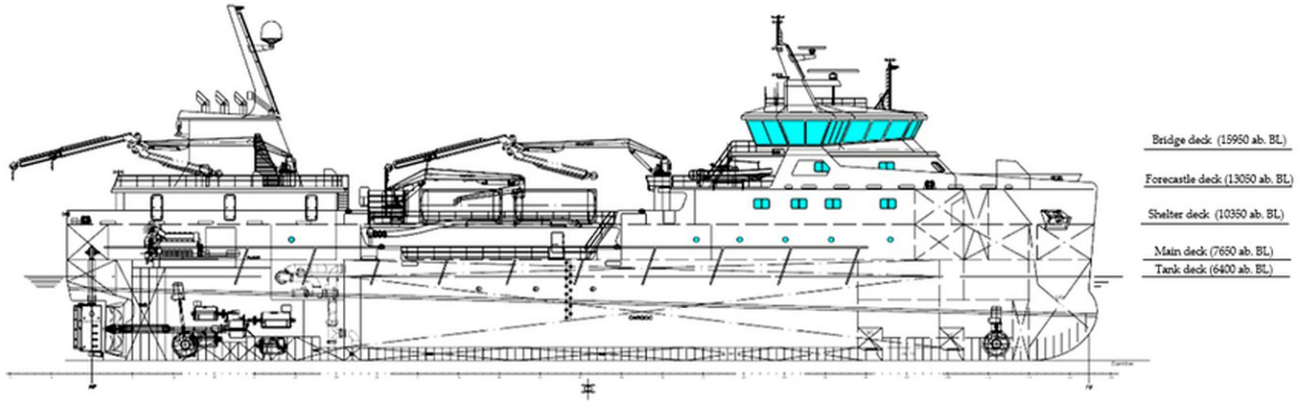
ESTADO DEL ARTE · MODELACIÓN Y SIMULACIÓN — ECONOMÍA CLIMÁTICA
Revista de Economía Climática y Ciencias del Mar · Vol. 12 · N.º 5 · 2026

EL “SÚPER NIÑO” 2026–2027 Y LA NUEVA ECONOMÍA DEL RIESGO CLIMÁTICO

CIENCIA, MODELOS DE SIMULACIÓN E IMPACTO EN LA OPERACIÓN DE BUQUES WELLBOATS EN EL SUR DE CHILE

Caso de estudio: una nave de 3.000 m³ de bodega frente a siete modelos acoplados

Evidencia global y regional actualizada al 13 de octubre de 2026



Nave de referencia — vista de perfil. Líneas de cubierta: Bridge 15.950 · Forecastle 13.050 · Shelter 10.350 · Main 7.650 · Tank 6.400 (mm sobre línea base).

+2,1 °C	83 %	29 %	39.942 t
Niño-3.4 · septiembre 2026	*Prob. evento histórico OND*	*Prob. simulada FAN severa*	*Mortalidad FAN 2016*

AUTOR

Ing. René Pallalever P., M.Sc.

Ingeniero Pesquero · Licenciado en Ciencias
Ingeniero Civil Industrial · Master of Sciences

DATOS DEL ARTÍCULO

Versión: 15 oct 2026 · Datos al 13 oct 2026
Modelos: 7 · Iteraciones Monte Carlo: 2×10^5
Estado del arte con modelación y caso de estudio

Correspondencia:
r.pallalever@ejemplo.cl

© 2026 R. Pallalever P. · Publicado bajo licencia de acceso abierto · Estado del arte con modelación y caso de estudio

ABSTRACT

The 2026–27 El Niño has become the strongest event on several instrumental records: NOAA's Niño-3.4 index reached +2.1 °C in September, Niño-1+2 +3.9 °C, and CPC assigns an 83 % probability that October–December exceeds every event since 1950. This paper updates the state of the art and couples it with seven simulation models applied to a 75.8 m wellboat with a 3,000 m³ fish hold operating in southern Chile. A Monte Carlo chain (2×10^5 draws) links the ENSO peak and the Southern Annular Mode to local summer sea temperature, harmful algal bloom (HAB) probability, hold oxygen and cooling demand, vessel endurance, fleet evacuation dynamics and sectoral losses. Results indicate a 29 % chance of a severe HAB season (≈2.8× a neutral year), a 22 % chance of maximum farm temperatures ≥17 °C, and a 95 % value-at-risk of USD 1,034 M per season under a reactive strategy. Endurance (≈4,500 nm) is not the binding constraint; oxygen and heat in the closed hold are. A single 3,000 m³ vessel avoids ≈830 t of mortality per event, but only anticipatory management (pre-season harvest, earlier warning and large-vessel capacity) cuts the 95 % tail loss by ≈29 %.

Keywords: Super El Niño · ENSO · Southern Annular Mode · harmful algal blooms · wellboat · dissolved oxygen · Monte Carlo · fleet simulation · value-at-risk · salmon farming · Chile

RESUMEN

El Niño 2026–27 se ha convertido en el evento más intenso de varios registros instrumentales: el índice Niño-3.4 de NOAA alcanzó +2,1 °C en septiembre, el Niño-1+2 +3,9 °C, y el CPC asigna un 83 % de probabilidad a que el trimestre octubre-diciembre supere todos los eventos desde 1950. Este trabajo actualiza el estado del arte y lo acopla con siete modelos de simulación aplicados a un wellboat de 75,8 m de eslora y 3.000 m³ de bodega que opera en el sur de Chile. Una cadena Monte Carlo (2×10^5 realizaciones) vincula el pico ENSO y el Modo Anular del Sur con la temperatura superficial local, la probabilidad de floraciones algales nocivas (FAN), la demanda de oxígeno y frío en bodega, la autonomía de la nave, la dinámica de evacuación de la flota y las pérdidas sectoriales.

Los resultados indican una probabilidad de 29 % de temporada con FAN severa (≈2,8 veces un año neutro), 22 % de que la temperatura máxima en centros alcance o supere 17 °C y un valor en riesgo al 95 % de USD 1.034 millones por temporada bajo una estrategia reactiva. La autonomía de combustible (≈4.500 millas) no es la restricción activa: lo son el oxígeno y el calor en la bodega cerrada. Una nave de 3.000 m³ evita del orden de 830 t de mortalidad por evento, pero sólo una gestión anticipatoria —cosecha preventiva, alerta más temprana y capacidad de naves grandes— reduce la cola de pérdidas al 95 % en ≈29 %. El wellboat es infraestructura crítica de resiliencia, cuyo valor se realiza cuando se integra en una estrategia de riesgo planificada antes del pico del evento.

Palabras clave: Súper Niño · ENOS · Modo Anular del Sur · FAN · wellboat · oxígeno disuelto · Monte Carlo · simulación de flota · valor en riesgo · salmonicultura · Chile

PUNTOS CLAVE

- El Niño 2026–27 es récord en el índice de la Agencia Meteorológica de Japón (+4,0 °C en septiembre) y el CPC estima 83 % de probabilidad de superar el umbral histórico de +2,5 °C en OND.
- La probabilidad simulada de una temporada con FAN severa sube de 10 % (año neutro) a 29 %.
- Entre 12 y 17 °C la demanda de O_2 del salmón sube 45 % y la solubilidad cae 10 %: sin inyección, 3.000 m³ con 450 t tienen menos de 5 minutos de reserva de oxígeno.
- Mantener la bodega a 13 °C con agua a 17–18 °C exige ≈760–880 kW de frío.
- La gestión anticipatoria reduce el VaR 95 % de USD 1.034 M a USD 733 M por temporada.

I. INTRODUCCIÓN

Del eslabón logístico a la infraestructura crítica de riesgo

La salmonicultura chilena es la segunda productora mundial de salmónidos. En 2025 sus exportaciones sumaron cerca de USD 6.550 millones, alrededor del 6 % de los envíos totales del país, y Chile concentró aproximadamente el 30,5 % de la producción global de salmón frente al 46,4 % de Noruega [14]. Esta industria opera en la geografía de fiordos y canales de Los Lagos, Aysén y Magallanes, donde la logística marítima especializada es condición de existencia. En ella, el buque *wellboat* —nave que transporta peces vivos en bodegas inundadas— dejó de ser un eslabón de transporte para asumir tareas sanitarias (baños antiparasitarios contra *Caligus rogercresseyi*), de cosecha y de respuesta ambiental.

En 2026 se configuró el escenario que la industria temía desde 2016. El Niño se declaró en el Pacífico tropical a mediados de año, se intensificó con rapidez y en octubre ya superaba en algunos índices al evento de 1997-98 [1][3]. El precedente es conocido: las floraciones algales de febrero y marzo de 2016, coincidentes con un El Niño intenso y una fase positiva del Modo Anular del Sur (SAM), mataron unos 25 millones de peces, equivalentes a 39.942 toneladas, con pérdidas sectoriales del orden de USD 800 millones [5][9].

Este artículo amplía una versión previa centrada en las particularidades de una nave de 3.000 m³ y persigue tres objetivos: (i) sintetizar el estado del conocimiento científico sobre el Súper Niño 2026–27 a escala global y regional; (ii) traducir esa evidencia en un sistema de siete modelos de simulación acoplados, transparente y replicable; y (iii) cuantificar qué parte del riesgo puede mitigar una nave de esta clase, qué parte depende de la flota y la cadena en tierra, y qué parte sólo se reduce con gestión anticipatoria.

NOTA METODOLÓGICA — QUÉ ES DATO Y QUÉ ES MODELO

Las cifras del estado del arte (índices ENSO, probabilidades oficiales, mortalidad de 2016, exportaciones, normativa) provienen de fuentes públicas citadas entre corchetes. Las cifras de las secciones V y VI son **resultados de modelos estilizados**, calibrados con esas fuentes y con supuestos explícitos (Tabla 3). Sirven para ordenar magnitudes, comparar estrategias y orientar decisiones; no sustituyen pronósticos oficiales, cálculos de estabilidad ni estudios de ingeniería específicos de la nave. Todo el código es reproducible con semilla fija.

II. EL SÚPER NIÑO 2026–2027

Estado del arte global: diagnóstico, métricas y teleconexiones

2.1 Diagnóstico al 13 de octubre de 2026

La discusión diagnóstica del Centro de Predicción Climática de NOAA (CPC) del 8 de octubre mantuvo la Advertencia de El Niño e informó que el evento siguió fortaleciéndose: los índices mensuales llegaron a +2,1 °C en Niño-3.4, +3,0 °C en Niño-3 y +3,9 °C en Niño-1+2, con anomalías superficiales superiores a +4 °C en sectores del Pacífico ecuatorial oriental [1]. Bajo la superficie, las anomalías en el Pacífico oriental superaron +10 °C en profundidad, reflejo de una termoclina anormalmente profunda, y los índices de Oscilación del Sur fueron fuertemente negativos: el sistema acoplado océano-atmósfera responde como un El Niño en intensificación [1][2].

El CPC estima que un evento fuerte a muy fuerte es probable hasta enero-marzo de 2027, y asigna a la ocurrencia de un evento “histórico” —un índice RONI trimestral de +2,5 °C o más, nunca alcanzado desde 1950— probabilidades de 54 % para septiembre-noviembre, 83 % para octubre-diciembre y 70 % para noviembre-enero [1][2]. La Agencia Meteorológica de Japón (JMA) informó que su índice alcanzó +4,0 °C en septiembre, superando el máximo de +3,6 °C de diciembre de 1997 en registros desde 1949, y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que integra 13 centros, proyectó para octubre-diciembre una anomalía Niño-3.4 cercana a +3,7 °C, por sobre el récord de +2,6 °C de 2015-16, con persistencia casi segura hasta febrero de 2027 [3].

TRES AGENCIAS, TRES MÉTRICAS

Las cifras no son intercambiables. El CPC usa el **RONI**, un índice relativo que descuenta el calentamiento de todo el trópico; la JMA mide una región que se extiende más al este (150°W-90°W), y la OMM entrega un pronóstico estacional multimodelo. Las tres apuntan en la misma dirección, pero “récord” es por ahora un hallazgo de la JMA y un pronóstico de la OMM, no un veredicto único [3]. En este trabajo el umbral operativo es el del CPC (+2,5 °C).

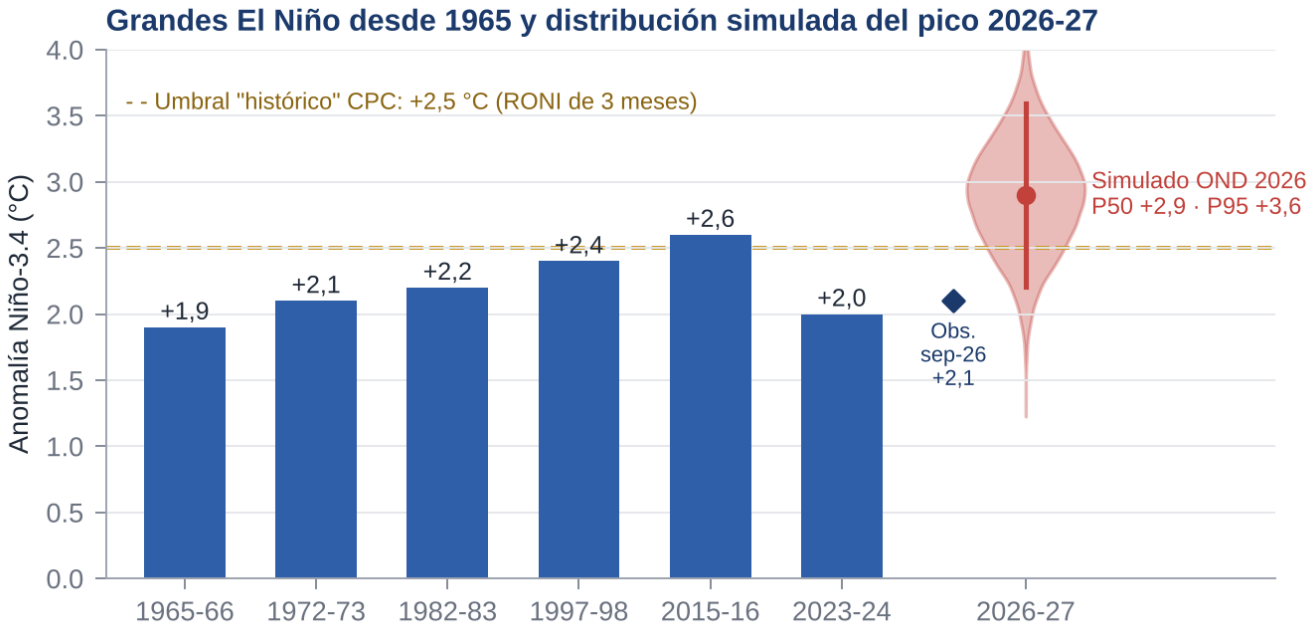


Figura 1. *Picos aproximados del índice oceánico de El Niño (ONI) en grandes eventos desde 1965 (NOAA) frente al valor mensual observado en septiembre de 2026 y la distribución simulada del pico de octubre-diciembre de 2026 (modelo M1, calibrado a la probabilidad del CPC). El modelo da P(pico ≥ +2,5 °C) = 83 % y P(pico ≥ +3,0 °C) = 41 %. Los picos históricos usan ONI y el umbral del CPC usa RONI; la comparación es indicativa.*

2.2 Mecanismo físico y tendencia de largo plazo

El Niño se sostiene por la retroalimentación de Bjerknes: el debilitamiento de los alisios reduce la pendiente de la termoclina ecuatorial, ondas Kelvin descendentes propagan agua cálida hacia el este y el calentamiento oriental debilita aún más los vientos [16]. Los eventos extremos se distinguen porque la convección profunda migra al Pacífico oriental, como ocurrió en 1982-83 y 1997-98. Proyecciones con modelos climáticos sugieren que el calentamiento global puede aumentar la frecuencia de estos eventos extremos [17], y el actual se desarrolla sobre un océano ya récord: la OMM informó que agosto de 2026 fue el agosto más cálido registrado y que la temperatura superficial global del mar alcanzó entonces su máximo observado [3].

2.3 Teleconexiones globales

Los impactos son desiguales: algunas regiones reciben exceso de lluvia y otras déficit. La Tabla 1 sintetiza las señales que la OMM favorece para la temporada y las asociaciones clásicas documentadas en eventos fuertes previos.

Región	Señal esperada	Implicancia
Cuerno de África	Más lluvioso que lo normal [3]	Inundaciones; presión sobre seguridad alimentaria
Sudeste de Sudamérica	Más lluvioso [3]	Crecidas en la cuenca del Plata; agricultura
Norteamérica al sur de 45°N	Más lluvioso [3]	California declaró emergencia preventiva antes del invierno [3]
Subcontinente indio	Más seco [3]	Riesgo para el monzón y la producción de alimentos
Centroamérica sur y Caribe	Más seco [3]	Sequía y agua para riego
Noroeste de Sudamérica	Más seco [3]	Hidroelectricidad y agricultura
Costa de Perú y Ecuador	Mar muy cálido; lluvias costeras	Históricamente, colapso de la anchoveta (1972-73, 1997-98) y menor oferta de harina de pescado
Centro-sur de Chile	Lluvias sobre lo normal en invierno-primavera [10][11]	Ver sección III para la Patagonia norte

Tabla 1. *Teleconexiones del El Niño 2026–27 relevantes para la economía global y la cadena acuícola.*

III. SEÑAL REGIONAL EN EL SUR DE CHILE

El Niño, Modo Anular del Sur, floraciones algales y cadena de respuesta

3.1 El clima de la temporada 2026–27

La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) confirmó en julio la presencia de El Niño y anticipó su persistencia hasta el otoño de 2027, con un máximo hacia octubre-noviembre [10]. Sus pronósticos estacionales favorecieron lluvias sobre lo normal entre Coquimbo y Los Ríos durante agosto-octubre, una doble condición normal/sobre lo normal en el norte de Los Lagos y una señal bajo lo normal en Aysén [11]. Para el sur del país, las presentaciones técnicas a la industria proyectan para la primavera-verano menos precipitación y mayores temperaturas, una combinación que, sumada a factores oceanográficos, puede favorecer floraciones nocivas [7].

3.2 Del Pacífico ecuatorial a los fiordos: el papel del SAM

La crisis de 2016 mostró que El Niño no actúa solo. León-Muñoz y colaboradores demostraron que la floración récord de *Pseudochattonella* cf. *verruculosa* coincidió con un El Niño fuerte y una fase positiva del SAM; la combinación alteró la circulación atmosférica del extremo sur, redujo el aporte de agua dulce y permitió la advección de aguas más salinas y ricas en nutrientes hacia la costa [9]. Históricamente, los grandes El Niño han coincidido con algunas de las floraciones más importantes registradas en Chile, como las de 1983, 1998 y 2016 [7].

La evidencia más reciente refuerza el vínculo térmico. Díaz y colaboradores, tras analizar unos 20 años de monitoreo en la Patagonia noroccidental, encontraron que las floraciones de *Alexandrium catenella* sobre 10.000 células por litro se asociaron exclusivamente a anomalías térmicas positivas, y califican la temporada 2026-27 de riesgo elevado para Los Lagos y Aysén, en especial en primavera-verano [8]. El Centro INCAR, por su parte, ha propuesto mapas de riesgo por barrio y un semáforo para ordenar la producción máxima según la amenaza climática [6].

3.3 La lección de 2016 y la cadena de respuesta actual

Según Sernapesca, el 57 % de la mortalidad de 2016 se procesó en plantas de harina y el 30,3 % fue a vertederos; otras 4.500 t se vertieron en alta mar, dentro de una autorización de hasta 9.000 t [5]. La autoridad atribuyó ese vertimiento a la demora y falta de coordinación inicial para extraer peces que comenzaron a descomponerse. Desde entonces, la modificación de 2018 del Reglamento Ambiental para la Acuicultura fijó capacidades de extracción y almacenamiento y mecanismos de prealerta; y las exigencias actualizadas en 2025 establecen que el retiro de mortalidad no debe superar 96 horas, con hasta 192 horas cuando se usan embarcaciones con refrigeración [5]. En 2026 se realizó un simulacro de mortalidad masiva en Los Lagos, Aysén y Magallanes, pero no se ha publicado una capacidad consolidada diaria de retiro, transporte y tratamiento, y la industria planteó habilitar celdas sanitarias en tierra como alternativa, aún en evaluación normativa [5].

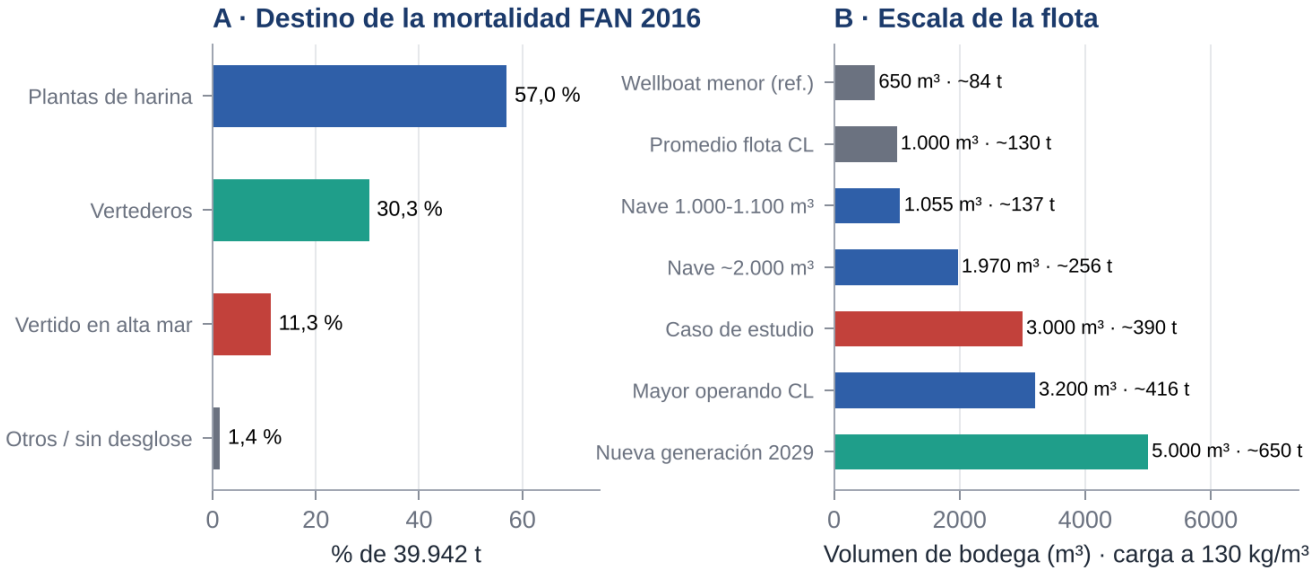


Figura 2. *(A) Destino de la mortalidad por FAN en 2016 según Sernapesca [5]. (B) Escala de la flota wellboat: el caso de estudio frente a naves representativas que operan en Chile [19][20] y a la nueva generación de 5.000 m³ encargada para 2029 [21]; toneladas indicativas a 130 kg/m³.*

La capacidad de transporte vivo es escasa a escala global: un operador que inició sus actividades en 2026 estima que se requerirán unos 150.000 m³ adicionales hacia 2030, equivalentes a unas 30 naves de 5.000 m³ [21]. En Chile conviven naves reacondicionadas de 300-800 m³ con unidades modernas de 2.000-3.200 m³; la mayor en operación declara 3.200 m³ y hasta 500 t de peces vivos en tres bodegas [19][20]. Una nave de 3.000 m³ se ubica, por tanto, en el decil superior de la flota nacional.

IV. CASO DE ESTUDIO

La nave de referencia: disposición general y particularidades principales

El análisis se ancla en un wellboat de transporte de peces vivos de gran porte, cuyo plano de disposición general (perfil, vista de popa, cubierta principal y planta sobre tanques) se reproduce en la Figura 3. Con una bodega de **3.000 m³**, triplica el promedio nacional cercano a 1.000 m³. Sus particularidades (Tabla 2) son los parámetros de entrada de los modelos M4 a M6.

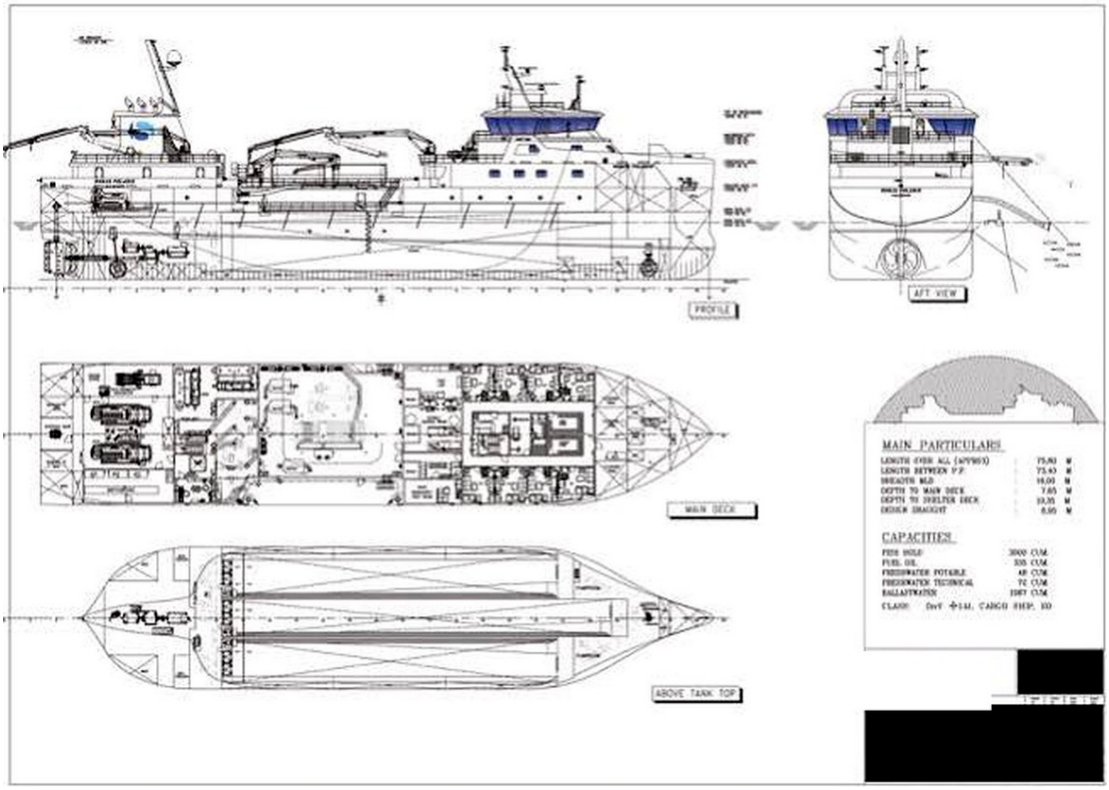


Figura 3. *Plano de disposición general de la nave de referencia: perfil, vista de popa, cubierta principal y planta sobre tanques. Fuente: plano aportado por el autor [22].*

Parámetro	Valor	Uso en los modelos de simulación
Eslora total (LOA)	75,80 m	Opera en canales principales; restricción en pasos angostos
Eslora entre perpendiculares	73,43 m	—
Manga (de trazado)	16,00 m	Estabilidad para grúas y baños
Puntal a cubierta principal / shelter	7,65 / 10,35 m	Volumen protegido para frío, O_2 y sensórica
Calado de diseño	8,00 m	Limita acceso a sitios someros
Bodega de peces	3.000 m³	M4 (O_2, frío) · M6 (carga por viaje)
Combustible	335 m³	M5 (alcance, desvío evasivo)
Agua dulce potable / técnica	40 / 72 m³	Tripulación / baños antiparasitarios
Lastre	1.087 m³	Calado y estabilidad en carga

Tabla 2. *Particularidades principales de la nave de referencia y su papel en la modelación.*

V. MARCO DE MODELACIÓN

Siete modelos acoplados: del océano ecuatorial a las pérdidas por temporada

El sistema de modelos (Figura 4) propaga la incertidumbre desde el pico de El Niño hasta las pérdidas económicas. Cada eslabón es deliberadamente simple, con ecuaciones explícitas y parámetros trazables, de modo que cualquier operador pueda sustituir los supuestos por sus propios datos. La Tabla 3 resume ecuaciones, calibración y salidas.

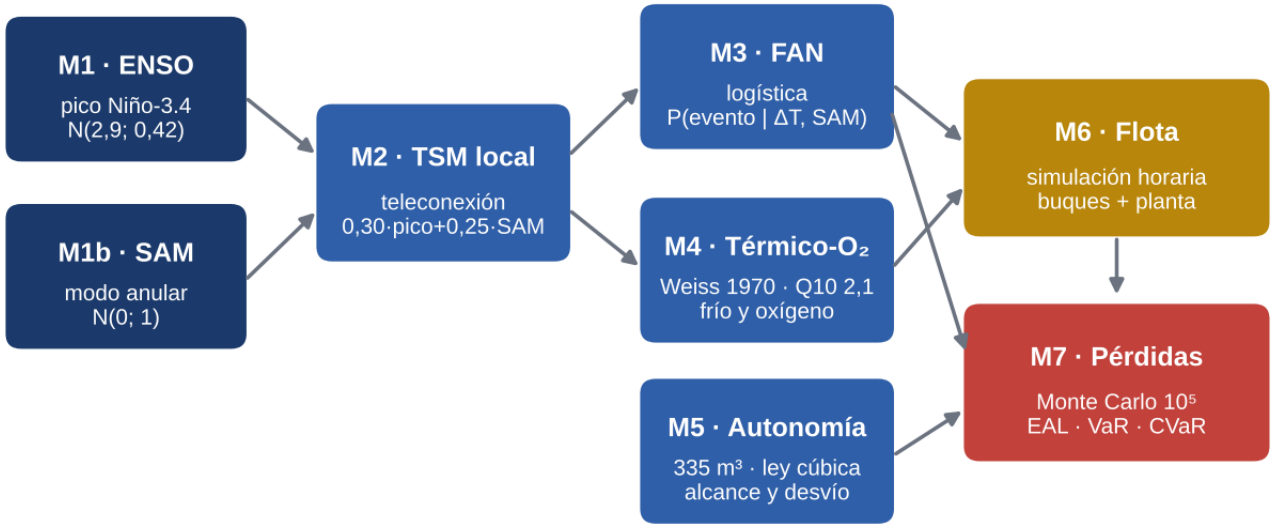


Figura 4. *Arquitectura de la modelación. M1-M2 generan escenarios climáticos; M3-M5 evalúan la amenaza y la respuesta de la nave; M6 simula la flota y la planta; M7 integra todo en distribuciones de pérdida.*

Modelo	Formulación	Calibración / supuestos	Salida
M1 · ENSO	Pico OND ~ N(2,90; 0,42) °C	P(≥2,5 °C) = 0,83, igual al CPC [1]	Distribución del pico
M2 · TSM local	ΔT = 0,30·pico + 0,25·SAM + ε; ε ~ N(0; 0,35)	Anomalías estivales de ≈1 °C en 2016 [9]	Anomalía estival en Patagonia norte
M3 · FAN	logit P = −2,4 + 1,5·ΔT + 0,4·SAM	≈8 % en año neutro; 45-55 % en condiciones tipo 2016 [8][9]	Prob. de temporada con FAN severa
M4 · Térmico-O_2	Solubilidad de Weiss; MO_2 = 150·2,1^((T−12)/10) mg/kg/h; calor 13,6 J/mg O_2	Umbral 7 mg/L; UA casco = 120 kW/K	O_2, carga de frío, horas de enfriamiento
M5 · Autonomía	P = 3.000·(v/12)³ + aux.; 205 g/kWh	90 % del combustible utilizable	Alcance y costo de desvío
M6 · Flota	Simulación horaria; 60 naves, 45 % disponibles, planta 3.600 t/día	Distancia 40-120 mn; 130 kg/m³; 200 réplicas	Días y t/día de evacuación
M7 · Pérdidas	Monte Carlo 10^5: evento × biomasa × mortalidad − evacuación	USD 20.000/t muerta (2016); 6.000/t cosecha urgente	EAL, VaR, CVaR, excedencia

Tabla 3. *Resumen de los modelos de simulación. EAL: pérdida esperada anual; VaR: valor en riesgo; CVaR: pérdida media más allá del VaR.*

VI. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Amenaza climática, respuesta de la nave, flota y economía del riesgo

6.1 Amenaza: temperatura y floraciones algales

La cadena M1-M2 proyecta una anomalía estival local con mediana de +0,9 °C y percentil 90 de +1,4 °C. Con ese forzamiento, la probabilidad media de una temporada con FAN severa sube a 29 %, ≈2,8 veces la de un año neutro (10 %). La temperatura máxima estival en centros tiene mediana de 16,3 °C; la probabilidad de alcanzar 17 °C es de 22 % y la de 18 °C, de 6 % (Figura 5). El SAM actúa como amplificador: con SAM +1 la curva de riesgo se desplaza cerca de medio grado hacia la izquierda.

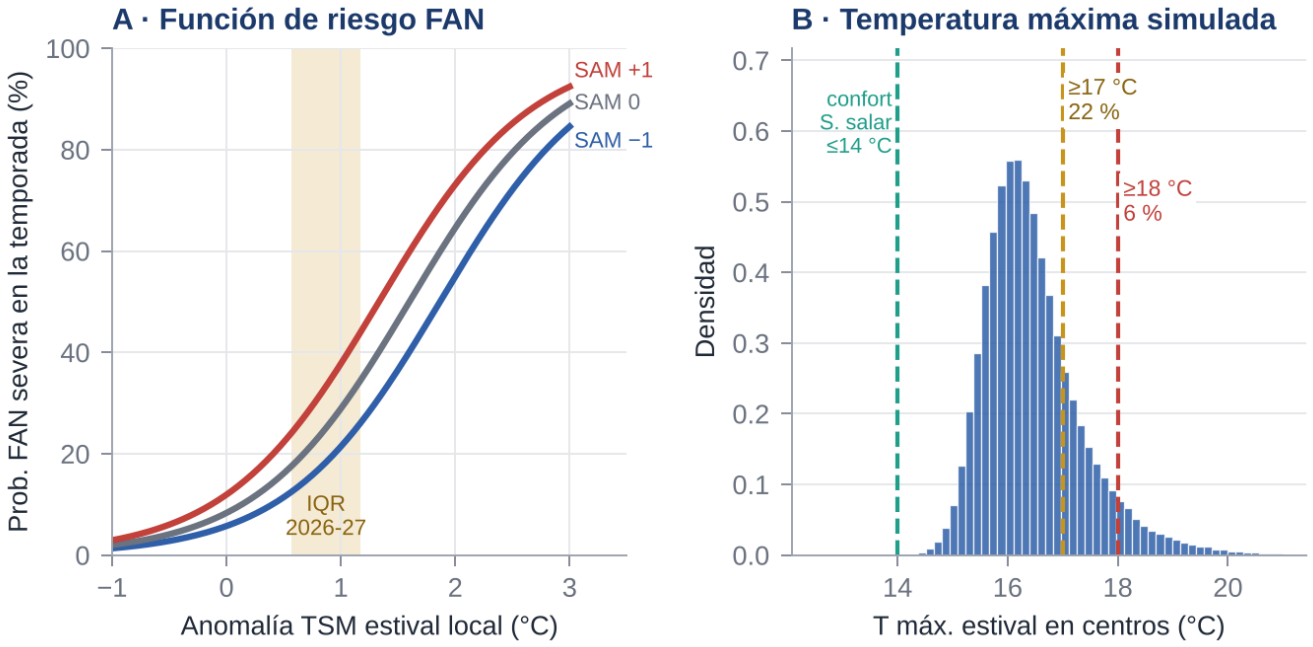


Figura 5. *(A) Probabilidad de temporada con FAN severa según la anomalía térmica local y la fase del SAM (M3); la franja dorada marca el rango intercuartil simulado para 2026-27. (B) Distribución simulada de la temperatura máxima estival en centros de engorda (M2).*

6.2 La tijera metabólica dentro de la bodega

Al pasar de 12 a 17 °C, la demanda de oxígeno del salmón aumenta 45 % mientras la solubilidad del oxígeno en agua de mar cae 10 % (de 8,8 a 8,0 mg/L). En una bodega cerrada de 3.000 m³ cargada a 150 kg/m³, el oxígeno disuelto por encima de 7 mg/L alcanza para apenas 4,8 minutos a 12 °C y 1,8 minutos a 17 °C. La operación depende enteramente de la inyección: ≈68 kg de O_2 por hora a 12 °C y ≈98 kg/h a 17 °C, es decir, unas 1,2 t de oxígeno en un viaje de 12 horas (Figura 6). La redundancia del sistema de oxigenación es, por tanto, el atributo de seguridad más crítico de la nave bajo El Niño.

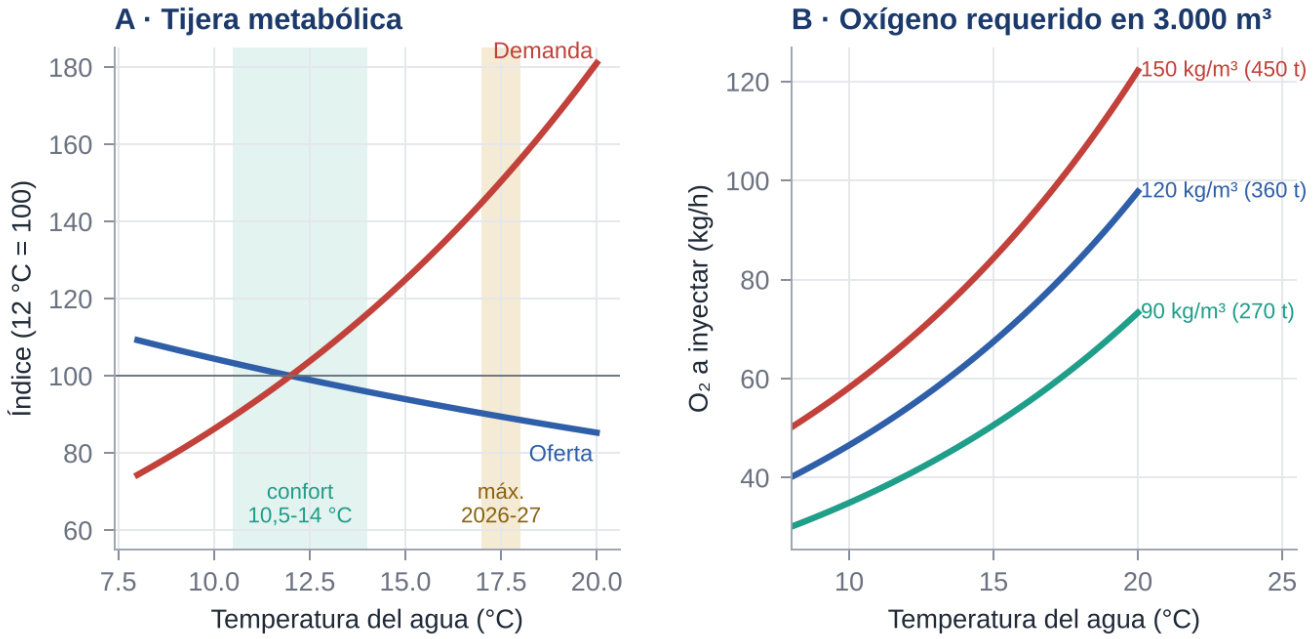


Figura 6. *(A) Oferta (solubilidad de saturación, ecuación de Weiss) frente a demanda (consumo del pez, Q_{10} = 2,1), índice 12 °C = 100. (B) Oxígeno que debe inyectarse para sostener la carga en 3.000 m³ según densidad de transporte.*

La sección maestra (Figura 7) muestra por qué el problema térmico y el hidrodinámico están acoplados: las bodegas subdivididas por mamparos limitan el oleaje interno y permiten un control de oxígeno y temperatura por compartimento, pero cada compartimento debe sostener su propio balance. Bajo estrés térmico, la aceleración del buque en mar agitado se suma al estrés fisiológico y reduce el margen aeróbico.

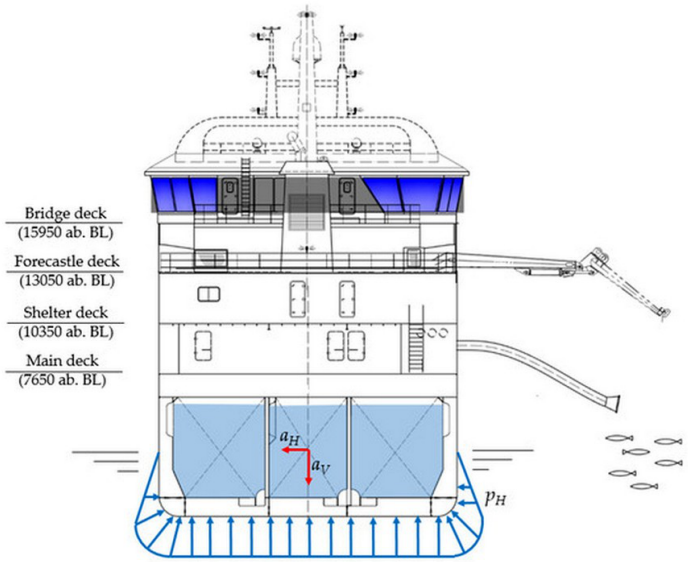


Figura 7. *Sección transversal (cuaderna maestra): bodegas inundadas subdivididas por mamparos, con aceleraciones horizontal (aH) y vertical (aV) sobre la carga y presión hidrostática del casco (pH). Fuente: plano aportado por el autor [22].*

6.3 Capacidad frigorífica: el verdadero dimensionamiento

Mantener 360 t de peces a 13 °C cuando el mar está a 17 °C demanda ≈760 kW de frío en régimen (calor metabólico, intercambio a través del casco y bombas), y ≈880 kW con mar a 18 °C. Llevar los 3.000 m³ de 17 a 13 °C toma ≈30,6 h con 1.000 kW instalados y ≈14,4 h con 1.500 kW (Figura 8). Bajo unos 1.150 kW el enfriamiento supera las 24 horas, y con capacidades cercanas a la carga en régimen prácticamente no progresa: el calor que entra por el casco y el que generan los peces igualan lo que la planta extrae. La lección operativa es que, en agua cálida, una bodega se mantiene fría mucho mejor de lo que se recupera; renovar agua con flujo abierto en zonas cálidas o con FAN destruye esa ventaja, y el sistema cerrado pasa a ser condición de viabilidad, no un diferenciador comercial.

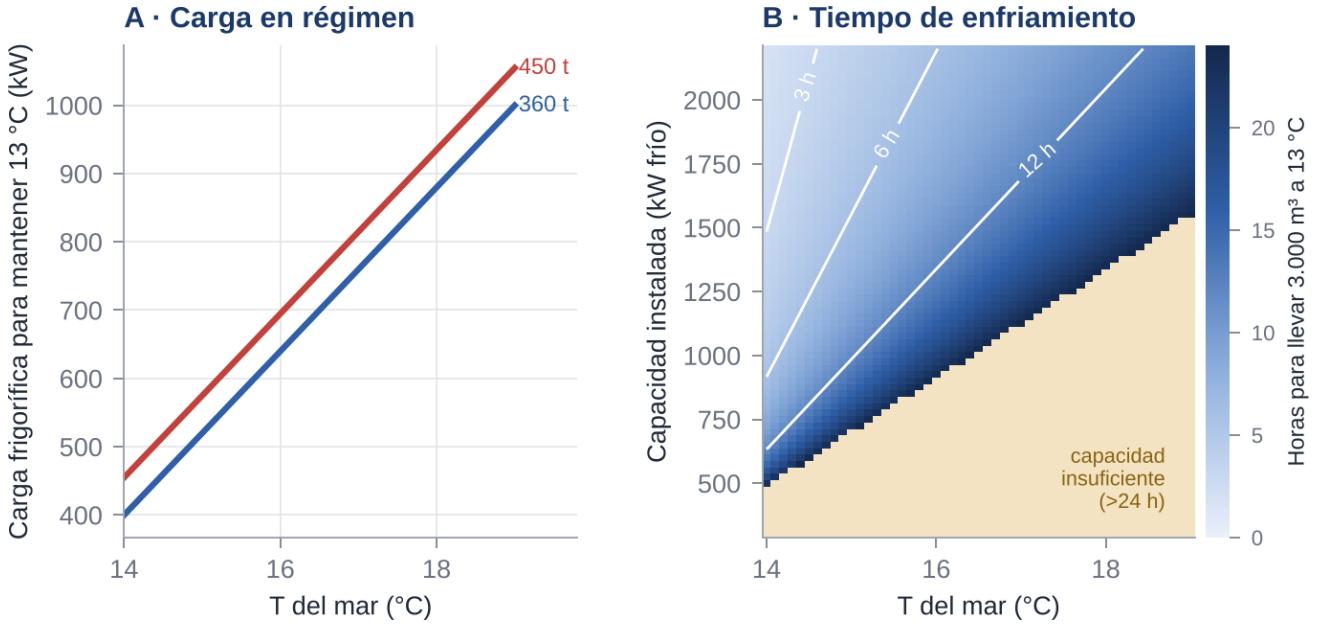


Figura 8. *(A) Carga frigorífica en régimen para sostener 13 °C en bodega según la temperatura del mar y la biomasa. (B) Horas para enfriar 3.000 m³ hasta 13 °C según capacidad instalada; la zona crema indica capacidad insuficiente (más de 24 h o sin convergencia).*

6.4 Autonomía: el combustible no es la restricción

Con 335 m³ (90 % utilizable) y un consumo de ≈0,74 m³/h a 11 nudos, la nave dispone de ≈4.470 millas (≈17 días de navegación); con la planta de frío y oxígeno al máximo el alcance baja a ≈3.750 millas. Un desvío evasivo de 100 millas cuesta apenas ≈6,7 m³, cerca del 2-3 % del tanque. El costo real del desvío es otro: cada 100 millas suman unas 9 horas de peces en bodega cerrada, con su consumo de oxígeno, su carga térmica y su estrés (Figura 9). El límite operativo de la ruta evasiva lo fija el bienestar animal, no el combustible.

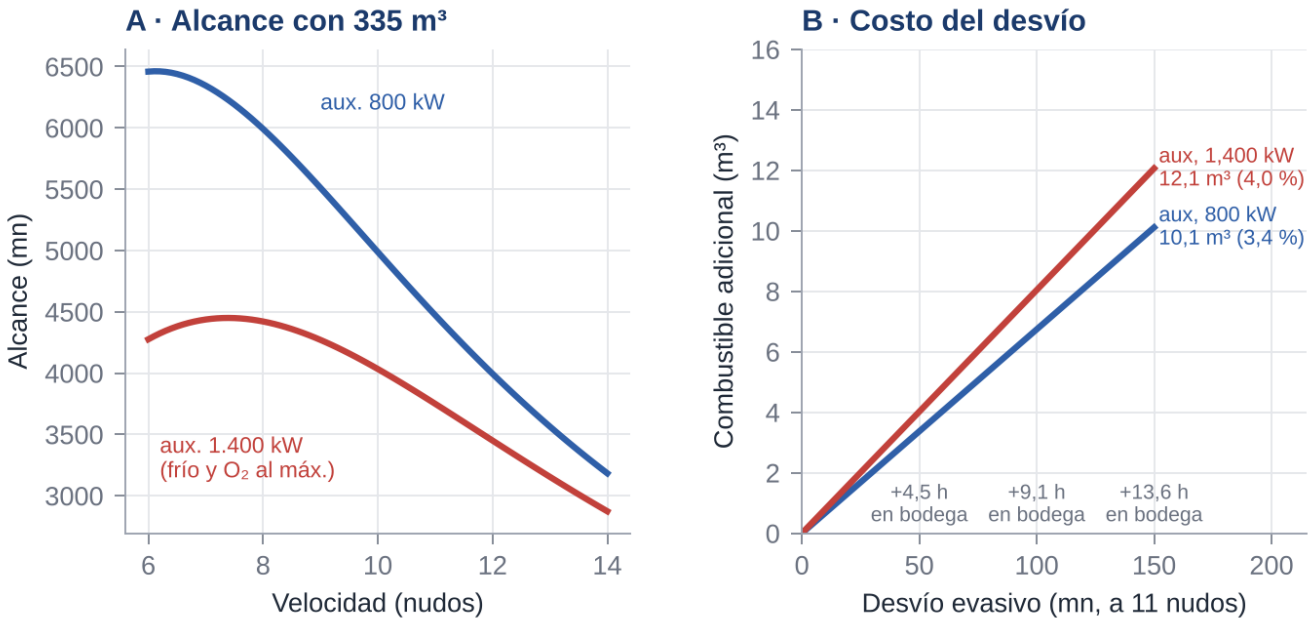


Figura 9. *(A) Alcance según velocidad con dos niveles de consumo auxiliar. (B) Combustible adicional de un desvío evasivo y horas adicionales de peces en bodega a 11 nudos.*

6.5 Evacuación de emergencia: la flota y la planta

La simulación horaria de flota (M6) considera la evacuación de 25.000 t desde un barrio afectado. Con la flota base disponible la operación toma una mediana de 9,6 días (P90: 11,8). Sumar la nave de 3.000 m³ lo reduce a 8,5 días, y tres naves de 3.000 m³ o más a 7,0 días. A partir de ese punto la restricción activa se desplaza a tierra: ampliar un 50 % la capacidad de planta sólo recorta medio día más (6,5 días), porque buques y planta deben crecer juntos (Figura 10). Con el criterio de 24 t diarias de crecimiento perdido por cada 5.000 t en ayuno, cada día ganado evita ≈120 t de pérdida de crecimiento sobre 25.000 t, además del riesgo de mortalidad.

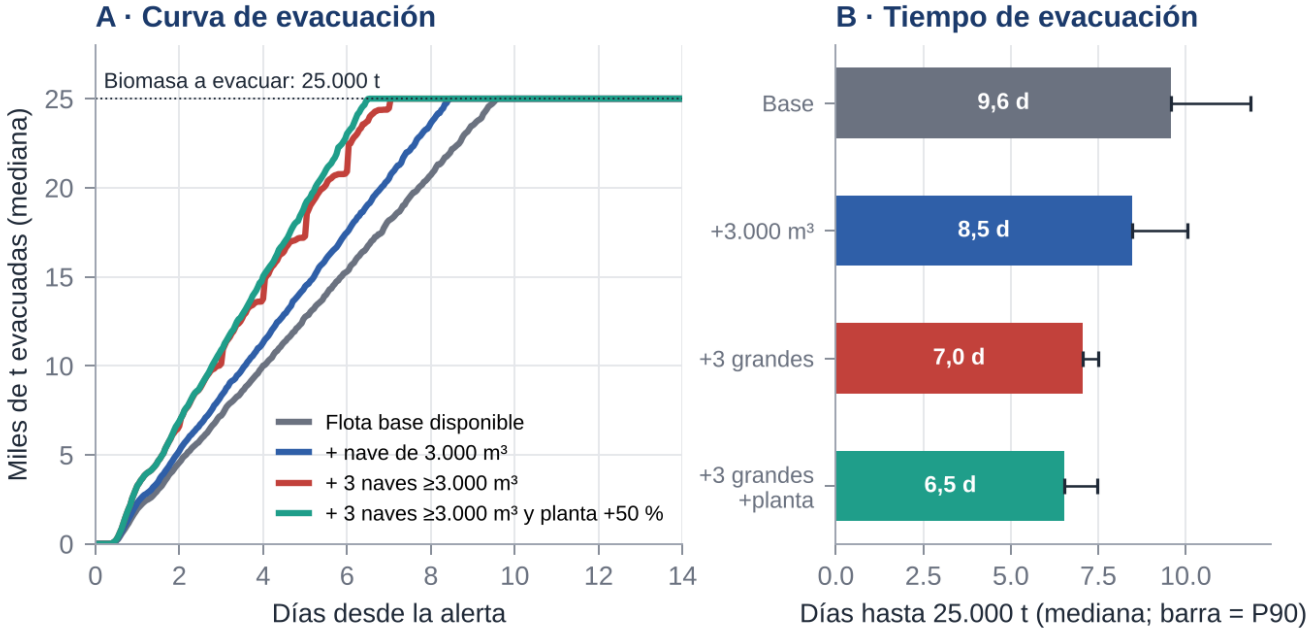


Figura 10. *(A) Curvas medianas de biomasa evacuada (200 réplicas por escenario). (B) Días hasta completar 25.000 t: mediana y percentil 90.*

6.6 Economía del riesgo: pérdidas, colas y sensibilidad

El Monte Carlo económico (M7) compara un año neutro con tres estrategias bajo el Súper Niño (Figura 11). La pérdida esperada por temporada pasa de USD 68 M en un año neutro a USD 193 M con una respuesta reactiva, y el VaR 95 % sube de USD 528 M a USD 1.034 M. La probabilidad de superar una pérdida del tamaño de 2016 (USD 800 M) se eleva de 2,9 % a 8,1 %.

Un hallazgo central es de escala: una sola nave de 3.000 m³ evita en promedio ≈830 t de mortalidad y ≈USD 6,7 M por evento, una cifra relevante para un productor pero marginal frente a la biomasa expuesta de un barrio completo: con la flota base sólo se alcanza a evacuar, en promedio, el 21 % de esa biomasa antes del daño. Incluso tres naves grandes recortan poco el VaR (USD 1.012 M). La estrategia anticipatoria —cosechar antes del pico el 25 % de la biomasa de los barrios críticos, ganar tres días de alerta y disponer de naves grandes— asume un costo cierto de unos USD 45 M, pero baja el VaR 95 % a USD 733 M (29 % menos) y la probabilidad de un evento tipo 2016 a 4,1 %.

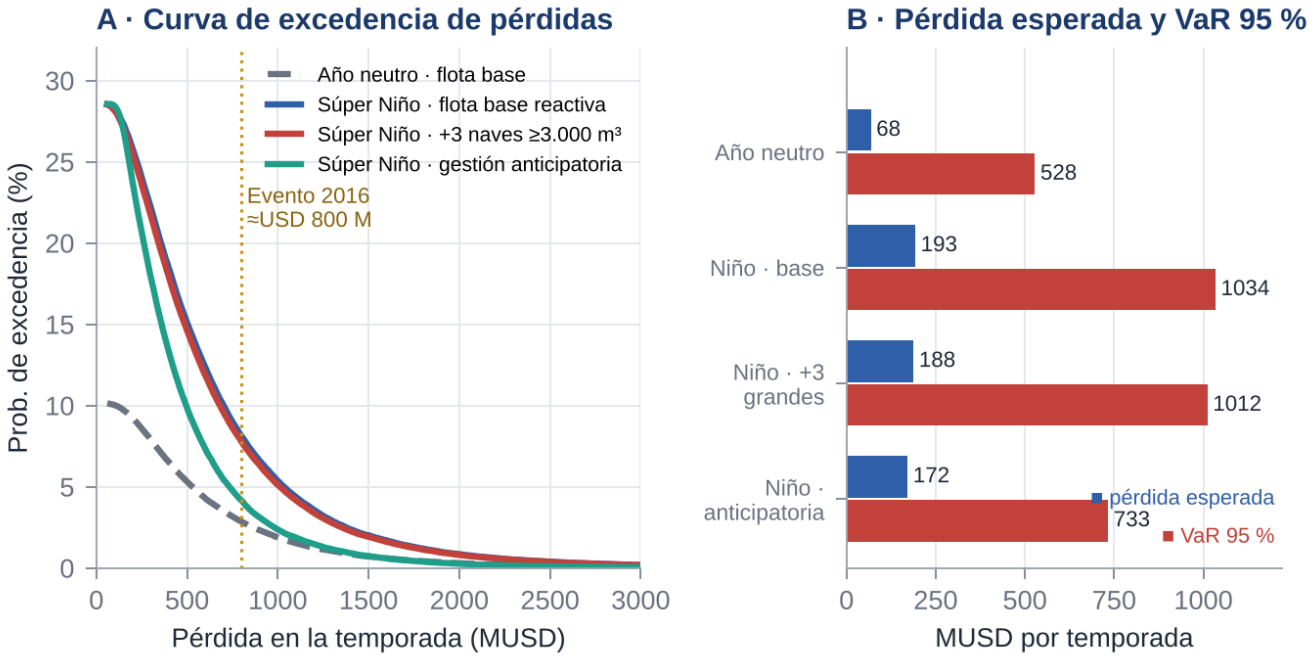


Figura 11. *(A) Curvas de excedencia de la pérdida sectorial por temporada. (B) Pérdida esperada (EAL) y VaR 95 % por estrategia. Montos en millones de USD; modelo M7, 10^5 realizaciones.*

El análisis de sensibilidad (Figura 12) muestra que la pérdida esperada depende sobre todo de parámetros biológicos y oceanográficos —sensibilidad de la FAN a la temperatura, mortalidad sin evacuación, teleconexión y biomasa expuesta— y mucho menos del ritmo de evacuación o de la anticipación de la alerta por sí solos. La palanca más efectiva al alcance del sector es, por tanto, reducir la biomasa expuesta en los barrios de mayor riesgo antes del pico estival.

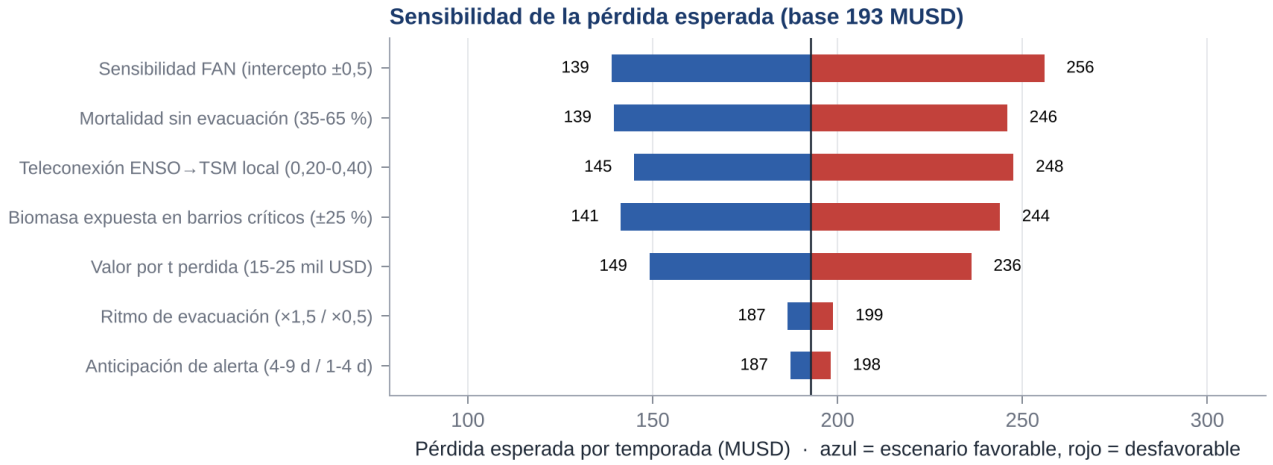


Figura 12. *Sensibilidad de la pérdida esperada por temporada a variaciones de un parámetro a la vez (escenario Súper Niño con flota base).*

6.7 Calendario de riesgo y síntesis operativa

Integrando los resultados con la estacionalidad documentada de las FAN de 2016 (febrero-marzo), el máximo térmico estival y los plazos normativos de retiro de mortalidad, la Figura 13 ordena el riesgo mes a mes. La ventana crítica para la flota se concentra entre enero y marzo de 2027, cuando coinciden calor, floraciones, mayor carga parasitaria y demanda simultánea de naves y plantas.



Figura 13. *Matriz de riesgo para la operación wellboat (juicio experto informado por los modelos y la evidencia regional; 1 = bajo, 5 = crítico).*

Indicador	Resultado	Lectura para la operación
P(pico ENSO ≥ +2,5 °C)	83 %	Evento histórico es el escenario base
P(FAN severa) Niño / neutro	29 % / 10 %	Planificar como año de alta amenaza
P(T máx. ≥ 17 °C) en centros	22 %	Activar protocolos térmicos desde diciembre
Reserva de O_2 sin inyección (150 kg/m³, 17 °C)	1,8 min	Redundancia de oxigenación obligatoria
Frío para 13 °C con mar a 17 °C	≈760 kW	Verificar capacidad instalada real
Alcance a 11 nudos	≈4.470 mn	El combustible no limita la evasión
Días para evacuar 25.000 t (base / +3 grandes)	9,6 / 7,0	Contratar capacidad antes de la alerta
Mortalidad evitada por la nave de 3.000 m³	≈830 t/evento	Valor directo como cobertura
VaR 95 % reactivo / anticipatorio	USD 1.034 / 733 M	La anticipación recorta la cola de riesgo

Tabla 4. *Síntesis de resultados de simulación.*

VII. DISCUSIÓN

La nave como infraestructura crítica de resiliencia

Los resultados permiten pasar de la tesis cualitativa de la versión previa —el wellboat como plataforma de mitigación— a una jerarquía cuantitativa de restricciones y palancas. Cuatro hallazgos ordenan la discusión.

Primero, la restricción operativa es fisiológica y térmica, no energética. La autonomía de 335 m³ cubre con holgura cualquier desvío realista; lo que limita la ruta evasiva es el tiempo de peces en bodega cerrada, que se mide en oxígeno inyectado y kilovatios de frío. La inversión prioritaria en la nave es la redundancia de oxigenación, la capacidad frigorífica verificada para agua de 17-18 °C y la sensórica continua de oxígeno, temperatura y CO_2 por compartimento.

Segundo, el valor de una nave grande es real pero de escala productor, no sectorial. Evitar del orden de 800 t de mortalidad por evento justifica contratos de disponibilidad para un productor o un barrio, pero ninguna nave aislada cambia la distribución de pérdidas del sector. La capacidad de flota se comporta como un bien de resiliencia compartido: escasea al mismo tiempo para todos y su valor se maximiza con coordinación (protocolos de priorización, reserva compartida, contratos de opción de capacidad).

Tercero, el cuello de botella migra a tierra. Con más naves grandes, la planta y la disposición final pasan a ser la restricción activa, lo que coincide con la advertencia de expertos y autoridades de que la gestión de mortalidades masivas sigue siendo una vulnerabilidad crítica [5][8]. La capacidad de los wellboats con refrigeración, que la norma permite usar con plazos de hasta 192 horas, debe planificarse junto a las plantas reductoras y destinos alternativos.

Cuarto, la economía del riesgo favorece la anticipación. La cosecha preventiva en barrios críticos tiene un costo cierto, pero recorta la cola de pérdidas mucho más que la capacidad reactiva. Esto abre espacio para instrumentos de transferencia de riesgo, como seguros paramétricos activados por umbrales de anomalía térmica o de índices ENSO, que financien decisiones anticipadas en lugar de compensar pérdidas consumadas.

7.1 Limitaciones

Los modelos son estilizados. La teleconexión ENSO-TSM local y la función de riesgo FAN se calibraron a pocos eventos históricos y no distinguen especies ni barrios; la composición de la flota es sintética y no representa contratos reales; la carga frigorífica depende de un coeficiente de intercambio supuesto; y las pérdidas monetarias se escalan desde 2016 sin ajustar por precios o seguros. Los resultados deben leerse como órdenes de magnitud y comparaciones entre estrategias. La agenda inmediata es calibrar M2-M3 con series del programa de monitoreo de FAN y datos de boyas oceanográficas, y validar M4 con registros reales de oxígeno y temperatura de bodega de la nave.

VIII. CONCLUSIONES

Hallazgos principales y recomendaciones

El El Niño 2026–27 es, según varias métricas, el más intenso del registro instrumental, y la evidencia regional vincula las anomalías térmicas positivas y el SAM con las floraciones nocivas más dañinas de la Patagonia. La modelación acoplada indica que la amenaza para la temporada 2026-27 es del orden de tres veces la de un año neutro y que la ventana crítica se concentra entre enero y marzo de 2027.

Para la nave de referencia, la bodega de 3.000 m³ es un activo de primera línea, pero su desempeño bajo El Niño no lo define el volumen ni la autonomía, sino la capacidad de sostener oxígeno y temperatura en sistema cerrado. A escala sectorial, la capacidad de flota sólo reduce el riesgo de cola cuando se combina con anticipación y con capacidad en tierra.

Recomendaciones

- **Antes de diciembre de 2026.** Verificar en prueba de mar la capacidad frigorífica real con agua de 17-18 °C y la redundancia del sistema de oxigenación; instalar sensórica continua por compartimento; contratar capacidad de evacuación como opción de disponibilidad.
- **Diciembre 2026 - enero 2027.** Ejecutar cosecha preventiva en barrios de mayor riesgo según los mapas del INCAR; operar en sistema cerrado en tránsito por zonas con alerta; integrar la sensórica embarcada a la red de alerta temprana.
- **Febrero - marzo de 2027 (pico).** Activar protocolos de priorización sectorial de naves y plantas; reservar naves con refrigeración para mortalidad según los plazos de 96/192 horas; coordinar destinos alternativos con la autoridad.
- **Agenda estructural.** Coordinar capacidad compartida de reserva entre productores, explorar seguros paramétricos ligados a índices oceanográficos y planificar la renovación de flota hacia naves de 3.000-5.000 m³ con frío y tratamiento a bordo.

Declaraciones

Financiamiento. El presente trabajo no recibió financiamiento externo específico. **Conflictos de interés.** El autor declara no tener conflictos de interés. **Disponibilidad de datos y código.** Las particularidades de la nave proceden del plano aportado por el autor. Los modelos M1-M7 se implementaron en Python con semilla fija (2026) y están disponibles a solicitud; las fuentes públicas se citan en la bibliografía. **Nota.** Las probabilidades y montos de las secciones V-VI son resultados de modelos y no pronósticos oficiales.

IX. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Fuentes científicas, técnicas, oficiales y sectoriales

1. NOAA Climate Prediction Center. (2026, 8 de octubre). *ENSO Diagnostic Discussion*. cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/ensodisc.shtml

2. NOAA Climate Prediction Center. (2026, 13 de octubre). *ENSO: Recent Evolution, Current Status and Predictions*. cpc.ncep.noaa.gov

3. Nature World News. (2026, 13 de octubre). Japan’s weather agency says El Niño is now the strongest it has recorded (síntesis de JMA, boletín del 9 oct., y WMO *El Niño Update*). natureworldnews.com

4. NOAA Climate Prediction Center. (2026, 10 de septiembre). *ENSO Diagnostic Discussion* (75 % de probabilidad de evento histórico en OND). cpc.ncep.noaa.gov

5. Hernández, F. (2026, 28 de septiembre). El Niño y la ruta de los salmones muertos: la capacidad que Chile debe poner a prueba. InfoSALMON (cifras de la Cuenta Pública 2016 de Sernapesca y Res. Ex. 118/2025). infosalmon.cl

6. Centro INCAR. (2026). El Niño 2026-2027: mapas de riesgo y semáforo para la salmonicultura. Mundo Acuícola / InfoSALMON.

7. Mundo Acuícola. (2026). Aquabench reúne a la industria para revisar avances y desafíos frente a El Niño 2026/2027. mundoacuicola.cl

8. Naguil, D. (2026, 13 de octubre). Patricio Díaz: floraciones sobre 10.000 células por litro se asocian a anomalías térmicas positivas (resultados publicados en *Water Biology and Security*). InfoSALMON.

9. León-Muñoz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R., & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8, 1330. doi:10.1038/s41598-018-19461-4

10. Dirección Meteorológica de Chile. (2026). Pronósticos estacionales JAS y ASO 2026; El Niño activo hasta otoño 2027 (EFE, Emol, CNN Chile).

11. Dirección Meteorológica de Chile. (2026, agosto). Pronóstico estacional agosto-septiembre-octubre 2026 (Radio Agricultura).

12. Consejo del Salmón / IFOP. (2026, septiembre). Taller de preparación ante El Niño 2026-2027 y FAN. Mundo Acuícola; Diario Acuícola.

13. Mundo Acuícola. (2026). El Niño 2026-2027: ¿Qué esperar en el sur de Chile y cómo llegar preparados? mundoacuicola.cl

14. SalmonChile / SeafoodSource. (2026). Chile’s salmon exports surpass USD 6.5 billion in 2025 (cifras de Banco Central y Kontali). seafoodsource.com

15. Weiss, R. F. (1970). The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep-Sea Research*, 17, 721-735.

16. Bjerknes, J. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 97, 163-172.

17. Cai, W., et al. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4, 111-116.

18. Handeland, S. O., Imsland, A. K., & Stefansson, S. O. (2008). The effect of temperature and fish size on growth, feed intake, food conversion efficiency and stomach evacuation rate of Atlantic salmon post-smolts. *Aquaculture*, 283, 36-42.

19. PortalPortuario. Gerente de Nachipa Wellboats explica los desafíos del transporte de salmón vivo (Ronia Diamond, 3.200 m³). portalportuario.cl; Aqua.cl (2025).

20. Frasal. Flota wellboat (naves de 650 m³). frasal.cl

21. SalmonExpert. (2026). Nueva empresa de wellboats se abre a la Bolsa y mira la salmonicultura chilena para crecer (Pelican Aqua Holding). salmonexpert.cl

22. Plano de disposición general — wellboat de transporte de peces vivos (nave de referencia). (s.f.). Documento técnico aportado por el autor.

23. Remen, M., Sievers, M., Torgersen, T., & Oppedal, F. (2016). The oxygen threshold for maximal feed intake of Atlantic salmon post-smolts is highly temperature-dependent. *Aquaculture*, 464, 582-592.

24. Intesal / Sernapesca. (2017). Recomendaciones para el transporte de peces en wellboat ante presencia de microalgas tóxicas.

25. Anthropic. (2026). *Claude* (modelo Claude Opus 5.5) [Modelo de lenguaje de gran escala]. Claude.ai. https://claude.ai

EL “SÚPER NIÑO” 2026–2027 Y LA NUEVA ECONOMÍA DEL RIESGO CLIMÁTICO

Ciencia · Simulación · Floraciones algales · Oxígeno y frío en bodega · Resiliencia de flota · Chile

Ing. René Pallalever P., M.Sc.
Ingeniero Pesquero · Licenciado en Ciencias · Ingeniero Civil Industrial · Master of Sciences

Revista de Economía Climática y Ciencias del Mar · Vol. 12 · N.º 5 · 2026

© 2026 R. Pallalever P. — Publicado bajo licencia de acceso abierto. Estado del arte con modelación y caso de estudio.