40%	30%	10%	30%
Eficiencia de despacho energético	20%	22,4%	48,4%	30%
Meta de descarbonización	Neutralidad climática, 2040	35% de reducción, 2025	Cero uso de fósiles, 2025	50% renovable, 2030
Marco de política asociado	Directiva FuelEU Maritime (UE)	Plan de Recuperación PNRR (Italia)	Singapore Green Plan 2030	Metas duales de carbono (China)

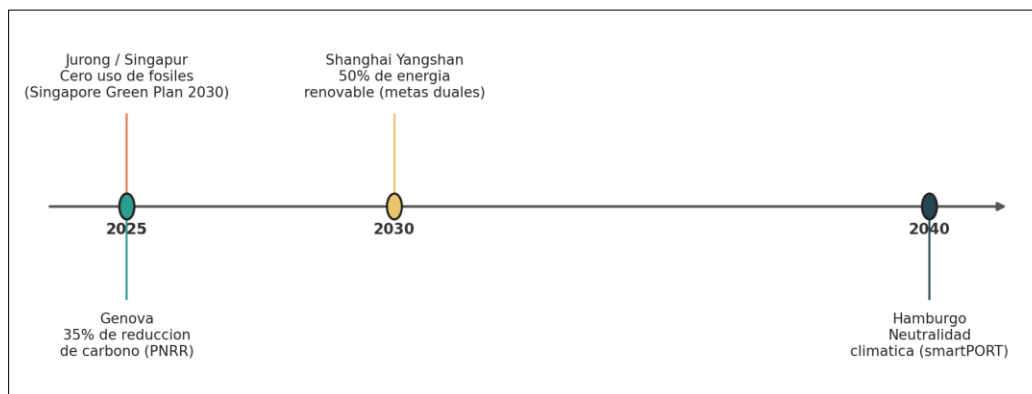
Fuente. Elaboración propia a partir de los datos reportados en Yang, Hussain, Haakana y Nardelli (2025).

Figura 3. Perfil comparativo de los cuatro puertos en cuatro indicadores clave.



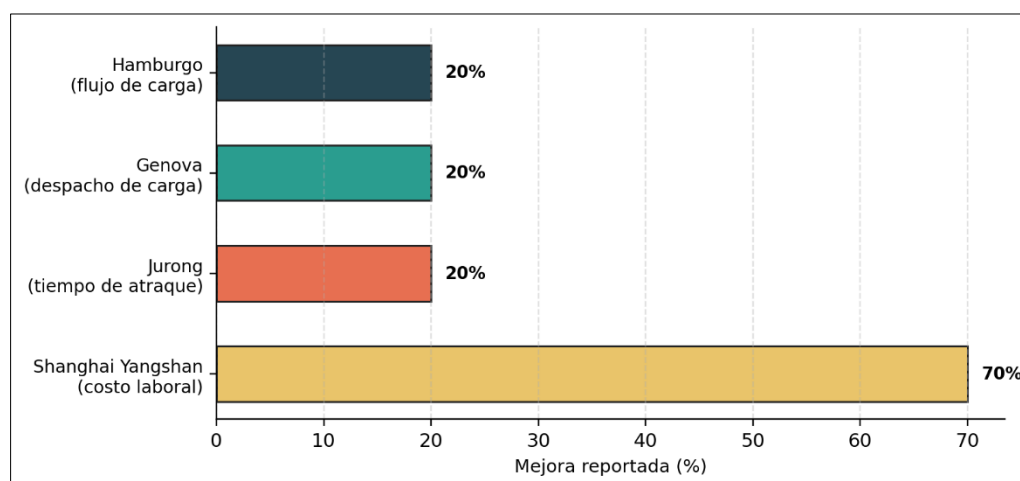
Fuente. Elaboración propia a partir de Yang et al. (2025).

Figura 4. Metas de descarbonización declaradas por cada puerto y su marco de política asociado.



Fuente. Elaboración propia a partir de Yang et al. (2025).

Figura 5. Mejora operativa reportada asociada a la automatización, por puerto.



Fuente. Elaboración propia a partir de Yang et al. (2025).

Lo que confirma la literatura más reciente (2026)

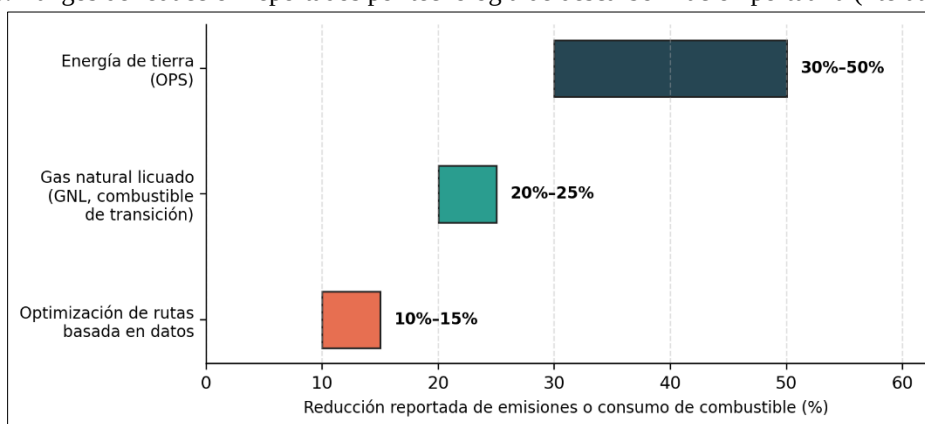
Los cuatro casos analizados no agotan el panorama, y conviene situarlos frente a lo que la literatura publicada en 2026 reporta de forma más amplia sobre tecnologías de descarbonización portuaria. La tabla 2 y la figura 6 resumen los rangos de reducción documentados por Kurniawan et al. (2026) para tres tecnologías que, de hecho, ya aparecen en los cuatro puertos comparados: energía de tierra, gas natural licuado como combustible de transición, y optimización de rutas basada en datos.

Tabla 2. Reducción de emisiones / consumo de combustible por tecnología de descarbonización portuaria.

Tecnología	Reducción reportada	Puertos que la reportan	Fuente
Energía de tierra (OPS)	30%–50% de emisiones de buques atracados	Múltiples puertos; depende de la matriz eléctrica local	Kurniawan et al. (2026)
Gas natural licuado (combustible de transición)	20%–25% menos CO2 que combustibles pesados	Adopción amplia como puente hacia cero emisiones	Kurniawan et al. (2026)
Optimización de rutas basada en datos	10%–15% menos consumo de combustible	Singapur, Rotterdam	Kurniawan et al. (2026)

Fuente. Elaboración propia a partir de Kurniawan et al. (2026).

Figura 6. Rangos de reducción reportados por tecnología de descarbonización portuaria (literatura 2026).



Fuente. Elaboración propia a partir de Kurniawan et al. (2026).

Dos matices de esta literatura reciente merecen mención. El primero: casi toda la evidencia disponible, incluidos los cuatro casos comparados aquí, proviene de puertos grandes y bien financiados; Macedo y Coelho (2026) muestran que, para puertos pequeños y medianos en la región centro de Portugal, la hoja de ruta hacia la descarbonización a 2050 exige medidas distintas, centradas en movilidad de acceso terrestre más que en electrificación de gran escala, porque no cuentan con el capital de un Hamburgo o un Shanghái. El segundo: Castro et al. (2026) advierten sobre un sesgo de eficiencia, en el que la inteligencia artificial diseñada para maximizar rendimiento sin restricciones ambientales explícitas puede reforzar, en vez de corregir, el patrón que este artículo ya documentó en Shanghái Yangshan: mucha automatización, poca reducción de emisiones.

Discusión

Si algo deja claro la comparación es que la pregunta con la que abrió este artículo tenía una respuesta incómoda: no, la implementación de tecnologías Smart Port no se traduce de manera uniforme en mejor desempeño ambiental. Hamburgo y Shanghai Yangshan invirtieron en tecnologías comparables, energía solar, electrificación, sistemas inteligentes de gestión, y obtuvieron resultados de reducción de emisiones que difieren en un factor de casi cuatro (38% frente a 10%). La variable que mejor parece explicar esa diferencia no es cuánta tecnología se instaló, sino qué tan limpia era ya la red eléctrica de la que esa tecnología se alimenta y qué tan ambicioso es el marco regulatorio que empuja la transición, un patrón que coincide con lo que Belmoukari et al. (2023) describen como la dependencia estructural de las ganancias ambientales portuarias respecto del contexto energético nacional.

El caso de Jurong añade un matiz que rara vez aparece en el discurso comercial sobre puertos inteligentes: un puerto puede liderar en participación renovable y, al mismo tiempo, mostrar una de las reducciones de emisiones más modestas del grupo, simplemente porque partía de un nivel de eficiencia ya alto antes de digitalizarse. Esto sugiere que comparar puertos únicamente por su reducción porcentual de emisiones puede ser engañoso sin conocer su línea base, un problema metodológico que Dağistan et al. (2025) también señalan como una de las brechas pendientes en la literatura del área.

Conviene ser honesto sobre los límites de esta comparación. Los cuatro casos no fueron seleccionados mediante muestreo aleatorio de una población más amplia de puertos, sino precisamente porque cuentan con datos públicos comparables, lo que introduce un sesgo hacia puertos que ya destacan en transparencia y desempeño. Puertos con transformaciones digitales menos documentadas, o simplemente menos exitosas, no están representados aquí, y es razonable suponer que el panorama sería menos favorable si se incluyeran. Además, varias de las metas de descarbonización citadas, como la neutralidad climática de Hamburgo hacia 2040, son compromisos a futuro y no resultados ya alcanzados, distinción que este artículo ha intentado mantener clara en cada tabla y cifra.

Conclusiones

Este artículo combinó una revisión documental de la literatura reciente sobre puertos inteligentes con un estudio de caso comparado de cuatro terminales que ya reportan resultados ambientales públicos y verificables: Hamburgo, Génova, Jurong y Shanghai Yangshan. La evidencia reunida no respalda la idea, bastante extendida, de que más automatización o más sensores equivalgan automáticamente a mejor desempeño ambiental en las zonas costeras donde estos puertos operan. Hamburgo logró la mayor reducción de emisiones apoyándose en electrificación e hidrógeno; Jurong lidera en energía renovable sin traducir eso, todavía, en la mayor reducción de emisiones; y Shanghai Yangshan, con la automatización más avanzada del grupo, obtuvo el menor avance ambiental medido.

La implicación práctica para autoridades portuarias y formuladores de política es directa: la eficiencia ambiental de un puerto inteligente no depende solo de qué tecnología se adopte, sino

de que esa tecnología esté acoplada a una matriz energética en transición y a metas de descarbonización con plazos concretos y mecanismos de seguimiento. Quedan como líneas de trabajo futuro ampliar esta comparación a puertos con menor disponibilidad de datos públicos, y profundizar en el efecto de la línea base energética de cada puerto sobre la magnitud de la reducción de emisiones que resulta atribuible, en sentido estricto, a su transformación digital.

Referencias

- Belmoukari, B., Audy, J.-F., & Forget, P. (2023). Smart port: A systematic literature review. *European Transport Research Review*, 15(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00581-6>
- Castro, M., Sabino, M. R., Cabrita, M. do R., Mendes, A., & Pinho, T. (2026). From smart ports to sustainable port ecosystems: The transformative role of artificial intelligence. *Systems*, 14(2), Artículo 187. <https://doi.org/10.3390/systems14020187>
- Dağıstan, U., Atalay, M., Aydın Ünal, D., & Aydın, S. Z. (2025). Sustainability of smart ports: A systematic literature review. *SAGE Open*, 15(3). <https://doi.org/10.1177/21582440251363339>
- Kurniawan, S. B., Ahmad, M. M., Pambudi, D. S. A., Alfanda, B. D., & Imron, M. F. (2026). From smart green ports to blue economy: A review of sustainable maritime infrastructure and policy. *Sustainability*, 18(8), Artículo 4038. <https://doi.org/10.3390/su18084038>
- Macedo, J., & Coelho, M. C. (2026). Decarbonizing small-medium ports in Portugal's center region: A mobility plan for a 2050 emissions reduction roadmap. *International Journal of Sustainable Transportation*. <https://doi.org/10.1080/15568318.2026.2623525>
- Mansoursamaei, M., Moradi, M., González-Ramírez, R. G., & Lalla-Ruiz, E. (2023). Machine learning for promoting environmental sustainability in ports. *Journal of Advanced Transportation*, 2023, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2023/2144733>
- Molavi, A., Lim, G. J., & Race, B. (2020). A framework for building a smart port and smart port index. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14(9), 686–700. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1610919>
- Yang, Y., Hussain, H. M., Haakana, J., & Nardelli, P. H. J. (2025). Assessing the technical and environmental impacts of energy management systems in smart ports. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2511.20043>