



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
ARQUITECTURA**

**GEMELO DIGITAL: MÉTODO DE ELABORACIÓN APLICADO EN  
INFRESTRUCTURA MARÍTIMO – PORTUARIA**

**TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN ARQUITECTURA  
En el campo de conocimiento de Tecnologías**

**PRESENTA:**

**Arq. Francisco Javier Chavarría Morales**

**TUTOR PRINCIPAL**

**Mtro. Leonardo Bernardo Zeevaert Alcántara**

División de estudios de Posgrados de la Facultad de Arquitectura, UNAM

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR**

**Dra. Paola Elizabeth Rodríguez Ocampo**  
Facultad de Ingeniería, UNAM

**Mtro. Alejandro Esteban Marambio Castillo**  
División de estudios de Posgrados de la Facultad de Arquitectura, UNAM

**Ciudad Universitaria, CDMX, octubre 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

**GEMELO DIGITAL: MÉTODO DE ELABORACIÓN APLICADO  
EN INFRESTRUCTURA MARÍTIMO - PORTUARIA**

**Tesis de Maestría**

Francisco Javier Chavarría Morales  
Arquitecto

Mtro. Leonardo Bernardo Zeevaert Alcántara  
Tutor Principal  
Facultad de Arquitectura, UNAM

Dra. Paola Elizabeth Rodríguez Ocampo  
Miembro del comité Tutor  
Facultad de Ingeniería, UNAM

Mtro. Alejandro Esteban Marambio Castillo  
Miembro del comité Tutor  
Facultad de Arquitectura, UNAM

Dr. Carlos Alfredo Bigurra Alzati  
Sinodal  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Mtro. Francisco Reyna Gómez  
Sinodal  
Facultad de Arquitectura, UNAM

**CDMX, octubre 2023**

*A la Fuerza que es mi guía constante.*

*A mis padres y hermanos, cimientos de mi existencia; y a mis sobrinos, futuros arquitectos de sus destinos.*

*Jimena, mi compañera de vida, y a su familia.*

*Zahita, pilar de alegría constante.*

*Betito y Pomen, mis inquebrantables amigos.*

*Octavio, amigo y brújula profesional.*

*A todos quienes son parte de mi historia y pasión.*

*A la UNAM, maestra en el arte de construir sueños.*

## AGRADECIMIENTOS

---

Al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura y al Campo de Tecnologías. Ambos por darme un espacio virtual físico, donde desarrollé el conocimiento para mi formación en estudios de maestría.

Al Programa de Becas para Estudios de Posgrado de CONAHCYT, cuyo apoyo económico fue determinante en mi recorrido académico.

Mtro. Leonardo Zeevaert, por ser mi guía y mentor principal. Mi más sincero agradecimiento por brindarme sus consejos, apoyo y motivación durante mi formación académica.

Dra. Paola Rodríguez, por compartirme su conocimiento, tiempo y disposición durante la realización de esta investigación.

Mtro. Alejandro Marambio, por enriquecer mis perspectivas sobre tecnologías aplicadas en arquitectura, ingeniería y construcción, y por sus valiosos insights en el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Carlos Bigurra y el Mtro. Paco Reyna, con quienes tuve la valiosa oportunidad de ser alumno en materias que impartieron dentro del programa, lo cual reforzó mis conocimientos y los apliqué en esta investigación y ahora forman parte especial de ella

A SSA México, la empresa que no solo me ha visto crecer profesionalmente, y me apoyo moralmente para perseguir esta profesionalización y que además ha sido una fuente invaluable de información y apoyo para este trabajo.

## RESUMEN

---

Esta tesis aborda cómo digitalizar la información de infraestructura marítimo-portuaria construida para elaborar un Gemelo Digital (GD). Este enfoque busca mejorar la gestión de información como herramienta para la futura toma de decisiones en lo referente a las etapas de vida de un proyecto, Planeación, Diseño, Construcción y Operación. Este trabajo sigue un proceso de investigación de diseño en cinco etapas, destacando el uso de tecnologías de información y gestión de datos. Se propone un flujo de trabajo para crear un GD que incluye la adquisición de datos, la integración en un entorno BIM, la visualización digital y su actualización continua. Este enfoque se aplica a la Terminal Internacional de Cruceros de Cozumel, y evaluación de nivel de GD obtenido. En conclusión, la creación del GD podría ser una herramienta invaluable para las áreas de la Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Operación en la gestión eficiente de la infraestructura marítimo-portuaria de México.

## ABSTRACT

---

*This thesis addresses how to digitize the information of built maritime port infrastructure to develop a Digital Twin (DT). This approach seeks to improve information management as a tool for future decision-making regarding the life stages of a project: Planning, Design, Construction, and Operation. This work follows a five-stage design research process, highlighting the use of information technologies and data management. A workflow is proposed to create a DT, which includes data acquisition, integration into a BIM environment, digital visualization, and continuous updating. This approach is applied to the International Cruise Terminal of Cozumel, and an evaluation of the level of DT obtained. In conclusion, the creation of the DT could be an invaluable tool for the fields of Architecture, Engineering, Construction, and Operation in the efficient management of Mexico's maritime-port infrastructure.*

## ÍNDICE

---

Índice de ilustraciones.....	ii
Índice de tablas.....	v
Gemelo Digital: Innovación en el manejo de la información en la Era Digital en el Sector Marítimo-Portuario .....	1
1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA MARÍTIMO-PORTUARIA: DEL HORIZONTE AZUL A LOS PUERTOS INTELIGENTES .....	6
1.1 Horizonte azul y su impacto en la infraestructura Marítimo-portuaria .....	7
1.2 Evolución de la Infraestructura Marítimo-Portuaria en México .....	15
1.3 De puertos tradicionales a puertos inteligentes: transformación en la era digitalización ..	20
1.4 Caracterización de los elementos de un puerto marítimo .....	27
2. EL FUTURO DE LA INFRAESTRUCTURA MARITIMO-PORTUARIA: INNOVACIÓN Y APLICACIÓN DEL GEMELO DIGITAL.....	52
2.1. El desafío de la utilización efectiva de datos en los puertos: tecnología, visualización e innovación .....	53
2.2 Gemelo Digital: Origen y su aplicación actual.....	55
2.3 Avances y aplicaciones del Gemelo Digital en Infraestructura construida.....	61
3. CONSTRUYENDO EL GEMELO DIGITAL: ENFOQUE EXPLORATORIO EN LA IDENTIFICACIÓN Y USO DE TECNOLOGÍAS.....	66
3.1 Tecnologías para la creación del GD.....	67
3.2 Identificación y función de Tecnologías en la creación de GD .....	73
3.3 Herramientas de modelado y diseño (HMD) .....	77
3.4 Herramientas de recopilación y análisis de datos (HRA) .....	86
3.5 Herramientas de simulación y visualización (HSV) .....	89
3.6 Herramientas de almacenamiento de datos, aprendizaje automático e inteligencia artificial (HAAIA).....	92
4 FLUJO DE TRABAJO PARA LA ELABORACIÓN DEL GEMELO DIGITAL .....	96
4.1 Bases del Gemelo Digital: adquisición, procesamiento y visualización .....	98
4.2 Optimización y actualización del Gemelo Digital: innovación para el futuro .....	104
4.3 Evaluación de un GD de infraestructura marítimo-portuaria .....	108
5. APLICACIÓN DEL FLUJO DE TRABAJO PARA LA ELABORACIÓN DEL GEMELO DIGITAL: ESTUDIO DE CASO DE LA TERMINAL INTERNACIONAL DE CRUCEROS DE SSA MÉXICO EN COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO .....	110
5.1 Bases del Gemelo Digital: adquisición, procesamiento y visualización de la Terminal Internacional de Cruceros de Cozumel (TICC) de SSA México .....	112
5.2 Optimización y actualización del Gemelo Digital de la TICC.....	130
5.3 Evaluación del GD de la TICC .....	138
5.4 Conclusiones y Recomendaciones Finales.....	139
Referencias.....	cxliii

## Índice de ilustraciones

---

Ilustración 1. Chumbe Island Coral Park, Zanzibar..	5
Ilustración 2. Zona Costera..	11
Ilustración 3. Evolución de la zona Costera de Rotterdam, Holanda, de 1400 a 1990.....	12
Ilustración 4. Terrenos ganados al mar, antigua isla de Urk, Países Bajos: 1930 -2020.....	13
Ilustración 5. Municipios costeros de México .....	14
Ilustración 6. Sistema Portuario Nacional.....	19
Ilustración 7. Muelle de Fort Meyers, Florida, EUA. Antes y después del huracán IAN de 2022 .....	22
Ilustración 8. Evolución de puertos.....	23
Ilustración 9. Mapa de investigación y educación, de Rotterdam .....	26
Ilustración 10. Esquema Conceptual de un Puerto.....	27
Ilustración 11. Esquema General de la infraestructura que compone a un puerto.....	28
Ilustración 12. Factores que afectan al Dimensionamiento de áreas de agua .....	29
Ilustración 13. Visualización del concepto de ampliación de la dársena de ciaboga No. 2 en el puerto de Gdynia. ....	31
Ilustración 14. TEA Lázaro Cárdenas de SSA México, Barcos tipo RORO atracados y usando la dársena de atraque.....	31
Ilustración 15. a) Paralelos a la costa      b) Convergentes      c) Perpendiculares a la Costa. ....	32
Ilustración 16. Dique Vertical.....	32
Ilustración 17. Dique en Talud.....	33
Ilustración 18. Sección de Dique Mixto .....	33
Ilustración 19. Dique en Talud del puerto de Scheveningen, Holanda.....	34
Ilustración 21. (Izquierda) Sección de Dique Flotante. (Derecha) Los seis grados de Libertad de movimiento .....	35
Ilustración 22. Efectos sobre la playa con el uso de Duques Exentos .....	35

Ilustración 23. Diques de espigón de madera en la playa de Zingst, Alemania .....	36
Ilustración 24. Escolleras artificiales.....	37
Ilustración 25. Escolleras artificiales de concreto .....	38
Ilustración 26. Dique de escolleras naturales .....	38
Ilustración 27. Muelle de estructura sólida .....	39
Ilustración 28. Estructura de atraque para descarga de contenedores, en Rotterdam, Holanda .....	40
Ilustración 29. Muelle por gravedad de cajones prefabricados .....	41
Ilustración 30. Muelle de muro pantalla.....	41
Ilustración 31. Muelle de Pilotes.....	42
Ilustración 32. Esquema de un muelle flotante .....	42
Ilustración 33. Combinación de estructuras de amarre, Muelle y duques de alba .....	43
Ilustración 34. Sistemas de Anclaje de Boyas.....	44
Ilustración 35. Maniobra de descarga de rollos de acero, puerto de Ensenada.....	45
Ilustración 36. Terminal de Contenedores (izquierda) y terminal de granos (derecha) .....	46
Ilustración 37. Terminal Especializada en Autos .....	47
Ilustración 38. Terminal de productos Minerales .....	48
Ilustración 39. Terminal de Fluidos de derivados de petróleo.....	48
Ilustración 40. Instalaciones Marítimas-Portuarias de la Isla de Manhattan en Nueva York .....	50
Ilustración 41. Representación gráfica de un gemelo digital de acuerdo con ESRI .....	51
Ilustración 42. Representación del hombre y la percepción sensorial del mundo exterior .....	54
Ilustración 43. Proceso de manufactura industrial con un Gemelo Digital .....	56
Ilustración 44. Capas necesarias para desarrollar Gemelo Digital de una ciudad inteligente .....	60
Ilustración 46. Proceso de investigación. Fuente: Elaboración propia. ....	65
Ilustración 47. Método de selección de literatura relevante para la investigación .....	69
Ilustración 48. Intercambio de información entre los datos colectados por los sensores e IoT en entornos BIM .....	88
Ilustración 49. Flujo de Trabajo para la realización de un Gemelo Digital.....	95
Ilustración 50. Paso 1 para la elaboración de un Gemelo Digital.....	97
Ilustración 51. Paso 2: Procesamiento de la información para integrarla en un entorno BIM.....	99
Ilustración 52. Paso 3: Utilización del entorno BIM para visualizar la infraestructura construida .....	101
Ilustración 53. Paso 4: Adición y Visualización de Nuevos Proyectos en el Gemelo Digital .....	103
Ilustración 54. Paso 5: Integración de sensores, Paso 6: Integración de la Nube para el manejo de la información y Paso 7: Integración de aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (AI).....	105
Ilustración 55. Terminal Internacional de Cruceros Cozumel.....	109
Ilustración 56. Adquisición de datos de la estructura de Atraque de la TICC.....	111
Ilustración 57. Evolución de la estructura de atraque en la TICC. A) 1974, b) 1988 y c)1997...114	114
Ilustración 58. Afectación en las estructuras de atraque provocadas por el paso de Wilma en 2006. c) Estructura en 1997 d) 2005, Daños en estructuras e) 2006, Acciones tomadas para reconstrucción de estructuras de atraque f) 2008, Composición de reconstrucción de Estructuras de Atraque .....	115
Ilustración 59. Evolución de la estructura de atraque en la TICC. g) 2009 h)2011 i)2023 j)Estado actual de las estructuras de atraque (Julio 2023) .....	116
Ilustración 60. Integración de Batimetrías e información AEC en un sistema GIS para corroborar su utilidad.....	117
Ilustración 61. Paso 2: Procesamiento de la información recopilada de la TICC para integrarla en un entorno BIM .....	119
Ilustración 62. Modelo Digital 2D de la TICC inserto en plataforma GIS.....	120

Ilustración 63. Diferencias encontradas en el cruce información de los planos "As Built" y la Nube de puntos de las estructuras de atraque .....	121
Ilustración 64. Ortofoto georreferenciada obtenida de las fotografías de las estructuras de atraque .....	122
Ilustración 65. Nube de puntos de la batimetría de 2018 obtenida del archivo .XYZ y modelo 3D de lecho marino .....	123
Ilustración 66. GD 3D y 2D integrados en plataforma GIS, Google Earth Pro .....	124
Ilustración 67. Paso 3: Utilización del entorno BIM para visualizar la infraestructura construida .....	125
Ilustración 68. Captura de recorrido virtual de la TICC, muestra escombros generados por huracán Wilma .....	126
Ilustración 69. AR aplicado a los elementos del muelle, el ejemplo se muestra información relacionada con la Bita 15 de las estructuras de atraque .....	127
Ilustración 70. Visualización de aumento estimado del nivel medio del mar. a)2024, b)2030, c) 2040, d)2050 y e)2100 .....	128
Ilustración 71. Visualización de aumento estimado de la pleamar máxima. f) 2024, g) 2030, h) 2040, i)2050 y j)2100 .....	128
Ilustración 72. Paso 4: Adición y Visualización de Nuevos Proyectos en el Gemelo Digital de la TICC .....	129
Ilustración 73. Evolución de la estructura de atraque en la TICC. i)2023 j)Estado actual de las estructuras de atraque (Julio 2023).....	130
Ilustración 74. Gemelo Digital de la estructura de atraque de la TICC actualizada a Agosto de 2023.....	132
Ilustración 75. Paso 5: Integración de sensores, Paso 6: Integración de la Nube para el manejo de la información y Paso 7: Integración de aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (AI), para la infraestructura construida .....	133

## Índice de tablas

---

Tabla 1. Componentes de la economía Azul.....	9
Tabla 2. Evolución del transporte marítimo .....	17
Tabla 3. Diferentes definiciones de un Gemelo Digital .....	57
Tabla 4. Nivel de madurez de gemelos Digitales, principios y uso .....	58
Tabla 5. Niveles de fidelidad de un Gemelo Digital .....	59
Tabla 6. Resultados de la búsqueda de publicaciones relevantes para esta investigación .....	70
Tabla 7. Tecnologías identificadas por publicación relevante.....	74
Tabla 8. Clasificación de la agrupación de tecnologías utilizados para la adopción de GDs en infraestructura construida.....	76
Tabla 9. Plataformas BIM en el mercado .....	80
Tabla 10. Elaboración de modelos 3D con fotogrametría.....	82
Tabla 11. Elaboración de modelos 3D con LiDAR.....	83
Tabla 12. Software para obtención de modelos 3D con nube de puntos.....	85
Tabla 13. Software para implementación de simulaciones en la AIC .....	90
Tabla 14. Resumen de Información AEC recopilada.....	113
Tabla 15. Proyección de nuevos planos de mareas. ....	128
Tabla 16. Información AEC recopilada de la estructura de atraque en 2023 .....	131

# Gemelo Digital: Innovación en el manejo de la información en la Era Digital en el Sector Marítimo-Portuario

---

La infraestructura Marítimo-Portuaria es esencial para el desarrollo global, impulsada por el comercio y la *Economía y Crecimiento Azul*. Esta infraestructura permite a los países el acceso a los mercados mundiales y las cadenas de suministro, son parte integral del transporte marítimo y actividades como la pesca, generación de energía en alta mar, turismo, entre otras actividades que se desarrollan en las denominadas zonas costeras.

La creciente demanda de transporte marítimo y la expansión de la economía global han llevado a la necesidad de desarrollar soluciones innovadoras en la planificación, diseño, construcción y gestión de infraestructuras marítimo-portuarias. Con más del 80% del volumen del comercio mundial transportado por mar (OMI, 2021), los puertos se convierten en nodos fundamentales que sostienen las cadenas de suministro. Esto los hace infraestructuras esenciales para el desarrollo de los países, especialmente en aquellos en vías de desarrollo, como México.

A partir de 1993, en México inició la administración de los puertos con participación de capital privado, con el objetivo de mejorar su organización, eficiencia y eficacia. Esa inversión ha generado la expansión de la infraestructura portuaria hasta llegar a las condiciones actuales (Zepeda-Ortega et al., 2017). Actualmente el sistema portuario mexicano está conformado por 114 puertos, 64 funcionan bajo un régimen de concesión: 74 puertos entregados a 27 sociedades mercantiles Administración Portuaria Integral (hoy ASIPONA), para el uso, aprovechamiento y explotación de los bienes y la prestación de los servicios respectivos (SCT, 2017).

El Crecimiento y la modernización es esencial para los puertos mexicanos, dada su relevancia en la economía. Sin embargo, es necesario actualizar y mejorar la infraestructura portuaria para adaptarse a las nuevas tecnologías y generaciones de buques. A eso se le suma que, desde hace casi 15 años, se detecta que en materia del manejo y administración de la información de las zonas costeras es limitado (López, 2008); la limitación actual de la infraestructura se debe en gran medida a una visión de desarrollo marítimo insuficiente y a la falta de una sólida cultura marítima en el país (Encinas, 2017).

Como consecuencia existe vulnerabilidad en la infraestructura marítimo-portuaria frente a las nuevas condiciones climáticas y necesidades del transporte marítimo.

Uno de los principales desafíos en el sector marítimo-portuario en México, es la falta de herramientas y metodologías eficaces para gestionar la información de la infraestructura existente. En el contexto de la creciente demanda de transporte marítimo comercial y turístico la falta de Información y documentación de la infraestructura marítimo-portuaria mexicana es insuficiente.

Esta limitación dificulta la toma de decisiones informadas, adopción de innovaciones tecnológicas, identificación de estrategias para mejorar la resiliencia y eficiencia de la infraestructura portuaria y la implementación de mejoras en la infraestructura portuaria, donde se tiene planeada una inversión aproximada de 200 mil millones de pesos hacia 2024 (Díaz, 2020).

En ese sentido, existe una transformación a nivel mundial en la digitalización de la información y que ha cambiado la forma en que los ciudadanos y los stakeholders<sup>1</sup> viven, trabajan, colaboran y se comunican (Bokolo, 2021), donde los puertos, nodos clave del desarrollo económico del país y estos deben: planear, desarrollar e implementar estrategias de digitalización para mantenerse competitivos (CEPAL, 2022).

En el contexto actual, la tecnología desempeña un papel fundamental en el mejoramiento de la infraestructura portuaria, garantizando su adaptabilidad y sostenibilidad a largo plazo. La adopción de soluciones innovadoras, como el Gemelo Digital, puede ser una estrategia efectiva para enfrentar estos desafíos y promover prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

No obstante, a pesar de los avances en la digitalización y gestión de datos que han llevado a la nueva era de innovación llamada Industria 4.0, donde el concepto de Gemelo Digital es protagónico (Evans et al., 2019), su aplicación aún se encuentra en sus primeras etapas y existe una falta de protocolos y estándares para establecer cómo desarrollarlos (Pregolato, Gunner, Voyagaki, De Risi, et al., 2022) , especialmente para la infraestructura existente (ARUP, 2019).

---

<sup>1</sup> Individuos o grupos que tienen interés e impacto en una organización y en los resultados de sus acciones

El problema de investigación que se aborda en esta tesis es la falta de un método sistemático y eficiente para la elaboración de Gemelos Digitales de infraestructura marítimo-portuaria ya existente. La investigación se centrará en identificar las mejores prácticas y tecnologías disponibles para apoyar el proceso de creación de Gemelos Digitales.

Partiendo de lo anterior:

¿Qué tecnologías existen y se utilizan para el desarrollo del Gemelo Digital en entornos construidos?

¿Cómo utilizar las tecnologías identificadas para la elaboración del Gemelo Digital de infraestructura marítima portuaria en Mexico?

## HIPÓTESIS

---

A partir de tecnologías identificadas en publicaciones de divulgación científica, se desarrollará un método para crear Gemelos Digitales de infraestructura marítimo-portuarias construidas, aplicable en México.

## OBJETIVOS

---

### Objetivo principal

Desarrollar un método para crear Gemelos Digitales de infraestructura marítimo-portuaria construida, caso específico: Muelle de cruceros en Cozumel, México.

### Objetivos parciales

Identificar y analizar las tecnologías utilizadas para la creación de Gemelos Digitales en entornos construidos en publicaciones de divulgación científica.

Desarrollar el método para adaptar y aplicar las tecnologías identificadas en un caso de estudio de infraestructura marítimo-portuaria construida, para el Muelle de cruceros en Cozumel, México.

Con lo anterior, se presenta este trabajo estructurado en cinco capítulos, cada uno diseñado para proporcionar una comprensión más profunda de la investigación desde el contexto en el que se desarrolla, marco teórico, la metodología, el análisis e interpretación de los datos para elaborar un flujo de trabajo para la obtención del Gemelo Digital de una infraestructura marítimo portuaria construida, y finalmente la aplicación del mismo en un caso de estudio para poder evaluar el alcance que se obtuvo y obtener conclusiones y aplicaciones futuras. A continuación, se proporciona una descripción general de cada capítulo:

**Capítulo 1, Contextualización de la Infraestructura Marítimo-Portuaria: Del Horizonte Azul a los Puertos Inteligentes:** Donde se establece el panorama general de la infraestructura marítimo-portuaria, resaltando la necesidad de digitalización y gestión de datos para desarrollar Gemelos Digitales. Se identifican los desafíos y oportunidades en el sector portuario mexicano, especialmente en el marco de la creciente Economía Azul y el advenimiento de la Industria 4.0.

**Capítulo 2, El Futuro de la Infraestructura Marítimo-Portuaria: Innovación y Aplicación del Gemelo Digital:** Aquí se destaca la importancia de una gestión efectiva de los datos en el sector portuario, explorando el concepto del Gemelo Digital (GD) y cómo su implementación puede transformar la industria. Se analizan los avances recientes y aplicaciones del GD en el ámbito marítimo-portuario y de las áreas de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción.

**Capítulo 3, Construyendo el Gemelo Digital: Enfoque Exploratorio en la Identificación y Uso de Tecnologías:** Este capítulo se adentra en la metodología de la investigación, examinando y sugiriendo diversas tecnologías aplicables para generar el GD de activos existentes dentro de la infraestructura marítimo-portuaria. Se describen en detalle los cinco pasos del método de investigación en Ciencias del Diseño (Design Science Research Method - DSRM).

**Capítulo 4, Flujo de Trabajo para la Elaboración del Gemelo Digital:** En este capítulo, se propone un método paso a paso para la creación de un GD, describiendo cada etapa del proceso. Este enfoque estratégico proporciona un flujo de trabajo claro para la elaboración de un GD, y además se sugiere una herramienta para evaluar el nivel de GD obtenido.

**Capítulo 5, Aplicación del Flujo de Trabajo para la Elaboración del Gemelo Digital: Estudio de Caso de la Terminal Internacional de Cruceros de SSA México en Cozumel, Quintana Roo, México:** Este capítulo aplica el flujo de trabajo teórico del GD desarrollado en el capítulo anterior a un caso real, la Terminal Internacional de Cruceros de Cozumel. A través de este estudio de caso, se busca demostrar como del flujo propuesto en el capítulo anterior se obtiene un GD, Además, utilizando la herramienta de evaluación del GD se revisará el nivel de GD obtenido. Finalmente, se presentarán las conclusiones obtenidas a través de este trabajo de investigación y algunas recomendaciones para trabajos futuros.

Cada uno de estos capítulos se entrelaza para formar una visión comprensiva de la utilización del Gemelo Digital en la infraestructura marítimo-portuaria, explorando tanto las teorías como las aplicaciones prácticas.

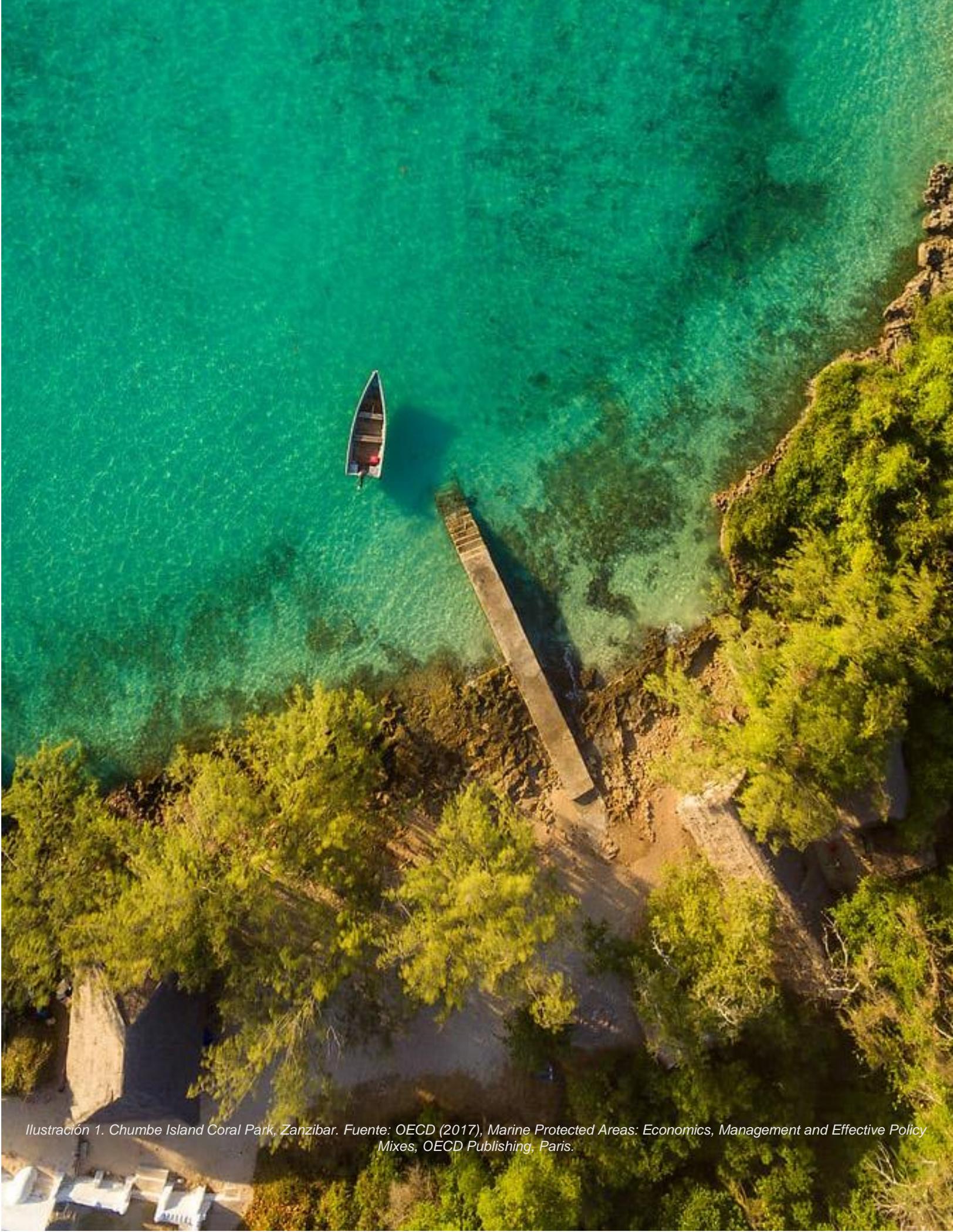


Ilustración 1. Chumbe Island Coral Park, Zanzibar. Fuente: OECD (2017), *Marine Protected Areas: Economics, Management and Effective Policy Mixes*, OECD Publishing, Paris.

# 1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA MARÍTIMO-PORTUARIA: DEL HORIZONTE AZUL A LOS PUERTOS INTELIGENTES

---

El propósito central de la investigación consiste en concebir un enfoque de digitalización de la información vinculada a la infraestructura marítimo-portuaria, utilizando tecnologías de la información y gestión de datos, para desarrollar las pautas que generen un *Gemelo Digital* en el contexto del sector portuario mexicano, fundamentado en explorar la importancia de la infraestructura marítima-portuaria.

Donde, el crecimiento demográfico global y la demanda creciente de recursos han impulsado el surgimiento de nuevas actividades económicas relacionadas con los océanos y se estima que el transporte marítimo comercial se cuadruplicará para 2050, lo que ha generado un incremento en las inversiones en infraestructura.

Dicha inversión debe ser responsable, tener en cuenta los impactos ambientales y sociales a largo plazo y demandar una gestión sostenible de los recursos oceánicos, cumpliendo con las normativas y regulaciones vigentes que conforman la llamada *Economía y Crecimiento Azul (Blue Economy & Blue Growth)*.

Sin embargo, en México, predomina una gestión limitada de información referente a la infraestructura marítimo-portuaria (López, 2009), falta de visión del desarrollo marítimo (Encinas, 2017), que resulta en una posición vulnerable, debida a las cambiantes condiciones climáticas y las crecientes exigencias tecnológicas del transporte marítimo, especialmente con su relación con la infraestructura existente y que estas sigan operando.

Además, en el contexto actual, de Industria 4.0, pone de manifiesto la utilización de las Tecnologías de la información y gestión de datos para la obtención y manejo de la información que compone a la infraestructura.

## 1.1 Horizonte azul y su impacto en la infraestructura Marítimo-portuaria

En esta sección del capítulo, se aborda el surgimiento y evolución del concepto de *Economía y Crecimiento Azul*, un paradigma que combina el aprovechamiento sostenible de los recursos oceánicos para el desarrollo económico con la imperante necesidad de preservar el ecosistema marino. Se subraya la relevancia crucial de la ciencia y la tecnología para garantizar una explotación sostenible de nuestros océanos.

Dentro de los sectores estratégicos, se pone especial énfasis en el comercio marítimo, sector que se encuentra en crecimiento y se proyecta que su actividad se cuadruplicará para 2050, motivando una inversión significativa en infraestructura marítima y portuaria. Esta infraestructura juega un papel esencial en el desarrollo y dinamismo de las zonas costeras, que han sido el eje central del progreso humano a través de los siglos, debido a su abundancia de recursos naturales y a su cambiante geología.

Además, las zonas costeras de México, alineadas con regulaciones internacionales y principios de sostenibilidad, albergan una rica diversidad de ecosistemas y una amplia gama de actividades económicas vitales. La correcta gestión y explotación de esta vasta costa, que abarca los océanos Pacífico, Atlántico y el Mar Caribe, tiene el potencial de convertirse en una fuente principal de ingresos para el país.

Estas zonas han atraído inversiones significativas, especialmente destinadas al desarrollo de infraestructura marítima-portuaria y de actividades que se benefician de estos recursos. Sin embargo, se necesita implementar estrategias para mejorar la infraestructura existente y expandir los servicios para satisfacer la creciente demanda, impulsada por el constante crecimiento económico y la expansión del comercio internacional.

### 1.1.1 Horizonte azul: economía y crecimiento de las zonas costeras

Desde la década de 1960, la comunidad científica comenzó a prestar más atención al desarrollo sostenible, en sus diferentes dimensiones: ambiental, económica y social (Tijan et al., 2021). Naciones Unidas (ONU), declaró a 1998 como el Año Internacional de los Océanos, esto llevó a un cambio de enfoque en la agenda política relacionada con los océanos.

El reporte de la EXPO'98<sup>2</sup>, incluyó un capítulo específico sobre la gobernanza de los océanos donde se establecía que el uso indebido de tecnologías avanzadas puede causar daños y explotación excesiva de los océanos. Sin embargo, el uso correcto de ellas, pueden ser el motor de cambio usar el potencial de los océanos y satisfacer las necesidades básicas de la sociedad (Independent World Commission on the Oceans, 1998).

---

<sup>2</sup> Expo '98, "Los océanos: un patrimonio para el futuro", por el Bureau International des Expositions, se realizó en Lisboa, Portugal, del 22 de mayo al 30 de septiembre de 1998.

El cambio de milenio trajo consigo un enfoque a escala mundial particularmente enfocado en la participación de los stakeholders, involucrar a la ciencia y la tecnología, para tener un uso sostenible de los océanos. La combinación de avances científicos y tecnológicos permitió la aplicación de nuevos usos económicos del espacio marítimo, conduciendo a nuevos modelos de gestión del espacio marítimo (Guerreiro, 2021).

En 2006, la Unión Europea adoptó un enfoque más integral analizando el potencial futuro de las diferentes políticas marítimas globales, denominando esta perspectiva como *Blue Economy* o *Economía Azul*. Enfocada en el aprovechamiento sostenible de los recursos del océano y la identificación de oportunidades de desarrollo económico en cinco sectores estratégicos: acuicultura, energías renovables, biotecnología marina, minería de aguas profundas y comercio marítimo (Philipp et al., 2020).

Durante la Conferencia de la ONU sobre Desarrollo Sostenible Rio+20, se institucionalizó el término *Economía Azul* como resultado de la sugerencia de los Pequeños Países Isla en Desarrollo, quienes consideraron que era una mejor alternativa a la llamada *Green Economy*<sup>3</sup> o *Economía Verde* (Ivanova et al., 2017). Además, particularmente después de la Conferencia Río +20, el término *Blue Growth* o *Crecimiento Azul* se convirtió en un concepto y una política pública a nivel mundial.

En 2017, el Banco Mundial definió la *Economía Azul* como el “uso sostenible de los recursos oceánicos para el crecimiento económico, la mejora de los medios de vida y el empleo, preservando al mismo tiempo la salud del ecosistema oceánico” (World Bank, 2017b). El informe del Banco Mundial destaca que el crecimiento poblacional y el aumento del consumo generan una demanda creciente de recursos oceánicos para actividades económicas esenciales en la *Tabla 1* como se puede apreciar en la actividad de “Comercio y Transporte”, se encuentra la infraestructura portuaria.

Es así, que se han establecido conceptos fundamentales como la *Economía Azul*, engloba sectores interdependientes que requieren infraestructuras compartidas, como los puertos, y dependen del uso sostenible del mar; y el *Crecimiento Azul*, se enfoca en el desarrollo sostenible a largo plazo de los sectores marinos y marítimos, reconociendo la importancia de los océanos como motores económicos con un gran potencial para la innovación.

---

<sup>3</sup> Economía impulsada por la inversión pública y privada en actividades económicas, infraestructura y activos que permitan reducir las emisiones de carbono y la contaminación, mejorar la eficiencia energética y de los recursos, y prevenir la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos.

Tabla 1. Componentes de la economía Azul. Fuente: Elaboración propia con información de World Bank, 2017

Actividad	Categoría	Sector	Impulsores
<b>Cosecha y Comercio Recursos vivos marinos</b>	Cosecha de mariscos	Pesca primaria	Demanda de alimentos y nutrición, especialmente proteínas
		Pesca secundaria y actividades relacionadas	
		Comercio de productos del mar	
		Acuicultura	
	Comercio de productos del mar no comestibles	Demanda cosmética, mascotas, y productos farmacéuticos	
	Uso de los recursos marinos vivos para productos farmacéuticos y aplicaciones químicas	Biotecnología marina y Bioprospección	I+D, cuidado de la salud, cosmético, enzimas, nutracéuticos, y otras industrias
<b>Extracción y uso de recursos marinos no vivos</b>	Minerales	Minería	Demanda de minerales
	Recursos energéticos	Petróleo y gas	Demanda de recursos energéticos
	Generación de agua potable	Desalinización	Demanda de agua potable
<b>Uso de fuerzas naturales renovables no agotables</b>	Generación de energía renovables (off-shore <sup>4</sup> ), viento, oleaje, mareomotriz, etc.	Renovables	Demanda de fuentes de energía alternativas
<b>Comercio y transporte</b>	Transporte y comercio	Construcción naval	Crecimiento del comercio y transporte marítimos
		Transporte marítimo	
		Puertos y servicios relacionados	
Desarrollo costero	Planificación nacional Pública y sector privado	Urbanización costera, normativas nacionales	
Turismo y recreación		Crecimiento global del turismo	
<b>Contribución indirecta a las actividades y entornos económicos</b>	Secuestro de carbono <sup>5</sup>	Carbono Azul <sup>6</sup>	Mitigación del cambio climático
	Protección costera	Restauración y protección del hábitat	Crecimiento resiliente
	Disposición de desechos producidos en tierra	Asimilación de nutrientes, residuos sólidos	Gestión de los desechos
	Biodiversidad	Protección de especies	Conservación

<sup>4</sup> Fuera de la costa

<sup>5</sup> Proceso de capturar y almacenar dióxido de carbono de la atmósfera, en los océanos, estabilizándolo en formas sólidas y disueltas

<sup>6</sup> Carbono capturado por los ecosistemas oceánicos costeros del mundo como manglares, marismas salinas, pantanos, praderas marinas y macroalgas.

Estos enfoques han permitido identificar nuevas oportunidades para la sostenibilidad y el desarrollo económico en el ámbito marítimo. Gracias a la colaboración entre ciencia y tecnología, han surgido usos económicos innovadores del espacio marítimo, como la generación de energía renovable, turismo sostenible, exploración y explotación de recursos minerales, acuicultura y biotecnología marina. Estos nuevos usos requieren prácticas innovadoras para garantizar su sostenibilidad y responsabilidad.

Para efectos de los anterior, se prevé una inversión considerable en Infraestructura Marítima-Portuaria a nivel mundial, en específico para el transporte de mercancías y turismo, con una proyección de que el transporte marítimo comercial se cuadruplicará para 2050 (World Bank, 2017a).

### 1.1.2 Infraestructura portuaria en el desarrollo de las zonas costeras

En el año 2021, el transporte marítimo constituyó la columna vertebral del comercio global, siendo responsable de más del 80% del volumen de mercancías transportadas internacionalmente, una proporción que incrementa aún más en los países en desarrollo (United Nations Conference on Trade and Development, 2022). Así, el transporte marítimo se consolida como el mecanismo principal para la provisión de materias primas, productos de consumo, alimentos esenciales y energía, siendo un motor indiscutible del crecimiento económico y la generación de empleo tanto en el ámbito marítimo como en tierra.

Simultáneamente, el turismo experimenta un auge considerable, posicionándose como uno de los mayores generadores de empleo a nivel mundial, representando cerca del 10% del PIB global (Manzoor et al., 2019). El turismo marítimo y las actividades vinculadas a los océanos son segmentos fundamentales de la economía en numerosos países, como es el caso de México, en donde representan aproximadamente el 9% del PIB nacional (BANCO DE MEXICO, 2018).

Aunado a lo anterior, es importante conocer y mantener la infraestructura portuaria existente, si bien su importancia radica en su papel estratégico en el desarrollo económica y su conectividad, esta podría cambiar con el tiempo, cambiar de uso y reconvertirse su uso para otras actividades, aunque la operatividad y seguridad de la infraestructura debe garantizarse durante todo su ciclo de vida (Mukhopadhyay & Gupta, 2022; Tonmoy et al., 2020; Valdepeñas et al., 2020).

Entonces, se pueden aprovechar oportunidades derivadas de la *Economía y Crecimiento Azul*, invirtiendo en infraestructura marítima, conectividad terrestre y desarrollo comunitario (C. García, 2017). Su planificación, diseño, construcción y mantenimiento, de esa infraestructura, son clave para el desarrollo económico de países costeros, desempeñando un papel fundamental en zonas costeras.

### 1.1.3 La zona costera: frontera dinámica entre el mar y la tierra

La interacción del ser humano con las costas<sup>7</sup> ha sido intrínseca a lo largo de la historia, ya que son una fuente esencial de recursos naturales que han impulsado el desarrollo del comercio en esas zonas. Además, es un territorio que se puede considerar ideal por estar asociado a cambios continuos, en su escala geológica e histórica, además de estar sometido a transformaciones constantes por la naturaleza y humana (M. García, 2017).

Estas se caracterizan por variables geopolíticas convirtiéndola en un espacio con múltiples fronteras, definidos por la presencia dos grandes sistemas: el marino y el terrestre (León, 2008) y se caracteriza por ser “el ambiente más dinámico de la tierra, siendo la única región a lo largo de todos los continentes donde interactúan la tierra, la atmósfera, el mar y el agua dulce” (Silva et al., 2017)”.

El Derecho Internacional del Mar, que ha evolucionado significativamente en respuesta a los avances científicos, tecnológicos y políticos, reconoce la soberanía de cada país para ejercer su jurisdicción sobre los recursos naturales marinos y costeros con el objetivo de mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos y acelerar el desarrollo económico (Sócrates, 2004). En este contexto, las zonas costeras, sujetas al principio de uso y soberanía de cada país, sirven como una interfaz dinámica entre la tierra y el mar.

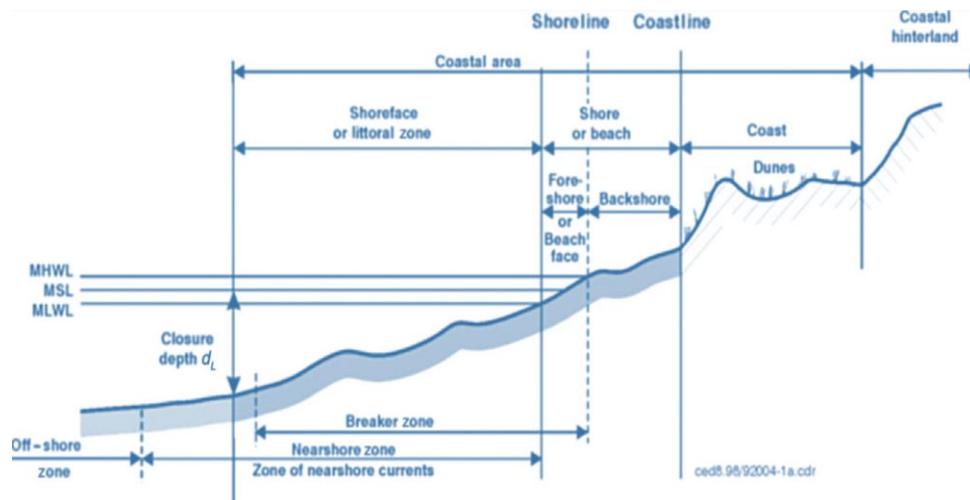


Ilustración 2. Zona Costera. Fuente: *Coastal Area Management: Biodiversity and Ecological Sustainability in Sri Lanka: A Perspective*, p. 702.

<sup>7</sup> Las costas deben ser consideradas como un espacio social, que si bien puede estar definido por los atributos biofísicos (climáticos o ecológicos) tiene un devenir histórico-cultural que lo determina (León, 2008).

Estas áreas, que incluyen tanto las porciones de tierra influenciadas por su proximidad al mar como las partes del mar afectadas por su cercanía a la tierra (Balasuriya, 2018), se extienden hacia el interior hasta los límites de las actividades regionales.

La zona costera, en su estrecha relación con el medio marítimo, se vincula con una amplia gama de componentes fisicoquímicos, morfológicos, biológicos y climáticos, generando una gran diversidad paisajística, ver *Ilustración 2*. Estas zonas, que son propiedad pública, están administradas por el Estado, quien tiene la responsabilidad de garantizar su uso en beneficio de todos los ciudadanos (López, 2008, 2009).

Además, se caracterizan por albergar las tasas de crecimiento poblacional más elevadas, así como por constituir el escenario de proyectos de gran impacto que ejercen una influencia significativa en los recursos costeros y en el medio ambiente. En algunos países, la geografía particular ha impulsado proyectos de expansión territorial mediante la creación de terrenos ganados al mar, como el emblemático puerto de Rotterdam, *Ilustración 3*, o la isla de Urk, *Error! Reference source not found.*, ambos en Países Bajos.

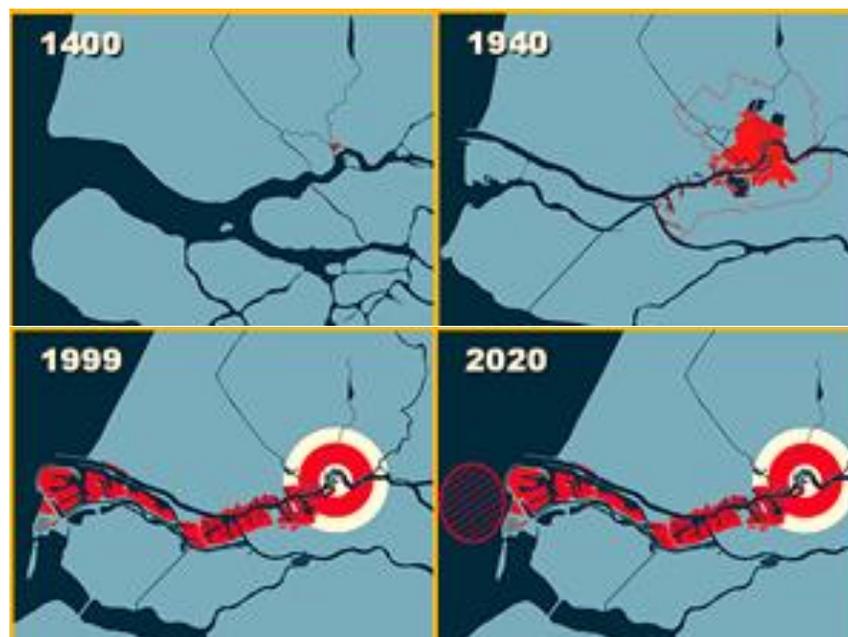


Ilustración 3. Evolución de la zona Costera de Rotterdam, Holanda, de 1400 a 1990. Fuente: E-Marine Education. <https://e-marineeducation.com/en/port-candarli-going-replacing-port-rotterdam/rotterdam-limani-qelisimi/>

1930



2020



Ilustración 4. Terrenos ganados al mar, antigua isla de Urk, Países Bajos: 1930 -2020. Fuente: Lanhdanan en: <https://imgur.com/gallery/fnTwwV4>

#### 1.1.4 Las costas de México en el contexto de la economía y crecimiento azul

Diversas entidades federales mexicanas participan activamente en la protección, conservación y planificación de su zona costera y marina, alineadas con las regulaciones internacionales y los principios de sostenibilidad, donde, la franja costera de México, con su vasta diversidad de ecosistemas, hábitats y recursos naturales, desempeña un papel crucial, albergando una serie de actividades económicas relevantes (Zárate, 2004).

Dado que la costa mexicana se extiende por una gran superficie, su adecuada gestión y aprovechamiento podría convertirse en una de las principales fuentes de recursos económicos del país (López, 2009). Esta zona ofrece una amplia gama de bienes y servicios ambientales, los cuales pueden ser optimizados a través de inversiones públicas y privadas en infraestructura marítima-portuaria.



*Ilustración 5. Municipios costeros de México Fuente: Elaboración propia con datos cartográficos de INEGI.*

México tiene costas en los océanos Pacífico, Atlántico y Mar Caribe. Cuenta una longitud 11,122 km y tiene una superficie de Mar Territorial<sup>8</sup> de 209,000 km<sup>2</sup> y 3,149,920 km<sup>2</sup> de Zona Económica Exclusiva<sup>9</sup> (INEGI - SEMARNAT, 1999; SEMARNAT, 2001), la cual es considerada por UNESCO como la décima más grande a nivel mundial. Cabe destacar que es compartida por 17 estados litorales (SEMARNAT, 2001), dentro de los cuales se encuentran los considerados municipios costeros, *Ilustración 5*.

<sup>8</sup> El Mar Territorial es la franja del mar adyacente a las costas nacionales continentales e insulares, como a las aguas marinas interiores, donde la Nación ejerce su soberanía (Art. 23).

<sup>9</sup> La Zona Económica Exclusiva es el área de mar situada fuera del Mar Territorial y adyacente a éste, donde la Nación ejerce su soberanía con fines de exploración, explotación, conservación y administración de los recursos naturales del lecho y subsuelo del mar y sus aguas suprayacentes (Art. 46).

La zona costera es muy valiosa para el país en los términos que engloban a la sostenibilidad: ecológicos, sociales y económicos. Todos ellos derivados de la gran diversidad de ecosistemas, hábitats, recursos naturales y por el desarrollo de importantes actividades económicas (Zárate, 2004). Debido a la extensión del territorio marítimo costero mexicano, su correcto uso podría convertirse en uno de los mayores generadores de recursos económicos del país (López, 2009).

Los bienes y servicios ambientales en las costas mexicanas, mayormente de libre acceso o propiedad pública, han atraído inversiones significativas orientadas a la construcción de infraestructuras y al desarrollo de actividades que se benefician de estos recursos (Quijano & Rodríguez-Aragón, 2004), apoyado por la tendencia creciente del comercio internacional, estimulado por la búsqueda de mayor eficiencia en los servicios de transporte por vía marítima (Aceves, 2012).

Donde, gracias a la apertura del mercado mexicano a él internacional ha acelerado la inversión en las zonas costeras de México. Sin embargo, aún es necesario implementar estrategias para mejorar la capacidad de respuesta a la demanda de infraestructura y servicios necesarios (C. Valdés & Herrmann, 2004) ya que el crecimiento económico depende de la calidad y cantidad de la infraestructura existente (Zepeda-Ortega et al., 2017).

## 1.2 Evolución de la Infraestructura Marítimo-Portuaria en México

En México Prehispánico<sup>10</sup>, antes de la llegada de los españoles, las civilizaciones indígenas de México, aunque tenían una relación con las costas, carecían de una verdadera cultura marítima y no emprendían viajes extensos mar adentro. Los primeros avistamientos de las embarcaciones europeas causaron consternación entre los habitantes costeros, con la llegada de los españoles, se inició un periodo de expansión de la actividad marítima y de desarrollo de la infraestructura portuaria, cambiando de manera significativa la relación de los habitantes con el mar (Maza et al., 1996).

Durante la colonia<sup>11</sup> se fundaron muchos de los puertos que fueron estratégicos en el intercambio comercial con Asia, América y Europa, sentando las bases del actual sistema portuario nacional, en ese periodo se realizaron los puertos de Veracruz, el Sisal, Campeche, Tlacotalpan, Matagorda, Soto la Marina, Pueblo Viejo, Tampico y Matamoros en el Golfo y Acapulco, San Blas, Mazatlán, Zihuatanejo, Salina Cruz y otros de California en el Pacífico (Silva & Salles, 2004).

---

<sup>10</sup> Comprende del 2500 A.C. a 1521 D.C.

<sup>11</sup> Comprende de 1521 a 1810

Durante el siglo XIX escaseo el desarrollo de infraestructura portuaria. Con la independencia de México en 1821 impulsó la transferencia de las instalaciones navales de San Blas a Manzanillo, un puerto estratégico en el Pacífico aun hoy en día. Además, la expansión del ferrocarril conectó cinco puertos clave: Veracruz, Tampico, Manzanillo, Coatzacoalcos y Salina Cruz, generando un marco marítimo nacional.

Estas inversiones impulsaron el desarrollo urbano y económico de los puertos, facilitando el comercio y la recaudación de impuestos, donde dragado se convirtió en una tarea esencial para garantizar la accesibilidad de los buques en los puertos y mantener su operatividad (Maza et al., 1996).

Durante el Porfiriato<sup>12</sup> se encauzo hacia el aprovechamiento de los recursos marítimos a través de la construcción de infraestructura marítima-portuaria gracias a la introducción de navíos de vapor, lo que provocó la llegada de barcos más grandes y de metal, lo que llevó a la necesidad de mejor protección portuaria. Además, se construyeron los muelles en Manzanillo y el dique seco en Salina Cruz, que aún está en operación. De la mano, el dragado se volviera crucial para mantener estas **inversiones** (Maza et al., 1996; Silva & Salles, 2004).

Los puertos desarrollados entre 1930 y 1970 correspondían a un modelo de economía cerrada, es decir, puertos de primera generación (Guillaumin, 2010). En 1940 se creó la Secretaría de Marina (SEMAR), y para 1976 se hizo el cambio administrativo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), quien se responsabilizó de la operación, construcción, equipamiento y dragado de los puertos.

A partir de 1986, ante la apertura comercial con el extranjero, se evidenció la ineficiencia de los puertos mexicanos. Llevando a que, en 1993, iniciara la administración de los puertos con participación de capital privado, para mejorar su organización, eficiencia y eficacia. Estableciendo así el marco jurídico con la expedición de la Ley de Puertos, creándose con ello las llamadas Administración Portuaria Integral, hoy Administración del Sistema Portuario Nacional (ASIPONA), transformando la manera en que se administraban y operaban los puertos (Zepeda-Ortega et al., 2017).

Lo anterior permitió la inversión del capital privado se destinará a la operación, servicios y gestión de las infraestructura marítimo-portuaria y el sector público mantuvo el control y la administración del recinto portuario, la planeación para el desarrollo de nuevos puertos, así como la licitación de las concesiones para nuevos actores provenientes del sector privado (C. García, 2017).

---

<sup>12</sup> Comprende de 1876 hasta 1911

Tabla 2. Evolución del transporte marítimo. Fuente: Elaboración propia con base en Guilaumin, E. (2010, p.4), Los Puertos y su conectividad.

Generación	Desarrollo	Función	Servicios	Instalaciones
Primera (hasta 1960)	Menor en sus servicios	Centro de conexión entre lo terrestre y marítimo	Carga, descarga y almacenamiento	Desvinculadas, independientes y de escasa integración
Segunda (1960 a 1980)	Habitual	Nodo de transporte y Distribución Centro de actividad industrial y comercial	Carga, descarga y almacenamiento, Industriales y comerciales	Se instalan en su cercanía Industrias de transformación
Tercera (desde 1980)	Nivel alcanzado por países desarrollados	Centro logístico y de distribución	Cargas contenerizadas	Plataformas comerciales
Cuarta (reciente)	Internacional	Puertos en red (IoT) Plataforma logística	Integrados a las cadenas logísticas de transporte internacional y multimodal, puerta a puerta	Disponen de redes telemáticas, terminales intermodales o puertos secos. Tienen una unidad comercial y de gestión

Las hoy ASIPONAs, fueron un elemento central en el proceso de privatización de los puertos, cuyo objetivo es la construcción, administración, operación y prestación de servicios portuarios; además poseen autonomía administrativa y financiera (**Ley de puertos, 2020**). Para el cumplimiento de sus concesiones, las ASIPONA´s formulan el Programa Maestro de Desarrollo Portuario<sup>13</sup> (PMDP), donde se establecen los usos, modos de operación y planes de inversión de las distintas zonas portuarias. Las transformaciones en el manejo de carga en los puertos durante el periodo de 1990 a 2000, los coloca en la categoría de segunda generación.

De 2001 a 2018, se realizaron cambios en relación con los puertos referentes a sus servicios y relaciones con los PMDP que se buscaron actualizarse con las necesidades derivadas del mercado portuario mundial y se constituyeron como puertos de tercera generación (**C. García, 2017**). Donde 5 puertos pueden ser considerados dentro de esta categoría: Manzanillo, Veracruz, Altamira, Ensenada y Lázaro Cardenas; los cuales podrían actualizarse para pertenecer a la de cuarta generación por las características actuales que tienen y se describen en la *Tabla 2*.

Cabe destacar que SCT efectuó traspaso de la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante a SEMAR (**SCT, 2021**). Por lo que, actualmente la SEMAR es quien otorga la concesión a las ASIPONAS´s para el “uso, aprovechamiento y explotación de los bienes y la prestación de los servicios concesionados” (**Ley de puertos, 2020**).

Recientemente, los puertos mexicanos se han destacado por su crecimiento de los volúmenes de mercancías y pasajeros - previo a la pandemia, donde se vio afectado como muchas otras industrias, pero comienza a recuperarse con miras a seguir creciendo -, por la diversificación de las actividades que se traducen en áreas de oportunidad para la inversión en proyectos para la mejora y nueva infraestructura marítimo-portuaria.

De acuerdo con el Programa Nacional de Infraestructura, actualmente, el sistema portuario mexicano está conformado por 117 puertos y terminales portuarias, 71 funcionan bajo un régimen de concesiones los cuales están a cargo de las ASIPONA´s, para el uso, aprovechamiento y explotación de los bienes y la prestación de los servicios respectivos (**SCT, 2017**), 16 están a cargo de la SEMAR, dos a cargo del Fondo Nacional de Fomento al Turismo y una es privada.

---

<sup>13</sup> Documento de consulta pública, elaborado por la Administración Portuaria Integral de un puerto, que garantiza una eficiente explotación de los espacios portuarios, su desarrollo futuro y su conexión con los sistemas generales de transporte para identificar y justificar los usos, destinos y formas de operación de las diferentes Zonas del Puerto de conformidad con lo establecido en el artículo 41 de la Ley de Puertos

Las 25 ASIPONA´s trabajan de la siguiente manera: SEMAR - Altamira, Coatzacoalcos, Dos Bocas, Ensenada, Guaymas, Manzanillo, Mazatlán, Lázaro Cárdenas, Progreso, Vallarta, Salina Cruz, Tampico, Tuxpan, Topolobampo, Puerto Madero y Veracruz. Estatales - Baja California Sur, Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Tamaulipas. FONATUR - Huatulco y Los Cabos. La única con inversión privada es la de Acapulco.



Ilustración 6. Sistema Portuario Nacional. Fuente: Elaboración Propia con información de la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante.

Actualmente la infraestructura portuaria mexicana tiene como reto y oportunidad adecuarse y actualizarse con el objetivo de desarrollar puertos de clase mundial capaces de recibir barcos de última generación es decir pertenecer a la cuarta generación de puertos (Tabla 2). Lo anterior también va relacionado con los accesos terrestres, es decir, carreteras e infraestructura ferroviaria, e integrarse a las economías gran escala (Zepeda-Ortega et al., 2017).

Como consecuencia se podrá potencializar la economía de las localidades, así como el desarrollo de otras infraestructuras necesarias, como las comentadas anteriormente, así como el desarrollo en general de las zonas portuarias. Es así como el aumento en la demanda de recursos y el transporte marítimo comercial ha generado nuevas oportunidades económicas en el sector marítimo, como el transporte de mercancías y el turismo. Estas actividades se apoyan en una infraestructura clave: los puertos marítimos.

### 1.3 De puertos tradicionales a puertos inteligentes: transformación en la era digitalización

Los puertos marítimos, son esenciales para el comercio global y la economía, particularmente en países en desarrollo como México. Sin embargo, estos constantemente necesitan mejoras y mantenimiento para resistir condiciones las climáticas actuales. Invertir en infraestructura, como los puertos, es vital para satisfacer la creciente demanda de instalaciones y servicios portuarios, ya que la capacidad de esta es un factor clave para el crecimiento económico.

Además, los puertos se enfrentan a desafíos significativos debido al cambio climático, como el aumento del nivel del mar y la intensidad de las tormentas, que amenazan su infraestructura, servicios y operaciones. Para seguir siendo competitivos y sostenibles, necesitan una gestión integrada y estrategias de adaptación y resiliencia.

Entonces, los puertos deben adoptar enfoques innovadores y tecnológicos para enfrentar los desafíos del cambio climático y otros problemas, dando lugar al concepto de puerto inteligente. La digitalización ha llevado a la aparición de lo que se conoce como "puertos inteligentes", que usan la innovación para mejorar la infraestructura y proteger el medio marino. Donde la implementación de tecnologías de la Industria 4.0, se utilizan para recolectar y procesar datos relevantes a la infraestructura portuaria.

En esta sección, se discutirá en detalle cada uno de estos aspectos y cómo están transformando la industria portuaria.

#### 1.3.1 El Papel Esencial de los Puertos Marítimos

Los puertos marítimos son infraestructuras esenciales debido a su rol en las rutas marítimas globales y su contribución a la economía local de las ciudades donde se ubican (D. Wang et al., 2019). En 2021, el transporte marítimo se consolidó como el medio principal para el comercio internacional, con especial relevancia en países en desarrollo (United Nations Conference on Trade and Development, 2022). Su importancia radica en facilitar el abastecimiento mundial de materias primas, bienes de consumo, alimentos y energía, impulsando el crecimiento económico y el empleo en varios sectores (World Bank, 2017a).

En un contexto más amplio, el turismo, y específicamente el turismo marítimo y oceánico, se ha erigido como un pilar económico de trascendencia global, generando un impacto positivo en la creación de empleo. Se estima que uno de cada once trabajadores en todo el mundo pertenece a esta industria, la cual representa cerca del 10% del PIB global (Manzoor et al., 2019). Esta tendencia también se refleja en países como México, donde el turismo ligado a sus mares y océanos representa aproximadamente el 9% del PIB nacional (Llamosas-Rosas et al., 2021).

Es dentro de este escenario donde los puertos cobran especial importancia. Estos son vistos como infraestructuras estratégicas dentro del mercado internacional y, frecuentemente, se convierten en la principal fuente económica de las ciudades donde se asientan, aumentando el potencial para integrarse en las rutas marítimas (D. Wang et al., 2019). Debido a su gran envergadura, estas infraestructuras se desarrollan en un entorno altamente desafiantes (Jofré-Briceño et al., 2021).

En países en desarrollo, como México, los puertos suelen estar en mal estado, implicando una gran inversión cuando se requieren actualizarlos. Además, debido a la falta de mantenimiento, son vulnerables a las condiciones climáticas extremas. La presencia de agua, sobre todo salinas, además el impacto de las dinámicas costeras afecta a los elementos de un puerto, complicando tanto proyectos de nueva creación como el acelerando deterioro de los elementos existentes (PIANC, 2006).

Por todo ello, la apertura del mercado internacional ha impulsado la inversión en la zona costera de México. Esta inversión debería traducirse en una mayor capacidad para satisfacer la demanda de infraestructura y servicios necesarios en la región (C. Valdés & Herrmann, 2004). Recientes investigaciones han demostrado que la magnitud de la aportación del transporte en el crecimiento depende de la cantidad y calidad de la infraestructura existente (Zepeda-Ortega et al., 2017).

### 1.3.1 Los puertos en la era del cambio climático

Los puertos se enfrentan a una dura competencia para poder mantener sus números en el mercado y poder ofrecen un flujo de mercancías y turistas, mucho más eficaz y seguro. Requieren una gestión integrada y coherente para asegurar el crecimiento sostenible y preservar los ecosistemas costeros y marinos para las generaciones futuras, lo cual fue comentado también en la sección de *economía y crecimiento azul*.

No obstante, el cambio climático representa un reto significativo al plantear amenazas considerables para la infraestructura, los servicios y las operaciones en este ámbito. Los incrementos en el nivel del mar, la temperatura y la frecuencia e intensidad de las tormentas demandan una comprensión profunda de los riesgos y vulnerabilidades a fin de implementar medidas efectivas para mitigarlos (Kalaidjian et al., 2022), *Ilustración 7*.

De esa manera los países en desarrollo se podrán adaptar al crecimiento del comercio marítimo y posicionarse en términos de infraestructura y capacidades tecnológicas para optimizar su sector marítimo y beneficiar a su sociedad, economía y nunca dejar de lado lo ambiental. En cuanto a los desafíos y oportunidades en la gestión de la zona costera de México, es fundamental abordar la adaptación al cambio climático. Para ello, es importante desarrollar e implementar estrategias de resiliencia y protección de la biodiversidad marina y costera.

Además, se debe impulsar la implementación de tecnologías limpias y sostenibles en la industria pesquera y turística, lo que disminuiría la contaminación y garantizaría la conservación de los ecosistemas marinos y costeros.

La participación de las comunidades locales y los actores clave en la toma de decisiones y la gestión de la zona costera es esencial para garantizar un desarrollo sostenible y equitativo. Fomentar la inclusión y el diálogo entre diferentes interesados, como comunidades indígenas, pescadores, empresas turísticas y organizaciones ambientales, permitirá la construcción de soluciones adaptadas a las necesidades y realidades locales.

Un enfoque colaborativo facilitará la creación de políticas públicas y planes de manejo que aseguren la preservación de los recursos naturales, el aprovechamiento sostenible y responsable de las actividades económicas y la protección del patrimonio cultural y ecológico de la zona costera mexicana.



*Ilustración 7. Muelle de Fort Meyers, Florida, EUA. Antes y después del huracán IAN de 2022. Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google*

En respuesta a los problemas existentes, como el cambio climático entre otros, a nivel internacional los puertos más avanzados están adoptando nuevos enfoques para la planificación y gestión de las operaciones portuarias, soluciones que hacen uso de la tecnología inteligentes para gestionar mejor las operaciones que enfrentan nuevos desafíos en el mantenimiento de instalaciones seguras y energéticamente eficientes que mitigan los impactos ambientales (Molavi et al., 2020). En este contexto, ha surgido un nuevo concepto que se denomina puerto inteligente.

### 1.3.3 Innovación y tecnología en la transformación de los puertos: puertos inteligentes

Un puerto es un tipo de sistema orgánico inserto en un sistema económico globalizado. Por lo tanto, la evolución de los puertos se debe explicar en un contexto general, si bien los países en desarrollo tienen sistemas económicos, sociales y políticos diferentes a los de los países desarrollados, un puerto evoluciona continuamente, adaptándose a los cambios en los patrones económicos y comerciales internacionales, las nuevas tecnologías, la legislación y el sistema de gobernanza portuaria (P. T.-W. Lee & Lam, 2016). En ese contexto, los puertos han evolucionado a lo largo de cinco generaciones, *Ilustración 8*.



*Ilustración 8. Evolución de puertos. Fuente: Elaboración propia con información de A Framework for Building a Smart Port and Smart Port Index*

La 1ra generación sirvió como un nodo entre el transporte terrestre y marítimo, proporcionando operaciones sencillas como intercambio de mercancías, cruceros, pesca y rescates de emergencia. La 2da generación implementó equipos e infraestructura para reducir la dependencia de la mano de obra (Douaioui et al., 2018). La 3ra generación, se centró en el manejo de carga con servicios de valor agregado como almacenamiento, embalaje, distribución, entre otros, lo que se traduce en oportunidades de empleo adicionales (Ajuntament de Barcelona, 2012). La 4ta generación conecta puertos físicamente separados para servir como una red integrada a las cadenas logísticas de transporte internacional multimodal (Paixão & Bernard Marlow, 2003).

Con el aumento del comercio mundial, las cadenas de suministro internacionales y turismo en constante cambio, el mercado marítimo se encuentra en un estado constante de transición. Para enfrentar estos desafíos, los entes involucrados (públicos o privados) buscan que se realicen inversiones de capital inteligentes y estratégicas en infraestructura y tecnología que además sea sostenible y permita que la industria prospere.

En años recientes, la adopción de tecnologías innovadoras, de la llamada Industria 4.0 ha invertido en desarrollar aplicaciones innovadoras para mantener la ventaja competitiva de diferentes actores. La Industria 4.0 se caracteriza por la búsqueda de un mayor nivel de automatización e interconectividad para unir los mundos cibernético y físico, recopilando e intercambiando datos en tiempo real entre procesos, productos, servicios y personas (Tortorella et al., 2023).

Con el fin de mejorar la infraestructura portuaria, la protección del océano y el medio marino se vuelve necesario utilizar las TICs para recopilar, almacenar, procesar, presentar y distribuir datos e información pertinentes a la infraestructura portuaria (Attia, 2016). Es así como los puertos más avanzados a nivel mundial reconocen el valor de la información, sin embargo, en México, se ve afectados por la dificultad de acceso y la falta de documentación de la infraestructura existente (Jofré-Briceño et al., 2021).

El creciente interés en la digitalización y las nuevas tecnologías relacionadas ha evolucionado especialmente en la última década. La digitalización a menudo se considera como un salvador en términos de los desafíos que demanda la creciente globalización, la competencia y los problemas ambientales. Las tecnologías digitales, como las bases de datos distribuidas seguras (Blockchain) y otras tecnologías ya son ampliamente diversos sectores industriales, como la fabricación, transporte y la logística (Atari & Prause, 2018; Gerlitz et al., 2018; Philipp et al., 2020b). Sin embargo, existen una serie de barreras y retos que deben ser tomados en consideración.

De acuerdo con el Manual de Puertos Inteligentes (FUNDACIÓN VALENCIAPORT, 2020) son los siguientes: Gobernanza y modelos de financiación Gestión del cambio y la innovación, Rechazo social, El desafío de la tecnología, La problemática de la ciberseguridad, La necesidad de trabajo colaborativo y la falta de personal calificado, es decir que, la transformación digital conlleva la aparición de nuevos perfiles profesionales y la adquisición de competencias transversales, donde una herramientas clave para superar las barreras en el desarrollo de los puertos inteligentes es la innovación.

En este sentido, los puertos líderes a nivel mundial han reconocido el valor de la información para mejorar la infraestructura portuaria y proteger el medio marino, lo que hace necesario utilizar las TICs para recopilar, almacenar, procesar, presentar y distribuir datos e información relevantes a la infraestructura portuaria. Esta nueva generación de puertos está transformando la gestión portuaria, ofreciendo soluciones innovadoras que mejoran la capacidad de los puertos para responder a las cambiantes demandas del mercado y promover la sostenibilidad económica y ambiental.

Además de la innovación, se han realizado esfuerzos a nivel internacional para crear ecosistemas de innovación que incluyen elementos como la cultura empresarial, la inversión de capital de riesgo, las instituciones educativas y los centros de investigación y desarrollo. Dos referentes destacan en esta área: el Puerto de Rotterdam y Singapur. La asociación SmartPort<sup>14</sup> del Puerto de Rotterdam lidera la agenda de innovación con la creación e inversión en diferentes estructuras.

La Autoridad Portuaria de Rotterdam tiene la ambición de no solo ser el puerto más grande, sino también la capital principal de innovación marítima de Europa (FUNDACIÓN VALENCIAPORT, 2020). Un diagrama esquemático, *Ilustración 9*, difundido por el puerto muestra una visión general de la integración de diferentes centros educativos, investigación, innovación y desarrollo en Rotterdam. La Facultad de Arquitectura y Medio Ambiente Construido está incluida ya que los actores de la industria AIC son esenciales en esta transformación

SmartPort investiga cómo hacer que el puerto esté preparado para el futuro con respecto a la logística, la energía y la infraestructura, sus investigaciones son con una visión a largo plazo, 2030 a 2050, observando especialmente las tendencias emergentes como resultado de la transición energética, la digitalización, la automatización y el cambio climático.

También, la Autoridad Marítima y Portuaria de Singapur, junto con el operador portuario PSA internacional<sup>15</sup> y la comunidad portuaria de la región, han desarrollado un centro innovación marítima, trabajan de la mano con el Instituto Marítimo de Singapur<sup>16</sup> y stakeholders en colaboraciones para la investigación y desarrollo e impulsar la digitalización de los puertos.

Los puertos de Nueva York, Hamburgo y Londres han iniciado proyectos para el desarrollo del capital humano, la investigación y la innovación, con el propósito de mejorar la eficiencia operativa, la utilización del equipo, el consumo de energía, la utilización de mano de obra y la digitalización de la infraestructura portuaria. La innovación tecnológica y la especialización de las actividades portuarias tendrán un impacto significativo en la industria portuaria.

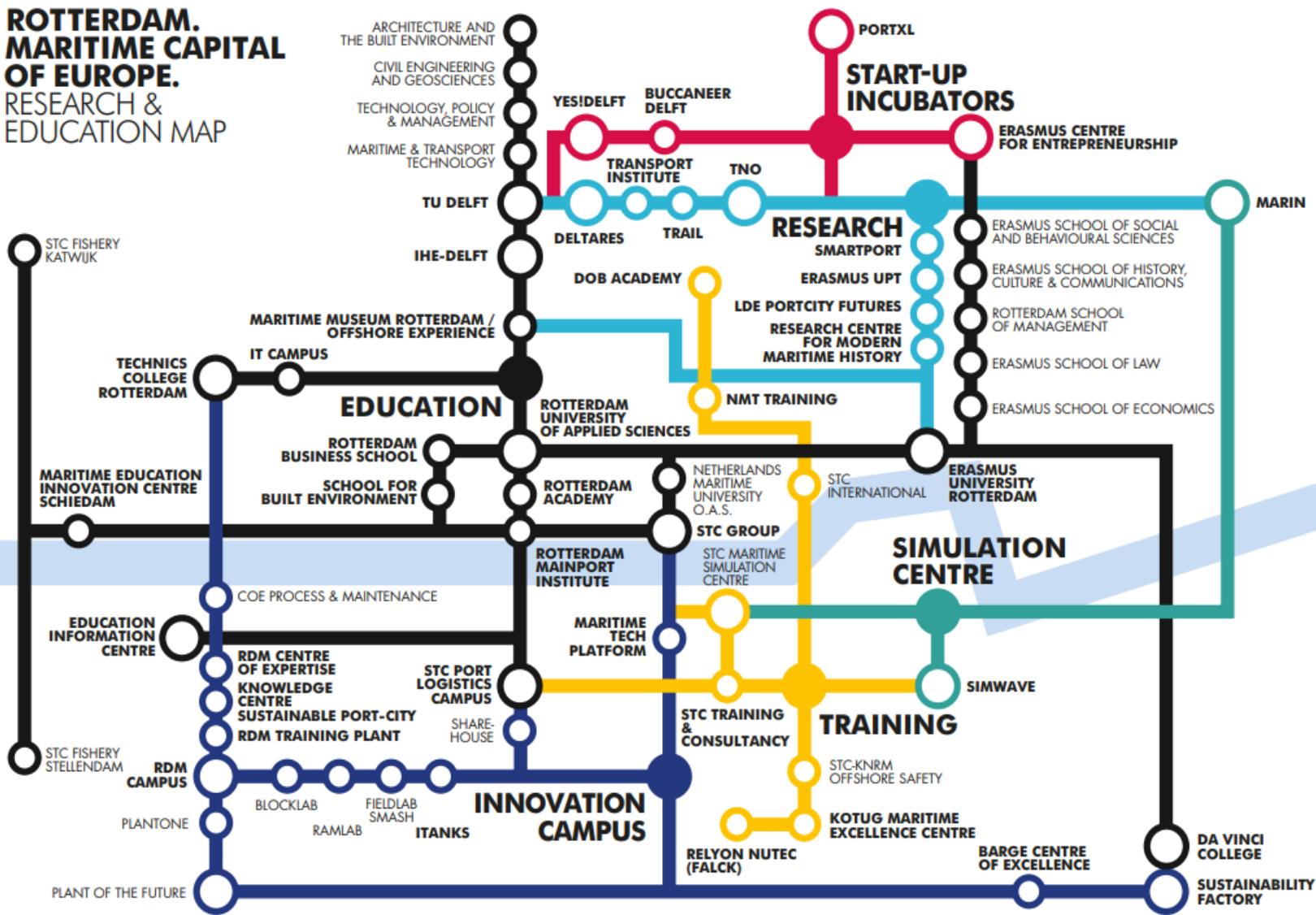
---

<sup>14</sup> SmartPort es una plataforma sin fines de lucro que incentiva el financiamiento de investigaciones y la difusión del conocimiento adquirido con el objetivo de acelerar las innovaciones en el puerto de Rotterdam. <https://smartport.nl/>

<sup>15</sup> Grupo portuario con operaciones principales en Singapur y Amberes, además su red global abarca 160 ubicaciones en 42 países de todo el mundo.

<sup>16</sup> Desarrolla estrategias y programas con áreas clave en sectores como los servicios portuarios, marítimos, trazando la estrategia de investigación marítima, además promueve la colaboración entre la industria y la academia en investigación y desarrollo en Singapur.

# ROTTERDAM. MARITIME CAPITAL OF EUROPE. RESEARCH & EDUCATION MAP



**KNOWLEDGE DISTRICT**  
Knowledge-based activity.

**MAIN NODE**  
Institute, organisation, partnership

**STATION**  
Faculty, institute or organisation department, where relevant maritime and port related education research and training programmes are provided.

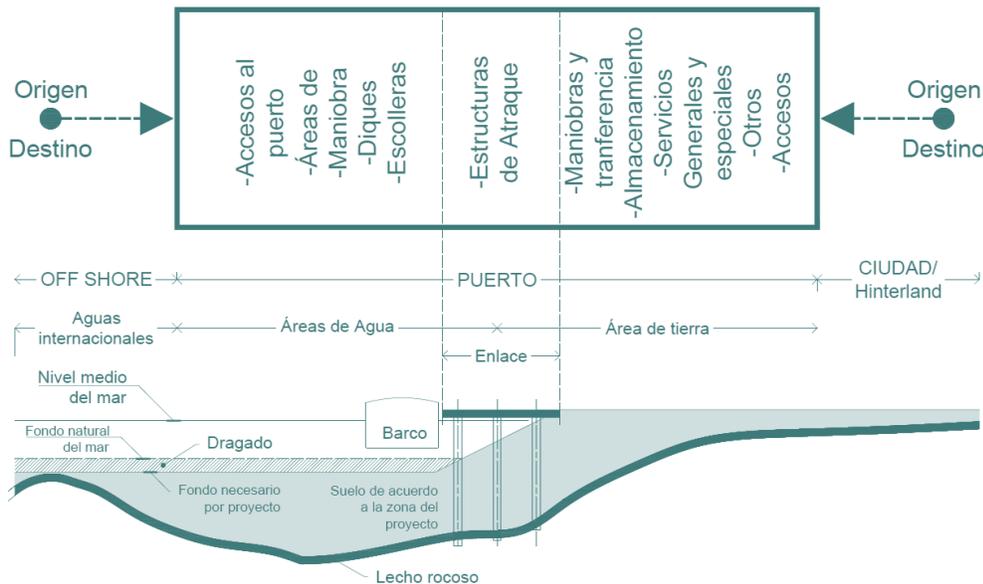
**EDUCATION AND EDUCATION INSTITUTE**      **INNOVATION CAMPUS**      **SIMULATOR CENTRE**

**RESEARCH UNIVERSITY OR INSTITUTE**      **MARITIME, OFFSHORE, SAFETY TRAINING**      **START-UP INCUBATOR CENTRE**

Ilustración 9. Mapa de investigación y educación, de Rotterdam. Capital marítima de Europa. Fuente: <https://storage.rotterdammaritimecapital.com/>

#### 1.4 Caracterización de los elementos de un puerto marítimo

Un puerto, como componente integral del sistema de transporte global, puede ser conceptualizado a través de ciertos elementos característicos. La comprensión de estos elementos no solo es fundamental para su gestión eficiente, sino también para su integración eficaz en la red logística global. La *Ilustración 10*, esquematiza esos elementos:



*Ilustración 10. Esquema Conceptual de un Puerto. Fuente: Elaboración propia con información de Manual de dimensionamiento portuario (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001) y Port Designer's Handbook (Thoresen, 2018).*

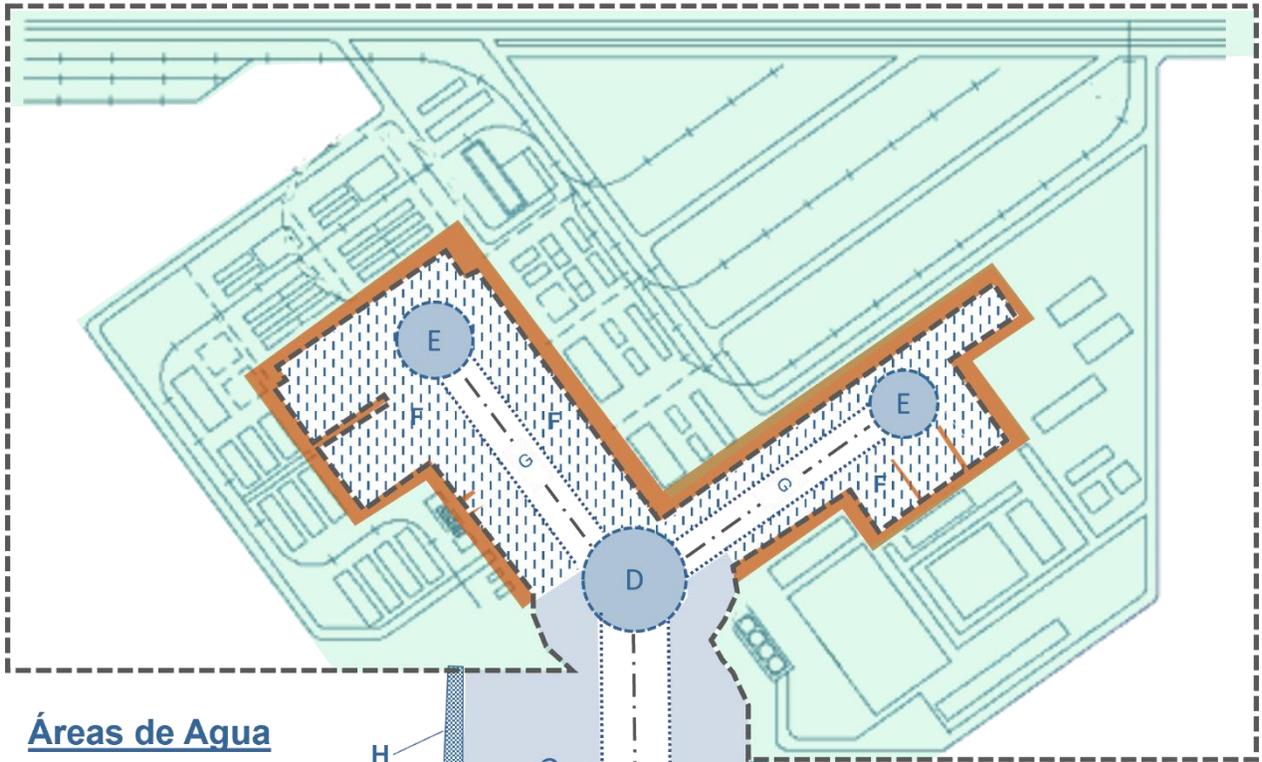
La infraestructura de un puerto, que comprende tanto sus áreas terrestres como acuáticas, es determinada principalmente por dos factores: las características de las embarcaciones que se van a atender y el tipo de muelle necesario para dichas embarcaciones.

Para operar eficientemente, los puertos deben tener en sus inmediaciones espacios destinados al almacenamiento de mercancías, áreas para las maniobras de carga y descarga, y en ciertos casos, instalaciones industriales para modificar la carga o regular su entrada. Además, cuando se trata de la salida de productos, ya sea por necesidad o por regulación, se requieren áreas de almacenamiento y maniobras, y en el caso del petróleo, es indispensable la presencia de plantas o refinerías (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001).

En la *Ilustración 11*, se muestra un esquema general de un puerto y la infraestructura de sus distintas áreas, las cuales se revisarán puntualmente más adelante en esta sección del trabajo.

## Áreas de Tierra

Dependen del tipo de operación



## Áreas de Agua

Accesos al puerto

- A Bocana
- B Canal de Navegación
- C Antepuerto y Fondeadero

Áreas de maniobras

- D Dársena de Ciaboga
- E Dársena de Maniobras
- F Dársena de Servicios
- G Canales secundarios

Estructuras de protección

- H- Diques / Escolleras

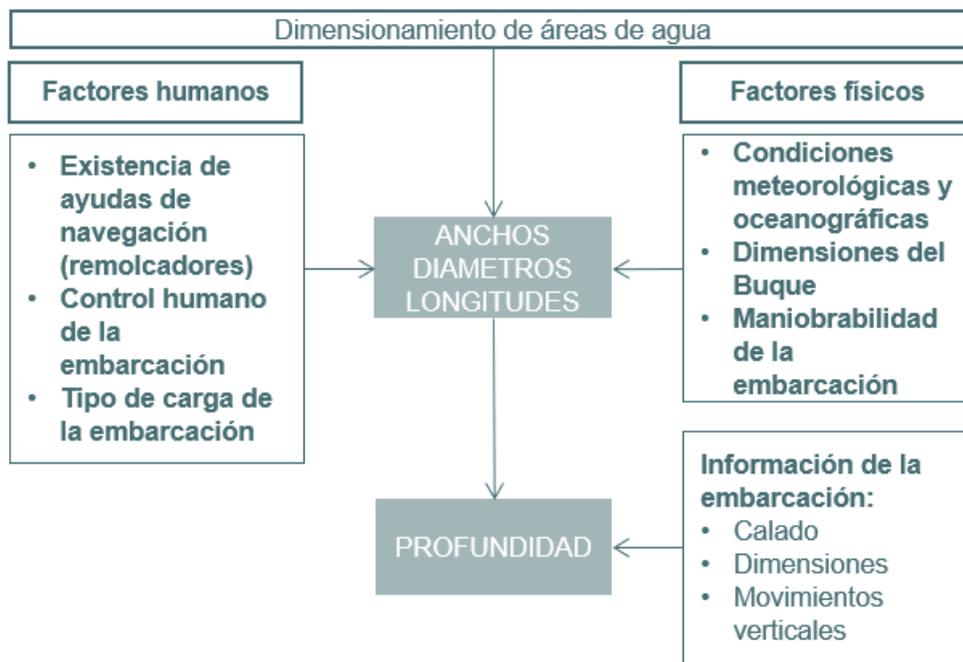
## Estructuras de Atraque

Dependen del tipo de operación

### 1.4.1 Infraestructura en áreas de agua

La función principal de estos elementos es cubrir las necesidades de acceso al puerto de forma segura y eficiente. Considerando las maniobras que realiza la embarcación, desde la entrada hasta que fondea o atraque y viceversa (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001; Dirección de Obras Portuarias, 2013; Thoresen, 2018).

En general el diseño de estos espacios se ven afectados por una serie de factores que influyen directamente en el dimensionamiento horizontal (anchos, diámetros y longitudes), como el dimensionamiento vertical (profundidad), los cuales es necesario conocer para tener un diseño razonable de las áreas de agua, estos factores se pueden agrupar en aspectos físicos y de control humano, en la *Ilustración 12*, se muestra cómo se relacionan con el dimensionamiento.



*Ilustración 12. Factores que afectan al Dimensionamiento de áreas de agua. Fuente: Elaboración Propia con información de la Manual de dimensionamiento portuario (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001).*

Con base en los criterios mencionados, se dimensionan las áreas de agua para los diferentes tipos de cargas a manejar y que también está estrechamente relacionado con la embarcación de diseño. Donde el requisito básico para garantizar la seguridad de navegación en una vía marítima o fluvial es el calado. A continuación, se presenta la infraestructura de agua esencial de un puerto.

## Accesos al puerto

Elementos que, como su nombre lo indica, da entrada o salida a las embarcaciones al puerto, la infraestructura con la que cuentan los accesos al puerto son las siguientes:

**Bocana:** Es la entrada de mar abierto a la zona portuaria, puede ser natural o artificial, esta última estará limitada por escolleras debidamente señalizados (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001) . Para su diseño, se requiere analizar dos aspectos fundamentales: la orientación y el ancho, que van ligados entre ellos.

**Canal de Navegación:** Es la zona navegable más importante del puerto, es donde la embarcación en movimiento pasa de mar abierto a la zona portuaria. En su diseño se obtiene en base al barco tipo de mayor tamaño que se espera arribe al puerto (Dirección de Obras Portuarias, 2013; Puertos del Estado, 1995; Thoresen, 2018).

**Antepuerto**<sup>17</sup>: Área de agua asignada cerca del acceso, una vez se cruce por el canal de acceso, su función es dar un espacio donde las embarcaciones puedan esperar sus maniobras en muelle, además de dar servicio para maniobras o fondeo de las embarcaciones.

**Fondeadero**<sup>18</sup>: Área de agua que sirven para el anclaje, cuando los barcos tienen que esperar un lugar de atraque, abordaje de tripulación, abastecimientos, inspección de cuarentena y algunas veces aligeramiento de carga. Generalmente se ubican junto a los canales de navegación, con la intención de no perjudicar el arribo de otras embarcaciones.

## Áreas de maniobras

Las áreas de maniobras se definen como la zona de agua protegida, dentro del puerto, que debe proporcionar un espacio de maniobras seguro y adecuado para las embarcaciones. De acuerdo con la frecuencia y tamaño de las embarcaciones puede haber varias dársenas para atender a los diferentes tipos de embarcaciones que llegan al puerto, y en general se puede cotar con las siguientes:

**Dársena**<sup>19</sup> **de ciaboga:** Área dentro del puerto destinada a las maniobras de preparación del barco, ver *Ilustración 13*, para el acercamiento al muelle destino, se realizan las maniobras de giro y revire con el fin de dirigirse hacia las distintas áreas del puerto según lo requiera la embarcación (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001; Dirección de Obras Portuarias, 2013; C. García, 2017; Thoresen, 2018).

---

<sup>17</sup> Ver Glosario.

<sup>18</sup> Ver Glosario.

<sup>19</sup> Ver Glosario.



Ilustración 13. Visualización del concepto de ampliación de la dársena de ciaboga No. 2 en el puerto de Gdynia, Polonia. Fuente: Capacity analysis of the selected track system in partially ordered space (Mieloszyk et al., 2019).

**Dársena de Maniobras:** Áreas dentro del puerto destinadas a las maniobras de preparación del barco para el acercamiento o separación del muelle, es necesario tener áreas para este fin en cada muelle, esta área se encuentra precia a las dársenas de atraque. (Dirección de Obras Portuarias, 2013).

**Canales Secundarios:** Son vías navegables dentro del puerto que permiten a las embarcaciones realizar la entrada o salida, conectando el canal navegación principal con las distintas áreas que conforman el puerto.

**Dársena de Servicios:** Áreas de agua cercana los muelles y otras áreas complementarias del puerto. Las áreas contiguas a los muelles son conocidas como dársenas de atraque, ver *Ilustración 14*, normalmente dependen de la longitud del frente de atraque; las que se usan para reparaciones son diseñadas en función del tamaño del buque y tipo de anclaje (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001; Thoresen, 2018) (Karan, 2021).



Ilustración 14. TEA Lázaro Cárdenas de SSA México, Barcos tipo RORO atracados y usando la dársena de atraque. Fuente: <https://www.puertolazarocardenas.com.mx/plc25/noticias/1274-2021-seminario-virtual>

## Estructuras de Protección

Elementos que sirven como protección para el puerto del entorno natural, la infraestructura con la que cuentan los accesos al puerto son las siguientes:

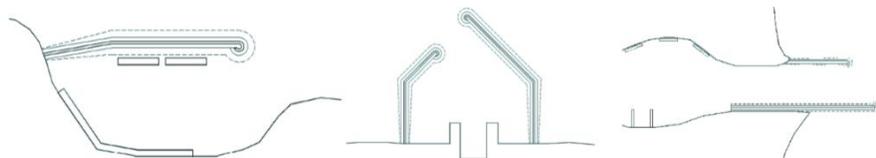
**Diques:** Estructura diseñada para proteger un puerto, fondeadero o cuenca marina, de las olas marítimas, interceptan las corrientes costeras y tienden a prevenir la erosión de las playas (Encyclopaedia Britannica, 2020). Estas obras, consideradas como de abrigo o de protección (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001; Thoresen, 2018).

Por su configuración física, ver *Ilustración 15*, se clasifican en:

**Paralelos a la costa:** Utilizado en puertos exteriores ganados al mar, no muy alejados de la costa; o bien, cuando no se dispone de área en tierra. Pueden estar aisladas de la costa.

**Convergentes:** Cuando se busca calado necesario con poco o ningún dragado, se debe tener cuidado con las áreas de agua disponibles, ya que el puerto puede quedar encerrado por las obras de abrigo y no dejar espacio para crecimiento de las instalaciones.

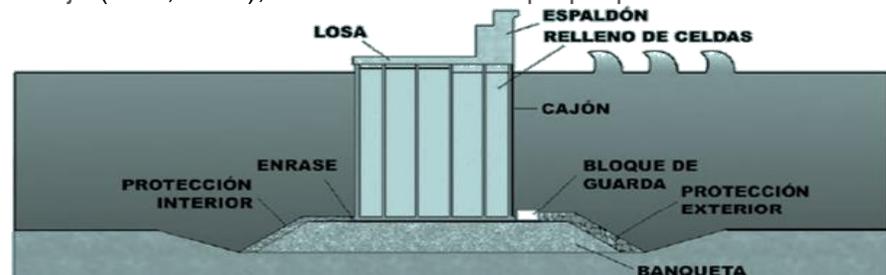
**Perpendiculares a la Costa:** Usados en puertos creados en áreas de tierra mediante dragados o en ríos con salidas al mar.



*Ilustración 15. a) Paralelos a la costa b) Convergentes c) Perpendiculares a la Costa. Fuente: Elaboración propia con información del Manual de dimensionamiento portuario.*

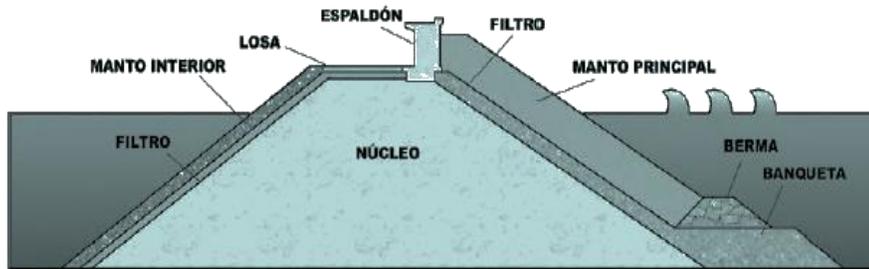
Por su estructura, los diques se pueden clasificar de la siguiente manera:

**Dique Vertical:** Estructura vertical, ver *Ilustración 16*, conformada por cajones, bloques o pantallas, apoyados sobre una banqueta de escollera (Rodríguez et al., 2018), su función principal es reflejar el oleaje (Ruiz, 2019), únicamente con su propio peso.



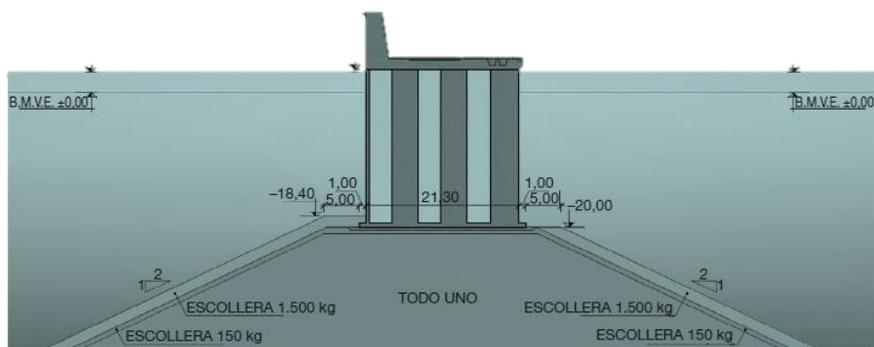
*Ilustración 16. Dique Vertical. Fuente: Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas*

Dique en Talud: También conocido como rompeolas, ver *Ilustración 17*, constituidos generalmente por un núcleo. Su función es romper el oleaje, es decir, disipar su energía. Los procesos involucrados en la estabilidad de la estructura suelen ser diversos; entre ellos para entender su influencia, descripción y estudio, se han dividido en factores hidráulicos (oleaje), estructurales (materiales de construcción, geometría y uso) y geotécnicos (Quiñones, 2006), donde la energía disipada es mayor que la reflejada. Por su diseño este puede estar sumergido, provocando que sólo pase una porción de la energía del oleaje (Dirección de Obras Portuarias, 2013). En la *Ilustración 19*, se puede apreciar la diferencia en las corrientes en la cara interna y externa del talud.



*Ilustración 17. Dique en Talud. Fuente: Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas*

Dique mixto: Los rompeolas tipo mixto o compuesto, son constituidos por un dique vertical y teniendo como cimentación un dique en talud, este último funciona como un dissipador de la Ola, por lo que la energía reflejada es similar a la disipada, ver *Ilustración 18*.

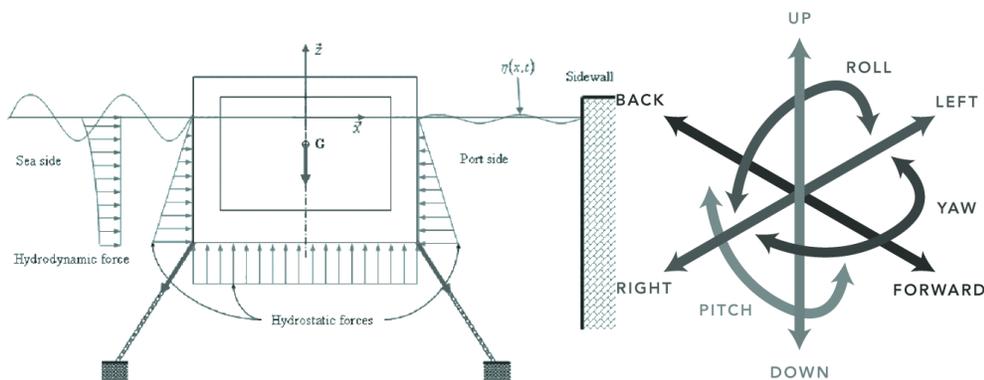


*Ilustración 18. Sección de Dique Mixto. Fuente: www.elsevier.es/ribagua*



Ilustración 19. Dique en Talud del puerto de Scheveningen, Holanda. Fuente: <https://www.istockphoto.com/>

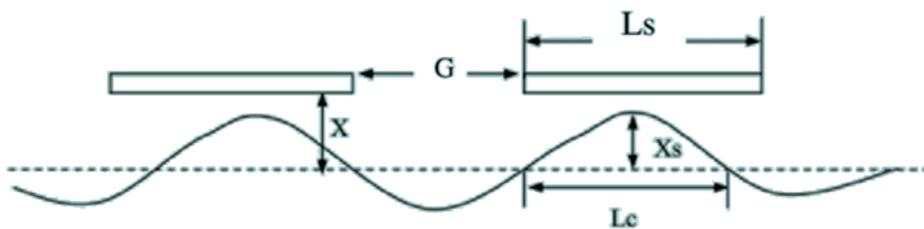
**Dique Flotante:** Estructuras, que a partir de su diseño (forma, dimensiones y materiales de construcción), ver *Ilustración 21*, generan una reducción del oleaje transmitido, en función de la reflexión, difracción, atenuación, interferencia y transmisión de su energía (Elchahal et al., 2009; Ruggeri et al., 2017), lo anterior gracias a que es una estructura semirrígida, con seis grados de libertad de movimiento: balanceo (roll), cabeceo (pitch), guiñada<sup>20</sup> (yaw), avance/retroceso (surge o Back/Forward), desviación lateral (sway o Righth/Left) y elevación/descenso (heave o Up/Down) (Rueda & Lonin, 2012).



*Ilustración 21. (Izquierda) Sección de Dique Flotante. (Derecha) Los seis grados de Libertad de movimiento. Fuente: Design optimization of floating breakwaters with an interdisciplinary fluid–solid structural problem & <https://projectoidis.org/6dof/>*

Por su efecto sobre la playa, se pueden clasificar como:

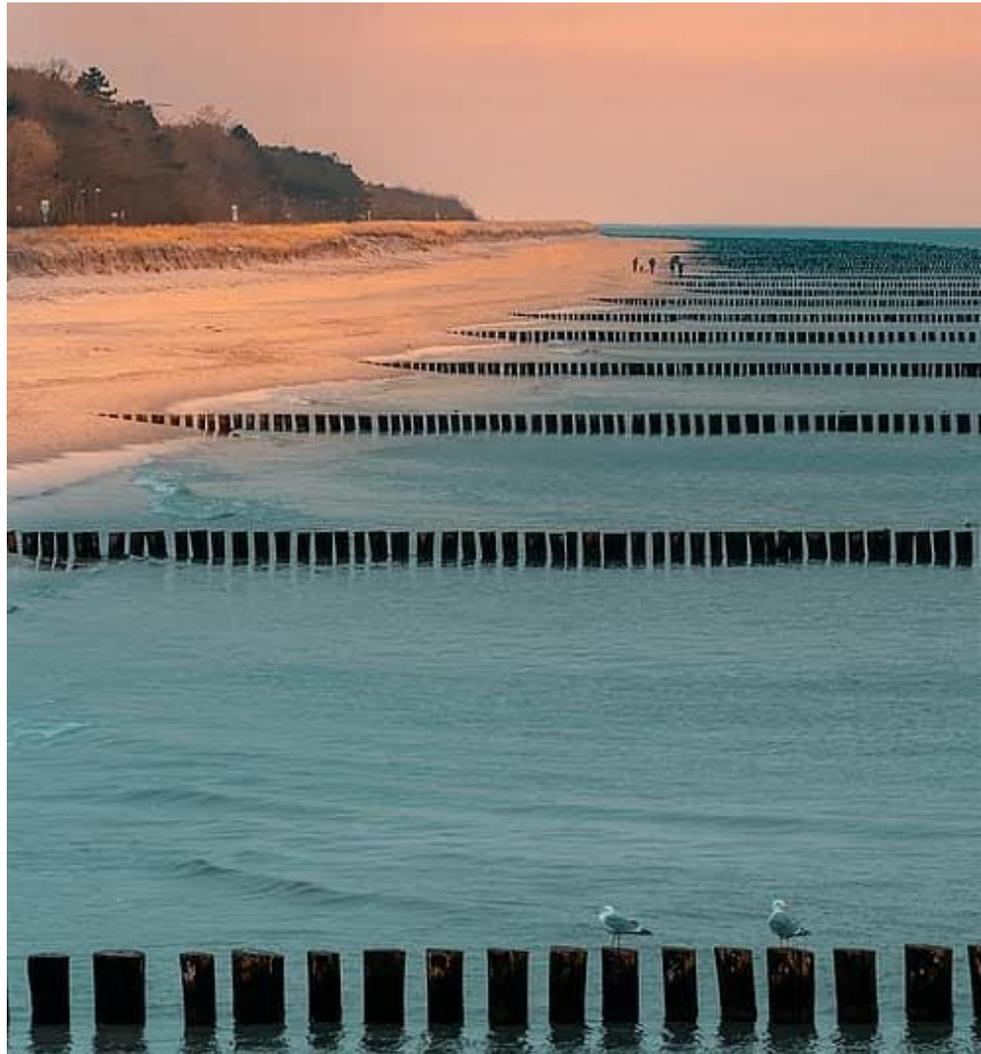
**Diques Exentos:** Paralelos a la costa, ver *Ilustración 22*, también pueden proporcionar una protección para los puertos o las costas erosionables y sirven como trampa para sedimentos de la barrera litoral (Martínez, 2017; Paganelli et al., 2014; Rodríguez et al., 2018).



*Ilustración 22. Efectos sobre la playa con el uso de Duques Exentos. Fuente: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/82503>*

<sup>20</sup> Término que se emplea para designar el movimiento de rotación de un objeto en relación con su eje vertical.

**Espigón**<sup>21</sup>: Son estructuras angostas de diferentes longitudes y alturas (Dirección de Obras Portuarias, 2013), perpendiculares una costa, con el objetivo de interrumpir el transporte longitudinal de sedimentos, propiciando que la propia dinámica litoral genere un tramo de costa adicional donde ha habido erosión o bien donde nunca ha existido (Martínez, 2017; Paganelli et al., 2014), ver *Ilustración 23*.



*Ilustración 23. Diques de espigón de madera en la playa de Zingst, Alemania. Fuente: <https://www.pikist.com/>*

---

<sup>21</sup> En inglés: Groyne

**Escolleras:** Las escolleras<sup>22</sup>, son elementos que se seleccionan y utilizan para proteger la integridad de la infraestructura que se encuentra sometida a las acciones del oleaje (Aboubacar et al., 2021; Keaton, 2018).

Por su origen, estas se clasifican en:

Naturales: Procedentes de voladuras de canteras, ver *Ilustración 26*, normalmente cercanas al sitio de trabajo, que, por su granulometría se agrupan por el peso de cada pieza en:

1 kN a 3 kN (101.97 kg a 305.91 kg)

3 kN a 20 kN (305.91 kg a 2,039.43 kg)

Mayores de 20 kN (más de 2,039.43 kg)

Artificiales: Piezas prefabricadas de concreto, ver *Ilustración 24* e *Ilustración 25*, que sustituyen a las escolleras naturales, por razón de tamaño o dificultad de obtención. Existe una gran variedad de escolleras artificiales, muchas de ellas sometidas patentes, la guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas las agrupa por su forma en:

Masivas, que resisten la acción del oleaje por su peso y están colocadas sin trabazón<sup>23</sup>.

Complejas, su variedad es debido a la búsqueda de una mejor trabazón, disminuir el peso y la cantidad de concreto a emplear.

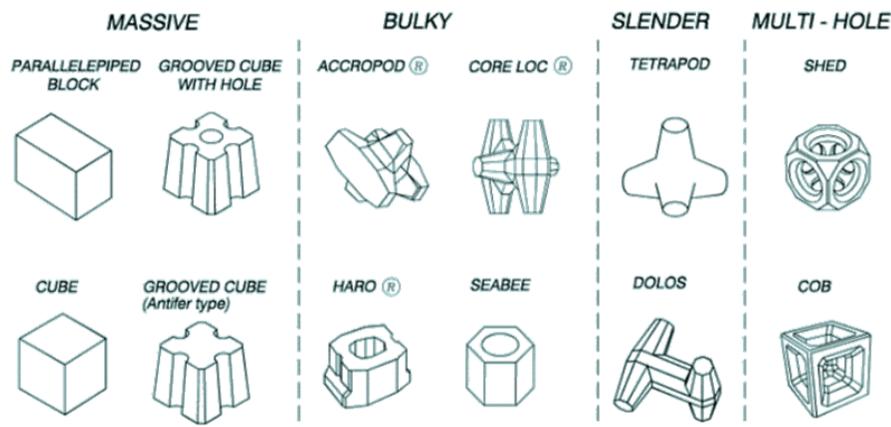


Ilustración 24. Escolleras artificiales. Fuente: <https://www.marinespecies.org/>

<sup>22</sup> En inglés: Armourstone.

<sup>23</sup> Ver Glosario



Ilustración 26. Dique de escolleras naturales. Fuente: <https://toppng.com/>

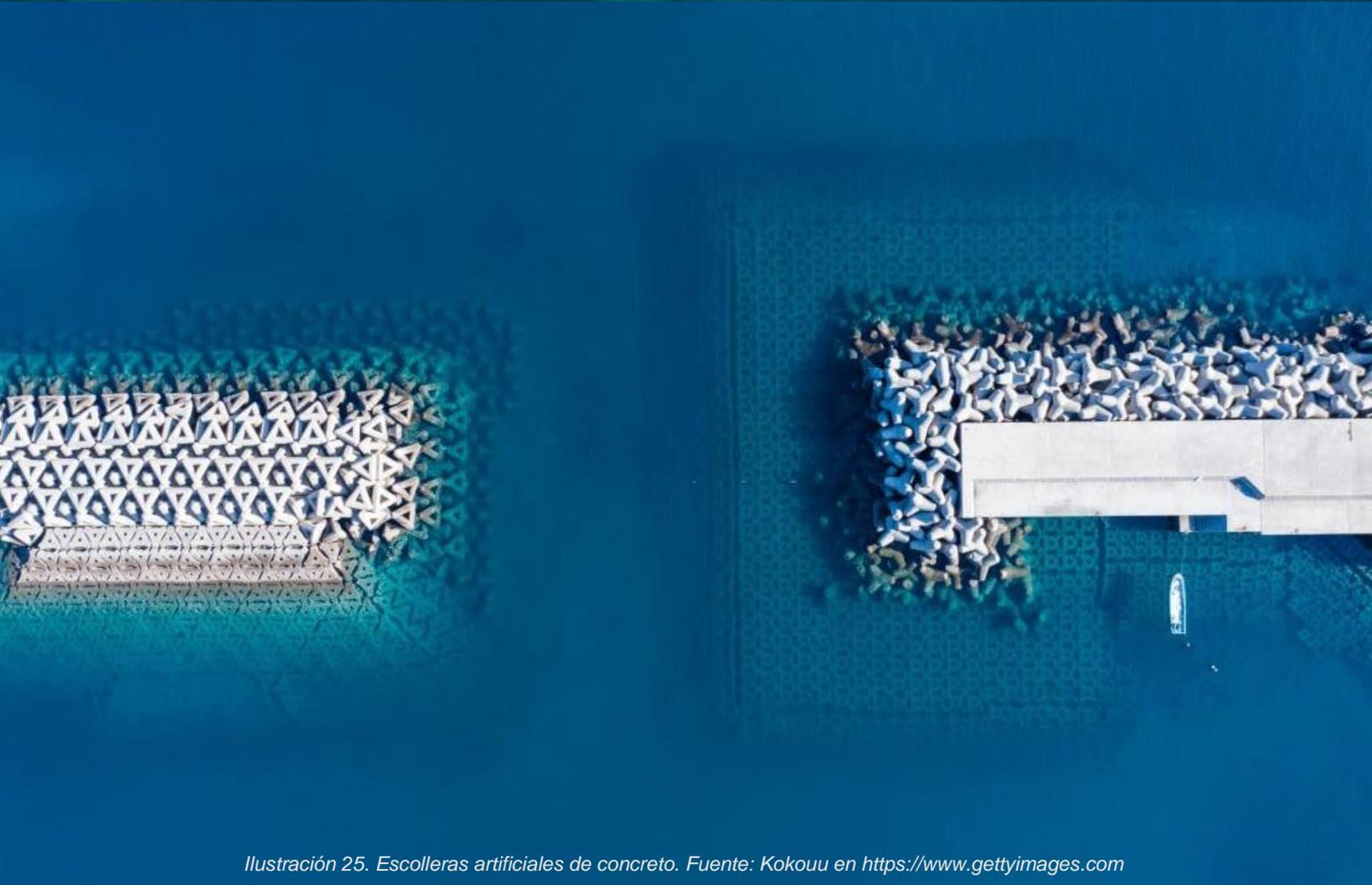


Ilustración 25. Escolleras artificiales de concreto. Fuente: Kokouu en <https://www.gettyimages.com>

### 1.4.2 Estructuras de Atraque

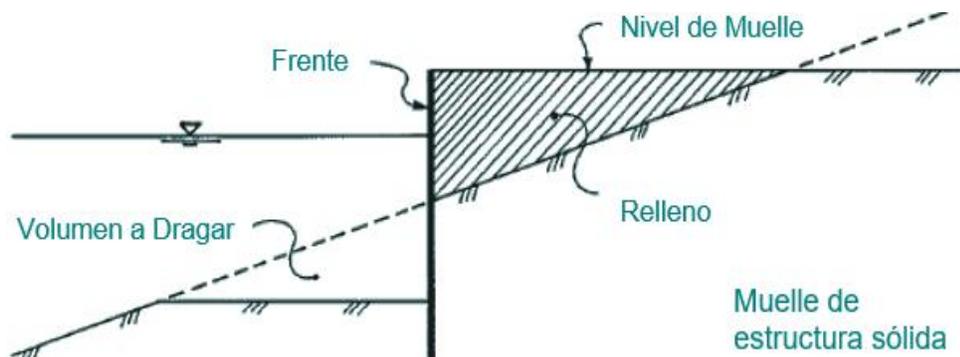
El propósito de esta estructura es proporcionar un área donde los barcos puedan atracar<sup>24</sup> de manera segura, en ese sentido, estas estructuras son una conexión física entre mar y tierra (Thoresen, 2018), ver *Ilustración 28*, con el objetivo de proporcionar a las embarcaciones condiciones adecuadas y seguras para su estadía existen elementos como son Bitas de Amarre<sup>25</sup> y Defensas Marinas<sup>26</sup>. Además, deben dotar las condiciones necesarias para que las operaciones portuarias necesarias como: carga, estiba, desestiba, descarga y transbordo de pasajeros o vehículos (Dirección de Obras Portuarias, 2013; Prosertek, 2007; Thoresen, 2018).

De acuerdo con la guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras (2013), por su tipología estructural, las obras de atraque y amarre pueden clasificarse como se revisa a continuación.

#### Muelle

Un muelle es en una estructura que deja un área libre de agua en su borde o frente, que permite el atraque paralelo de las embarcaciones que proporciona un área para las operaciones de carga y descarga según lo que se requiera (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001; Dirección de Obras Portuarias, 2013; Thoresen, 2018). Los muelles se construyen de acuerdo con uno de los siguientes dos principios (Lapkina & Malaksiano, 2020; Thoresen, 2018):

**Estructura sólida:** Se construye bajo el concepto de un muro de protección, el espacio que se genera entre la pantalla y el terreno natural se rellena para obtener la plataforma del muelle, de acuerdo con el nivel que se requiere, ver *Ilustración 27*. La pantalla se diseña para resistir la carga horizontal del relleno, así como las cargas vivas y de las embarcaciones que atracaran.



*Ilustración 27. Muelle de estructura sólida. Fuente: Elaboración propia con información del Port Designer's Handbook.*

<sup>24</sup> Ver Glosario

<sup>25</sup> Ver Glosario

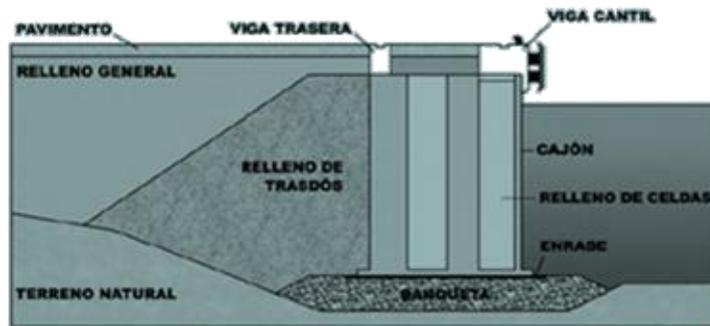
<sup>26</sup> Ver Glosario



Ilustración 28. Estructura de atraque para descarga de contenedores, en Rotterdam, Holanda. Fuente: <https://www.gettyimages.com> de Dawid Ziolkowski.

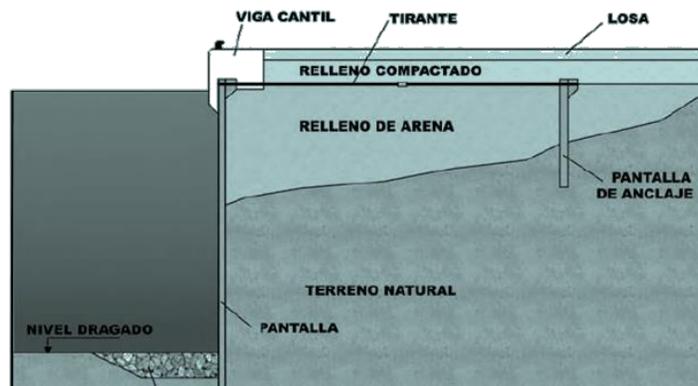
Los muelles de estructura sólida se pueden dividir en dos grupos principales, según su procedimiento constructivo:

**Por gravedad:** El terreno es contenido con el peso muerto de la estructura y fricción inferior será capaz de resistir las cargas del relleno, cargas vivas y otras cargas horizontales y verticales que actúan sobre el muelle (Thoresen, 2018), ver *Ilustración 29*.



*Ilustración 29. Muelle por gravedad de cajones prefabricados. Fuente: Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas*

**Muros Pantalla:** Conformadas por un muro pantalla, que transmite las cargas al terreno y al trasdós<sup>27</sup> mediante empotramiento y anclaje, respectivamente. El anclaje puede estar constituido por una pantalla trasera. Estas pantallas pueden ser construidas mediante Tablaestacas de acero o Pantallas de concreto, (Dirección de Obras Portuarias, 2013; Prosertek, 2007; Puertos del Estado, 2008; Thoresen, 2018), ver *Ilustración 30*.

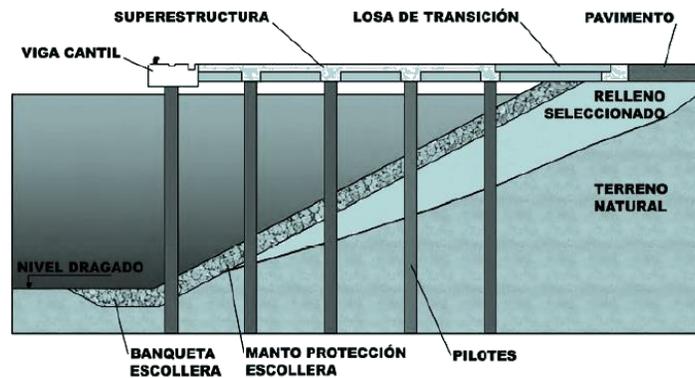


*Ilustración 30. Muelle de muro pantalla. Fuente: Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas*

<sup>27</sup> Ver Glosario

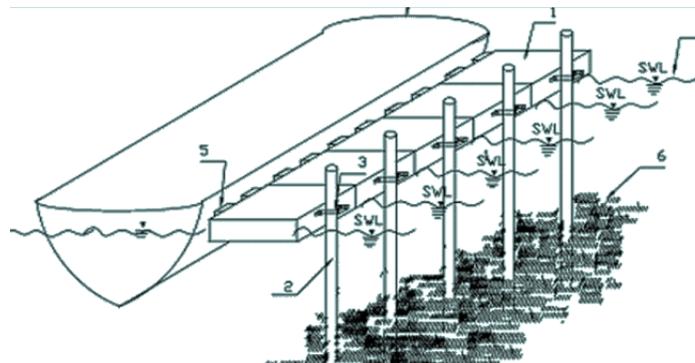
**Estructura Abierta:** En términos de diseño, una estructura de atraque abierta permite que el agua circule libremente por debajo, lo que puede ser útil en áreas con corrientes fuertes o donde se necesita mantener un flujo de agua. Además, este tipo de diseño puede ser beneficioso en áreas con suelos blandos o inestables, ya que la carga del muelle se distribuye entre los múltiples pilotes, reduciendo así la presión sobre el suelo.

Bajo este sistema constructivo la plataforma del muelle es soportada por pilas o pilotes, ver *Ilustración 31*, que transmiten los esfuerzos hacia el terreno, de manera vertical o inclinada.



*Ilustración 31. Muelle de Pilotes. Fuente: Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas*

**Muelles Flotantes:** El sistema estructural de estos muelles consiste en una serie de cuerpos flotantes, llamados pontones<sup>28</sup>, que están conectados, ver *Ilustración 32*, son retenidos lateralmente por pilotes u otro anclaje. Con ayuda de un marco guía, rígidamente unido a los pontones, y que tienen un sistema que permite el movimiento vertical libre de los pontones derivado del oleaje y el cambio de nivel del agua (Mostofi & Bargi, 2012).



*Ilustración 32. Esquema de un muelle flotante. Fuente: New concept in analysis of floating piers for ship berthing impact.*

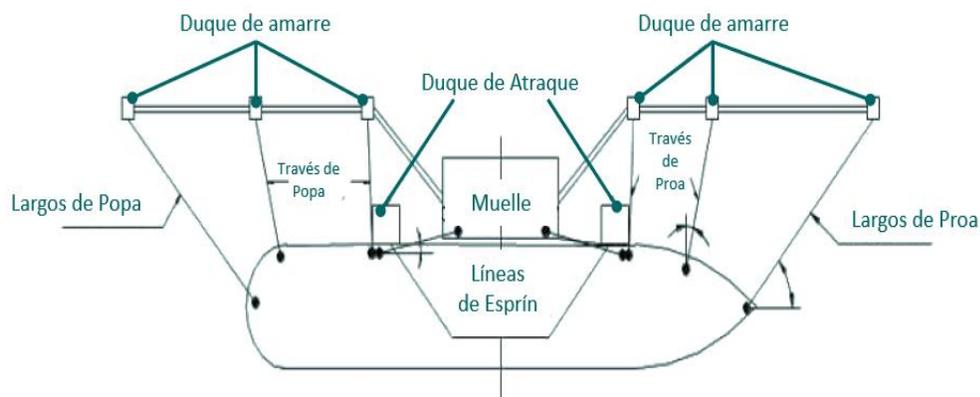
<sup>28</sup> Ver Glosario

## Duques de Alba

Un Duque de Alba<sup>29</sup> es una estructura aislada al muelle, de acuerdo con su propósito sirve para el atraque o amarre de embarcaciones, es muy común encontrar combinación de Duques de Alba con Muelles, lo anterior reduce drásticamente el tamaño de los muelles, en la , se muestra una combinación los cuales se dividen en dos tipos, ver *Ilustración 33* (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001; Rodríguez et al., 2018; Thoresen, 2018):

Duque de Atraque / Breasting Dolphin: Ayuda en el atraque de las embarcaciones recibiendo las fuerzas provocadas por la embarcación y su carga, con ello ayuda a que la sección longitudinal del muelle sea más corta, además de servir como puntos de apoyo para restringir el movimiento de manera longitudinal.

Duque de Amarre / Mooring Dolphin: Como su nombre lo indica, se utilizan solo para amarrar y asegurar las embarcaciones mediante las líneas de amarre<sup>30</sup>, tomando en cuenta los efectos producidos por la tensión y con ello controlar el movimiento transversal.



*Ilustración 33. Combinación de estructuras de amarre, Muelle y duques de alba. Fuente: Design Conditions for Dolphin Berth by Tanker Fleet Analysis*

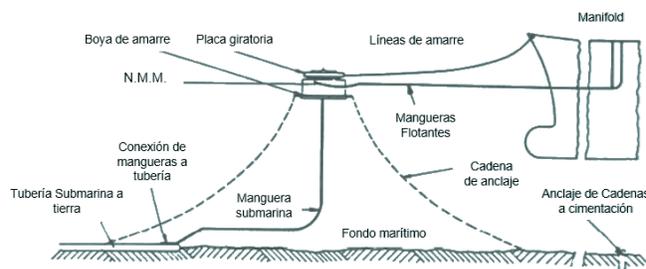
Estructuralmente y de manera general consisten en uno o más pilotes a manera de cimentación una plataforma o espacio para la maniobra de amarre u otras actividades donde se ubicarán los elementos auxiliares que le darán la función al duque: Defensas si son de Atraque; Bitas si son de amarre (Farag et al., 2016; Kang et al., 2013).

<sup>29</sup> En Inglés: Dolphin

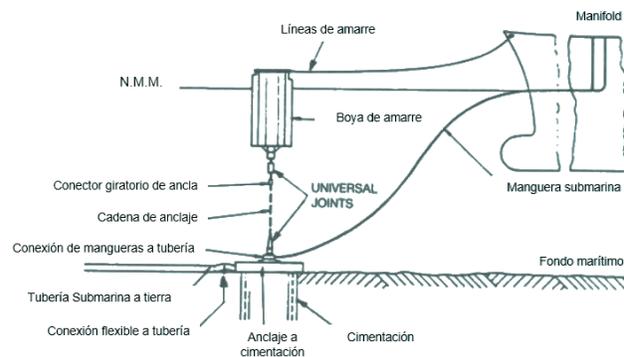
<sup>30</sup> También llamadas: Cabos de amarre

## Sistema de Boyas

Las boyas son estructuras flotantes, cuya posibilidad de movimientos se encuentra limitada por una cadena, ver *Ilustración 34*, la cual esta amarrada a un punto fijo en el fondo, es decir, que son estructuras ancladas al lecho marino, que permiten amarrar embarcaciones en zonas con escasa protección marítima, generalmente se usan en operaciones de carga o descarga de líquidos ya que disponen de equipamiento para realizar esa operación a través de mangueras submarinas (Amaechi et al., 2021; S.-W. Lee & Kim, 2019). Según el anclaje puede ser de las siguientes formas:



(a) CALM (Catenary Anchor Leg Mooring) Sistema de Anclaje de catenaria



(b) SALM (Single Anchor Leg Mooring) Sistema de Anclaje a un punto

*Ilustración 34. Sistemas de Anclaje de Boyas. Fuente: Study on Improvement of Criteria for Mooring Safety Assessment in Single Point Mooring*

De acuerdo con la libertad de movimiento se pueden considerar que existen dos sistemas de boyas para amarre:

**Monoboya:** Elemento único que permite la libertad de giro a la embarcación de acuerdo con las condiciones climáticas.

**Sistemas Multiboyas:** Comúnmente denominados MBM por las siglas del inglés Multi Buoy Mooring System, posibilitan el amarre de una embarcación simultáneamente a varias boyas, con el objeto de limitar sus movimientos.

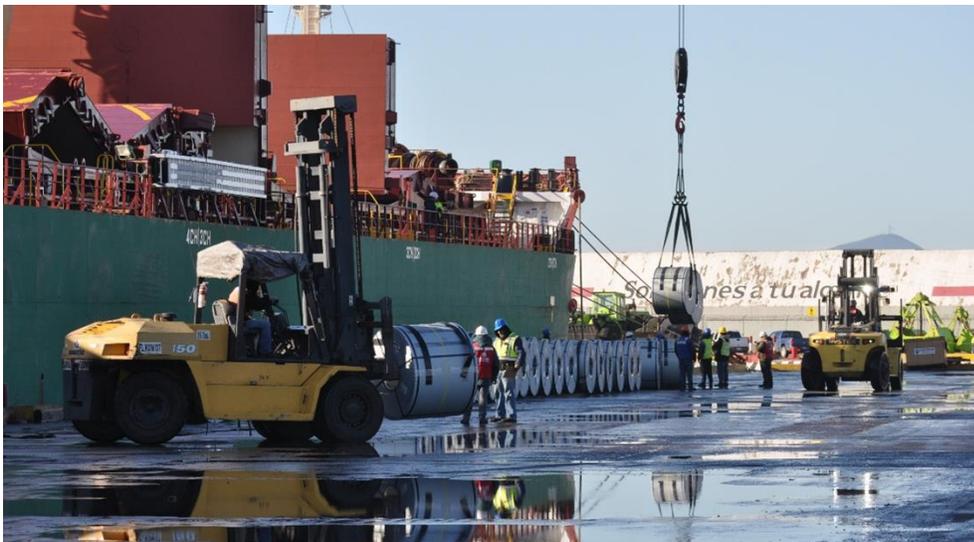
### 1.4.1 Infraestructura en áreas de Tierra

Las Áreas Terrestres de un Puerto dependerán del tipo de carga que se maneje según el operador o la autoridad portuaria. El área portuaria dentro del área de tierra es conocido como Puesto de atraque, elemento vital del puerto que hace posible la operación (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001; Thoresen, 2018). En general el puesto de atraque comprende:

- Área de maniobras de carga – descarga (embarcación – muelle).
- Área de transferencia. (de muelle a transporte terrestre)
- Almacenamiento.
- Accesos y vialidades (Carreteras y Ferrocarriles)
- Estacionamientos y controles de seguridad.
- Instalaciones de conservación y mantenimiento de equipo.
- Servicios generales y especiales.
- Terminal o instalaciones para el movimiento de pasajeros.

En general, por el tipo de carga, se pueden clasificar de la siguiente manera:

**Carga General:** son áreas de atraque para usos generales, y que permiten la manipulación de carga general fraccionada (cajas, sacos, bidones, etc.), carga unitaria individual (como rollos y máquinas), ver *Ilustración 35*; o reunida (como pallets). En México, las operaciones de carga – descarga se efectúan por medio de grúas del barco y equipo de translación de carga ubicado en el muelle (camiones, montacargas, etc.).



*Ilustración 35. Maniobra de descarga de rollos de acero, puerto de Ensenada. Fuente: @portofensenada (Puerto Ensenada, 2019)*

**Carga unitarizada:** Es carga en unidades de transporte se adaptan a las características de los diversos tipos de unidades movilizadas (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001). Los puertos que tienen este tipo de terminales se especializan en la carga y descarga de contenedores, que se almacenan apilados por módulos que para transportarlos utilizan diferentes tipos de grúa, capaces de mover mercancías de diferentes tonelajes (Prosertek, 2021). Según la capacidad de TEU's<sup>31</sup>, se pueden subclasificar en:

- 1ª generación: 750 TEU's
- 2ª generación: 1,500 TEU's
- 3ª generación: 3,000 TEU's
- 4ª generación: 4,000 TEU's
- 5ª generación: 5,000 TEU's

**Polivalente:** Es una combinación de las dos anteriores, ver *Ilustración 36*, han surgido como terminales de transición entre las de carga fraccionada y unitaria, como pueden ser de contenedores y de graneles específicos, donde al aumentar considerablemente el volumen de carga, han generado la necesidad de contar con Terminales Especializadas de Contenedores o de Graneles en un mismo puesto de atraque (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001). Esto sucede en particular en los países en desarrollo como el caso de México.



*Ilustración 36. Terminal de Contenedores (izquierda) y terminal de granos (derecha). Fuente: <https://mexicoport.com/> ((Benitez, 2021)*

---

<sup>31</sup> Acrónimo de Twenty-foot Equivalent Unit. Contenedor con capacidad de carga estándar de 20 pies (6.096 m x 2.438 m x 2.591 m).

**RORO**<sup>32</sup>: Es dedicada a embarcaciones que mueven vehículos de carga, automóviles (puede ser con pasajeros si se trata de un ferry), ver *Ilustración 37*. Este tipo de terminal es muy conveniente en países en desarrollo debido a su flexibilidad en la operación, requieren pocas instalaciones especializadas.



*Ilustración 37. Terminal Especializada en Autos. Fuente: Figura 2 de Modeling of sea transport infrastructure objects (Lapkina & Malaksiano, 2020).*

**Granel**: Infraestructura dedicada a la carga y descarga de producto en forma suelta y se pueden dividir en dos grandes grupos:

Ordinarios (Bulk), donde destacan los cereales (maíz, trigo, sorgo, etc.); y otros materiales como: abonos químicos, azúcares, sal, cemento, etc.

Minerales (Ore), donde existe una extensa gama de variedades como: mineral de hierro, carbón, cobre, manganeso, zinc, bauxita, azufre, barita, etc.

Donde dos de los elementos más importantes además del área de atraque son él; Cargador, equipo básico para la operación se sitúa en el muelle para acceder a la embarcación con el producto y el Almacenamiento, que corresponden a patios donde se apilan los minerales, también se pueden requerir bodegas y silos para cereales o productos que requieren protección de la intemperie. En la *Ilustración 38*, se pueden apreciar ambos.

---

<sup>32</sup>Acrónimo del término inglés RollOn-RollOff, que denomina a la embarcación que transporta cargamento rodado, como automóviles o camiones.



*Ilustración 38. Terminal de productos Minerales. Fuente: TPP reactiva operaciones en Lázaro Cárdenas (T21, 2017).*

**Fluidos:** Dedicada a la recepción o envío (importación y exportación) de productos derivados del petróleo (crudos o refinados; gases licuados) y otros (vinos, aceites, mieles, etc.), también se considera granel, pero requiere otro tipo de instalaciones en el muelle. Por el tamaño de la embarcación y condicionantes físicos de las áreas de agua para la operación de fluidos, en especial de petróleo y derivados, los Puestos de Atraque se dividen en:

En Aguas Protegidas, ver *Ilustración 39*, son aquellas que se sitúan en un recinto portuario; debe contar con equipamiento especializado para la carga o descarga del producto (MLA's).



*Ilustración 39. Terminal de Fluidos de derivados de petróleo. Fuente: <https://www.golder.com/>*

En Mar Abierto, para embarcaciones cuyo calado es mayor a 16.00 m; para grandes buques que no pueden arribar a puerto por tal motivo se instalan en mar abierto donde se manera natural se logran profundidades mayores.

**Pesqueros:** Estos puertos constituyen desde pequeñas instalaciones hasta modernas terminales equipadas con tecnología de punta (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001), por el tipo de pesca que se practica pueden incluir la pesca ribereña<sup>33</sup> y la pesca de altura<sup>34</sup>.

**Turísticos:** Atendiendo el desarrollo turístico, en años recientes se ha tenido un incremento notable en las actividades que permiten aprovechar las condiciones naturales de las costas, impulsado por los Puertos Turísticos (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001; López, 2009; Zárate, 2004). Los cuales pueden ser para:

**Cruceros:** instalaciones que permiten recibir a estas embarcaciones con rutas establecidas y visitan sitios con atractivos turísticos especializados, pueden incluir instalaciones especiales como plazas comerciales, hoteles u otros, según la operación de la terminal (Lapkina & Malaksiano, 2020; Thoresen, 2018). En temporada alta de vacacionistas se requiere que los barcos fondeen, haciendo necesario el uso de tenders<sup>35</sup>, por tal motivo, algunas terminales tienen muelle de tenders (Krech Ojard & Associates et al., 2013).

**Turismo náutico:** actividad, con fines recreativos y/o deportivos, se realiza en las vías navegables con embarcaciones menores recreativas y deportivas con fines comerciales para brindar servicios a terceros (R. Valdés, 2018).

**Abrigo:** sitios en los que las embarcaciones deportivas pueden guarecerse en condiciones de mal tiempo, abasteciéndose de combustible u otros enceres (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001).

**Marinas y Complejos residenciales:** son desarrollos urbanos con instalaciones para la atención a las embarcaciones deportivas y se ubican en sitios, que tienen las características adecuadas para aprovechar las condiciones naturales, sociales y económicas del sitio (Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, 2001). Además, incluyen un conjunto de instalaciones, servicios técnicos y comerciales, que requieren las embarcaciones y sus usuarios (Guillaumin, 2010; Thoresen, 2018; R. Valdés, 2018) como comercios, estacionamientos y accesos terrestres, entre otros.

En la *Ilustración 40*, se muestra el Puerto de Manhattan, que conjunta la mayoría de los tipos de puertos revisados en esta sección.

---

<sup>33</sup>También “pesca artesanal”, utiliza técnicas tradicionales con poco desarrollo tecnológico. La practican pequeños barcos en zonas costeras a no más de 10 millas de distancia, dentro del mar territorial (Wikipedia, 2021a).

<sup>34</sup>También “pesca de altura” o “pesca deportiva”, se realiza en aguas alejadas de la costa, tipo de pesca industrial (Wikipedia, 2021b).

<sup>35</sup>Botes con los que cuenta el crucero, diseñados específicamente para transportar grupos de pasajeros del crucero a una costa Cuando el Crucero no puede atracar en un muelle.



Ilustración 40. Instalaciones Marítimas-Portuarias de la Isla de Manhattan en Nueva York. Fuente: <https://www.cruise critic.com/>

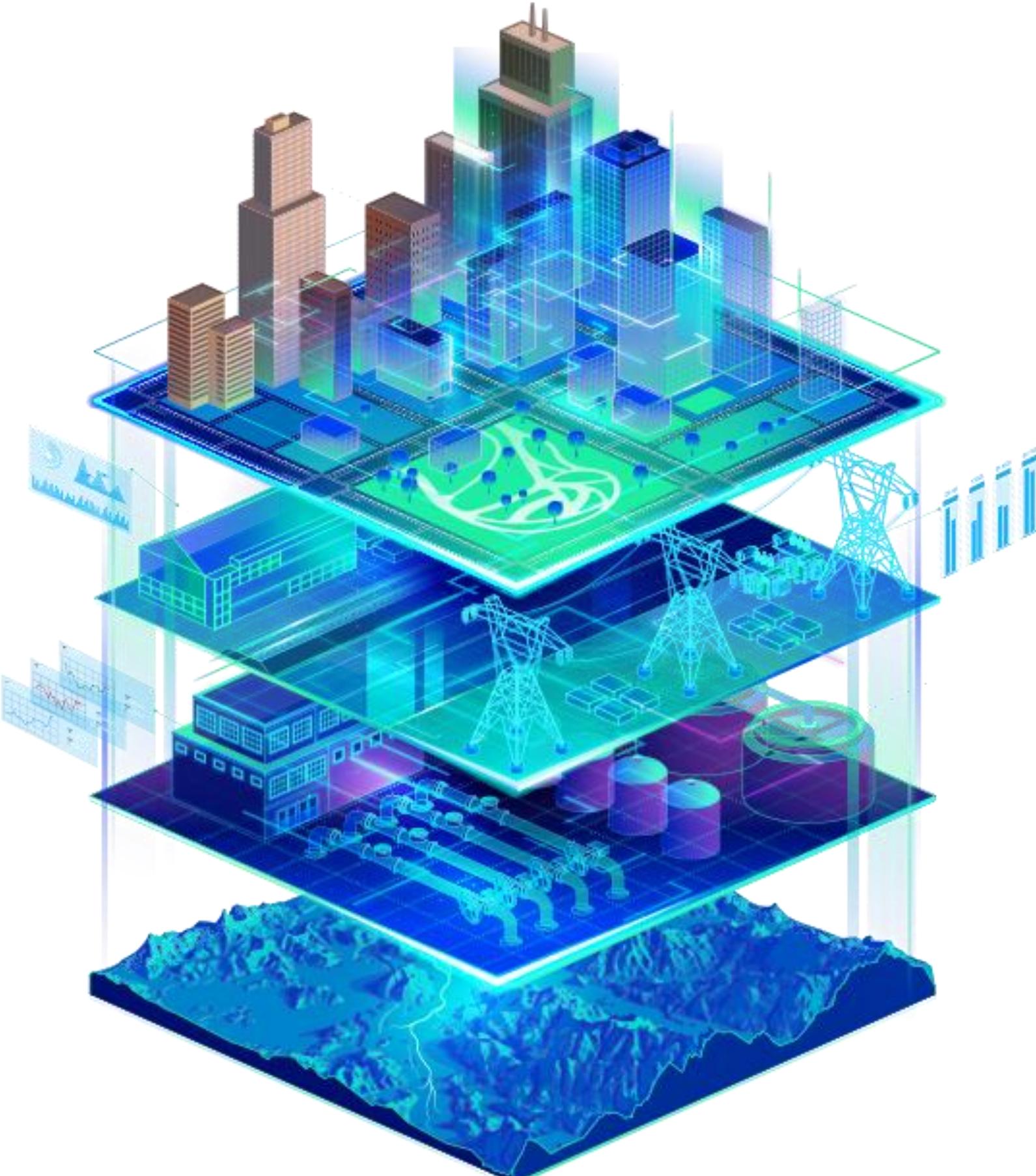


Ilustración 41. Representación gráfica de un gemelo digital de acuerdo con ESRI. Fuente: <https://www.esri.com/en-us/digital-twin/overview>

## 2. EL FUTURO DE LA INFRAESTRUCTURA MARITIMO-PORTUARIA: INNOVACIÓN Y APLICACIÓN DEL GEMELO DIGITAL

---

El presente capítulo explora la importancia de una gestión efectiva de los datos en el sector portuario, teniendo en cuenta el marco tecnológico emergente y las tendencias innovadoras. En este contexto de digitalización y eficiencia operativa, es esencial abordar cómo la tecnología y la innovación pueden contribuir a una visualización de datos mejorada para una toma de decisiones informada.

Además, se abordará el concepto del Gemelo Digital (GD), que es una representación digital de objetos y sistemas físicos reales, y que se ha convertido en una tecnología crucial en la transformación digital de múltiples industrias, incluida la infraestructura marítima-portuaria.

Finalmente, se explorarán los avances recientes y las aplicaciones GD en el contexto de la infraestructura construida. Este análisis del estado del arte permitirá identificar las implementaciones pioneras de esta tecnología, subrayando su relevancia y su potencial para la transformación de la infraestructura portuaria en México.

De esta manera se obtendrá una evaluación integral de cómo la gestión de datos y la innovación tecnológica están revolucionando el sector portuario. Esta revisión ayudará a entender la importancia estratégica de estos elementos y su potencial para diseñar la infraestructura portuaria del futuro.

## 2.1. El desafío de la utilización efectiva de datos en los puertos: tecnología, visualización e innovación

En la era de la digitalización, los puertos más importantes están adoptando las Tecnologías de digitalización y gestión de datos en optimizar sus operaciones y prepararse para el futuro. Un caso emblemático es el de Rotterdam, que ha reconocido el valor de la información en su estrategia de transformación. Sin embargo, un desafío común, es la utilización efectiva de los datos. A menudo, los datos solo se comparten a nivel interno, lo que limita su potencial para impulsar la innovación y la eficiencia.

En este sentido, es fundamental la visualización de los datos, según el matemático Benoît Mandelbrot<sup>36</sup>, "hay cosas que se entienden mejor con los ojos que con la mente". Esto se refleja en la capacidad de la visualización para transformar los fenómenos en información y la información en conocimientos (Costa, 1998). Por ejemplo, el mapa de carreteras y el plano de una ciudad son esquemas, simplificaciones, abstracciones de la realidad que nos permiten entender y utilizar la información que contiene.

La investigación científica produce y utiliza visualizaciones obtenidas por medios técnicos para obtener información con una función práctica que nos ofrece conocimientos útiles, los cuales deben ser útiles para el investigador, como para individuos que requieren información en su vida cotidiana ya que el cometido de la información visual es reducir la complejidad, la ambigüedad y la incertidumbre (Costa, 1998).

Debemos tomar en cuenta que en esta en la industria 4.0, el aumento de canales, medios, soportes y plataformas de información no necesariamente significa que la calidad de la información aumente. En años recientes, los avances tecnológicos en software, hardware y aplicaciones han transformado drásticamente la forma en que la gestiona la información de activos construidos (J. Zhao et al., 2022a). De manera general esa información se distribuye en dos fases principales:

1. Planeación, diseño y construcción
2. Puesta en marcha, operación y mantenimiento.

En la primera fase, se debe reconocer la relación entre las fases de planeación, diseño y construcción, con ello manejar la información como un sistema integrado. En la segunda fase, cada parte de la estructura debe ser monitoreada en tiempo real para optimizar la operación, ejecutar el mantenimiento planificado, establecer el mantenimiento diferido, identificar posibles mejoras, detectar problemas de protección y garantizar la salud y la seguridad de las personas (Rafsanjani & Nabizadeh, 2021).

---

<sup>36</sup> Fue el principal creador de la Geometría Fractal, al referirse al impacto de esta disciplina en la concepción e interpretación de los objetos que se encuentran en la naturaleza.

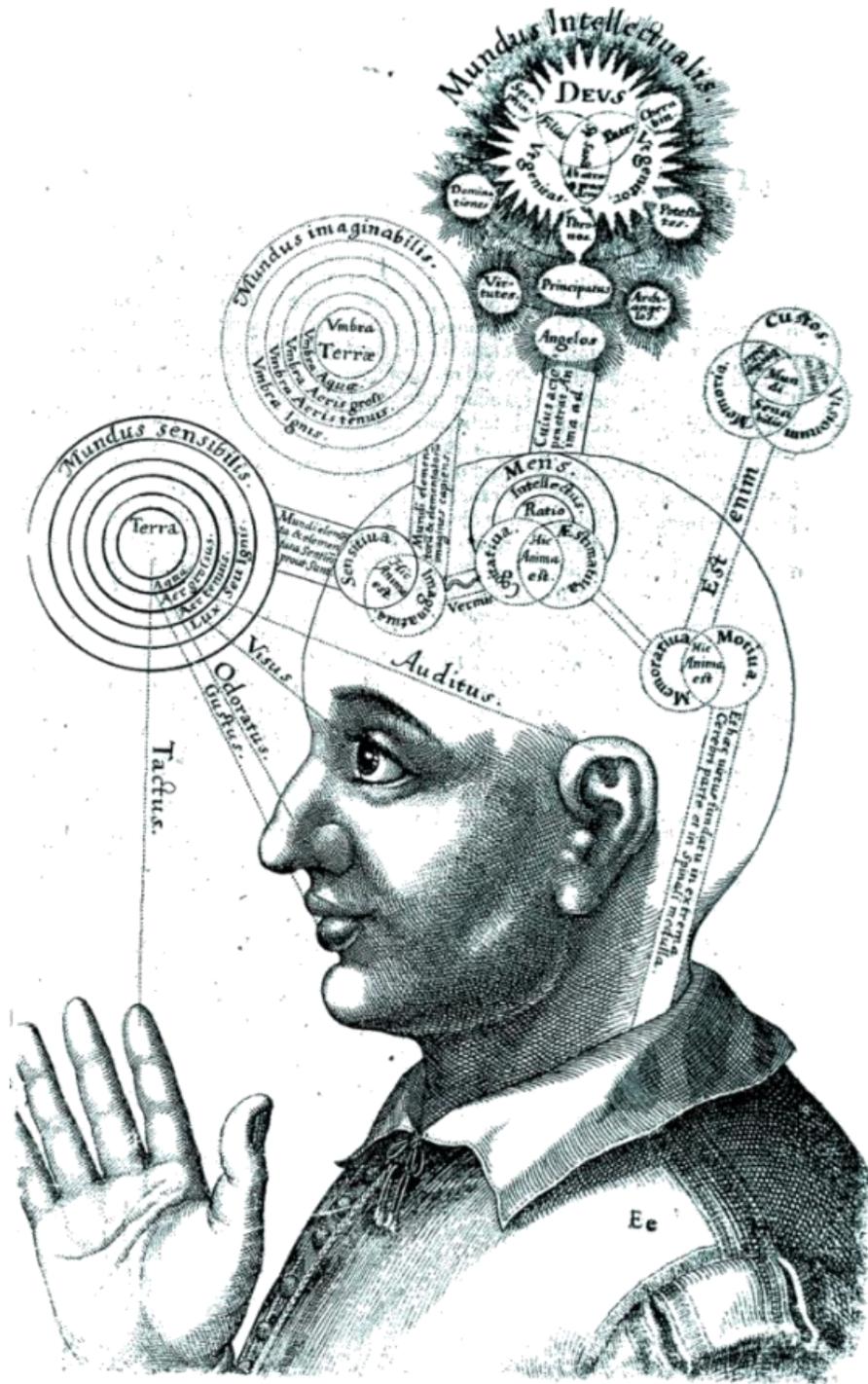


Ilustración 42. Representación del hombre y la percepción sensorial del mundo exterior.

Fuente: Robert Fludd en

[https://ca.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Fludd#/media/Fitxer:RobertFuddBewusstsein17Jh.png](https://ca.wikipedia.org/wiki/Robert_Fludd#/media/Fitxer:RobertFuddBewusstsein17Jh.png)

Para lograr la transformación digital de los puertos, es necesario fomentar la colaboración y el intercambio de información tanto dentro como fuera de la organización para tener una visión más holística. Además, se requiere contar con un plan y recursos adecuados para analizar la información de manera efectiva y permitir una adecuada toma de decisiones en tiempo y forma. En este sentido, la integración de Tecnologías de digitalización y gestión de datos es clave para asegurar la sostenibilidad y la resiliencia de la infraestructura marítimo-portuaria en el largo plazo.

Como se mencionó anteriormente, la visualización de la información como una herramienta valiosa en este proceso. En este sentido, vale la pena reflexionar la *Ilustración 42* de Robert Fludd, que representa la percepción sensorial del hombre del mundo exterior, que sirve como una analogía de cómo los puertos podrían utilizar Tecnologías de digitalización y gestión de datos para percibir y comprender mejor su entorno, y adaptarse a él de manera más efectiva.

## 2.2 Gemelo Digital: Origen y su aplicación actual

La revolución tecnológica actual, marcada por la integración de tecnologías inteligentes, digitales y basadas en IoT, ha propiciado una era de innovación conocida como Industria 4.0. Esta transformación ha extendido su influencia a diversas áreas, incluyendo la infraestructura marítimo-portuaria.

Donde, el concepto de Gemelo digital (GD) ha cobrado especial relevancia, pues promete optimizar procesos de diseño, control de calidad y toma de decisiones, favoreciendo así la eficiencia de los proyectos (**Botín-Sanabria et al., 2022**). En esta sección se revisarán los antecedentes de esta hasta su aplicación en la industria 4.0, donde el GD se han convertido en una herramienta valiosa en diversas industrias, pero para efectos de este trabajo centrándose en la infraestructura civil y con ello tener una visión completa de la evolución, definición, elementos fundamentales del GD.

### 2.2.1 Gemelo Digital: De la Crisis del Apolo 13 a la Industria 4.0

Como un hito importante en el desarrollo de los gemelos digitales, podemos referirnos a un incidente ocurrido en 1970 durante la misión Apolo 13 de la NASA. Apenas dos días después del lanzamiento, uno de los tanques de oxígeno de la nave explotó, poniendo en riesgo la misión y la vida de la tripulación (**Boschert & Rosen, 2016**).

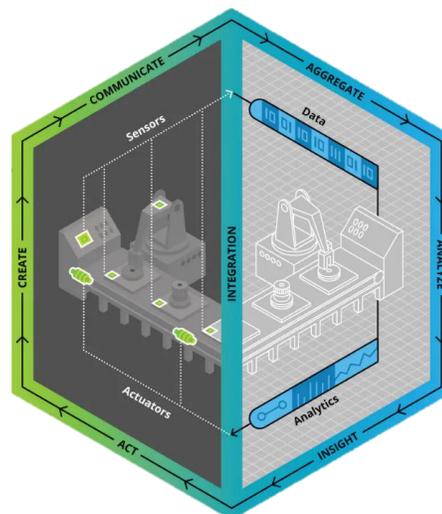
Ante este imprevisto, el equipo de control terrestre de la NASA, ubicado en Houston, recurrió a un enfoque innovador: crearon un modelo físico de la situación problemática en la Tierra. Mediante este modelo, pudieron simular y analizar la condición crítica en la que se encontraba la nave, lo que permitió desarrollar una solución viable utilizando solo los materiales disponibles a bordo de la nave espacial.

De esta manera, ingenieros en la Tierra llevaron a cabo pruebas y simulaciones para determinar el procedimiento más seguro y efectivo que permitiría al equipo del Apolo 13 regresar a salvo a la Tierra (Barricelli et al., 2019). Este hecho sentó un precedente relevante para la concepción y evolución del GD en años posteriores.

El término Gemelo Digital fue introducido de manera informal por Michael Grieves en 2002, durante una presentación sobre la gestión del ciclo de vida del producto, sin embargo, fue hasta 2014 que Grieves formalizó el concepto en su obra "Gemelo Digital: Excelencia en la Fabricación a través de la Replicación Virtual de Fábrica". En este trabajo, Grieves propone que un GD se compone de tres elementos principales (Trancossi et al., 2018):

1. Un entorno real que alberga un objeto físico.
2. Un entorno virtual que contiene un objeto digital.
3. Un enlace que permite el flujo bidireccional de datos entre los entornos real y virtual, posibilitando la convergencia y sincronización de ambos sistemas (Grieves, 2014).

A partir de esa introducción formal, el GD ha encontrado aplicaciones en diversas industrias, ver *Ilustración 43*, como la manufactura, salud, aeronáutica y aviación, energía, educación, agricultura, meteorología y automoción, etc (Sheuly et al., 2022). Sin embargo, en lo que respecta a los activos construidos de infraestructuras marítimas y portuarias, se encuentra notablemente rezagado en comparación con otros sectores (Pregolato, Gunner, Voyagaki, de Risi, et al., 2022).



*Ilustración 43. Proceso de manufactura industrial con un Gemelo Digital. Realidad a la izquierda y digital a la derecha. Fuente: Industry 4.0 and the digital twin en: Proceso de manufactura industrial con un Gemelo Digital.*

Tabla 3. Diferentes definiciones de un Gemelo Digital. Fuente: Elaboración propia con información de Digital twin Towards a meaningful framework

FUENTE	DEFINICIÓN
CAMBRIDGE CENTRE FOR DIGITAL BUILT BRITAIN	Un gemelo digital es una representación digital realista de algo físico
DASSAULT SYSTÈMES	Un "gemelo virtual" es una representación virtual de lo que se ha producido. Podemos comparar un gemelo virtual con su diseño de ingeniería para comprender mejor lo que se produjo frente a lo que se diseñó, estrechando el ciclo entre el diseño y la ejecución
DELOITTE	Un gemelo digital es una imagen digital casi en tiempo real de un objeto o proceso físico que ayuda a optimizar el rendimiento empresarial
GARTNER	Un gemelo digital es una representación digital de una entidad o sistema del mundo real. La implementación de un gemelo digital es un objeto o modelo de software encapsulado que refleja un objeto físico único, proceso, organización, persona u otra abstracción. Los datos de múltiples gemelos digitales se pueden agregar para una vista compuesta a través de una serie de entidades del mundo real, como una planta de energía o una ciudad, y sus procesos relacionados
GENERAL ELECTRIC	Un gemelo digital es un modelo vivo que impulsa un resultado comercial
IBM	Un gemelo digital es una representación virtual de un objeto físico o sistema a lo largo de su ciclo de vida, utilizando datos en tiempo real para permitir la comprensión, el aprendizaje y el razonamiento.
MICHAEL GRIEVES	El gemelo digital es un conjunto de construcciones de información virtual que describe completamente un producto físico fabricado potencial o real desde el nivel micro (nivel atómico) hasta el macro (nivel geométrico). En su forma óptima, cualquier información que se pueda obtener de la inspección de un producto fabricado físicamente se puede obtener de su gemelo digital
MICROSOFT	Un gemelo digital es un modelo virtual de un proceso, producto, activo de producción o servicio. Las máquinas y dispositivos habilitados para sensores y conectados a IoT, combinados con el aprendizaje automático y el análisis avanzado, se pueden usar para ver el estado del dispositivo en tiempo real. Cuando se combina con información de diseño 2D y 3D, un gemelo digital puede visualizar el mundo físico y proporcionar un método para simular resultados electrónicos, mecánicos y combinados del sistema
NASA	Un gemelo digital integra la simulación de ultra alta fidelidad con el sistema integrado de gestión de la salud del vehículo a bordo, el historial de mantenimiento y todos los datos históricos y de flota disponibles para reflejar la vida útil de su gemelo volador y permitir niveles sin precedentes de seguridad y fiabilidad
SIEMENS	Un gemelo digital es una representación virtual de un producto o proceso físico, utilizado para comprender y predecir las características de rendimiento de la contraparte física.

## 2.2.2 Gemelos Digitales: Definición y Elementos Esenciales

Debido a las diversas aplicaciones del GD en diferentes campos, se han propuesto numerosos conceptos según el campo de aplicación. En la *Tabla 3*, se presentan algunas definiciones de lo que es el GD (Thelen et al., 2022).

Particularmente y para efectos de este trabajo la propuesta como concepto de GD es el de “una representación virtual de un sistema físico que se actualiza a través del intercambio de información entre los sistemas físicos y virtuales” (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Siguiendo la concepción de un GD como Grieves en 2014, requiere los siguientes elementos para considerarse como tal (Pregnotato, Gunner, Voyagaki, de Risi, et al., 2022):

- 1) El objeto del mundo real
- 2) Su contraparte virtual
- 3) El "enlace" bidireccional entre los anteriores

El proceso y el método para desarrollar y obtener GD significa todo un reto, ya que puede desarrollarse en cualquier momento de la vida de un activo, claro es mejor implementarlos desde etapas tempranas, sin embargo, el “Institution of Engineering and Technology”, desarrolló el nivel de madurez que define los diferentes elementos y proporciona un marco de referencia que compone a un GD (Herries et al., 2019), ver *Tabla 4*.

*Tabla 4. Nivel de madurez de gemelos Digitales, principios y uso. Fuente: Elaboración propia con información de Digital twins for the built environment*

Madurez GD	Principios	Aplicación
0	Captura de la realidad. (ej.: Nube de puntos, drones, fotogrametría, o dibujos/bocetos)	Brownfield (infraestructura existente), levantamiento de lo construido.
1	Sistemas 2D o 3D (ej.: Objetos sin datos o BIM)	Diseño/optimización y coordinación de activos
2	Modelos con datos y metadatos (ejemplo: BIM, documentos, sistemas de gestión de datos)	BIM 4D/5D Diseño/Gestión de activos
3	Enriquecer con datos en tiempo real (ej.: Usar IoT, sensores)	Eficiencia de la operación
4	Integración e interacción bidireccional de datos	Ops. remotas e inmersivas Controlar lo físico desde lo digital
5	Operación y mantenimiento autónomos	Autosuficiencia con total transparencia

Por su parte, ARUP en 2019, presento un marco de referencia, ver *Tabla 5*, para articular qué es un GD, qué puede hacer y en qué puede convertirse, con el objetivo de evaluar el estado actual de los gemelos digitales en cinco niveles clave, donde se definen los niveles de las propiedades de la fidelidad de un GD. Donde se define la fidelidad como el nivel de detalle, las medidas, cálculos o especificaciones acercando el GD a la realidad.

*Tabla 5. Niveles de fidelidad de un Gemelo Digital. Fuente: Elaboración propia con información de Digital twin Towards a meaningful framework*

Concepto	Nivel	Descripción
<b>Fidelidad</b>	1	Baja precisión de detalle y puede considerarse como un modelo conceptual
	2	De bajo a medio rango de precisión y se puede utilizar para extraer mediciones
	3	Rango medio de precisión y se considera una representación confiable del mundo físico
	4	Alto nivel de precisión y pueden tomarse con certeza las medidas del modelo
	5	Alto grado de precisión y se puede utilizar toma de decisiones operativas críticas

Los GD en principio pueden parecer una réplica exacta de un objeto de la realidad, sin embargo, no son necesariamente representaciones realistas, sino que incluso pueden ser abstracciones de un activo físico. Por lo que no es necesario que el GD de por ejemplo una ciudad replique digitalmente cada parte de lo que lo compone, como un ladrillo o columna, etc. En otras palabras, al desarrollar un GD, este debe ser adecuados para el propósito que se requiere, y su nivel dependerá de su uso primordial, complejidad y conectividad, y posteriormente en valor (ARUP, 2019).

Otra manera de poder conceptualizar por niveles un GD, es el planteado para una ciudad inteligente. Se basa en una serie de seis capas de información y de esta manera recopilar datos de la ciudad y utilizarlos para realizar simulaciones sobre la optimización de la movilidad, el impacto de nuevos edificios o aplicación de enotecnias (White et al., 2021).

Es importante tener en cuenta que estos elementos no son necesariamente lineales o secuenciales, por lo que un GD puede poseer características de elementos de orden superior antes que los de orden inferior. Sin embargo, la complejidad se considera mejor al otorgarles un valor numérico, por lo que los elementos de orden superior son significativamente más complejos que los de orden inferior.



Capa 5. Capa virtual, donde se puede transmitirse información para generar simulaciones para resolver problemas o tomar acciones para nuevos proyectos.

Capa 4. La capa digital centrada en la integración de sensores IoT para recopilar datos para poder monitorear y administrar el tráfico y los sistemas de transporte, las centrales eléctricas, etc.

Capa 3. Capa que agrega movilidad a las capas de infraestructura y construcción. Esta puede ser flujo peatonal, bicicletas, autos o barcos.

Capa 2. Capa que suma la infraestructura existente de la ciudad como instalaciones físicas de redes públicas como agua o drenaje, las cuales básicas necesarias para el funcionamiento de una sociedad o empresa.

Capa 1. Esta capa agrega los edificios existentes en la ciudad al modelo, pueden ser muy básicos o de alta precisión (BIM) para usar como un gemelo digital del edificio.

Capa 0. Capa que representa el terreno sobre el que se construye, construyo o construirá una ciudad, aporta información como topografía, hidrografía, etc.

*Ilustración 44. Capas necesarias para desarrollar Gemelo Digital de una ciudad inteligente. Fuente: A Digital Twin Smart*

## 2.3 Avances y aplicaciones del Gemelo Digital en Infraestructura construida

En esta sección se explora cómo el GD, como resultado de la transformación digital, está siendo cada vez más utilizado en la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de infraestructura civil. Se revisan estudios de casos específicos en los que se ha implementado esta tecnología y se discuten las perspectivas futuras de la implementación del GD en la infraestructura portuaria de México, reconociendo los desafíos existentes, así como las potenciales áreas de oportunidad.

A pesar de que el uso de los GD en la infraestructura portuaria se encuentra aún en una etapa temprana, se destaca el creciente interés y la potencialidad de estos para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la infraestructura portuaria.

### 2.3.1 Adopción de Gemelos Digitales en la Infraestructura Construida

La adopción del GD en infraestructura construida ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, siendo un tema central en diversos estudios e investigaciones, donde se aborda su uso y las tecnologías clave en su implementación, así como sus beneficios en la toma de decisiones, reducción de riesgos y mejorar la eficiencia de los proyectos.

Evans et al., abordan de manera general las oportunidades, beneficios, desafíos y riesgos de implementar los gemelos digitales en infraestructura construida. Además, los autores mencionan algunas de las tecnologías y herramientas necesarias para generar un GD, como el escaneo láser, los modelos BIM, la nube de puntos, la realidad aumentada y la realidad virtual, señala que, dependiendo de la calidad y la cantidad de los datos recopilados, el GD afectaran la precisión y su utilidad (2019).

Boje et al. (2020a), presentan una revisión de estudios y desarrollos recientes en la creación del GD y proponen un marco conceptual para la creación de uno. Proponen un flujo de trabajo dividido en tres fases: adquisición y gestión de datos, integración y enriquecimiento de datos y diseño y ejecución del GD.

Rafsanjani y Nabizadeh (2021), abordan al GD revisando algunas de las tecnologías que son clave en su adopción y cómo estas pueden ayudar la toma de decisiones, planificación, construcción, operación y mantenimiento de los edificios y la infraestructura construida.

J. Zhao et al. (2022a) proponen un marco conceptual para la aplicación del GD, enfocado en la eficiencia y reducción los costos de operación y mantenimiento de edificios existentes. Dividido en seis etapas: identificación de los requerimientos de los usuarios, adquisición de datos, modelado y simulación, integración de sistemas, monitoreo y control en tiempo real, y mejora continua.

Mientras que, Thelen et al. (2022), se enfocan en la aplicación de los GD en entornos construidos, describiendo las tecnologías que permitirían la creación de GD, para mejorar la planificación, el diseño, la construcción, el mantenimiento y la operación de edificios e infraestructuras.

Por ejemplo, Ferré-Bigorra et al. (2022) mencionan que la infraestructura ya construida, sería uno de los principales beneficiados con esta tecnología, ya que pueden ayudar a mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos de operación. Al implementar el GD en la creación de modelos virtuales que imite la realidad física, permitirá una gestión más efectiva y sostenible.

Otros autores, como Gürdür Broo et al. (2022), revisan algunas tecnologías clave como BIM, el IoT, los sistemas de información geográfica (GIS), la nube y el análisis de datos. Destacando la importancia de tener un modelo de datos completo y detallado de la infraestructura, para generar un modelo con información precisa y poder usarlo como GD. En general, presentan una visión general de cómo se pueden utilizar las tecnologías de información y la gestión de datos para generar un GD.

De la mano de los artículos anteriormente citados, un ejemplo de lo que está sucediendo a nivel mundial referente a esta Tecnología, es el GD de la ciudad de Boston, es de acceso abierto y permite en lo referente a nuevos proyectos, poder revisar que cambios están sucediendo en la ciudad, así como revisar el proceso de todo el proyecto. Cuenta con una línea de tiempo que muestra fechas de hitos, documentos, eventos, imágenes y formularios para hacer comentarios públicos relacionados con el proyecto seleccionado.

En ese sentido el GD como tecnología emergente está adquiriendo gran relevancia, debido a su capacidad de mejorar la eficiencia y la efectividad de la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de los activos construidos y por construirse, permiten la integración de diferentes disciplinas y sistemas de información, de esta manera se aborda la colaboración y la comunicación entre distintas disciplinas que intervienen como los son la arquitectura e ingeniería.

Además, el uso del GD permite la implementación de simulaciones, tomando en cuenta diferentes escenarios y condiciones, lo que puede ayudar a predecir y prevenir posibles problemas que puedan presentarse durante la construcción, post construcción y la etapa operativa de la infraestructura en cuestión.

En este contexto, significan una oportunidad para mejorar la resiliencia, la eficiencia y la sostenibilidad de los activos a lo largo de todo su ciclo de vida y se espera que la demanda de gemelos digitales para la infraestructura construida siga creciendo a medida que las Tecnologías de la información y gestión de datos que se integran también en los procesos inherentes a la industria marítimo-portuaria.

### 2.3.2 Adopción de Gemelos Digitales en Infraestructura Marítimo-Portuaria

La infraestructura portuaria es una de las áreas en las que el GD se está utilizando cada vez más. Estos pueden ayudar en la planificación, diseño de puertos, identificación de áreas de congestión y la optimización de la eficiencia operativa. También se utilizan para el monitoreo, mantenimiento, reparación de estructuras portuarias y para la simulación de posibles eventos y accidentes. En consecuencia, existe un crecimiento exponencial en su uso aplicado a la infraestructura portuaria en el futuro cercano.

En ese sentido, la CEPAL (2019), en su informe sobre la digitalización de puertos, analiza el impacto de la digitalización y la implementación del GD en la gestión y operación de puertos. Además, el informe señala que la implementación de estos en la industria portuaria no solo tiene un impacto en la eficiencia y sostenibilidad de los puertos, sino que también puede tener un impacto positivo en la económico y social de la región donde se encuentren esos puertos.

Por su parte, Cumo (2021), presenta un estudio de caso de la implementación de un GD para la gestión de la infraestructura portuaria en la isla de Ventotene, Italia. El objetivo principal del caso de estudio fue demostrar cómo el uso de un GD podría mejorar la eficiencia y la seguridad en la gestión de la infraestructura Portuaria donde los resultados y beneficios de la aplicación de estos fue: la mejora de la eficiencia en la gestión de la infraestructura portuaria; Reducción de los tiempos de inactividad; Optimización de la capacidad de carga y Mejoras en la seguridad.

Brötzmann et al. (2022), abordan en el uso del GD específicamente en su uso para infraestructura portuaria. De acuerdo con los autores, además de su uso para la construcción de infraestructura, se puede implementar la simulación de diferentes escenarios para mejorar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad de la operación portuaria y de la cadena de suministro.

Además, el marco del 7° congreso Europeo de la International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, Agostinelli et al., (2022), examinaron el potencial de los gemelos digitales en la gestión de instalaciones portuarias. Donde el GD, a partir de modelos 3D de las instalaciones portuarias, permitirían la visualización y simulación de posibles escenarios de operación y mantenimiento. Con lo anterior pueden ayudar en la eficiencia y reducción de los costos asociados a la gestión y mantenimiento de la infraestructura marítimo-portuaria.

En general, para el sector portuario, los esfuerzos por el uso de gemelos Digitales se han centrado en la automatización y digitalización de los procesos de carga y descarga, la optimización de la gestión del tráfico de barcos y la mejora de la eficiencia energética derivada también de la operación de los puertos.

### 2.3.3 Perspectivas de la Implementación de Gemelos Digitales en la Infraestructura Portuaria de México

Si bien es cierto que, para la infraestructura construida, incluyendo la infraestructura marítimo-portuaria, se está empezando a adoptar cada vez más las Tecnologías de Información y gestión de datos, aún existe un amplio margen para la adopción de estas tecnologías y su uso integrado con herramientas emergentes como el GD.

En cuanto a la implementación del GD en la infraestructura portuaria de México, la información es escasa. No obstante, compañías internacionales como WSP y Hutchinson Ports han comenzado a implementar esta tecnología en sus labores de planificación, construcción y operaciones en infraestructuras portuarias de otros países. Esto sugiere que en el futuro cercano podría aumentar el interés por el uso del GD en el contexto de la infraestructura marítimo-portuaria mexicana.

Uno de los desafíos para la implementación de gemelos digitales en México es la falta de datos precisos y actualizados sobre la infraestructura existente. Estos datos son esenciales para la generación del GD y su uso en el siguiente paso, utilizar herramientas de simulación y análisis.

Además, la falta de inversión en tecnología y la resistencia cultural dentro de la industria pueden ser obstáculos para la adopción de estas tecnologías avanzadas. Vale la pena mencionar que en México existen iniciativas gubernamentales para fomentar la digitalización en este sector, como la estrategia de implementación del Modelado de Información de Construcción (MIC/BIM), que busca impulsar la transformación digital en la construcción y desarrollo de infraestructura.

El uso del GD en la infraestructura marítimo-portuaria e infraestructura en México, se puede decir que está en una fase temprana y existe un creciente interés en el uso de las tecnologías para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de ellas.

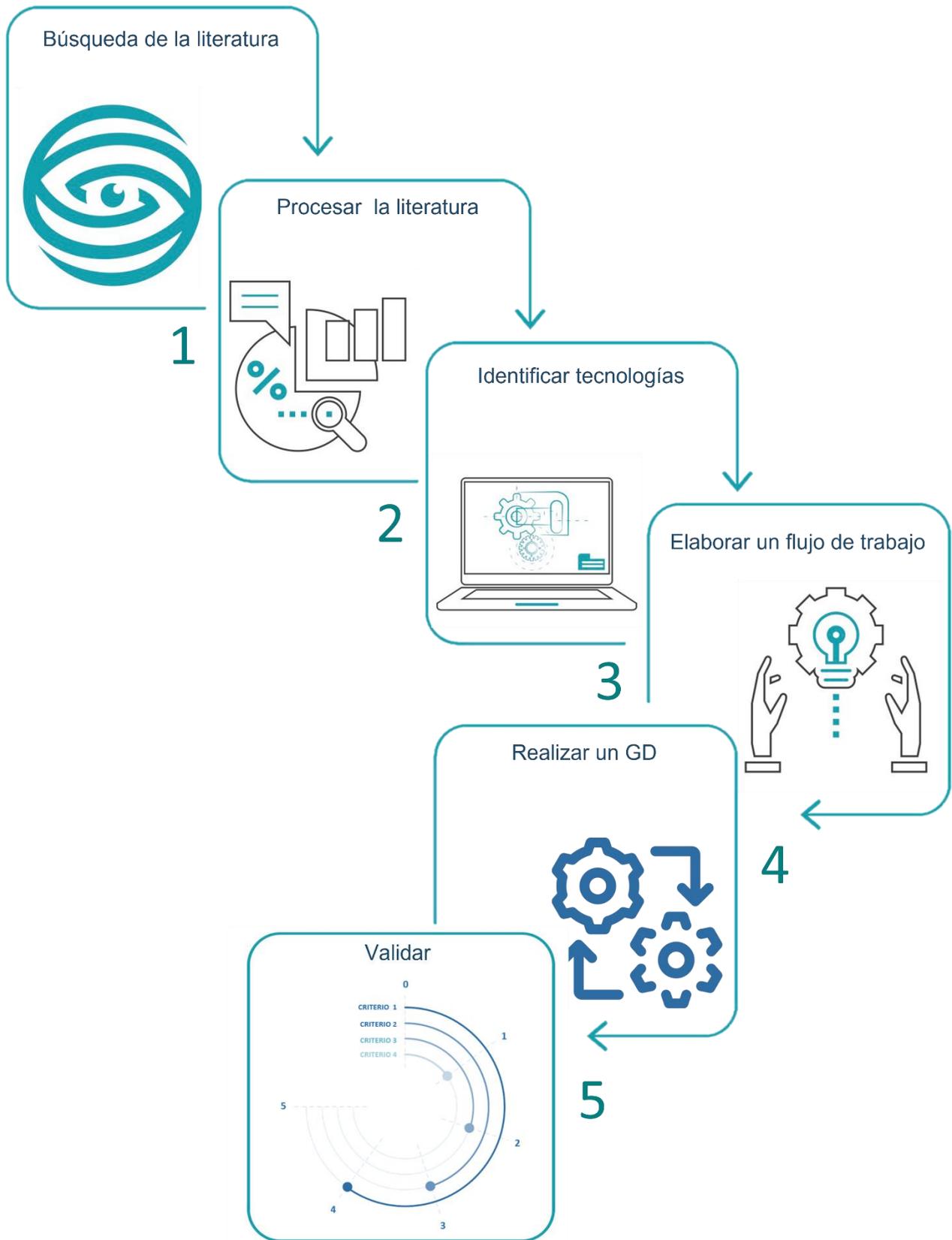


Ilustración 46. Proceso de investigación. Fuente: Elaboración propia.

### 3. CONSTRUYENDO EL GEMELO DIGITAL: ENFOQUE EXPLORATORIO EN LA IDENTIFICACIÓN Y USO DE TECNOLOGÍAS

---

Esta investigación tiene como objetivo examinar y sugerir el uso de diversas tecnologías aplicables a la generación del GD de activos existentes dentro de la infraestructura marítimo-portuaria. Según la literatura, este trabajo se clasifica como una investigación exploratoria, la cual se realiza cuando se busca examinar un tema o problema de investigación que ha sido poco estudiado previamente, con el fin de identificar áreas, entornos, contextos y situaciones de estudio, así como posibles relaciones entre variables (Sampieri, 2006).

Entonces, se toma como referencia el método de investigación en Ciencias del Diseño (Design Science Research Method DSRM), el cual se basa en un proceso de investigación organizado en 5 etapas (Carstensen & Bernhard, 2019):

1. Identificación de problemas observados
2. Definición de objetivos para una posible solución
3. Diseño y desarrollo
4. Demostración
5. Evaluación

En la primera etapa, se realizó una revisión bibliográfica basada en repositorios como, Scopus, Springer, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Science Direct, Institute of Electrical and Electronics Engineers, entre otros, junto con la revisión de manuales, guías e informes técnicos, para identificar en la literatura investigaciones previas sobre la adopción de del GD en infraestructura construida, sin considerar que sea específicamente para infraestructura marítimo-portuaria. Además, con esta revisión bibliográfica, se identificarán las tecnologías y métodos preliminares o para la construcción en un entorno virtual de infraestructura existente, entre otras tecnologías aplicadas para la generación del GD.

La segunda etapa, con base en los antecedentes reunidos, busca dar solución a uno de los objetivos de esta investigación, el uso de las tecnologías identificadas, para poder realizar la digitalización de la infraestructura existente para la mejora la gestión de activos construidos y de esa manera llenar los vacíos de información, permitiendo la elaboración de un GD que pueda ser funcional para integrar información para la solución de nuevos proyectos.

En la tercera etapa, se realizará el diseño y desarrollo de un método que conjunte una serie de tecnologías, identificadas en las etapas anteriores, para la reconstrucción de un modelo digital de una infraestructura marítimo-portuaria ya construida.

En la cuarta etapa, el método planeado se aplicará a un estudio de caso de una infraestructura portuaria, específicamente un muelle de cruceros, donde existe carencia de información (Modelos 3d, planos arquitectónicos, estructurales, memorias, informes sobre la construcción y sistemas estructurales utilizados). Parte de esta etapa considera que con los antecedentes y documentación que se recolecte, se obtenga información que sirva para la reconstrucción de un modelo digital con las tecnologías que se obtuvieron en la investigación.

Finalmente, en la quinta etapa, se validarán las Tecnologías utilizadas, se revisará la correcta integración del modelo realizado por medio estas, validando con una herramienta del método a partir de la revisión bibliográfica para identificar hasta que nivel se logró trabajar el GD.

### 3.1 Tecnologías para la creación del GD

Como se revisó en el marco teórico, el GD es una herramienta que surge del uso de un conjunto de tecnologías de la información y gestión de datos, mismos que están diversas industrias para mejorar la planificación, construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura civil y que puede ser utilizada en la industria portuaria y la ingeniería de costas. Sin embargo, no existe una única solución o plataforma utilizada para proporcionar un gemelo digital.

La creación de un GD es un proceso apoyado por las tecnologías que tenemos al alcance hoy en día. Es decir, que aprovechar la información y tecnologías existentes sumando la experiencia para gestionar y manipular de una variedad de datos para con ellos poder obtener el GD. Este GD puede variar desde un simple modelo 2D o 3D de un componente local, con un nivel básico de detalle, hasta un modelo totalmente integrado y altamente preciso de todo un activo o instalación, o incluso de todo un país, con cada componente vinculado dinámicamente a datos de la infraestructura construida. Las nuevas metodologías y tecnologías han permitido optimizar los flujos de trabajo a través de herramientas que permiten la colaboración y la integración de la información, mejorando los métodos tradicionales (Barazzetti et al., 2016).

A continuación, se revisan las Tecnologías que para efectos de este trabajo se consideran las que de manera más eficaz pueden ayudar a construir o generar un GD, las cuales se identifican como Tecnologías del Gemelo Digital (TDG).

#### Método de investigación de TGD

En esta sección se realizó una revisión sistemática de literatura centrada en investigaciones donde se mencionan las Tecnologías utilizadas en la adopción de los GDs en la AIC<sup>37</sup> (Ver Ilustración 47). Para evaluar y examinar la diversa literatura existentes, se adaptaron los métodos utilizados en “Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions” (Y. Lu et al., 2017), “Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications” (Liu et al., 2021), “Digital twin application in the construction industry: A literature review” (Opoku et al., 2022) y “Drivers for Digital Twin Adoption in the Construction Industry: A Systematic Literature Review” (Opoku et al., 2022).

#### Identificación y Selección de Fuentes Bibliográficas de TGD

Como primera etapa, se realizó una búsqueda de empleando los motores de búsqueda de Scopus y ScienceDirect, los cuales son dos bases de datos bibliográficas que proporcionan acceso a una amplia gama de revistas científicas, artículos, libros y otras publicaciones académicas.

Para obtener una variedad de artículos, se realizó una búsqueda booleana, en idioma inglés, con los siguientes parámetros: (“Digital Twin” OR “Digital Twins”) AND (“AEC” OR “Architecture, Engineering and Costruction”) AND (“Technologies” OR “Technology”), sin establecer fechas como parámetro, sin embargo, con esa búsqueda se detectó que las primeras publicaciones que abarcan la relación de esos términos y que son importantes para esta investigación datan de 2019 en adelante.

---

<sup>37</sup> AIC, acrónimo para identificar tres especialidades: Arquitectura, Ingeniería y Construcción.

De las publicaciones encontradas, solamente los artículos de revisión y los artículos de investigación se seleccionaron ya que los primeros ofrecen una síntesis crítica de la literatura existente, mientras que los segundos describen artículos que pueden contener un informe detallado de un estudio original realizado por los autores. Se obtuvieron 81 resultados, donde 68 pertenecen a ScienceDirect y 13 en Scopus.

### Selección y Análisis de Publicaciones Relevantes sobre Tecnologías de GDs

En la segunda etapa, se realizó una revisión más detallada para identificar y seleccionar las publicaciones más apropiadas para esta investigación tomando en cuentas que la publicación se referían a la adopción de Gemelos Digitales de infraestructura civil y además se mencionaran o hicieran referencia a Tecnologías para la generación de estos, para garantizar que solo las publicaciones que se centraron en la adopción de GDs en la infraestructura civil construida se aborden en este trabajo de investigación.

Después de eliminar publicaciones duplicadas, como resultado, se identificaron 31 publicaciones en 10 revistas relevantes, para realizar un análisis detallado de las Tecnologías con la cuales se realizar los GDs hoy en día. El número de artículos seleccionados, así como las publicaciones finales pertinentes, se proporcionan en la Tabla 6 .

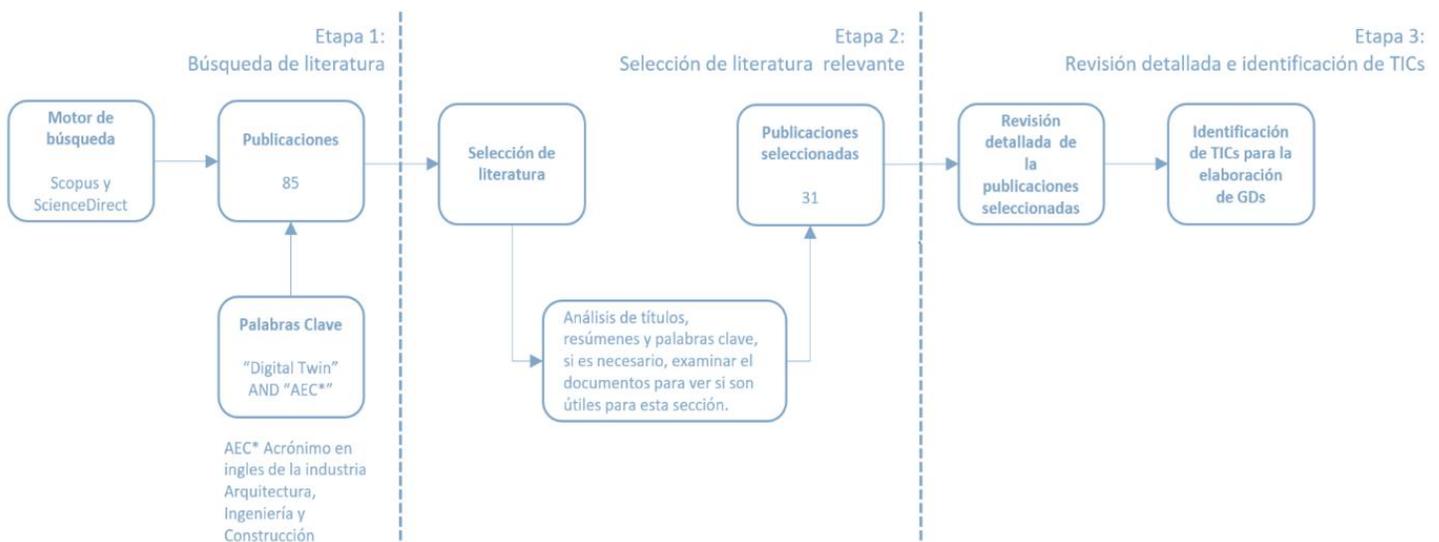


Ilustración 47. Método de selección de literatura relevante para la investigación. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Resultados de la búsqueda de publicaciones relevantes para esta investigación. Fuente: Elaboración propia.

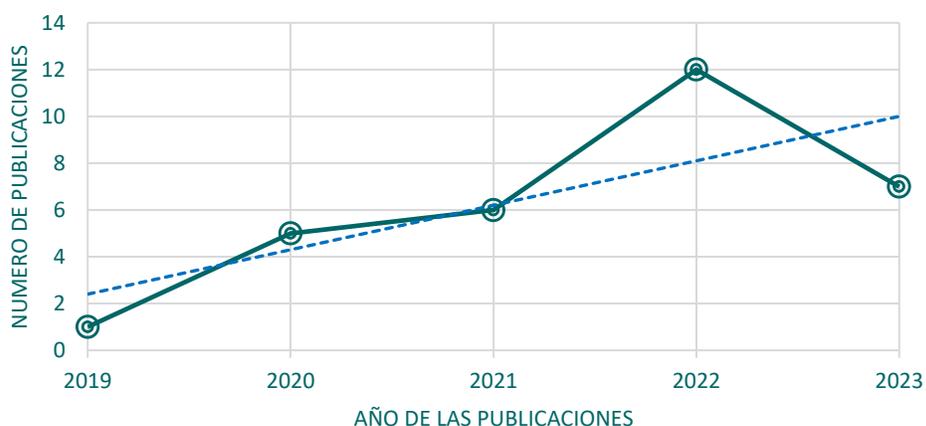
#	Revista	Cant.	Referencias
1	Applied Sciences (Switzerland)	1	(Sepasgozar, 2020)
2	Automation in Construction	19	(Agrawal et al., 2023; Boje et al., 2020b; Edwards et al., 2023; Honghong et al., 2023; Huang et al., 2023; L. Jiang et al., 2023; Q. Lu et al., 2020; Moyano, Carreño, et al., 2022; Moyano et al., 2021; Naderi & Shojaei, 2023; Pan et al., 2022; Pan & Zhang, 2020; Potseluyko et al., 2022; Pregnotato, Gunner, Voyagaki, De Risi, et al., 2022; Song et al., 2022; B. Wang et al., 2022; Y.-G. Wang et al., 2022; Xie et al., 2023; Y. Zheng et al., 2021)
3	Building and Environment	1	(Lim et al., 2021)
4	Buildings	2	(Carrasco et al., 2022; Nour El-Din et al., 2022)
5	Construction Innovation	1	(Bosch-Sijtsema et al., 2021)
6	Developments in the Built Environment	1	(Sacks et al., 2020)
7	Energy and Buildings	2	(Arsiwala et al., 2023a; Lydon et al., 2019)
8	Energy and Built Environment	1	(Rafsanjani & Nabizadeh, 2023)
9	IEEE Access	1	(Naderi & Shojaei, 2022)
10	Journal of Building Engineering	1	(J. Zhao et al., 2022b)
11	Journal of Information Technology in Construction	1	(Deng et al., 2021)

## Análisis Descriptivo y Determinación de TGD

Tras identificar los artículos relevantes, para esta sección de la investigación, se realizó el análisis descriptivo para encontrar las Tecnologías usadas o mencionadas en los artículos seleccionados. Usando métodos como el conteo de frecuencia<sup>38</sup> y el porcentaje<sup>39</sup>, que, en conjunto, son técnicas útiles de análisis de datos que se utilizan comúnmente en la investigación para identificar patrones y tendencias, para este caso, referentes a las utilizadas para la generación de GDs.

### Tendencia anual de publicaciones del uso de TGD en la industria AIC

La *Figura 1* muestra el aumento constante en el número de publicaciones sobre el tema a partir del 2019, con un pico de 14 publicaciones en 2022. Mostrando un creciente interés en la adopción de GDs y el interés por el uso de Tecnologías para la generación de estos. Además, en lo que va del primer bimestre del 2023, ya se cuenta con 8 publicaciones. Lo anterior es un indicador de que los investigadores y profesionales han reconocido la capacidad de los GDs para resolver algunos de los desafíos que enfrenta las actividades relacionadas con la AIC.



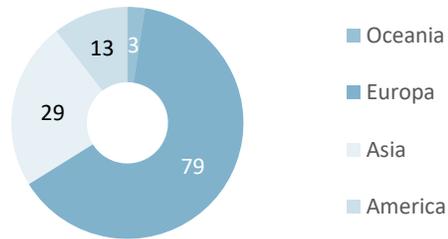
*Figura 1* Tendencia anual de publicaciones del uso de TGD en la AIC. Fuente: Elaboración propia

<sup>38</sup> El método de conteo de frecuencia es una técnica de análisis de datos que cuenta el número de veces que ocurre un evento o se utiliza una palabra o término en un conjunto de datos. En el contexto de la investigación, este método se utiliza para identificar las palabras o términos más comunes en un conjunto de datos, lo que puede proporcionar información útil sobre los temas o problemas centrales abordados en los datos (Lavrakas, 2008).

<sup>39</sup> El porcentaje es una medida de proporción que indica la relación entre una cantidad y el total del conjunto de datos. En la investigación, el porcentaje se utiliza para expresar la frecuencia de un evento o término como una proporción del total de eventos o términos en el conjunto de datos (Lavrakas, 2008).

### Perspectiva Internacional en la adopción del GD en la AIC

Como parte de la información recabada, se identificaron los países y regiones que están activamente involucrados en la investigación de Tecnologías y adopción de GDs. Para recabar esta información se tomó en cuenta la universidad de cada uno de los autores revisados. De las 31 publicaciones consultadas tuvieron la participación de 124 profesionales e investigadores del tema. Como se muestra en la *Figura 2*, en su mayoría, las publicaciones fueron realizadas por universidades o grupos de trabajo se centraron en países europeos.



*Figura 2. Número de investigadores por región. Fuente: Elaboración propia.*

De las 31 publicaciones consultadas, las universidades o centros de trabajos para a los cuales se encuentran afiliados los investigadores, que en total son 124, abarcan veinte países, que incluyen a países desarrollados y países en desarrollo, ver *Figura 3*.



*Figura 3. Países de afiliación de los investigadores de las publicaciones consultadas. Fuente: Elaboración propia.*

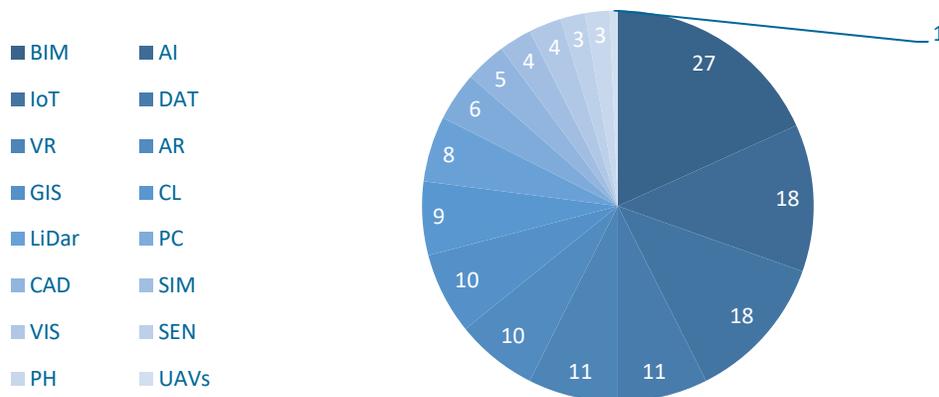
La mayoría de las publicaciones, un 80%, provienen de universidades en países desarrollados y el resto, un 20%, provienen de países en vías de desarrollo. Además, la mayoría de los países desarrollados, como el Reino Unido, Estados Unidos, España, cuentan con el mayor número de investigadores que están interesados en el uso de las Tecnologías en la adopción de GDs para infraestructura civil. Por su parte, en países en desarrollo, China es la que más ha contribuido en investigaciones sobre el uso estas tecnologías para la adopción de GDs de entornos construidos.

Lo anterior nos da un contexto, los recursos y las perspectivas de los investigadores. Cada país tiene su propia cultura económica y social, política y empresarial, lo que puede afectar la manera en que se implementación de estas en su uso en la adopción de GDs, en un contexto específico.

### 3.2 Identificación y función de Tecnologías en la creación de GD

La identificación de estas tecnologías es fundamental para entender su función y poder elaborar un flujo de trabajo para generar los GDs. Las Tecnologías identificadas en orden de aparición, tomando en cuenta que se dio lectura en orden por el año de publicación, fueron: Simulación (SIM), Visualización (VIS), Modelado de información de la Construcción (BIM), Análisis de datos (DAT), Realidad Virtual (VR), Realidad Aumentada (AR), Inteligencia Artificial (AI), Internet de las Cosas (IoT), Sensores (SEN), La Nube (CL), Dibujo Asistido por Computadora (CAD), Fotogrametría (PH), Vehículo aéreo no tripulados (UAVs), Nube de puntos (PC), Láser de detección de imágenes y alcance (LiDar) y Sistema de Información Geográfica (GIS).

En la *Figura 4* se muestra un resumen de las Tecnologías y en cuanto a las publicaciones de la seleccionadas fueron mencionadas y en *Tabla 7* se muestran las que se identificaron en cada una de las publicaciones relevantes.



*Figura 4. Publicaciones en la que se mencionan la Tecnología. Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 7. Tecnologías identificadas por publicación relevante. Fuente: Elaboración propia.

#	Referencia	SIM	VIS	BIM	DAT	VR	AR	AI	IoT	SEN	CL	CAD	PH	UAVs	PC	LiDar	GIS
1	(Lydon et al., 2019)	✓		✓	✓												
2	(Sepasgozar, 2020)	✓	✓	✓	✓	✓	✓										
3	(Pan & Zhang, 2020)				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						
4	(Q. Lu et al., 2020)			✓								✓	✓				
5	(Boje et al., 2020a)			✓		✓	✓	✓	✓								
6	(Sacks et al., 2020)			✓			✓	✓	✓		✓						
7	(Y. Zheng et al., 2021)			✓	✓			✓	✓								
8	(Moyano et al., 2021)		✓	✓				✓									
9	(Lim et al., 2021)			✓													
10	(Bosch-Sijtsema et al., 2021)																
11	(Deng et al., 2021)	✓		✓				✓	✓								
12	(Rafsanjani & Nabizadeh, 2021)			✓	✓	✓	✓	✓	✓						✓	✓	✓
13	(Song et al., 2022)			✓				✓						✓		✓	
14	(Pan et al., 2022)				✓								✓		✓	✓	
15	(Potseluyko et al., 2022)			✓		✓						✓					
16	(L. Jiang et al., 2023)				✓			✓	✓	✓							✓
17	(B. Wang et al., 2022)			✓											✓	✓	
18	(Moyano, Carreño, et al., 2022)			✓			✓								✓	✓	✓
19	(Pregolato, Gunner, Voyagaki, De Risi, et al., 2022)			✓					✓							✓	✓
20	(Y.-G. Wang et al., 2022)			✓		✓										✓	
21	(Nour El-Din et al., 2022)			✓	✓			✓	✓		✓						
22	(Carrasco et al., 2022)			✓		✓	✓				✓	✓					✓
23	(Naderi & Shojaei, 2022b)	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
24	(J. Zhao et al., 2022a)		✓	✓		✓			✓		✓	✓					
25	(Huang et al., 2023)			✓	✓			✓	✓						✓		✓
26	(Edwards et al., 2023)			✓		✓	✓	✓	✓								✓
27	(Xie et al., 2023)			✓	✓			✓	✓								
28	(Honghong et al., 2023)			✓			✓	✓	✓		✓						
29	(Agrawal et al., 2023)			✓	✓			✓	✓								
30	(Naderi & Shojaei, 2023)			✓		✓		✓	✓								✓
31	(Sheuly et al., 2022)			✓				✓	✓		✓						✓

Una vez identificadas, se resalta que, muchas de ellas de acuerdo con sus funciones, se pueden agrupar según las herramientas (Software y Hardware) necesarias para su aplicación en la generación de GDs. El propósito de agruparlas o consolidación de ellas, comprender mejor cada una de ellas.

Partiendo de usar la lógica codificada, la cual para esta investigación consistió en identificar relaciones entre las Tecnologías identificadas y poder agruparlas. Una agrupación de Tecnologías aplicadas a la infraestructura construida, de acuerdo con diversos autores (Arsiwala et al., 2023b; Qi et al., 2021; Sheuly et al., 2022), es la siguiente: Herramientas de modelado y diseño (HMD); Herramientas de simulación y visualización (HSV); Herramientas de recopilación y análisis de datos (HRA); Herramientas de almacenamiento de datos, aprendizaje automático e Inteligencia artificial (HAAIA).

Además, para evaluar la importancia relativa a los diferentes grupos de Tecnologías que están impulsando la adopción GDs, se utilizó el Análisis de Clasificación Promedio. En este análisis, se le asigna a cada elemento de un grupo un puntaje o una clasificación en función de una métrica específica, para este caso la frecuencia con la que aparecieron en la literatura relevante revisada, permitiendo identificar las más relevantes para esta y futuras investigaciones.

En la *Formula 1*, se muestra el Análisis de Clasificación Promedio para cada grupo y las Tecnologías que los integran y también gráficamente en la *Figura 5*. Para obtener los resultados se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$Media = \frac{\Sigma(f_{Hx})}{N}$$

*Formula 1. Análisis de Clasificación Promedio*

Donde  $\Sigma(f_{Hx})$ , es la frecuencia total de apariciones de las Tecnologías de un grupo;  $N$  es el total de las Tecnologías encontradas, por ejemplo, para el caso de las Herramientas de modelado y diseño (HMD) el resultado es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 Media &= \frac{\Sigma(f_{HMD})}{N} = \\
 &= \frac{\Sigma(hdm1 + hdm2 + \dots + hdm6)}{16} = \\
 &= \frac{(27 + 8 + 6 + 5 + 3 + 1)}{16} = \\
 &Media = 3.12
 \end{aligned}$$

Tabla 8. Clasificación de la agrupación de tecnologías utilizados para la adopción de GDs en infraestructura construida. Fuente: Elaboración propia.

Grupo	Código	TICs	Frecuencia	Media	Clasificación
	<b>HMD</b>			<b>3.12</b>	<b>1°</b>
Herramientas de modelado y diseño	hdm1	BIM	27	-	
	hdm2	LiDAR	8	-	
	hdm3	PC	6	-	
	hdm4	CAD	5	-	
	hdm5	PH	3	-	
	hdm6	UAVs	1	-	
	<b>HRA</b>			<b>2.62</b>	<b>2°</b>
Herramientas de recopilación y análisis de datos	hra1	IoT	18	-	
	hra2	DAT	11	-	
	hra3	GIS	10	-	
	hra4	SEN	3	-	
	<b>HSV</b>			<b>1.88</b>	<b>3°</b>
Herramientas de simulación y visualización	hsv1	VR	11	-	
	hsv2	AR	11	-	
	hsv3	SIM	4	-	
	hsv4	VIS	4	-	
	<b>HAAIA</b>			<b>1.69</b>	<b>4°</b>
Herramientas de almacenamiento de datos, aprendizaje automático e Inteligencia artificial	haaia1	AI	18	-	
	haaia2	CL	9	-	

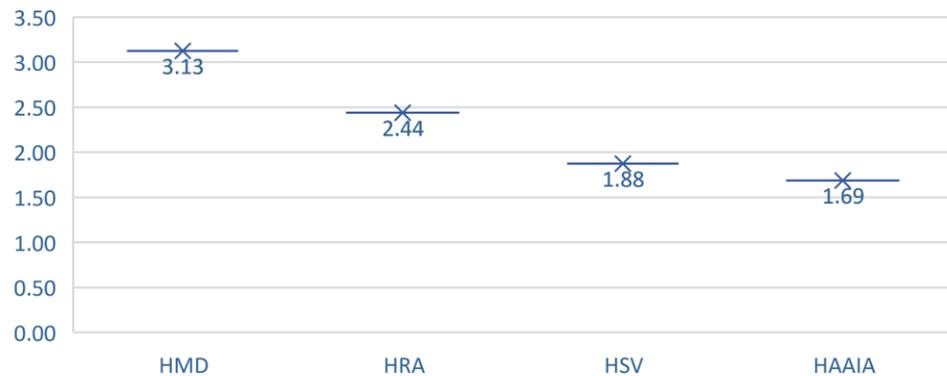


Figura 5. Representación gráfica de la media de los grupos de Tecnologías. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Herramientas de modelado y diseño (HMD)

El empleo de HMD en el ámbito AIC ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, evidenciando su eficacia en sectores como la AIC y la infraestructura portuaria (K. Wang et al., 2022), posibilitan la generación de modelos precisos de infraestructura civil y su del ciclo de vida: planificación, diseño, construcción y mantenimiento. Además, facilitan la elaboración de representaciones digitales detalladas de la infraestructura civil, que constituyen la base para la creación de gemelos digitales.

Dichos modelos se derivan de la recopilación de datos provenientes de planos, dibujos, imágenes y otras fuentes relevantes. A continuación, se exponen algunas de las herramientas de modelado y diseño predominantes en la generación de gemelos digitales, conforme a la literatura pertinente y clasificadas en función de su relevancia de aplicación según la *Tabla 8*, además, debido a la relación que tienen las Tecnologías, que para efectos de este trabajo se clasificaron en dos grandes grupos: Building Information Modeling (BIM) y Percepción remota.

#### 3.3.1 Building Information Modeling (BIM)

BIM es una metodología que permite modelar, visualizar y analizar información relevante sobre un proyecto de construcción en un entorno digital. En el contexto de los gemelos digitales, BIM es fundamental para crear representaciones de la infraestructura civil física en el mundo virtual, permiten mejorar la toma de decisiones, predecir y optimizar el desempeño de las construcciones, reducir costos y riesgos asociados a los proyectos (Boje et al., 2020b).

Es importante recalcar que BIM, como una metodología, conjunta una serie de procesos, técnicas y herramientas que se aplican de manera sistemática para abordar la gestión de información a lo largo de todo el ciclo de vida de un proyecto, no se limita a un software o una tecnología específica, sino que es una forma de abordar y organizar la información relacionada con el diseño, construcción, operación y mantenimiento de un bien construido.

Con su enfoque integral y estructurado, BIM se posiciona como una herramienta esencial para la AIC, en el ámbito académico y profesional, consolidándose como una metodología fundamental que integra un enfoque multidisciplinario.

Esta metodología aborda aspectos clave del ciclo de vida de un proyecto, tales como el modelado tridimensional, la colaboración interdisciplinaria, la gestión eficaz de la información y la sinergia con tecnologías complementarias, de acuerdo con diversos autores (Azhar, 2011; Eastman et al., 2011; Musarat et al., 2023; Succar & Kassem, 2015; Volk et al., 2014), la metodología BIM incluye:

**Modelado (M):** Creación de representaciones digitales precisas y detalladas de los componentes de un proyecto, facilitando la visualización y análisis de la estructura.

**Colaboración (C):** Permite que todos los actores involucrados en un proyecto trabajen de forma coordinada y compartan información en tiempo real, lo que resulta en una mayor eficiencia y reducción de errores y conflictos.

**Gestión de la información (G):** Almacena y gestiona toda la información relevante del proyecto en un único modelo, incluyendo datos técnicos, de diseño, costos, programación y otros aspectos relevantes.

**Simulaciones y análisis (S):** Con la información almacenada en el modelo, se pueden realizar diversas simulaciones y análisis para evaluar el desempeño de la edificación, optimizar el uso de recursos y prevenir problemas futuros.

**Integración con otras tecnologías (I):** BIM se integra con otras herramientas y tecnologías, como sistemas de análisis de energía, software de análisis estructural y tecnologías de realidad virtual y aumentada, entre otros.

Si bien BIM no se considera un software en sí mismo, es fundamental reconocer que se requiere de herramientas tecnológicas especializadas para llevar a cabo el proceso de modelado de información de construcción de manera efectiva. El software es una pieza clave en el proceso, pero es importante entender que este solo complementa y soporta la metodología BIM. En otras palabras, el software es una herramienta útil para la implementación de BIM, pero no es la única pieza fundamental del proceso.

### 3.3.2 Software BIM

La implementación efectiva de la metodología BIM en la AIC depende en gran medida de la selección del software adecuado, es necesario considerar factores específicos del proyecto, tales como el tipo de proyecto, el tamaño del equipo y el nivel de complejidad requerido para los procesos de modelado y colaboración. Además, el software seleccionado debe ser capaz de integrarse con otras herramientas y plataformas utilizadas por diferentes partes interesadas involucradas en el proyecto.

Para llevar a cabo BIM y la transformación digital en la AIC, se requieren herramientas efectivas, las cuales están siendo utilizadas por los profesionales de la construcción para gestionar la información de los proyectos. De 2010 a 2020, se ha producido un cambio significativo en el uso de herramientas de diseño y dibujo asistido por computadora (CAD), pasando de herramientas 2D como AutoCAD a herramientas 3D como Revit y ArchiCAD, siendo estas últimas las más populares (Bain, 2020).

Aplicar BIM involucrará múltiples herramientas para diferentes usos y las soluciones BIM se pueden clasificar las soluciones BIM en (Sacks et al., 2018); Herramienta BIM: Aplicaciones específicas que generan, estructuran y gestionan información de diseño, como renderizado, análisis energético y estimación de costos, etc.; Plataforma BIM: Generador central de información BIM que mantiene la integridad de un modelo paramétrico y basado en objetos, alberga información de varias herramientas BIM y requiere capacidades de interoperabilidad; Entorno BIM: Conjunto de aplicaciones BIM interconectadas que admiten múltiples flujos de información y procesos en un proyecto, organización o sector de construcción local.

BIM surgió principalmente de la capacidad de transferir información e interacción o interoperabilidad de diferentes herramientas de software utilizadas en la AIC (Utkucu & Sözer, 2020). Esta última se refiere a la capacidad de que exista un entorno a partir de uso de diferentes herramientas y plataformas de software para comunicarse, intercambiar y utilizar efectivamente la información del modelo a lo largo de todo el ciclo de vida de un proyecto, permite la colaboración efectiva entre equipos multidisciplinarios y la integración de procesos y datos de diversas fuentes. Industry Foundation Classes (IFC), Construction Operation Building information Exchange (COBie) y BIM Collaboration Format (BCF) constituyen estándares de interoperabilidad BIM empleados en la industria AIC.

IFC ofrece un formato abierto y neutral que posibilita la transferencia de información entre aplicaciones BIM, estableciendo un marco unificado de clases y atributos para representar componentes constructivos (Shehzad et al., 2021). COBie con base en hojas de cálculo, promueve el intercambio de datos de construcción y mantenimiento a lo largo de las distintas etapas del ciclo de vida del edificio (Matarneh et al., 2022). BCF, facilita la colaboración en la coordinación y revisión de modelos BIM, permitiendo el seguimiento y la comunicación de problemas, observaciones y comentarios entre aplicaciones y equipos involucrados en el proyecto (van Berlo & Krijnen, 2014).

En la *Tabla 9*, se presentan las plataformas BIM existentes, así como su relación con los aspectos clave, interoperabilidad, así como el tipo de licencia.

Tabla 9. Plataformas BIM en el mercado. Fuente: Elaboración propia.

Plataforma BIM		M	C	G	S	I	Interoperabilidad			Licencia			
							IFC	COBie	BCF	Tipo	Costo	Tiempo	
ACCA	Edificius	✓	✓	✓		✓				C*	\$1,586.75	Mes	
AUTODESK	Revit	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		C*	\$2,920.33	Mes	
BENTLEY	MicroStation	✓	✓*	✓		✓	✓*			C	\$3,295.08	Mes	
	SYNCHRO 4D		✓*	✓	✓	✓	✓*	✓*		C	\$6,606.67	Mes	
	Bentley LumenRT				✓	✓	✓*	✓*		C	\$2,814.44	Mes	
BLENDER	Blender BIM	✓	✓*	✓*	✓*	✓		✓		O	\$ -	Mes	
Nemetschek	ALLPLAN	Basic	✓							C	\$2,200.02	Mes	
		Architecture	✓		✓					C	\$3,864.90	Mes	
		Engineering	✓		✓		✓			C	\$4,915.36	Mes	
		AEC	✓	✓	✓	✓*	✓	✓		C	\$6,600.06	Mes	
	ARCHICAD	ARCHICAD (SOLO)	✓			✓	✓	✓	✓		C*	\$1,563.00	Mes
		ARCHICAD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		C*	\$3,125.00	Mes
		COLLABORATE (incluye BIMcloud)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		C*	\$3,125.00	Mes
VW	Vectorworks suite	✓	✓	✓		✓	✓	✓		C*	\$3,270.30	Mes	
TRIMBLE	SKECTHUP STUDIO	✓	✓*	✓*	✓*	✓	✓			C	\$1,154.52	Mes	
	TRIMBLE Connect		✓	✓	✓*	✓	✓*	✓*		C	\$ 474.69	Mes	
	TEKLA	✓	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓*	C**	\$ -	Mes	

✓\* Dependen de otras aplicaciones en conjunto.

C\* Cuenta con licencias para estudiantes.

O Código Abierto.

C\*\* Varias opciones de precios de acuerdo con el valor del proyecto o los ingresos brutos anuales.

La tecnología BIM es crucial para la generación de gemelos digitales, ya que permite tener modelos digitales, visualizar y analizar información de infraestructura construida en entornos digitales, facilitando la representación virtual de ellas, es decir, el objeto real.

### 3.3.3 Percepción remota

La obtención de modelos tridimensionales precisos es fundamental para tener una representación la infraestructura existente. La llegada de nuevas tecnologías ha simplificado la captura de datos cada vez son más económicos (Moyano, Justo-Estebarez, et al., 2022) y permiten la integración de esa información en un entorno BIM, es ahí donde el papel de la percepción remota se vuelve imprescindible.

La percepción remota es la ciencia y el uso de la tecnología para obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por dispositivos remotos, como satélites, aviones, drones, tecnología móvil inteligente, entre muchos otros, pero lo más importante es que no requieren el contacto directo con el objeto (Booyesen et al., 2021).

En la AIC, la percepción remota se refiere al uso de tecnologías, como la fotogrametría o el Light Detection and Ranging (LiDAR), para recopilar información sobre objetos y entornos físicos sin la necesidad de contacto directo. Estos datos se pueden utilizar para crear modelos tridimensionales precisos de edificios, terrenos y otras estructuras para su uso en el diseño, construcción y mantenimiento de la infraestructura. Además, la percepción remota también puede utilizarse para la inspección y monitoreo de estructuras existentes para detectar cambios y desgaste en su condición con el tiempo.

Además, la fotogrametría y LiDAR son técnicas de recolección de información y permiten disminuir la repetición en procesos propios del levantamiento de información convencionales. Las principales ventajas de estas tecnologías se caracterizan por una alta precisión geométrica y mediciones muy rápidas en comparación con los métodos tradicionales (geodésicos ópticos, satelitales, etc.).

Estas técnicas pueden llevarse a cabo de forma rápida y controlada facilitando el manejo de la información de las condiciones de la infraestructura, el mantenimiento de registros actualizados del sitio de construcción, la detección de errores constructivos, la evaluación de cambios temporales y la generación de documentación “Como Construido” (Rocha et al., 2020), particularmente relevante en infraestructura existente.

En ese contexto como parte del crecimiento del uso de la metodología BIM, existen un esfuerzo en hacer el uso de técnicas de detección y medición como Light Detection and Ranging (LiDAR) o la fotogrametría para modelar objetos y espacios de infraestructura construida en un entorno BIM.

### 3.3.4 Fotogrametría

La fotogrametría, se refiere al conjunto de metodologías y técnicas científico-tecnológicas empleadas para adquirir información precisa y fiable de objetos físicos y su entorno (Ebert, 2015), permitiendo obtener representaciones digitales de objetos utilizando herramientas que permiten la captura a partir del uso de fotografías, utilizando software especializado, se obtiene una nube de puntos (Souto-Vidal et al., 2015).

El procesamiento de información fotogramétrica para crear un modelo 3D implica varios pasos (Apollonio et al., 2021; Deligiorgi et al., 2021; Dhanda et al., 2019; Fritsch & Klein, 2018; Rahaman & Champion, 2019), se puede resumir de la siguiente manera:

Tabla 10. Elaboración de modelos 3D con fotogrametría. Fuente: Elaboración propia

Proceso	Fotogrametría				
	(Rahaman & Champion, 2019)	(Apollonio et al., 2021)	(Fritsch & Klein, 2018)	(Dhanda et al., 2019)	(Deligiorgi et al., 2021)
Adquisición de imágenes (FOTOS)	✓	✓	✓	✓	✓
Alineación de imágenes	✓	✓	✓	✓	✓
Generación de nube de puntos	✓	✓	✓	✓	✓
Nube de puntos densa	✓	✓	✓	✓	✓
Generación de malla	✓	✓	✓	✓	✓
Texturizado	✓	✓	✓	✓	✓
Exportar modelo 3D	✓	✓	✓	✓	✓

Adquisición de imágenes (ADI): Se toman fotografías del objeto o área de interés desde diferentes ángulos y perspectivas utilizando una cámara digital, asegurando una superposición adecuada entre las imágenes.

Alineación imágenes (ALI): El software de fotogrametría identifica puntos comunes en las imágenes y estima la posición y orientación relativa de la cámara en el momento en que se tomaron las fotografías.

Generación de nube de puntos (GPC): A través de la técnica de triangulación, el software calcula las coordenadas X, Y, Z, de los puntos de interés comunes en el espacio, generando una nube de puntos densa que representa la geometría del objeto.

Una vez completados estos pasos, la información de datos fotogramétricos se puede utilizar en diversas aplicaciones en la industria AIC para generar modelos 3D.

### 3.3.5 LiDAR

Por su parte, LiDAR utiliza la tecnología de teledetección, es decir que utiliza pulsos de luz láser para medir las distancias entre un sensor laser y los objetos en su entorno. El sistema LiDAR emite un haz de luz láser y mide el tiempo que tarda en reflejarse y regresar al sensor, a partir de los datos de tiempo y la velocidad de la luz, se calcula la distancia entre el sensor y el objeto (Li & Ibanez-Guzman, 2020). Los datos obtenidos del LiDAR se procesan para calcular las distancias y generar una nube de puntos.

El procesamiento de información LiDAR para crear un modelo 3D de acuerdo con diversos autores (Brell et al., 2019; Cui et al., 2023; Hu et al., 2021; Mahdjoubi et al., 2013; Yuan et al., 2023), implica lo siguiente:

Tabla 11. Elaboración de modelos 3D con LiDAR. Fuente: Elaboración propia

Proceso	LiDAR				
	(Mahdjoubi et al., 2013)	(Hu et al., 2021)	(Yuan et al., 2023)	(Cui et al., 2023)	(Brell et al., 2019)
Adquisición de Datos (Uso de LiDAR)	✓	✓	✓	✓	✓
Clasificación y filtrado de Nube de puntos	✓	✓	✓	✓	✓
Nube de puntos densa	✓	✓	✓	✓	✓
Generación de malla	✓	✓		✓	✓
Texturizado	✓	✓		✓	✓
Exportar modelo 3D	✓	✓		✓	✓

Adquisición de datos (ADLi): Con un sensor LiDAR, montado en una plataforma como un vehículo terrestre, avión o Vehículos aéreos no tripulados (UAVs), o con equipo portátil para usuarios, emite pulsos de luz láser y registra los tiempos de retorno de los pulsos reflejados. También se recopilan datos adicionales, como las coordenadas de posición y la orientación de la plataforma, generalmente utilizando un sistema de navegación inercial y un receptor GPS. Los datos brutos del LiDAR se procesan para calcular las distancias y generar una nube de puntos.

Clasificación y filtrado (PCC): La nube de puntos se clasifica y filtra para separar distintos tipos de objetos, como el terreno, edificios, vegetación etc. Esto se puede hacer utilizando algoritmos automatizados basados en características geométricas y de intensidad o la intervención manual de un operador.

Una vez completados estos pasos, se puede procesar la información para obtener el modelo 3D resultante.

### 3.3.6 Tratamiento de nube de puntos para obtención de modelos 3D

Se puede decir que el método de obtención de un modelo 3D de infraestructura construida es similar y estandarizado entre el uso de LiDAR y la fotogrametría en términos generales, ya que ambos procesos buscan obtener información tridimensional de un objeto, sin embargo, hay diferencias clave en la forma en que se adquieren y procesan los datos en cada técnica; Fotogrametría utiliza fotografías; LiDAR, utiliza pulsos láser. Sin embargo, el resultado final en ambos casos es un modelo 3D de la infraestructura existente a partir del uso de la Nubes de Puntos.

Las nubes de puntos son conjuntos de datos que representan objetos o escenas tridimensionales mediante la recopilación de puntos en el espacio 3D. Cada punto en la nube de puntos tiene coordenadas X, Y y Z, que indican su posición en el espacio. Las nubes de puntos también pueden incluir información adicional, como color y reflectancia e incluso su georreferencia, lo que proporciona una representación más detallada del objeto.

Como se revisó anteriormente, los principales procesos para la adquisición y procesamiento de la nube de puntos a partir del uso de la fotogrametría y LiDAR siguen un flujo de trabajo (Apollonio et al., 2021; Brell et al., 2019; Cui et al., 2023; Deligiorgi et al., 2021; Dhanda et al., 2019; Fritsch & Klein, 2018; Hu et al., 2021; Mahdjoubi et al., 2013; Rahaman & Champion, 2019)2013; Rahaman & Champion, 2019), con la nube de puntos se pasa al siguiente proceso:

**Nube de puntos densa (DPC):** Proceso que utiliza algoritmos y técnicas de procesamiento para incrementar la densidad de puntos, interpolando y extrapolando puntos adicionales a partir de datos de entrada, empleando información de textura, color y geometría.

**Creación de malla (MESH):** A partir de la nube de puntos densa, se crea una malla poligonal 3D que conecta los puntos, formando una superficie continua.

**Texturizado (TEX):** Las imágenes originales se proyectan sobre la malla poligonal para asignar colores y texturas a la geometría 3D. Esto proporciona al modelo 3D una apariencia realista y detallada.

**Exportación y visualización (3DM):** El modelo 3D resultante se puede exportar a diferentes formatos de archivo y visualizar en software de modelado, visualización o análisis 3D.

En la *Tabla 12* se presentan algunos softwares, para el tratamiento de nube de puntos, así como su relación con el entorno BIM, así como el tipo de licencia.

Tabla 12 Software para obtención de modelos 3D con nube de puntos. Fuente: Elaboración propia

Software de Fotogrametría o LiDAR		Fotogrametría		LiDAR	Proceso compartido					Licencias		
		ALI	PCG	PCC	DPC	MESH	TEX	3DM	GRAF	Tipo	Costo	Tiempo
Agisoft Metashape	Standard	✓	✓		✓	✓	✓	✓		C	\$ 3,312.00	Per.
	Professional	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	C*	\$ 64,731.50	Per.
Autodesk	ReCap Pro	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	C*	\$ 4,698.00	Anual
Bentley Systems	Context Capture	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	C	\$ 67,469.50	Anual
Cloud Compare	Cloud Compare			✓*	✓	✓	✓	✓		O	\$ -	
Global Mapper	Basic	✓	✓	✓*						C	\$ 11,081.50	Per.
	PRO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	C	\$ 26,806.50	Per.
Leica Cyclone	REGISTER			✓					✓	C	\$ 62,900.00	Anual
	REGISTER 360			✓					✓	C	\$ 45,325.00	Anual
	BASIC			✓						C	\$ 15,817.50	Anual
	SURVEY				✓	✓	✓	✓	✓	C	\$ 62,900.00	Anual
	MODEL				✓	✓	✓	✓	✓	C	\$105,450.00	Anual
MESHLAB	MeshLAB					✓	✓	✓		O	\$ -	
PIX4D	PIX4DMapper	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	C*	\$ 64,750.00	Anual
TRIMBLE Real Works	Starter				✓	✓	✓		✓	C	\$ 75,110.00	Per.
	Core			✓	✓	✓	✓	✓*	✓	C	\$177,137.50	Per.
	Performance			✓	✓	✓	✓	✓	✓	C	\$305,897.50	Per.

✓\* Dependen de otras aplicaciones en conjunto.

C\* Cuenta con licencias para estudiantes.

O Código Abierto.

Per. En licencias perpetuas después del primer año se tiene que pagar por actualizaciones y mantenimiento.

### 3.4 Herramientas de recopilación y análisis de datos (HRA)

La transformación digital en la infraestructura Portuaria requiere nuevas estrategias para el análisis de datos, donde las herramientas de recopilación y análisis de datos comprenden tecnologías, dispositivos y aplicaciones que facilitan la recolección, procesamiento y análisis de información del mundo físico y su relación con los datos digitales que representan esa realidad (Huang et al., 2023). La combinación de datos físicos y digitales permite comprender mejor los de infraestructura construida, impulsando la innovación y mejora continua.

Las tecnologías como sensores se aplican cada vez más en el campo de la infraestructura civil construida, se pueden monitorear y controlar diferentes variables en tiempo real (Cheng et al., 2022), las variables que se quieran obtener datos dependerán del interés que se tenga o el problema que se busque resolver. Esto permite identificar soluciones a problemas o áreas de mejora de manera temprana y tomar medidas rápidas para resolverlos, lo que se traduce en un mejor rendimiento y una mayor vida útil de la infraestructura construida.

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de internet, permitiendo la recopilación y el intercambio de datos. Estos dispositivos y objetos están equipados con sensores, software, y conectividad de red para recoger y compartir datos con otros dispositivos y sistemas en tiempo real (Zahid et al., 2021). El IoT permite la conexión y comunicación entre dispositivos, como sensores, y la transmisión de información recolectada a través de internet a plataformas o software específicos. Esta información es procesada y analizada para proporcionar una visión detallada del desempeño, estado y condiciones de la infraestructura civil construida.

La integración de IoT con entornos BIM permite que los datos de sensores sean incorporados en los modelos 3D de la infraestructura construida y pueden ser utilizados para visualizar la información y con ello para tomar decisiones informadas sobre el diseño, construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura. Algunos ejemplos de aplicaciones de IoT en la AIC incluyen:

Monitoreo de la integridad estructural, se puede medir la tensión, la deformación y la vibración en estructuras para evaluar su integridad y detectar posibles problemas (Castelli et al., 2023); Gestión del entorno, monitoreando la calidad del aire, la temperatura, la humedad y el nivel de ruido y ajustarlos la para mejorar el bienestar de los usuarios (Shahinmoghdam et al., 2021); Monitoreo del consumo de recursos como energía, agua, entre otros, para optimizar su uso y reducir los costos operativos (Mathews et al., 2023).

El intercambio de información entre los datos colectados por los sensores e IoT en entornos BIM se lleva a cabo mediante un proceso integrado que permite la recopilación de datos del mundo físico y su análisis y visualización en un modelo BIM. De acuerdo con diversos autores el flujo de trabajo para representar datos recolectados por sensores IoT en entornos BIM (Chen et al., 2021; Huang et al., 2023; Tang et al., 2019; Valinejadshoubi et al., 2021; T. Wang et al., 2022), en general, consta de las siguientes etapas (*ver: Ilustración 48*):

Selección e instalación de sensores, en función de las necesidades y los objetivos de los datos que se quieren obtener, se seleccionan y se instalan los sensores IoT apropiados en la infraestructura construida.

Recopilación de datos y transmisión de datos, los datos recolectados por los sensores se transmiten a través de internet a una plataforma centralizada, como una base de datos en la nube o un servidor, para su almacenamiento y análisis.

Procesamiento y análisis de los datos recibidos utilizando algoritmos y herramientas específicas para extraer información útil.

Integración de datos para conformar un Gemelo Digital, los datos procesados y analizados se incorporan y sincronizan con el modelo BIM, para compartir en tiempo real la información que toman los sensores.

Toma de decisiones y acciones, con la información integrada en el entorno BIM y el gemelo digital, se pueden tomar decisiones informadas sobre el diseño, la construcción, el mantenimiento y la operación de la infraestructura. Las acciones resultantes pueden incluir modificaciones en el diseño, la implementación de soluciones de mantenimiento preventivo o la optimización del rendimiento de los sistemas y equipos.

Retroalimentación y mejora continua, conforme los datos se siguen recopilando y analizando, se pueden realizar ajustes y mejoras en los procesos referentes a la infraestructura. Esto permite un enfoque de mejora continua para optimizar la eficiencia, la sostenibilidad y el rendimiento de la infraestructura construida.

Este flujo de trabajo representa un enfoque general para integrar datos de sensores IoT en entornos BIM y gemelos de infraestructura construida. Cabe señalar que las etapas específicas y las herramientas utilizadas pueden variar según los requisitos del proyecto y las tecnologías disponibles. Además, no existe un único software que recoja los datos de sensores IoT y los visualice directamente en un entorno BIM, esta se envía a plataformas en la nube (*Ver: Herramientas de almacenamiento de datos*), donde se almacenan y procesan los datos que pueden ser visualizados e integrados en un entorno BIM mediante el uso de plataformas BIM.

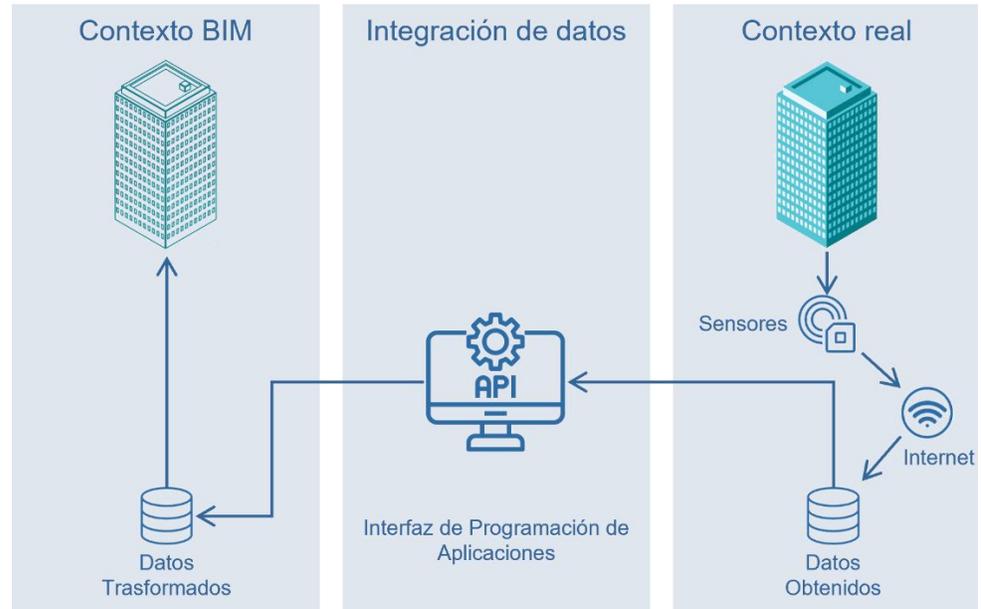


Ilustración 48. Intercambio de información entre los datos colectados por los sensores e IoT en entornos BIM. Elaboración propia con información de “A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends” y “BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings”

Para lograr la compatibilidad con entornos BIM, se requiere desarrollar aplicaciones personalizadas o utilizar soluciones de terceros que permitan la integración entre las plataformas en la nube y las herramientas BIM, las que se apoyan de aplicaciones para facilitar la integración y visualización de los datos de sensores IoT en los GDs y entornos BIM, conocidas como API (Application Programming Interfaz o Interfaz de Programación de Aplicaciones).

Una API es un conjunto de reglas, protocolos y herramientas que permiten la comunicación e interacción entre diferentes sistemas de software, fundamentales para permitir la comunicación entre los sensores IoT, la nube y BIM. Por ejemplo, los datos de los sensores IoT se pueden enviar a través de una API a una plataforma en la nube, donde los datos se almacenan y analizan. Después en BIM se puede utilizar otra API para acceder y visualizar los datos en el entorno BIM, facilitan la interoperabilidad y la integración entre diferentes sistemas y servicios en la industria AIC.

### 3.5 Herramientas de simulación y visualización (HSV)

La implementación de Tecnologías en la AIC ha demostrado ser un catalizador para el progreso y la eficiencia, donde, las herramientas de simulación y visualización han cambiado drásticamente la forma en que los que se abordan el diseño, construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura (Alsafouri & Ayer, 2018). Herramientas como la simulación (SIM) y su Visualización (VIS), que comprenden a la Realidad Virtual (VR), la Realidad Aumentada (AR) han experimentado un crecimiento significativo en su adopción e impacto en la industria y su relación con los Gemelos Digitales.

Las herramientas de simulación son esenciales en la AIC para tomar decisiones informadas en relación con infraestructuras nuevas o existentes, estas facilitan, el análisis y la predicción del comportamiento y el rendimiento de las infraestructuras en escenarios virtuales, lo que permite prever problemas, optimizar recursos y mejorar la eficiencia, calidad y durabilidad (L. Zheng et al., 2023). Para obtener resultados óptimos, es crucial que un modelo de simulación reproduzca fielmente el sistema real mediante la incorporación de datos precisos que representen la información del entorno real.

Por ejemplo, el análisis de elementos finitos y la dinámica de fluidos computacional son cruciales en la toma de decisiones relacionadas con la infraestructura nueva y existente. Estos enfoques tecnológicos pueden integrarse en entornos BIM o exportarse al software de simulación correspondiente, lo que permite modelar, analizar, predecir y visualizar el comportamiento y el rendimiento de la infraestructura en escenarios virtuales. Esta información valiosa facilita la anticipación de problemas, la optimización de recursos y la mejora de la eficiencia, calidad y vida útil de la infraestructura (Ursini et al., 2022).

Las simulaciones abordan diversos aspectos, ofreciendo información valiosa para mejorar la toma de decisiones en el diseño y eficiencia operativa de la infraestructura, las más utilizadas son: Análisis de elementos finitos (FEA) para evaluar resistencia y estabilidad estructural; Dinámica de fluidos computacional (CFD) para analizar flujos y optimizar sistemas HVAC, confort térmico y efectos de viento y oleaje; Simulación energética (EEC) para consumo de energía y eficiencia; Iluminación (ILU) para optimizar distribución lumínica Interior y exterior; Acústica (ACU) para evaluar y mejorar calidad sonora y aislamiento en edificaciones; Tráfico y transporte (MOV) para optimizar diseño y planificación en infraestructuras de movilidad; Evacuación y seguridad (SEC) para evaluar accesibilidad y rutas de emergencia; y Simulación de construcción (4/5D) para coordinar etapas constructivas y controlar tiempo (4D) y costos (5D) del proyecto.

Tabla 13. Software para implementación de simulaciones en la AIC. Fuente: Elaboración propia

Software		SIMULACIÓN							BIM	Licencias			
		FEA	CFD	EEC	ILU	ACU	MOV	SEC		4/5D	Tipo	Costo	Tiempo
ANSYS	ANSYS	✓	✓	✓		✓				👉	C**		Per.
Autodesk	CFD		✓							✓	C**		Anual
	Insight			✓	✓					✓	C*	\$ 42,236.00	Anual
	Infraworks						✓			✓	C*	\$ 25,179.00	Anual
	Robot Structural Analysis	✓								✓	C	Con AEC Collection	Anual
	Naviswork								✓	✓	C*	\$ 13,341.00	Anual
Bentley Systems	STAAD PRO	✓								✓	C	\$ 86,746.50	Anual
	RAM Structural System	✓								✓	C	\$ 52,262.50	Anual
	OpenBuildings Station Designer			✓				✓		✓	C	\$ 93,332.50	Anual
	OpenRoads Designer						✓			✓	C	\$ 112,054.50	Anual
	SYNCHRO 4D								✓	✓	C	\$ 74,000.00	Anual
Dassault Systèmes SIMULIA	ABAQUS	✓								👉	C**		
	Xflow		✓							👉	C**		
IES	Virtual Environment		✓	✓	✓				✓	👉	C** C*	\$ -	Anual
SIMSCALE	Architecture, Engineering, and Construction Simulation Solutions		✓	✓						👉	C**		Anual
Thunderhead Engineering	PyroSim							✓		👉	C	\$ 20,350.00	Anual
	Pathfinder						✓			👉	C	\$ 43,475.00	Anual
Nemetschek Group	SCIA Engineer	✓								✓	C*	\$ 8,244.45	Anual
	EcoDesigner STAR			✓						✓	C*	Incluida en Archicad	Anual
OTROS	DiaLUX				✓					👉	O	\$ -	
	ODEON					✓				👉	C*	\$ 98,086.30	Anual
	OpenFoam		✓							👉	O	\$ -	
	Radiance		✓							👉	O	\$ -	
	PrePoMax y Calculix	✓								👉	O	\$ -	
TRIMBLE	Tekla Structural Designer	✓								✓	C**		Anual

👉 Se requiere de una serie de pasos para que el modelo BIM sea funcional en el software de simulación

C\* Cuenta con licencias para estudiantes.

O Código Abierto.

C\*\* Varias opciones de precios de acuerdo con el valor del proyecto o los ingresos brutos anuales de la empresa

Las herramientas de visualización como la AR y VR han ganado relevancia en la industria AIC, especialmente en entornos BIM. Estas tecnologías permiten una inmersión visual y una interacción más efectiva con los entornos BIM y su relación con la realidad, facilitando la comprensión y el análisis de las simulaciones, como las mencionadas anteriormente.

La VR, se refiere a las herramientas que permiten experimentar como podría ser cualquier infraestructura nueva o modificación a la infraestructura existente en entornos inmersivos y tridimensionales que permiten que los usuarios se sumerjan en los modelos 3D, además, estas herramientas puede emplearse en la simulación de múltiples escenarios, permitiendo a los usuarios sumergirse y establecer una conexión directa con diversos entornos, al tratar de recrear de manera realista y precisa situaciones específicas que enfrentan los profesionales de la AIC (Bucchiarone, 2022).

La AR va un paso más allá de la VR al trasladar información digital en el entorno físico en tiempo real, permitiendo mejorar y enriquecer la percepción subjetiva de la realidad, estas adiciones virtuales que pueden ser incluso simulaciones que contengan sonido, video, gráficos, texto, etc., mismas que son generadas e insertadas mediante software especializado y son visualizadas mediante diferentes tipos de hardware, como computadoras, tabletas, teléfonos inteligentes o dispositivos ponibles usables, por ejemplo, lentes de visualización (Gomez-Jauregui et al., 2019).

La VR y la AR son tecnologías emergentes que modifican nuestra percepción del entorno, aunque se distinguen en términos de experiencia e interacción. La VR transporta al usuario a un espacio tridimensional completamente generado por computadora, desligándolo del entorno real, mientras que la AR añade componentes virtuales al mundo físico, permitiendo la interacción simultánea con ambos contextos. En esencia, la VR ofrece una experiencia inmersiva en un ambiente virtual, mientras que la AR mejora el entorno real mediante la incorporación de elementos digitales.

La implementación de Tecnologías también ha facilitado la creación de plataformas integradas que combinan SIM y VIS en un entorno BIM. La integración de herramientas como la SIM y VIS en el proceso de diseño, construcción y operación de activos no circulantes o infraestructura, ha revolucionado la forma en que se llevan a cabo los proyectos y su gestión con ayuda de los Gemelos Digitales, ya que estas permiten la interacción y comunicación entre los diferentes actores involucrados en la AIC.

Esta relación de herramientas permite una visión holística de la infraestructura, facilitando la detección temprana de problemas y la optimización de los procesos de diseño, construcción y operación. A medida que la tecnología sigue evolucionando, es probable que estas herramientas de simulación y visualización desempeñen un papel cada vez más importante en la forma en que diseña, construye y gestiona la infraestructura.

### 3.6 Herramientas de almacenamiento de datos, aprendizaje automático e inteligencia artificial (HAAIA)

Como se ha revisado en las Herramienta anteriores, la transformación digital de la infraestructura construida está siendo impulsada y dirigida por la adopción de tecnologías como los entornos BIM combinadas con la integración de sensores IoT y herramientas de simulación y visualización. Estas tecnologías, están revolucionando la forma en que se gestionan los proyectos en todas sus etapas de vida.

Sin embargo, el uso de estas Tecnologías también conlleva el desafío de gestionar la enorme cantidad de datos generados. Esta información recolectada puede resultar abrumadora si no se cuenta con sistemas adecuados para procesar, analizar y almacenar dichos datos.

Por ello, es fundamental contar con estrategias y soluciones de gestión de datos eficientes y efectivas para aprovechar al máximo las ventajas que ofrecen estas tecnologías . Por lo tanto, es crucial abordar el desafío de gestionar estos datos de manera efectiva, utilizando soluciones como sistemas de almacenamiento en la llamada nube (Onungwa et al., 2021).

#### 3.6.1 La nube para almacenamiento de datos

Estas plataformas y servicios en la nube permiten a desarrolladores y empresas crear aplicaciones y flujos de trabajo personalizados para integrar y gestionar datos de sensores IoT en entornos BIM (Y. Zhao & Taib, 2022). Además, estos sistemas facilitan la sincronización y combinación de información de modelos BIM con datos de la infraestructura construida y los sensores IoT en tiempo real, ofreciendo una visión más amplia y detallada de los proyectos y la infraestructura existente. Existen varias soluciones que permiten la integración de datos provenientes de sensores IoT en entornos BIM, algunas de las más populares incluyen:

**Amazon Web Services (AWS) IoT:** AWS IoT es una plataforma en la nube desarrollada por Amazon que permite la conexión, recolección y análisis de datos de dispositivos IoT. AWS IoT puede integrarse con entornos BIM a través de sus diversas herramientas y servicios como AWS Lambda, AWS IoT Analytics y Amazon S3 para el almacenamiento y análisis de datos.

**Autodesk Platform Services:** es una plataforma de desarrollo en la nube que permite a los desarrolladores y empresas crear aplicaciones y flujos de trabajo personalizados utilizando las API de Autodesk para integrar datos de sensores IoT en entornos BIM, como Autodesk Revit.

**Google Cloud IoT Core:** Es un servicio en la nube desarrollado por Google que permite conectar, administrar y analizar datos de dispositivos IoT. Esta plataforma se puede integrar con entornos BIM mediante el uso de APIs y otras herramientas de Google Cloud, como Cloud Functions, Cloud Pub/Sub y BigQuery, para el análisis y almacenamiento de datos.

**IBM Watson IoT:** Plataforma IoT que permite la conexión y gestión de dispositivos y sensores. IBM Watson IoT puede integrarse con entornos BIM mediante el uso de APIs.

**iTwin Platform:** Plataforma de software en la nube desarrollada por Bentley Systems que permite sincronizar y combinar la información de los modelos BIM con datos de la infraestructura construida y los datos de sensores IoT en tiempo real.

**Microsoft Azure:** Plataforma de servicios IoT desarrollada por Microsoft, permite la conexión, monitoreo y administración de dispositivos IoT en entornos BIM, pueden realizarse con Azure Functions o Azure Logic Apps para crear flujos de trabajo personalizados.

**Siemens MindSphere:** Plataforma IoT industrial desarrollada por Siemens que ofrece herramientas para la conexión, análisis y visualización de datos de sensores. MindSphere puede integrarse con entornos BIM a través de sus APIs y conectores específicos para aplicaciones de construcción e infraestructura.

**ThingWorx:** plataforma IoT que ofrece herramientas para la recopilación, análisis y visualización de datos de sensores, integrándose con entornos BIM mediante el uso de APIs personalizados.

**Trimble Connect:** plataforma de colaboración basada en la nube que permite compartir y acceder a datos de sensores IoT.

### 3.6.2 Aprendizaje automático e inteligencia artificial

En el contexto del uso de las Nube, y su aplicación en infraestructura construida tiene una adopción limitada en lo referente al aprendizaje automático (ML) y el uso de inteligencia artificial (AI) (Abdirad & Mathur, 2021). Lo anterior es debido a desafíos como modelos incompletos, formatos de archivo poco estructurados o incompatibilidad entre representaciones de datos BIM, lo anterior es conocido como falta de objetos semánticamente ricos.

Los objetos semánticamente ricos son elementos digitales que contienen información detallada y bien definida sobre su significado, características, propiedades y relaciones con otros objetos en un contexto específico (S. Jiang et al., 2023). Estos objetos pueden ser parte de modelos de información de construcción (BIM), sistemas de gestión de contenidos o bases de datos, entre otros.

La riqueza semántica facilita la comunicación, la interoperabilidad y la comprensión entre sistemas y usuarios al proporcionar una descripción clara y estructurada de los objetos, permitiendo que las máquinas y las personas interpreten y procesen la información de manera más efectiva y precisa (Kalay, 2001).

En el contexto de la infraestructura construida, los objetos semánticamente ricos pueden incluir componentes de construcción, como paredes, ventanas o sistemas mecánicos, etc, todos ellos con información detallada sobre sus propiedades, funciones y relaciones con otros componentes del proyecto. De acuerdo con Abdirad & Mathur, el uso de ML y AI se puede usar de la siguiente manera en las diferentes etapas que comprende a un proyecto:

Diseño y planificación, se propone la aplicación de aprendizaje automático para predecir la eficacia de las alternativas de diseño basadas en otros proyectos con características similares o predecir el costo del proyecto, tiempos de obra, y características licitaciones exitosas previas.

Para la fase de construcción, se centra en el reconocimiento y seguimiento de objetos (trabajadores, componentes de construcción, objetos y equipos) basados en imágenes, GPS o datos de escaneo láser para predecir, controlar y monitorear el progreso del proyecto, los riesgos de seguridad y las condiciones construidas.

Para las fases posteriores a la construcción, las aplicaciones de aprendizaje automático han mejorado los métodos de análisis de los activos construidos para operaciones, mantenimiento y evaluación de la condición, especialmente para el monitoreo estructural y la inspección de activos circulantes y no circulantes, la planificación del mantenimiento predictivo.

En conclusión, la revolución digital en la industria AIC está en pleno desarrollo gracias a la adopción de tecnologías como BIM, IoT y la aplicación de aprendizaje automático e inteligencia artificial en la gestión de proyectos. El uso de estas tecnologías ha demostrado su capacidad para mejorar la eficiencia y la toma de decisiones en todas las etapas de los proyectos. No obstante, es crucial abordar los desafíos en la gestión de la gran cantidad de datos generados, lo cual puede lograrse mediante la implementación de soluciones en la nube y estrategias adecuadas para almacenar, analizar y procesar esta información.

A pesar de las dificultades que aún enfrenta la industria en términos de adopción de aprendizaje automático e inteligencia artificial, el futuro es prometedor en cuanto a su potencial para transformar la forma en que se gestionan y desarrollan los proyectos en el sector AIC. Continuar explorando y desarrollando nuevas aplicaciones y enfoques para utilizar estas tecnologías será fundamental para mantener el progreso y la innovación en la industria.



## Flujo de trabajo para la elaboración del gemelo digital

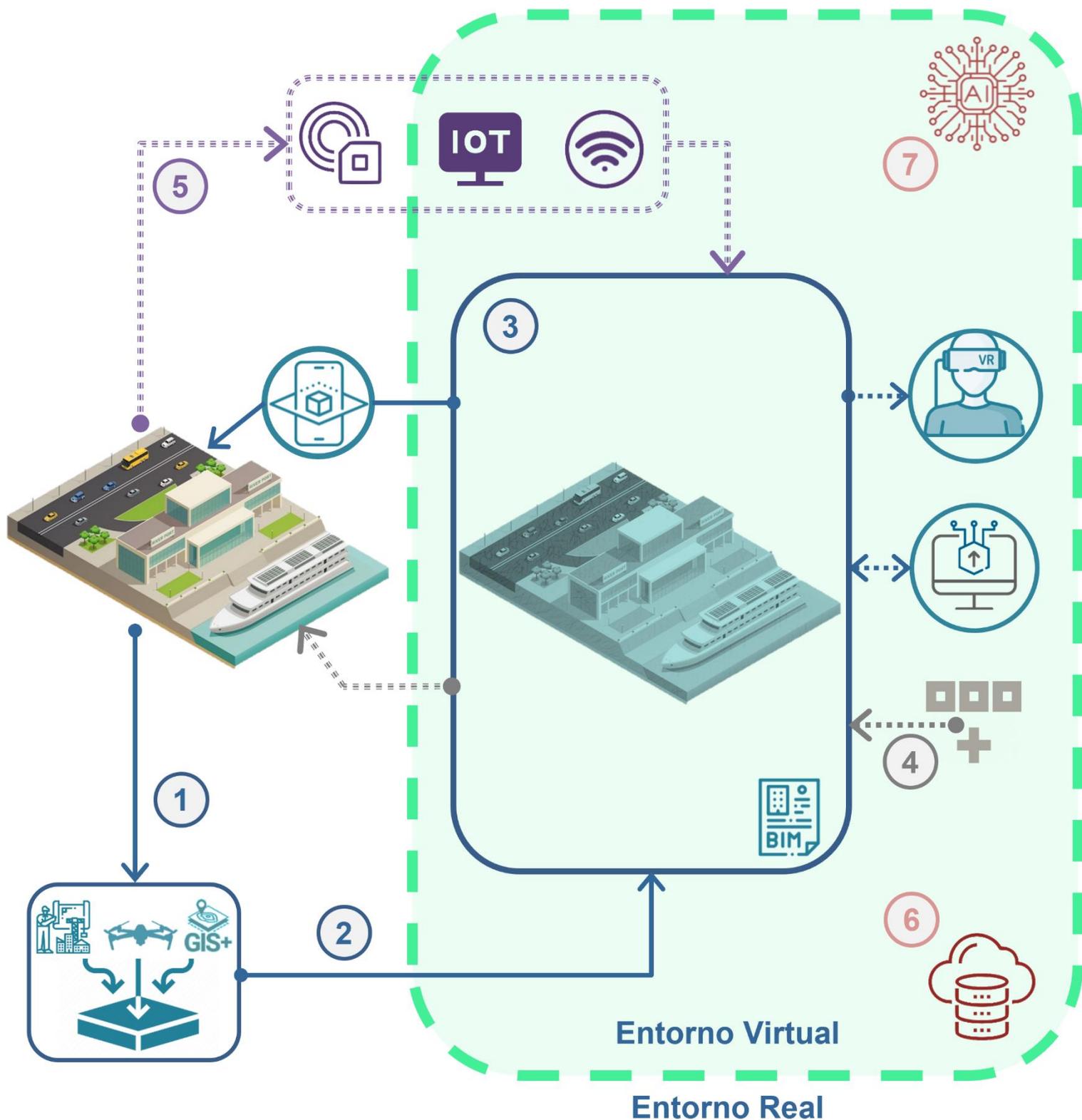


Ilustración 49. Flujo de Trabajo para la realización de un Gemelo Digital. Fuente: Elaboración Propia.

## 4 FLUJO DE TRABAJO PARA LA ELABORACIÓN DEL GEMELO DIGITAL

---

Este capítulo se centra en la descripción del método propuesto para la creación de un GD de infraestructura marítimo-portuaria construida, con base en la información del *Capítulo 3*, se explora un enfoque sistemático para desarrollar un GD de infraestructura marítima-portuaria construida, que se divide en dos secciones con tres etapas cada uno.

La primera fase comprende tres etapas iniciales:

1. Adquisición de datos de la infraestructura construida.
2. Procesamiento de la información para integrarla en un entorno BIM.
3. Utilización del entorno BIM para visualizar la infraestructura construida en modelo digital que sirva en diversas aplicaciones, como realidad virtual, realidad aumentada y simulaciones.

Es en este punto, tras la integración de la información en un entorno BIM y la posibilidad de su visualización de la información en el entorno real, se puede considerar que se ha creado un GD.

La segunda fase, por otro lado, busca mejorar y actualizar la información datos del GD, contribuyendo a su utilidad para los procesos de toma de decisiones concernientes a la infraestructura construida. Los pasos incluyen:

4. Implementación de nuevos proyectos en el gemelo digital, lo que permite ver como se relacionarán con la infraestructura existente.
5. Integración de sensores en la infraestructura física para proporcionar datos actualizados y en tiempo real al GD.
6. Integración de la Nube.
7. Integración de aprendizaje automático e inteligencia artificial.

A lo largo de este capítulo, cada uno de estos pasos se desarrollará en detalle, resaltando las tecnologías y herramientas que se han seleccionado para facilitar cada etapa del proceso. Este enfoque estratégico proporciona un flujo de trabajo para la elaboración de un GD. Una vez se haya completado la creación del GD, será crucial evaluar su eficacia y eficiencia. Donde se proporcionará un marco para la evaluación del GD.



1

# Adquisición de datos de la infraestructura construida



Información AEC de la infraestructura operativa, inspecciones y evaluaciones previas.



Datos topográficos (si se requiere).



Fotogrametría para obtener modelos 3D de las estructuras de tierra existentes



Datos de sensores en estructuras de Tierra (si existen).



Información operativa de las operaciones terrestres



Información AEC, inspecciones y evaluaciones previas de las estructuras de atraque.



Fotogrametría para obtener modelos 3D de las estructuras de atraque existentes



Datos de sensores en estructuras de atraque (si existen).



Datos batimétricos para una representación detallada del lecho marino.



Datos relacionados con las condiciones marinas, como las mareas y las corrientes.



Dimensiones de las embarcaciones que se reciben en las estructuras de atraque.



Datos de sensores marinos (si existen).

#### 4.1 Bases del Gemelo Digital: adquisición, procesamiento y visualización

La creación del GD de infraestructura marítima-portuaria construida comienza con una labor esencial: recopilar los datos necesarios. Esta tarea inicial no es menor; los datos pueden abarcar desde simples planos de construcción hasta detalladas mediciones del fondo marino, etc., cada pieza de información formará la base sobre la que se desarrollará el GD.

El próximo desafío es procesar y organizar todos esos datos en un entorno Digital, como BIM. Este paso es crítico, ya que la calidad de la información que se integre directamente impactará en la utilidad del GD.

A continuación, se describirá un plan de trabajo para ilustrar cómo se debe procesar la información de la recopilación de datos en la creación de un GD, considerando las necesidades para la infraestructura marítimo-portuaria.

##### 4.1.1 Adquisición de datos de la infraestructura construida

La adquisición de datos, fundamental para crear un GD, consiste en recolectar toda la información necesaria para recrear la infraestructura construida en un entorno digital. Dependiendo de la infraestructura y su contexto, la naturaleza y la cantidad de datos requeridos pueden variar significativamente.

Los datos pueden provenir de una amplia variedad de fuentes. Por ejemplo, en las áreas de tierra, los planos de construcción, si están disponibles, pueden proporcionar información vital sobre la estructura y el diseño de la infraestructura. Aunque estos planos pueden ser antiguos, a menudo sirven como punto de partida para el modelado en 3D y la integración en un entorno de Modelado de Información de Construcción (BIM).

En caso de que no existan planos que sirvan como referencia, la fotogrametría es otro recurso valioso en la etapa de adquisición de datos. Con los avances en la tecnología de drones, la recopilación de datos de fotogrametría es más accesible y precisa que nunca. Es importante mencionar que además de estas fuentes de datos, puede haber otras que sean relevantes para la infraestructura específica. Por ejemplo, si la infraestructura ha sido objeto de inspecciones o evaluaciones anteriores, los informes de estas pueden ofrecer datos útiles y detallados.

Otra fuente de datos indispensable en la creación de un GD para infraestructuras marítimas-portuarias son los datos topo batimétricos. Estos datos proporcionan una representación detallada del lecho marino y el terreno donde se asienta la infraestructura, esenciales para entender cómo la infraestructura interactúa con su entorno. El levantamiento topo batimétrico, aunque puede ser un proceso complejo y costoso, es crítico para desarrollar un GD preciso y detallado de una infraestructura marítimo-portuaria.



## 2 Procesamiento de la información para integrarla en un entorno BIM

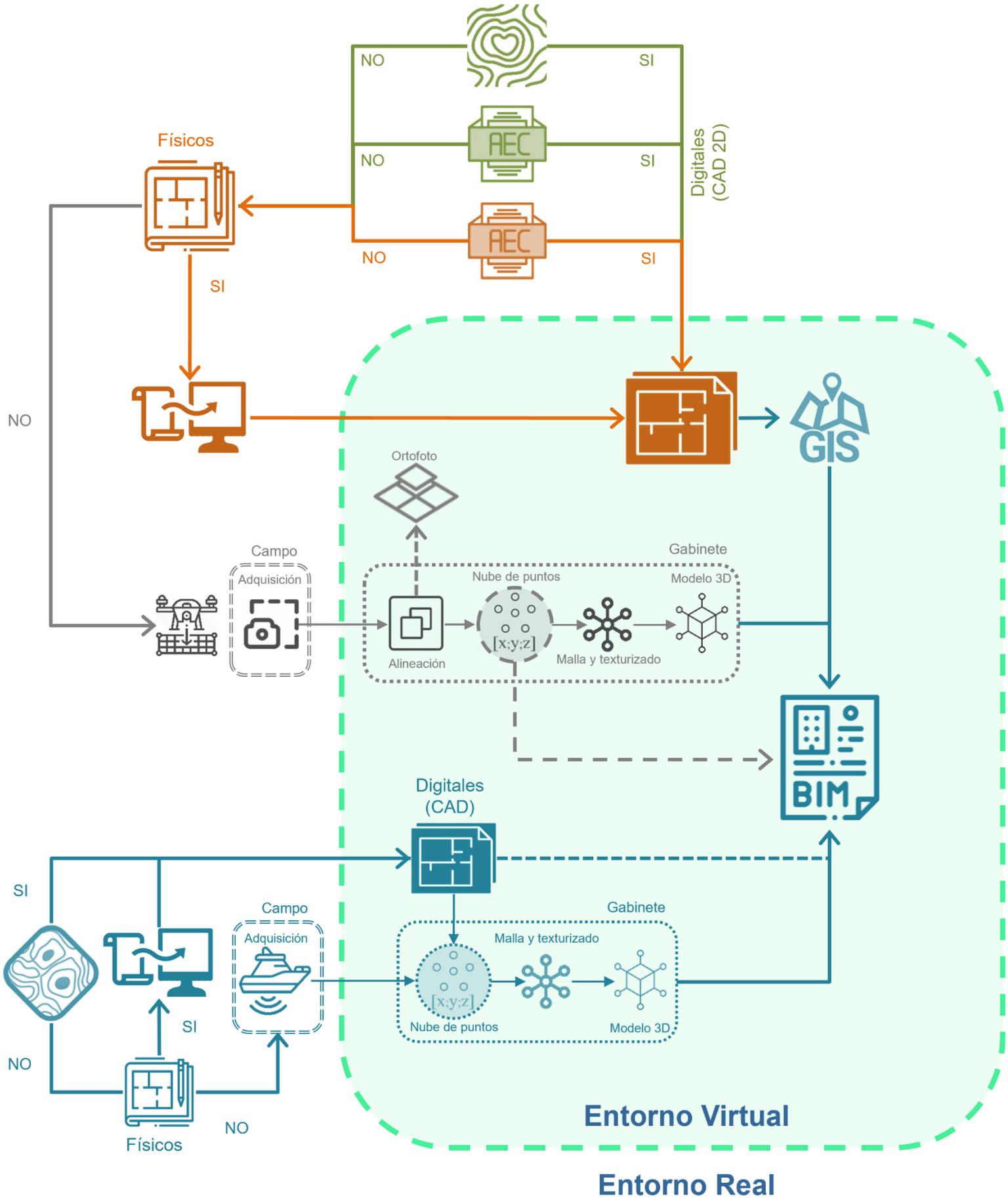


Ilustración 51. Paso 2: Procesamiento de la información para integrarla en un entorno BIM. Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.1.2 Procesamiento de la información para integrarla en un entorno BIM

El procesamiento de la información recopilada es el segundo paso crucial en la creación de un GD. En este punto, los datos adquiridos en el primer paso son transformados, organizados y preparados para su integración en un entorno BIM. Este proceso es esencial para asegurar que los datos sean utilizables y que la representación digital del modelo sea precisa y útil.

En el caso de la información AIC, como planos físicos, pueden requerir una digitalización. Esto implica convertir los planos físicos a un formato digital que pueda ser importado al software BIM. Es importante que este proceso se realice con precisión, ya que cualquier error en esta etapa puede tener un efecto de cascada en la precisión y utilidad del GD final.

Además, se recomienda trabajar con esta información inicialmente en 2D, ya que muchos de estos detalles pueden ser útiles para su presentación en plataformas GIS<sup>40</sup>. Este enfoque servirá para controlar la información según las necesidades de cada usuario, desde los equipos de proyectos hasta las áreas administrativas que pueden beneficiarse de tener acceso a información que requiere menos capacidad gráfica.

Uno de los desafíos de esta etapa es la fotogrametría. Este proceso implica la transformación de las imágenes capturadas en un formato utilizable por el software BIM. En la sección 3.3.3 *Percepción remota*, se revisa puntualmente ese proceso.

El procesamiento de datos batimétricos puede ser especialmente desafiante debido a la complejidad de estos datos. Sin embargo, son indispensables para proporcionar una visión precisa de cómo la infraestructura interactúa con su entorno marino. A menudo, estos datos requieren un procesamiento especializado para convertirlos en un formato que sea utilizable dentro del entorno BIM.

Una vez que los datos han sido procesados y están listos para su importación al entorno BIM, se pueden comenzar a modelar los diferentes elementos de la infraestructura. Esta etapa implica la colocación precisa de los elementos en el modelo según los datos adquiridos. Aquí, la precisión es de suma importancia para asegurar que el Gemelo Digital sea una representación fiel y útil de la infraestructura real.

En resumen, el procesamiento de datos y su integración en un entorno BIM es un desafío que requiere precisión y atención al detalle. A pesar de su complejidad, es un paso esencial que transforma los datos brutos en una representación digital de la infraestructura que será la base para el GD.

---

<sup>40</sup> Sistemas de Información Geográfica (por sus siglas en inglés GIS, Geographic Information Systems) es un sistema diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar, gestionar y presentar todo tipo de datos geoespaciales.



### 3 Utilización del entorno BIM para visualizar la infraestructura construida

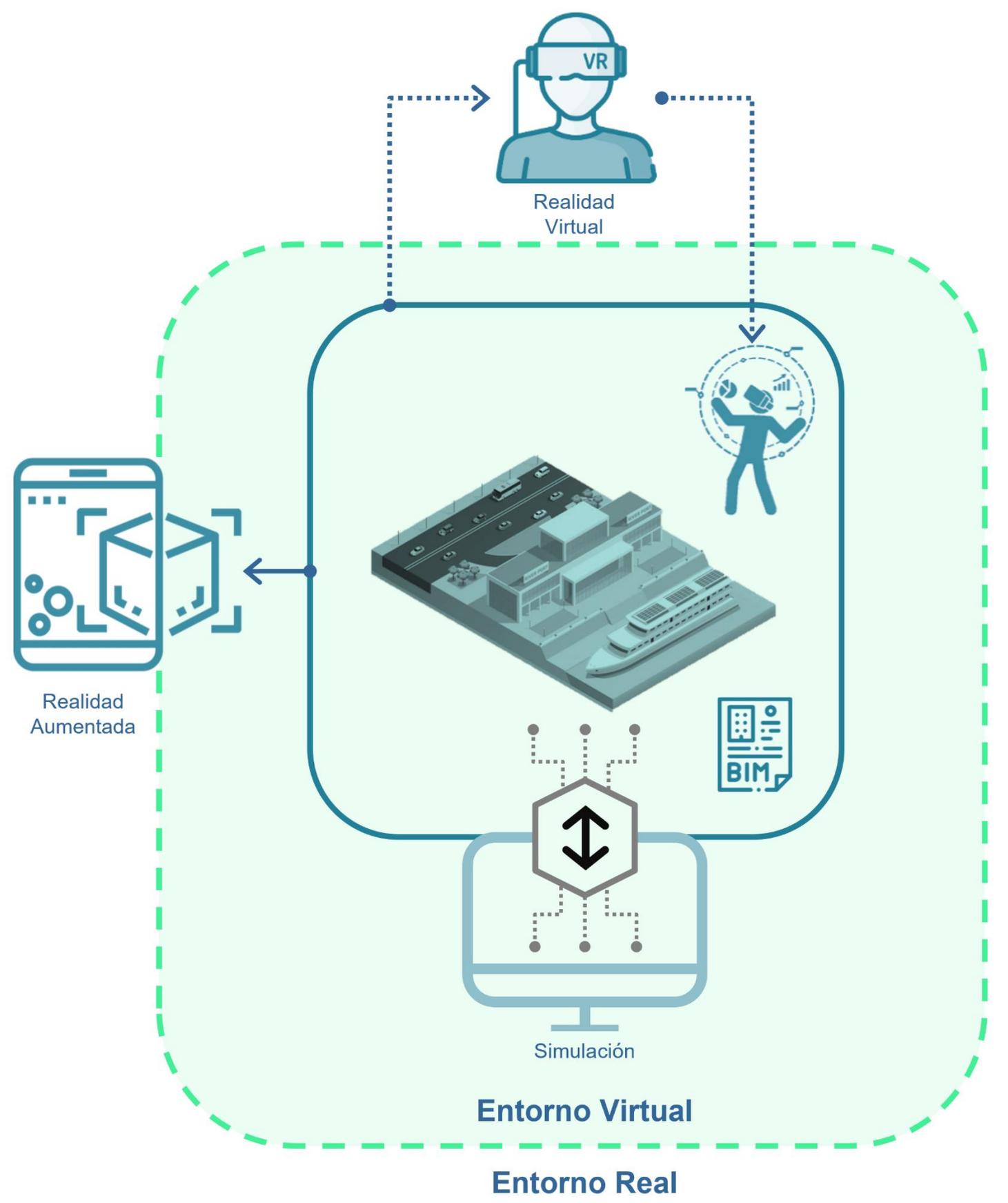


Ilustración 52. Paso 3: Utilización del entorno BIM para visualizar la infraestructura construida. Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.1.3 Utilización del entorno BIM para visualizar la infraestructura construida

Una vez procesados los datos y construido el modelo 3D en el entorno de BIM, el siguiente paso es visualizar la infraestructura en formato digital. BIM, como enfoque integrado para la gestión de la información de construcción, proporciona una representación digital precisa, detallada y tridimensional de la infraestructura. Esta visualización es esencial ya que ofrece una visión realista útil para diversas aplicaciones del GD.

Los entornos BIM no solo permiten la visualización en 3D, sino también la interacción con el modelo para realizar diversas tareas. Esta interacción facilita la comprensión del diseño y funcionamiento de la infraestructura, siendo útil para los responsables de la toma de decisiones, los equipos de Arquitectura, Ingeniería, Construcción y el personal de operaciones (AECO). Esta etapa supone una conexión del entorno real con el entorno virtual.

Un uso práctico de la VR en la infraestructura marítimo-portuaria podría ser para los directivos de las empresas concesionarias, permitiendo realizar recorridos virtuales ofreciendo una comprensión intuitiva y realista de los activos construidos sin la necesidad de estar físicamente presentes. Además de ahorrar costos de viáticos y logística, facilitaría la familiarización con esta infraestructura, permitiendo la exploración inmersiva de los activos existentes además promoviendo una mejor comprensión y manejo de estos.

La AR, combina datos digitales y realidad física, revela aspectos "invisibles" de la infraestructura, asistiendo en el mantenimiento y previniendo daños durante intervenciones. También puede ser útil para mostrar datos relacionados con la infraestructura, como los costos de algún elemento, el año de construcción, el tiempo de vida de diseño restante, entre otros. Esta aplicación proporciona una visualización de datos integral, enriqueciendo la comprensión y el manejo de la infraestructura marítimo-portuaria.

Por último, los entornos BIM permiten la realización de simulaciones o, en su caso, el intercambio de información modelada para simulaciones específicas. Estas pueden ser útiles para predecir y planificar las operaciones de la infraestructura. Por ejemplo, pueden simularse situaciones de tráfico para entender cómo las embarcaciones de nuevas dimensiones atracarán en la infraestructura existente, o el flujo de peatones en un muelle para el desembarque, ayudando a identificar posibles problemas y soluciones antes de que ocurran en la realidad.

En resumen, el entorno BIM proporciona herramientas para visualizar e interactuar con la infraestructura construida de manera detallada y realista. A través del uso de VR y AR, así como de simulaciones, los responsables de la toma de decisiones y los equipos de operación pueden obtener una comprensión más profunda de la infraestructura, identificando posibles problemas y soluciones antes de que ocurran en la realidad. Sin embargo, el potencial futuro del GD radica en su optimización y actualización continua.



4

# Adición y Visualización de Nuevos Proyectos en el Gemelo Digital

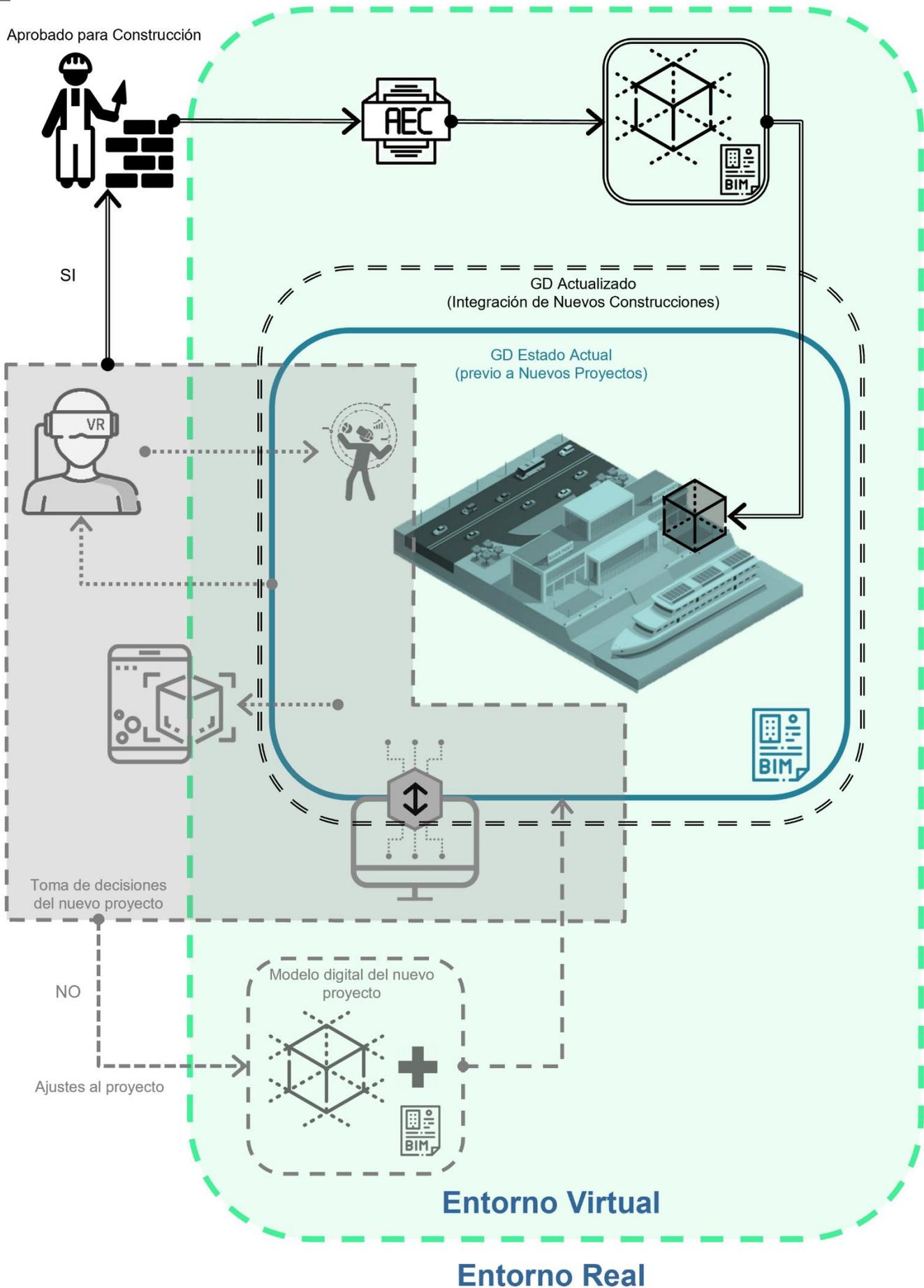


Ilustración 53. Paso 4: Adición y Visualización de Nuevos Proyectos en el Gemelo Digital. Fuente: Elaboración Propia.

## 4.2 Optimización y actualización del Gemelo Digital: innovación para el futuro

La siguiente sección se adentra en la segunda fase en la evolución de un GD, centrada en mejorar y actualizar la información y los datos dentro de este. Esta fase abarca la implementación de nuevos proyectos en el GD, la incorporación de sensores en la infraestructura física para suministrar datos actualizados y en tiempo real, la integración con la nube y la incorporación de tecnologías de aprendizaje automático e inteligencia artificial. Así, el GD se transforma en una herramienta viva y evolutiva, fundamental para la toma de decisiones en relación con la infraestructura marítima-portuaria.

### 4.2.1 Adición y Visualización de Nuevos Proyectos en el Gemelo Digital

Hasta la fase actual, el GD es una representación digital precisa y detallada de la infraestructura existente, brindando una plataforma ideal para la incorporación y visualización de nuevos proyectos. Esto permite a los actores AECO anticipar cómo un nuevo proyecto se integrará con la infraestructura existente, facilitando realizar ajustes y optimizaciones antes de la construcción física.

La incorporación de un nuevo proyecto al GD requiere el desarrollo de un modelo digital, utilizando las mismas técnicas y herramientas de modelado 3D empleadas en la creación inicial del GD. Este modelo se integra posteriormente en el GD existente. La compatibilidad del entorno BIM con tecnologías de RV y RA potencia el proceso al proporcionar una inmersión aún mayor, lo que facilita la toma de decisiones en relación con la infraestructura nueva y su impacto sobre la existente.

Más allá de la visualización, la incorporación de nuevos proyectos en el GD permite un análisis detallado del impacto que estos tendrán en la infraestructura y operaciones existentes. Esto puede incluir la evaluación de la eficiencia del flujo de tráfico, la optimización de la distribución espacial y el análisis de las interacciones entre la nueva construcción y las estructuras existentes, todo esto apoyado por herramientas de simulación.

Se recomienda que estos nuevos proyectos se elaboren utilizando entornos BIM desde el principio, lo cual facilitará su integración al GD. Una vez que el proyecto haya pasado por el proceso de autorización y se haya construido, se debe obtener un modelo "Como Construido", que se integrará como una parte virtual del GD.

En resumen, la adición y visualización de nuevos proyectos en el Gemelo Digital se convierten en componentes esenciales en la optimización y actualización de este, permitiendo la evaluación y optimización anticipada de los nuevos proyectos de infraestructura.



- 5 Integración de sensores
- 6 Integración de la Nube para el manejo de la información
- 7 Integración de aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (AI)

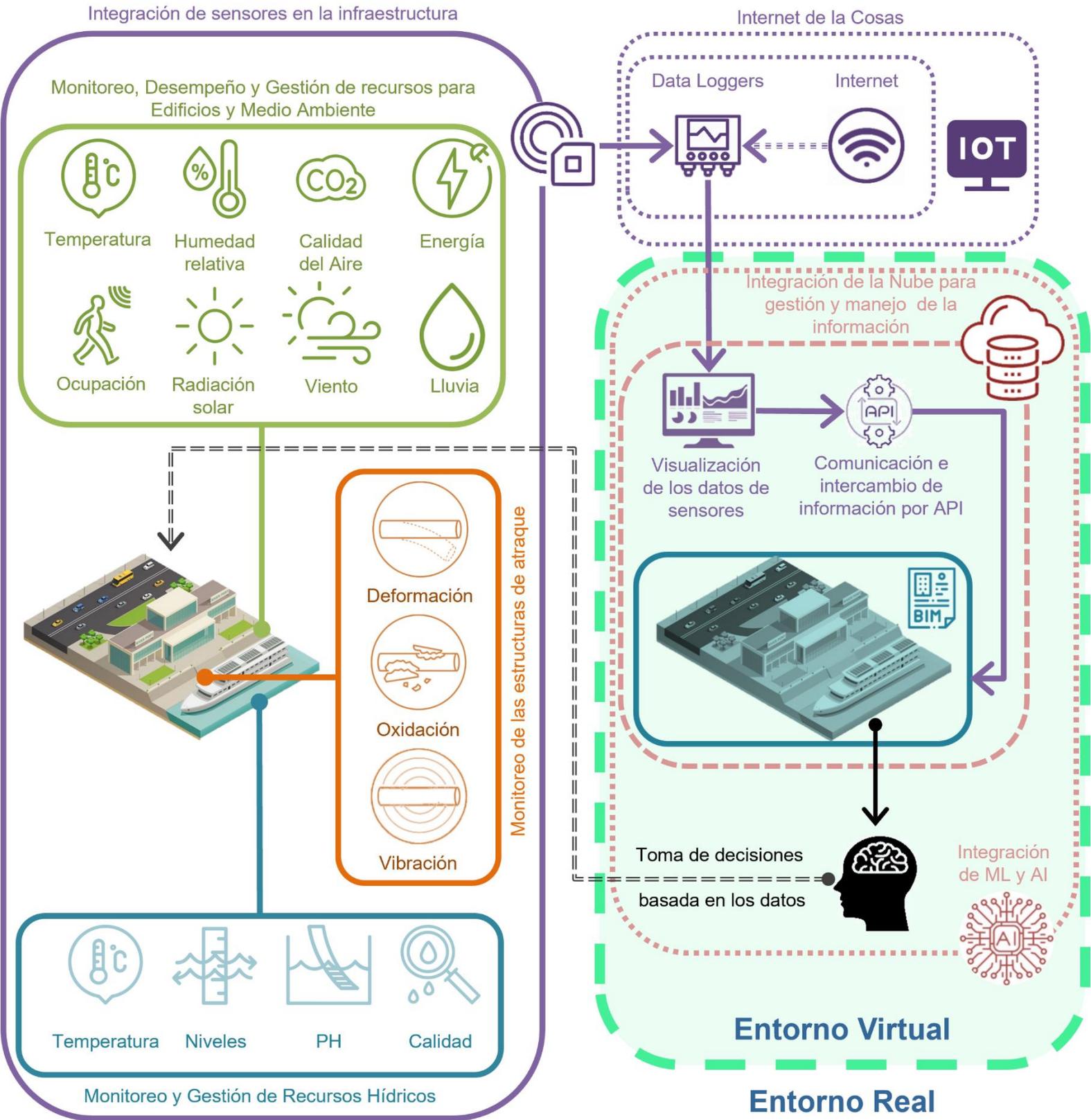


Ilustración 54. Paso 5: Integración de sensores, Paso 6: Integración de la Nube para el manejo de la información y Paso 7: Integración de aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (AI). Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.2.2 Integración de sensores

En la era digital, los datos en tiempo real y actualizados son fundamentales para optimizar la eficiencia operativa y tomar decisiones informadas. En el contexto del GD, los sensores pueden ser de una amplia variedad, incluyendo aquellos para monitorear variables, mecánicas, eléctricas entre muchas otras, dependiendo de las necesidades específicas de cada proyecto.

Estos datos en tiempo real permiten monitorizar y analizar el desempeño de la infraestructura en su totalidad, lo que puede ser usado para identificar y solucionar problemas rápidamente o predecir y prevenir problemas futuros lo cual puede ayudar a prolongar la vida útil de los equipos y a reducir los costos de mantenimiento, esto último con ayuda del ML y la AI.

#### 4.2.3 Integración de la Nube para el manejo de la información

Los servicios en la nube son esenciales en la implementación del GD debido a la magnitud de los datos involucrados, los cuales suelen superar la capacidad de los sistemas de almacenamiento local. La nube proporciona una solución de almacenamiento escalable, permitiendo el manejo eficiente de estos grandes volúmenes de datos, y asegurando su accesibilidad para todos los actores AECO, clave para la colaboración efectiva y la toma de decisiones.

Además, la nube ofrece una robusta seguridad de los datos, incluyendo cifrado, autenticación de usuarios, control de acceso y copias de seguridad. Este nivel de protección es crucial para prevenir la pérdida, el robo o el daño de la información vital contenida en el GD, lo cual resulta vital dado que estos datos pueden ser accedidos y utilizados en tiempo real por todas las partes interesadas autorizadas, sin importar su ubicación geográfica.

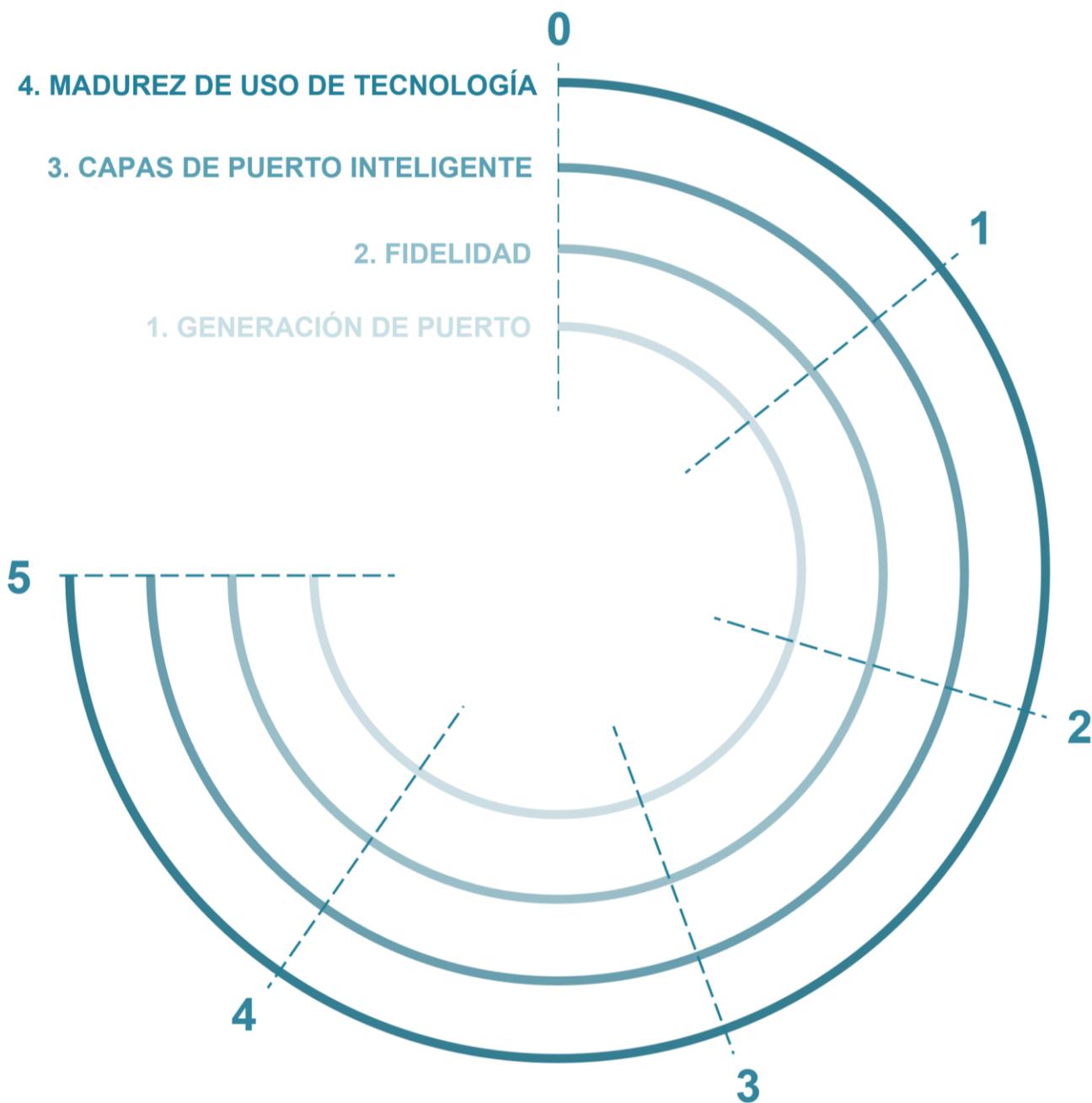
#### 4.2.4 Integración de aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (AI)

El ML y AI, son esenciales en el aprovechamiento del potencial de los GD, Estas tecnologías, deben ser diseñadas de manera específica para cada proyecto, los algoritmos de ML y AI, cual "trajes a medida", se adaptan a los objetivos del proyecto, los tipos de datos disponibles y las particularidades de la infraestructura física, permitiendo identificar tendencias, prever comportamientos futuros y tomar decisiones informadas.

Además, la IA puede potenciar la automatización de operaciones, mejorando la eficiencia y el rendimiento en áreas como la gestión de flujos de tráfico en un puerto marítimo o la regulación de la distribución de energía en una red eléctrica. Esta personalización de los modelos de ML y AI, integrada en el GD, es fundamental para responder adecuadamente a las necesidades y retos específicos del proyecto, proporcionando en tiempo real predicciones y recomendaciones que contribuyen a la optimización de la infraestructura y la reducción de costos.



## Herramienta de Evaluación de un GD de infraestructura marítimo-portuaria



**1. Generación del puerto:** Este rubro examina las diferentes etapas o fases por las que ha pasado la infraestructura de puerto

**2. Fidelidad:** Este criterio evalúa el nivel de detalle, precisión y exactitud con el que un GD representa la realidad.

**3. Capas de puerto inteligente:** Evalúa la organización de la información en el GD.

**4. Madurez en el uso de la Tecnología:** Este aspecto mide el nivel de desarrollo y aplicación del GD en la infraestructura.

### 4.3 Evaluación de un GD de infraestructura marítimo-portuaria

Para entender las fortalezas y debilidades de un GD es crucial cuantificar y clasificar su rendimiento basándose en diversos criterios, como se presentan en la *Tabla 2*, *Tabla 4*, *Tabla 5* y la *Ilustración 41*. A partir de estos criterios, se desarrolla una herramienta de evaluación para un GD específico de infraestructura marítima-portuaria. Esta herramienta se concentra en cuatro rubros esenciales que permiten evaluar su eficacia, funcionalidad y adaptabilidad a las necesidades del puerto. Cada rubro se califica en una escala de 0 a 5, de acuerdo con los siguientes criterios:

**Generación del puerto:** Este rubro examina las diferentes etapas o fases por las que ha pasado el puerto, y cómo éste ha respondido a las demandas del mercado y a los desafíos en infraestructura, sostenibilidad económica y ambiental, y eficiencia operativa. Desde los puertos de la primera generación, con funciones básicas de conexión entre lo terrestre y marítimo, hasta los modernos Smart Ports de quinta generación, que incorporan la tecnología IoT para operar.

**Fidelidad:** Este criterio evalúa el nivel de detalle, precisión y exactitud con el que el GD representa la infraestructura construida. Un GD con un alto grado de fidelidad puede utilizarse para la toma de decisiones operativas críticas, ya que ofrece una representación confiable y precisa del mundo físico.

**Capas de puerto inteligente:** Este rubro evalúa la organización de la información en el GD, especialmente en el contexto de una ciudad inteligente. Desde si aporta información básica sobre el terreno, hasta si el modelo permite la generación de simulaciones para resolver problemas o tomar acciones para nuevos proyectos. Cada capa añade un nivel de información y funcionalidad más complejo y sofisticado, lo que permite una gestión portuaria más eficiente y adaptativa.

**Madurez en el uso de la Tecnología:** Este aspecto mide el nivel de desarrollo y aplicación del GD en el puerto, desde la mera captura de la realidad hasta la operación y mantenimiento autónomos. Un puerto con un alto nivel de madurez tecnológica puede integrar y utilizar los datos en tiempo real para aumentar la eficiencia de las operaciones, e incluso controlar lo físico desde lo digital y lograr la autosuficiencia con total transparencia.

En conjunto, estos rubros proporcionan un marco de evaluación para analizar el nivel al que llega un GD de una infraestructura marítima-portuaria. De esta forma, es posible identificar las áreas de mejora y desarrollar estrategias para optimizar la implementación y el uso del GD en este tipo de entornos.



Ilustración 55. Terminal Internacional de Cruceros Cozumel. Fuente: SSA México

## 5. APLICACIÓN DEL FLUJO DE TRABAJO PARA LA ELABORACIÓN DEL GEMELO DIGITAL: ESTUDIO DE CASO DE LA TERMINAL INTERNACIONAL DE CRUCEROS DE SSA MÉXICO EN COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO

---

En el capítulo anterior, se desarrolló un flujo de trabajo teórico y una herramienta de evaluación para la creación y análisis de un GD en el contexto de infraestructuras marítimo-portuarias. Ahora, para demostrar la aplicabilidad y eficacia de este enfoque en un entorno del mundo real, realizaremos un estudio de caso.

La Terminal Internacional de Cruceros de Cozumel (TICC), ubicada en Quintana Roo, México, y que actualmente es operada por SSA Mexico. Esta es una infraestructura marítima de crucial importancia tanto para la economía local como nacional. Su actividad principal es la recepción de cruceros turísticos, lo que supone un gran desafío en términos de gestión logística, eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y económica.

Este capítulo se centrará en la aplicación práctica del flujo de trabajo teórico de GD a esta terminal de cruceros, permitiendo así una comprensión más profunda de cómo puede ser implementado. A lo largo de este capítulo, se describirán en detalle las etapas de aplicación del flujo de trabajo, así como los retos encontrados y las soluciones aplicadas.

Además, utilizando la herramienta de evaluación del GD diseñada en el capítulo anterior, se medirá y discutirá la eficacia del GD creado para la Terminal Internacional de Cruceros de Cozumel. Finalmente, se presentarán los resultados y conclusiones obtenidas a través de este estudio de caso, proporcionando una visión detallada y completa de cómo nuestra metodología de GD puede ser aplicada para mejorar y optimizar la gestión de infraestructuras marítimo-portuarias.

En última instancia, este capítulo busca demostrar cómo la metodología de creación de GD propuesta puede ser una herramienta invaluable para las áreas de la Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Operación, y cómo puede utilizarse para facilitar la transición hacia los puertos inteligentes.



1

## Adquisición de datos de la infraestructura construida



La adquisición de datos AEC para el GD de la TICC implicó el análisis de planos y documentos que detallan casi 50 años de modificaciones a la infraestructura. Se localizaron planos que datan de 1974 hasta 2023, documentando cambios significativos a la estructura de atraque.



En el año 2022, la empresa SSA Mexico, operadora de la Terminal Internacional de Cruceros Cozumel, recibió la solicitud de entregar una Ortofoto de sus instalaciones. A partir de esta petición, la empresa reunió información procedente de fotografías tomadas por un dron. Estas imágenes no solo pueden ser útiles para generar una Ortofoto precisa, sino que también pueden ser procesadas para crear una nube de puntos. Esta nube de puntos puede ser utilizada para generar un modelo 3D detallado del área existente, proporcionando una representación precisa y actualizada de las instalaciones.



No existen ni se han implementado sensores en estructuras de atraque



Datos batimétricos para una representación detallada del lecho marino.



Datos batimétricos para una representación detallada del lecho marino.



Dimensiones de las embarcaciones que se reciben en las estructuras de atraque.



No existen ni se han implementado sensores en estructuras de atraque

## 5.1 Bases del Gemelo Digital: adquisición, procesamiento y visualización de la Terminal Internacional de Cruceros de Cozumel (TICC) de SSA México

Cabe destacar que, dada la cantidad de información para este ejercicio de la creación del GD de la TICC, se enfocará en la infraestructura que se considera más importante, para este caso es el de la estructura de Atraque o Muelle. La base para la creación del GD para la TICC inició con la esencial pero desafiante tarea de recopilar información de la terminal. La información recolectada va desde planos de construcción hasta batimetrías, cada uno de estos datos formaran la base para el desarrollo del GD.

Una vez adquiridos, el siguiente paso consistió en procesar y organizar toda la información en un entorno de Modelado de Información de Construcción (BIM). Este paso es de suma importancia, ya que la calidad de la información integrada impacta directamente en la utilidad del GD. En esta sección, se describe el proceso para la creación de las bases para el GD de la TICC, siguiendo el flujo de propuesto en el *CAPITULO 4*.

### 5.1.1 Adquisición de datos de la infraestructura TICC

Para el GD de la TICC, el primer paso fue la adquisición de datos. Este proceso implicó la recolección de toda la información necesaria para replicar la infraestructura de la terminal en un entorno digital, en específico las estructuras de atraque. Información que provino de la operadora de las instalaciones, con diversos formatos y fechas.

Se recopilaron planos de “Proyecto” y “Como Construidos”, aunque algunos son antiguos, proporcionaron detalles vitales sobre la estructura, su diseño y evolución en el tiempo. Mismos que pueden servir como punto de partida para el modelado 3D de esa información y su integración en el entorno de BIM. Además, se recurrió a la fotogrametría, para adquirir datos del estado actual y poder comparar con los planos obtenidos. También se obtuvieron algunos informes de inspecciones y evaluaciones previas de la infraestructura, proporcionando una valiosa fuente de datos adicional.

Un componente fundamental es la información de las batimetrías. Los datos batimétricos proporcionaron una representación detallada del lecho marino y el terreno en el que se asienta la terminal, datos que son cruciales para entender cómo la infraestructura interactúa con su entorno marítimo. Afortunadamente se contaba con información, la cual se pudo cruzar con información en línea que permite comparar unas bases de datos de consulta abierta contra información de diferentes años y como esta pudo haber cambiado.

En resumen, a través de una combinación de fuentes de datos, se pudo recopilar una amplia variedad de información, desde planos de construcción hasta datos batimétricos, formando una base sólida para la poder proceder con la creación del GD.

Tabla 14. Resumen de Información AEC recopilada. Fuente: Elaboración propia.

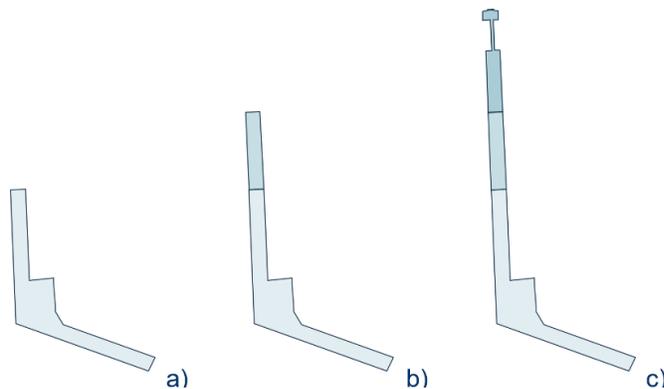
Año	Información AEC Recogida	Crucero de diseño	Pasajeros	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	GT (ton)	Información Adicional
1974	Plano hecho a mano de la segunda estructura de atraque	Ferris y clase "Bolero"	900	138	23	6.6	15,781	-
1988	Planos de reconstrucción del muelle	"Sovereign"	2,700	268.33	32.21	7.55	73,192 a 73,941	-
1997	Planos de extensión del muelle	"Vision"	2,450	279.20 a 301.36	32.31	7.62	74,000 a 82,910	Niveles batimétricos impresos
2005	-	-	-	-	-	-	-	Huracán Wilma golpea Cozumel, causando daños a la TICC
2006	Proyecto de reconstrucción de las estructuras de atraque en formato DWG	"Freedom"	3,634	338.91	38.91	8.53	154,407	Levantamiento batimétricos DWG (con error en georreferencia)
2009	"As Built" de la ampliación del muelle y un duque de alba	"Voyager"	3,386	311	38.6	9.124	139,999	Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) 2009
		"Oasis"	5,600	360	47	9.322	226,836	
2010	-	-	-	-	-	-	-	Levantamiento batimétricos DWG (con error en georreferencia)
2011	"As Built" de otra ampliación del muelle	-	-	-	-	-	-	MIA 2019 para corroborar las actualizaciones
2015	-	-	-	-	-	-	-	Levantamiento batimétricos DWG (con error en georreferencia)
2018	-	-	-	-	-	-	-	Levantamiento batimétrico DWG
2019	-	-	-	-	-	-	-	Estudio de Modelación Hidrodinámica y Dispersión de Sedimentos

La adquisición de datos para el GD de la TICC implicó el análisis de planos y documentos que nos relatan diversas modificaciones a lo largo de casi medio siglo de historia de esta infraestructura, En la *Tabla 14* se presenta un resumen de la información AEC encontrada ya que Cozumel empezó a recibir cruceros en 1968, sin una infraestructura específica para su atraque.

De Noviembre de 1974, se recopilaron planos, hechos a mano, de la segunda estructura de atraque de la isla, diseñada para ferris y cruceros de hasta 900 pasajeros con las siguientes características: Eslora de 138 m, Manga de 23 m, Calado de 6.6m y un Tonelaje bruto (GT) <sup>41</sup> de 15,781 ton.

De Julio de 1988, se encontraron planos de una reconstrucción del muelle, para atender a cruceros clase "Sovereign", con una capacidad de 2,700 pasajeros y las siguientes características: Eslora de 268.33m, Manga de 32.21m, Calado de 7.55m y un GT de 73,192 a 73,941 ton.

De Octubre de 1997, se localizaron planos de una extensión del muelle, para atender a cruceros de clase "Vision", con capacidad para 2,450 pasajeros y las siguientes características: Eslora de 279.20m a 301.36 m, Manga de 32.31m, Calado de 7.62m y un GT de 74,000 a 82,910 ton. Estos planos, escaneados de versiones impresas, reflejan la transición a tecnologías CAD<sup>42</sup>.



*Ilustración 57. Evolución de la estructura de atraque en la TICC. A) 1974, b) 1988 y c) 1997  
Fuente: Elaboración propia con información de SSA México.*

A pesar de su antigüedad, estos documentos son fundamentales, ya que brindan una perspectiva histórica del diseño inicial y funcionalidad de la estructura de atraque, ver *Ilustración 57*, y su evolución con la tecnología y el crecimiento de los cruceros.

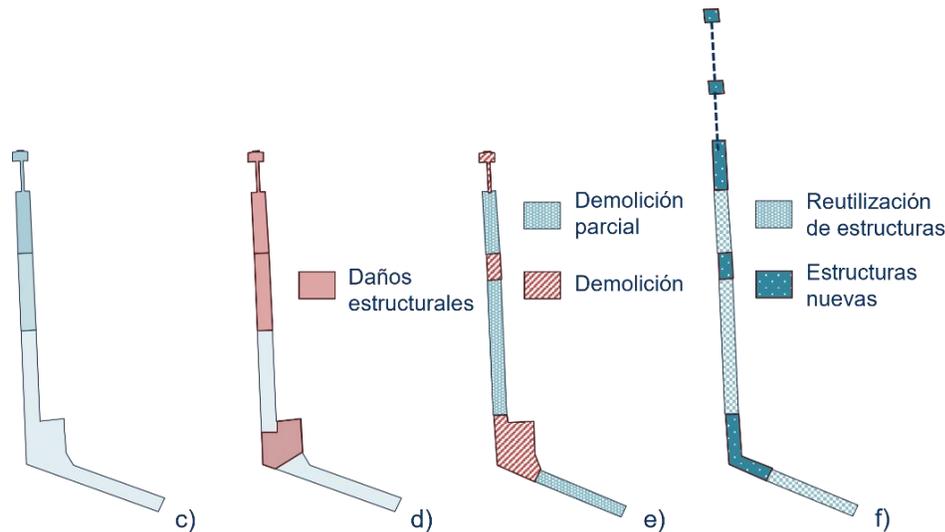
<sup>41</sup> El "tonelaje bruto" o "gross tonnage (GT)" en el contexto de los cruceros, se refiere a una medida no dimensional y es una forma de calcular y expresar el volumen total de un buque. Esta medida se utiliza en la industria naviera para determinar las regulaciones y tarifas que se aplican a un barco, así como para evaluar su capacidad y tamaño.

<sup>42</sup> CAD, un acrónimo de Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora).

En Octubre del 2005, el paso del huracán Wilma golpeo fuertemente la isla de Cozumel, entre los diversos daños ocasionados afecto directamente la TICC. Debido a lo anterior se perdieron elementos de la estructura de atraque y un duque de alba. Las afectaciones fueron de tal magnitud que además de esta estructura de atraque, las otras dos existentes en la isla, en esos años, fueron reconstruidas.

De Mayo del 2006, se recopiló todo el proyecto de reparación de las estructuras de atraque en formato DWG<sup>43</sup>. Estos archivos proporcionaron una visión completa de los daños por Wilma, así como la toma de decisiones para la reconstrucción de las estructuras de atraque, donde en algunas secciones se reutilizó la cimentación existente y en otras se optó por la demolición total para construir la estructura del muelle y dos duques de alba, que fueron completamente nuevos, ver *Ilustración 58*.

Las dimensiones propuestas del diseño de 2006 son resultado, además de la reconstrucción, de atender a cruceros de clase "Freedom", con capacidad para 3,634 pasajeros y las siguientes características: Eslora de 338.91m, Manga de 38.91m, Calado de 8.53m y un GT de 154,407 ton.



*Ilustración 58. Afectación en las estructuras de atraque provocadas por el paso de Wilma en 2006. c) Estructura en 1997 d) 2005, Daños en estructuras e) 2006, Acciones tomadas para reconstrucción de estructuras de atraque f) 2008, Composición de reconstrucción de Estructuras de Atraque. Fuente: Elaboración propia con información de SSA México.*

<sup>43</sup> DWG es un formato de archivo utilizado para almacenar datos y metadatos de diseños 2D y 3D, mapas y fotos. El nombre DWG proviene de la palabra "drawing", que significa dibujo en inglés.

De Noviembre de 2009, se obtuvieron "As Built"<sup>44</sup> que detalla la ampliación del muelle y un duque de alba, que responde a atender dos embarcaciones; En banda interna hasta un clase "Voyager", con capacidad para 3,386 pasajeros y las siguientes características: Eslora de 311m, Manga de 38.6m, Calado de 9.124m y un GT de 139,999 ton.; En banda externa un clase "Oasis", con capacidad para 5,600 pasajeros y las siguientes características: Eslora de 360m, Manga de 47m, Calado de 9.322m y un GT de 226,836 ton. Como resultado el Muelle paso de 12m a 17m, ampliando su banda interna.

De 2011, se encontró información "As Built" de otra ampliación del muelle, este corresponde al tramo que conecta las estructuras de atraque con el acceso a la TICC. Esta ampliación fue de 7m en la banda externa, pasando de 10m a 17m, de esta manera se homologa el ancho de la estructura en toda su longitud y se genera un espacio para el mejor flujo de pasajeros.

Finalmente, los planos "As Built" más recientes son de junio 2023, estos proporcionan información actual de las estructuras de atraque, esta se compone de la construcción de un nuevo duque de amarre y la conexión entre el muelle y un duque de alba. Esta actualización de la infraestructura parte poder recibir, en 2024, cruceros clase "Icon", con capacidad para 7,600 pasajeros y las siguientes características: Eslora de 365m, Manga de 65m, Calado de 9.124m y un GT de 250,800 ton.

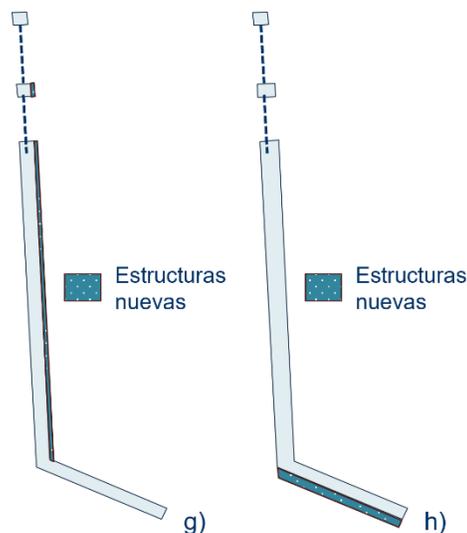


Ilustración 59. Evolución de la estructura de atraque en la TICC. g) 2009 h)2011 i)2023 j)Estado actual de las estructuras de atraque (Julio 2023). Fuente: Elaboración propia con información de SSA México.

<sup>44</sup> "As built" es un término utilizado en arquitectura, ingeniería y construcción para describir los dibujos técnicos que muestran la condición real y exacta de una estructura o infraestructura después de que se ha completado la construcción o las modificaciones.

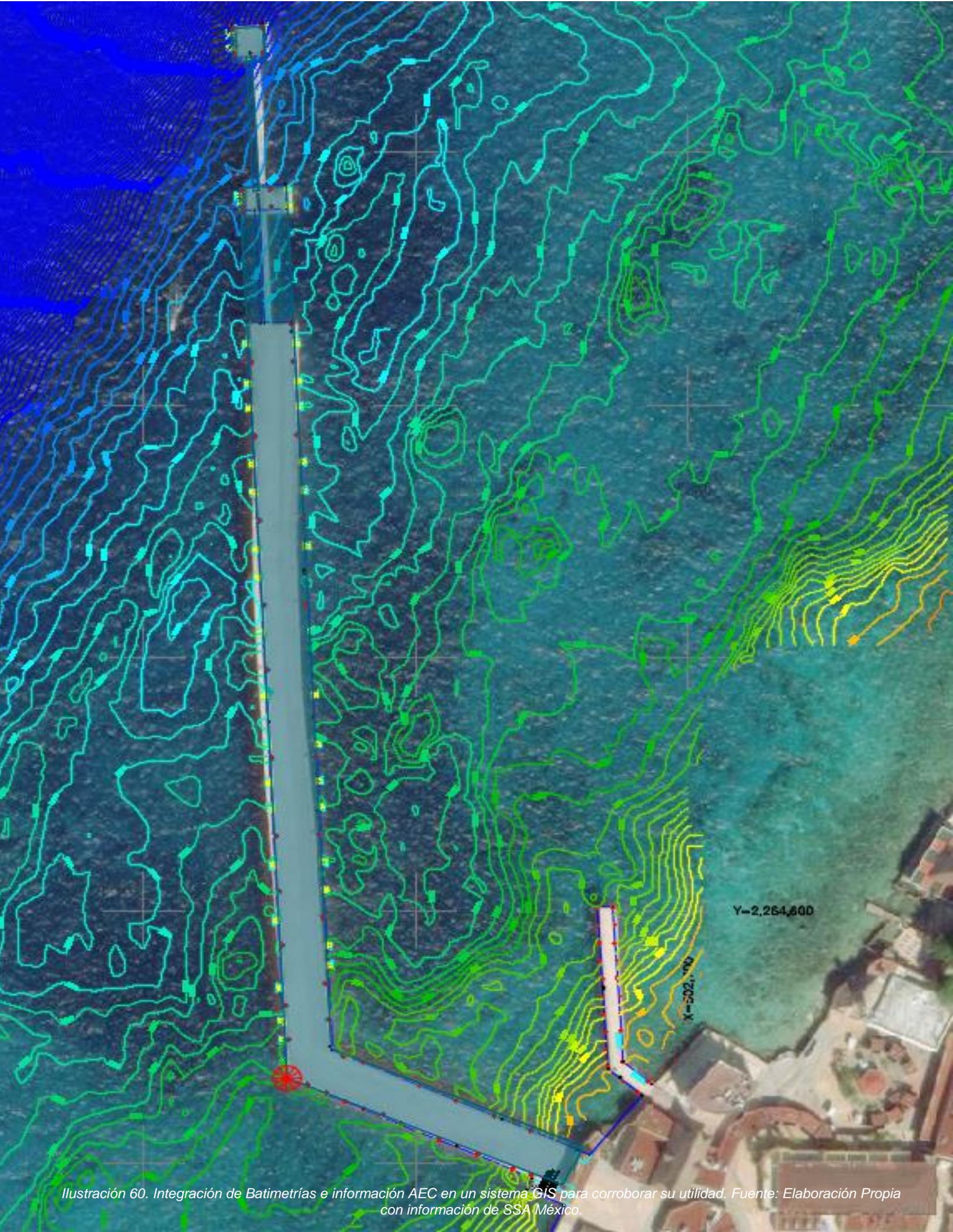


Ilustración 60. Integración de Batimetrías e información AEC en un sistema GIS para corroborar su utilidad. Fuente: Elaboración Propia con información de SSA México.

Además de la información AEC sobre la estructura, se obtuvo información adicional de registros fotográficos y otros documentos relevantes como son los que se describen a continuación.

De 2009 en adelante se cuenta con una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) que describe entre sus antecedentes las ampliaciones a partir de 1997 y todas las que se llevaron a cabo hasta la reconstrucción de 2006, en lo referentes a las estructuras de atraque. Lo que sirve para corroborar las ampliaciones descritas de la información AEC. También se ubicó una MIA de Junio de 2019, para la modernización de las estructuras de atraque, que fue realizada en 2022 y 2023, misma que sirvió para corroborar otras actualizaciones como la realizada en 2011.

De noviembre de 2022, la empresa SSA Mexico, operadora de la TICC, recibió la solicitud de presentar una Ortofoto de sus instalaciones. A partir de esta petición, la empresa reunió información procedente de fotografías tomadas por un dron. Estas imágenes son útiles para ser procesadas para crear una nube de puntos. Esta nube de puntos puede ser utilizada para generar un modelo 3D detallado del área existente, proporcionando una representación precisa y actualizada de las instalaciones.

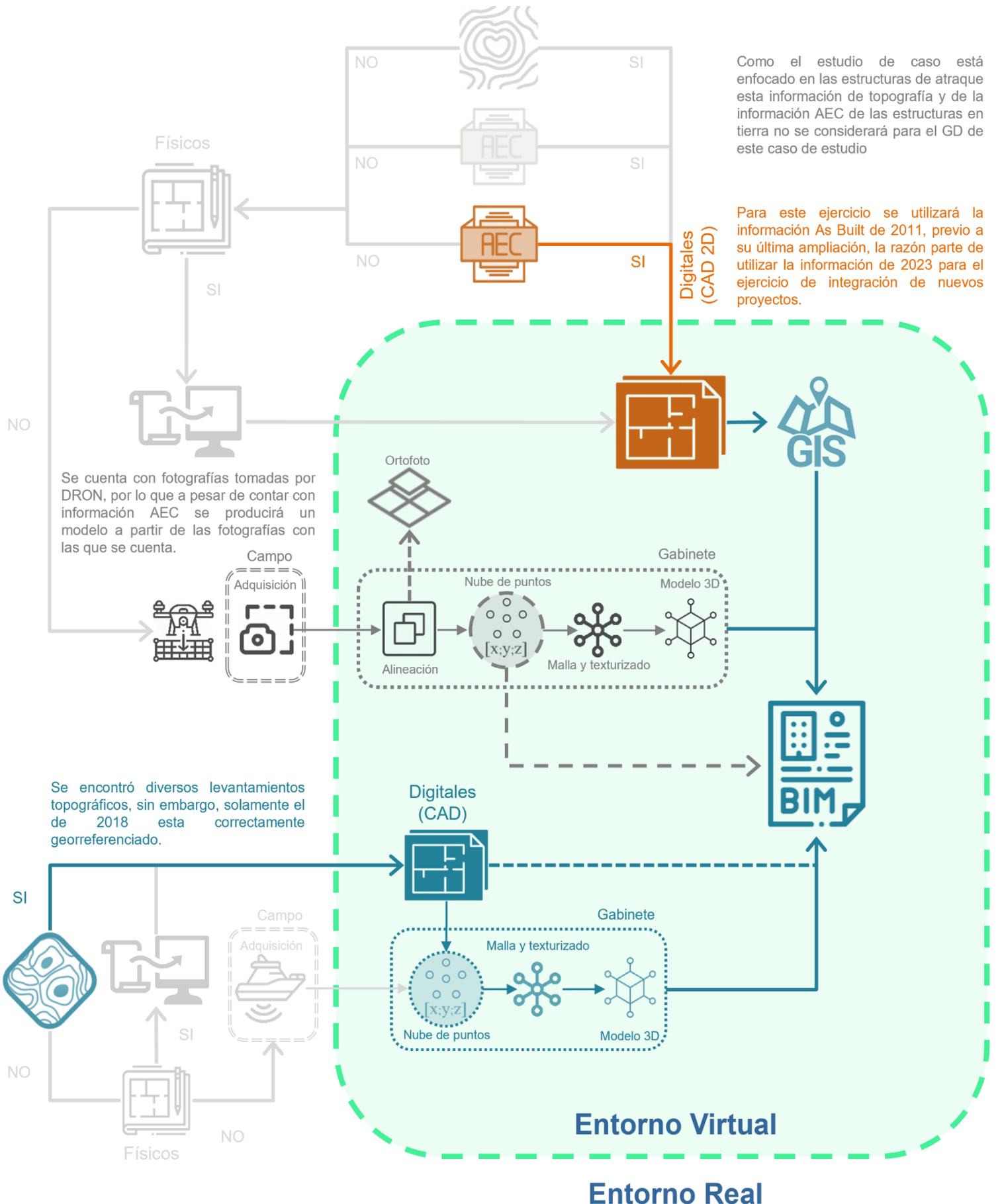
En lo referente a información del área de agua, en los planos de proyectos previos a la reparación de 2006 se encontró información que, hacía referencia a los niveles batimétricos en las áreas circundantes a las estructuras de atraque, para ser exactos en los planos de la ampliación de 1997, pero esta información no es de mucha utilidad ya que se trata de un escaneo de planos impresos. Sin embargo, se cuenta con los levantamientos batimétricos en formato DWG de los siguientes años: 2006, 2010, 2015 y 2018.

De la información de las batimetrías se encontró que la única que está debidamente georreferenciada es la del año 2018, por lo que para su uso solo será tomada en cuenta esa. En la *Ilustración 60*, se puede apreciar una imagen donde se georreferencia esta información recolectada y se pueden apreciar los niveles batimétricos, una fotografía aérea georreferenciada de AutoCAD y la última información ASBUILT de las estructuras de Atraque.

Además, se cuenta con estudios de Modelación hidrodinámica y dispersión de sedimentos en el área de la TICC, estos corresponden a los años 2019 y 2023. En resumen, la suma, la riqueza y la diversidad de la información recopilada servirán como información para formar una base sólida para la creación del GD de la TICC.



## 2 Procesamiento de la información recopilada de la TICC para integrarla en un entorno BIM



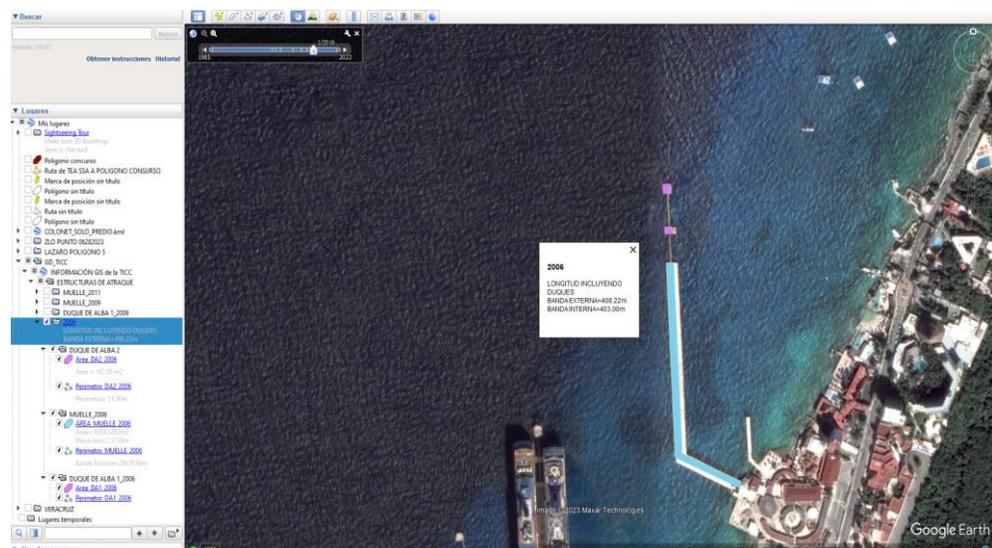
### 5.1.2 Procesamiento de la información recopilada de la TICC para integrarla en un entorno BIM

La construcción del GD precisa de varias etapas esenciales, la recolección de datos fue la inicial. Sin embargo, estos datos solos no son suficientemente útiles hasta que se procesan y se estructuran en un formato que pueda integrarlo como es el software BIM. Este procesamiento de la información recogida de la TICC es un paso vital para desarrollar un GD que refleje con precisión y funcionalidad el objeto real.

Se sugiere manejar inicialmente la información en un formato 2D para su gestión eficaz. Este enfoque simplifica su presentación en plataformas GIS, permitiendo un control de la información más ajustado a las necesidades de distintos tipos de usuarios. Así, tanto los equipos AEC como otras áreas pueden acceder a información menos gráficamente intensiva.

Como primer paso, se convertirá la información de las diferentes etapas a un formato GIS que permita su visualización en una plataforma de acceso abierto, y que además contenga información relevante de la infraestructura. En este caso, se utilizó la información de las estructuras de 2006 a 2011 para analizar cómo evolucionaron las estructuras de atraque en función de la capacidad de la TICC para recibir cruceros.

La *Ilustración 62*, presenta la integración en formato 2D de la estructura de 2006 tras la reconstrucción, inserta en Google Earth y comparada con la estructura en una imagen satelital de 2012. Este primer modelo digital es de gran utilidad para asegurar que la información que se tiene está debidamente georreferenciada y es útil para el desarrollo del GD.



*Ilustración 62. Modelo Digital 2D de la TICC inserto en plataforma GIS. Fuente: Elaboración propia*

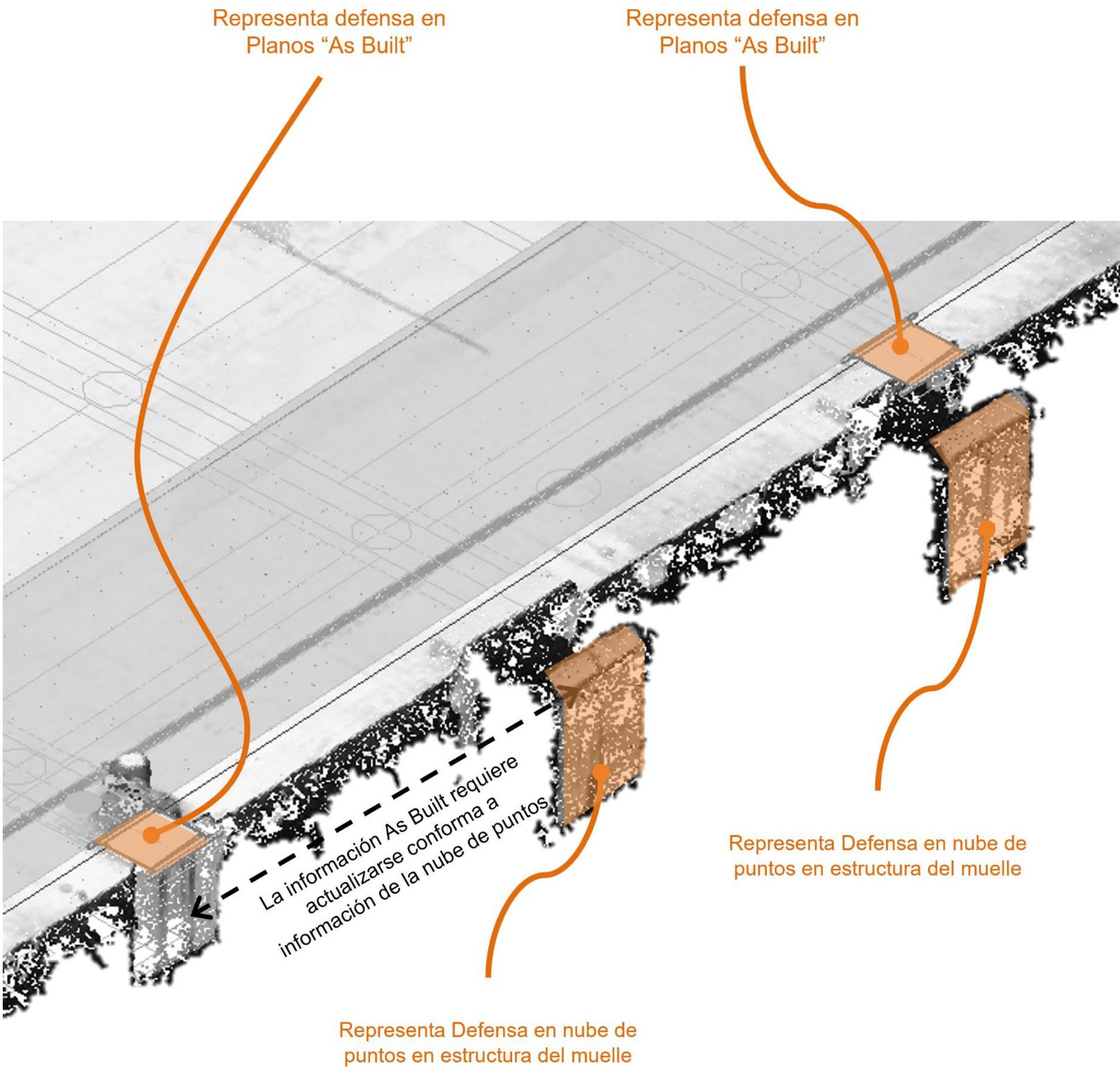
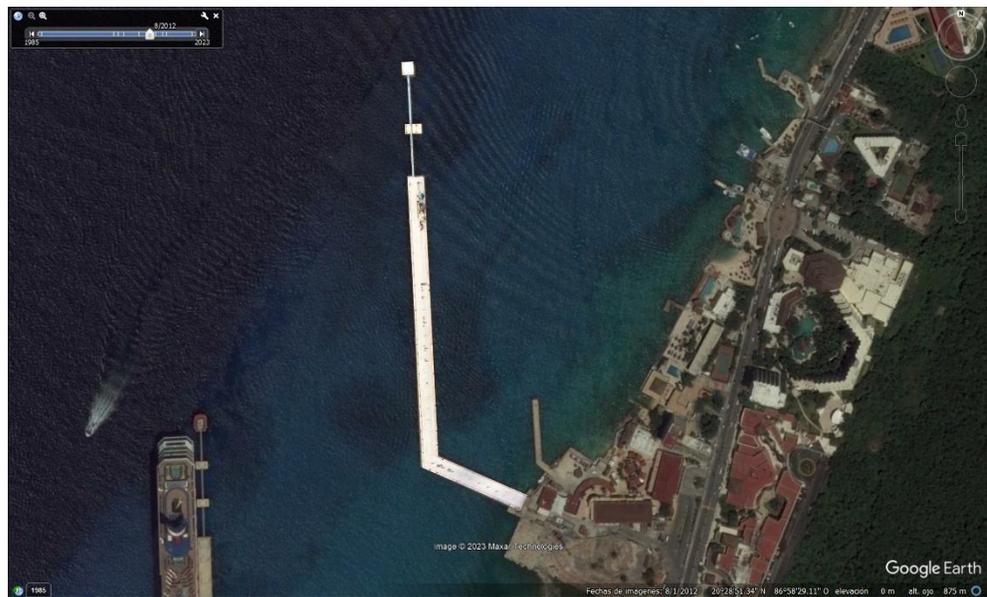


Ilustración 63. Diferencias encontradas en el cruce información de los planos "As Built" y la Nube de puntos de las estructuras de atraque. Fuente: Elaboración propia.

En el flujo de trabajo el siguiente paso para este caso de estudio es contrastar la información de fotogrametría contra los planos As built y esta información también integrarla en un entorno GIS, en principio, para después pasar a un entorno BIM.

Se obtuvo una nube de puntos a partir de 128 imágenes, conformando el archivo de nube de puntos y una ortofoto, ambos georreferenciados, para utilizar como base del modelo y compararlas con la información de los planos DWG. Esta comparación permitirá realizar las correcciones necesarias en el gemelo digital para que corresponda a la realidad. En la *Ilustración 64* se puede observar la ortofoto insertada en la plataforma de Google Earth.

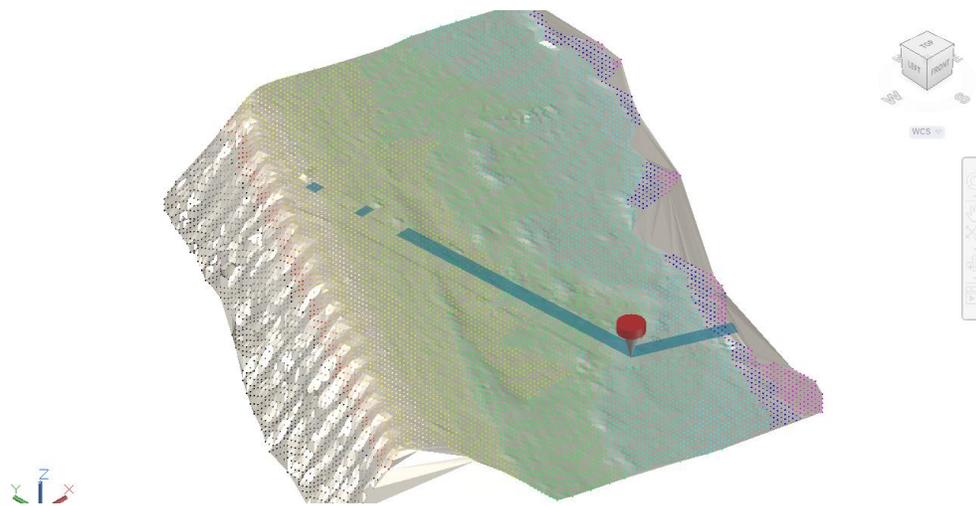


*Ilustración 64. Ortofoto georreferenciada obtenida de las fotografías de las estructuras de atraque. Fuente: Elaboración propia.*

Una vez que se georreferenciaron diversos datos como los planos As built y la nube de puntos en una plataforma CAD, se identificaron diferencias en los elementos de las estructuras de atraque. Por ejemplo, en la *Ilustración 63*, se puede observar que la ubicación de las defensas del muelle no está correctamente georreferenciada y/o ubicada en la documentación As Built. Por lo tanto, es necesario modificar los planos As Built para que correspondan a la realidad y esta información pueda ser útil para el desarrollo del GD.

Con lo anterior se vuelve necesario modificar los planos para que estos correspondan a la realidad y esta información pueda ser útil para el desarrollo del GD.

Con la información referente a el área de mar, se obtuvieron distintas batimetrías que la operadora ha realizado de manera regular, estas han sido realizadas como parte de la información que se solicita para hacer diversos estudios. Sin embargo, solo la de año 2018 fue la que se obtuvo con un archivo .XYZ<sup>45</sup>. Este archivo es el que se utilizó para poder exportarse como nube de puntos y con ella procesar la información para obtener un modelo digital de elevaciones del terreno y su modelo 3D como se muestra en la *Ilustración 65*.



*Ilustración 65. Nube de puntos de la batimetría de 2018 obtenida del archivo .XYZ y modelo 3D de lecho marino. Fuente: Elaboración Propia*

De acuerdo con el flujo de trabajo propuesto, el siguiente paso es integrar la información en un entorno BIM. En este caso, la información que se integrará en un archivo incluirá la batimetría y las estructuras de atraque para generar un Gemelo digital 3D. Además, los niveles de la batimetría se pasarán a un formato compatible para ser visualizados en Google Earth, así como las bitas y defensa de las estructuras de atraque, lo que lo convierte en un Gemelo Digital 2D que será muy útil para el área de operaciones, a este nivel de información se pueden realizar simulaciones de atraque<sup>46</sup>. En la *Ilustración 66*, se muestra el GD inserto en el entorno de Google Earth combinando información 3d con datos en 2d de las estructuras de apoyo al muelle como son las bitas y algunos datos de ellas.

---

<sup>45</sup> Un archivo XYZ es un formato de archivo de texto plano que contiene información tridimensional (X, Y, Z) en un formato muy simple. Se utiliza comúnmente en una variedad de aplicaciones, incluyendo sistemas de información geográfica (GIS), modelado 3D y visualización de datos tridimensionales.

<sup>46</sup> Un simulador de atraque de cruceros o embarcaciones es una herramienta tecnológica que replica las condiciones de atraque en un puerto. Permite a los navegantes practicar maniobras de atraque en un entorno virtual, ofreciendo una experiencia realista y segura. Es fundamental en la formación y evaluación de las habilidades marítimas.



1

Capacidad: 100T  
Año de instalación: 2011  
Estado: Óptimo

Cómo llegar: [Aquí](#) - [De aquí](#)

3

### Utilización del entorno BIM para visualizar la infraestructura construida de la TICC

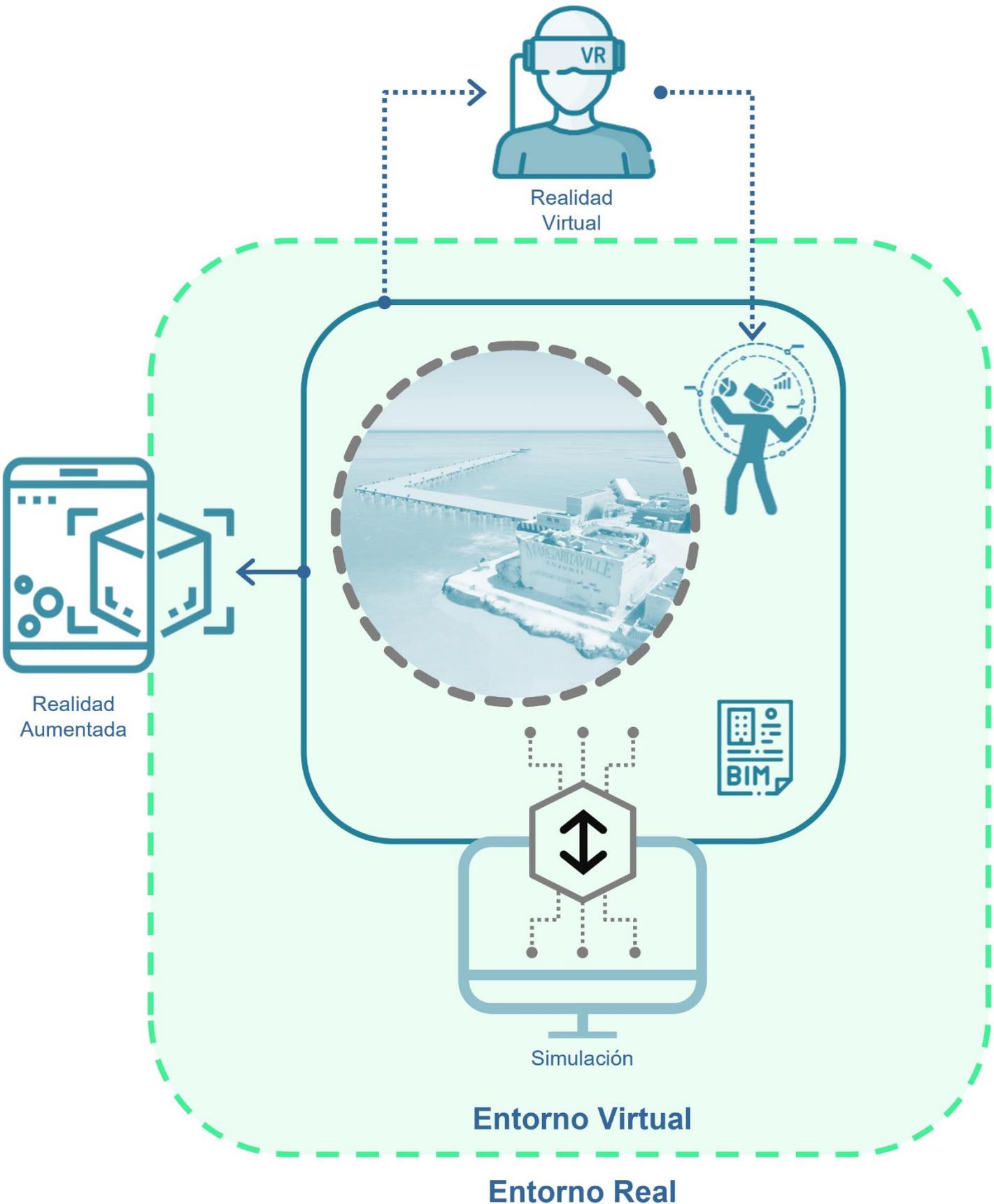


Ilustración 67. Paso 3: Utilización del entorno BIM para visualizar la infraestructura construida. Fuente: Elaboración Propia.

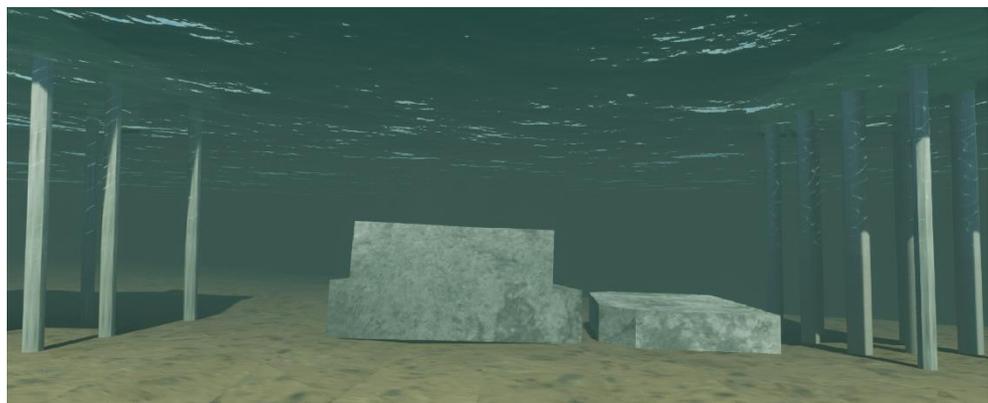
### 5.1.3 Utilización del entorno BIM para visualizar la infraestructura construida de la TICC

Una vez procesados los datos y construido el modelo 3D en el entorno de BIM, el siguiente paso es visualizar la infraestructura en formato digital. BIM, como enfoque integrado para la gestión de la información de construcción, proporciona una representación digital precisa, detallada y tridimensional de la infraestructura. Esta visualización es esencial ya que ofrece una visión realista útil para diversas aplicaciones del GD.

Los entornos BIM no solo permiten la visualización en 3D, sino también la interacción con el modelo para realizar diversas tareas. Esta interacción facilita la comprensión del diseño y funcionamiento de la infraestructura, siendo útil para los responsables de la toma de decisiones, los equipos de Arquitectura, Ingeniería, Construcción y el personal de operaciones (AECO). Esta etapa supone una conexión del entorno real con el entorno virtual.

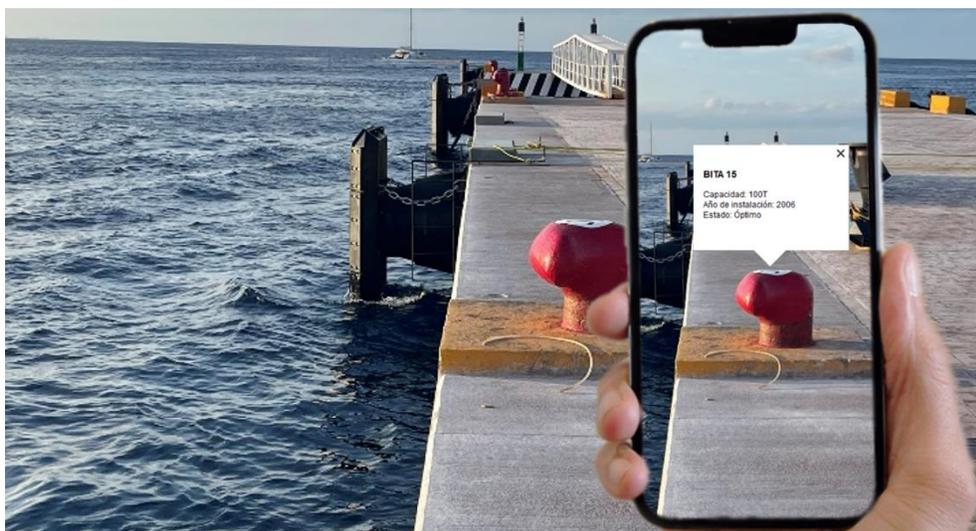
Un uso práctico de la VR en la infraestructura marítimo-portuaria podría ser para los directivos de las empresas concesionarias, permitiendo realizar recorridos virtuales ofreciendo una comprensión intuitiva y realista de los activos construidos sin la necesidad de estar físicamente presentes. Además de ahorrar costos de viáticos y logística, facilitaría la familiarización con esta infraestructura, permitiendo la exploración inmersiva de los activos existentes además promoviendo una mejor comprensión y manejo de estos.

Por ejemplo, en la *Ilustración 68*, se presenta una captura un recorrido virtual donde se presentan algunos de los escombros generados por el huracán Wilma y que no pudieron ser retirados debido a la complejidad que esto implicaba. Debido a lo anterior durante la construcción se tuvo que dejar este espacio entre al duque de alba y la estructura del muelle, cuando originalmente la intención era tener toda esa longitud de muelle.



*Ilustración 68. Captura de recorrido virtual de la TICC, muestra escombros generados por huracán Wilma. Fuente: Elaboración Propia.*

La AR, combina datos digitales y realidad física, puede revelar información "invisible" de la infraestructura, convirtiéndolo en una herramienta para mantenimiento o prevención de daños durante intervenciones a la infraestructura. También puede ser útil para mostrar datos relacionados con la infraestructura, como el costo de algún elemento, año de construcción, tiempo de vida de los elementos, entre otros, como se muestra en la *Ilustración 69*, proporcionando una visualización de datos integral, enriqueciendo la comprensión y el manejo de la infraestructura marítimo-portuaria.



*Ilustración 69. AR aplicado a los elementos del muelle, el ejemplo se muestra información relacionada con la Bita 15 de las estructuras de atraque. Fuente: Elaboración propia.*

Además, los entornos BIM permiten realizar simulaciones o, en su caso, el intercambio de información modelada para simulaciones específicas. Estas pueden ser útiles para predecir y planificar las operaciones de la infraestructura. Por ejemplo, pueden simularse situaciones de tráfico para entender cómo las embarcaciones de nuevas dimensiones atracarán en la infraestructura existente, o el flujo de peatones en un muelle para el desembarque, ayudando a identificar posibles problemas y soluciones antes de que ocurran en la realidad.

Como caso práctico del uso de herramientas de simulación y visualización a continuación, se usarán los datos de la Estación Mareográfica de Cozumel, Q. Roo., de los planos de mareas referidos al nivel de bajamar media inferior para realizar una simulación de la afectación del incremento del nivel del mar estimado con base en las Proyecciones del Nivel del Mar del Sexto Informe de Evaluación del IPCC<sup>47</sup>, la información se encuentra en la *Tabla 15*.

---

<sup>47</sup>Intergovernmental Panel on Climate Change, establecida en 1988 por la World Meteorological Organization (WMO) y el United Nations Environment Programme (UNEP)

Tabla 15. Proyección de nuevos planos de mareas. Fuente: Elaboración Propia.

Año	Promedio de elevación	Proyección de nuevos planos de mareas	Nivel	Planos de mareas Cozumel
2030	0.155 m	0.945 m	0.790 m	Pleamar máxima registrada
		0.312 m	0.157 m	Nivel medio del mar
2040	0.228 m	1.018 m	0.790 m	Pleamar máxima registrada
		0.385 m	0.157 m	Nivel medio del mar
2050	0.658 m	1.448 m	0.790 m	Pleamar máxima registrada
		0.815 m	0.157 m	Nivel medio del mar
2100	0.806 m	1.596 m	0.790 m	Pleamar máxima registrada
		0.963 m	0.157 m	Nivel medio del mar

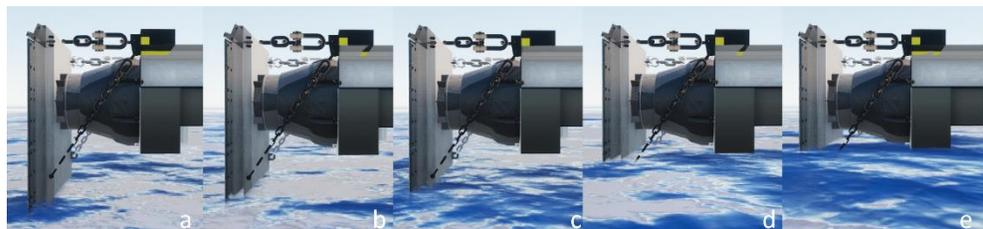


Ilustración 70. Visualización de aumento estimado del nivel medio del mar. a)2024, b)2030, c) 2040, d)2050 y e)2100. Fuente: Elaboración propia.

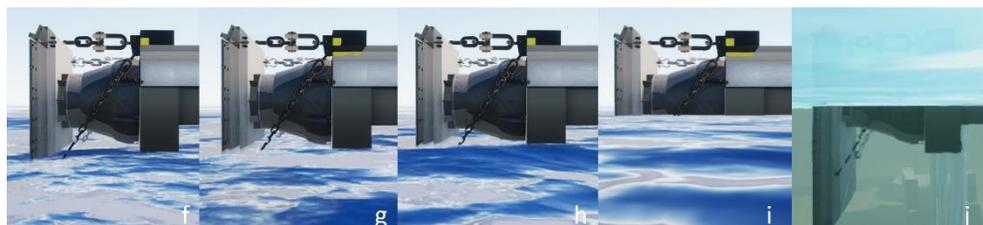


Ilustración 71. Visualización de aumento estimado de la pleamar máxima. f) 2024, g) 2030, h) 2040, i)2050 y j)2100. Fuente: Elaboración propia.

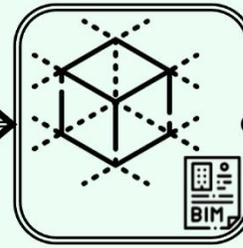
En resumen, el entorno BIM proporciona herramientas para visualizar e interactuar con la infraestructura construida de manera detallada y realista. A través del uso de VR y AR, así como de simulaciones, los responsables de la toma de decisiones y los equipos de operación pueden obtener una comprensión más profunda de la infraestructura, identificando posibles problemas y soluciones antes de que ocurran en la realidad. Sin embargo, el potencial futuro del GD radica en su optimización y actualización continua.

4

# Adición y Visualización de Nuevos Proyectos en el Gemelo Digital de la TICC



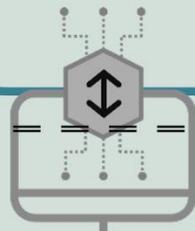
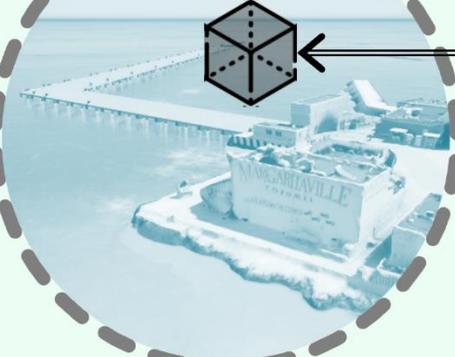
Aprobado para Construcción



SI

GD Actualizado  
(Integración de Nuevas Construcciones)

GD Estado Actual  
(previo a Nuevos Proyectos)



Toma de decisiones  
del nuevo proyecto

NO

Ajustes al proyecto

Modelo digital del nuevo  
proyecto



Entorno Virtual

Entorno Real

Ilustración 72. Paso 4: Adición y Visualización de Nuevos Proyectos en el Gemelo Digital de la TICC. Fuente: Elaboración Propia.

## 5.2 Optimización y actualización del Gemelo Digital de la TICC

Esta sección aborda la segunda fase de evolución del GD, alineándose con el flujo propuesto en las secciones previas. La intención primordial es la mejora y actualización de la información contenida en el GD. Durante la realización de esta maestría, se efectuó una adaptación de la infraestructura, que, consecuentemente, requiere la actualización del GD. Adicionalmente, se explicará el uso del almacenamiento en la nube.

Debido a las restricciones de tiempo de la maestría, no fue viable la incorporación de sensores en esta investigación. Sin embargo, se delineará una serie de opciones sobre cómo se podría implementar la utilización de sensores en futuras investigaciones. Además, si bien las tecnologías de aprendizaje automático e inteligencia artificial no se han integrado en esta etapa, es crucial considerar su potencial en investigaciones subsecuentes. Es indiscutible que un GD en constante evolución es una herramienta esencial para decisiones informadas en el sector marítimo-portuario.

### 5.2.1 Adición y Visualización de Nuevos Proyectos en el Gemelo Digital de la TICC

El dinamismo y la adaptabilidad son características intrínsecas de un GD, permitiendo la actualización y expansión conforme a los cambios y mejoras en la infraestructura real. Bajo esta premisa, se han incorporado al GD de la TICC importantes actualizaciones correspondientes al primer semestre del 2023, ver .

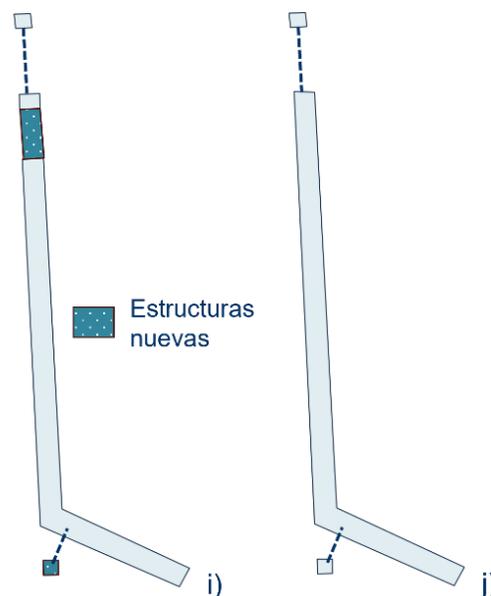


Ilustración 73. Evolución de la estructura de atraque en la TICC. i)2023 j)Estado actual de las estructuras de atraque (Julio 2023).

Uno de los cambios más significativos ha sido la ampliación del muelle. Esta expansión no solo conlleva un aumento en su longitud o capacidad, sino también una serie de ajustes y optimizaciones en su diseño y funcionalidad. Adicionalmente, se ha añadido la construcción de un duque de alba, una estructura que desempeña un papel crucial en la asistencia en el amarre de los cruceros. Estas nuevas adicciones cambian de manera significativa la estructura de atraque de la TICC, redefiniendo el proceso de amarre y las dimensiones de los cruceros a atender, que se muestran en la *Tabla 16*.

*Tabla 16. Información AEC recopilada de la estructura de atraque en 2023. Fuente: Elaboración propia.*

Año	Información AEC Recogida	Crucero de diseño	Pasajeros	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	GT (ton)	Información Adicional
2023	Planos "As Built" más recientes de la infraestructura	"Icon"	7,600	365	65	9.124	250,800	Información procedente de fotografías tomadas por un dron, Estudio de Modelación Hidrodinámica y Dispersión de Sedimentos

Para la actualización del GD se tomó como base la información AsBuilt del proyecto finalizado en el primer semestre de 2023. Donde se aplicó el mismo flujo establecido en la sección 5.1.2 *Procesamiento de la información recopilada de la TICC para integrarla en un entorno BIM*. Ambas adicciones al GD se visualizan con detalle, ofreciendo una representación fiel de las recientes actualizaciones. Estas visualizaciones no solo sirven como herramienta de representación, sino también como medio para identificar posibles áreas de mejora, anticipar desafíos operativos y facilitar la planificación de futuras intervenciones.

La incorporación de estas actualizaciones al GD refuerza su papel como herramienta de vanguardia para la gestión y toma de decisiones relacionadas con la infraestructura marítima-portuaria. En la *Ilustración 74*, podemos ver la representación digital de la realidad que corresponde a la *ilustración Ilustración 55*. Entonces la adaptabilidad del GD asegura que se mantiene al día con las necesidades y cambios reales, garantizando que siempre sirva como un reflejo preciso y actualizado de la TICC en el mundo real.



Ilustración 74. Gemelo Digital de la estructura de atraque de la TICC actualizada a Agosto de 2023. Fuente: Elaboración propia.



- 5 Integración de sensores
- 6 Integración de la Nube para el manejo de la información
- 7 Integración de aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (AI)

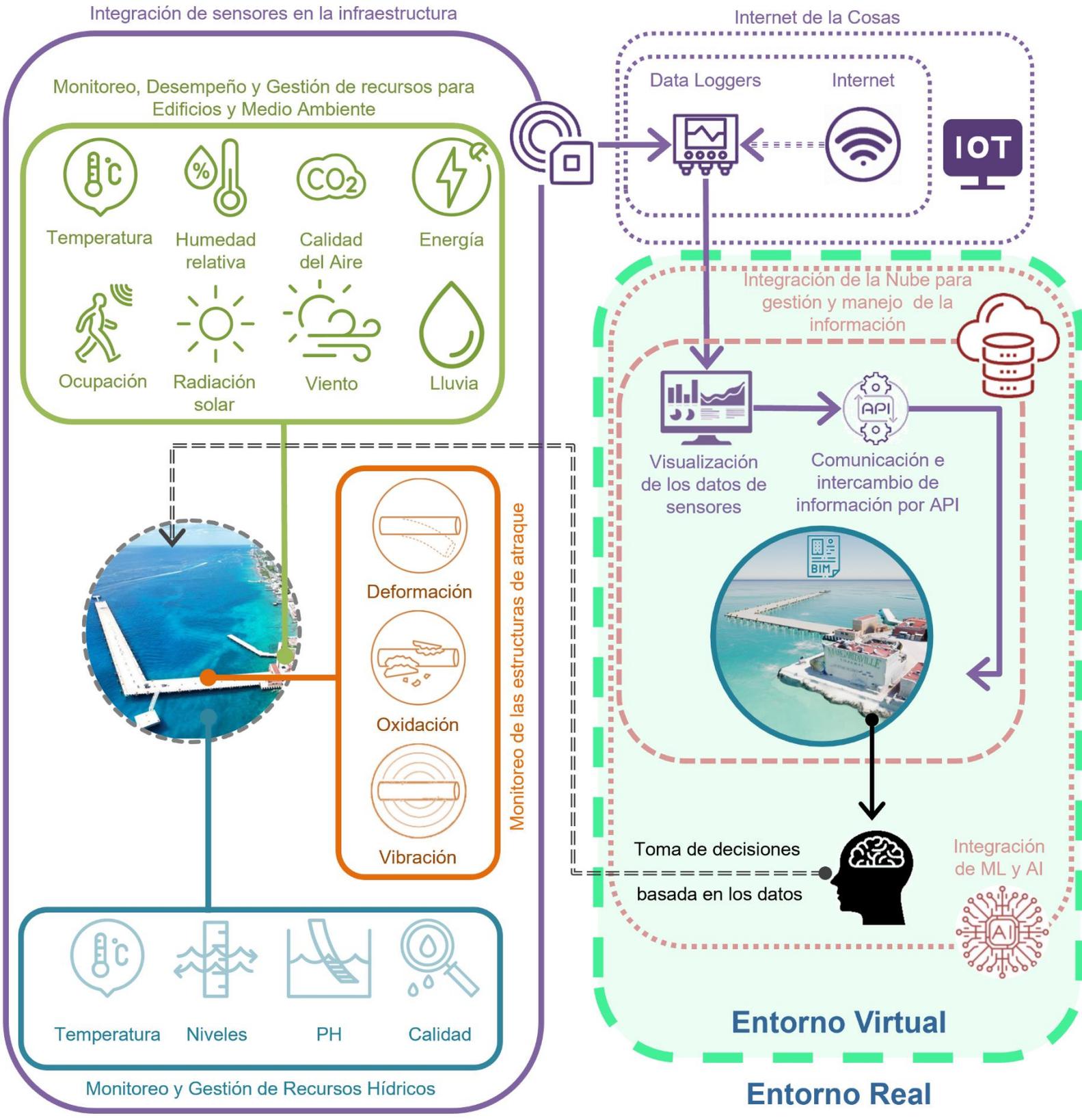


Ilustración 75. Paso 5: Integración de sensores, Paso 6: Integración de la Nube para el manejo de la información y Paso 7: Integración de aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (AI), para la infraestructura construida Fuente: Elaboración Propia.

### 5.2.2 Integración de sensores en el GD de la TICC

Los sensores proporcionan una vía para conectar el mundo físico con el digital, facilitando la sincronización en tiempo real entre el GD y su contraparte física. La integración de sensores en el GD representa uno de los pilares fundamentales para la actualización y precisión del modelo.

Si bien, debido a las restricciones temporales de esta maestría, la implementación directa de sensores en el GD de la TICC no se llevó a cabo, la investigación sugiere que su adopción sería altamente beneficiosa. Para futuros trabajos, será vital considerar las especificaciones técnicas de los sensores, su correcta colocación y la integración de sus datos en el GD, para maximizar su potencial y la eficiencia de la TICC.

El principal objetivo de integrar sensores en el GD es capturar y transmitir datos en tiempo real de la infraestructura física. Esto permite no solo un monitoreo constante, sino también la capacidad de reaccionar a tiempo ante posibles desviaciones, anomalías o cambios que puedan surgir en la infraestructura real. Los beneficios Principales la aplicación de sensores son los siguientes:

**Monitoreo en tiempo real:** La instalación de sensores en puntos estratégicos, como el muelle, estructuras de apoyo, y zonas de carga y descarga, permitiría obtener una instantánea continua del estado y funcionamiento de la TICC. Esto se traduce en una toma de decisiones más informada y una capacidad de respuesta inmediata ante eventualidades.

**Predicción de mantenimiento:** Más allá del monitoreo, los sensores podrían ayudar en la identificación temprana de desgastes o problemas estructurales. Esto facilita la transición de un mantenimiento reactivo a uno predictivo, donde las acciones se toman basadas en la predicción de fallos, antes de que estos ocurran

Y se propone que en estudios futuros se puedan implementar algunos como los siguientes:

**Sensores estructurales:** Estos podrían detectar vibraciones, tensiones y deformaciones en estructuras como el muelle, brindando información sobre su estado y alertando sobre posibles fallos o necesidad de reparaciones.

**Sensores medioambientales:** Estos capturarían datos sobre condiciones climáticas, calidad del agua y otros factores ambientales que pueden influir en las operaciones portuarias.

**Sensores de tráfico y movimiento:** Permitirían monitorear el flujo de barcos y vehículos, optimizando operaciones y previniendo congestiones.

La elección del tipo de sensor dependerá siempre de las necesidades específicas de visualización, implementación y mejora en la infraestructura portuaria.

### 5.2.3 Integración de la Nube para el manejo de la información del GD de la TICC

En el ámbito de las operaciones marítimas y portuarias, la capacidad de gestionar y acceder a información en tiempo real y desde distintas ubicaciones es fundamental. Las soluciones basadas en la nube se presentan como una respuesta eficiente a esta demanda, ofreciendo no solo flexibilidad, sino también una plataforma colaborativa y segura.

En el desarrollo de este trabajo, se optó por utilizar las herramientas de la nube ofrecidas por OneDrive. Esta decisión no solo se basó en la facilidad de uso de la plataforma, sino también en su confiabilidad y capacidades colaborativas. OneDrive permitió una interacción fluida con el concesionario de la operación de la TICC. A través de esta herramienta, se gestionó información diversa, desde archivos originales escaneados o en formato PDF, hasta archivos avanzados en 3D. Esta integración con la nube facilitó diversos aspectos:

**Accesibilidad Universal:** La información almacenada en OneDrive podía ser accesada desde cualquier dispositivo y en cualquier lugar, siempre que se contara con una conexión a internet. Esto resultó especialmente útil al trabajar en diferentes ubicaciones y con variados equipos de cómputo.

**Colaboración en tiempo real:** La plataforma permitió el intercambio de datos y comentarios en tiempo real con el concesionario, agilizando la toma de decisiones y el proceso de iteración.

**Seguridad y Respaldo:** Al utilizar OneDrive, se garantizó que la información estaba respaldada y protegida, reduciendo el riesgo de pérdida o alteración de datos.

**Organización y Gestión:** Toda la información generada durante el proceso de investigación y desarrollo del GD fue almacenada de forma organizada en la nube, lo que facilitó la gestión y revisión de los datos y recursos.

Por lo anterior se puede decir que la integración de la nube, a través de herramientas como OneDrive, se mostró como un elemento clave para la gestión eficiente de la información en el desarrollo del GD de la TICC. La facilidad de acceso, junto con las capacidades colaborativas y de seguridad, evidenciaron que la adopción de soluciones en la nube es esencial para proyectos de esta magnitud y complejidad. Es recomendable que futuros proyectos consideren la nube no solo como una herramienta de almacenamiento, sino también como una plataforma de trabajo colaborativo y dinámico.

#### 5.2.4 Integración de aprendizaje automático (ML) e inteligencia artificial (AI) en el GD de la TICC

Como ya se revisó previamente, la era digital ha experimentado avances tecnológicos significativos en los últimos años. Entre los más prominentes se encuentran el ML y la AI. Estas tecnologías tienen el potencial de transformar sectores enteros, incluidas las operaciones marítimas y portuarias, optimizando procesos, anticipando problemas y generando soluciones en tiempo real.

A pesar de no haberse implementado en este estudio, es importante señalar que la integración de ML y AI en futuros trabajos relacionados con el GD de la TICC podría significar una revolución en la gestión portuaria. La capacidad de estos sistemas para aprender, adaptarse y proporcionar soluciones basadas en datos podría ofrecer ventajas significativas en términos de eficiencia, seguridad y rendimiento. Por lo anterior, es esencial comprender su potencial impacto y las oportunidades que ofrecen para el GD de la TICC:

**Predicción y Anticipación:** A través del análisis de datos históricos, el ML puede entrenar modelos para predecir posibles desviaciones, anomalías o cambios en la infraestructura y operaciones, permitiendo una respuesta proactiva antes de que surjan problemas.

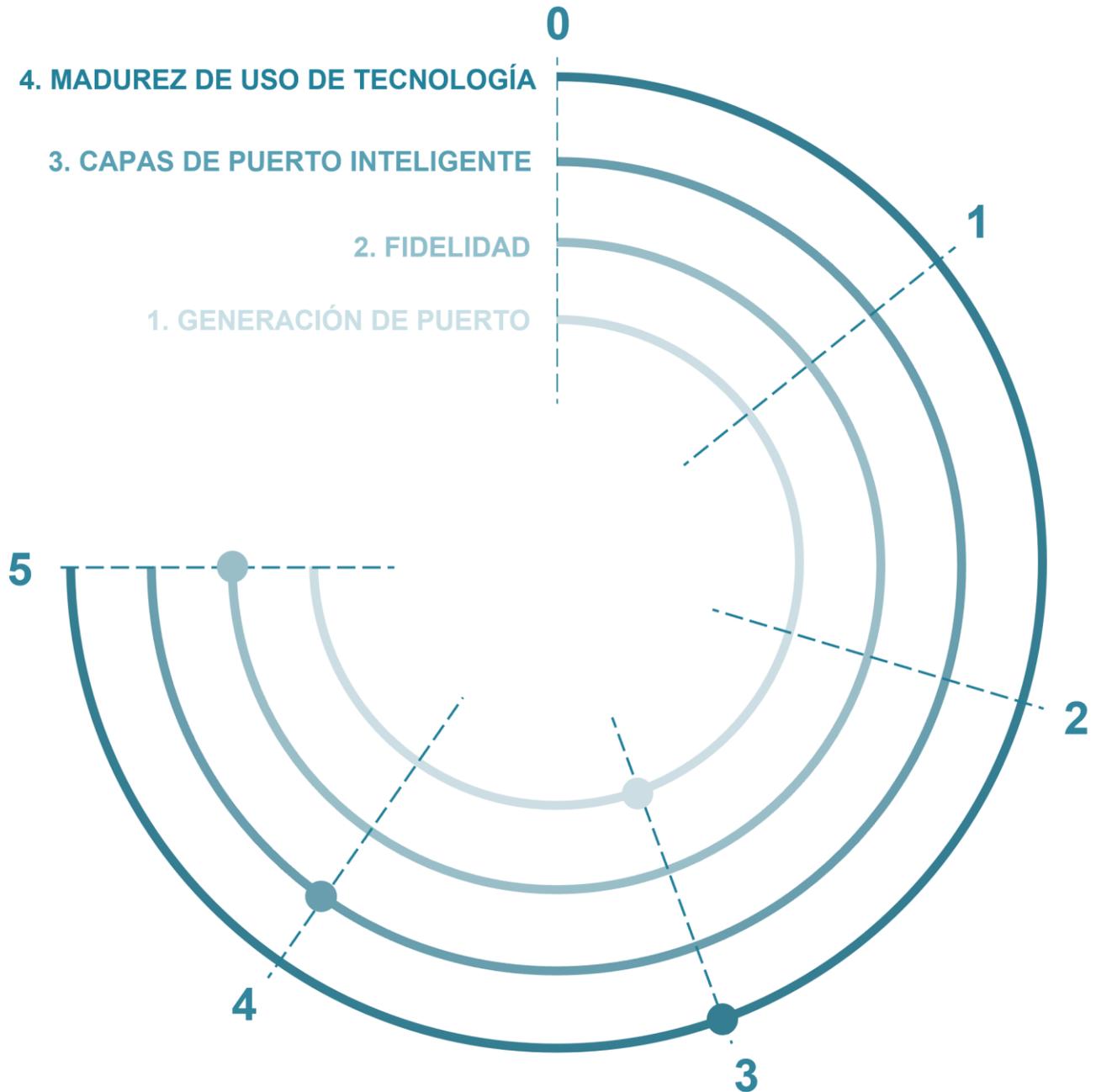
**Optimización de Operaciones:** La AI puede analizar grandes cantidades de datos en tiempo real para identificar patrones y tendencias, lo que podría traducirse en la optimización de operaciones, como la asignación de recursos, gestión del tráfico marítimo y logística portuaria.

**Automatización de Tareas:** Las tecnologías de AI pueden llevar a cabo tareas repetitivas, liberando al personal para centrarse en decisiones más estratégicas y tareas que requieren una intervención humana más crítica.

**Mejora de la Seguridad:** ML y AI pueden ser herramientas vitales en la identificación y notificación temprana de riesgos potenciales en la infraestructura portuaria, contribuyendo a la creación de un entorno más seguro.

Si bien la integración directa de ML y AI no fue parte de este trabajo, la relevancia y el potencial de estas tecnologías no pueden ser ignorados. Se recomienda que las futuras investigaciones en el ámbito del GD de la TICC consideren seriamente la adopción e implementación de estas herramientas, dadas las ventajas transformadoras que prometen en el sector marítimo y portuario.

## Evaluación del GD de la estructura de atraque de la TICC



**1. Generación del puerto:** Se examinaron las diferentes etapas o fases por las que ha pasado la infraestructura de puerto. **Calificación: 3**

**2. Fidelidad:** Se evaluó el nivel de detalle, precisión y exactitud con el que un GD representa la realidad. **Calificación: 5**

**3. Capas de puerto inteligente:** Se evaluó la organización de la información en el GD. **Calificación: 4**

**4. Madurez en el uso de la Tecnología:** Se evaluó el nivel de desarrollo y aplicación del GD en la infraestructura. **Calificación: 3**

### 5.3 Evaluación del GD de la TICC

La implementación de un GD para la TICC ha sido un esfuerzo estratégico para mejorar la gestión y operatividad de la infraestructura marítima-portuaria.

A continuación, se presenta una evaluación basada en los criterios establecidos en la sección *4.3 Evaluación de un GD de infraestructura marítimo-portuaria*:

**Generación del puerto (Calificación: 3/5):** La TICC ha experimentado diferentes etapas de transformación. Durante el proceso, se evidenció una evolución desde un puerto de segunda generación, centrado principalmente en operaciones básicas, hacia una orientación más próxima a un puerto de cuarta generación que integra elementos tecnológicos avanzados. A pesar de estos avances, aún hay un margen para alcanzar la categoría de Smart Port.

**Fidelidad (Calificación: 5/5):** La fidelidad del GD de la TICC destaca por su capacidad para representar con precisión la realidad portuaria. No se trata solo de exactitud geométrica, sino también de integridad en datos asociados como materiales o vida útil. Esta alta precisión es esencial para garantizar decisiones acertadas en mantenimiento e inversiones, y se traduce en beneficios operativos y estratégicos. La representación fiel y detallada facilita la integración con sistemas de simulación, fortaleciendo la toma de decisiones basadas en información confiable y exacta.

**Capas de puerto inteligente (Calificación: 4/5):** En el GD de la TICC, la organización de la información ha sido meticulosa, abarcando distintos niveles de información de capas. Sin embargo, hay potencial para añadir capas más complejas que permitan simulaciones avanzadas.

**Madurez en el uso de la Tecnología (Calificación: 3/5):** Aunque la TICC ha incorporado soluciones tecnológicas avanzadas, como la integración de soluciones basadas en la nube, aún no ha alcanzado un nivel donde el GD pueda dirigir operaciones autónomas.

En resumen, la evaluación del GD para la TICC ha resaltado fortalezas, especialmente en fidelidad y estructuración de la información. Aun así, se reconocen áreas de mejora en madurez tecnológica y evolución hacia un Smart Port. Basándonos en la información proporcionada en capítulos anteriores, surgen oportunidades para desarrollar estrategias que optimicen la implementación y uso del GD en la TICC.

## 5.4 Conclusiones y Recomendaciones Finales

Tras realizar un profundo análisis en los anteriores capítulos, esta sección se centrará en resumir las principales conclusiones de la investigación y proponer recomendaciones y perspectivas para futuros estudios y aplicaciones del GD, enfocado principalmente las áreas de la Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Operación en la gestión eficiente de la infraestructura marítimo-portuaria y de otras de carácter civil.

### 5.4.1. Conclusiones Principales

La necesidad de digitalización en el sector marítimo-portuario es primordial. Con más del 80% del comercio mundial transportado por mar y con la creciente demanda de transporte marítimo, la falta de información adecuada puede llevar a decisiones ineficaces y poco estratégicas. La falta de una gestión adecuada de la información y una visión marítima sólida en México ha llevado a una vulnerabilidad en la infraestructura marítimo-portuaria. Esta situación resalta la urgencia de implementar soluciones digitales avanzadas.

El Gemelo Digital surge como una solución viable y futurista para abordar estos problemas. Como reflejo digital de la infraestructura física, el Gemelo Digital puede facilitar la toma de decisiones, la adaptabilidad a las condiciones cambiantes, y aumentar la eficiencia y sostenibilidad de la infraestructura marítimo-portuaria. A lo largo de la investigación, se confirmó que la digitalización, y en particular el desarrollo de Gemelos Digitales es esencial para abordar eficazmente los desafíos de la infraestructura marítimo-portuaria existente.

El enfoque propuesto a través del método de investigación en Ciencias del Diseño (DSRM) demostró ser efectivo para identificar y aplicar tecnologías para desarrollar Gemelos Digitales en el sector. Las tecnologías identificadas en la investigación son fundamentales para facilitar la creación de Gemelos Digitales. No obstante, se identificó una falta de estándares unificados y protocolos, que son esenciales para garantizar la consistencia y calidad de los Gemelos Digitales desarrollados.

El método propuesto para la creación de un Gemelo Digital aporta claridad y dirección a este campo emergente. En el caso las estructuras de atraque de la Terminal Internacional de cruceros en Cozumel, se demuestra que el flujo de trabajo teórico es aplicable y útil en un contexto real ya que sirvió como una validación esencial del método propuesto, demostrando su aplicabilidad y eficacia.

Por lo anterior, esta investigación aporta una metodología concreta para abordar la falta de digitalización en la infraestructura marítimo-portuaria, enriqueciendo el corpus de conocimientos en el ámbito de la Industria 4.0 en contextos específicos como México.

#### 5.4.2. Recomendaciones

Ante el desafío de la digitalización y la optimización del sector marítimo-portuario, emerge la necesidad de orientaciones precisas que guíen la transición hacia tecnologías como el Gemelo Digital. Basándonos en los hallazgos y conclusiones de esta investigación, se presentan a continuación una serie de recomendaciones estratégicas que buscan no solo impulsar la adopción de esta herramienta, sino también garantizar su integración efectiva y sostenible en el entorno de la infraestructura civil marítimo-portuaria:

**Promover la colaboración:** Es vital establecer colaboraciones entre los diversos actores del sector marítimo-portuario, así como con expertos en tecnología y digitalización para garantizar un enfoque holístico en el desarrollo y adopción del Gemelo Digital.

**Incrementar la inversión en tecnología:** Los beneficios del Gemelo Digital justifican una inversión significativa en tecnología y herramientas para su correcta implementación.

**Educación continua:** Asegurarse de que todos los involucrados, desde tomadores de decisiones hasta operadores en el terreno, estén informados y capacitados sobre las últimas tecnologías y aplicaciones del Gemelo Digital.

**Establecer un marco regulatorio:** El gobierno y las autoridades competentes deben establecer un marco regulatorio que fomente la adopción de Gemelos Digitales, garantizando al mismo tiempo la seguridad, privacidad y confiabilidad de la información.

**Evaluaciones periódicas:** Es fundamental llevar a cabo evaluaciones periódicas del Gemelo Digital para asegurarse de que sigue siendo un reflejo preciso del activo físico y de que se está utilizando para maximizar la eficiencia y sostenibilidad.

Finalmente, con la correcta implementación y mejora continua, el Gemelo Digital tiene el potencial de revolucionar no solo el sector marítimo-portuario sino toda la infraestructura civil construido y por construir en el mundo moderno. Su adopción es, por lo tanto, no solo deseable sino esencial para el mundo en evolución en el que vivimos.

#### 5.4.3. Perspectivas Futuras

Enfrentamos tiempos de cambio significativo en el sector las áreas de la Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Operación, impulsados por avances tecnológicos como el Gemelo Digital. Esta herramienta promete transformar la gestión y visión de nuestras infraestructuras civiles construidas y por construir. A continuación, desglosamos las perspectivas que podrían guiar este excitante futuro basado en tendencias y hallazgos recientes.

**Adopción generalizada del Gemelo Digital:** A medida que se reconoce la importancia del Gemelo Digital, se espera que su adopción se expanda más allá del sector marítimo-portuario a otras infraestructuras civiles en México y en el mundo.

**Desarrollo de estándares unificados:** Es esencial la creación de un conjunto unificado de estándares y protocolos para garantizar que los Gemelos Digitales creados en diferentes lugares y para diferentes propósitos sean consistentes, confiables y interoperables.

**Integración de la Inteligencia Artificial (IA):** La combinación del Gemelo Digital con tecnologías de IA puede llevar a predicciones más precisas, mantenimiento predictivo y una gestión más eficiente del activo físico representado por el Gemelo Digital.

**Educación y capacitación:** Dado que la adopción del Gemelo Digital es un cambio significativo en cómo se aborda la infraestructura, es fundamental ofrecer programas educativos y de capacitación para los profesionales del sector marítimo-portuario.

**Inversión en I+D:** A medida que la tecnología evoluciona, es esencial continuar invirtiendo en investigación y desarrollo para mejorar las capacidades y características del Gemelo Digital, y para adaptarse a las cambiantes condiciones del mercado y del mundo en general.

**Sostenibilidad y Cambio Climático:** Con los crecientes desafíos del cambio climático, los Gemelos Digitales podrían desempeñar un papel esencial en el monitoreo y adaptación de las infraestructuras marítimo-portuarias a condiciones cambiantes, asegurando una mayor resiliencia.

Para finalizar, estamos ante una revolución en las áreas de la Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Operación, marcada por la incorporación progresiva del Gemelo Digital. Estas perspectivas no solo señalan un camino hacia una gestión más eficiente y predictiva de las infraestructuras, sino que también destacan la responsabilidad colectiva de adoptar, adaptar y evolucionar.

México, al igual que el resto del mundo, tiene la oportunidad de liderar y aprovechar estos avances para construir un futuro más resiliente, sostenible y conectado. La adaptación no es una opción, es una necesidad imperante en la era digital en la que nos encontramos.

UNAM | Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura | Campo de Tecnologías

## Referencias

---

- Abdirad, H., & Mathur, P. (2021). Artificial intelligence for BIM content management and delivery: Case study of association rule mining for construction detailing. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101414. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101414>
- Aboubacar, M. H., Yavuz, A. B., Tanyu, B. F., & Sarı, S. A. (2021). Investigation of the quality of armour stones used in rubble mound breakwater in Güzelbahçe (İzmir), Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 80(11), 401. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09705-4>
- Aceves, J. (2012). *Metodología para estimar la capacidad de una terminal portuaria de contenedores*.
- Agostinelli, S., Majidi, N., Nastasi, B., Piras, G., & Astiaso Garcia, D. (2022). *Digital Twins for Port Facilities Management*.
- Agrawal, A., Thiel, R., Jain, P., Singh, V., & Fischer, M. (2023). Digital Twin: Where do humans fit in? *Automation in Construction*, 148, 104749. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104749>
- Ajuntament de Barcelona. (2012). La evolución del transporte marítimo: los puertos de 4<sup>a</sup> generación. En *Cápsula de tendencia sectorial: Transporte marítimo*.
- Alsafouri, S., & Ayer, S. K. (2018). Review of ICT Implementations for Facilitating Information Flow between Virtual Models and Construction Project Sites. *Automation in Construction*, 86, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.005>
- Amaechi, C. V., Chesterton, C., Butler, H. O., Wang, F., & Ye, J. (2021). Review on the design and mechanics of bonded marine hoses for Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) buoys. *Ocean Engineering*, 242, 110062. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110062>
- Apollonio, F. I., Fantini, F., Garagnani, S., & Gaiani, M. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. *Remote Sensing*, 13(3), 486. <https://doi.org/10.3390/rs13030486>
- Arsiwala, A., Elghaish, F., & Zoher, M. (2023a). Digital twin with Machine learning for predictive monitoring of CO2 equivalent from existing buildings. *Energy and Buildings*, 284, 112851. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112851>
- Arsiwala, A., Elghaish, F., & Zoher, M. (2023b). Digital twin with Machine learning for predictive monitoring of CO2 equivalent from existing buildings. *Energy and Buildings*, 284, 112851. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112851>
- ARUP. (2019). *Digital twin: towards a meaningful framework*. <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/digital-twin-towards-a-meaningful-framework>
- Atari, S., & Prause, G. (2018). *Risk Assessment of Emission Abatement Technologies for Clean Shipping* (pp. 93–101). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74454-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74454-4_9)

- Attia, T. M. (2016). Importance of communication and information technology and its applications in the development and integration of performance in seaports. *Renewable Energy and Sustainable Development*, 2(2), 137–146. <https://doi.org/10.21622/resd.2016.02.2.137>
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- Bain, D. (2020). *Summary of findings from the tenth annual BIM survey*. <https://www.thenbs.com/knowledge/national-bim-report-2020>
- Balasuriya, A. (2018). Coastal Area Management: Biodiversity and Ecological Sustainability in Sri Lankan Perspective. En *Biodiversity and Climate Change Adaptation in Tropical Islands* (pp. 701–724). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813064-3.00025-9>
- BANCO DE MEXICO. (2018). Medición del Crecimiento Económico en las Principales Zonas Turísticas de Playa Mediante el Uso de Fotos Satelitales. En *Economías Regionales*. BANCO DE MEXICO.
- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Previtali, M., & Roncoroni, F. (2016). BIM FROM LASER SCANS... NOT JUST FOR BUILDINGS: NURBS-BASED PARAMETRIC MODELING OF A MEDIEVAL BRIDGE. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III–5, 51–56. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-III-5-51-2016>
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*, 7, 167653–167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- Benitez, A. (2021, junio 28). *SSA México reduce estadía de contenedores en el Puerto de Manzanillo*. Méxicoxport. <https://mexicoxport.com/ssa-mexico-reduce-estadía-de-contenedores-en-el-puerto-de-manzanillo/>
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020a). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020b). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Bokolo, A. (2021). Managing digital transformation of smart cities through enterprise architecture – a review and research agenda. *Enterprise Information Systems*, 15(3), 299–331. <https://doi.org/10.1080/17517575.2020.1812006>
- Booyens, R., Gloaguen, R., Lorenz, S., Zimmermann, R., & Nex, P. A. M. (2021). Geological Remote Sensing. En *Encyclopedia of Geology* (pp. 301–314). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12127-X>
- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital Twin—The Simulation Aspect. En *Mechatronic Futures* (pp. 59–74). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5)
- Bosch-Sijtsema, P., Claeson-Jonsson, C., Johansson, M., & Roupe, M. (2021). The hype factor of digital technologies in AEC. *Construction Innovation*, 21(4), 899–916. <https://doi.org/10.1108/CI-01-2020-0002>
- Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A.-S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., & Lozoya-Santos, J. de J. (2022). Digital Twin Technology

- Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/rs14061335>
- Brell, M., Segl, K., Guanter, L., & Bookhagen, B. (2019). 3D hyperspectral point cloud generation: Fusing airborne laser scanning and hyperspectral imaging sensors for improved object-based information extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.022>
- Brötzmann, J., Thiele, C.-D., Rüppel, U., Lorenzen, S. R., Berthold, H., & Schneider, J. (2022). A review of the digital twin in the AEC sector in the context of application. En *Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability* (pp. 855–862). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003322641-102>
- Bucchiarone, A. (2022). Gamification and Virtual Reality for Digital Twins Learning and Training: Architecture and Challenges. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 4(6), 471–486. <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.08.001>
- Carrasco, C. A., Lombillo, I., Sánchez-Espeso, J. M., & Balbás, F. J. (2022). Quantitative and Qualitative Analysis on the Integration of Geographic Information Systems and Building Information Modeling for the Generation and Management of 3D Models. *Buildings*, 12(10), 1672. <https://doi.org/10.3390/buildings12101672>
- Carstensen, A.-K., & Bernhard, J. (2019). Design science research – a powerful tool for improving methods in engineering education research. *European Journal of Engineering Education*, 44(1–2), 85–102. <https://doi.org/10.1080/03043797.2018.1498459>
- Castelli, S., Belleri, A., Graziosi, L. R., Locatelli, L., Zirpoli, A., & Svaluto, G. (2023). Integrated BIM-SHM techniques for the assessment of seismic damage. *Procedia Structural Integrity*, 44, 846–853. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.110>
- CEPAL. (2019). *Digitization in Ports: Application of Digital Twins to Complex Logistics*. <https://www.cepal.org/en/publications/44704-digitization-ports-application-digital-twins-complex-logistics>
- CEPAL. (2022). Digitalización en puertos: aplicación de gemelos digitales en la complejidad logística. *Tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC)*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48050-digitalizacion-puertos-aplicacion-gemelos-digitales-la-complejidad-logistica>
- Chen, H., Hou, L., Zhang, G. (Kevin), & Moon, S. (2021). Development of BIM, IoT and AR/VR technologies for fire safety and upskilling. *Automation in Construction*, 125, 103631. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103631>
- Cheng, J. C. P., Kwok, H. H. L., Li, A. T. Y., Tong, J. C. K., & Lau, A. K. H. (2022). BIM-supported sensor placement optimization based on genetic algorithm for multi-zone thermal comfort and IAQ monitoring. *Building and Environment*, 216, 108997. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108997>
- Coordinación General de Puertos y Marina Mercante. (2001). *Manual de dimensionamiento portuario*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/puertosymarinamercante/acciones-y-programas/manual-de-dimensionamiento-portuario>
- Costa, J. (1998). *La esquemática: Visualizar la información*. Paidós.
- Cui, L., Zhou, L., Xie, Q., Liu, J., Han, B., Zhang, T., & Luo, H. (2023). Direct generation of finite element mesh using 3D laser point cloud. *Structures*, 47, 1579–1594. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.010>
- Cumo, F. (2021). *DIGITAL TWIN FOR CRITICAL INFRASTRUCTURES: THE VENTOTENE ISLAND PORT CASE STUDY, ITALY*. 217–222. <https://doi.org/10.2495/BIM210181>

- Deligiorgi, M., Maslioukova, M. I., Averkiou, M., Andreou, A. C., Selvaraju, P., Kalogerakis, E., Patow, G., Chrysanthou, Y., & Artopoulos, G. (2021). A 3D digitisation workflow for architecture-specific annotation of built heritage. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 37, 102787. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102787>
- Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2021). From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 58–83. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>
- Dhanda, A., Reina Ortiz, M., Weigert, A., Paladini, A., Min, A., Gyi, M., Su, S., Fai, S., & Santana Quintero, M. (2019). RECREATING CULTURAL HERITAGE ENVIRONMENTS FOR VR USING PHOTOGRAMMETRY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 305–310. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-305-2019>
- Ley de puertos, (2020).
- Díaz, A. (2020). *Gobierno Federal planea inversión de 200 Mil MDP para infraestructura portuaria*. Real Estate Market & Lifestyle. <https://realestatemarket.com.mx/noticias/infraestructura-y-construccion/26885-gobierno-federal-planea-inversion-de-200-mil-mdp-para-infraestructura-portuaria>
- Dirección de Obras Portuarias. (2013). *Guía de Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras* (1a ed., Vol. 1). Gobierno de Chile.
- Douaioui, K., Fri, M., Mabrouki, C., & Semma, E. A. (2018). Smart port: Design and perspectives. *2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GOL.2018.8378099>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Ebert, J. I. (2015). Photogrammetry, Photointerpretation, and Digital Imaging and Mapping in Environmental Forensics. En *Introduction to Environmental Forensics* (pp. 39–64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404696-2.00003-5>
- Edwards, C., Morales, D. L., Haas, C., Narasimhan, S., & Cascante, G. (2023). Digital twin development through auto-linking to manage legacy assets in nuclear power plants. *Automation in Construction*, 148, 104774. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104774>
- Elchahal, G., Lafon, P., & Younes, R. (2009). Design optimization of floating breakwaters with an interdisciplinary fluid–solid structural problem. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(11), 1732–1743. <https://doi.org/10.1139/L09-095>
- Encinas, J. (2017). La evolución de los puertos Marítimos. *Instituto de Investigaciones Estratégicas de la Armada de México*.
- Encyclopaedia Britannica. (2020). *breakwater / marine engineering*. <https://www.britannica.com/technology/breakwater/additional-info#history>
- Evans, S., Savian, C., Burns, A., & Cooper, C. (2019). *Digital Twins for the built environment*. Institution of Engineering and Technology. <https://www.theiet.org/impact-society/sectors/built-environment/built-environment-news/2019-news/digital-twins-for-the-built-environment/>
- Farag, R., Haldar, A., & El-Meligy, M. (2016). Reliability Analysis of Piles in Multilayer Soil in Mooring Dolphin Structures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 138(5). <https://doi.org/10.1115/1.4033578>

- Fritsch, D., & Klein, M. (2018). 3D preservation of buildings – Reconstructing the past. *Multimedia Tools and Applications*, 77(7), 9153–9170. <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4654-5>
- Fundación Valenciaport. (2020). MANUAL DE PUERTOS INTELIGENTES. En *Banco Interamericano de Desarrollo*.
- García, C. (2017). *Repercusiones de la infraestructura industrial y portuaria sobre el crecimiento urbano de Salina Cruz, Oaxaca* [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, M. (2017). *HACIA LA METAMORFOSIS SINTÉTICA DE LA COSTA DISEÑANDO PAISAJES RESILIENTES* [Doctorado]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Gerlitz, L., Philipp, R., & Beifert, A. (2018). *Smart and Sustainable Cross-Sectoral Stakeholder Integration into Macro-Regional LNG Value Chain* (pp. 112–126). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74454-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74454-4_11)
- Gomez-Jauregui, V., Manchado, C., Del Castillo-Igareda, J., & Otero, C. (2019). Quantitative evaluation of overlaying discrepancies in mobile augmented reality applications for AEC/FM. *Advances in Engineering Software*, 127, 124–140. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.11.002>
- Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. En *White Paper*. Florida Institute of Technology.
- Guerreiro, J. (2021). The Blue Growth Challenge to Maritime Governance. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.681546>
- Guillaumin, E. (2010). *Los puertos y su conectividad*. [https://www.oas.org/cip/docs/documentos\\_importantes/PresentacionesIxtapa/E.\\_Guillaumin.\\_Los\\_puertos\\_y\\_su\\_conectividad.pdf](https://www.oas.org/cip/docs/documentos_importantes/PresentacionesIxtapa/E._Guillaumin._Los_puertos_y_su_conectividad.pdf)
- Gürdür Broo, D., Bravo-Haro, M., & Schooling, J. (2022). Design and implementation of a smart infrastructure digital twin. *Automation in Construction*, 136, 104171. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104171>
- Herries, G., Thompson, N., Wilson, P., Surin, P., Tennyson, R., & Murphy, S. (2019). *Digital twins for the built environment an introduction to the opportunities, benefits, challenges and risks*.
- Honghong, S., Gang, Y., Haijiang, L., Tian, Z., & Annan, J. (2023). Digital twin enhanced BIM to shape full life cycle digital transformation for bridge engineering. *Automation in Construction*, 147, 104736. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104736>
- Hu, Y., Chen, X., Tang, Z., Yu, J., Chen, Y., Wu, Z., Yang, D., & Chen, Y. (2021). Collaborative 3D real modeling by multi-view images photogrammetry and laser scanning: The case study of Tangwei Village, China. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 21, e00185. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00185>
- Huang, X., Liu, Y., Huang, L., Onstein, E., & Merschbrock, C. (2023). BIM and IoT data fusion: The data process model perspective. *Automation in Construction*, 149, 104792. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104792>
- Independent World Commission on the Oceans. (1998). *The Ocean: Our Future* (M. Soares, Ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511564529>
- INEGI - SEMARNAT. (1999). *Estadísticas del Medio Ambiente*. (Vols. 1 y 2).
- Ivanova, A., Cariño, M., Monteforte-Sanchez, M., Ramirez, E., & Dominguez, W. (2017). La economía azul como modelo de sustentabilidad para estados costeros: el caso de Baja

- California Sur. *Sociedad y Ambiente*, 14, 75–98.  
<https://www.scielo.org.mx/pdf/sya/n14/2007-6576-sya-14-75.pdf>
- Jiang, L., Shi, J., Wang, C., & Pan, Z. (2023). Intelligent control of building fire protection system using digital twins and semantic web technologies. *Automation in Construction*, 147, 104728. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104728>
- Jiang, S., Feng, X., Zhang, B., & Shi, J. (2023). Semantic enrichment for BIM: Enabling technologies and applications. *Advanced Engineering Informatics*, 56, 101961. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101961>
- Jofré-Briceño, C., Muñoz-La Rivera, F., Atencio, E., & Herrera, R. F. (2021). Implementation of Facility Management for Port Infrastructure through the Use of UAVs, Photogrammetry and BIM. *Sensors*, 21(19), 6686. <https://doi.org/10.3390/s21196686>
- Kalaidjian, E., Becker, A., & Pinel, S. (2022). Operationalizing resilience planning, theory, and practice: Insights from U.S. seaports. *Frontiers in Sustainability*, 3. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.963555>
- Kalay, Y. E. (2001). Enhancing multi-disciplinary collaboration through semantically rich representation. *Automation in Construction*, 10(6), 741–755. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00091-1)
- Kang, S.-J., Lee, J.-W., Lee, D.-H., & Kim, H.-J. (2013). Design Conditions for Dolphin Berth by Tanker Fleet Analysis. *Journal of Navigation and Port Research*, 37(6), 647–653. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2013.37.6.647>
- Karan, C. (2021, diciembre 14). *A Detailed Explanation of How a Ship is Manoeuvred to a Port*. Marine Insight. <https://www.marineinsight.com/guidelines/a-detailed-explanation-of-how-a-ship-is-manoeuvered-to-a-port/>
- Keaton, J. R. (2018). *Armor Stone* (pp. 28–29). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_19)
- Krech Ojard & Associates, Vickerman and Associates, SRF Consulting Group, & WF Baird & Associates. (2013). *Duluth- Superior Cruise Ship Terminal Facility Study*.
- Lapkina, I. O., & Malaksiano, M. O. (2020). MODELING OF SEA TRANSPORT INFRASTRUCTURE OBJECTS. En *Development of Scientific Schools of Odessa National Maritime University* (pp. 230–267). Izdevnieciba “Baltija Publishing.” <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-86-0.12>
- Lavrakas, P. (2008). *Encyclopedia of Survey Research Methods*. Sage Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781412963947>
- Lee, P. T.-W., & Lam, J. S. L. (2016). Developing the Fifth Generation Ports Model. En *Dynamic Shipping and Port Development in the Globalized Economy* (pp. 186–210). Palgrave Macmillan UK. [https://doi.org/10.1057/9781137514233\\_8](https://doi.org/10.1057/9781137514233_8)
- Lee, S.-W., & Kim, Y.-D. (2019). A Study on Improvement of Criteria for Mooring Safety Assessment in Single Point Mooring. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 25(3), 287–297. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.3.287>
- León, R. (2008). *EVALUACIÓN MULTIDISCIPLINARIA DE LA ZONA COSTERA DE MEXICO* [Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Li, Y., & Ibanez-Guzman, J. (2020). Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems. *IEEE Signal Processing Magazine*, 37(4), 50–61. <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2973615>
- Lim, Y.-W., Chong, H.-Y., Ling, P. C. H., & Tan, C. S. (2021). Greening existing buildings through Building Information Modelling: A review of the recent development. *Building and Environment*, 200, 107924. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107924>

- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Llamosas-Rosas, I., Rangel González, E., & Sandoval Bustos, M. (2021). Medición de la actividad económica en las principales zonas turísticas de playa en México a través imágenes satelitales. *Ensayos Revista de Economía*, 40(2), 115–136. <https://doi.org/10.29105/ensayos40.2-1>
- López, H. (2008, junio). Planeación de la Infraestructura Costera Mexicana. *Revista AMIP*, 4–7.
- López, H. (2009). *Planeación del desarrollo costero*. Asociación Mexicana de Ingeniería Portuaria, Marítima y Costera, A.C.
- Lu, Q., Chen, L., Li, S., & Pitt, M. (2020). Semi-automatic geometric digital twinning for existing buildings based on images and CAD drawings. *Automation in Construction*, 115, 103183. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103183>
- Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., & Li, Y. (2017). Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. *Automation in Construction*, 83, 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.024>
- Lydon, G. P., Caranovic, S., Hischer, I., & Schlueter, A. (2019). Coupled simulation of thermally active building systems to support a digital twin. *Energy and Buildings*, 202, 109298. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.015>
- Mahdjoubi, L., Moobela, C., & Laing, R. (2013). Providing real-estate services through the integration of 3D laser scanning and building information modelling. *Computers in Industry*, 64(9), 1272–1281. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.09.003>
- Manzoor, F., Wei, L., Asif, M., Haq, M. Z. ul, & Rehman, H. ur. (2019). The Contribution of Sustainable Tourism to Economic Growth and Employment in Pakistan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(19), 3785. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193785>
- Martínez, J. (2017). *Diseño de espigones y diques exentos mediante análisis multicriterio. Aplicación al tramo de costa entre la Punta del Caballo y la Punta de Calaburras (Málaga)* [Universidad de Granada]. <https://doi.org/10.30827/Digibug.47523>
- Matarneh, S., Elghaish, F., Rahimian, F. P., Dawood, N., & Edwards, D. (2022). Automated and interconnected facility management system: An open IFC cloud-based BIM solution. *Automation in Construction*, 143, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104569>
- Mathews, M. E., Shaji, A. E., Anand, N., Andrushia, A. D., Chin, S. C., & Lubloy, E. (2023). IoT-based BIM integrated model for energy and water management in smart homes. En *Intelligent Edge Computing for Cyber Physical Applications* (pp. 45–66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99412-5.00009-5>
- Maza, J. A., Silva, R., & Sánchez, C. (1996). History of Coastal Engineering in Mexico. *History and Heritage of Coastal Engineering*, 375–389. <https://doi.org/10.1061/9780784401965.009>
- Mieloszyk, E., Milewska, A., & Grulkowski, S. (2019). Capacity analysis of the selected track system in partially ordered space. *MATEC Web of Conferences*, 262, 11006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926211006>
- 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>

- Mostofi, A., & Bargi, K. (2012). New concept in analysis of floating piers for ship berthing impact. *Marine Structures*, 25(1), 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2011.12.001>
- Moyano, J., Carreño, E., Nieto-Julián, J. E., Gil-Arizón, I., & Bruno, S. (2022). Systematic approach to generate Historical Building Information Modelling (HBIM) in architectural restoration project. *Automation in Construction*, 143, 104551. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104551>
- Moyano, J., Justo-Estebarez, Á., Nieto-Julián, J. E., Barrera, A. O., & Fernández-Alconchel, M. (2022). Evaluation of records using terrestrial laser scanner in architectural heritage for information modeling in HBIM construction: The case study of the La Anunciación church (Seville). *Journal of Building Engineering*, 62, 105190. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105190>
- Moyano, J., León, J., Nieto-Julián, J. E., & Bruno, S. (2021). Semantic interpretation of architectural and archaeological geometries: Point cloud segmentation for HBIM parameterisation. *Automation in Construction*, 130, 103856. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103856>
- Mukhopadhyay, R., & Gupta, A. (2022). Constructing a Blue Economy Architecture for Small Islands. En *Blue Economy* (pp. 379–416). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-5065-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-19-5065-0_13)
- Musarat, M. A., Alaloul, W. S., Cher, L. S., Qureshi, A. H., Alawag, A. M., & Baarimah, A. O. (2023). Applications of Building Information Modelling in the Operation and Maintenance Phase of Construction Projects: A Framework for the Malaysian Construction Industry. *Sustainability*, 15(6), 5044. <https://doi.org/10.3390/su15065044>
- Naderi, H., & Shojaei, A. (2022a). Civil Infrastructure Digital Twins: Multi-Level Knowledge Map, Research Gaps, and Future Directions. *IEEE Access*, 10, 122022–122037. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223557>
- Naderi, H., & Shojaei, A. (2022b). Civil Infrastructure Digital Twins: Multi-Level Knowledge Map, Research Gaps, and Future Directions. *IEEE Access*, 10, 122022–122037. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223557>
- Naderi, H., & Shojaei, A. (2023). Digital twinning of civil infrastructures: Current state of model architectures, interoperability solutions, and future prospects. *Automation in Construction*, 149, 104785. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104785>
- Nour El-Din, M., Pereira, P. F., Poças Martins, J., & Ramos, N. M. M. (2022). Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. *Buildings*, 12(12), 2155. <https://doi.org/10.3390/buildings12122155>
- OMI. (2021). *Introducción a la OMI*. Organización Marítima Internacional. <https://www.imo.org/es/About/Paginas/Default.aspx>
- Onungwa, I., Olugu-Uduma, N., & Shelden, D. R. (2021). Cloud BIM Technology as a Means of Collaboration and Project Integration in Smart Cities. *SAGE Open*, 11(3), 215824402110332. <https://doi.org/10.1177/21582440211033250>
- Opoku, D.-G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., Rashidi, M., Famakinwa, T., & Bamdad, K. (2022). Drivers for Digital Twin Adoption in the Construction Industry: A Systematic Literature Review. *Buildings*, 12(2), 113. <https://doi.org/10.3390/buildings12020113>
- Paganelli, D., la valle, P., Ercole, S., Lisi, L., Teofili, C., & Nicoletti, Luisa. (2014). *Guidelines for environmental studies related to the construction of coastal defence works*. ISPRA,

- Paixão, A. C., & Bernard Marlow, P. (2003). Fourth generation ports – a question of agility? *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 33(4), 355–376. <https://doi.org/10.1108/09600030310478810>
- Pan, Y., Braun, A., Brilakis, I., & Borrmann, A. (2022). Enriching geometric digital twins of buildings with small objects by fusing laser scanning and AI-based image recognition. *Automation in Construction*, 140, 104375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104375>
- Pan, Y., & Zhang, L. (2020). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, 122, 103517. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- Philipp, R., Prause, G., & Meyer, C. (2020a). Blue Growth Potential in South Baltic Sea Region. *Transport and Telecommunication Journal*, 21(1), 69–83. <https://doi.org/10.2478/ttj-2020-0006>
- Philipp, R., Prause, G., & Meyer, C. (2020b). Blue Growth Potential in South Baltic Sea Region. *Transport and Telecommunication Journal*, 21(1), 69–83. <https://doi.org/10.2478/ttj-2020-0006>
- PIANC. (2006). *Maintenance and Renovation of Navigation Infrastructure*.
- Potseluyko, L., Pour Rahimian, F., Dawood, N., Elghaish, F., & Hajirasouli, A. (2022). Game-like interactive environment using BIM-based virtual reality for the timber frame self-build housing sector. *Automation in Construction*, 142, 104496. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104496>
- Pregnotato, M., Gunner, S., Voyagaki, E., De Risi, R., Carhart, N., Gavriel, G., Tully, P., Tryfonas, T., Macdonald, J., & Taylor, C. (2022). Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure. *Automation in Construction*, 141, 104421. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421>
- Pregnotato, M., Gunner, S., Voyagaki, E., de Risi, R., Carhart, N., Gavriel, G., Tully, P., Tryfonas, T., Macdonald, J., & Taylor, C. (2022). Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure. *Automation in Construction*, 141, 104421. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421>
- Prosertek. (2007). *Principales tipos de muelles portuarios y sus características*. Prosertek.
- Prosertek. (2021, octubre 4). *Un acercamiento a las terminales portuarias*. <https://prosertek.com/es/blog/terminales-portuarias/>
- Puerto Ensenada. (2019). *Buque Atlantis Unity en el Puerto de Ensenada realizando maniobra de descarga de rollos de lámina*. <https://twitter.com/portofensenada/status/1099060941226893312/photo/4>
- Puertos del Estado. (1995). Recomendaciones para obras marítimas: Acciones Climáticas II: Vientos. En *Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente*.
- Puertos del Estado. (2008). *GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA EJECUCIÓN DE OBRAS MARÍTIMAS*.
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- Quijano, M., & Rodríguez-Aragón, B. (2004). El marco legal de la zona costera. En E. Rivera, G. Villalobos, I. Azuz, & F. Rosado (Eds.), *El Manejo Costero en México* (pp. 70–84). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- Quiñones, J. (2006). *Estabilidad de diques en talud*. UNAM.

- Rafsanjani, H. N., & Nabizadeh, A. H. (2021). Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.004>
- Rafsanjani, H. N., & Nabizadeh, A. H. (2023). Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin. *Energy and Built Environment*, 4(2), 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.004>
- Rahaman, H., & Champion, E. (2019). To 3D or Not 3D: Choosing a Photogrammetry Workflow for Cultural Heritage Groups. *Heritage*, 2(3), 1835–1851. <https://doi.org/10.3390/heritage2030112>
- Rocha, Mateus, Fernández, & Ferreira. (2020). A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. *Heritage*, 3(1), 47–67. <https://doi.org/10.3390/heritage3010004>
- Rodríguez, Á., Grau, J., Gómez, G., Lope, A., Dizey, A., Mey, R., Arana, E., Arriandiaga, J., Falcón, S., & Varela, O. (2018). *GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA EJECUCIÓN DE OBRAS MARÍTIMAS* (1a ed.). Puertos del Estado.
- Rueda, A., & Lonin, S. (2012). Rompeolas flotantes: revisión histórica y académica. *Boletín Científico CIOH*, 30, 43–52. <https://doi.org/10.26640/22159045.242>
- Ruggeri, F., Watai, R. A., Rosetti, G. F., Lavieri, R. S., Dotta, R., Ferrari Junior, J. A., & Nishimoto, K. (2017). Floating breakwater concept for large LNG terminals: part 1. Parametric study and process design. *Marine Systems & Ocean Technology*, 12(4), 211–230. <https://doi.org/10.1007/s40868-017-0035-1>
- Ruiz, C. (2019). *Diseño funcional de diques sumergidos para la protección de la costa y aprovisionamiento de hábitats marinos*. UNAM.
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119287568>
- Sacks, R., Girolami, M., & Brilakis, I. (2020). Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech. *Developments in the Built Environment*, 4, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>
- Sampieri, R. H., C. C. F., & L. P. B. (2006). *Metodología de la investigación*. (4ta ed.). McGraw-Hill Education.
- SCT. (2017, junio 6). *Sistema Portuario Nacional*.
- SCT. (2021, junio 7). *SCT efectúa traspaso de la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante a SEMAR*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes
- SEMARNAT. (2001). Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006. *En la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*.
- Sepasgozar, S. M. E. (2020). Digital Twin and Web-Based Virtual Gaming Technologies for Online Education: A Case of Construction Management and Engineering. *Applied Sciences*, 10(13), 4678. <https://doi.org/10.3390/app10134678>
- Shahinmoghadam, M., Natephra, W., & Motamedi, A. (2021). BIM- and IoT-based virtual reality tool for real-time thermal comfort assessment in building enclosures. *Building and Environment*, 199, 107905. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107905>
- Shehzad, H. M. F., Ibrahim, R. B., Yusof, A. F., Khaidzir, K. A. M., Iqbal, M., & Razzaq, S. (2021). The role of interoperability dimensions in building information modelling. *Computers in Industry*, 129, 103444. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103444>

- Sheuly, S. S., Ahmed, M. U., & Begum, S. (2022). Machine-Learning-Based Digital Twin in Manufacturing: A Bibliometric Analysis and Evolutionary Overview. *Applied Sciences*, *12*(13), 6512. <https://doi.org/10.3390/app12136512>
- Silva, R., Martínez, L., Moreno-Casasola, P., Mendoza, E., López-Portillo, J., Lithgow, D., Vázquez, G., Martínez, R., Monroy, R., Cáceres, J., Ramírez, A., & Boy, M. (2017). *Aspectos generales de la zona costera*. UNAM; INECOL.
- Silva, R., & Salles, P. (2004). PUERTOS, MARINAS, MUELLES E INFRAESTRUCTURA NAVIERA. En E. Rivera, G. Villalobos, I. Azuz, & F. Rosado (Eds.), *El Manejo costero de México* (pp. 163–178). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- Sócrates, M. (2004). Legislación naval y mercante aplicada a la protección, conservación y planeación de la zona costera. En E. Rivera, G. Villalobos, I. Azuz, & F. Rosado (Eds.), *El Manejo Costero en México* (pp. 85–98). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- Song, C., Chen, Z., Wang, K., Luo, H., & Cheng, J. C. P. (2022). BIM-supported scan and flight planning for fully autonomous LiDAR-carrying UAVs. *Automation in Construction*, *142*, 104533. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104533>
- Souto-Vidal, M., Ortiz-Sanz, J., & Gil-Docampo, M. (2015). Implementación del levantamiento eficiente de fachadas mediante fotogrametría digital automatizada y el uso de software gratuito. *Informes de la Construcción*, *67*(539), e107. <https://doi.org/10.3989/ic.14.098>
- Succar, B., & Kassem, M. (2015). Macro-BIM adoption: Conceptual structures. *Automation in Construction*, *57*, 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.018>
- T21. (2017, febrero 24). *TPP reactiva operaciones en Lázaro Cárdenas*.
- Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction*, *101*, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>
- Thelen, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B. D., Todd, M. D., Mahadevan, S., Hu, C., & Hu, Z. (2022). A Comprehensive Review of Digital Twin - Part 1: Modeling and Twinning Enabling Technologies. *Computational Engineering, Finance, and Science*. <https://arxiv.org/abs/2208.14197>
- Thoresen, C. A. (2018). Port planning. En *Port Designer's Handbook* (pp. 1–37). ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/pdhhbf.63075.001>
- Tijan, E., Jović, M., & Perić Hadžić, A. (2021). Achieving Blue Economy goals by implementing digital technologies in the maritime transport sector. *Pomorstvo*, *35*(2), 241–247. <https://doi.org/10.31217/p.35.2.6>
- Tonmoy, F. N., Hasan, S., & Tomlinson, R. (2020). Increasing Coastal Disaster Resilience Using Smart City Frameworks: Current State, Challenges, and Opportunities. *Frontiers in Water*, *2*. <https://doi.org/10.3389/frwa.2020.00003>
- Tortorella, G. L., Saurin, T. A., Hines, P., Antony, J., & Samson, D. (2023). Myths and facts of industry 4.0. *International Journal of Production Economics*, *255*, 108660. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108660>
- Trancossi, M., Cannistraro, M., & Pascoa, J. (2018). Can constructal law and exergy analysis produce a robust design method that couples with industry 4.0 paradigms? The case of a container house. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, *5*(4), 303–312. <https://doi.org/10.18280/mmep.050405>

- United Nations Conference on Trade and Development. (2022). *Review of Maritime Transport 2021*.
- Ursini, A., Grazzini, A., Matrone, F., & Zerbinatti, M. (2022). From scan-to-BIM to a structural finite elements model of built heritage for dynamic simulation. *Automation in Construction*, 142, 104518. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104518>
- Utkucu, D., & Sözer, H. (2020). Interoperability and data exchange within BIM platform to evaluate building energy performance and indoor comfort. *Automation in Construction*, 116, 103225. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103225>
- Valdepeñas, P., Esteban Pérez, M. D., Henche, C., Rodríguez-Escribano, R., Fernández, G., & López-Gutiérrez, J.-S. (2020). Application of the BIM Method in the Management of the Maintenance in Port Infrastructures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(12), 981. <https://doi.org/10.3390/jmse8120981>
- Valdés, C., & Herrmann, H. (2004). Cooperación Internacional en el Manejo Integrado de la Zona Costera en México. En *El marco legal de la zona costera* (pp. 152–162). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- Valdés, R. (2018). Las Marinas Turísticas y el Delegado Honorario en México. *ININVESTAM*. <https://cesnav.uninav.edu.mx/>
- Valinejadshoubi, M., Moselhi, O., Bagchi, A., & Salem, A. (2021). Development of an IoT and BIM-based automated alert system for thermal comfort monitoring in buildings. *Sustainable Cities and Society*, 66, 102602. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102602>
- van Berlo, L., & Krijnen, T. (2014). Using the BIM Collaboration Format in a Server Based Workflow. *Procedia Environmental Sciences*, 22, 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.11.031>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Wang, B., Wang, Q., Cheng, J. C. P., & Yin, C. (2022). Object verification based on deep learning point feature comparison for scan-to-BIM. *Automation in Construction*, 142, 104515. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104515>
- Wang, D., Li, D., Gong, Y., Wang, R., Wang, J., & Huang, X. (2019). Development situation and future demand for the ports along the Northern Sea Route. *Research in Transportation Business & Management*, 33, 100465. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100465>
- Wang, K., Guo, F., Zhang, C., Hao, J., & Schaefer, D. (2022). Digital Technology in Architecture, Engineering, and Construction (AEC) Industry: Research Trends and Practical Status toward Construction 4.0. *Construction Research Congress 2022*, 983–992. <https://doi.org/10.1061/9780784483978.100>
- Wang, T., Gan, V. J. L., Hu, D., & Liu, H. (2022). Digital twin-enabled built environment sensing and monitoring through semantic enrichment of BIM with SensorML. *Automation in Construction*, 144, 104625. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104625>
- Wang, Y.-G., He, X.-J., He, J., & Fan, C. (2022). Virtual trial assembly of steel structure based on BIM platform. *Automation in Construction*, 141, 104395. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104395>

- White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, *110*, 103064. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064>
- Wikipedia. (2021a, enero 15). *Pesca artesanal*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Pesca\\_artesanal](https://es.wikipedia.org/wiki/Pesca_artesanal)
- Wikipedia. (2021b, noviembre 14). *Pesca de altura*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Pesca\\_de\\_altura](https://es.wikipedia.org/wiki/Pesca_de_altura)
- World Bank. (2017a). *THE POTENTIAL OF THE BLUE ECONOMY*.
- World Bank. (2017b). *What is the Blue Economy?* <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2017/06/06/>
- Xie, X., Merino, J., Moretti, N., Pauwels, P., Chang, J. Y., & Parlikad, A. (2023). Digital twin enabled fault detection and diagnosis process for building HVAC systems. *Automation in Construction*, *146*, 104695. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104695>
- Yuan, X., Smith, A., Moreu, F., Sarlo, R., Lippitt, C. D., Hojati, M., Alampalli, S., & Zhang, S. (2023). Automatic evaluation of rebar spacing and quality using LiDAR data: Field application for bridge structural assessment. *Automation in Construction*, *146*, 104708. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104708>
- Zahid, H., Elmansoury, O., & Yaagoubi, R. (2021). Dynamic Predicted Mean Vote: An IoT-BIM integrated approach for indoor thermal comfort optimization. *Automation in Construction*, *129*, 103805. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103805>
- Zárate, D. (2004). Instrumentos para la Gestión y el Manejo de la Zona Costera de México. En E. Rivera, G. Villalobos, I. Azuz, & F. Rosado (Eds.), *El Manejo Costero en México* (pp. 39–50). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- Zepeda-Ortega, I. E., Ángeles-Castro, G., & Carrillo-Murillo, D. G. (2017). Infraestructura portuaria y crecimiento económico regional en México. *Economía Sociedad y Territorio*. <https://doi.org/10.22136/est002017806>
- Zhao, J., Feng, H., Chen, Q., & Garcia de Soto, B. (2022a). Developing a conceptual framework for the application of digital twin technologies to revamp building operation and maintenance processes. *Journal of Building Engineering*, *49*, 104028. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104028>
- Zhao, J., Feng, H., Chen, Q., & Garcia de Soto, B. (2022b). Developing a conceptual framework for the application of digital twin technologies to revamp building operation and maintenance processes. *Journal of Building Engineering*, *49*, 104028. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104028>
- Zhao, Y., & Taib, N. (2022). Cloud-based Building Information Modelling (Cloud-BIM): Systematic literature review and Bibliometric-qualitative Analysis. *Automation in Construction*, *142*, 104468. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104468>
- Zheng, L., Lu, W., Wu, L., & Zhou, Q. (2023). A review of integration between BIM and CFD for building outdoor environment simulation. *Building and Environment*, *228*, 109862. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109862>
- Zheng, Y., Törmä, S., & Seppänen, O. (2021). A shared ontology suite for digital construction workflow. *Automation in Construction*, *132*, 103930. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103930>