



HENKO
DIGITAL

PUERTOS MÁS
INTELIGENTES,
SOSTENIBLES Y
COMPETITIVOS.

COMPENDIO

Puertos Azules

Transformación digital
y sostenibilidad para puertos
pesqueros y comerciales

Damian Adolfo Giacone



Contenido

	Nota del autor	4
Capítulo 1	Los datos detrás de los Puertos Azules Dos iniciativas con nombre parecido y una misma base, medir para saber si se vive del mar sin agotarlo	6
Capítulo 2	Decidir con incertidumbre tecnológica Por qué los datos propios son la mejor cobertura cuando no se sabe qué tecnología va a ganar	11
Capítulo 3	Nivel 0 a nivel 1, el primer salto de madurez tecnológica Por qué mapear y medir a mano, antes que digitalizar, es la condición para que un puerto pueda diagnosticarse	17
Capítulo 4	Nivel 1 a nivel 2, el salto que integra los datos Por qué pasar de datos dispersos a una plataforma integrada es el paso de mayor impacto en la escala de madurez	23
Capítulo 5	Nivel 2 a nivel 3, de tener un tablero a tomar decisiones Por qué la gobernanza de datos es la condición previa para que un puerto pueda automatizar sin amplificar sus errores	29
Capítulo 6	Nivel 3 a nivel 4, el paso de automatizar a coordinar Cómo consolidar la automatización y medir su impacto antes de dejar que agentes de IA coordinen la cadena completa	35
Capítulo 7	Nivel 4, el puerto inteligente y verificable Qué implica llegar al destino de la escala de madurez y qué dejó el recorrido completo de la serie Puertos Azules	41
Capítulo 8	Ciberseguridad en el puerto azul Por qué la conectividad que exige la madurez tecnológica abre una oportunidad y, si se hace mal, una superficie de ataque	47
	Anexo · Tecnologías por nivel	54
	Anexo · Glosario de sistemas portuarios	57

Nota del autor

Esta serie nació de una conversación. Soraya Corvalán es ingeniera pesquera —la primera egresada de esa carrera en la UTN Facultad Regional Chubut— y trabajamos juntos en Alpесca, una de las pesqueras más grandes del país: ella en su rol de experta pesquera, yo intentando explotar todo lo que el proceso nos daba a nivel de datos. Años después volvimos a coincidir, esta vez como docentes. Cuando Soraya empezó a hablarme de los Puertos Azules, la pregunta que se me apareció fue casi automática: ¿y la infraestructura tecnológica? ¿y los datos? Es una capa que no suele discutirse en la conversación inicial sobre sostenibilidad portuaria, pero que de algún modo subyace debajo de todo el concepto: no hay manera de verificar que un puerto vive del mar sin agotarlo si no hay datos que lo demuestren.

Que esa capa todavía no se discuta tiene una explicación lógica y no es casual. La FAO planteó el concepto de Puertos Azules por primera vez en Vigo en 2019, pero en Argentina el primer taller sobre el tema recién se hizo en 2023, y no fue hasta 2026 que el país se adhirió formalmente a la iniciativa. Es un concepto todavía joven acá: es lógico que la discusión esté concentrada en los conceptos previos —qué es un puerto azul, cómo se mide su sostenibilidad, quiénes son los actores involucrados— y no en la capa tecnológica que lo sostiene. Pero justamente por eso me parece necesario empezar a marcarla ahora: para que la adopción arranque con bases sólidas y con planes progresivos que permitan escalar en la escala de madurez, en lugar de tener que resolver esa capa a los apurones más adelante.

Fui a buscar qué se había escrito sobre esa capa —tecnología, datos, y también la pregunta de gobernanza y protección que se abre apenas un puerto empieza a depender de sistemas digitales, dado que se trata de infraestructura crítica— y no encontré demasiado. Ahí decidí escribir esto: no porque tuviera la respuesta completa, sino porque la pregunta me parecía necesaria y nadie la estaba respondiendo desde este ángulo.

Mi propio trasfondo es la convergencia entre Tecnología de la Información y Tecnología Operacional, un lugar desde el que se aprende rápido que ningún sistema mejora lo que no mide. La Industria 4.0 me dio el "cómo": pensar la digitalización, la integración de datos y la automatización como etapas de un mismo proceso de madurez, no como saltos aislados. El marco de Puertos Azules de la FAO me dio el "para qué": sostenibilidad ambiental, social y económica, verificada con datos propios en lugar de declarada de palabra.

La escala de cinco niveles que propongo en esta serie es mi intento de tender un puente entre esas dos miradas: una manera concreta y progresiva de acompañar a un puerto convencional en su transformación hacia un puerto azul, empezando por lo más simple —ordenar lo que ya existe— y llegando a lo más ambicioso —agentes

que coordinan decisiones y generan su propia evidencia de cumplimiento—. No es un estándar ni una metodología certificada. Es una síntesis propia, puesta a disposición de quienes operan puertos y plantas, para que la discutan, la corrijan y la usen.

CAPÍTULO 1

Serie Puertos Azules · Nota técnica

Los datos detrás de los Puertos Azules

Dos iniciativas con nombre parecido y una misma base, medir para saber si se vive del mar sin agotarlo

Resumen ejecutivo

Bajo la denominación «puerto azul» conviven dos iniciativas que nacieron por separado. La primera, impulsada por la FAO, propone transformar los puertos pesqueros y comerciales en espacios sostenibles en tres dimensiones: ambiental, social y económica. La segunda, conocida como Puertos 4.0, aplica la Estrategia del Océano Azul de Kim y Mauborgne al sector portuario: en lugar de competir por tarifa y volumen, el puerto se diferencia mediante digitalización, automatización e interoperabilidad.

Este capítulo sostiene que ambas iniciativas exigen la misma base: datos propios, medidos y confiables. Sin capacidad de medición, ningún puerto puede demostrar su impacto ni ofrecer un servicio diferenciado. Para recorrer ese camino se presenta un modelo de madurez tecnológica de cinco niveles, que se transita en espiral y se articula con las cuatro fases del proceso de la FAO. Es la primera entrega de una serie que analizará cada etapa.

1. Dos iniciativas con nombre parecido

El término «puerto azul» se usa hoy para referirse a dos marcos distintos. Conviene no confundirlos, porque responden a preguntas diferentes, aunque terminan pidiendo la misma base tecnológica.

1.1 Puertos Azules de la FAO

La Iniciativa Puertos Azules (Blue Ports Initiative) es un marco que impulsa la transformación de puertos pesqueros y comerciales en espacios sostenibles. Se evalúa en tres dimensiones (ambiental, social y económica), más la gobernanza, y requiere la participación de todos los actores involucrados.

1.2 Puertos 4.0 y la Estrategia del Océano Azul

Puertos 4.0 toma la Estrategia del Océano Azul de Kim y Mauborgne y la traslada al sector portuario. La idea central es dejar de competir en el «océano rojo» de las tarifas y el volumen, y crear valor mediante digitalización, automatización e interoperabilidad. Es el enfoque desarrollado por Ortiz-Rey, González-Cancelas, Molina Serrano y colaboradores (2021).

Aspecto	Puertos Azules (FAO)	Puertos 4.0
Tipo de marco	Sostenibilidad	Competitividad
Objetivo	Espacios ambiental, social y económicamente sostenibles	Diferenciarse en lugar de competir por tarifa y volumen
Herramientas	Proceso de cambio en cuatro fases, con participación de los actores	Digitalización, automatización e interoperabilidad
Mira hacia	El mar	El negocio

2. La pregunta que las cruza

Pese a sus diferencias, ambos marcos comparten una pregunta: ¿cómo saber que se vive del mar sin agotarlo? La respuesta es una sola: con datos.

No es posible validar qué tan azul es un puerto si no existe una manera de medirlo. Sin captura, integración y análisis de información, un puerto no puede demostrar su impacto ambiental, y tampoco puede ofrecer un servicio diferenciado. Sostenibilidad y competitividad dependen, en la práctica, de los mismos datos.

Esta observación se enmarca en el trabajo del autor para un curso de Inteligencia Artificial aplicada a la producción pesquera, y da lugar a una necesidad concreta: contar con un marco de maduración tecnológica que permita avanzar por etapas.

3. El proceso de la FAO en cuatro fases

El documento *Roadmap to a Blue Port* (FAO, 2023) define un proceso de transformación en cuatro fases. Es un marco de gestión del cambio, adaptable a cada contexto local, y no baja al nivel de la infraestructura tecnológica.

1. **Diagnóstico.** Relevamiento en las tres dimensiones de sostenibilidad, más la gobernanza.
2. **Estrategia adaptable.** Diseño de un enfoque propio: no existe una receta única de puerto azul, y cada puerto define sus ejes.
3. **Implementación.** Ejecución de proyectos y acciones concretas basadas en buenas prácticas.
4. **Monitoreo y evaluación.** Medición del impacto y comunicación de resultados a los actores involucrados.

Todas estas fases requieren información para ejecutarse. El marco indica qué hacer, pero no cómo obtener ni gestionar los datos que cada fase necesita. Ese es el espacio que cubre la escala de madurez tecnológica.

4. Una escala de madurez tecnológica

El modelo que se presenta a continuación es una síntesis propia, elaborada por el autor a partir del marco de la FAO y de la literatura sobre digitalización portuaria. No corresponde a un documento único ni a un estándar reconocido. Propone cinco niveles, cada uno con su situación característica y con el riesgo que corre un puerto que se queda a mitad de camino.

Nivel	Situación característica	Riesgo si no avanza
0. Manual o reactivo	Registros en papel o planillas sueltas, sin trazabilidad digital. Las decisiones se basan en la experiencia del personal.	Los reportes de sostenibilidad quedan sustentados en estimaciones no auditables.
1. Digitalización básica	Sensores puntuales (frío, combustible) y sistemas administrativos digitalizados, pero aislados entre sí.	Cada sistema mide «su» verdad; integrarlos después resulta más costoso.
2. Integración de datos	Plataforma central que reúne flota, planta, energía y residuos en un repositorio único.	Sin gobernanza de datos, la plataforma se llena de información en la que nadie confía.
3. Automatización y decisión asistida	Mantenimiento predictivo, ruteo optimizado y proyección de cumplimiento de cuota en tiempo real.	Automatizar sin gobernanza previa amplifica los errores en lugar de corregirlos.
4. Puerto inteligente y verificable	Agentes de IA coordinan la cadena completa y la trazabilidad para certificaciones se genera de forma automática.	Sin etapas previas sólidas, los agentes deciden sobre datos poco confiables.

4.1 Una espiral, no una escalera

La escala no se recorre en una sola pasada. Cada nivel tecnológico repite su propio ciclo de diagnóstico, estrategia, implementación y monitoreo antes de habilitar el salto al siguiente. De allí que los objetivos de cada etapa funcionen como condición de salida y no como una lista de deseos.

Un puerto en el nivel 1, por ejemplo, realiza su propio diagnóstico, estrategia, implementación y monitoreo antes de avanzar hacia la integración de datos del nivel 2. No tiene sentido diseñar la «estrategia adaptable» de la FAO para un puerto que todavía no cuenta con sensores básicos.

4.2 El salto de mayor impacto

De todos los pasos, el más decisivo es el del nivel 1 al nivel 2: pasar de datos dispersos a una plataforma integrada. Sin ese salto, un puerto difícilmente puede sostener un reporte de sostenibilidad creíble o una certificación auditable.

Ejemplo ilustrativo. Un puerto que mide consumo de combustible en el sistema de la flota y desperdicios en el de la planta, cada uno en su propia planilla, cuenta con datos, pero no con una visión. Recién cuando ambos se integran bajo criterios comunes de calidad y trazabilidad de origen es posible cruzar las dimensiones ambiental y económica en un único tablero.

5. Cómo ubicarse en la escala

Una forma rápida de ubicar la situación de un puerto consiste en identificar cuál de las siguientes descripciones se ajusta mejor a su realidad. Si los hechos se conocen solo porque alguien los cuenta, y no existe ningún registro digital de flota, planta o cadena de frío, el puerto se encuentra en el nivel 0. Si hay sensores y sistemas digitales, pero cada área mira su propia planilla y nadie las cruza, se encuentra en el nivel 1.

Si existe un tablero único donde se ve la flota, la planta, la energía y los residuos, aunque todavía no se actúa de forma automática sobre él, el puerto está en el nivel 2. Si el sistema sugiere o ejecuta acciones (rutas, mantenimiento, alertas) sin que alguien las calcule a mano, alcanzó el nivel 3. Y si la trazabilidad para auditorías y certificaciones se genera sola, y los agentes coordinan decisiones entre mar, planta y mercado, está en el nivel 4.

6. Alcance de este capítulo

Este capítulo adopta la mirada de los datos, la automatización y la Industria 4.0. No emite juicios sobre el estado de los recursos pesqueros ni sobre la política ambiental, que corresponden a especialistas de cada campo. El modelo de madurez es una propuesta de trabajo en desarrollo, y los objetivos concretos de cada nivel, con el riesgo de quedarse a mitad de camino, se analizarán en las próximas entregas de la serie.

CAPÍTULO 2

Serie Puertos Azules · Nota técnica

Decidir con incertidumbre tecnológica

Por qué los datos propios son la mejor cobertura cuando no se sabe qué tecnología va a ganar

Resumen ejecutivo

Toda industria enfrenta hoy una decisión tecnológica cuya respuesta todavía no existe: qué combustible, qué maquinaria, qué esquema de energía, refrigeración o automatización conviene adoptar. Ante esa falta de certezas, la reacción habitual es esperar. Este capítulo sostiene que esperar también es una decisión, y que suele ser la más costosa.

La incertidumbre tecnológica no se elimina, pero puede administrarse. Para ello se proponen tres criterios de decisión (inversiones "sin arrepentimiento", decisiones modulares y reversibles, y señales de activación definidas de antemano) y una condición que los sostiene a todos: contar con datos propios, medidos, integrados y con historia. Esos datos cumplen una doble función. Permiten anticipar el comportamiento de la propia operación mediante herramientas de Inteligencia Artificial y Machine Learning, y permiten evaluar con rapidez qué tecnología encaja con la realidad de la organización cuando el panorama se aclare.

1. Origen de este capítulo

Este capítulo surge de una consulta recibida en el intercambio sobre el post *Los datos detrás de los Puertos Azules*, primera entrega de la serie: si la modernización de los puertos no quedaría condicionada, antes que nada, por saber cuándo y en qué sentido evolucionarán los combustibles alternativos.

La pregunta es pertinente y excede al sector portuario. Por eso se la aborda aquí en términos generales: primero se define qué es la incertidumbre tecnológica, luego se muestra que atraviesa a distintas industrias y, finalmente, se propone un modo de decidir en su presencia.

2. Qué es la incertidumbre tecnológica

Incetidumbre tecnológica es la imposibilidad de saber de antemano qué tecnología va a imponerse, cuándo alcanzará madurez, cuánto costará y bajo qué reglas operará. Como consecuencia, no es posible asignar probabilidades confiables a los resultados de una inversión.

2.1 Diferencia con el riesgo

La distinción proviene de la economía clásica (Knight, 1921). En una situación de **riesgo** se conocen los escenarios posibles y sus probabilidades, como ocurre con un seguro. En una situación de **incertidumbre** no se conocen ni unos ni otros. Por lo tanto, no alcanza con calcular: hay que decidir de modo que la decisión resista distintos futuros.

2.2 Fuentes de incertidumbre

Fuente	Pregunta que plantea
Técnica	¿La tecnología funciona a escala y cuándo alcanza madurez?
De mercado	¿Quién la adopta y cuánta demanda real existe?
Regulatoria y de estándares	¿Qué exigirán las normas y qué estándar termina prevaleciendo?
De costos e infraestructura	¿Cuánto cuesta y existe la red necesaria para abastecerla y operarla?

En la práctica estas fuentes se presentan combinadas, y es esa combinación la que vuelve difícil decidir.

3. Un fenómeno transversal

La incertidumbre tecnológica no es exclusiva de los puertos. Cada industria tiene su propia incógnita:

Sector	Incógnita tecnológica
Puertos	Qué combustible alternativo predominará (GNL, metanol, biocombustibles, amoníaco, electrificación). Es probable que no gane uno solo: la conveniencia depende del tipo de puerto, de los buques que recibe y de las rutas que operan.
Agro	Cuánta tecnología de precisión y qué maquinaria adoptar.
Industria alimenticia	Qué cambios de energía, envases o refrigeración se le van a exigir.
Metalmecánica	Cómo impactan la automatización, la energía y la IA en sus procesos.

En ningún caso existe una respuesta completa disponible. Y esperar a tenerla también es una decisión: la de postergar, con el costo de oportunidad que eso implica, y casi siempre la más costosa de las alternativas.

4. Tres criterios para decidir con incertidumbre

Planificar bajo incertidumbre tecnológica no consiste en adivinar cuál será la tecnología ganadora, sino en elegir mejor los movimientos.

4.1 Inversiones "sin arrepentimiento"

Son aquellas que resultan útiles cualquiera sea la tecnología que finalmente se imponga: medir consumos, tiempos y desperdicios, e integrar esos datos. Corresponden a los niveles 1 (digitalización básica) y 2 (integración de datos) del modelo de madurez tecnológica propuesto en el *Roadmap de madurez tecnológica* de esta serie, y constituyen el primer escalón de cualquier proceso de maduración.

4.2 Decisiones modulares y reversibles

En lugar de comprometer todo el capital en una única tecnología, conviene priorizar soluciones que puedan ampliarse o adaptarse a medida que el panorama se aclara. La reversibilidad tiene valor económico: reduce el costo de equivocarse.

4.3 Señales de activación definidas de antemano

Consiste en establecer, antes de que el contexto cambie, qué evento dispara la inversión: un cambio regulatorio, un movimiento de precios o un umbral de demanda. Si el criterio no se define de antemano, la decisión termina tomándose tarde o por impulso.

Ejemplo ilustrativo. Un puerto podría definir que, cuando la proporción de buques que recalcan con determinado tipo de propulsión supere un umbral acordado por su comité directivo, se activa la inversión en la infraestructura de abastecimiento correspondiente. El umbral lo fija cada organización con sus propios datos; no existe un valor universal.

5. El rol de los datos

La incertidumbre no se elimina: se administra. Y lo que permite administrarla son los datos propios, por dos razones complementarias.

Primera: permiten anticipar el comportamiento de la propia operación. Un proceso que se mide, que cuenta con métricas y del cual se conoce su historia puede ser analizado con herramientas de Inteligencia Artificial y Machine Learning para

intentar predecir qué sucederá. En el modelo de madurez de la serie, esto corresponde al nivel 3 (automatización y decisión asistida), que solo es viable si los niveles previos están consolidados: automatizar sin gobernanza de datos amplifica los errores en lugar de corregirlos.

Segunda: permiten evaluar rápidamente qué tecnología encaja. Cuando las tecnologías maduren, la organización que ya conoce su realidad a través de sus datos puede identificar con rapidez cuál se ajusta a ella, en lugar de comenzar a medir recién en ese momento y llegar tarde a la decisión.

5.1 Alcance y límites

Conviene ser precisos sobre lo que los datos pueden y no pueden hacer. Los modelos predictivos se entrenan con la historia de la propia operación: sirven para anticipar consumos, demanda, fallas o desvíos, pero no predicen qué tecnología va a prevalecer en el mercado ni qué normas se sancionarán. Los datos no eliminan la incertidumbre externa; reducen la parte que depende de la propia operación y acortan el tiempo de reacción cuando el contexto se define.

En síntesis: entender la realidad propia a través de los datos es la condición para decidir con evidencia cuando llegue el momento.

6. Cómo empezar

Sin importar el sector, los primeros pasos coinciden con los objetivos de los niveles iniciales del modelo de madurez:

1. **Mapear el proceso completo** y ubicar dónde se genera cada dato hoy.
2. **Registrar un conjunto mínimo de indicadores** (consumos, tiempos, desperdicios, incidentes), aunque al comienzo sea de forma manual.
3. **Estandarizar formatos y unidades** entre áreas, para que los datos puedan cruzarse.
4. **Integrar los datos** en una plataforma única, con criterios definidos de calidad, acceso y trazabilidad de origen.
5. **Establecer una línea base** medible para cada indicador, y definir por escrito las señales de activación de las próximas inversiones.

7. Alcance de este capítulo

Este capítulo adopta la mirada de los datos y la automatización. La energía y los combustibles no son la especialidad del autor, por lo que no se emiten juicios sobre su evolución. Se invita a los especialistas de cada sector a aportar su perspectiva sobre las incógnitas planteadas.

CAPÍTULO 3

Serie Puertos Azules · Nota técnica

Nivel 0 a nivel 1, el primer salto de madurez tecnológica

Por qué mapear y medir a mano, antes que digitalizar, es la condición para que un puerto pueda diagnosticarse

Resumen ejecutivo

Todo modelo de madurez tecnológica describe un punto de partida común: el nivel en el que las operaciones funcionan sin registro digital, sostenidas por la experiencia y la memoria del personal. En la escala de cinco niveles propuesta para los puertos pesqueros y comerciales, ese punto es el nivel 0, manual o reactivo. No es una situación excepcional ni un signo de atraso: es, de hecho, el estado más frecuente entre las organizaciones que todavía no iniciaron su proceso de transformación digital.

Este capítulo, tercera entrega de la serie Puertos Azules, aborda el primer salto de la escala: del nivel 0 al nivel 1. Se describe qué caracteriza al punto de partida, qué riesgo concreto implica quedarse en él y cuáles son los cuatro objetivos que permiten superarlo sin necesidad de inversión tecnológica compleja. El argumento central es que este primer salto no requiere sensores ni plataformas: requiere orden, y ese orden es la condición para que cualquier diagnóstico posterior, incluido el que propone la FAO en su marco de puertos azules, tenga información real con la cual trabajar.

1. Contexto: dónde empieza esta escala

Las notas anteriores de esta serie plantearon dos ideas de base. La primera, que sostenibilidad y competitividad portuaria, aunque respondan a marcos distintos, piden la misma base de datos. La segunda, que la incertidumbre tecnológica no se elimina sino que se administra, y que los datos propios son la herramienta principal para hacerlo. Este capítulo retoma esas ideas y las aplica al primer tramo de la escala de madurez tecnológica presentada en el *Roadmap de madurez tecnológica* de la serie: el pasaje del nivel 0 al nivel 1.

La escala completa tiene cinco niveles, del 0 al 4, y se recorre en espiral: cada nivel repite su propio ciclo de diagnóstico, estrategia, implementación y monitoreo antes de habilitar el salto al siguiente. Este capítulo se concentra en el primer tramo de ese recorrido, el que va del estado manual al de digitalización básica, por ser el punto en el que se encuentra la mayoría de los puertos pesqueros hoy.

2. El nivel 0: manual y reactivo

2.1 Qué lo caracteriza

El nivel 0 se identifica por tres rasgos que suelen presentarse juntos. Los registros existen en papel o en planillas sueltas, sin ningún criterio común de formato. No hay trazabilidad digital de la operación: un evento (una falla, un desvío de cuota, un incidente ambiental) se reconstruye después, a partir del relato de quien lo vivió. Y las decisiones se apoyan en la experiencia y la memoria del personal, no en un registro consultable.

La señal más simple para reconocer este nivel es una frase: *si algo pasa, nos enteramos porque alguien lo cuenta*. No existe ningún registro digital de flota, planta o cadena de frío que permita verificar, después de los hechos, qué ocurrió.

2.2 Por qué no es un juicio de valor

Conviene aclarar que estar en el nivel 0 no es una falla de gestión. Es, con frecuencia, el resultado de una operación que creció resolviendo lo urgente, sin que en ningún momento existiera una razón de peso para invertir en digitalización. El problema no es haber llegado hasta ahí. El problema es quedarse, porque la memoria del personal no escala, no se audita y no se transfiere cuando esa persona deja de estar disponible.

3. El riesgo de quedarse

El riesgo de permanecer en el nivel 0 no es abstracto: es que cualquier reporte de sostenibilidad, de cumplimiento o de eficiencia que la organización necesite producir queda basado en estimaciones que nadie puede auditar. Esto tiene consecuencias concretas en tres frentes.

En el frente de la sostenibilidad, ninguna de las tres dimensiones que propone el marco de la FAO (ambiental, social, económica) puede medirse con rigor si no hay datos que las respalden. Un puerto puede tener buenas prácticas reales, pero si no puede demostrarlas con evidencia, esas prácticas no cuentan para una certificación ni para un reporte ante un comprador que las exige.

En el frente de la competitividad, un puerto que no puede mostrar datos propios no puede diferenciarse. La estrategia de digitalización, automatización e interoperabilidad que proponen los marcos de Puertos 4.0 no tiene con qué arrancar si no existe, primero, un registro mínimo de la operación.

En el frente de la oportunidad, cada mes que pasa sin ese registro mínimo es información que se pierde de forma irrecuperable: no hay manera de reconstruir retroactivamente el consumo de combustible o el volumen de descartes de un período que no se midió. La postergación tiene, en este sentido, un costo que crece con el tiempo.

4. Los cuatro objetivos para salir del nivel 0

Superar el nivel 0 no exige tecnología sofisticada. Exige método y priorización. El roadmap de la serie identifica cuatro objetivos concretos, pensados para ejecutarse con los recursos que una organización ya tiene disponibles.

1. **Mapear el proceso completo**, de mar a planta y a mercado, y ubicar dónde se genera cada dato hoy. Antes de digitalizar cualquier cosa, hay que saber qué información existe, en qué formato y en manos de quién. Este mapeo suele revelar que buena parte de los datos ya se genera, solo que de forma dispersa y no aprovechada.
2. **Registrar manualmente un set mínimo de indicadores** de sostenibilidad: consumo, descartes, incidentes. No hace falta automatizar la captura desde el primer día. Alcanza con definir qué se va a medir, con qué frecuencia y bajo qué criterio, y sostenerlo de forma consistente.
3. **Designar un responsable de datos o de gobernanza**, aunque sea con dedicación parcial. Sin una persona responsable de sostener el registro, cualquier iniciativa de este tipo se abandona apenas surge una urgencia operativa, que siempre las hay.
4. **Priorizar los dos o tres procesos de mayor impacto ambiental o de compliance** para digitalizar primero. No todos los procesos requieren el mismo nivel de urgencia. Identificar cuáles concentran el mayor riesgo o la mayor exigencia regulatoria permite ordenar el esfuerzo en lugar de dispersarlo.

Ejemplo ilustrativo. Un puerto que recibe descargas de varias embarcaciones podría empezar por dos procesos: el registro de descartes por especie y el consumo de combustible por embarcación. Son datos que ya existen en alguna forma (una planilla de capitanía, un remito de combustible) y que, una vez estandarizados, permiten construir los primeros dos indicadores de sostenibilidad con información real, sin inversión en sensores.

4.1 Un orden que no es opcional

Estos cuatro objetivos no son independientes entre sí: el mapeo (objetivo 1) es la base para decidir qué priorizar (objetivo 4), y sin un responsable designado (objetivo 3) el registro manual (objetivo 2) rara vez se sostiene más de unas pocas semanas. Tratarlos como una lista de tareas sueltas es el error más común en esta etapa.

5. Qué habilita en el marco de la FAO

El *Roadmap to a Blue Port* de la FAO (2023) define un proceso de transformación en cuatro fases: diagnóstico, estrategia adaptable, implementación, y monitoreo y evaluación. Es un marco de gestión del cambio, no de infraestructura tecnológica, y por eso no indica cómo obtener los datos que cada fase necesita.

Cumplir los cuatro objetivos del nivel 0 es lo que le da a la fase de diagnóstico de la FAO algo real con qué trabajar. Sin ese mínimo, el diagnóstico se construye sobre percepciones y no sobre evidencia, y cualquier estrategia que se diseñe a partir de él hereda esa debilidad. El salto del nivel 0 al nivel 1 no es, entonces, un paso tecnológico menor: es la condición de posibilidad de todo lo que sigue en el proceso de la FAO.

6. Autodiagnóstico rápido

La siguiente tabla ayuda a ubicar en qué nivel se encuentra una operación hoy, antes de entrar en el detalle de los objetivos.

Nivel	Señal característica
0. Manual o reactivo	"Si algo pasa, nos enteramos porque alguien lo cuenta." No hay ningún registro digital de flota, planta o cadena de frío.
1. Digitalización básica	Hay sensores y sistemas digitales, pero cada área mira su propia planilla y nadie los cruza.

Si la primera descripción resulta familiar, el paso siguiente no es evaluar plataformas ni proveedores de tecnología. Es ejecutar los cuatro objetivos de este capítulo, en el orden en que fueron presentados.

7. Alcance de este capítulo

Este capítulo describe el primer tramo de una escala de madurez que es una síntesis propia del autor, elaborada a partir del marco de la FAO y de la literatura sobre digitalización portuaria. No corresponde a un estándar certificado ni a una metodología única. Las próximas entregas de la serie recorrerán los tramos siguientes: de la digitalización básica a la integración de datos, de ahí a la automatización y decisión asistida, y finalmente al puerto inteligente y verificable.

CAPÍTULO 4

Serie Puertos Azules · Nota técnica

Nivel 1 a nivel 2, el salto que integra los datos

Por qué pasar de datos dispersos a una plataforma integrada es el paso de mayor impacto en la escala de madurez

Resumen ejecutivo

Una organización que alcanzó el nivel 1 de la escala de madurez tecnológica ya dejó atrás el registro en papel: cuenta con sensores puntuales, con sistemas administrativos digitalizados y con datos que se generan todos los días. Sin embargo, esos datos suelen quedar aislados en cada área. La flota mide su consumo en un sistema, la planta registra sus descartes en otro y la logística lleva su propia planilla. Existe información, pero no existe una visión de conjunto.

Este capítulo, cuarta entrega de la serie Puertos Azules, aborda el segundo salto de la escala: del nivel 1 al nivel 2. Se describe qué caracteriza al punto de partida, qué riesgo concreto implica quedarse en él y cuáles son los cuatro objetivos que permiten superarlo. El argumento central es que este es el salto de mayor impacto de todo el recorrido, porque sin una plataforma integrada ningún puerto puede sostener un reporte de sostenibilidad creíble ni una certificación auditable, y porque cada mes que se posterga la estandarización encarece la integración posterior.

1. Contexto: en qué punto de la escala se ubica este capítulo

Las entregas anteriores de la serie establecieron tres ideas de base. La primera, que la sostenibilidad y la competitividad portuaria responden a marcos distintos pero exigen la misma base de datos. La segunda, que la incertidumbre tecnológica no se elimina sino que se administra, y que los datos propios son la herramienta principal para hacerlo. La tercera, desarrollada en el capítulo anterior, que el primer salto de la escala, del nivel 0 al nivel 1, no requiere tecnología sofisticada sino orden: mapear el proceso, registrar un conjunto mínimo de indicadores, designar un responsable de datos y priorizar los procesos de mayor impacto.

La escala completa tiene cinco niveles, del 0 al 4, y se recorre en espiral. Cada nivel repite su propio ciclo de diagnóstico, estrategia, implementación y monitoreo antes de habilitar el salto al siguiente, tal como lo plantea el marco de cuatro fases de la FAO (2023). Este capítulo se ocupa del tramo que sigue al orden inicial: el momento en que la organización ya tiene datos digitales y debe decidir cómo hacer que trabajen juntos.

2. El nivel 1: digitalización básica

2.1 Qué lo caracteriza

El nivel 1 se reconoce por tres rasgos que suelen aparecer combinados. Existen sensores puntuales en algunos puntos críticos de la operación, por ejemplo en la cadena de frío o en el consumo de combustible. Los procesos administrativos ya se registran en sistemas digitales. Y, al mismo tiempo, esos sensores y esos sistemas están aislados entre sí: cada uno responde a un área, a un proveedor y, con frecuencia, a un criterio distinto de formato y de unidades de medida.

La señal más simple para reconocer este nivel es una descripción: hay sensores y sistemas digitales, pero cada área mira su propia planilla y nadie las cruza. La información existe y se almacena, pero no se combina.

2.2 Un punto de partida engañoso

El nivel 1 puede dar una impresión de avance mayor a la real. Quien recorre la operación encuentra pantallas, sensores y sistemas, y es razonable concluir que la transformación digital está encaminada. La dificultad aparece cuando se formula una pregunta transversal, por ejemplo cuánto combustible se consume por tonelada procesada. Responderla exige cruzar datos de la flota con datos de la planta, y si esos datos se generaron con formatos, unidades y periodicidades distintas, el cruce se convierte en un trabajo manual, lento y difícil de verificar.

Dicho de otro modo: en el nivel 1 hay datos, pero no hay todavía una visión. Esa diferencia es la que justifica un salto específico hacia el nivel 2.

3. El riesgo de quedarse

El riesgo de permanecer en el nivel 1 se resume en una frase: cada sistema mide su propia verdad. Cuando no existe una definición común de qué se mide, cómo y con qué unidad, dos áreas pueden informar cifras distintas para un mismo fenómeno sin que ninguna esté equivocada. Y sin estandarización, integrar los sistemas más adelante cuesta el doble, porque a la integración se suma el trabajo de reconciliar años de registros incompatibles.

Este riesgo tiene consecuencias en tres frentes.

En el frente de la sostenibilidad, las tres dimensiones del marco de la FAO (ambiental, social y económica) no pueden evaluarse en conjunto si los datos que las respaldan viven en sistemas separados. Un puerto puede saber cuánto consume

su flota y cuánto descarta su planta, pero no puede ver cómo se relacionan ambas cosas.

En el frente de la credibilidad, un reporte de sostenibilidad armado a mano, cruzando planillas, depende de la persona que lo prepara y es difícil de auditar. Cualquier comprador o certificador que pida evidencia consistente encontrará un proceso frágil.

En el frente de los costos, la deuda de integración crece con el tiempo. Cada sensor nuevo que se instala sin un criterio común, y cada sistema que se contrata sin considerar cómo se conectará con los demás, agrega un elemento más que habrá que reconciliar después.

4. Los cuatro objetivos para salir del nivel 1

Superar el nivel 1 exige consolidar lo que ya se digitalizó antes de sumar nuevas capas. El roadmap de la serie identifica cuatro objetivos concretos, que funcionan como condición de salida hacia el nivel 2.

1. **Instalar sensores IoT en los puntos críticos** priorizados en la etapa anterior. La priorización realizada en el nivel 0, que identificó los dos o tres procesos de mayor impacto ambiental o de cumplimiento, cobra aquí su valor: la instrumentación se concentra donde más información útil aporta y no se dispersa en toda la operación.
2. **Migrar los registros manuales a un ERP o sistema de gestión básico.** Los datos que todavía se cargan en planillas sueltas pasan a un sistema con estructura, con validaciones y con historial. No se trata de adoptar la herramienta más completa del mercado, sino una que sostenga un registro consistente y consultable.
3. **Estandarizar formatos y unidades de medida** entre las áreas de flota, planta y logística. Es el objetivo con mayor efecto sobre el costo posterior de integrar. Consiste en acordar qué se mide, con qué unidad, con qué frecuencia y bajo qué definición, de modo que dos áreas que registran lo mismo lo hagan de la misma manera.
4. **Capacitar al personal en la carga y la validación de datos digitales.** Un dato mal cargado en un sistema digital es tan poco confiable como una estimación en papel, con la diferencia de que parece confiable. La calidad del dato depende, en última instancia, de las personas que lo generan.

Ejemplo ilustrativo. Un puerto registra el consumo de combustible de la flota en litros por viaje y los descartes de la planta en kilogramos por turno. Ambos datos están digitalizados, pero uno se expresa por viaje y el otro por turno, y ninguno se vincula con las toneladas descargadas. Para calcular un indicador de intensidad, como el combustible consumido por tonelada procesada, hay que reconstruir manualmente la correspondencia entre viajes, turnos y volúmenes. Al estandarizar unidades y períodos de registro, ese cálculo pasa a ser una consulta y deja de ser un trabajo de varios días.

4.1 Un orden que conviene respetar

Los cuatro objetivos se apoyan unos en otros. La estandarización (objetivo 3) debería definirse antes de instalar nuevos sensores y de migrar registros (objetivos 1 y 2), porque es más económico instrumentar y migrar con un criterio común que corregir después. La capacitación (objetivo 4), a su vez, tiene sentido una vez que los formatos están acordados, ya que de lo contrario se enseña a cargar datos según reglas que van a cambiar. En la práctica, el error más frecuente en esta etapa es avanzar primero con la tecnología y dejar la estandarización para más adelante.

5. Hacia dónde conduce el salto: el nivel 2

El nivel 2 se caracteriza por contar con una plataforma central que reúne en un repositorio único los datos de flota, planta, energía y residuos. En el roadmap de la serie se la describe como un espacio de nombres unificado (Unified Namespace): un lugar común donde cada dato tiene un nombre, una definición y un origen conocidos, y desde el cual cualquier sistema o persona autorizada puede consultarlo.

La diferencia respecto del nivel 1 es cualitativa. En el nivel 1, para responder una pregunta transversal hay que pedir planillas a distintas áreas y armarlas a mano. En el nivel 2, existe un tablero único donde se ve la flota, la planta, la energía y los residuos al mismo tiempo. Todavía no se actúa automáticamente sobre esa información, algo que corresponde al nivel 3, pero por primera vez la organización puede ver su operación completa con datos confiables.

6. Qué habilita en el marco de la FAO

El *Roadmap to a Blue Port* de la FAO (2023) define cuatro fases: diagnóstico, estrategia adaptable, implementación, y monitoreo y evaluación. Es un marco de gestión del cambio y no de infraestructura tecnológica, por lo que no indica cómo obtener ni gestionar los datos que cada fase necesita.

Al completar los objetivos del nivel 1, el diagnóstico de la FAO ya cuenta con datos, aunque todavía se arma a mano cruzando planillas. Es un avance real respecto del nivel 0, donde el diagnóstico solo podía apoyarse en percepciones. Pero es también un límite: un diagnóstico que depende del trabajo manual de una persona se repite con dificultad y no permite el monitoreo continuo. La integración del nivel 2 es lo que convierte ese diagnóstico en un proceso repetible.

7. Autodiagnóstico: cómo saber si el salto está completo

La siguiente tabla resume las señales que distinguen el nivel 1 del nivel 2, y sirve para verificar si los objetivos de este capítulo están efectivamente cumplidos.

Aspecto	Todavía en el nivel 1	Listo para el nivel 2
Vista de la operación	Cada área mira su propia planilla y nadie las cruza.	Es posible responder una pregunta transversal sin armar planillas a mano.
Formatos y unidades	Cada sistema usa los suyos.	Existe un criterio común documentado entre flota, planta y logística.
Registros	Parte de la información sigue en planillas sueltas.	Los registros críticos viven en un sistema con validaciones e historial.
Personal	La carga de datos depende de hábitos individuales.	El personal sabe cargar y validar datos según un procedimiento.

Si la columna izquierda resulta familiar, el paso siguiente no es evaluar plataformas de integración, sino completar los cuatro objetivos de este capítulo, empezando por la estandarización.

8. Alcance de este capítulo

Este capítulo describe el segundo tramo de una escala de madurez que es una síntesis propia del autor, elaborada a partir del marco de la FAO y de la literatura sobre digitalización portuaria. No corresponde a un estándar certificado ni a una metodología única. Adopta la mirada de los datos, la automatización y la Industria 4.0, y no emite juicios sobre la selección de proveedores ni sobre productos específicos. Las próximas entregas recorrerán los tramos siguientes: de la integración de datos a la automatización y decisión asistida, de ahí al puerto inteligente y verificable, y un cierre que recapitula el recorrido completo.

CAPÍTULO 5

Serie Puertos Azules · Nota técnica

Nivel 2 a nivel 3, de tener un tablero a tomar decisiones

Por qué la gobernanza de datos es la condición previa para que un puerto pueda automatizar sin amplificar sus errores

Resumen ejecutivo

Alcanzar el nivel 2 de la escala de madurez tecnológica es un logro considerable: la organización cuenta con una plataforma central que reúne los datos de flota, planta, energía y residuos, y con un tablero único donde toda la operación se ve al mismo tiempo. Es también un punto en el que resulta tentador considerar terminado el trabajo. Sin embargo, un tablero informa, pero no decide: alguien debe mirarlo, interpretarlo y actuar en consecuencia. Y la plataforma, si no se gobierna, acumula información sobre la que nadie confía.

Este capítulo, quinta entrega de la serie Puertos Azules, aborda el tercer salto de la escala: del nivel 2 al nivel 3, es decir, de la integración de datos a la automatización y la decisión asistida. Se describe qué caracteriza al punto de partida, qué riesgo implica quedarse en él y cuáles son los cuatro objetivos que permiten superarlo. El argumento central es que automatizar solo es seguro sobre datos gobernados: la calidad, el acceso y la trazabilidad de origen de la información no son un detalle administrativo, sino la condición para que un sistema que actúa solo no multiplique sus errores.

1. Contexto: en qué punto de la escala se ubica este capítulo

Las entregas anteriores de la serie recorrieron los dos primeros saltos de la escala de cinco niveles. El primero, del nivel 0 al nivel 1, consistió en ordenar: mapear el proceso, registrar indicadores mínimos y designar un responsable de datos. El segundo, del nivel 1 al nivel 2, consistió en integrar: estandarizar formatos y unidades, migrar registros a un sistema de gestión y conectar lo que hasta entonces estaba aislado.

El nivel 2 es el resultado de ese recorrido. Y como en cada nivel de la escala, que se transita en espiral, corresponde repetir el ciclo de diagnóstico, estrategia, implementación y monitoreo que propone la FAO (2023) antes de saltar al siguiente. Este capítulo se ocupa de lo que ese ciclo debe dejar resuelto en el nivel 2 para que el nivel 3 sea viable.

2. El nivel 2: integración de datos

2.1 Qué lo caracteriza

El nivel 2 se reconoce por la existencia de una plataforma central que junta flota, planta, energía y residuos en un repositorio único. En el roadmap de la serie se la describe como un espacio de nombres unificado (Unified Namespace): un lugar común donde cada dato tiene un nombre, una definición y un origen conocidos. La consecuencia visible es un tablero único desde el cual se observa la operación completa.

La señal más simple para reconocer este nivel es esa misma imagen: existe un tablero donde se ve la flota, la planta, la energía y los residuos, aunque todavía no se actúa automáticamente sobre él.

2.2 La diferencia entre informar y decidir

Un tablero es una herramienta de información. Muestra qué ocurre, y lo hace con datos integrados, lo que ya es un avance sustancial respecto del nivel anterior. Pero la decisión sigue estando por completo en manos de una persona: alguien observa una desviación, la interpreta, decide qué hacer y ejecuta la acción. Ese circuito tiene un costo en tiempo, depende de la atención disponible y no escala cuando el volumen de datos crece.

La siguiente tabla resume la diferencia entre ambas situaciones.

Aspecto	Tablero (nivel 2)	Decisión asistida (nivel 3)
Función	Mostrar el estado de la operación.	Sugerir o ejecutar acciones sobre ella.
Quién detecta un desvío	Una persona que mira el tablero.	El sistema, según umbrales definidos.
Quién calcula la respuesta	Una persona, con criterio propio.	Un algoritmo, con reglas o modelos explícitos.
Límite principal	La atención y el tiempo disponibles.	La calidad de los datos que alimentan al sistema.

La última fila explica por qué el nivel 2 no puede saltarse. Cuando decide una persona, un dato dudoso genera una pregunta y una verificación. Cuando decide un sistema, un dato dudoso genera una acción.

3. El riesgo de quedarse

El riesgo específico del nivel 2 es que la plataforma se llene de información pero nadie confíe en los números. Es un riesgo silencioso: el tablero funciona, los datos fluyen y el repositorio crece, pero las personas siguen verificando por su cuenta, en una planilla aparte, las cifras que les importan. La plataforma existe y no se usa para lo que fue construida.

Este riesgo se manifiesta en tres frentes.

En el frente de la confianza, si nadie confía en los datos, ninguna decisión se apoya en ellos. La inversión en integración no rinde, porque el paso siguiente, dejar que el sistema sugiera o ejecute acciones, exige un nivel de confianza aún mayor.

En el frente de la seguridad de la operación, automatizar sobre datos no gobernados amplifica los errores en lugar de corregirlos. Una lectura errónea de un sensor, un registro duplicado o una unidad mal convertida dejan de ser un error aislado que alguien detecta y pasan a ser el insumo de una decisión automática repetida muchas veces.

En el frente de la sostenibilidad, una plataforma sin trazabilidad de origen no permite responder una pregunta básica de cualquier auditoría: de dónde surge esta cifra. Sin esa respuesta, el dato integrado no mejora la credibilidad del reporte frente a un dato disperso.

4. Los cuatro objetivos para salir del nivel 2

El roadmap de la serie identifica cuatro objetivos concretos que funcionan como condición de salida hacia el nivel 3.

1. **Implementar una capa de integración entre los sistemas ya digitalizados.** La plataforma central no debe depender de conexiones improvisadas entre sistemas. Requiere una capa de integración estable, que mantenga los datos actualizados y que permita incorporar nuevos sistemas sin rehacer lo existente.
2. **Construir dashboards que crucen las tres dimensiones de sostenibilidad** (ambiental, social y económica) en una sola vista. El propósito es que una misma pantalla permita ver cómo se relacionan las tres dimensiones del marco de la FAO, por ejemplo cómo varía el consumo de energía frente al volumen procesado y frente a los costos operativos.
3. **Definir un modelo de gobernanza de datos.** Comprende, como mínimo, tres componentes: la calidad (qué se considera un dato válido y quién lo verifica),

los accesos (quién puede ver, cargar o modificar cada información) y la trazabilidad de origen (de qué sistema, sensor o persona proviene cada dato).

- 4. Establecer una línea base medible para cada indicador de sostenibilidad.** Sin un valor de referencia, no es posible saber si una acción mejoró o empeoró la situación. La línea base es, además, la condición para poder medir el ahorro de cada automatización en el nivel siguiente.

Ejemplo ilustrativo. Un puerto integra el consumo de energía de su cámara de frío con el volumen de producto almacenado. Antes de automatizar cualquier alerta, define quién es responsable de validar la lectura de los medidores, qué rango se considera plausible y cómo se registra una corrección manual. Establece además el consumo por tonelada almacenada durante un período representativo como línea base. Cuando más adelante active una alerta de desvío, tendrá un valor de referencia contra el cual compararla y una lectura en la que confiar.

4.1 La gobernanza no es un proyecto de tecnología

De los cuatro objetivos, el tercero es el que con mayor frecuencia se posterga, porque no produce un resultado visible: no agrega una pantalla ni un sensor. Sin embargo, es el que determina si los otros tres sirven. Definir responsables, criterios de calidad y reglas de acceso es un trabajo organizacional antes que técnico, y requiere decisiones que solo la conducción de la organización puede tomar. La designación de un responsable de datos, iniciada en el nivel 0, encuentra aquí su función más importante.

5. Hacia dónde conduce el salto: el nivel 3

El nivel 3 se caracteriza por la automatización y la decisión asistida: mantenimiento predictivo, ruteo optimizado y proyección de cumplimiento de cuota en tiempo real. La organización deja de limitarse a observar y comienza a apoyarse en sistemas que sugieren o ejecutan acciones.

Es el nivel en el que la inversión en datos empieza a devolver resultados operativos visibles, como menos paradas imprevistas o mejores decisiones de asignación. Pero esos resultados solo son sostenibles si los datos de los que dependen cumplen los criterios definidos en el nivel 2. Por eso el orden de la escala no es opcional.

6. Qué habilita en el marco de la FAO

El *Roadmap to a Blue Port* de la FAO (2023) propone una fase de estrategia adaptable en la que cada puerto diseña su propio enfoque, sin una receta única. Es un marco de gestión del cambio y no de infraestructura tecnológica.

Recién en el nivel 2 esa estrategia puede diseñarse con datos reales, y no con supuestos. Las decisiones sobre qué dimensión priorizar, qué proyectos ejecutar primero o qué metas fijar dejan de apoyarse en percepciones y pasan a apoyarse en una línea base medida y en un tablero que cruza las tres dimensiones. Ese es el aporte específico de este nivel al proceso de la FAO.

7. Autodiagnóstico: cómo saber si el salto está completo

La siguiente tabla resume las señales que distinguen la situación de partida de la de un puerto listo para el nivel 3.

Aspecto	Todavía en el nivel 2	Listo para el nivel 3
Confianza en los datos	Las personas verifican las cifras en planillas propias.	Los tableros son la fuente que se usa para decidir.
Gobernanza	No hay responsables ni criterios de calidad definidos.	Existen calidad, accesos y trazabilidad de origen documentados.
Indicadores	Se muestran valores sin referencia.	Cada indicador tiene una línea base medible.
Vista de sostenibilidad	Cada dimensión se mira por separado.	Las tres dimensiones se cruzan en una sola vista.

Si la columna izquierda resulta familiar, el paso siguiente no es contratar un sistema de automatización, sino completar los cuatro objetivos de este capítulo, empezando por la gobernanza.

8. Alcance de este capítulo

Este capítulo describe el tercer tramo de una escala de madurez que es una síntesis propia del autor, elaborada a partir del marco de la FAO y de la literatura sobre digitalización portuaria. No corresponde a un estándar certificado ni a una metodología única. Adopta la mirada de los datos, la automatización y la Industria 4.0, y no emite juicios sobre normativas de protección de datos ni sobre herramientas específicas de integración. Las próximas entregas recorrerán el paso hacia el puerto inteligente y verificable y un cierre que recapitula el recorrido completo.

CAPÍTULO 6

Serie Puertos Azules · Nota técnica

Nivel 3 a nivel 4, el paso de automatizar a coordinar

Cómo consolidar la automatización y medir su impacto antes de dejar que agentes de IA coordinen la cadena completa

Resumen ejecutivo

En el nivel 3 de la escala de madurez tecnológica, el sistema deja de limitarse a informar y comienza a actuar: sugiere o ejecuta acciones de mantenimiento, de ruteo y de control de cuota sin que una persona las calcule a mano. Es el punto en que la inversión en datos empieza a devolver resultados operativos visibles. Es también el punto de mayor delicadeza de la escala, porque un error deja de ser un hecho aislado y pasa a ser una decisión que se repite a la velocidad de la máquina.

Este capítulo, sexta entrega de la serie Puertos Azules, aborda el cuarto salto de la escala: del nivel 3 al nivel 4. Se describe qué caracteriza al punto de partida, qué riesgo implica automatizar sin las bases adecuadas y cuáles son los cuatro objetivos que permiten consolidar este nivel. El argumento central es que el paso hacia el puerto inteligente no consiste en automatizar más, sino en automatizar con evidencia: medir el impacto de cada automatización, definir con claridad sus límites y solo entonces permitir que la coordinación entre mar, planta y mercado deje de depender de personas.

1. Contexto: en qué punto de la escala se ubica este capítulo

Las entregas anteriores recorrieron los tres primeros saltos de la escala de cinco niveles. Del nivel 0 al 1, la organización se ordenó y registró sus primeros indicadores. Del nivel 1 al 2, integró sus datos en una plataforma común. Del nivel 2 al 3, estableció la gobernanza y las líneas base que permiten que los datos sean confiables.

El nivel 3 es el primero en el que el sistema toma parte activa en la operación. Como en cada nivel de la escala, que se recorre en espiral, la organización debe repetir su propio ciclo de diagnóstico, estrategia, implementación y monitoreo, según el marco de la FAO (2023), antes de habilitar el salto siguiente. Este capítulo se ocupa de lo que debe quedar resuelto en ese ciclo.

2. El nivel 3: automatización y decisión asistida

2.1 Qué lo caracteriza

El nivel 3 se reconoce por la presencia de sistemas que sugieren o ejecutan acciones. El roadmap de la serie menciona tres aplicaciones típicas: el mantenimiento predictivo, que anticipa fallas en los activos; el ruteo optimizado de la flota y de los turnos de atraque, que reemplaza reglas fijas por cálculo; y la proyección de cumplimiento de cuota en tiempo real, que permite corregir el rumbo antes de un desvío.

La señal más simple para reconocer este nivel es que el sistema ya sugiere o ejecuta acciones, ya sea en rutas, en mantenimiento o en alertas, sin que alguien las calcule a mano.

2.2 Automatizar no es lo mismo que coordinar

Conviene distinguir dos capacidades que suelen confundirse. Una automatización resuelve una tarea acotada dentro de un proceso: predice una falla, propone una ruta, avisa de un desvío. Una coordinación, en cambio, decide cómo se combinan las tareas de distintas áreas: qué priorizar cuando el mantenimiento de una máquina compite con un pedido urgente, o cómo ajustar el ritmo de la planta a lo que ocurre en el mar y a lo que reclama el mercado.

Aspecto	Automatización (nivel 3)	Coordinación (nivel 4)
Alcance	Una tarea acotada dentro de un área.	Decisiones que atraviesan mar, planta y mercado.
Rol del sistema	Sugiere o ejecuta una acción puntual.	Concilia objetivos de distintas áreas.
Rol del sistema ante un desvío	Alerta con umbrales definidos.	Decide y coordina la respuesta entre áreas.
Exigencia sobre los datos	Confiables en cada área.	Confiables, integrados y trazables de punta a punta.

El nivel 4 amplía el alcance de la decisión automática. Por eso la exigencia sobre los datos y sobre la medición previa es mayor.

3. El riesgo de quedarse a mitad de camino

El riesgo central de este nivel es que automatizar sin gobernanza de datos previa amplifica los errores en lugar de corregirlos. Una persona que comete un error lo comete una vez; un sistema que opera sobre un dato erróneo lo comete cada vez que ese dato se utiliza. Esta amplificación tiene consecuencias en tres frentes.

En el frente operativo, una predicción de falla basada en lecturas de sensores mal calibrados puede generar paradas innecesarias o, peor, no detectar una falla real. El costo del error depende de la criticidad del activo, y por eso el mantenimiento predictivo se prioriza sobre los activos de mayor costo de falla.

En el frente de la evidencia, una automatización sin medición de resultados no permite saber si funciona. La organización puede acumular sistemas que actúan solos y, sin embargo, no poder demostrar qué ahorro o qué mejora aporta cada uno. Esto debilita cualquier justificación de la inversión siguiente.

En el frente de la escala, quedarse en el nivel 3 sin consolidarlo y avanzar hacia el nivel 4 traslada las debilidades a un sistema más poderoso. Los agentes que coordinan decisiones entre áreas heredan la calidad de los datos y de las automatizaciones que los sostienen.

4. Los cuatro objetivos para consolidar el nivel 3

El roadmap de la serie identifica cuatro objetivos concretos, que funcionan como condición de salida hacia el nivel 4.

1. **Desplegar mantenimiento predictivo sobre los activos de mayor costo de falla.** No se trata de instrumentar todos los equipos, sino de identificar aquellos cuya falla resulta más costosa, ya sea por la parada que provoca, por el riesgo ambiental o por el impacto sobre la cadena de frío, y concentrar allí el esfuerzo. Es un criterio de priorización similar al aplicado en el nivel 0.
2. **Automatizar las alertas de desvíos** (ambientales, de cuota y de calidad) con umbrales definidos. La clave está en la definición: un umbral que nadie acordó genera alertas que se ignoran. Cada umbral debería tener un responsable, una justificación y un procedimiento de revisión.
3. **Optimizar las rutas de la flota y los turnos de atraque con algoritmos, no con reglas fijas.** Las reglas fijas funcionan mientras las condiciones no cambian. Un algoritmo puede incorporar variables como el estado del mar, la disponibilidad de la planta o el volumen esperado, y recalcular cuando alguna de ellas se modifica.

4. **Medir el ahorro o el impacto de cada automatización** para justificar la inversión siguiente. Este objetivo se apoya en las líneas base establecidas en el nivel 2: sin un valor de referencia, no hay forma de cuantificar qué cambió. Es también el que impide que la automatización se convierta en un fin en sí mismo.

Ejemplo ilustrativo. Un puerto decide aplicar mantenimiento predictivo a los compresores de su cadena de frío, por ser los activos cuya falla pondría en riesgo la calidad de todo el producto almacenado. Define alertas con umbrales acordados entre mantenimiento y calidad, y registra, mes a mes, las paradas no planificadas antes y después de la implementación. Al contar con la línea base del nivel 2, puede comparar los períodos y decidir con evidencia si conviene extender el enfoque a otros equipos.

4.1 La supervisión humana como criterio de diseño

Un criterio recomendable, que este documento propone y no forma parte del marco de la FAO, consiste en definir de antemano qué decisiones pueden ejecutarse sin intervención y cuáles requieren la validación de una persona, así como quién puede interrumpir una acción automática. Definir esos límites en el nivel 3 prepara a la organización para el nivel 4, en el que las decisiones automáticas tienen un alcance mayor.

5. Hacia dónde conduce el salto: el nivel 4

El nivel 4 corresponde al puerto inteligente y verificable. En él, agentes de IA coordinan la cadena completa y la trazabilidad necesaria para las certificaciones se genera de manera automática. El roadmap de la serie menciona, como ejemplos de esquemas de certificación y control, MSC, ASC, HACCP e IUU, y plantea el uso de técnicas de recuperación de información sobre la normativa para sostener esa trazabilidad.

La diferencia respecto del nivel 3 es de alcance y de confianza. El sistema ya no se limita a resolver tareas dentro de cada área, sino que participa en decisiones que las atraviesan. Esa ampliación solo resulta razonable si las automatizaciones previas demostraron, con datos, que funcionan.

6. Qué habilita en el marco de la FAO

El *Roadmap to a Blue Port* de la FAO (2023) incluye una fase de implementación, en la que se ejecutan proyectos y acciones concretas basadas en buenas prácticas. Es un marco de gestión del cambio y no describe la infraestructura tecnológica que la sostiene.

Con el nivel 3 consolidado, la fase de implementación deja de ser un plan en papel y pasa a ser un conjunto de sistemas que actúan solos, con resultados medidos. Cada automatización evaluada aporta evidencia para las decisiones de la fase de monitoreo y evaluación, y ese es el puente hacia el nivel 4.

7. Autodiagnóstico: cómo saber si el salto está completo

La siguiente tabla resume las señales que distinguen la situación de partida de la de un puerto listo para el nivel 4.

Aspecto	Todavía en el nivel 3	Listo para el nivel 4
Mantenimiento	Se aplica de forma general o reactiva.	Es predictivo sobre los activos de mayor costo de falla.
Alertas	Los umbrales no están acordados.	Cada umbral tiene responsable, justificación y revisión.
Rutas y turnos	Se planifican con reglas fijas.	Se optimizan con algoritmos que incorporan variables cambiantes.
Impacto	No se sabe cuánto aporta cada automatización.	Cada automatización tiene su ahorro o impacto medido.

Si la columna izquierda resulta familiar, el paso siguiente no es incorporar agentes de IA, sino completar los cuatro objetivos de este capítulo, empezando por la medición.

8. Alcance de este capítulo

Este capítulo describe el cuarto tramo de una escala de madurez que es una síntesis propia del autor, elaborada a partir del marco de la FAO y de la literatura sobre digitalización portuaria. No corresponde a un estándar certificado ni a una metodología única. Adopta la mirada de los datos, la automatización y la Industria 4.0, y no emite juicios sobre ingeniería de mantenimiento, sobre navegación ni sobre normativa de seguridad de los buques. La última entrega de la serie describirá el nivel 4 y recapitulará el recorrido completo.

CAPÍTULO 7

Serie Puertos Azules · Nota técnica

Nivel 4, el puerto inteligente y verificable

Qué implica llegar al destino de la escala de madurez y qué dejó el recorrido completo de la serie Puertos Azules

Resumen ejecutivo

El nivel 4 de la escala de madurez tecnológica describe un puerto en el que agentes de inteligencia artificial coordinan decisiones entre el mar, la planta y el mercado, y en el que la trazabilidad necesaria para auditorías y certificaciones se genera de manera automática. Es el destino de un recorrido de cinco niveles que comenzó con registros en papel. Pero es un destino con una condición: solo se alcanza con las etapas previas sólidas, porque de lo contrario los agentes toman decisiones sobre datos poco confiables.

Este capítulo, séptima y última entrega de la serie Puertos Azules, describe el nivel 4, sus cuatro objetivos y su riesgo característico, y cierra el recorrido con una síntesis de lo planteado en la serie. El argumento central es que el nivel 4 no es un punto final sino el estado en el que el monitoreo y la evaluación propuestos por la FAO dejan de ser un informe anual y pasan a ser continuos y auditables. Y que la pregunta con la que comenzó la serie, cómo saber que se vive del mar sin agotarlo, encuentra en este nivel su respuesta más completa: con datos, y con la madurez necesaria para confiar en ellos.

1. Contexto: el final del recorrido

La serie comenzó con dos iniciativas de nombre parecido pero de origen distinto: los Puertos Azules de la FAO, un marco de sostenibilidad, y Puertos 4.0, un marco de competitividad basado en la Estrategia del Océano Azul. Ambas exigen la misma base tecnológica, que es la capacidad de medir. A partir de esa observación se propuso una escala de madurez de cinco niveles, que se recorre en espiral y que se articula con las cuatro fases del proceso de la FAO (2023): diagnóstico, estrategia adaptable, implementación, y monitoreo y evaluación.

Los tramos anteriores describieron los saltos entre niveles. Del nivel 0 al 1, ordenar. Del nivel 1 al 2, integrar. Del nivel 2 al 3, gobernar los datos para poder automatizar. Del nivel 3 al 4, medir el impacto de cada automatización para poder coordinar. Este capítulo describe el nivel al que conduce todo ese recorrido.

2. El nivel 4: puerto inteligente y verificable

2.1 Qué lo caracteriza

El nivel 4 se reconoce por dos rasgos. Primero, agentes de inteligencia artificial coordinan la cadena completa, es decir que participan en decisiones que atraviesan el mar, la planta y el mercado, y no solo alertan sobre lo que ocurre. Segundo, la trazabilidad para auditorías y certificaciones se genera sola, a partir de los datos que la operación produce de manera continua.

El roadmap de la serie menciona, como esquemas de certificación y control a los que apunta esa trazabilidad, MSC, ASC, HACCP e IUU, y plantea el uso de técnicas de recuperación de información sobre la normativa para sostenerla. La señal más simple para reconocer este nivel es esa combinación: la evidencia de cumplimiento se genera sin que alguien la arme, y las decisiones entre áreas se coordinan sin que alguien las concilie manualmente.

2.2 Verificable significa auditable

El adjetivo que acompaña a la palabra inteligente tiene el mismo peso que ella. Un puerto verificable es aquel que puede demostrar, con evidencia consultable, qué hizo, cuándo y con qué datos. En los niveles anteriores, ese objetivo se construyó de forma progresiva: el nivel 0 permitió la primera evidencia, aunque manual; el nivel 1 la digitalizó; el nivel 2 le dio trazabilidad de origen y el nivel 3 le sumó la medición del impacto de cada acción. En el nivel 4, esa evidencia deja de ser un producto que se prepara para cada auditoría y pasa a ser un subproducto de la operación cotidiana.

3. El riesgo de saltarse etapas

El riesgo característico del nivel 4 es que, sin las etapas previas sólidas, los agentes toman decisiones sobre datos poco confiables. Es la misma advertencia que acompañó a cada nivel de la escala, pero con mayor alcance: cuanto más amplio es el poder de decisión del sistema, más costoso resulta un dato defectuoso.

Este riesgo tiene consecuencias en tres frentes.

En el frente de las decisiones, un agente que coordina la cadena completa hereda la calidad de todos los datos que consulta. Si algún área conserva registros inconsistentes, la coordinación entre áreas propaga esa inconsistencia.

En el frente de la certificación, una trazabilidad automática construida sobre datos no gobernados produce evidencia que parece sólida y no lo es. Es una situación más riesgosa que la del nivel 0, en la que al menos se sabía que las estimaciones no eran auditables.

En el frente de la responsabilidad, un sistema que decide entre áreas necesita reglas claras sobre qué puede decidir por sí mismo, quién supervisa y quién responde por el resultado. Esas reglas, cuyo diseño se propuso desde el nivel 3, se vuelven imprescindibles.

4. Los cuatro objetivos del nivel 4

El roadmap de la serie identifica cuatro objetivos concretos para consolidar este nivel.

1. **Desplegar agentes que coordinen decisiones entre mar, planta y mercado**, y no solo que alerten. La diferencia es sustancial: un sistema que alerta deja la decisión en manos de una persona, mientras que un agente que coordina propone y, dentro de los límites definidos, ejecuta la respuesta que concilia los objetivos de las distintas áreas.
2. **Automatizar la generación de evidencia de cumplimiento** para auditorías y certificaciones. La evidencia se produce a partir de los datos de la operación, con trazabilidad de origen, y queda disponible para su consulta sin preparación específica.
3. **Habilitar el monitoreo continuo de las tres dimensiones de sostenibilidad**, con reporte a demanda. La organización puede conocer su desempeño ambiental, social y económico en cualquier momento, y no únicamente al cierre de un período.
4. **Convertir los datos acumulados en nuevos servicios o modelos de negocio de economía azul**. Los años de datos medidos, integrados y gobernados constituyen un activo. Este objetivo consiste en aprovecharlo más allá del cumplimiento, para ofrecer servicios o abrir líneas de negocio que antes no eran posibles.

Ejemplo ilustrativo. Un puerto que cuenta con años de registros de captura, consumo energético y trazabilidad de producto podría ofrecer a sus clientes un reporte de trazabilidad generado a demanda para cada lote. Al no requerir un trabajo manual de preparación, el mismo dato que se usa para la operación interna sostiene un servicio diferenciado, en línea con la lógica de Puertos 4.0 de competir por valor y no por tarifa.

4.1 Los objetivos también forman un sistema

Al igual que en los niveles anteriores, los cuatro objetivos se apoyan entre sí. La evidencia automática (objetivo 2) es la que alimenta el monitoreo continuo (objetivo 3), y ambos son la materia prima de los nuevos servicios (objetivo 4). Los agentes (objetivo 1) dependen de todo lo anterior para decidir con información confiable. Tratarlos como proyectos independientes es el error más frecuente.

5. Qué habilita en el marco de la FAO

El *Roadmap to a Blue Port* de la FAO (2023) propone una fase de monitoreo y evaluación, en la que se mide el impacto y se comunican los resultados a los actores involucrados. En los niveles anteriores, esa fase suele traducirse en un informe periódico, que exige un esfuerzo de preparación y refleja una situación pasada.

En el nivel 4, el monitoreo y la evaluación de la FAO se vuelven continuos y auditables. Los actores involucrados pueden acceder a información actualizada y verificable, y la comunicación de resultados deja de depender de un ciclo anual. Es el punto en que el marco de gestión del cambio y la escala de madurez tecnológica convergen por completo.

6. Síntesis de la serie

El recorrido completo de la serie puede resumirse en seis ideas.

1. **Dos marcos, una base.** La sostenibilidad de los Puertos Azules de la FAO y la competitividad de Puertos 4.0 responden a preguntas distintas, pero ambas exigen la misma base de datos propios, medidos y confiables.
2. **La incertidumbre se administra.** La incertidumbre tecnológica no se elimina; se afronta con inversiones que sirven cualquiera sea la tecnología que prevalezca, decisiones modulares y reversibles, y señales de activación definidas de antemano. Los datos propios son la condición de todo ello.
3. **Una espiral, no una escalera.** Cada nivel repite su ciclo de diagnóstico, estrategia, implementación y monitoreo antes de habilitar el salto siguiente.
4. **Cada nivel tiene su riesgo.** Quedarse en el nivel 0 deja los reportes sin sustento auditable; en el 1, cada sistema mide su propia verdad; en el 2, la plataforma se llena de datos en los que nadie confía; en el 3, la automatización amplifica los errores; en el 4, los agentes deciden sobre datos poco confiables.
5. **El salto de mayor impacto es del nivel 1 al nivel 2.** Pasar de datos dispersos a una plataforma integrada es lo que permite sostener un reporte de sostenibilidad creíble y una certificación auditable.

6. **El orden no es opcional.** Cada nivel construye la confianza que necesita el siguiente, y saltarlo traslada sus debilidades a sistemas cada vez más poderosos.

7. Autodiagnóstico: cómo saber si se está en el nivel 4

Aspecto	Señal característica
Decisiones	Los agentes coordinan decisiones entre mar, planta y mercado, no solo alertan.
Evidencia	La trazabilidad para auditorías y certificaciones se genera sola.
Monitoreo	Las tres dimensiones de sostenibilidad se monitorean de forma continua, con reporte a demanda.
Valor	Los datos acumulados sostienen nuevos servicios o modelos de negocio.

Como la escala se recorre en espiral, alcanzar el nivel 4 no clausura el proceso: cada nueva tecnología, cada cambio normativo y cada nueva exigencia del mercado abren un nuevo ciclo de diagnóstico, estrategia, implementación y monitoreo. La madurez, en este sentido, no es un estado que se alcanza una vez, sino una capacidad que se sostiene.

8. Alcance de este capítulo

Este capítulo cierra una serie que describe una escala de madurez que es una síntesis propia del autor, elaborada a partir del marco de la FAO y de la literatura sobre digitalización portuaria. No corresponde a un estándar certificado ni a una metodología única, y se ofrece como una propuesta de trabajo abierta a la revisión de quienes operan puertos y plantas. Adopta la mirada de los datos, la automatización y la Industria 4.0, y no emite juicios sobre el contenido de los esquemas de certificación mencionados, sobre el estado de los recursos pesqueros ni sobre la política ambiental, que corresponden a especialistas de cada campo.

CAPÍTULO 8

Serie Puertos Azules · Nota técnica

Ciberseguridad en el puerto azul

Por qué la conectividad que exige la madurez tecnológica abre una oportunidad y, si se hace mal, una superficie de ataque

Resumen ejecutivo

Cada nivel de la escala de madurez tecnológica de esta serie agrega conectividad: sensores que se enchufan a una red, sistemas que se integran en una plataforma central, agentes que deciden con datos propios. Esa misma conectividad es lo que hace posible medir, integrar y automatizar, pero también es lo que convierte a un puerto en un objetivo. Un puerto pesquero o comercial es infraestructura crítica: de su funcionamiento depende el abastecimiento de alimentos, el ingreso de miles de familias y, cada vez más, la trazabilidad que exigen los mercados internacionales. Conectar esa infraestructura sin gobernarla no es un detalle técnico menor; es abrir una superficie de ataque explotable.

Este capítulo, complementaria a las entregas centrales de la serie, no busca sumar un sexto nivel a la escala de madurez. Busca describir una dimensión que la atraviesa de punta a punta: qué significa que un puerto sea infraestructura crítica, qué cambia con cada tramo de la escala, y qué principios y referencias existen para gestionar el riesgo sin frenar la digitalización que las notas anteriores describieron como necesaria.

1. Un puerto es infraestructura crítica

1.1 Qué implica esa categoría

La noción de infraestructura crítica no describe un tamaño ni una facturación: describe una dependencia social. Un sistema es crítico cuando su interrupción afecta a algo más grande que la organización que lo opera: el abastecimiento alimentario de una región, el empleo de una comunidad portuaria, la cadena de exportación de un país. Un puerto pesquero o comercial cumple esa condición casi por definición. Cuando falla la cadena de frío, cuando se detiene la descarga de una flota o cuando se pierde la trazabilidad de un lote destinado a exportación, el efecto no queda contenido dentro de la operación: se traslada a proveedores, a compradores y a las familias que dependen de esa actividad.

1.2 Por qué esta capa no es un sexto nivel

Las notas anteriores de la serie describen una escala de madurez de cinco niveles, que va del registro manual al puerto inteligente y verificable. Este capítulo no agrega un nivel nuevo a esa escala. Describe algo distinto: una capa que atraviesa a los cinco niveles por igual, de la misma manera en que la calidad de los datos

atraviesa a todos ellos. Un puerto en el nivel 1 tiene una superficie de exposición distinta a la de un puerto en el nivel 4, pero ambos tienen una, y ambos necesitan gestionarla.

2. La misma conectividad que habilita, expone

2.1 La oportunidad

Cada nota de esta serie mostró un beneficio concreto de conectar sistemas que antes estaban aislados: un tablero único que cruza flota, planta y energía; mantenimiento predictivo que anticipa una falla antes de que ocurra; agentes que coordinan decisiones y generan su propia evidencia de cumplimiento. Ninguno de esos beneficios existe sin comunicación entre sistemas, y buena parte de esa comunicación ocurre hoy sobre redes IP, las mismas que llevan correo electrónico, navegación web y accesos remotos.

2.2 La otra cara: la superficie de ataque

Superficie de ataque es el conjunto de puntos por los que un sistema puede ser comprometido: un sensor con contraseña por defecto, un protocolo industrial sin autenticación, un acceso remoto de mantenimiento que quedó abierto, una integración entre el sistema administrativo y el de planta que nadie documentó. Cada objetivo de digitalización que proponen las notas anteriores de la serie, si se ejecuta sin un criterio de seguridad, agranda esa superficie en la misma medida en que agranda la capacidad de la organización.

Esto no es un argumento para no conectar. Es un argumento para conectar con el mismo criterio con que se mide: de forma deliberada, documentada y proporcional al riesgo. La alternativa (no conectar) no elimina el riesgo, porque deja al puerto sin la capacidad de medir y verificar que el resto de la serie plantea como condición de la sostenibilidad y la competitividad.

Ejemplo ilustrativo. Un sensor de temperatura instalado en una cámara de frío para sostener la trazabilidad exigida por un esquema de certificación puede, si se conecta con su configuración de fábrica y sin segmentar su red, convertirse en la puerta de entrada a sistemas de gestión que nada tienen que ver con la cadena de frío. El objetivo del nivel 1 (medir) no cambia; lo que cambia es si ese sensor se conecta como un punto aislado y gobernado, o como una puerta sin cerradura.

3. IT y OT: dos mundos que convergen en el puerto

La distinción entre Tecnología de la Información (IT) y Tecnología Operacional (OT) es central para entender el riesgo. IT gestiona datos: correo, ERP, reportes. OT gobierna procesos físicos: una cinta transportadora, una cámara de frío, un sistema de refrigeración o de propulsión. Durante décadas ambos mundos estuvieron separados, y esa separación era, sin proponérselo, una forma de seguridad.

La digitalización que impulsa esta serie borra esa frontera: el sensor de OT termina alimentando un tablero de IT, y el sistema de IT termina enviando órdenes que afectan a un proceso físico. Esa convergencia es necesaria (es la que permite integrar datos y automatizar decisiones), pero convierte a cualquier debilidad de un lado en un riesgo para el otro. Un ataque que compromete el sistema administrativo puede terminar afectando la cadena de frío; una falla de segmentación en la red de planta puede exponer datos comerciales sensibles. Gestionar esa convergencia con criterio, y no simplemente conectar todo a la misma red, es la tarea central de la ciberseguridad industrial.

4. Qué cambia en cada tramo de la escala

La exposición de un puerto no es uniforme: crece y cambia de naturaleza con cada nivel de madurez, y cada tramo tiene su propio punto de atención.

Nivel	Qué agrega en conectividad	Qué requiere en seguridad
0 → 1	Primeros sensores y sistemas digitales conectados a una red.	Cambiar credenciales por defecto, inventariar qué se conecta y separar redes administrativas de las de planta.
1 → 2	Una plataforma central que integra datos de distintas áreas.	Control de acceso por rol y gobernanza sobre quién puede leer y quién puede modificar cada dato.
2 → 3	Sistemas que sugieren o ejecutan acciones de forma automática.	Límites explícitos a lo que un sistema puede decidir por sí solo, y un mecanismo de intervención humana disponible en todo momento.
3 → 4	Agentes que coordinan decisiones entre áreas y generan evidencia de cumplimiento de forma autónoma.	Verificación de la integridad de los datos que consultan los agentes, y trazabilidad de cada decisión que toman.

4.1 Un principio que no cambia con el nivel

En los cuatro tramos se repite la misma idea: la seguridad no es una etapa que se agrega al final, sino una condición que se diseña junto con cada objetivo de digitalización. Postergarla hasta el nivel 3 o 4, cuando el sistema ya toma decisiones autónomas, significa intentar asegurar en retrospectiva algo que se construyó sin ese criterio desde el nivel 1.

5. Quién es responsable de esta capa

Una pregunta que suele quedar sin respuesta en una organización que recién empieza a digitalizarse es quién es responsable de la seguridad de lo que se conecta. No es una pregunta menor: sin un responsable claro, esta capa se diluye entre áreas que dan por sentado que es tarea de otra.

En un puerto pequeño o mediano, esa responsabilidad no necesita un cargo dedicado desde el día uno. Puede recaer, al menos en las primeras etapas, en la misma persona designada como responsable de datos o de gobernanza que propuso la nota sobre el nivel 0 de la escala, siempre que también tenga, o incorpore, criterio técnico sobre redes y sistemas. Lo que no puede pasar es que quede repartida de manera implícita entre el proveedor de cada sensor, el área de sistemas y el área de planta, sin que ninguno de los tres asuma la coordinación del conjunto.

A medida que la organización avanza en la escala de madurez, esa responsabilidad tiende a formalizarse: primero como una función dentro de un rol existente, después como una persona con dedicación parcial, y eventualmente, en el nivel 3 o 4, como una función que necesita autoridad real para frenar o limitar una automatización cuando el riesgo lo justifica. Definir esa autoridad de antemano, y no en medio de un incidente, es parte de lo que la nota sobre el nivel 3 de la serie llamó límites de decisión.

6. Principios para gestionar el riesgo sin frenar la digitalización

Gestionar esta capa no exige un departamento de ciberseguridad completo desde el primer día. Exige aplicar un puñado de principios, proporcionales al tamaño y al nivel de madurez de cada organización.

1. **Inventariar lo que se conecta.** No se puede proteger lo que no se sabe que existe. Cada sensor, sistema o integración nueva debería quedar registrado, con su responsable y su propósito.

2. **Segmentar las redes.** Separar la red administrativa de la red de planta reduce el impacto de un incidente: una falla en un sistema de oficina no debería poder alcanzar un sistema que gobierna un proceso físico, y viceversa.
3. **Gestionar accesos e identidades.** Cada persona y cada sistema deberían tener el acceso mínimo necesario para su función, y ese acceso debería revisarse periódicamente, no otorgarse una vez y olvidarse.
4. **Definir límites de decisión.** Como se planteó en el nivel 3 de la escala de madurez, todo sistema que actúa de forma automática necesita reglas explícitas sobre qué puede decidir por sí mismo y cuándo debe intervenir una persona.
5. **Tener un plan ante incidentes.** No es una cuestión de si va a ocurrir un incidente, sino de cuándo. Un plan simple (a quién avisar, cómo aislar un sistema comprometido, cómo seguir operando en modo degradado) reduce el daño más que cualquier herramienta.

Ejemplo ilustrativo. Un puerto que empieza a integrar sus datos en una plataforma central (nivel 2) podría aplicar estos principios de forma proporcional: un inventario simple en una planilla, redes separadas para planta y oficina, y un documento de una página que defina quién tiene acceso a qué. No hace falta un sistema de gestión de seguridad certificado para empezar a reducir la superficie de ataque; hace falta el mismo orden que la nota sobre el nivel 0 propuso para los datos.

7. Qué existe como referencia

Esta capa no carece de marcos de referencia; lo que falta, como se señaló en la nota introductoria de esta serie, es que se discuta junto con la digitalización portuaria y no por separado. Tres referencias resultan pertinentes para un puerto que empieza a ordenar esta dimensión.

La Organización Marítima Internacional (OMI) publicó en 2017 sus directrices sobre gestión del riesgo cibernético marítimo, actualizadas en revisiones posteriores, que proponen incorporar el riesgo cibernético a los sistemas de gestión de la seguridad ya existentes en el sector marítimo, en lugar de tratarlo como un dominio aparte.

La Agencia de la Unión Europea para la Ciberseguridad (ENISA) publicó en 2019 un informe específico sobre ciberseguridad portuaria, con un mapa de amenazas y buenas prácticas orientadas a las particularidades operativas de un puerto, y lo amplió en 2020 con una guía de gestión del riesgo cibernético para puertos.

La serie de normas ISA/IEC 62443 ofrece un marco técnico para la seguridad de sistemas de automatización y control industrial, aplicable a la capa de OT que gobierna procesos físicos como cadena de frío, propulsión o manejo de carga.

Ninguna de estas referencias fue escrita pensando específicamente en un puerto pesquero pequeño o mediano, y ninguna reemplaza un criterio propio. Pero las tres coinciden en un mismo punto de partida: la gestión del riesgo cibernético empieza por conocer qué se tiene conectado, no por comprar una herramienta.

8. Alcance de este capítulo

Este capítulo adopta la mirada de la convergencia IT/OT y la gestión de riesgo aplicada a la digitalización portuaria. No es un análisis legal de normativa de ciberseguridad ni un estudio de amenazas específico para el sector pesquero argentino, y no sustituye una evaluación de riesgo hecha a medida de cada organización. Su propósito es señalar que esta capa existe, que crece con cada nivel de la escala de madurez de la serie, y que conviene gestionarla desde el principio y no cuando ya sea tarde.

Anexo · Tecnologías por nivel

Estas tablas son ejemplos ilustrativos de categorías de tecnología para cada nivel, no una lista cerrada ni una recomendación de proveedores. Cada organización elige sus herramientas según su escala, su presupuesto y lo que ya tiene instalado; lo que define el nivel es el objetivo que cumple esa tecnología (medir, integrar, gobernar, automatizar o coordinar), no la marca elegida.

0 Manual o reactivo

Todavía no hay tecnología de registro: como mucho, planillas de cálculo (Excel, Google Sheets) para iniciar el registro manual de indicadores.

1 Digitalización básica

Sensores, conectividad y sistemas de gestión

Categoría	Tecnologías (ejemplos)
Sensores y captura	Sensores IoT puntuales de temperatura y cadena de frío, caudalímetros de combustible, GPS/AIS de flota.
Conectividad	Redes de bajo consumo (LoRaWAN, NB-IoT) y redes celulares.
Identificación	Código de barras y RFID para activos y lotes.
Sistema de gestión	ERP o sistema de gestión básico (por ejemplo Odoo, SAP Business One).
Registro	Data loggers o registradores autónomos.

2 Integración de datos

Plataforma central, protocolos y gobernanza

Categoría	Tecnologías (ejemplos)
Espacio de nombres unificado	Broker MQTT (Mosquitto, HiveMQ) o Apache Kafka como columna vertebral de datos.
Protocolos de planta	OPC-UA y Modbus para conectar equipos industriales.
Integración y orquestación	Node-RED, n8n, Azure IoT Hub, AWS IoT Core.
Almacenamiento	Data warehouse o data lake (PostgreSQL, BigQuery, Snowflake).
Dashboards y BI	Power BI, Grafana, Metabase.
Gobernanza de datos	Catálogo de datos y gestión de datos maestros (MDM).

3 Automatización y decisión asistida

Modelos predictivos, optimización y alertas

Categoría	Tecnologías (ejemplos)
Mantenimiento predictivo	Modelos de machine learning sobre series de tiempo (Python/scikit-learn, plataformas de APM industrial).
Optimización	Motores de ruteo y optimización de flota y turnos (OR-Tools u otros).
Automatización administrativa	RPA para tareas repetitivas de back office.
Alertas en tiempo real	Motores de reglas y alertas (Grafana Alerting, PagerDuty).
Procesamiento	Edge computing, cerca del sensor.
Simulación	Gemelo digital (digital twin) de los procesos críticos priorizados.

4 Puerto inteligente y verificable

Agentes, trazabilidad automática y coordinación

Categoría	Tecnologías (ejemplos)
Coordinación	Agentes de IA u orquestación multiagente que operan sobre los datos ya gobernados.
Trazabilidad normativa	RAG (generación aumentada por recuperación) para evidencia de auditoría.
Cumplimiento	Generación automática de reportes (MSC, HACCP, IUU) a partir del dato operativo.
Trazabilidad inmutable (opcional)	Blockchain o DLT; no es un requisito del nivel, sino una alternativa.
Acceso externo	APIs de exposición controlada a auditores, certificadores y clientes.
Coordinación de mercado	Gemelos digitales integrados con datos de demanda y precios.

Anexo · Glosario de sistemas portuarios

Estas definiciones describen la función que cumple cada tipo de sistema, sin nombrar marcas ni proveedores: lo relevante para la escala de madurez de esta serie es qué rol cumple cada uno (gestionar, controlar, medir, posicionar, simular), no qué producto comercial lo implementa. Un puerto puede tener una versión simple o avanzada de cada función, según su nivel de madurez.

Sistema	Qué hace
TOS (Terminal Operating System)	Sistema que actúa como el "cerebro" de una terminal portuaria. Controla en tiempo real el movimiento de grúas, camiones y contenedores, decide dónde se ubica cada carga y coordina las operaciones de carga y descarga de los buques. Es el equivalente portuario de un MES o un ERP de planta en una fábrica.
PCS (Port Community System)	Plataforma electrónica que conecta a los distintos actores del ecosistema portuario (aduana, agentes de transporte, navieras, operadores logísticos y autoridades) para intercambiar información de forma segura y sin papeles. Cumple una función parecida a la de una plataforma B2B de cadena de suministro.
PMIS (Port Management Information System)	Sistema usado por la autoridad portuaria para gestionar la facturación, los permisos de atraque, los servicios a los buques, el control de activos y la administración del dominio público del puerto. Es el equivalente de un ERP a nivel de administración general.
Ventanilla única portuaria	Portal donde navieras y transportistas gestionan reservas de espacio, entregan manifiestos de carga, coordinan turnos de llegada y pagan tasas. Cumple una función similar a la de un portal de clientes o CRM.
AGV (vehículo guiado automáticamente)	Vehículo terrestre sin conductor que traslada contenedores entre las grúas de muelle y el patio de almacenamiento, coordinado de forma centralizada por el sistema de operación de la terminal.
OCR y visión artificial	Cámaras instaladas en accesos y grúas que leen de forma automática matrículas de camiones y códigos de contenedores, y que pueden detectar daños en la carga sin intervención humana.
Sensores IoT y telemetría	Redes de sensores distribuidos en muelles, grúas y almacenes que miden variables como la vibración de un motor (para mantenimiento predictivo) o la velocidad del viento (para decidir si es seguro operar una grúa).

Sistema	Qué hace
RFID y GPS diferencial	Tecnologías de identificación y posicionamiento de alta precisión usadas para el seguimiento en tiempo real de equipos, y para que vehículos y grúas automatizados se posicionen con un margen de error de pocos centímetros.
SCADA y PLC	Sistemas de control industrial que gobiernan motores, frenos y circuitos eléctricos de la maquinaria pesada del puerto, traduciendo las órdenes del software de gestión en movimiento físico.
Gemelo digital (digital twin)	Representación virtual, en tiempo real, de las instalaciones y operaciones del puerto. Permite simular escenarios (por ejemplo, la llegada simultánea de varios buques) para optimizar decisiones antes de ejecutarlas en la operación real.

Bibliografía

La bibliografía reúne los marcos y las fuentes que respaldan los conceptos de esta serie: los proyectos de sostenibilidad y competitividad portuaria, los modelos de madurez, la decisión bajo incertidumbre, la gobernanza y la automatización de datos, y los esquemas de trazabilidad y certificación mencionados en el nivel 4. La escala de cinco niveles es una síntesis propia del autor: estas fuentes respaldan sus componentes, pero no la escala como tal. Las direcciones web se consultaron en septiembre de 2026.

Marcos de sostenibilidad y competitividad portuaria

FAO (2023). *Roadmap to a Blue Port*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/cc5789en/cc5789en.pdf>

FAO. *Blue Ports Initiative*. <https://www.fao.org/in-action/blue-ports-initiative/en>

Kim, W. C. y Mauborgne, R. (2005). *Blue Ocean Strategy: How to Create Uncontested Market Space and Make the Competition Irrelevant*. Boston: Harvard Business School Press.

Ortiz-Rey, N., González-Cancelas, N., Molina Serrano, B., Soler-Flores, F. y Camarero-Orive, A. (2021). Use of the Blue Ocean Strategy to obtain ports 4.0. *Ingeniería y Competitividad*, 23(1), e9466. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i1.9466>

Yang, Y., Zhong, M., Yao, H., Yu, F., Fu, X. y Postolache, O. (2018). Internet of things for smart ports: Technologies and challenges. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 21(1), 34-43. <https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8278808>

Modelos de madurez y transformación digital

Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M. y Wahlster, W. (eds.) (2017). *Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies*. acatech STUDY. Múnich: Herbert Utz Verlag. <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-managing-the-digital-transformation-of-companies/>

Henko Digital (2026). *Puertos Azules: Roadmap de madurez tecnológica*. Nota de trabajo. La escala de cinco niveles es una síntesis propia del autor y no un estándar.

Decisión bajo incertidumbre

Knight, F. H. (1921). *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston: Houghton Mifflin.

Courtney, H., Kirkland, J. y Viguerie, P. (1997). Strategy under uncertainty. *Harvard Business Review*, noviembre-diciembre de 1997. <https://hbr.org/1997/11/strategy-under-uncertainty>

Datos, gobernanza y automatización

DAMA International (2017). *DAMA-DMBOK: Data Management Body of Knowledge* (2.^a ed.). Basking Ridge, NJ: Technics Publications.

Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P. y Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.

Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W., Rocktäschel, T., Riedel, S. y Kiela, D. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33. <https://arxiv.org/abs/2005.11401>

Ciberseguridad e infraestructura crítica

Organización Marítima Internacional (OMI). *Guidelines on Maritime Cyber Risk Management* (MSC-FAL.1/Circ.3/Rev.3, 2025). <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Facilitation/FAL%20related%20non-mandatory%20documents/MS-C-FAL.1-Circ.3-Rev.3.pdf>

ENISA (2019). *Port Cybersecurity: Good Practices for Cybersecurity in the Maritime Sector*. <https://www.enisa.europa.eu/publications/port-cybersecurity-good-practices-for-cybersecurity-in-the-maritime-sector>

ENISA (2020). *Cyber Risk Management for Ports*. <https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-guidelines-cyber-risk-management-for-ports>

ISA/IEC 62443 Series of Standards. International Society of Automation. <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>

Trazabilidad, certificación y control

Comisión del Codex Alimentarius (FAO/OMS). *Principios generales de higiene de los alimentos* (CXC 1-1969), que incluye el sistema HACCP. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/publications/en/>

Marine Stewardship Council. *MSC Chain of Custody Standard: Default Version (v5.0)*. <https://www.msc.org/standards-and-certification/chain-of-custody-standard>

Reglamento (CE) n.º 1005/2008 del Consejo, de 29 de septiembre de 2008, por el que se establece un sistema comunitario para prevenir, desalentar y eliminar la pesca ilegal, no declarada y no reglamentada (DO L 286, 29.10.2008). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32008R1005>

Sobre el autor



Damian Adolfo Giacone

Consultor en convergencia IT/OT, Industria 4.0 e inteligencia artificial

Fundador de Henko Digital · Profesor en la Universidad del Gran Rosario

Consultor argentino especializado en la convergencia entre Tecnología de la Información y Tecnología Operacional (IT/OT), la Industria 4.0 y la inteligencia artificial, con más de treinta años de experiencia en manufactura. Entiende los procesos industriales y a las personas que los operan como un único sistema interconectado. Vive en Oliveros, Santa Fe, Argentina.

Formación

- Licenciado en Sistemas, Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA).
- Máster en Industria 4.0, IEBS School (España).
- Certificación en Data Science.

Trayectoria

- Fundador de Henko Digital, consultora de transformación digital para entornos industriales.
- Profesor de Ciberseguridad e infraestructuras críticas en la Universidad del Gran Rosario (UGR), desde 2023.
- Capacitador y orador sobre IA industrial, Industria 4.0 y convergencia IT/OT.
- Jefe de Automatismos y Control de Procesos en Trivium Packaging (Exal), 2020-2021.
- Gerente de Sistemas en La Madrileña S.A., 2010-2014, y Arquitecto de Sistemas en Alpesca S.A., 2004-2010.

Libro

El Muro Invisible: una obra en dos partes, con personajes basados en personas y experiencias reales, que ilustra la convergencia entre IT y OT.

Henko Digital

Transformación Digital con Propósito

Consultora de transformación digital fundada por el autor, con clientes en Latinoamérica y España. Trabaja en Industria 4.0 y manufactura inteligente, ciberseguridad, análisis de madurez digital con hojas de ruta estratégicas, y datos e inteligencia de negocios.

Contacto

www.damiangiacone.com damian@damiangiacone.com +542804200798

linkedin.com/in/damian-adolfo-giacone