

Índice de Sostenibilidad Portuaria en Norteamérica: Un Enfoque Comparativo Ambiental

Port Sustainability Index in North America: A Comparative Environmental Approach

Odette Virginia Delfín Ortega¹

* Martha Villegas Manzo²

Resumen

En este estudio se realiza un Índice de Sustentabilidad Portuaria (ISP) para evaluar y comparar el desempeño ambiental de los principales puertos de México, Estados Unidos y Canadá en 2024. El índice integra seis dimensiones ambientales: emisiones, consumo de agua, consumo energético, residuos, contaminación acústica y gestión ambiental. Los resultados muestran asimetrías significativas: México alcanza el promedio más alto, seguido de Canadá y, finalmente, Estados Unidos. El ISP confirma la hipótesis de disparidades regionales y se presenta como herramienta útil para la política pública y la gestión portuaria sustentable.

Palabras clave: sostenibilidad portuaria, puertos verdes, Norteamérica, índice compuesto, gestión ambiental.

Códigos JEL: Q56, R41, O13.

Abstract

In this study, a Port Sustainability Index (PSI) is developed to evaluate and compare the environmental performance of the main ports in Mexico, the United States, and Canada in 2024. The index integrates six environmental dimensions: emissions, water consumption, energy use, waste, noise pollution, and environmental management. The results reveal significant asymmetries: Mexico records the highest average, followed by Canada, and lastly the United States. The PSI confirms the hypothesis of regional disparities and stands as a valuable tool for public policy and sustainable port management.

Keywords: port sustainability, green ports, North America, composite index, environmental management.

JEL Codes: Q56, R41, O13.

1 Profesor-Investigadora, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Correo electrónico: odette.delfin@umich.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0990-6768>

2 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Correo electrónico: 0617493d@umich.mx, ORCID: 0009-0001-2684-1196 (Autor de correspondencia).

* Autor de correspondencia: 0617493d@umich.mx

1. Introducción

El transporte marítimo es responsable de más del 80% del comercio internacional, lo que convierte a los puertos en nodos estratégicos para la economía mundial (UNCTAD, 2023). Sin embargo, su operación intensiva genera presiones ambientales significativas, incluyendo emisiones de gases contaminantes, consumo energético y afectaciones a los ecosistemas costeros. En este contexto, la sostenibilidad portuaria se ha convertido en un tema prioritario para gobiernos, empresas y la academia (Puig *et al.*, 2014).

Diversos autores destacan la necesidad de integrar indicadores ambientales en la gestión portuaria, lo que ha dado lugar a los conceptos de “puertos verdes” y “puertos inteligentes” (Haralambides & Merk, 2020; Acciaro *et al.*, 2014). Estos modelos buscan compatibilizar la eficiencia logística con la protección ambiental, a través de innovaciones tecnológicas, digitalización y estrategias de economía circular (González-Aregall *et al.*, 2019). No obstante, en América del Norte, los países presentan niveles diferenciados en cuanto a infraestructura, normatividad y desempeño ambiental, lo que abre una brecha de conocimiento en torno a la comparación regional (Notteboom *et al.*, 2022).

La relevancia de este estudio radica en que proporciona un Índice de Sostenibilidad Portuaria (ISP) construido a partir de seis dimensiones ambientales: emisiones, consumo de agua, consumo energético, residuos, contaminación acústica y gestión ambiental. Con base en datos recientes (2024), este índice ofrece una herramienta para evaluar, comparar y proponer mejoras en los puertos de México, Estados Unidos y Canadá. La investigación cubre una brecha en la literatura al integrar una perspectiva regional, ya que la mayoría de los estudios se concentran en casos individuales o en regiones europeas y asiáticas.

El objetivo de esta investigación es evaluar el desempeño ambiental de los puertos de Norteamérica mediante un índice compuesto (ISP), a fin de identificar diferencias y proponer estrategias de mejora. La hipótesis plantea que existen asimetrías significativas en los niveles de sostenibilidad portuaria entre México, Estados Unidos y Canadá, derivadas de sus marcos regulatorios, infraestructura y capacidades tecnológicas.

El documento se organiza de la siguiente manera: primero se encuentra la introducción, en la sección 2 se presenta el arco teórico de la sustentabilidad, en la 3 la metodología y construcción del ISP, en la 4 los resultados y discusión, y finalmente en la sección 5 las conclusiones y recomendaciones de política pública.

2. Marco Teórico: La Sustentabilidad y sus Precursores

La sustentabilidad se ha consolidado como un concepto clave en el análisis del desarrollo económico, social y ambiental contemporáneo. En su definición más general, alude a la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras. Este principio, ampliamente difundido a partir del Informe Brundtland (1987), recoge la preocupación mundial por los límites del crecimiento económico y el deterioro ambiental, estableciendo un punto de inflexión en la reflexión académica y en la agenda política internacional.

Sin embargo, las bases del pensamiento sustentable se remontan a tiempos anteriores. Desde mediados del siglo XX, diversos investigadores y organismos internacionales comenzaron a advertir sobre la presión que las actividades humanas ejercen sobre los ecosistemas. El Club de Roma, a través de su informe *Los límites del crecimiento* (1972), marcó uno de los primeros llamados de atención sistemáticos, al demostrar mediante modelos de simulación que el crecimiento económico ilimitado no era compatible con los recursos finitos del planeta.

En el ámbito científico, autores como Rachel Carson (1962) con su obra **Silent Spring**, alertaron sobre los efectos nocivos de los pesticidas en la biodiversidad y la salud humana, introduciendo una mirada crítica hacia las prácticas productivas modernas. Estos aportes pueden considerarse precursores directos de la sustentabilidad, pues evidenciaron la necesidad de replantear la relación entre el ser humano y la naturaleza. Asimismo, desde la ecología surgieron teorías que cuestionaban la idea de recursos infinitos, incorporando el concepto de resiliencia de los ecosistemas.

En paralelo, surgieron corrientes de pensamiento económico que también influyeron en el desarrollo del concepto. Autores como Herman Daly (1996), desde la economía ecológica, plantearon la idea de un “estado estacionario” en el que el crecimiento debía ajustarse a los límites biofísicos del planeta. Esta postura contrastaba con la economía neoclásica dominante, que consideraba los recursos naturales como insumos sustituibles y, en muchos casos, inagotables. La crítica ecológica a esta visión contribuyó a cimentar un paradigma alternativo de desarrollo.

En América Latina, Enrique Leff (2004) impulsó una visión crítica de la sustentabilidad, vinculándola con la justicia social y el respeto a la diversidad cultural. Leff subrayó que no podía hablarse de desarrollo sustentable sin tomar en cuenta las desigualdades estructurales entre países y regiones. De este modo, la sustentabilidad se fue nutriendo de un enfoque interdisciplinario, integrando aportes de la ecología, la economía, la sociología y la filosofía política.

En suma, la sustentabilidad como concepto no surgió de manera repentina, sino como resultado de una evolución histórica marcada por aportaciones científicas, políticas y sociales. Sus primeros precursores sentaron las bases para comprender la interdependencia entre economía, sociedad y naturaleza, destacando la urgencia de replantear los modelos de desarrollo. Hoy, la sustentabilidad se reconoce como un paradigma central en la construcción de políticas públicas, estrategias empresariales y debates académicos que buscan garantizar un equilibrio entre progreso humano y preservación ambiental.

Por otro lado, la sustentabilidad portuaria surge como una aplicación específica del paradigma general de la sustentabilidad, donde los puertos se conciben no solo como nodos logísticos, sino como espacios de interacción entre economía, sociedad y medio ambiente.

Los primeros debates sobre sustentabilidad portuaria se intensificaron a finales del siglo XX, cuando organismos como la International Maritime Organization (IMO) y la European Sea Ports Organisation (ESPO) comenzaron a emitir lineamientos en materia de gestión ambiental y eficiencia energética. Estos enfoques dieron origen al concepto de “puertos verdes”, caracterizados por el control de emisiones, la implementación de energías renovables, la gestión adecuada de residuos y la protección de la biodiversidad marina. De este modo, los puertos se convirtieron en espacios clave para la transición hacia un transporte marítimo más sostenible.

En la actualidad, la sustentabilidad portuaria implica la integración de los tres pilares fundamentales: económico, ambiental y social. En el ámbito económico, se busca mantener la competitividad y eficiencia en la cadena logística; en el ambiental, reducir la huella ecológica de las operaciones portuarias mediante tecnologías limpias y planes de mitigación; y en el social, promover la participación de comunidades locales y garantizar condiciones laborales justas. Este enfoque holístico responde a la necesidad de alinear la actividad portuaria con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular aquellos vinculados a la acción climática, la vida submarina y el trabajo decente.

2.1 Revisión de literatura

La sostenibilidad portuaria se ha convertido en un campo de investigación clave en la última década, dado el creciente reconocimiento del impacto ambiental del transporte marítimo. La literatura identifica que los puertos son responsables de un porcentaje significativo de emisiones de gases contaminantes y generación de residuos, además de presionar ecosistemas marinos y costeros (Puig *et al.*, 2014; Vaca-Cabrero *et al.*, 2025; Notteboom *et al.*, 2022). La necesidad de transitar hacia modelos sostenibles ha impulsado la creación de indicadores, marcos normativos y certificaciones ambientales específicas para la gestión portuaria (Haralambides & Merk, 2020; Karakasnaki *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022).

Uno de los enfoques más recientes es el concepto de puertos verdes, que busca reducir la huella ambiental mediante medidas como electrificación de muelles, uso de energías renovables y planes de gestión ambiental integral (Acciaro *et al.*, 2014; Akhahenda, *et al.*, 2024; Halpe, *et al.*, 2025). Paralelamente, el concepto de puertos inteligentes ha ganado relevancia, ya que integra digitalización, automatización y análisis de datos para mejorar la eficiencia operativa y, al mismo tiempo, la sostenibilidad (Liu *et al.*, 2025; Woo *et al.*, 2011; Lam & Dai, 2015). Estudios recientes muestran que la combinación de estos dos enfoques es fundamental para alcanzar metas de sostenibilidad en el transporte marítimo global (Amani *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2022; Rakin, 2025).

En el contexto norteamericano, la investigación es aún limitada. Mientras que Estados Unidos ha implementado iniciativas de electrificación portuaria y monitoreo ambiental en terminales de alto volumen, México y Canadá presentan avances más dispares. México, por ejemplo, ha comenzado a impulsar programas de certificación ambiental y estrategias de transición energética en algunos de sus principales puertos (Delfin & Villegas, 2024), pero aún enfrenta retos en la homologación de indicadores y en la aplicación uniforme de normativas. Canadá, por su parte, ha fortalecido políticas ambientales que promueven la reducción de emisiones y la innovación en infraestructura, aunque enfrenta desafíos derivados de la heterogeneidad de su geografía y el volumen de comercio marítimo (López-Vallejo, 2023).

Un vacío identificado en la literatura es la falta de análisis comparativos entre países de América del Norte. La mayor parte de los estudios previos se centran en casos individuales, como los puertos de Los Ángeles y Long Beach en Estados Unidos o el puerto de Vancouver en Canadá, mientras que México ha recibido menor atención académica (González-Aregall *et al.*, 2019; Oloruntobi, *et al.*, 2023; Darousos *et al.*, 2023). De esta manera, se hace evidente la necesidad de una herramienta que permita evaluar de manera integral y estandarizada el nivel de sostenibilidad de los puertos norteamericanos, para así identificar brechas y orientar políticas públicas regionales.

En este sentido, el presente estudio contribuye a la literatura mediante la construcción de un Índice de Sostenibilidad Portuaria (ISP), que sintetiza diversos indicadores ambientales y ofrece un marco comparativo. Esta aproximación busca llenar la brecha existente en torno a la medición homogénea de la sostenibilidad portuaria en la región, aportando además recomendaciones de política y gestión aplicables en los tres países.

3. Metodología

El presente estudio se centra en la sustentabilidad portuaria, limitando el análisis exclusivamente a la dimensión ambiental, dado que constituye uno de los principales retos de los puertos norteamericanos en el contexto de

la transición energética y la reducción de emisiones. Para ello, se desarrolló un Índice de Sustentabilidad Portuaria (ISP), construido a partir de indicadores ambientales obtenidos de fuentes oficiales, bases de datos de organismos internacionales y reportes gubernamentales de México, Estados Unidos y Canadá correspondientes al año 2024. Este enfoque metodológico busca capturar las fortalezas y debilidades en la gestión ambiental de los principales puertos de la región.

3.1 Selección de indicadores ambientales

Con base en la literatura (OMS, 2024; UNEP, 2024; FAO, 2018; EPA, 1993; ESCWA, 2020; EEA, 2020 y Unstats, 2012); se seleccionaron los siguientes indicadores ambientales como representativos de la sustentabilidad portuaria:

1. Calidad del aire en áreas portuarias (índice de partículas PM2.5).
2. Consumo de agua
3. Consumo de energía (kWh por tonelada movilizada).
4. Gestión de residuos sólidos
5. Emisiones de gases efecto invernadero
6. Emisiones atmosféricas
7. Calidad acústica
8. Ecoeficiencia

Indicador Ambiental	Medición del indicador
Calidad del aire	Índice de Calidad del Aire (ICA): Es un indicador que resume la calidad del aire en una sola medida, generalmente en una escala de 0 a 500. El ICA se calcula teniendo en cuenta varios contaminantes clave, como partículas suspendidas (PM2.5 y PM10), ozono (O3), dióxido de azufre (SO2), dióxido de nitrógeno (NO2) y monóxido de carbono (CO) (OMS, 2024).
Consumo de agua	Mide la cantidad de agua utilizada en un determinado período y su eficiencia en relación con la producción o actividad (FAO, 2018).
Consumo de energía	Mide la cantidad de energía utilizada, ya sea eléctrica, térmica o de otro tipo, y su eficiencia en relación con la producción o actividad (Nations, 2016).
Gestión de residuos sólidos	Mide la cantidad de residuos sólidos generados y promueve la reducción, el reciclaje y una gestión adecuada (Nations, 2016).
Emisiones de gases efecto invernadero	Mide la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono (CO2), metano (CH4) y óxido nitroso (N2O), y fomenta su reducción y neutralización (GOB, 2012).
Emisiones atmosféricas	Mide las emisiones de contaminantes atmosféricos, como óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO2) y partículas suspendidas, y busca su control y reducción (ESCWA, 2020).

Calidad acústica	Nivel de presión sonora (Lp): Este indicador mide el nivel de intensidad del sonido presente en un entorno determinado. Se expresa en decibelios (dB) y se utiliza para evaluar el nivel de ruido ambiental. Se pueden medir los niveles de presión sonora en diferentes momentos del día y en distintas áreas para identificar áreas de mayor exposición al ruido (EPA, 1993).
Ecoeficiencia	Este indicador evalúa la relación entre la producción de bienes y servicios y la cantidad de recursos naturales utilizados. Puede medirse como la cantidad de recursos (materiales, agua, energía, etc.) utilizados por unidad de producto o como la cantidad de producto obtenido por unidad de recurso utilizado (Unstats, 2012).

3.2 Fuentes de información

Los datos fueron recolectados a partir de:

- **Bases gubernamentales:** Administración Portuaria Integral de México (API), U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Transport Canada.
- **Reportes internacionales:** OCDE (2023), UNCTAD (2023), Organización Marítima Internacional (2022).
- **Literatura científica:** estudios de Acciario et al. (2014), Delfin Ortega & Villegas Manzo (2024), y el *Manual de Puertos Inteligentes* (2023).

La combinación de estas fuentes garantiza tanto la **robustez de la información** como la **comparabilidad internacional** de los resultados

3.3 Desarrollo metodológico

Normalización de los datos

Dado que los indicadores provienen de fuentes heterogéneas y con diferentes unidades de medida, fue necesario aplicar un proceso de normalización *min-max* (Han et al., 2012), que permite estandarizar los datos en una escala entre 0 y 1. La fórmula aplicada fue la siguiente:

$$X'_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

Donde X_i es el valor del indicador para el puerto o país, X_{\min} y X_{\max} representan los valores mínimo y máximo observados en el conjunto de datos.

En aquellos casos en que valores más altos representaban un impacto negativo (por ejemplo, emisiones de CO₂ o consumo energético), se aplicó la transformación inversa:

$$X'_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

De esta manera, valores cercanos a 1 representan un mejor desempeño ambiental, y valores cercanos a 0 indican menor grado de sustentabilidad.

3.4 Construcción del Índice de Sustentabilidad Portuaria (ISP)

Una vez normalizados los indicadores, se calculó el ISP como un promedio simple:

$$ISP = \Sigma X'_i / n \quad (3)$$

Donde n corresponde al número de indicadores ambientales seleccionados (en este caso, seis). El ISP se estimó a nivel puerto y posteriormente se calcularon promedios nacionales para México, Estados Unidos y Canadá. Esto permite realizar comparaciones tanto entre países como entre puertos específicos, identificando fortalezas y áreas de mejora.

4. Resultados y Discusión

En este apartado se presentan los **resultados obtenidos a partir de la aplicación del Índice de Sustentabilidad Portuaria (ISP)**, construido con base en los indicadores ambientales seleccionados. Se muestran, en primer lugar, los valores individuales por puerto, lo que permite identificar fortalezas y debilidades específicas en cada caso. Posteriormente, se realiza una **comparación a nivel nacional**, destacando las diferencias entre México, Estados Unidos y Canadá. Finalmente, se discuten los principales hallazgos, contrastándolos con la literatura existente y con los marcos de referencia internacionales, con el fin de proporcionar un diagnóstico integral del desempeño ambiental portuario en Norteamérica.

4.1 Resultados por Puerto

En la Tabla 1 se presentan los valores del Índice de Sustentabilidad Portuaria (ISP) obtenidos para los principales puertos de México, Estados Unidos y Canadá. Los resultados muestran diferencias significativas entre puertos, destacando a Miami (USA) como el de mayor desempeño ambiental, mientras que Los Ángeles (USA) registra el menor nivel de sustentabilidad.

Tabla 1

Índice de Sustentabilidad Portuaria de Norteamérica		
Puerto	País	ISP
Miami	Estados Unidos	0.846
Manzanillo	México	0.728
Lázaro Cárdenas	México	0.720
Toronto	Canadá	0.720
Georgia	Estados Unidos	0.708
Trois-Rivières	Canadá	0.707
Veracruz	México	0.692
Altamira	México	0.689
Seattle- Tacoma	Estados Unidos	0.676

Hamilton	Canadá	0.669
Charleston, Carolina del Sur	Estados Unidos	0.665
Montreal	Canadá	0.659
Houston	Estados Unidos	0.653
Ensenada	México	0.647
Quebec	Canadá	0.646
Virginia, Norfolk	Estados Unidos	0.630
Oakland	Estados Unidos	0.616
Halifax	Canadá	0.608
Saint John	Canadá	0.599
Prince Rupert	Canadá	0.573
Vancouver	Canadá	0.537
Nueva York	Estados Unidos	0.504
Long Beach	Estados Unidos	0.483
Los Ángeles	Estados Unidos	0.344

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos.

4.2 Comparación por País

Con el fin de identificar patrones regionales, los valores del ISP se agruparon por país (Tabla 2). Los resultados evidencian que México (0.695) presenta el mejor promedio de sustentabilidad portuaria, seguido de Canadá (0.635) y finalmente Estados Unidos (0.612).

Tabla 2.

Indice de Sustentabilidad Portuaria Promedio por País

País	ISP Promedio
México	0.695
Canadá	0.635
Estados Unidos	0.612

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos.

En la imagen 1, se puede observar también los resultados del índice promedio por país, donde se puede evidenciar lo siguiente:

México

México presenta el valor promedio más alto del índice (0.695), lo que refleja un desempeño relativamente favorable en términos de sustentabilidad portuaria. Este resultado se asocia con la creciente incorporación de prácticas ambientales en algunos de sus principales puertos, como la gestión de residuos, la certificación ambiental y la modernización de infraestructura. Además, México ha mostrado avances en la integración de políticas públicas orientadas al desarrollo sostenible en la zona portuaria, lo cual le otorga una posición de liderazgo relativo frente a sus socios de América del Norte.

Canadá

Canadá alcanza un nivel intermedio (0.635), lo que indica un esfuerzo importante, aunque con áreas por fortalecer. El país cuenta con puertos altamente tecnificados y con programas de mitigación ambiental, especialmente en temas de eficiencia energética y reducción de emisiones. Sin embargo, el índice sugiere que todavía existen retos en la dimensión social y en la integración de comunidades locales a los beneficios del desarrollo portuario. En comparación con México, Canadá mantiene un menor puntaje, lo que puede explicarse por diferencias en las estrategias de gestión integral de la sustentabilidad.

Estados Unidos

Estados Unidos muestra el valor más bajo (0.612), lo cual puede resultar contradictorio dada su infraestructura portuaria avanzada y su papel central en el comercio internacional. No obstante, el índice evidencia que la sustentabilidad portuaria no depende únicamente del tamaño o eficiencia operativa, sino también de la implementación de políticas verdes, la innovación tecnológica en energías limpias y la inclusión social en las zonas de influencia. La menor puntuación podría deberse a rezagos en la adopción de prácticas ambientales unificadas a nivel federal, o a la heterogeneidad entre puertos con muy distintos niveles de compromiso con la sustentabilidad.

La gráfica 1 presenta a los cinco puertos con mayor y menor desempeño en el ISP. En la parte superior, Miami (0.846) se destaca como líder regional gracias a su infraestructura avanzada y políticas ambientales consolidadas. Manzanillo (0.728) y Lázaro Cárdenas (0.720) demuestran que en México los programas de certificación y modernización están teniendo un impacto positivo. En contraste, Los Ángeles (0.344) y Long Beach (0.483) muestran rezagos importantes, evidenciando que incluso puertos con gran volumen pueden enfrentar dificultades para equilibrar eficiencia logística con sustentabilidad ambiental. Esta heterogeneidad dentro de USA explica en parte su bajo promedio nacional.

Imagen 1

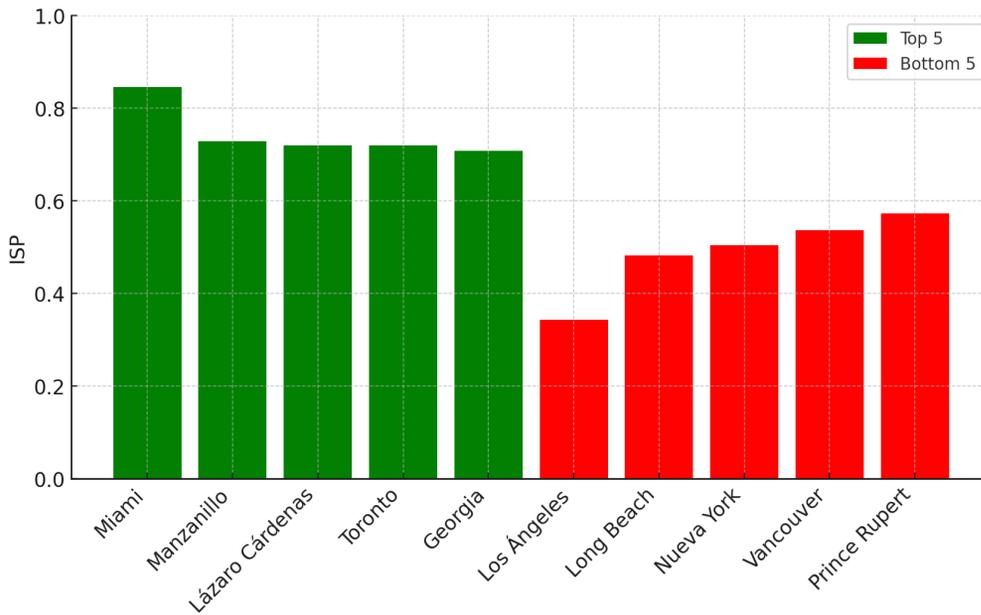
Mapa del Índice de Sustentabilidad Portuaria



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos.

Gráfica 1

Puertos con mejor y peor desempeño ISP



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos.

Los puertos ubicados en el *Top 5* comparten patrones: buena ecoeficiencia, gestión ambiental consolidada y mejor calidad del aire/ruido, lo que sugiere madurez operativa y digital (menos tiempos muertos y maniobras). En el extremo opuesto, los puertos del *Bottom 5* concentran sus debilidades en emisiones (GEI y contaminantes criterio) y consumo energético, típicamente por mayor congestión, infraestructuras más antiguas o menor adopción de electrificación y OPS. Esto explica por qué Estados Unidos, pese a tener el líder (Miami), presenta promedio nacional inferior: la heterogeneidad interna arrastra el promedio por el rezago de puertos de gran volumen como Los Ángeles y Long Beach.

4.3 Discusión de resultados

Los resultados del ISP muestran que los mejores puntajes están asociados a puertos que han implementado estrategias de digitalización, electrificación de equipos, gestión integral de residuos y certificaciones ambientales. Esto coincide con el enfoque del Manual de Puertos Inteligentes (Comisión Interamericana de Puertos, 2023), que destaca la necesidad de transitar hacia un puerto hiperconectado y sustentable, integrando a toda la comunidad portuaria. De igual forma, el marco de *Puerto Verde México* resalta la relevancia de la certificación ambiental PERS/EcoPorts, la reducción de GEI y la incorporación de energías limpias, aspectos clave en el desempeño de puertos mexicanos como Manzanillo y Lázaro Cárdenas.

A continuación se resumen (véase table 3), para cada puerto, los dos indicadores con mejor desempeño (fortalezas) y los dos con peor desempeño (debilidades) dentro de la dimensión ambiental. Se incluye una recomendación prioritaria enfocada en corregir los rezagos detectados.

Tabla 3

Diagnóstico Portuario: Fortalezas y Debilidades del ISP

Puerto	País	Fortalezas	Debilidades	Recomendación prioritaria
Halifax	Canadá	Emisiones de CO ₂ , Calidad del aire	Calidad acústica, Gestión ambiental	Implementar Onshore Power Supply OPS (Suministro de Energía en Tierra). Permite que los buques, al atracar en puerto, se conecten directamente a la red eléctrica terrestre y apaguen sus motores auxiliares de combustión Implementar SGA ISO 14001 y certificación PERS/EcoPorts con metas públicas anuales.
Hamilton	Canadá	Consumo de energía, Consumo de combustible	Emisiones atmosféricas, Ecoeficiencia	Control de combustibles limpios, y renovación tecnológica de equipos. Optimización de procesos y digitalización para reducir recursos por unidad movilizada.

Montreal	Canadá	Emissiones de CO ₂ , Ecoeficiencia	Gestión de residuos, Calidad acústica	Se sugiere implementar contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque. OPS en muelle, pantallas acústicas, mantenimiento preventivo y ventanas horarias para maniobras ruidosas.
Prince Rupert	Canadá	Emissiones de CO ₂ , Consumo de agua	Calidad acústica, Calidad del aire	OPS en muelle, pantallas acústicas, mantenimiento preventivo y ventanas horarias para maniobras ruidosas. Monitoreo continuo así como control de emisiones en maniobras y barreras/zonificación en áreas sensibles.
Quebec	Canadá	Emissiones de CO ₂ , Consumo de agua	Gestión de residuos, Ecoeficiencia	Se sugiere gestionar contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque. Optimización de procesos y digitalización (PCS/ventanilla única) para reducir recursos por unidad movilizada.
Saint John	Canadá	Emissiones de CO ₂ , Consumo de agua	Ecoeficiencia, Calidad acústica	Optimización de procesos y digitalización (PCS/ventanilla única) para reducir recursos por unidad movilizada. OPS en muelle, pantallas acústicas, mantenimiento preventivo y ventanas horarias para maniobras ruidosas.
Toronto	Canadá	Consumo de agua, Emissiones de CO ₂	Calidad del aire, Emissiones atmosféricas	Monitoreo continuo, control de emisiones en maniobras y barreras/zonificación en áreas sensibles. Control de combustibles limpios, filtros y renovación tecnológica de equipos.
Trois-Rivières	Canadá	Consumo de energía, Consumo de combustible	Gestión de residuos, Calidad acústica	Gestión de contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque. OPS en muelle, pantallas acústicas, mantenimiento preventivo y ventanas horarias para maniobras ruidosas.
Vancouver	Canadá	Emissiones de CO ₂ , Gestión de residuos	Emissiones atmosféricas, Calidad acústica	Control de NO _x /SO _x /PM (combustibles limpios, filtros) y renovación tecnológica de equipos. OPS en muelle, pantallas acústicas, mantenimiento preventivo y ventanas horarias para maniobras ruidosas.
Charleston, carolina del Sur	Estados Unidos	Consumo de agua, Emissiones de CO ₂	Gestión ambiental, Calidad acústica	Implementar/fortalecer ISO 14001 y certificación PERS/EcoPorts con metas públicas anuales. OPS en muelle, pantallas acústicas, mantenimiento preventivo y ventanas horarias para maniobras ruidosas.

Georgia	Estados Unidos	Consumo de agua, Emisiones de CO ₂	Gestión de residuos, Calidad del aire	Segregación en fuente, contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque. Monitoreo continuo, control de emisiones en maniobras y barreras/zonificación en áreas sensibles.
Houston	Estados Unidos	Calidad del aire, Ecoeficiencia	Gestión de residuos, Gestión ambiental	Segregación en fuente, contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque. Implementar/fortalecer SGA ISO 14001 y certificación PERS/EcoPorts con metas públicas anuales.
Long Beach	Estados Unidos	Gestión de residuos, Gestión ambiental	Calidad del aire, Emisiones atmosféricas	Monitoreo continuo, control de emisiones en maniobras y barreras/zonificación en áreas sensibles. Control de combustibles limpios, filtros y renovación tecnológica de equipos.
Los Ángeles	Estados Unidos	Gestión de residuos, Calidad acústica	Emisiones de CO ₂ , Emisiones atmosféricas	OPS para buques en atraque, mayor participación ferroviaria y optimización de estancias y velocidades. Control de combustibles limpios, filtros y renovación tecnológica de equipos.
Miami	Estados Unidos	Gestión ambiental, Emisiones de CO ₂	Emisiones atmosféricas, Gestión de residuos	Control de combustibles limpios, filtros y renovación tecnológica de equipos. Segregación en fuente, contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque.
Nueva York	Estados Unidos	Calidad acústica, Gestión ambiental	Consumo de combustible, Calidad del aire	Electrificación de flota interna y combustibles alternativos; capacitación en conducción eficiente. Monitoreo continuo, control de emisiones en maniobras y barreras/zonificación en áreas sensibles.
Oakland	Estados Unidos	Calidad del aire, Consumo de agua	Gestión ambiental, Ecoeficiencia	Implementar/fortalecer SGA ISO 14001 y certificación PERS/EcoPorts con metas públicas anuales. Optimización de procesos y digitalización (PCS/ventanilla única) para reducir recursos por unidad movilizada.
Seattle- Tacoma	Estados Unidos	Emisiones de CO ₂ , Consumo de energía	Calidad acústica, Emisiones atmosféricas	OPS en muelle, pantallas acústicas, mantenimiento preventivo y ventanas horarias para maniobras ruidosas. Control de combustibles limpios, filtros y renovación tecnológica de equipos.

Virginia, Norfolk	Estados Unidos	Emisiones atmosféricas, Consumo de agua	Gestión de residuos, Ecoeficiencia	Segregación en fuente, contratos de valorización y trazabilidad MARPOL para residuos de buque. Optimización de procesos y digitalización (PCS/ventanilla única) para reducir recursos por unidad movilizada.
Altamira	México	Consumo de agua, Emisiones de CO ₂	Gestión de residuos, Ecoeficiencia	Gestión de contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque. Optimización de procesos y digitalización (PCS/ventanilla única) para reducir recursos por unidad movilizada.
Ensenada	México	Consumo de agua, Emisiones de CO ₂	Gestión de residuos, Ecoeficiencia	Gestión de contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque. Optimización de procesos y digitalización (PCS/ventanilla única) para reducir recursos por unidad movilizada.
Lázaro Cárdenas	México	Gestión ambiental, Emisiones de CO ₂	Emisiones atmosféricas, Ecoeficiencia	Control de combustibles limpios, filtros y renovación tecnológica de equipos. Optimización de procesos y digitalización (PCS/ventanilla única) para reducir recursos por unidad movilizada.
Manzanillo	México	Ecoeficiencia, Emisiones de CO ₂	Calidad del aire, Gestión de residuos	Monitoreo continuo (PM2.5/NOx), control de emisiones en maniobras y barreras/zonificación en áreas sensibles. gestion de contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque.
Veracruz	México	Emisiones de CO ₂ , Consumo de agua	Gestión de residuos, Ecoeficiencia	Segregación en fuente, contratos de valorización y trazabilidad para residuos de buque. Optimización de procesos y digitalización (PCS/ventanilla única) para reducir recursos por unidad movilizada.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos.

Políticas portuarias

En el caso de México, se recomienda consolidar el programa de *Puerto Verde México* mediante una estrategia nacional que homologue indicadores ambientales entre APIs, integrando **OPS** en puertos prioritarios y fomentando alianzas público-privadas para financiar microrredes renovables (Comisión Interamericana de Puertos, 2022),. La adopción de certificaciones internacionales como PERS/EcoPorts daría credibilidad al avance del país.

Para Canadá, el desafío principal es la *heterogeneidad geográfica y climática*. Se recomienda avanzar hacia corredores verdes multimodales y aprovechar el marco normativo robusto para unificar prácticas de gestión ambiental entre puertos del Atlántico y del Pacífico. Además, la electrificación progresiva de equipos y la valorización de residuos permitirán consolidar su rol como líder en innovación portuaria sustentable.

Estados Unidos debe atender la brecha interna entre puertos líderes y rezagados. Mientras Miami demuestra los beneficios de la digitalización y la gestión ambiental avanzada, puertos como Los Ángeles y Long Beach requieren inversiones urgentes en OPS, combustibles alternativos y eficiencia logística. Una política nacional que incentive la adopción de tecnologías limpias y reduzca la congestión en grandes *hubs* sería clave para elevar el promedio nacional de sustentabilidad.

Este estudio presenta varias fortalezas destacables. En primer lugar, ofrece un enfoque comparativo trinacional entre México, Estados Unidos y Canadá, sustentado en datos recientes y homogéneos. Su metodología es clara y transparente, basada en la normalización *min-max*, la inversión de indicadores con impactos negativos y el cálculo de un promedio simple, lo que facilita su comprensión y aplicación. Además, proporciona un diagnóstico individual por puerto, identificando fortalezas y debilidades específicas.

Esta investigación también se alinea con marcos de referencia internacionales y certificaciones ambientales, incorporando un enfoque operativo y medible a través de indicadores clave de desempeño (KPIs). Asimismo, es replicable de manera anual y puede escalarse para incluir nuevas dimensiones o ponderaciones conforme evolucionen los desafíos ambientales. Finalmente, constituye una herramienta útil para la política pública y la gestión portuaria, ya que facilita la elaboración de hojas de ruta realistas y el seguimiento sistemático de avances hacia una mayor sustentabilidad.

Conclusiones

El presente estudio desarrolló un Índice de Sustentabilidad Portuaria (ISP) con el objetivo de evaluar comparativamente el desempeño ambiental de los principales puertos de México, Estados Unidos y Canadá. Para ello, se integraron diversas variables representativas de la dimensión ambiental portuaria, a saber: consumo de energía, consumo de agua, consumo de combustible, emisiones de CO₂, emisiones atmosféricas, calidad del aire, calidad acústica, gestión de residuos, gestión ambiental y ecoeficiencia. Estas variables fueron normalizadas mediante la técnica *min-max*, invirtiendo aquellas cuyo aumento implica un impacto negativo, y posteriormente se calcularon promedios simples para cada puerto y para los promedios nacionales.

Los resultados mostraron diferencias significativas tanto entre países como entre puertos. A nivel trinacional, México se posicionó como el país con mejor promedio de sustentabilidad (0.695), seguido de Canadá (0.635) y en último lugar Estados Unidos (0.612). A nivel portuario, Miami (USA) se consolidó como el puerto con mayor desempeño (0.846), mientras que Los Ángeles (USA) y Long Beach (USA) se ubicaron en los últimos lugares con valores de 0.344 y 0.483, respectivamente. En México, Manzanillo y Lázaro Cárdenas destacaron con puntajes superiores a 0.72, lo que refleja el impacto positivo de políticas recientes de certificación ambiental y modernización de infraestructura. En Canadá, puertos como Toronto y Trois-Rivières mantuvieron resultados consistentes, aunque otros como Vancouver y Prince Rupert registraron rezagos.

Estos hallazgos confirman la hipótesis inicial: existen asimetrías significativas en la sustentabilidad portuaria entre los tres países de América del Norte, derivadas de diferencias en infraestructura, marcos regulatorios y capacidades tecnológicas. Mientras México ha logrado avances importantes en algunos puertos

estratégicos, Estados Unidos presenta una marcada heterogeneidad interna, con casos de excelencia como Miami pero también fuertes rezagos en grandes *hubs* logísticos. Canadá, por su parte, muestra un desempeño intermedio con fortalezas en innovación y retos asociados a su dispersión geográfica.

Finalmente, el ISP diseñado constituye una herramienta útil para evaluar y comparar la sustentabilidad portuaria de manera integral, transparente y replicable. Su aplicación permite identificar fortalezas, debilidades y áreas prioritarias de intervención tanto a nivel portuario como nacional, aportando un insumo valioso para la toma de decisiones en política pública, planeación estratégica y gestión ambiental portuaria. Asimismo, este estudio sienta las bases para futuras investigaciones que incorporen nuevas dimensiones (sociales y económicas) y metodologías más sofisticadas de ponderación, fortaleciendo así la visión integral de la sostenibilidad en los puertos de Norteamérica.

Bibliografía

- Acciario, M., Ghiara, H., & Cusano, M. (2014). Energy management in seaports: A new role for port authorities. *Energy Policy*, 71, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.013>
- Administración Portuaria Integral de México (API) (2025). Informe anual de operaciones portuarias. Gobierno de México.
- Akhahenda, W., Kim, H., Son, W., Lee, J., & Cho, I. (2024). Analysis of maritime piracy trends and patterns using spatial autocorrelation in Africa. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 8(1–2). <https://doi.org/10.1080/25725084.2024.2325274>
- Amani, H., Bouyaya, L., Chaib, R., & Amani, M. (2024). Sustainable ship scheduling optimization for better berth allocation at the port of Annaba-Algeria. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 8(4). <https://doi.org/10.1080/25725084.2024.2408699>
- Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future. World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Houghton Mifflin.
- Comisión Interamericana de Puertos. (2022). *Puerto Verde México: Lineamientos para la implementación de buenas prácticas ambientales en los puertos mexicanos*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Comisión Interamericana de Puertos. (2023). *Manual de puertos inteligentes: Estrategia y hoja de ruta*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Daly, H. (1996). *Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*. Beacon Press.
- Darousos, E., Mejia, M., Panteladis, I., & Pastra, A. (2023). Maritime sustainability and the need for global performance indicators in shipping: An empirical investigation based on the Shipping KPI Standard by BIMCO. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 17(4), 759-768. <https://doi.org/10.12716/1001.17.04.01>
- Delfin Ortega, O. V., & Villegas Manzo, M. (2024). Desarrollo sostenible en los principales puertos de México. En J. F. Sarmiento Franco (Coord.), *Sostenibilidad y desarrollo regional de cara a los desafíos socioambientales* (pp. 263–280). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas; Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional. ISBN: 978-607-30-9747-5; 978-607-8632-44-2

- European Environment Agency (EEA) (2020). The European environment — state and outlook 2020: Knowledge for transition to a sustainable Europe. Publications Office of the European Union. <https://www.eea.europa.eu/soer/2020>
- Environmental Protection Agency (EPA) (1993). *Green book: Guidance for preparing site characterizations for the contaminated sites*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). The state of world fisheries and aquaculture 2018: Meeting the sustainable development goals. FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9540EN/>
- Gonzalez-Aregall, M., Bergqvist, R., & Monios, J. (2019). Port-driven measures for incentivizing sustainable hinterland transport. In R. Bergqvist & J. Monios (Eds.), *Green ports: Inland and seaside sustainable transportation strategies* (pp. 193–210). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814054-3.00010-4>
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2012). *Data Mining: Concepts and Techniques* (3rd ed.). Morgan Kaufmann.
- Halpe, P., Adams, M., & Walker, T. (2025). Challenges and opportunities for ports in achieving net-zero emissions in maritime transport. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 30, 101379. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101379>
- Haralambides, H., & Merk, O. (2020). *The Belt and Road Initiative: Impacts on Global Maritime Trade Flows* (ITF Discussion Papers No. 2020/02). International Transport Forum / OECD Publishing.
- International Maritime Organization. (2022). IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. IMO Publishing. <https://www.imo.org/>
- Karakasnaki, M., Pantouvakis, A., & Vlachos, I. (2023). Maritime social sustainability: Conceptualization and scale development. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 121, 103804. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103804>
- Leff, E. (2004). *Racionalidad ambiental: La reapropiación social de la naturaleza*. Siglo XXI Editores.
- Lam, J. & Dai, J. (2015). Environmental sustainability of logistics service provider: an ANP-QFD approach. *The International Journal of Logistics Management*, 26(2), pp. 313-333. <https://doi.org/10.1108/IJLM-08-2013-0088>
- Liu, Z., Xiong, H., & Yang, G. (2025). Transportation sector's carbon emission pressure in Chinese provinces during carbon peak. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 141, 104606. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104606>
- López-Vallejo, M. (2023). Las emisiones “netas cero” en Canadá: políticas federales y la diversidad provincial. *Norteamérica*, 18(1), 377-404. <https://doi.org/10.22201/cisan.24487228e.2023.1.623>
- Notteboom, T., Pallis, A., & Rodrigue, J. P. (2022). *Port Economics, Management and Policy*. New York: Routledge, Routledge. doi.org/10.4324/9780429318184
- OMS. (2020). Salud ocupacional: Alcances y desafíos. Organización Mundial de la Salud. Recuperado de: <https://www.who.int/health-topics/occupational-health>
- Oloruntobi, O., Mokhtar, K., Gohari, A., Asif, S., & Chuah, L. (2023). Sustainable transition towards greener and cleaner seaborne shipping industry: Challenges and opportunities. *Cleaner Engineering and Technology*, 13, 100628. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100628>
- Puig, M., Wooldridge, C., & Darbra, R. M. (2014). Identification and selection of environmental performance indicators for sustainable port development. *Marine Pollution Bulletin*, 81(1), 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.02.006>

- Rakin, S. (2025). New report stresses need for support of green shipping corridors. Sustainability and Decarbonization. Port Technology International. Available at: <https://www.porttechnology.org/news/new-report-stresses-need-for-support-of-green-shipping-corridors/>
- Secretaría de Marina. (2023). Manual de puertos inteligentes. Gobierno de México.
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2023). *Review of maritime transport 2023*. United Nations. <https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2023>
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2024). *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. Recuperado de: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46404>.
- United Nations Economic and Social Commission for Western Asia. (ESCWA) (2020). Shared prosperity vision for 2030: Reducing inequality in the Arab region. United Nations. <https://www.unescwa.org/publications/shared-prosperity-vision-2030>
- United Nations Statistics Division (UNSTATS) (2012). System of environmental-economic accounting for water. United Nations. <https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seeaw/>
- Vaca-Cabrero, J., Domínguez, J., González-Cancelas, N., & Camarero-Orive, A. (2025). Enhancing Sustainability in Port Infrastructure Through Innovation: A Case Study of the Spanish Port System. *Sustainability*, 17(6), 2593. <https://doi.org/10.3390/su17062593>
- Wang, L., Yao, J., Zhang, H. & Pang, Q. (2022). A sustainable shipping management framework in the marine environment: Institutional pressure, eco-design, and cross-functional perspectives. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1070078. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1070078>
- Woo, S.-H., Pettit, S. J., Kwak, D.-W., & Beresford, A. K. C. (2011). Seaport research: A structured literature review on methodological issues since the 1980s. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(7), 667–685. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.04.014>