

Monitorización acústica pasiva para la conservación de la orca ibérica y la seguridad marítima: coexistencia gestionada en el Estrecho de Gibraltar

Hans J. Scholl

(ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6168-3445>)

Documento de trabajo (Working Paper) | University of Washington, The Information School | Agosto de 2026

Resumen. La subpoblación de orca ibérica (*Orcinus orca*) se encuentra en peligro crítico de extinción (Critically Endangered), con aproximadamente 40 individuos expuestos a presiones antropogénicas acumulativas. Desde mayo de 2020, algunos ejemplares de esta subpoblación han interactuado reiteradamente con veleros en el sector occidental del Estrecho de Gibraltar y el Golfo de Cádiz, provocando el hundimiento confirmado de siete embarcaciones hasta octubre de 2025, sin que se hayan registrado víctimas mortales humanas hasta la fecha. Los sistemas de información existentes —incluidos los reportes de ciencia ciudadana, los mapas de riesgo tipo «semáforo», la monitorización oficial y las campañas de investigación— siguen siendo valiosos, pero resultan discontinuos, reactivos y fragmentados debido a las diferentes instituciones que gestionan esa información y la inexistencia de coordinación entre ellas. Esta perspectiva de políticas públicas sostiene que la monitorización acústica pasiva continua (PAM, por sus siglas en inglés), implementada mediante una red escalonada de inteligencia artificial perimetral (edge AI) en el Estrecho, podría proporcionar la capa independiente de detección continua necesaria tanto para la conservación de la orca como para la seguridad marítima. En lugar de tratar estos objetivos como prioridades contrapuestas, el presente artículo concibe el sistema PAM como una infraestructura compartida: una base para el seguimiento del comportamiento, la recopilación no invasiva de datos, la concienciación sobre el riesgo dirigida a embarcaciones y una Imagen Operativa Común (Common Operating Picture, COP) interjurisdiccional. El hardware y la arquitectura de edge AI requeridos ya están disponibles; no obstante, su uso operativo como sistema de alerta temprana requerirá la validación de modelos específicos para la orca ibérica, ensayos locales de propagación acústica, autorizaciones legales y pruebas de campo escalonadas. Por consiguiente, el desafío central no es únicamente técnico, sino institucional: articular un marco de gobernanza que integre a la comunidad científica marina, administraciones públicas, navegantes, pescadores, operadores de avistamiento de cetáceos y entidades de conservación en un sistema común de coexistencia gestionada.

Declaración sobre el uso de IA: Durante la preparación y edición del manuscrito, el autor empleó Claude (Anthropic) como asistente de redacción en determinadas secciones del texto. Gemini (Google) y ChatGPT (OpenAI) se utilizaron para la verificación posterior de hechos y coherencia. Todo el contenido intelectual, argumentación y conclusiones fueron desarrollados íntegramente por el autor.

Palabras clave: Monitorización acústica pasiva; edge AI; orca ibérica; seguridad marítima; Imagen Operativa Común (Common Operating Picture); Estrecho de Gibraltar; gobernanza de la conservación; red PAM.

1. Introducción

El Estrecho de Gibraltar se cuenta entre los corredores marítimos de mayor trascendencia ecológica y comercial del planeta. Constituye la única vía de paso Atlántico-Mediterráneo para la migración del atún rojo atlántico (*Thunnus thynnus*), presa fundamental para la orca ibérica (*Orcinus orca*, subpoblación de orca ibérica), y soporta el tránsito de más de 110.000 buques comerciales al año, situándose como una de las rutas marítimas con mayor densidad de tráfico a escala mundial [1]. En este angosto paso han convergido dos crisis interconectadas que se resisten a una resolución aislada.

La primera es una crisis de conservación. La subpoblación de orca ibérica, estimada en la actualidad en unos 40 individuos distribuidos en varios grupos sociales, está catalogada como en peligro de extinción por la UICN [2]. Décadas de merma de sus presas, contaminación química, ruido submarino generado por el tráfico marítimo y lesiones directas por artes de pesca han restringido el hábitat de la subpoblación y deprimido sus tasas reproductivas [3–5]. Su viabilidad a largo plazo depende de reducciones sustanciales y simultáneas en múltiples categorías de presiones antropogénicas.

La segunda es una crisis de la seguridad marítima. Desde mayo de 2020, un subconjunto de la población de orcas ibéricas ha protagonizado interacciones reiteradas y lesivas con embarcaciones a vela —principalmente veleros de recreo— en los accesos occidentales al Estrecho y en el Golfo de Cádiz [6, 7]. Hasta octubre de 2025 se han registrado siete hundimientos confirmados de embarcaciones, habiéndose rescatado con éxito a la totalidad de las tripulaciones en cada episodio [1, 8]. El séptimo naufragio tuvo lugar frente a Peniche (Portugal) en octubre de 2025, involucrando a dos adultos y tres menores. Hasta el momento no se han producido víctimas mortales humanas; sin embargo, no puede asumirse que esta tendencia se mantenga indefinidamente.

El Taller de Madrid de febrero de 2024, promovido por los gobiernos de España y Portugal, congregó a 29 investigadores y gestores públicos para abordar la crisis [9]. Su recomendación primordial —que los navegantes eviten los puntos calientes conocidos (hotspots) y se alejen con celeridad en caso de producirse un encuentro— atiende al síntoma y no al déficit estructural de información que subyace al problema. De forma crítica, dicho taller excluyó a tres grupos de actores clave: los navegantes de recreo, los operadores de turismo de avistamiento de cetáceos y las cofradías/asociaciones locales de pescadores [1]. En consecuencia, las recomendaciones resultantes, aun siendo científicamente rigurosas en sus componentes individuales, carecen de la legitimidad social y la exhaustividad situacional necesarias para su aplicación efectiva.

Nuestra perspectiva de políticas públicas sostiene que una red de monitorización acústica pasiva (PAM) de funcionamiento continuo, desplegada en nodos estratégicos a lo largo del Estrecho de Gibraltar, representa la infraestructura compartida ausente capaz de dar respuesta simultánea a ambas crisis. A partir de los recientes avances en arquitecturas de detección acústica basadas en edge AI y del concepto de Imagen Operativa Común (Common Operating Picture, COP) propio de la gestión de emergencias [10], este artículo describe la viabilidad técnica, los condicionantes de despliegue, los requerimientos de gobernanza y la vía regulatoria para dicha red. El hardware principal y la arquitectura de edge AI necesarios para un PAM continuo se encuentran disponibles hoy en día.

Lo que aún resulta imprescindible antes de su empleo operativo como sistema de alerta es la validación de modelos específicos para la orca ibérica, ensayos de propagación local, aprobaciones regulatorias y pruebas de campo escalonadas bajo las condiciones reales del Estrecho. Este artículo no constituye una especificación técnica de diseño de sistemas, sino una perspectiva de política pública e infraestructuras orientada a identificar las condiciones técnicas, de gobernanza y de concertación social que permitirían

que el PAM continuo se convierta en una infraestructura compartida de conservación y seguridad en el Estrecho.

2. La brecha actual en el conocimiento situacional

La infraestructura de información en torno a las interacciones entre orcas ibéricas y embarcaciones se ha expandido sustancialmente desde 2020; no obstante, continúa siendo estructuralmente fragmentaria y operativamente insuficiente como base para una coexistencia gestionada. El Grupo de Trabajo Orca Atlántica (GTOA), la Cruising Association (CA), el Instituto Hidrográfico portugués y diversas comunidades en redes sociales (destacando los canales de Telegram «Orcas Locations» y «Orcas Discussions», que conjuntamente superan los 3.500 miembros) proporcionan actualizaciones sobre la presencia de orcas y el riesgo de interacción [1].

El mapa de riesgo semafórico del GTOA —el recurso operativo más consultado por los navegantes que transitan el Estrecho— es definido expresamente por sus responsables como válido únicamente por 24 horas, dependiente de avistamientos reportados por observadores humanos y desprovisto de carácter oficial por parte de las autoridades de seguridad marítima. Por su parte, la campaña de seguimiento conductual de CIRCE en 2025, realizada en colaboración con el MITECO y la Loro Parque Fundación, contribuyó a una reducción interanual del 23% en las interacciones registradas en 2025 [11]. Estos suponen avances incuestionables.

Sin embargo, son sistemas reactivos y discontinuos por diseño. Los datos de avistamiento humano presentan una gran dispersión espacial y temporal: un grupo de orcas que sea detectado en el dispositivo de separación de tráfico a las 03:00 horas con meteorología adversa no constará en ninguno de estos registros hasta que una embarcación notifique un encuentro. El lapso transcurrido entre el último avistamiento humano y una interacción real —que puede acontecer a cualquier hora y bajo cualquier estado del mar— constituye precisamente la ventana de incertidumbre que la infraestructura actual es incapaz de cerrar. Ningún sistema desplegado actualmente en el Estrecho suministra una detección acústica continua e independiente de la presencia de orcas sumergidas, al margen de las condiciones meteorológicas, la hora del día o la densidad del tráfico marítimo.

Este déficit de información acarrea repercusiones de gobernanza que trascienden la seguridad operativa. Tal y como documentó Scholl (2026), el Taller de Madrid de febrero de 2024 [9] elaboró recomendaciones de gestión formuladas casi en su totalidad por biólogos marinos, científicos de la conservación y administraciones públicas, sin representación directa de las tres comunidades de usuarios que generan la mayor parte de los datos de interacción en tiempo real y soportan directamente sus consecuencias. Un análisis posterior sobre la cobertura mediática en la prensa española entre 2022 y 2024 reveló que el enfoque informativo estuvo dominado primordialmente por discursos conservacionistas y científicos, relegando sistemáticamente a un segundo plano las inquietudes de seguridad de los navegantes [12]. Esta asimetría entre quienes definen el problema y quienes sufren sus consecuencias ha consolidado un marco de gobernanza científicamente solvente pero operativamente incompleto.

La consecuencia estructural de este escenario es la ausencia de lo que la gestión de emergencias define como una Imagen Operativa Común (Common Operating Picture, COP): una visión operativa interjurisdiccional, actualizada de forma continua e integradora de los datos de todos los sistemas y colectivos implicados [1, 10]. Una red PAM en funcionamiento ininterrumpido aportaría la capa independiente de detección acústica de la que carece estructuralmente la infraestructura en servicio.

3. Tecnología PAM: Del proyecto piloto a la infraestructura

Un estudio piloto reciente [13] supone un primer paso legítimo al demostrar la detectabilidad acústica de las vocalizaciones de la orca ibérica en el Estrecho de Gibraltar mediante un registrador de banda ancha desplegable. Su sistema calibrado SoundTrap 400 permitió recuperar un repertorio preliminar de llamadas e identificar firmas de ruido antropogénico coincidentes con el tráfico marítimo y las ecosondas. El propio planteamiento del estudio postula un «sistema PAM permanente» y una «matriz de estaciones PAM sincronizadas» como la siguiente fase obligada. La cuestión crítica que aborda esta perspectiva no radica en si dicha infraestructura es deseable —los propios autores confirman que lo es—, sino en si relegarla a una línea de investigación futura refleja con precisión el estado actual de madurez tecnológica. La evidencia examinada a continuación demuestra que no es así.

3.1. La frontera arquitectónica de la IA perimetral (Edge AI)

En el último quinquenio se ha producido un cambio de paradigma en la arquitectura PAM: se ha pasado del registro de datos post hoc —que requiere análisis manual o procesamiento en la nube— hacia la inferencia continua directamente en el dispositivo (edge-AI PAM). Una revisión sistemática de 82 estudios publicados entre 2017 y 2025 sobre computación perimetral aplicada a la monitorización bioacústica identificó cuatro tipologías de sistemas, desde microcontroladores de muy bajo consumo para la detección de un único taxón hasta ordenadores monoplaca (Single Board Computers, SBC) con capacidad de clasificación multiespecífica y emisión de alertas en tiempo real [14]. Las publicaciones anuales en esta materia pasaron de 3 en 2017 a 19 en 2025, lo que evidencia una rápida consolidación y no una mera fase exploratoria inicial.

En el ámbito concreto de la detección de cetáceos, la viabilidad operativa de la clasificación de vocalizaciones de orca mediante aprendizaje profundo (deep learning) se encuentra plenamente acreditada a nivel de tipo de llamada y de ecotipo [15, 16]. Palmer et al. (2025) presentaron el conjunto de datos acústicos anotados de orca DCLDE 2026, un recurso abierto que aporta el corpus de entrenamiento indispensable para los clasificadores específicos de población. Sobre esta base, Palmer et al. (2026) demostraron el primer clasificador poblacional de orcas publicado mediante transferencia de aprendizaje (transfer learning) con BirdNET, logrando discriminar ecotipos simpátricos en el Mar de Salish en condiciones estándar de despliegue. Este hito confirma la validez de la transferencia de aprendizaje incluso en poblaciones con anotación acústica previa limitada, siempre que se disponga de datos de llamadas a nivel de línea materna como base de entrenamiento [17]. Resulta fundamental señalar que en la actualidad no existe un corpus anotado comparable para la subpoblación de orca ibérica, limitación real que constituye el principal obstáculo para una clasificación acústica detallada, y no impedimento arquitectónico alguno.

Hyer et al. (2025) evidenciaron la detección de cetáceos en tiempo real sobre hardware de clase microcontrolador en el caso de la ballena franca del Atlántico Norte (*Eubalaena glacialis*), alcanzando un rendimiento operativo óptimo con una fracción del consumo energético de los sistemas precedentes [18]. Estos principios de diseño son perfectamente transferibles a la detección de orcas, con la salvedad de que la investigación en ballena franca se beneficia de décadas de recopilación de datos de entrenamiento con los que aún no cuenta la orca ibérica. Por tanto, el hallazgo de Hyer et al (2025). ilustra lo que es alcanzable arquitectónicamente una vez reunido un corpus de entrenamiento adecuado, lo que acentúa la urgencia de iniciar registros acústicos continuos para conformar dicho corpus.

Un ejemplo operativo de edge-AI PAM directamente aplicable a la realidad del Estrecho ha sido documentado recientemente [19]. El sistema, instalado en Whangarei Harbour (Nueva Zelanda) —un puerto comercial de elevado tráfico al que acceden orcas para cazar elasmobranchios—, incorpora un detector de deep learning (entrenado con un millón de horas de grabaciones de 59 emplazamientos y 24 especies, el corpus «Fletcher») en una boya autónoma alimentada por energía solar con una unidad de

procesamiento neuronal Radxa CM5. El dispositivo opera con un muestreo continuo al 100% sin ciclos de reposo (duty cycling), transmite las detecciones a la plataforma en la nube CetaWare en tiempo real y remite alertas a los capitanes de los buques mediante un panel de control específico y una aplicación móvil [19]. Una detección verificada sobre el terreno el 26 de noviembre de 2024 confirmó la identificación de orcas a una distancia de 2,66 km en condiciones portuarias reales; esta cifra debe tomarse como una referencia operativa conservadora, ya que alcances mayores en aguas abiertas requerirán validación mediante modelos de propagación propios del Estrecho. Este sistema resulta extrapolable al despliegue costero en el Estrecho de Gibraltar, modulando la diferencia de escala: Whangarei Harbour cuenta con una anchura inferior a 3 km, mientras que el corredor de interacción con orcas en el Estrecho occidental abarca unos 25 km, lo que sustenta la arquitectura multinodal propuesta más adelante [19]. Un despliegue operativo independiente con esta misma plataforma de boya edge AI ha sido documentado en Golden Bay (Nueva Zelanda) para la detección de cetáceos en entorno costero abierto [19].

Modelos de incrustación (embeddings) acústicos de acceso libre, tales como Perch 2.0 de Google DeepMind [20], la arquitectura BirdNET [21] y el Catálogo Europeo de Firmas Sonoras [22], ofrecen múltiples vías para la transferencia de aprendizaje aplicada a vocalizaciones de cetáceos sin precisar el entrenamiento de modelos desde cero. Burns et al. (2025) demuestran una resolución variable según las taxonimías de cetáceos, lo que confirma que la calidad de los datos de entrenamiento sigue siendo el factor limitante y no la arquitectura de incrustación. La validación empírica de la transferencia de aprendizaje con BirdNET y Perch bajo las condiciones acústicas del Estrecho de Gibraltar ya está disponible. Márquez-Rodríguez et al. (2026) implementaron una red neuronal personalizada basada en BirdNET para la detección de silbidos de cetáceos sobre 1.319 horas de grabaciones en tres campañas estacionales junto a la Isla de Tarifa, alcanzando un valor F1 de 0,88 tras un ajuste fino (fine-tuning) semisupervisado iterativo con datos locales. Es significativo resaltar que los modelos base sin ajuste fino local cayeron a valores F1 iguales o inferiores a 0,10 bajo las condiciones de ruido reales del Estrecho, lo que confirma que la adaptación al dominio con datos locales representa el factor determinante en el rendimiento operativo, y no las limitaciones arquitectónicas [23]. El conjunto de datos acústicos anotados del Estrecho generado por dicho estudio (proyecto SEANIMALMOVE, de acceso público) constituye una base parcial para construir un corpus de entrenamiento específico de la orca ibérica, complementando al dataset DCLDE 2026 [15].

3.2. Complejidad de la señal en el Estrecho

El entorno acústico del Estrecho de Gibraltar plantea retos de detección que cualquier sistema PAM debe solventar. Una campaña reciente de caracterización del ruido de fondo submarino en 14 estaciones al sur de la Península Ibérica, incluido el Estrecho, documenta un ruido continuo por tráfico marítimo por debajo de 200 Hz y emisiones de ecosondas de banda estrecha a 30 y 50 kHz [24], lo cual concuerda con el espectro descrito por Almunia et al. (2025) [13]. Este enmascaramiento antropogénico es notable, pero no carece de precedentes en despliegues operativos de PAM, donde entornos portuarios con niveles de ruido análogos se han gestionado con éxito mediante filtrado en el propio dispositivo [19, 25]. La variabilidad estacional y espacial descrita por Márquez-Rodríguez et al. (2026) —con una merma acusada del rendimiento en un despliegue invernal en una ubicación ligeramente distinta de Tarifa— fundamenta empíricamente la arquitectura de matriz multinodal y multiestacional aquí propuesta [23]. Los fondeos puntuales en una sola estación y estación del año no permiten caracterizar el espectro completo de propagación acústica que una red PAM permanente debe afrontar.

Por otro lado, las señales de 40 Hz descritas por Almunia et al. (2025) como atribuibles a pautas de alimentación del rorcual común (*Balaenoptera physalus*) exigen cautela interpretativa. Los rorcuales

comunes del Atlántico Norte emiten secuencias de pulsos estereotipadas a 20 Hz, así como modulaciones descendentes de 60 a 40 Hz; distinguir estas señales de las de otros rorcuaes resulta complejo sin una verificación visual directa. Asimismo, no cabe descartar que las vocalizaciones de peces —especialmente en agregaciones de desove de especies soníferas— constituyan una fuente alternativa o concurrente en este rango de frecuencias: tanto el rabil como el atún rojo, abundantes en el Estrecho, generan pulsos de baja frecuencia entre 20 y 130 Hz asociados a contracciones de los músculos de la vejiga natatoria [26]. Esta ambigüedad acústica pone de relieve la superioridad interpretativa de un registro continuo y multinodal frente a campañas de fondeo oportunistas y aisladas.

4. Una matriz PAM para el Estrecho: Arquitectura, condicionantes de despliegue y gobernanza

Para materializar la monitorización continua se propone una matriz estructurada en tres niveles operativos complementarios, articulada bajo un marco jurídico-administrativo sólido.

4.1. Arquitectura de red propuesta

Los requerimientos geográficos y operativos del Estrecho sugieren el despliegue de una matriz PAM costera de cuatro nodos. La Figura 1 superpone la ubicación aproximada de los nodos propuestos (N1–N4, sujetos a revisión tras levantamiento batimétrico, modelización de propagación acústica y autorizaciones administrativas) sobre el mapa oficial del MITECO de probabilidad de presencia de orcas, elaborado mediante marcas satelitales y avistamientos acumulados durante cinco años [9, 27]. Las cuatro posiciones se localizan en la plataforma costera española, dentro de la isóbata de los 40 metros aproximadamente, en el sector occidental del corredor de interacción comprendido entre Barbate y Tarifa. Ninguna de ellas interfiere con el carril central del Dispositivo de Separación de Tráfico.

Se propone una separación entre nodos de unos 6 a 8 km como hipótesis de trabajo orientada a comprobar si es posible lograr un solapamiento en la detección acústica a lo largo de todo el corredor de interacción, sujeta a validación mediante modelos de propagación específicos del Estrecho y campañas de campo. El alcance de detección confirmado de 2,66 km [19] debe interpretarse como una cota operativa conservadora en entorno portuario, mientras que distancias mayores deducidas por modelos o según el contexto requerirán ser contrastadas en el Estrecho mediante modelización y ensayos escalonados. El solapamiento efectivo dependerá de la propagación local, la relación señal/ruido, la profundidad del hidrófono, la tipología de las vocalizaciones, el estado del mar y las pruebas de validación. Los nodos fijos configurados de este modo asegurarían una cobertura acústica de base 24/7, el registro continuo del paisaje sonoro submarino y, una vez compilado el corpus de entrenamiento necesario, la emisión de detecciones en tiempo real o casi real. Entretanto, un detector genérico de orcas entrenado con las bases de datos disponibles proporcionaría una capa base de detección útil, si bien su fiabilidad operativa en el Estrecho deberá consolidarse mediante ajuste fino local y validación empírica. La discriminación por línea materna o grupo social podrá ser viable a medida que se disponga de un corpus ibérico debidamente anotado, lo que debe concebirse como un hito científico posterior y no como una capacidad operativa inicial [16, 17].

El segundo nivel de la red comprende unidades móviles a bordo de las embarcaciones de avistamiento de cetáceos que operan con regularidad en el Estrecho. Estas empresas efectúan transectos sistemáticos en el núcleo de la zona de interacción durante la temporada principal de presencia de orcas (mayo a octubre) y ya aportan datos de avistamiento al GTOA y a plataformas de ciencia ciudadana [28]. Equipar estos barcos con dispositivos ligeros y autónomos de edge-AI PAM, del tipo descrito por Pine y Visser (2025), ampliaría la cobertura espacial con un coste adicional mínimo, generando al mismo tiempo las

grabaciones anotadas ligadas a encuentros reales que se precisan para entrenar el modelo específico de orca ibérica.

El tercer nivel integra las alertas acústicas generadas por el PAM con el flujo de datos del Sistema de Identificación Automática (AIS). La Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima (SASEMAR) gestiona la infraestructura AIS en el Estrecho desde el Centro de Coordinación de Salvamento (CCS) de Tarifa. Asociar las detecciones acústicas con el registro de buques AIS posibilitaría la emisión de avisos de riesgo de interacción dirigidos y específicos para cada embarcación, sustituyendo la ventana de validez de 24 horas del actual semáforo del GTOA por una capacidad de alerta dinámica, individualizada y en tiempo real.

4.2. Condicionantes de despliegue: Autorizaciones, seguridad y protección física

La traslación de esta arquitectura teórica a una infraestructura operativa exige solventar una serie de condicionantes reales que este trabajo asume como esenciales y no secundarios.

Autorizaciones regulatorias: Las instalaciones marinas fijas en aguas territoriales españolas requieren autorización en virtud del Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante (TRLPEMM), tramitada a través de Puertos del Estado. En el Estrecho de Gibraltar, la zona de operaciones queda enmarcada en el Plan de Ordenación del Espacio Marítimo de la demarcación del Estrecho y Alborán (POEM, Real Decreto 150/2023), que regula la asignación de usos espaciales y exige la evaluación de compatibilidad ambiental para cualquier infraestructura de nueva planta. Más allá del régimen civil, el Estrecho de Gibraltar se rige con carácter general como estrecho internacional bajo la Parte III de la CONVEMAR, ostentando la Armada Española competencias operativas sobre sus accesos. El fondeo de instrumental acústico en este sector requiere, por ende, comunicación previa y coordinación con la Fuerza de Acción Marítima (FAM) de la Armada y con el Servicio Marítimo de la Guardia Civil, adicionalmente a los permisos de Puertos del Estado. El marco de gobernanza propuesto más adelante —fundamentado en el Plan de Conservación del MITECO y los compromisos de ACCOBAMS [29]— define la vía institucional idónea para cursar estas solicitudes, dado que una tramitación gubernamental unificada con respaldo ministerial ostenta una viabilidad significativamente superior a la iniciativa aislada de un centro de investigación.

Seguridad física y resistencia a manipulaciones: El Estrecho de Gibraltar constituye un entorno de severa exigencia para instrumental marino no tripulado. Las comunidades pesqueras que faenan en el área de interacción han observado históricamente las infraestructuras de monitorización con recelo; paralelamente, la cercanía a rutas activas de narcotráfico en el sector occidental introduce el riesgo de sabotaje, colisión o sustracción de los equipos de superficie. Todo sistema de boyas debe integrar, en consecuencia, medidas antivandálicas desde su fase de diseño. Entre las soluciones de ingeniería aplicables destacan: recubrimientos antiincrustantes y de alta resistencia en los cascos; configuraciones de fondeo subsuperficial que reduzcan la firma visual en superficie garantizando a su vez la cota óptima del hidrófono; cadenas de fondeo monitorizadas por GPS con alertas automáticas de desplazamiento transmitidas vía CetaWare o plataformas en la nube equivalentes; y señalización identificativa oficial bajo el mandato MITECO/ACCOBAMS, que confiere protección legal con arreglo a la legislación marítima española. La arquitectura de boya estanca y blindada descrita por Pine y Visser (2025) —en la que la electrónica y la unidad neuronal quedan confinadas en el interior de un casco acorazado— resulta plenamente idónea para este fin, al carecer de conexiones accesibles desde el exterior que permitan extraer datos o claves de acceso.

Una alternativa complementaria consistiría en integrar los nodos PAM en el balizamiento marítimo oficial ya existente dependiente de la administración marítima española. La coiniciación de sensores acústicos en

boyas de señalización cartografiadas —que gozan de facto de protección operativa y legal— cuenta con precedentes consolidados en la NOAA en el Golfo de México y el Pacífico Noroeste, y reduciría sustancialmente tanto la carga administrativa como los riesgos de seguridad física.

4.3. Marco de gobernanza

Una matriz PAM con estas especificaciones resulta técnicamente ejecutable mediante hardware existente y software de código abierto. Su gobernanza, en cambio, exige una articulación específica, habida cuenta de que en el Estrecho confluyen tres soberanías estatales —España, Marruecos y el Reino Unido (por las aguas de Gibraltar)— y cuatro colectivos de usuarios cuyos intereses deben atenderse simultáneamente.

El anclaje institucional natural reside en el marco normativo español. El Plan de Conservación de las orcas del Estrecho y Golfo de Cádiz (aprobado mediante Orden APM/427/2017) confiere al MITECO la potestad jurídica de promover redes de monitorización en hábitats críticos declarados. La red PAM daría cumplimiento práctico a los mandatos de dicho plan de forma proporcional a la categoría de amenaza de la especie y al riesgo acreditado para la seguridad marítima. Asimismo, la recomendación del Taller de Madrid de febrero de 2024 relativa a «intensificar la cooperación y armonizar los sistemas de registro en la región, creando un grupo asesor internacional de apoyo científico y técnico» [9] supone un respaldo gubernamental explícito para la articulación de la infraestructura interagencias aquí postulada.

En el plano intergubernamental, España y Portugal son partes contratantes del Acuerdo sobre la Conservación de los Cetáceos del Mar Negro, el Mar Mediterráneo y la Zona Atlántica Contigua (ACCOBAMS), cuyo ámbito de aplicación engloba las ZEE de ambos países. ACCOBAMS encomienda a los Estados miembros la investigación, monitorización y gestión de las interacciones entre actividades humanas y cetáceos [29]. La puesta en marcha en junio de 2025 de la Fase II de la ACCOBAMS Survey Initiative (ASI-II), con campañas aéreas y oceanográficas a partir de 2026, consolida un marco intergubernamental de seguimiento en el que la red PAM puede encuadrarse formalmente [30]. La inclusión de Marruecos resulta igualmente indispensable, dado que las orcas operan en todo el arco sur del Estrecho; el Reino de Marruecos es firmante de ACCOBAMS y participó en el Taller de Madrid de febrero de 2024.

4.4. Integración de actores, acceso a datos e Imagen Operativa Común

El reto de gobernanza no puede solventarse únicamente mediante infraestructuras técnicas. Como documentó Scholl (2026), el Taller de Madrid de 2024 omitió a tres comunidades fundamentales —navegantes, pescadores y operadores de avistamiento— cuyos datos observacionales nutren la gran mayoría del histórico de interacciones en tiempo real. Cualquier órgano de gestión que coordine la red PAM debe dar cabida reglamentaria a estos colectivos, no solo porque sus aportaciones son insustituibles en la operativa, sino porque su exclusión genera directrices desprovistas de la legitimidad social requerida para su observancia efectiva [1, 12].

Un segundo obstáculo estructural atañe al acceso a la información. El programa de marcado satelital sufragado por el MITECO desde 2023 [9] ha generado mapas de probabilidad de presencia difundidos con periodicidad irregular. Si bien constituyen una aportación analítica de valor, no reemplazan la necesidad de datos de localización continuos, en tiempo real y accesibles a todos los usuarios. La limitación es consustancial al método: los cetáceos permanecen sumergidos gran parte del tiempo, lo que restringe el enlace con los satélites Argos a unas pocas ventanas de transmisión diarias por individuo marcado [31]. Las marcas de ventosa, una alternativa menos invasiva evaluada para esta subpoblación, tienen por diseño una duración muy reducida (de unas pocas horas a un máximo de un día), siendo

inviabiles para generar alertas a largo plazo [32, 33]. Ninguna metodología de telemetría individual directa proporciona la monitorización acústica ininterrumpida 24/7 que precisa la seguridad de la navegación.

Adicionalmente, las marcas satelitales penetrantes con dardo conllevan riesgos acreditados para el bienestar animal. En cetáceos del Estrecho de Gibraltar se han documentado lesiones y secuelas en los puntos de anclaje de las marcas [34]. El precedente de la población de orcas residentes del sur (Southern Resident killer whales), donde un panel de expertos concluyó que la colocación de un emisor satelital provocó con alta probabilidad una infección fúngica letal en el individuo L95 [35], demuestra que el riesgo biológico no es teórico. Para una subpoblación en peligro crítico de unos 40 individuos, cada procedimiento de marcaje invasivo representa un riesgo individual inadmisibile. La red PAM supera ambos déficits: los hidrófonos fijos suministran datos continuos de presencia sin necesidad de contacto con los animales.

Los datos generados con financiación pública mediante fondos del MITECO o de ACCOBAMS deben someterse a las obligaciones de datos acceso abierto que estipula la normativa europea (Directiva UE 2019/1024), impidiendo que las asimetrías de información entre centros de investigación y usuarios del mar se perpetúen en el modelo de gestión del PAM.

El resultado operativo del sistema integrado —nodos PAM fijos, unidades móviles en buques turísticos, integración AIS y ciencia ciudadana— conforma lo que el marco del Departamento de Seguridad Nacional (DHS) define como una Imagen Operativa Común (Common Operating Picture, COP): una panorámica de la situación actualizada continuamente e interjurisdiccional que consolida datos de todos los sistemas y colectivos implicados [10]. Las medidas de mitigación conductual derivadas de las campañas de seguimiento y el mapa semafórico del GTOA constituirían entradas complementarias para dicha Imagen Operativa Común, nunca alternativas excluyentes.

5. Conclusión: Llamamiento a la acción coordinada

La crisis de las orcas ibéricas no es un dilema de suma cero entre la conservación y la seguridad marítima. Representa, antes bien, un fallo de gobernanza y una inminente dejación en la gestión de emergencias al no haberse promovido una infraestructura compartida capaz de atender a ambos frentes a la vez. El estudio piloto de Almunia et al. (2025) confirma que el Estrecho de Gibraltar es accesible acústicamente a las técnicas PAM. La literatura sobre edge AI examinada acredita que la arquitectura para una monitorización acústica continua y en tiempo real resulta técnicamente viable y aplicable de inmediato, si bien su uso operativo para alertas requiere una validación escalonada. Los instrumentos institucionales analizados —la Orden APM/427/2017, el Acuerdo ACCOBAMS y su iniciativa ASI-II, y las conclusiones del Taller de Madrid de febrero de 2024— aportan la base jurídica y administrativa para implementar la red sin necesidad de promulgar nuevas leyes.

Se requiere una decisión formal por parte del MITECO —en coordinación con SASEMAR, la Armada Española, la Autoridade Marítima Nacional de Portugal y la Secretaría de ACCOBAMS— para encomendar el despliegue por fases de una red PAM en el Estrecho occidental, estructurada en torno a los cuatro nodos costeros descritos, coordinada mediante un órgano multilateral con representación de todos los actores y sujeta al principio de datos abiertos consustancial a toda infraestructura financiada con fondos públicos. Los condicionantes técnicos y administrativos identificados —permisos sectoriales, coordinación militar y seguridad física— son complejos pero plenamente solubles dentro de los cauces vigentes, en especial si se recurre a la colocación de equipos en las boyas de navegación ya operativas.

Los beneficios derivados de esta inversión se distribuyen equitativamente entre todos los colectivos involucrados:

- La comunidad científica marina obtiene una base de datos acústicos continua y no invasiva para el estudio demográfico y del comportamiento, reduciendo la dependencia respecto a técnicas de marcaje lesivas cuyos riesgos resultan desproporcionados para una subpoblación de apenas 40 ejemplares.
- Las agencias de salvamento y seguridad marítima adquieren una capacidad de alerta temprana individualizada y dirigida a buques que el actual mapa semafórico de 24 horas no puede proporcionar.
- Los navegantes y pescadores disponen por fin de la Imagen Operativa Común cuya ausencia se viene denunciando desde el estallido de la crisis.
- La propia subpoblación de orcas ibéricas se beneficia de una infraestructura concebida para mitigar las perturbaciones humanas en lugar de incrementarlas.

La tecnología está disponible. El marco legal existe. La necesidad objetiva no admite discusión. Lo que ha faltado hasta ahora es el enfoque interdisciplinar integrador que haga visible el beneficio mutuo para todas las partes. El presente trabajo ha pretendido aportar dicho enfoque.

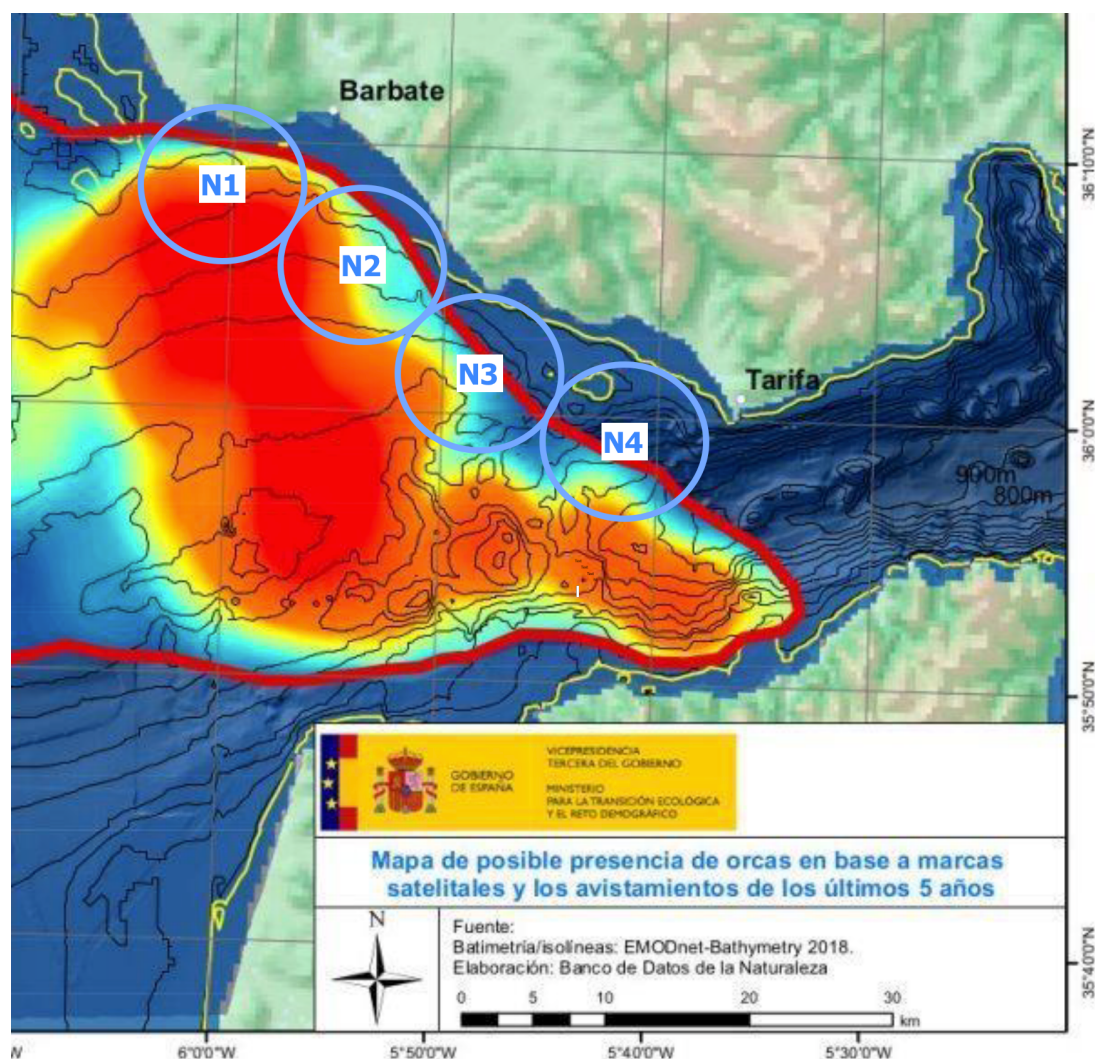


Figura 1. Nota: Las líneas del mapa delimitan el área de estudio y no representan necesariamente los límites nacionales o territoriales reconocidos.

Ubicaciones aproximadas propuestas para cuatro nodos continuos de la red PAM (N1–N4, círculos azules; posiciones sujetas a revisión tras el levantamiento batimétrico, el modelado de propagación acústica y la obtención de permisos reglamentarios) superpuestas al mapa oficial de probabilidad de presencia de orcas de MITECO para el oeste del Estrecho de Gibraltar y el Golfo de Cádiz. El mapa de calor de probabilidad se deriva de datos de marcaje satelital y registros de avistamientos de cinco años; rojo = mayor probabilidad de presencia de orcas, azul = menor. Contornos batimétricos de EMODnet-Bathymetry 2018. Los cuatro nodos están situados en la plataforma continental española, aproximadamente dentro de la isobata de 40 m y fuera del Esquema de Separación de Tráfico, en el núcleo del punto crítico de interacción con orcas documentado entre Barbate y Tarifa. El espaciado entre nodos de aproximadamente 6 a 8 km tiene como objetivo comprobar si es posible lograr oportunidades de detección acústica superpuestas a lo largo del corredor de interacción, sujeto a la modelización de propagación específica del estrecho y a la validación en campo. Adaptado de MITECO en virtud de la Ley 37/2007 sobre la reutilización de la información del sector público y la Directiva de Datos Abiertos de la UE 2019/1024/UE; batimetría de EMODnet-Bathymetry 2018 (CC-BY 4.0). Anotaciones de nodos por el autor. Declaración de conflicto de intereses. El autor de este artículo declara no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido indebidamente en este trabajo. Financiación. Este trabajo no recibió financiación externa.

Referencias bibliográficas

1. Scholl, H. J., «The Iberian orca interaction crisis: disentangling wild marine and human lives a call for managed coexistence», en ITDRR 2024, IFIP Advances in Information and Communication Technology, W. Seböck, ed., pp. 257–275, Cham: Springer Nature Switzerland, 2026.
2. Esteban, R. y A. D. Foote, «*Orcinus orca* (Strait of Gibraltar subpopulation)», IUCN Red List of Threatened Species, 2024.
3. Esteban, R., P. Verborgh, P. Gauffier, J. Giménez, C. Guinet y R. de Stephanis, «Dynamics of killer whale, bluefin tuna and human fisheries in the Strait of Gibraltar», *Biological Conservation*, vol. 194, pp. 31–38, 2016.
4. Esteban, R., P. Verborgh, P. Gauffier, J. Giménez, V. Martín, M. Pérez-Gil, M. Tejedor, J. Almunia, P. D. Jepson y S. García-Tiscar, «Using a multi-disciplinary approach to identify a critically endangered killer whale management unit», *Ecological Indicators*, vol. 66, pp. 291–300, 2016.
5. Jepson, P. D., R. Deaville, J. L. Barber, À. Aguilar, A. Borrell, S. Murphy, J. Barry, A. Brownlow, J. Barnett y S. Berrow, «PCB pollution continues to impact populations of orcas and other dolphins in European waters», *Scientific Reports*, vol. 6, n.º 1, pp. 1–17, 2016.
6. Esteban, R., A. López, A. García de los Ríos, M. Ferreira, F. Martinho, P. Méndez-Fernandez, E. Andréu y J. C. García-Gómez, Update on the interactions between killer whales and vessel along the Iberian Peninsula, International Whaling Commission: Subcommittee/working Group, 2022.
7. Esteban, R., A. López, Á. G. de los Ríos, M. Ferreira, F. Martinho, P. Méndez-Fernandez, E. Andréu, J. C. García-Gómez, L. Olaya-Ponzzone y R. Espada-Ruiz, «Killer whales of the Strait of Gibraltar, an endangered subpopulation showing a disruptive behavior», *Marine Mammal Science*, vol. 38, n.º 4, pp. 1699–1709, 2022.
8. Silva, M. F., «Unusual 2025 interactions of Iberian *Orcinus orca* with sailing vessels: behavior, patterns and conservation responses», *Marine Notes Journal, Conservation News*, vol. 1, n.º 1, pp. 1–5, 2026.

9. Anónimo, Workshop-Interactions Between Iberian Killer Whales And Vessels: Management Recommendations, Gobierno de España, Madrid, 2024.
10. DHS, Common Operating Picture for Emergency Responders, U.S. Department of Homeland Security, 2024.
11. GTOA, End-of-year interaction summary 2025, Grupo de Trabajo Orca Atlántica, 2025.
12. Sabater, M., «Media narratives of human-wildlife conflict: Iberian orcas and boats in the Spanish press», *Conservation*, vol. 5, n.º 4, p. 54, 2025.
13. Almunia, J., S. García Beitia, J. P. Lüke, F. Rosa y R. de Stephanis, «Pilot Passive Acoustic Monitoring in the Strait of Gibraltar: First Evidence of Iberian Orca Calls and 40 Hz Fin Whale Foraging Signals», *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, 2025.
14. Vuilliomenet, A., K. E. Jones y D. Wilson, «Future of edge AI in biodiversity monitoring», arXiv, pp. 1–41, 2026.
15. Palmer, K. J., E. Cummings, M. G. Dowd, K. Frasier, F. Frazao, A. Harris, A. Houweling, J. Kanes, O. S. Kirsebom, H. Klinck, H. LeBlond, L. Laturnus, C. Matkin, O. Murphy, H. Myers, D. O. O'Neill, B. Padovese, J. Pilkington, L. Quayle, A. R. Vuibert, K. Trounce, S. Vagle, S. Veirs, V. Veirs, J. Wladichuk, J. Wood, T. Yack, H. Yurk y R. Joy, «A Public Dataset of Annotated Orcinus orca Acoustic Signals for Detection and Ecotype Classification», *Scientific Data*, vol. 12, n.º 1137, pp. 1–15, 2025.
16. Palmer, K. J., A. Houweling, L. Laturnus, J. Pilkington, A. R. Vuibert, J. Wladichuk y R. Joy, «Population-Level Acoustic Classification of Salish Sea Killer Whales: Integrating Biologically Informed Call Type Balancing to Build Robust Models for Conservation Monitoring», *Marine Mammal Science*, vol. 42, n.º 1, pp. e70126, 2026.
17. Nousek, A. E., P. J. B. Slater, C. Wang y P. J. O. Miller, «The influence of social affiliation on individual vocal signatures of northern resident killer whales (*Orcinus orca*)», *Biology Letters*, vol. 2, pp. 481–484, 2006.
18. Hyer, M. D., A. T. Anderson, D. A. Mann, T. A. Mooney, N. Aoki y F. H. Jensen, «Robust real-time detection of right whale upcalls using neural networks on the edge», *Ecological Informatics*, vol. 89, n.º 103130, 2025.
19. Pine, M. K. e I. N. Visser, «Add orca to your phone's contact list: using edge-AI to detect orca», *International Symposium on Orcas; Talk A1; February 17, Ocean Acoustics Ltd / Orca Research Trust*, pp. 1–22, 2025.
20. Burns, A., L. Harrell, B. v. Merriënboer, V. Dumoulin, J. Hamer y T. Denton, «Perch 2.0 transfers 'whale' to underwater acoustic tasks», arXiv, 2025.
21. Kahl, S., C. M. Wood, M. Eibl y H. Klinck, «BirdNET: a deep learning solution for avian diversity monitoring», *Ecological Informatics*, vol. 61, p. 101236, 2021.
22. EMODnet/OSPAR, «European Catalog of Sound Signatures (ECOSS)», 2026.
23. Márquez-Rodríguez, A., N. Pérez-Gimeno, D. Benítez-Aragón, G. M. Arroyo y A. De la Cruz, «Iterative deep learning for cetacean whistle detection in the Strait of Gibraltar», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 167, p. 113756, 2026.
24. Morales, D., «Underwater noise levels in the Strait of Gibraltar and surrounding waters: findings from the AMIGOS survey», *Frontiers in Marine Science*, vol. 12, p. 1655366, 2025.
25. Vuilliomenet, A., S. M. Balvanera, O. M. Aodha, K. E. Jones y D. Wilson, «acoupi: an open-source Python framework for deploying bioacoustic AI models on edge devices», *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 17, n.º 1, pp. 67–76, 2025.

26. Parsons, M. J., R. D. McCauley, P. J. W. Siwabessy y J. D. Penrose, «Detection and characterization of yellowfin and bluefin tuna using passive-acoustical techniques», *Fisheries Research*, vol. 60, pp. 63–74, 2003.
27. MITECO, Mapa de posible presencia de orcas en base a marcas satelitales y los avistamientos de los últimos 5 años en el Golfo de Cádiz, 2026.
28. Díaz López, B. y S. Methion, «Killer whales habitat suitability in the Iberian Peninsula and the Gulf of Biscay: Implications for conservation», *Ocean & Coastal Management*, vol. 255, p. 107245, 2024.
29. ACCOBAMS, Resolution A/4.1 Amendments: Extension of the Accobams Geographical Scope, 2025.
30. UNEP/MAP, 2025 UN Oceans Conference: Synergies for Cetacean Monitoring in the Mediterranean —ACCOBAMS Survey Initiative Phase II (ASI-II) launch, 2026.
31. Teilmann, J., M. D. Agersted y M. P. Heide-Jørgensen, «A comparison of CTD satellite-linked tags for large cetaceans Bowhead whales as real-time autonomous sampling platforms», *Deep-Sea Research Part I*, vol. 157, n.º 103213, 2020.
32. Wiggins, S. M., «Engineering tools for studying marine mammals», *Frontiers of Engineering*, pp. 1–21, Washington, DC: National Academies Press, 2010.
33. McGregor, R., «Testing tag attachments to increase the attachment duration of archival tags on baleen whales», *Animal Biotelemetry*, vol. 4, p. 21, 2016.
34. Herr, H., P. Burkhardt-Holm, K. Heyer, U. Siebert y J. Selling, «Injuries, Malformations, and Epidermal Conditions in Cetaceans of the Strait of Gibraltar», *Aquatic Mammals*, vol. 46, n.º 2, pp. 215–235, 2020.
35. NOAA Fisheries, Southern Resident Killer Whale (*Orcinus orca*) Stranding Event Expert Review Summary, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD, 2021.