



**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MEDIOAMBIENTE  
INGENIERÍA AMBIENTAL**

---

**Propuesta de gestión basada en modelos de distribución de especies para la conservación de *Megaptera novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane bajo escenarios de cambio climático.**

**TRABAJO DE TÍTULO**

**Estudiante**

**Camilo Ignacio Atenas Sereño**

**Profesor Guía**

**Mg. Ing. Jairo Valencia Muñoz**

---

**Valparaíso, Chile**

**05 Diciembre 2025**

## *Agradecimientos*

*Agradezco a mi familia por la paciencia*

*Agradezco a mi abuela por siempre estar ahí*

*Agradezco a mi catita por siempre apoyarme*

*Agradezco a mis amigos por la compañía*

*Agradezco a los que ya no están*

*Y me agradezco a mi por no dejarme caer en los peores momentos...*

## Resumen

La presente investigación evaluó las implicancias del cambio climático en la representatividad del hábitat de *Megaptera novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane (PMFC), integrando herramientas de modelación de distribución de especies, análisis de representatividad espacial, evaluación institucional y estimación económica de las medidas de gestión. Este enfoque permitió comprender de forma integral la efectividad de la conservación marina frente a escenarios ambientales cambiantes y generar insumos técnicos para la toma de decisiones.

Metodológicamente, se aplicó el modelo MaxEnt con variables ambientales seleccionadas según su relevancia ecológica y baja colinealidad, incluyendo temperatura, salinidad, pH, clorofila y dirección de corrientes. Las proyecciones bajo escenarios climáticos SSP1-1.9, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 permitieron estimar la distribución potencial actual y futura de la especie, identificando las áreas de mayor idoneidad dentro y fuera del parque. Los resultados muestran estabilidad relativa del hábitat bajo bajas emisiones, una ligera contracción bajo escenarios intermedios y una pérdida progresiva de idoneidad en escenarios de altas emisiones, lo que resalta la necesidad de mantener la conectividad ecológica entre el Parque Marino Francisco Coloane y el Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos Francisco Coloane.

La evaluación del plan de manejo vigente evidenció avances en la protección de la especie, pero también limitaciones en la incorporación del cambio climático, el establecimiento de metas medibles y la aplicación de un monitoreo sistemático. A partir de ello, se propusieron cinco líneas de gestión: ajuste de la zonificación interna, implementación de corredores ecológicos, monitoreo climático y ecológico, fortalecimiento institucional y educación ambiental. Estas estrategias, alineadas con los Estándares Abiertos para la Conservación v4.0, constituyen un marco operativo para fortalecer la resiliencia del sistema marino frente al cambio climático.

Finalmente, la estimación de costos determinada asciende al monto de \$389.530.000 CLP, esta permitió priorizar propuestas según su impacto ecológico y factibilidad, identificando requerimientos financieros, logísticos y humanos para la ejecución de cada propuesta. En conjunto, los resultados confirman que el Parque Marino Francisco Coloane cumple actualmente una función clave en la conservación de *M. novaeangliae*, pero su efectividad futura dependerá de la integración de la ciencia en la gestión, el fortalecimiento institucional y la implementación sostenida de medidas de adaptación y monitoreo.

## **Listado de acrónimos**

**AMP: Área Marina Protegida**

**AMCP-MU: Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos**

**AMCP-MU FC: Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos Francisco Coloane**

**AMOC: Atlantic Meridional Oceanic Circulation**

**CDB: Convenio sobre la Diversidad Biológica**

**CMP: Conservation Measures Partnership**

**CONADI: Corporación Nacional de Desarrollo Indígena**

**ECMPO: Espacios Costeros Marinos Pueblos Originarios**

**GBIF: Global Biodiversity Information Facility**

**IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change**

**MMA: Ministerio del Medio Ambiente**

**MN: *Megaptera novaeangliae***

**NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration**

**OBIS: Ocean Biogeographic Information System**

**PMFC: Plan de Manejo Vigente del Parque Francisco Coloane**

**SBAP: Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas**

**SDM: Species Distribution Modelling**

**SIMBIO: Sistema de Información y Monitoreo de Biodiversidad**

**SMART: Specific – Measurable – Achievable – Relevant – Time-bound**

**SSP: Shared Socioeconomic Pathways**

**TSM: Temperatura Superficial del Mar**

**UICN: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza**

**WWF: World Wide Fund for Nature**

# INDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Efectos del cambio climático .....	1
1.2	Ecosistemas Marinos en Chile .....	2
1.3	Instrumentos para la Conservación y Protección de la Biodiversidad .....	3
1.3.1	Estrategia Nacional de Biodiversidad .....	4
1.3.2	Gestión de Ecosistemas Marinos.....	4
1.3.3	Servicio de biodiversidad y áreas protegidas (SBAP) .....	7
1.4	Parque Marino Francisco Coloane.....	8
1.4.1	Características oceanográficas y ecológicas del sur de Chile .....	9
1.4.2	Área de estudio .....	9
1.4.3	Plan de Manejo Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos Francisco Coloane 10	
1.5	Aplicación de Estándares Internacionales a la Planificación de Áreas Marinas Protegidas en Chile13	
1.6	Enfoques transversales para la conservación marina .....	15
1.6.1	Planificación adaptativa en áreas marinas chilenas.....	15
1.6.2	Gobernanza participativa en conservación marina.....	15
1.6.3	Abordaje integral del cambio climático.....	16
1.7	Cetáceos como objeto de conservación .....	16
1.7.1	<i>Megaptera novaengliae</i> .....	17
1.8	Modelación de distribución de especies como herramienta para la planificación de la conservación .....	20
1.9	Propuestas de Gestión para Áreas Marinas Protegidas .....	22
2	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	23
3	OBJETIVOS .....	24
3.1	OBJETIVO GENERAL .....	24
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
4	METODOLOGÍA.....	25
4.1	Evaluación del plan de gestión del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de <i>Megaptera novaeangliae</i> .....	25

4.1.1	Primera Etapa, Caracterización del Plan de Gestión .....	25
4.1.2	Segunda Etapa, Análisis comparativo con los Estándares Abiertos .....	27
4.1.3	Tercera Etapa, Evaluación de alcances y limitaciones.....	29
4.2	Modelación de distribución de especies .....	29
4.2.1	Registros de ocurrencia de la especie (fuentes, criterios de selección).....	29
4.2.2	Variables ambientales (actuales y futuras, escenarios SSP del IPCC).....	30
4.2.3	Preprocesamiento de datos .....	31
4.2.4	Recorte y estandarización de variables ambientales .....	32
4.2.5	Modelo exploratorio para la selección de variables ambientales.....	32
4.2.6	Algoritmo Maxent .....	33
4.2.7	Análisis de representatividad .....	34
4.2.8	Proyección de Escenarios .....	36
4.2.9	Comparativo entre presente y futuro. ....	36
4.2.10	Interpretación para la gestión.....	37
4.3	Propuestas de Gestión Adaptativas: Estándares Abiertos de conservación Versión 4.0	37
4.4	Estimación de costos de implementación de propuestas de gestión. ....	38
5	RESULTADOS .....	40
5.1	Evaluación del plan de gestión del Parque Marino Francisco Coloane en relación con <i>Megaptera novaeangliae</i> .....	40
5.1.1	Caracterización del Plan de Manejo .....	40
5.1.2	Revisión comparativa respecto a los Estándares Abiertos para la Conservación (v4.0)	43
5.1.3	Evaluación crítica: alcances y limitaciones .....	45
5.2	Modelación de distribución de especies .....	46
5.2.1	Registro de ocurrencias .....	46
5.2.2	Preprocesamiento y correspondencia de variables ambientales .....	48
5.2.3	Recorte y estandarización de variables ambientales .....	49
5.2.4	Modelo exploratorio para la selección de variables ambientales.....	50
5.2.5	Pruebas modelo exploratorio y evaluación del modelo.....	53
5.2.6	Análisis de representatividad .....	59
5.2.7	Proyección de escenarios .....	66
5.3	Propuestas de gestión adaptativas.....	76

5.3.1	Eje 1. Revisión y ajuste de la zonificación interna del PMFC.....	78
5.3.2	Eje 2. Implementación de corredores ecológicos marinos .....	79
5.3.3	Eje 3. Monitoreo climático y ecológico adaptativo .....	80
5.3.4	Eje 4. Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa .....	81
5.3.5	Eje 5. Educación ambiental y participación comunitaria .....	82
5.4	Estimación de costos para la gestión.....	83
5.4.1	Eje 1: Estimación de costos para estudio de cambio de zonificación .....	83
5.4.2	Eje 2: Estimación de costos para la Implementación de corredores ecológicos marinos	84
5.4.3	Eje 3: Estimación de costos para el Monitoreo climático y ecológico adaptativo .....	85
5.4.4	Eje 4: Estimación de costos para el Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa.....	86
5.4.5	Eje 5: Estimación de costos para la propuesta de Educación ambiental y divulgación científica .....	87
5.4.6	Costo Total de propuestas de gestión .....	88
5.4.7	Horizonte temporal, tipo de costos e instrumentos de financiamiento .....	88
6	DISCUSIÓN.....	93
7	CONCLUSIÓN.....	99
8	BIBLIOGRAFÍA.....	101
9	ANEXOS .....	107
9.1	Anexo 1: Aplicación de “Matriz de caracterización del Plan de Manejo del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de <i>Megaptera novaeangliae</i> ” (Elaboración Propia).....	107
9.2	Anexo 2: Aplicación de Matriz de evaluación del plan de manejo del PMFC según los Estándares Abiertos para la Conservación (Elaboración Propia). .....	108
9.3	Anexo 3: Script Preprocesamiento Registros de ocurrencia lenguaje R.....	110
9.4	Anexo 4: Script Preprocesamiento de variables ambientales en Rstudio Lenguaje R. .	113
9.5	Anexo 5: Script para cálculo de colinealidad Spearman .....	117
9.6	Anexo 6: Script para procesar en PyQgis Lenguaje para Python .....	119
9.7	Anexo 7: Script Ploteo de mapas proyección de escenarios Rstudio lenguaje R .....	122
9.8	Anexo 8: Tabla Representatividad Calculo Representatividad .....	124
9.9	Anexo 9: Script calculo Representatividad de hábitat Rstudio lenguaje R.....	125
9.10	Anexo 10: Mapas binarios Calculo de Áreas.....	135

9.10.1	Anexo 10.1: Mapa binario histórico.....	135
9.10.2	Anexo 10.2: Mapa Binario Escenario Ssp1 1.9 2020-2030.....	136
9.10.3	Anexo 10.3: Mapa Binario Escenario Ssp1 1.9 2030-2040.....	137
9.11	Anexo 10.4: Mapa Binario Escenario Ssp1 1.9 2040-2050 .....	138
9.11.1	Anexo 10.5: Mapa Binario Escenario Ssp2 4.5 2020-2030.....	139
9.11.2	Anexo 10.6: Mapa Binario Escenario Ssp2 4.5 2030-2040.....	140
9.11.3	Anexo 10.7: Mapa Binario Escenario Ssp2 4.5 2040-2050.....	141
9.11.4	Anexo 10.6: Mapa Binario Escenario Ssp5 8.5 2020-2030.....	142
9.11.5	Anexo 10.7: Mapa Binario Escenario Ssp5 8.5 2030-2040.....	143
9.11.6	Anexo 10.8: Mapa Binario Escenario Ssp5 8.5 2040-2050.....	144
9.12	Anexo 11: Script Ploteo de mapas Binarios Rstudio Lenguaje R .....	145
9.13	Anexo 12: Matriz Licitaciones de referencia utilizadas para la estimación de costos estudio cambio de zonificación.....	148
9.14	Anexo 13: Matriz Licitaciones de referencia para la estimación de costos del Eje 2 – Implementación de corredores ecológicos marinos.....	149
9.15	Anexo 14: Matriz Licitaciones de referencia para la estimación de costos del Eje 3 – Monitoreo climático y ecológico adaptativo. ....	150
9.16	Anexo 15: Referencias y valores utilizados para la estimación de costos – Eje 4 Gobernanza colaborativa. ....	151
9.17	Anexo 16: Referencias para estimación de costos – Eje 5: Educación ambiental y divulgación científica.....	152



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1 :</b> Mapa Parque Marino Francisco Coloane (Elaboración Propia) .....	10
<b>Figura 1.2:</b> Cartografía AMCP-MC Francisco Coloane “Celeste” y Parque Marino Francisco Coloane “Verde” (Fuente: Plan de manejo AMCPMU FC) .....	12
<b>Figura 1.3:</b> Ruta migratoria Ballena Jorobada Pacífico Sur (Protecting Blue Corridors — Explore, 2025.) .....	18
<b>Figura 1.4:</b> Ballena Jorobada (Fisheries, 2024 ) .....	19
<b>Figura 1.5:</b> Diagrama Modelo de Distribución de especie (Elaboración Propia) .....	21
<b>Figura 5.1.</b> Ocurrencias Megaptera novaengliae .....	47
<b>Figura 5.2.</b> Matriz de spearman cálculo de colinealidad. ....	50
<b>Figura 5.3.</b> Promedio de prueba de sensibilidad. ....	53
<b>Figura 5.4.</b> Gráfico curvo de Omisión y comisión modelo exploratorio. ....	54
<b>Figura 5.5.</b> Prueba Jackknife de AUC M. Novaengliae. ....	56
<b>Figura 5.6.</b> Prueba Jackknife de ganancia M. novaengliae. ....	56
<b>Figura 5.7.</b> Prueba Jackknife de ganancia de entrenamiento M. Novaengliae.....	57
<b>Figura 5.8.</b> Mapa idoneidad media Histórico modelo exploratorio M. Novaengliae. ....	58
<b>Figura 5.9.</b> Mapa Idoneidad Futuro escenario Ssp 1 1.9 2020-2030. ....	58
<b>Figura 5.10.</b> Mapa de Idoneidad actual M. Novaengliae 2010-2020.....	67
<b>Figura 5.11.</b> Mapa Idoneidad distribución futura de M. novaeangliae bajo el escenario SSP1-1.9 (2020-2030).....	69
<b>Figura 5.12.</b> Mapa Idoneidad distribución futura de M. novaeangliae bajo el escenario SSP1-1.9 (2030-2040).....	69
<b>Figura 5.13.</b> Mapa Idoneidad distribución futura de M. novaeangliae bajo el escenario SSP1-1.9 (2040-2050).....	70
<b>Figura 5.14.</b> Mapa Idoneidad distribución futura de M. novaeangliae bajo el escenario SSP2-4.5 (2020-2030).....	71
<b>Figura 5.15.</b> Mapa Idoneidad distribución futura de M. novaeangliae bajo el escenario SSP2-4.5 (2030-2040).....	72
<b>Figura 5.16.</b> Mapa Idoneidad distribución futura de M. novaeangliae bajo el escenario SSP2-4.5 (2040-2050).....	72
<b>Figura 5.17.</b> Mapa Idoneidad distribución futura de M. novaeangliae bajo el escenario SSP5-8.5 (2020-2030).....	74
<b>Figura 5.18.</b> Mapa Idoneidad distribución futura de M. novaeangliae bajo el escenario SSP5-8.5 (2030-2040).....	74
<b>Figura 5.19.</b> Mapa Idoneidad distribución futura de M. novaeangliae bajo el escenario SSP5-8.5 (2040-2050).....	75
<b>Figura 5.20.</b> Diagrama relación de amenazas, propuestas de gestión, actividades propuestas y resultados esperados .....	76

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.4.1.</b> Matriz de caracterización del Plan de Manejo del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de <i>Megaptera novaeangliae</i> .....	26
<b>Tabla 4.4.2.</b> Matriz de evaluación del plan de manejo del PMFC según los Estándares Abiertos para la Conservación. ....	28
<b>Tabla 4.4.3.</b> Matriz Representación espacial del hábitat adecuado de <i>Megaptera novaeangliae</i> dentro del Parque Marino Francisco Coloane bajo escenarios actuales y futuros 2025.....	36
<b>Tabla 5.1.</b> Caracterización del Plan de Manejo del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de <i>M.novaeangliae</i> . ....	42
<b>Tabla 5.2.</b> Matriz comparativa del plan de manejo del PMFC según los estándares abiertos de conservación V4.0. ....	44
<b>Tabla 5.3.</b> Resumen de datos de Ocurrencia. ....	46
<b>Tabla 5.4.</b> Correspondencia de variables ambientales utilizadas en el modelado.....	48
<b>Tabla 5.5.</b> Identificación general de colinealidad entre variables ambientales .....	51
<b>Tabla 5.6.</b> Variables altamente correlacionadas.....	51
<b>Tabla 5.7.</b> Selección final variables ambientales. ....	52
<b>Tabla 5.8.</b> Porcentaje de contribución de las variables ambientales al modelo. ....	55
<b>Tabla 5.9.</b> Matriz resumen espacial del hábitat adecuado de <i>Megaptera novaeangliae</i> dentro del Parque Marino Francisco Coloane bajo escenarios actuales y futuros 2025.....	64
<b>Tabla 5.10.</b> Matriz técnica de propuestas de gestión adaptativa para la conservación de <i>Megaptera novaeangliae</i> en el Parque Marino Francisco Coloane, basada en los Estándares Abiertos para la Conservación (CMP v4.0). ....	77
<b>Tabla 5.11.</b> Matriz técnica de la propuesta de gestión - Eje 1: Revisión y ajuste de la zonificación interna.....	79
<b>Tabla 5.12.</b> Matriz técnica de la propuesta de gestión - Eje 2: Implementación de corredores ecológicos marinos.....	80
<b>Tabla 5.13.</b> Matriz técnica de la propuesta de gestión adaptativa - Eje 3: Monitoreo climático y ecológico adaptativo. ....	81
<b>Tabla 5.14.</b> Matriz técnica de la propuesta de gestión - Eje 4: Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa.....	82
<b>Tabla 5.15.</b> Matriz técnica de la propuesta de gestión adaptativa - Eje 5: Educación ambiental y divulgación científica.....	83
<b>Tabla 5.16.</b> Matriz Estimación de costos del Eje 1 - Revisión y ajuste de zonificación interna del PMFC .....	84
<b>Tabla 5.17.</b> Estimación de costos del Eje 2 - Implementación de corredores ecológicos marinos ..	84
<b>Tabla 5.18.</b> Estimación de costos del Eje 3 - Monitoreo climático y ecológico adaptativo .....	85
<b>Tabla 5.19.</b> Estimación de costos del Eje 4 - Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa.....	86
<b>Tabla 5.20.</b> Estimación de costos del Eje 5 - Educación ambiental y divulgación científica.....	87

**Tabla 5.21.** Matriz resumen de costos estimados por propuesta de gestión ..... 88  
**Tabla 5.22.** Instrumentos de financiamiento considerados y montos que manejan. .... 91

# 1 INTRODUCCIÓN

La actual crisis climática plantea serios desafíos para la biodiversidad marina y exige la adaptación de las estrategias de conservación a nivel global. En particular, las especies migratorias emblemáticas, como la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*), pueden reflejar los cambios en los ecosistemas oceánicos debido a su sensibilidad a las variaciones ambientales. La presente investigación se centra en evaluar cómo las proyecciones de cambio climático podrían influir en la distribución del hábitat de la ballena jorobada dentro de un área marina protegida de Chile, el Parque Marino Francisco Coloane, y qué implicancias tendrían estos cambios para la representatividad ecológica y la planificación de la conservación. En los siguientes apartados se discuten los fundamentos teóricos relevantes, incluyendo la relación entre el cambio climático y la biodiversidad marina, la ecología de la ballena jorobada, los efectos del cambio global sobre los cetáceos, el uso de modelos de distribución de especies, el concepto de representatividad ecológica en áreas protegidas y el contexto de las políticas de conservación marina en Chile.

## 1.1 Efectos del cambio climático

El cambio climático representa una de las principales amenazas globales para la biodiversidad marina, alterando variables ambientales fundamentales como la temperatura superficial del mar, la acidificación oceánica, la productividad primaria y los patrones de circulación oceánica (IPCC, 2021). Estas transformaciones tienen consecuencias directas sobre la distribución, abundancia y comportamiento de múltiples especies marinas, incluyendo aquellas de importancia ecológica y conservacionista como la *Megaptera novaeangliae*.

Entre los efectos más significativos se encuentra el aumento sostenido de la temperatura superficial del mar (TSM), el cual ha provocado desplazamientos latitudinales de numerosas especies a un ritmo aproximado de 60 km por década (Richardson y Whittaker, 2010). Este fenómeno está acompañado por eventos extremos como olas de calor marinas, que alteran drásticamente los ecosistemas pelágicos y costeros. Las proyecciones climáticas del IPCC (2021) indican que, bajo escenarios de altas emisiones (SSP5-8.5), la TSM podría incrementarse hasta en 4,4 °C hacia fines del siglo XXI, condicionando la viabilidad de muchos hábitats marinos.

En paralelo, la acidificación oceánica provocada por la absorción de CO<sub>2</sub> atmosférico ha reducido el pH superficial en 0,1 unidades desde la era preindustrial, y se proyecta que esta tendencia continúe. Este proceso compromete la calcificación de organismos clave como moluscos, equinodermos y fitoplancton calcificado, afectando indirectamente a las especies que dependen de ellos dentro de la red trófica (Assis et al., 2018; IPCC, 2021).

Otro aspecto crítico es la alteración en la productividad primaria, derivada de la mayor estratificación de la columna de agua que limita el afloramiento de nutrientes. Esta situación disminuye la disponibilidad de fitoplancton y, en consecuencia, la biomasa de niveles tróficos superiores. Estudios recientes estiman una reducción global de hasta un 17 % en la biomasa animal marina bajo escenarios de altas emisiones (Lotze et al., 2019), lo que representa una amenaza directa para especies depredadoras como los cetáceos.

Asimismo, la modificación de la circulación oceánica, incluyendo la posible desaceleración de la Circulación de Vuelco Meridional del Atlántico (AMOC) y cambios en los sistemas de surgencia costera como la Corriente de Humboldt, incide en la distribución de nutrientes, la conectividad poblacional y la estructura de los ecosistemas (Plischoff y Fuentes-Castillo, 2011).

A nivel nacional, Chile ha sido testigo del aumento en la frecuencia de eventos como mareas rojas y alteraciones en la distribución de especies de importancia pesquera, lo cual refleja el impacto del cambio climático sobre la biodiversidad marina local (Ramírez y Gelcich, 2021). Estos cambios afectan directamente a especies emblemáticas y de alto valor ecológico, como la ballena jorobada, cuyo principal sitio de alimentación en aguas interiores chilenas se localiza en el Parque Marino Francisco Coloane (Gibbons et al., 2003; Capella et al., 2020).

Este parque, ubicado en la Región de Magallanes, representa un caso ilustrativo de los desafíos del cambio climático a escala local. A pesar de ser un área protegida, el aumento de la temperatura del mar, los cambios en la disponibilidad de presas y las alteraciones en la productividad podrían afectar la permanencia estacional y el éxito reproductivo de la *Megaptera novaeangliae* (Kennedy et al., 2014; NOAA Fisheries, 2023). Por tanto, el cambio climático se posiciona como un factor transversal que debe integrarse en las estrategias de conservación y gestión adaptativa de los ecosistemas marinos, particularmente en regiones de alta sensibilidad como el extremo austral de Chile.

## 1.2 Ecosistemas Marinos en Chile

La Patagonia chilena, que abarca desde el Golfo de Penas hasta el Cabo de Hornos, constituye uno de los ecosistemas marinos más prístinos y biodiversos del planeta. Esta región se caracteriza por una compleja red de fiordos, canales, archipiélagos y estuarios que generan una alta heterogeneidad ambiental, dando lugar a gradientes oceánicos y climáticos únicos en el hemisferio sur. Estas condiciones ecológicas favorecen la coexistencia de una rica variedad de especies, muchas de las cuales son endémicas o se encuentran en estado de conservación vulnerable.

Entre los grupos faunísticos más representativos se encuentran los cetáceos, como *Megaptera novaeangliae* (ballena jorobada), *Eubalaena australis* (ballena franca austral), y *Orcinus orca* (orca), además de importantes poblaciones de pinnípedos, como el lobo marino común (*Otaria flavescens*) y el elefante marino del sur (*Mirounga leonina*). Las aguas frías y ricas en nutrientes también

sostienen colonias reproductivas de aves marinas, como el albatros de ceja negra (*Thalassarche melanophris*), el cormorán imperial (*Leucocarbo atriceps*) y el pingüino de Magallanes (*Spheniscus magellanicus*), especies que dependen estrechamente de la productividad primaria que se genera en esta zona.

Los hábitats marinos de la Patagonia cumplen funciones ecológicas esenciales: los bosques de macroalgas, como *Macrocystis pyrifera*, forman estructuras tridimensionales que albergan peces, invertebrados y moluscos, mientras que los estuarios y fondos blandos constituyen zonas de reproducción y crianza para numerosas especies, como la merluza austral y los crustáceos bentónicos. Esta complejidad ecológica convierte a la Patagonia en un refugio de biodiversidad y en un corredor clave para especies migratorias.

A pesar de su relativo aislamiento, estos ecosistemas enfrentan amenazas crecientes. El cambio climático está alterando la temperatura superficial del mar, los regímenes de circulación oceánica y la disponibilidad de alimento para especies superiores, lo que puede provocar desplazamientos en sus áreas de distribución y afectar su éxito reproductivo (IPCC, 2021). Asimismo, la expansión de la salmonicultura, el tráfico marítimo, la contaminación por plásticos y el escaso monitoreo ecológico representan desafíos significativos para su conservación (Ramírez y Gelcich, 2021; Quiroga et al., 2020).

Frente a este escenario, Chile ha avanzado en la creación de áreas marinas protegidas en la región austral, destacando el Parque Marino Francisco Coloane y otras AMCP-MU en canales subantárticos. Sin embargo, estudios recientes indican que la representatividad ecológica de estas áreas aún es limitada, y que existe una necesidad urgente de fortalecer la planificación sistemática de la conservación, integrando criterios ecológicos, sociales y proyecciones futuras del cambio climático (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

En consecuencia, la Patagonia chilena emerge como una prioridad para la conservación marina global, no solo por su biodiversidad intrínseca, sino por su rol como laboratorio natural para estudiar los efectos del cambio ambiental en regiones de alta latitud.

### **1.3 Instrumentos para la Conservación y Protección de la Biodiversidad**

Chile ha implementado una serie de instrumentos legales, administrativos y de gestión para conservar su biodiversidad, tanto terrestre como marina. A continuación, se revisan los principales instrumentos orientados a la protección de la biodiversidad marina, con énfasis en sus objetivos, bases legales y estado de avance.

### **1.3.1 Estrategia Nacional de Biodiversidad**

La Estrategia Nacional de Biodiversidad 2017–2030 (ENB) constituye el marco rector para coordinar las políticas de conservación en Chile. Sus objetivos buscan integrar la protección de la biodiversidad en todos los sectores del desarrollo, mediante la conservación efectiva, restauración de ecosistemas, uso sustentable de recursos, fortalecimiento institucional y participación ciudadana (Ministerio del Medio, 2018). Chile ha iniciado un proceso de actualización de esta estrategia para alinearse con el Marco Global de Biodiversidad Kunming-Montreal al 2030 (MMA y PNUD, 2023).

### **1.3.2 Gestión de Ecosistemas Marinos**

La gestión de los ecosistemas marinos en Chile ha evolucionado hacia un enfoque integral que reconoce la necesidad de conservar la biodiversidad, asegurar los servicios ecosistémicos y compatibilizar la conservación con el desarrollo sustentable. Dada la extensión de la Zona Económica Exclusiva del país y su elevada productividad biológica, el océano chileno constituye un territorio estratégico tanto ecológica como socialmente.

El marco institucional y normativo vigente ha dado lugar a diversas categorías de protección marina, como Parques Marinos, Reservas Marinas, Áreas Marinas Costeras Protegidas de Múltiples Usos (AMCP-MU), Santuarios de la Naturaleza y Espacios Costeros Marinos para Pueblos Originarios (ECMPO). Cada una de estas figuras responde a diferentes objetivos de conservación y niveles de uso permitido, lo que permite implementar estrategias de manejo diferenciadas según las características ecológicas, culturales y socioeconómicas del territorio.

Estas áreas protegidas no solo permiten salvaguardar especies y hábitats críticos, sino también constituyen herramientas clave para mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la resiliencia ecológica. En este contexto, instrumentos recientes como el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP), creado por la Ley N.º 21.600, buscan fortalecer la coordinación entre instituciones y optimizar la planificación y gestión de los espacios marinos protegidos.

Así, la gestión de los ecosistemas marinos en Chile se encamina hacia un modelo más holístico y adaptativo, que reconoce tanto la riqueza natural como los conocimientos locales y tradicionales, alineándose con estándares internacionales de conservación y sostenibilidad.

### **1.3.2.1 Áreas Marinas Protegidas**

Es un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, mediante medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados.

Por servicios ecosistémicos se entiende beneficios que los seres humanos reciben de las funciones ecológicas de los ecosistemas, aportando bienestar al ser humano, por ejemplo, alimentos, recreación y belleza escénica. (*Parques Y Reservas Marinas , Sernapesca, s.f.*)

Las Áreas Marinas Protegidas en Chile comprenden varias categorías legales (Parques Marinos, Reservas Marinas, Santuarios de la Naturaleza y AMCP-MU), creadas para proteger hábitats, especies y procesos ecológicos claves. A 2023, más del 42% de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) chilena estaba protegida legalmente, siendo uno de los porcentajes más altos del mundo (Ramírez y Gelcich, 2021).

### **1.3.2.2 Parque Marino**

Es un área destinada a preservar unidades ecológicas de alto interés para la ciencia y como patrimonio natural, cautelando la mantención y diversidad de las especies hidrobiológicas y su hábitat. Todo Parque contará con un Plan General de Administración (PGA). En ellos no podrá efectuarse ninguna actividad, salvo aquellas que se autoricen con propósitos de observación e investigación. Están bajo la tuición de SERNAPESCA. (*Parques Y Reservas Marinas, Sernapesca, s.f.*)

### **1.3.2.3 Áreas marinas costeras protegidas de múltiples usos (AMCP-MU)**

Las AMCP-MU son una figura legal chilena que busca conciliar la conservación de la biodiversidad con actividades humanas sustentables. Estas áreas permiten usos como pesca artesanal, turismo y recolección, en base a planes de manejo y gobernanza compartida (Ministerio del Medio Ambiente, 2022).

Área destinada a conservar la biodiversidad, proteger especies marinas en peligro, reducir conflictos de uso, generar investigación y educación; y actividades comerciales y recreativas de modo sustentable. Conserva el patrimonio histórico-cultural marino y costero de comunidades locales para el desarrollo sostenible del turismo, pesca y recreación. En ellas sólo podrán realizarse

actividades que no pongan en riesgo sus objetos de conservación. Están a cargo del Ministerio del Medio Ambiente. (*Parques Y Reservas Marinas, Sernapesca, s.f.*)

#### **1.3.2.4 Áreas de Manejo de Recursos Bentónicos (AMERB'S)**

Las Áreas de Manejo de Recursos Bentónicos (AMERB's) representan un instrumento de gestión pesquera creado en Chile a partir del Decreto Supremo N.º 355 de 1995, en el marco de la Ley General de Pesca y Acuicultura. Estas áreas tienen como objetivo principal asegurar la sostenibilidad de la extracción de recursos bentónicos –organismos que habitan el fondo marino como locos (*Concholepas concholepas*), erizos y algas– mediante el manejo directo por parte de organizaciones de pescadores artesanales.

En este sistema de co-gestión, las AMERB son solicitadas por sindicatos u organizaciones de base que presentan un plan de manejo técnico-ecológico, elaborado por asesores científicos acreditados, el cual es evaluado y aprobado por la Subsecretaría de Pesca y SERNAPESCA. De este modo, se busca combinar objetivos de conservación con el aprovechamiento sustentable, fortaleciendo el rol de las comunidades locales en la administración del recurso y generando incentivos para su conservación a largo plazo (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2022).

Este modelo ha sido ampliamente replicado a lo largo del país, y aunque enfrenta desafíos vinculados al monitoreo y al cumplimiento de normas, representa un ejemplo destacado de gobernanza pesquera territorial y participación comunitaria en la conservación marina.

#### **1.3.2.5 Santuario de la Naturaleza**

Los Santuarios de la Naturaleza son una categoría protegida bajo la Ley de Monumentos Nacionales (N.º 17.288), y pueden incluir ambientes marinos y costeros con alto valor ecológico. Ejemplos destacados son el Islote Cachagua o el Santuario Humedal de Tongoy (Consejo de Monumentos Nacionales [CMN], 2023).

Sitios con posibilidades especiales para estudios e investigaciones geológicas, paleontológicas, zoológicas, botánicas o de ecología, o con formaciones naturales de interés para la ciencia o el Estado. En ellos sólo se podrán realizar actividades de observación, investigación y educación, debidamente autorizadas. Están bajo la tuición de Monumentos Nacionales, quien las gestiona con el Ministerio del Medio Ambiente. (*Parques Y Reservas Marinas, Sernapesca, s.f.*)

### **1.3.2.6 Espacios marinos costeros de pueblos originarios (ECMPO)**

Los ECMPO, establecidos por la Ley N.º 20.249 (Ley Lafkenche), reconocen los derechos consuetudinarios de los pueblos originarios sobre espacios marinos costeros. Este instrumento fortalece la conservación biocultural y la gobernanza local en comunidades indígenas (Ogalde et al., 2021). Son espacios marinos delimitados, cuya administración es entregada a comunidades indígenas o asociaciones de ellas que han ejercido el uso de dicho espacio constatado por CONADI. (*Espacios Costeros Marinos Pueblos Originarios (ECMPO) - SUBPESCA. Subsecretaría De Pesca Y Acuicultura, s.f.*)

### **1.3.3 Servicio de biodiversidad y áreas protegidas (SBAP)**

El Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP) constituye uno de los avances más relevantes en la institucionalidad ambiental chilena. Tras más de una década de discusión legislativa, la Ley N° 21.600 que lo establece fue promulgada en 2023, consolidando un organismo público especializado en la conservación de la biodiversidad y la administración de las áreas protegidas terrestres y marinas del país (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN], 2023). La creación del SBAP responde a la necesidad de superar la fragmentación institucional existente, en la cual las funciones de protección de la biodiversidad se encontraban dispersas en múltiples organismos, dificultando la coherencia en la gestión y reduciendo su eficacia.

Dentro de sus atribuciones, el SBAP se configura como la entidad responsable de implementar políticas, planes y programas de conservación, además de ejercer la administración directa del Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Su ámbito de acción incorpora tanto espacios terrestres como marinos, lo que resulta particularmente significativo para la gestión de Áreas Marinas Protegidas (AMPs) como el Parque Marino Francisco Coloane. En este marco, el SBAP se proyecta como un actor central en la integración de lineamientos técnicos y científicos en los planes de manejo, asegurando que la administración de las áreas protegidas incorpore enfoques adaptativos capaces de responder a las amenazas actuales y a las proyecciones de cambio climático (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], 2017).

Otro aspecto relevante corresponde a su rol en la generación, sistematización y difusión de información científica sobre biodiversidad, lo que permite fortalecer la toma de decisiones bajo criterios basados en evidencia. Esta función es crítica en el ámbito marino, donde las transformaciones vinculadas al cambio climático requieren de un monitoreo constante y de herramientas de análisis espacial. Para casos específicos como el Parque Marino Francisco Coloane, donde la ballena jorobada constituye un objeto de conservación prioritario, el SBAP ofrece un marco institucional capaz de incorporar metodologías de vanguardia, tales como los Modelos de

Distribución de Especies (SDM), que permiten proyectar escenarios futuros de idoneidad de hábitat y anticipar estrategias de conservación (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011).

La creación del SBAP se inscribe, además, en un proceso de modernización de la política ambiental nacional, alineado con compromisos internacionales asumidos por Chile, tales como el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB, 1992) y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2015). Desde esta perspectiva, el SBAP no solo cumple funciones administrativas, sino que adquiere un carácter estratégico al promover la articulación intersectorial y la inclusión de comunidades locales en la conservación. De esta manera, se constituye en una herramienta institucional destinada a fortalecer la gestión integrada y adaptativa de las áreas protegidas, condición indispensable para garantizar la conservación de especies altamente migratorias como *Megaptera novaeangliae*, cuya persistencia depende de ecosistemas marinos resilientes y adecuadamente gestionados.

#### **1.4 Parque Marino Francisco Coloane**

El Parque Marino Francisco Coloane, creado oficialmente en 2003 como la primera AMCP-MU de Chile dedicada a cetáceos, se localiza en el estrecho de Magallanes, al suroeste de la Isla Riesco. Con una superficie aproximada de 653 km<sup>2</sup>, combina hábitats marinos profundos, costas rocosas y sistemas de fiordos. Su ubicación estratégica y heterogeneidad ambiental lo convierten en un refugio clave para la biodiversidad marina subantártica.

El Parque Marino Francisco Coloane, ubicado en la Región de Magallanes, es un área marina protegida de alta importancia ecológica. Se reconoce como uno de los principales sitios de alimentación estival de la ballena jorobada en el hemisferio sur. Esta área presenta una combinación de fiordos, canales y aguas productivas que sustentan una rica biodiversidad, incluyendo otras especies de cetáceos, aves marinas y peces. Su relevancia biológica ha motivado su protección como Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos (AMCP-MU), y su gestión constituye un ejemplo clave de conservación marina en Chile.

El Parque Marino Francisco Coloane (PMFC) constituye uno de los principales sitios de alimentación de la población del Pacífico Suroriental de *Megaptera novaeangliae*. La fidelidad interanual de la especie ha sido documentada mediante estudios de foto-identificación, monitoreo acústico y seguimiento satelital, los cuales demuestran un uso recurrente de fiordos y canales ricos en kril y pequeños peces pelágicos. Estos atributos ecológicos, junto con su ubicación estratégica en el Estrecho de Magallanes, consolidan al PMFC como un objeto de conservación prioritario dentro de la planificación marina de Chile. En escenarios futuros de cambio climático, evaluar la permanencia de este hábitat crítico se vuelve indispensable para la continuidad de las funciones ecológicas que sustentan a la especie.

### **1.4.1 Características oceanográficas y ecológicas del sur de Chile**

El sur de Chile, y particularmente la región del Estrecho de Magallanes, presenta una oceanografía única caracterizada por bajas temperaturas, alta productividad primaria y una compleja red de fiordos y canales que generan condiciones heterogéneas y favorables para el desarrollo de ecosistemas marinos diversos. Las aguas frías, influenciadas por la Corriente Circumpolar Antártica y por el afloramiento de aguas profundas, transportan nutrientes que estimulan el crecimiento de fitoplancton, base de la cadena trófica marina (Iriarte et al., 2010).

En estas condiciones, se desarrolla una alta biomasa de zooplancton, incluyendo especies de kril (*Euphausia spp.*), esenciales para la alimentación de cetáceos filtradores como la ballena jorobada. La fuerte estacionalidad, el aporte de agua dulce desde glaciares y ríos, y la complejidad batimétrica generan hábitats variados que sostienen una biodiversidad marina singular, incluyendo moluscos bentónicos, peces demersales y aves pelágicas.

Estas condiciones ecológicas han favorecido la presencia de especies adaptadas al clima subantártico y refuerzan el valor del sur de Chile como zona núcleo para la conservación de megafauna marina. No obstante, esta riqueza también es sensible a los cambios ambientales globales, como el calentamiento del mar, la acidificación y la alteración en la disponibilidad de nutrientes, todos fenómenos asociados al cambio climático (IPCC, 2021; Lenz et al., 2016).

### **1.4.2 Área de estudio**

El área de estudio definida en esta investigación corresponde al Parque Marino Francisco Coloane y sus alrededores inmediatos dentro del Estrecho de Magallanes, entre los 52° y 53° de latitud sur (ver figura 1.1). Esta delimitación responde tanto a criterios ecológicos como metodológicos: se trata de una zona donde se ha documentado de forma consistente la presencia estacional de *Megaptera novaeangliae*, y donde se dispone de registros georreferenciados de ocurrencia de la especie, esenciales para el modelado de distribución.

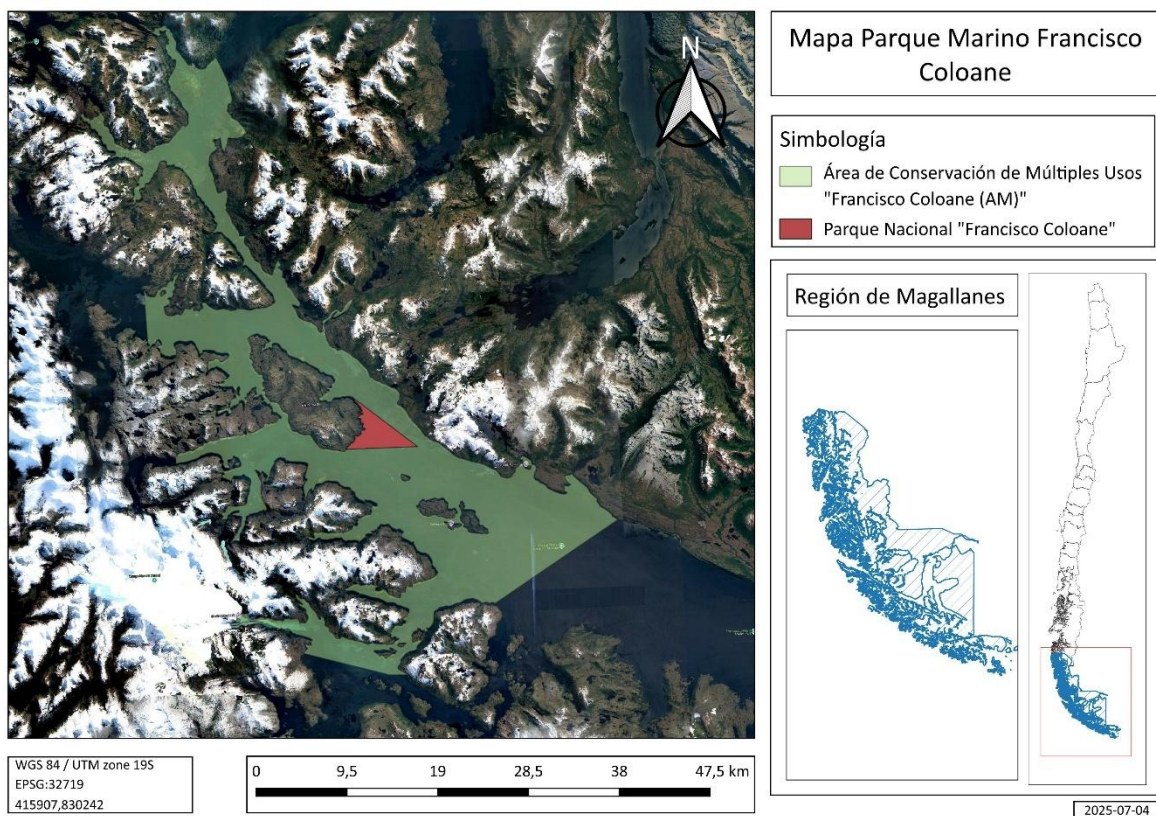


Figura 1.1 : Mapa Parque Marino Francisco Coloane (Elaboración Propia)

### 1.4.3 Plan de Manejo Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos Francisco Coloane

En el contexto de la planificación territorial y conservación marina en Chile, el Plan de Manejo del Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos Francisco Coloane (AMCP-MU FC) constituye un ejemplo paradigmático de instrumento de gestión ambiental con enfoque ecosistémico y participativo. Este tipo de plan se enmarca en las disposiciones de la Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y tiene por finalidad compatibilizar la conservación de la biodiversidad marina con el desarrollo sustentable de las comunidades costeras que dependen directa o indirectamente de los ecosistemas marinos.

El AMCP-MU Francisco Coloane fue declarado oficialmente en 2003 en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, siendo una de las primeras áreas marinas protegidas del país bajo la categoría de “uso múltiple”. Esta figura jurídica busca integrar, en un mismo espacio marino-costero, actividades de conservación con prácticas productivas tradicionales como la pesca artesanal y el turismo de naturaleza, incorporando progresivamente principios de sostenibilidad y

corresponsabilidad territorial. En la **figura 1.2** se puede apreciar el área que abarca el parque dentro del área marina protegida.

El plan de manejo correspondiente establece como objetivo general la protección de la biodiversidad marina y costera mediante una gestión integrada y participativa, que promueva el uso sustentable de los recursos y servicios ecosistémicos, resguardando tanto los valores ecológicos del territorio como el bienestar humano asociado. Este enfoque multidimensional se expresa en la identificación de objetos de conservación prioritarios, entre los que destacan especies como la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) y el delfín austral (*Cephalorhynchus eutropia*), así como hábitats estructurantes como los bosques de macroalgas y las comunidades bentónicas de fondos blandos.

Los objetos de conservación del Plan de Manejo del AMCP-MU Francisco Coloane fueron definidos por el Ministerio de Economía, Subsecretaría de Pesca y SERNAPESCA, con apoyo técnico de equipos científicos y organizaciones locales, en el marco de la Ley N.º 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente y las directrices de la UICN.

La selección se fundamentó en los siguientes criterios:

- Valor ecológico: especies y hábitats con rol funcional clave (p. ej., cetáceos como depredadores tope, bosques de macroalgas como hábitats estructurantes).
- Estado de amenaza y tendencia poblacional: especies en categorías de conservación o en declive poblacional.
- Singularidad y representatividad biogeográfica: elementos característicos del ecosistema subantártico.
- Viabilidad de manejo: factibilidad de implementar acciones de protección y monitoreo.
- Relevancia sociocultural y ecosistémica: importancia para comunidades locales, turismo y servicios ecosistémicos.

En este contexto, *M. novaeangliae* fue incorporada como objeto de conservación prioritario, debido a su rol ecológico, vulnerabilidad a presiones antrópicas (tráfico marítimo, ruido submarino) y dependencia de condiciones oceanográficas sensibles al cambio climático.



**Figura 1.2:** Cartografía AMCP-MC Francisco Coloane “Celeste” y Parque Marino Francisco Coloane “Verde” (Fuente: Plan de manejo AMCPMU FC)

Desde una perspectiva teórica, el plan recoge elementos propios del enfoque ecosistémico de gestión, promovido por organismos internacionales como el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), en cuanto reconoce la complejidad ecológica del sistema marino y la necesidad de integrar el conocimiento local y científico en los procesos de planificación.

Otro aspecto relevante desde el enfoque teórico de la conservación marina es la estructura de zonificación que propone el plan. Esta se basa en la definición de zonas de conservación estricta, zonas de uso sustentable y zonas de amortiguación, permitiendo una gestión espacial diferenciada que responde a los distintos niveles de sensibilidad ecológica y presión antrópica. Esta lógica territorial refleja los principios de ordenamiento espacial marino y la necesidad de compatibilizar distintos intereses sobre un mismo espacio, aspecto fundamental en áreas de múltiples usos.

En cuanto a la dimensión de gobernanza, el plan reconoce la importancia de la participación ciudadana y el involucramiento de diversos actores incluidas comunidades indígenas como el pueblo Kawésqar, pescadores artesanales, operadores turísticos y organismos públicos. No obstante, desde una perspectiva crítica, esta participación carece de mecanismos institucionalizados de cogestión vinculante, lo cual limita su potencial transformador en términos de justicia ambiental y equidad en la toma de decisiones.

En síntesis, el Plan de Manejo del AMCP-MU Francisco Coloane constituye un caso representativo del desarrollo institucional de la conservación marina en Chile, incorporando principios modernos como la planificación espacial, la participación de múltiples actores y el enfoque ecosistémico. No obstante, su implementación efectiva requiere de mejoras en términos de planificación adaptativa, gobernanza participativa y abordaje integral del cambio climático, aspectos que son centrales en los marcos teóricos contemporáneos de la conservación marina.

## **1.5 Aplicación de Estándares Internacionales a la Planificación de Áreas Marinas Protegidas en Chile**

La planificación y gestión de áreas marinas protegidas (AMP) ha evolucionado significativamente durante las últimas décadas, incorporando enfoques más integradores, participativos y adaptativos frente a la complejidad socioecológica de los sistemas marinos. En este contexto, los Estándares Abiertos para la Práctica de la Conservación, desarrollados por la *Conservation Measures Partnership* (CMP), constituyen uno de los marcos metodológicos más ampliamente aceptados a nivel internacional para diseñar, implementar, monitorear y ajustar proyectos de conservación de manera efectiva.

La versión 4.0 de estos estándares (publicada en 2020) plantea una estructura sistemática basada en seis componentes centrales: (1) definición del contexto, (2) planificación de estrategias, (3) implementación de acciones, (4) monitoreo y evaluación, (5) gestión adaptativa, y (6) documentación y aprendizaje. Estos componentes no solo permiten ordenar los procesos de conservación desde una lógica causal, sino que también promueven el uso de herramientas como modelos conceptuales, teorías del cambio y metas SMART (específicas, medibles, alcanzables, relevantes y con plazo definido), las cuales son fundamentales para evaluar la eficacia de las intervenciones.

Desde un enfoque conceptual, los Estándares Abiertos reconocen explícitamente la necesidad de considerar tanto los elementos ecológicos como los sociales en la gestión de la biodiversidad. Para ello, integran dimensiones como el bienestar humano, los servicios ecosistémicos, el conocimiento local y el análisis de actores, en sintonía con marcos como el enfoque ecosistémico impulsado por el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB). Además, abordan el cambio climático como una amenaza transversal que debe ser considerada en todas las fases del proceso, desde la planificación hasta la evaluación, promoviendo el desarrollo de estrategias de adaptación basadas en escenarios y vulnerabilidades específicas.

La utilidad de este marco metodológico se torna especialmente relevante al analizar instrumentos de conservación como los planes de manejo de áreas marinas protegidas en Chile, que frecuentemente adolecen de debilidades estructurales relacionadas con la falta de indicadores, la escasa evaluación de amenazas complejas, la limitada incorporación del cambio climático y la

ausencia de sistemas de monitoreo adaptativo. El caso del Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos Francisco Coloane (AMCP-MU FC) es ilustrativo en este sentido, ya que, si bien representa un avance en términos de planificación participativa y zonificación espacial, evidencia importantes brechas cuando se compara con los criterios establecidos por los Estándares Abiertos.

Incorporar este enfoque en la planificación y evaluación de áreas marinas protegidas en Chile permitiría fortalecer la coherencia interna de los planes de manejo, establecer indicadores de desempeño claros, mejorar la gobernanza a través de la participación vinculante de actores locales y, sobre todo, avanzar hacia una gestión adaptativa basada en evidencia. Así, los Estándares Abiertos no solo operan como una guía metodológica, sino como una herramienta para promover la efectividad y legitimidad de las acciones de conservación en contextos marinos complejos y cambiantes.

Su aplicación permite identificar brechas específicas como la ausencia de metas SMART, la integración del cambio climático como amenaza transversal, y la falta de indicadores de desempeño vinculados a los objetos de conservación. Asimismo, posibilitan establecer una comparación sistemática entre el plan vigente y las mejores prácticas internacionales, orientando la formulación de propuestas de gestión adaptativa.

De este modo, los Estándares Abiertos no solo cumplen un rol conceptual, sino que se convierten en la herramienta de referencia para evaluar la pertinencia, coherencia y suficiencia del Plan de Manejo del PMFC frente a los desafíos actuales y futuros de la conservación marina.

La aplicación de estándares internacionales en la planificación y gestión de la conservación evidencia la necesidad de contar con herramientas conceptuales y metodológicas que trasciendan la normativa vigente y permitan abordar la complejidad de los sistemas socioecológicos. En este sentido, la conservación marina contemporánea no puede limitarse a la delimitación estática de áreas protegidas, sino que requiere enfoques capaces de responder a la variabilidad ambiental, integrar a múltiples actores sociales y anticipar escenarios de cambio global.

Con base en lo anterior, se identifican tres enfoques transversales que constituyen pilares para fortalecer la efectividad de las áreas marinas protegidas en Chile: la planificación adaptativa, que incorpora el aprendizaje continuo y la flexibilidad en la gestión; la gobernanza participativa, que asegura legitimidad social y corresponsabilidad en la toma de decisiones; y el abordaje integral del cambio climático, que reconoce esta amenaza como un factor determinante en la persistencia de los objetos de conservación. Estos enfoques, desarrollados en la siguiente sección, permiten contextualizar y sustentar el marco metodológico de la presente investigación.

## **1.6 Enfoques transversales para la conservación marina**

La conservación de ecosistemas marinos en Chile requiere integrar enfoques que trasciendan las acciones tradicionales de protección y manejo. En el contexto actual de cambio climático, transformación institucional y crecientes demandas socioambientales, la gestión de áreas marinas protegidas debe articular dimensiones ecológicas, sociales y climáticas de manera simultánea. Este marco transversal permite fortalecer la eficacia de las medidas de conservación, asegurar su continuidad en el tiempo y promover una gobernanza más inclusiva y adaptativa.

En esta sección se presentan tres enfoques clave que orientan la planificación contemporánea de áreas marinas: la planificación adaptativa, fundamental para responder a escenarios ambientales dinámicos; la gobernanza participativa, que asegura legitimidad social y la incorporación de diversos actores locales; y el abordaje integral del cambio climático, necesario para anticipar impactos y diseñar estrategias de mitigación y adaptación a largo plazo. Estos enfoques constituyen pilares esenciales para la gestión moderna de áreas protegidas y sirven como base conceptual para el análisis y propuestas desarrolladas en este estudio.

### **1.6.1 Planificación adaptativa en áreas marinas chilenas**

La planificación adaptativa se ha consolidado como un enfoque moderno para la gestión de áreas protegidas, al reconocer la incertidumbre ecológica y la necesidad de ajuste continuo de estrategias. En Chile, herramientas como la Guía para la planificación y gestión de áreas marinas protegidas con participación de comunidades locales y/o indígenas, elaborada por WWF Chile, presentan un ciclo adaptativo estructurado y participativo en cinco pasos: desde la definición de la visión hasta la evaluación de resultados y ajustes a futuro.

Estas metodologías reflejan la transición de una planificación estática hacia un diseño iterativo, fundamentado en estándares internacionales como los de la CMP. Este enfoque es particularmente relevante para Áreas Marinas Protegidas (AMP), donde dinámicas como corrientes oceánicas cambiantes, presiones pesqueras o eventos climáticos extremos requieren respuestas flexibles y basadas en evidencia continua.

### **1.6.2 Gobernanza participativa en conservación marina**

El fortalecimiento de la gobernanza participativa en AMP es crucial para mejorar la efectividad y legitimidad de la conservación. La misma guía de WWF Chile resalta que la participación de comunidades locales e indígenas permite co-administrar las áreas protegidas, asegurando que las estrategias respeten los intereses locales y generen beneficios compartidos.

Además, la Guía de Planificación Espacial Marina del MMA incorpora principios de gobernanza inclusiva, señalando que la asignación de usos ecosistémicos en la zona costa-marina debe incluir a representantes de grupos de interés en su validación. Así, la planificación y gestión de AMP en Chile avanza hacia estructuras colaborativas, donde el Estado y las comunidades dialogan y co-gestiona en procesos más equitativos.

### **1.6.3 Abordaje integral del cambio climático**

En Chile, la dimensión climática ya no es opcional en la gestión de áreas protegidas; es un componente central. Según el Ministerio del Medio Ambiente (2025), el Informe el Informe N.º 3 de avance del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático plantea la incorporación del cambio climático en los instrumentos de gestión de la biodiversidad, incluyendo objetivos, indicadores y responsabilidades institucionales para áreas marinas (como AMP).

Adicionalmente, estudios recientes documentan cómo el cambio climático combinado con actividades como la salmonicultura están afectando ecosistemas vitales como los bosques de algas en la Patagonia. Estas evidencias muestran la urgencia de integrar estrategias de adaptación en la planificación de zonas marinas prioritarias (por ejemplo, la restauración o cultivo de macroalgas como herramienta de resiliencia).

## **1.7 Cetáceos como objeto de conservación**

Los cetáceos, grupo que incluye a ballenas, delfines y marsopas, constituyen organismos clave para la conservación marina, no solo por su rol ecológico fundamental, sino también por su valor como indicadores de la salud del ecosistema y su capacidad para movilizar acciones de protección a gran escala. Su posición como depredador tope, su longevidad y sus extensas migraciones les permiten influir sobre vastos territorios oceánicos, facilitando el transporte de nutrientes entre regiones y promoviendo procesos como la productividad primaria a través del fenómeno conocido como la “bomba de nutrientes” (Roman y McCarthy, 2010).

Además de su rol funcional, los cetáceos han sido reconocidos como especies emblemáticas y sombrilla para la conservación por su carisma, su historia de sobreexplotación y su capacidad de generar empatía social. Su inclusión en el diseño de áreas protegidas permite conservar no solo a las especies en sí, sino también a múltiples componentes ecológicos que coexisten en sus hábitats (Hooker y Gerber, 2004). En este sentido, los cetáceos cumplen una doble función en la conservación: son sujetos de resguardo prioritario y herramientas estratégicas para la protección de ecosistemas completos.

Chile ha reconocido formalmente esta relevancia al otorgar protección legal a todas las especies de cetáceos mediante decretos y leyes específicas. Entre ellas, destaca la Ley 20.293, que declaró a los espacios marítimos chilenos como santuario de cetáceos, protegiendo legalmente a todas las especies que habitan o transitan por sus aguas (Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, 2008). Esta medida ha consolidado la conservación de cetáceos como una política pública nacional, con implicancias ecológicas, culturales y económicas.

Desde la perspectiva de la planificación territorial y la gestión de áreas protegidas, los cetáceos pueden ser definidos formalmente como objetos de conservación, categoría que engloba a aquellos componentes prioritarios de la biodiversidad cuya protección resulta esencial para mantener la integridad ecológica de un área. Según la Fundación Kreen (s. f.), estos objetos permiten focalizar acciones, orientar el monitoreo y evaluar la efectividad de la conservación mediante indicadores específicos. Su selección y evaluación se basan en criterios ampliamente validados, como la irremplazabilidad, el grado de amenaza, la representatividad ecológica y la factibilidad de gestión (Granizo et al., 2006). A nivel nacional, el reciente marco institucional del Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas refuerza este enfoque, estableciendo lineamientos para la identificación y seguimiento de objetos de conservación dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas, 2023). Como señalan Calfucura y Figueroa (2014), priorizar estos objetos no solo permite optimizar recursos en contextos de conservación, sino que genera beneficios ecológicos y sociales que superan ampliamente los costos asociados. Bajo este marco conceptual, los cetáceos por su relevancia ecológica, su vulnerabilidad y su rol como especies sombrilla constituyen un objeto de conservación particularmente estratégico en el contexto de los ecosistemas marinos australes.

### **1.7.1 *Megaptera novaengliae***

La ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) representa uno de los cetáceos más emblemáticos y estudiados a nivel mundial. De amplia distribución cosmopolita, esta especie migra estacionalmente entre zonas de alimentación en altas latitudes y zonas de reproducción en aguas tropicales y subtropicales, llegando a recorrer hasta 25.000 kilómetros anuales (Kennedy et al., 2014). Esta condición migratoria convierte a la especie en un ejemplo paradigmático de la necesidad de cooperación internacional en materia de conservación marina. “Los corredores azules son autopistas migratorias para la megafauna marina, como las ballenas, y unen áreas ecológicamente interconectadas, a menudo globales (por ejemplo, lugares donde se alimentan, se reproducen, socializan y migran), que son esenciales para su supervivencia” (*Protecting Blue Corridors — WWF Protecting Whales & Dolphins Initiative*, s.f ). Se puede apreciar en la figura 1.3 la ruta migratoria que sigue la ballena jorobada por el océano austral, desplazándose hacia zonas de bajas latitudes para reproducirse.



**Figura 1.3:** Ruta migratoria Ballena Jorobada Pacífico Sur (Protecting Blue Corridors — Explore, 2025.)

Desde un punto de vista ecológico, la ballena jorobada cumple un rol clave como depredador filtrador, alimentándose principalmente de kril y peces pelágicos mediante estrategias cooperativas, como las redes de burbujas (Clapham, 2000). Su fidelidad a sitios específicos de alimentación y reproducción, como ocurre en el Estrecho de Magallanes en Chile, refuerza la importancia de conservar hábitats críticos mediante mecanismos de protección espacial efectiva (Gibbons et al., 2003).

Una de sus características más distintivas es su comunicación acústica compleja. Los machos emiten cantos estructurados que pueden durar más de 20 minutos y repetirse durante horas, con funciones reproductivas y sociales. Estas vocalizaciones muestran aprendizaje cultural entre poblaciones oceánicas, y representan uno de los ejemplos más notables de transmisión cultural en el reino animal (Garland et al., 2011). La figura 1.4 se muestra a la ballena jorobada saltando fuera del agua, este comportamiento se asocia a una variedad de razones, comunicación, socialización, eliminar los percebes y parásitos, aunque hasta la fecha, la comunidad científica desconoce el propósito real de este comportamiento.

A nivel global, *Megaptera novaeangliae* fue intensamente cazada hasta mediados del siglo XX, lo que redujo su población global a menos del 10 % de su tamaño original. Gracias a las moratorias internacionales, muchas poblaciones se han recuperado, razón por la cual la UICN la clasifica

actualmente como "Preocupación Menor", aunque algunas subpoblaciones, como la del Mar Árabe, permanecen críticamente amenazadas (Cooke, 2018). En Chile, la especie cuenta con protección total desde 2008 y ha sido declarada Monumento Natural, siendo también objeto de conservación en áreas protegidas como el Parque Marino Francisco Coloane (SERNAPESCA, s.f.).

Pese a los avances, la Ballena jorobada enfrenta diversas amenazas emergentes: el cambio climático altera la disponibilidad de alimento y sus rutas migratorias; el tráfico marítimo incrementa el riesgo de colisiones; la pesca industrial puede causar enmallamientos; y la contaminación acústica interfiere en su comunicación y comportamiento reproductivo (NOAA Fisheries, 2023).

La *Megaptera novaeangliae* ha demostrado ser una especie sombrilla efectiva para la conservación marina. Su protección beneficia indirectamente a múltiples especies simpátricas, y su presencia sirve como indicador del estado ecológico del océano. Su carisma también ha promovido el desarrollo del turismo responsable en zonas costeras, especialmente en el sur de Chile, contribuyendo a la concientización ambiental y la economía local (WWF, 2020).



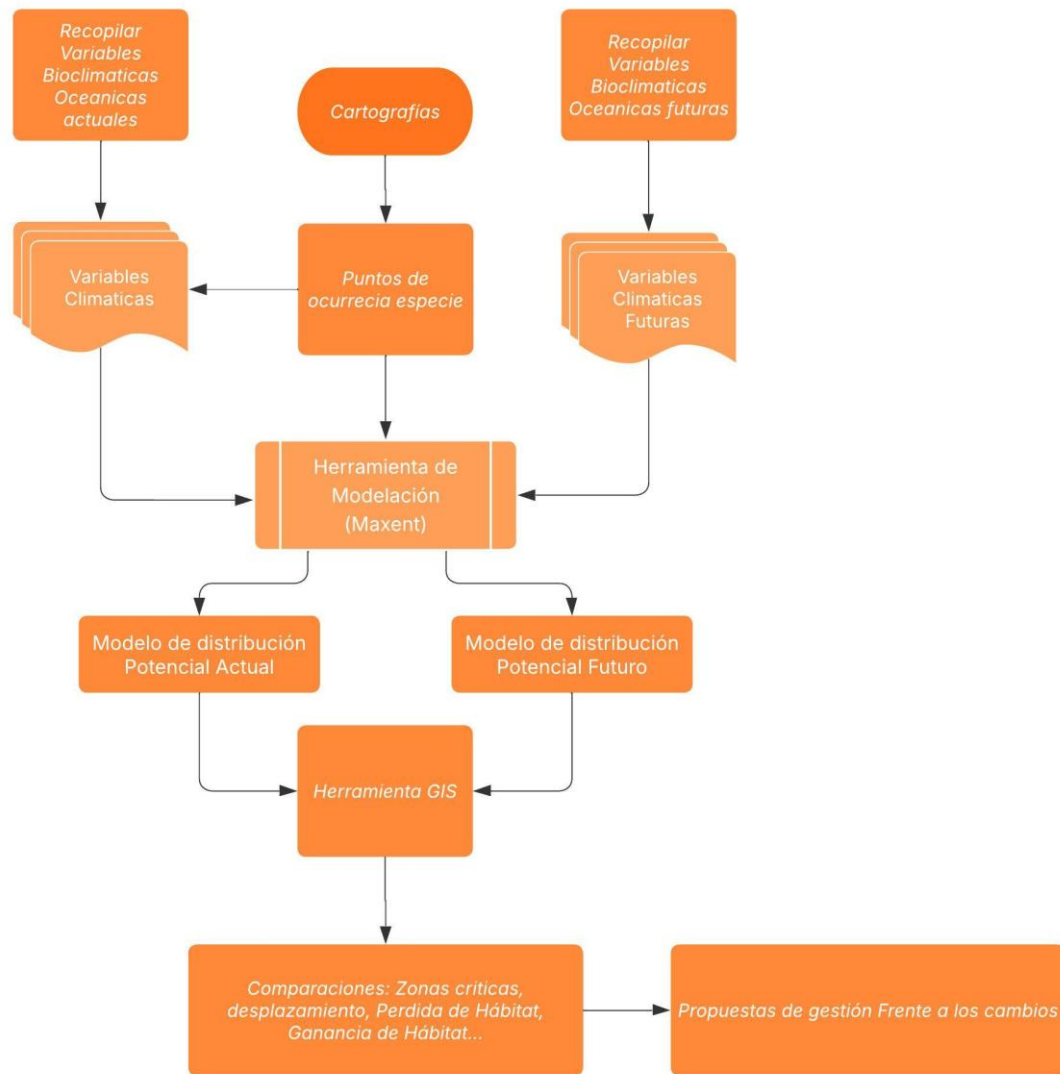
Figura 1.4: Ballena Jorobada (Fisheries, 2024 )

## **1.8 Modelación de distribución de especies como herramienta para la planificación de la conservación**

Los modelos de distribución de especies (SDM, por sus siglas en inglés) se han transformado en una de las áreas de investigación con mayor desarrollo dentro del campo de la biogeografía de la conservación (Richardson y Whittaker, 2010). Esta disciplina puede entenderse como la aplicación de los principios, teorías y análisis propios de la biogeografía a problemas vinculados a la conservación de la biodiversidad (Whittaker et al., 2005). En este contexto, los modelos de distribución permiten vincular datos de presencia de especies con variables ambientales, generando proyecciones espaciales que orientan estrategias de conservación, manejo adaptativo y diseño de áreas protegidas.

Según Pliscoff y Fuentes-Castillo (2011), la evolución de estas herramientas ha pasado de modelos estáticos y descriptivos hacia enfoques integrados que consideran la dinámica espacio-temporal de los ecosistemas, el cambio climático y las presiones antrópicas. Estos avances han ampliado las posibilidades de incorporar SDM en procesos de planificación sistemática para la conservación, especialmente en territorios como Chile, donde existen vacíos significativos en la representatividad ecológica del sistema de áreas protegidas.

Entre los enfoques más utilizados para la implementación de SDM se encuentra el software MaxEnt (Maximum Entropy Modeling), desarrollado por Phillips et al. (2006). MaxEnt permite estimar la distribución potencial de una especie a partir de datos de presencia y capas ambientales continuas, utilizando principios estadísticos de máxima entropía. Esta herramienta ha demostrado un alto rendimiento predictivo en estudios con datos escasos o distribuciones limitadas, lo cual ha consolidado su uso en contextos marinos y terrestres, este proceso se ejemplifica en el diagrama presentado en la figura 1.5 donde describe de manera general cómo funciona un MDS. En Chile, su aplicación ha sido recomendada por diversos autores para apoyar la gestión de áreas protegidas, la identificación de vacíos de conservación y la priorización de sitios de alto valor ecológico (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).



**Figura 1.5:** Diagrama Modelo de Distribución de especie (Elaboración Propia)

En el ámbito marino, los SDM permiten abordar la escasez de datos empíricos mediante el uso de variables satelitales o modeladas, lo cual es especialmente útil en regiones australes como el Parque Marino Francisco Coloane. El enfoque adoptado en esta investigación que integra datos climáticos marinos actuales y proyectados (Bio-ORACLE, CMIP6) permite anticipar zonas de idoneidad ecológica futura para *Megaptera novaeangliae* bajo distintos escenarios de cambio climático, y propone su uso como insumo estratégico en la planificación espacial adaptativa.

De este modo, los modelos de distribución no solo sirven como herramientas de análisis predictivo, sino también como base técnica para fortalecer la representatividad, conectividad y eficacia de las

áreas protegidas, en sintonía con los principios de la planificación sistemática y los estándares internacionales de conservación.

### **1.9 Propuestas de Gestión para Áreas Marinas Protegidas**

El enfoque de gestión adaptativa constituye el eje estructural de estos estándares, proponiendo un modelo de planificación flexible basado en el aprendizaje y la retroalimentación sistemática (CMP, 2020). La formulación de propuestas de gestión para áreas marinas protegidas constituye una etapa clave dentro del ciclo de conservación adaptativa, especialmente en contextos donde los efectos del cambio climático reconfiguran la distribución de hábitats críticos y la dinámica ecológica de especies altamente móviles como *Megaptera novaeangliae*. En concordancia con los principios metodológicos establecidos por los Estándares Abiertos para la Práctica de la Conservación v4.0, estas propuestas deben surgir a partir de un diagnóstico integral que considere no solo la caracterización ecológica del área, sino también los factores de presión directa e indirecta, los actores involucrados y los escenarios de cambio ambiental proyectados.

En el caso del Parque Marino Francisco Coloane, declarado como AMCP-MU en 2003, la implementación de un plan de manejo basado en el enfoque de múltiples usos ha representado un avance importante en términos de conservación marina en Chile. Sin embargo, tal como se analizó en los apartados anteriores, dicho plan presenta limitaciones en cuanto a la integración del cambio climático como amenaza estructural, la formulación de metas operativas cuantificables, y la implementación de sistemas de monitoreo adaptativo. Frente a este escenario, se hace necesario complementar la planificación existente con propuestas de gestión orientadas a fortalecer la representatividad y resiliencia del hábitat de *Megaptera novaeangliae*, especie considerada como objeto de conservación prioritario en la zona. Dada la incertidumbre asociada al cambio climático y a la distribución de especies marinas, este estudio adopta la gestión adaptativa no solo como marco conceptual, sino como fundamento operativo para la formulación de propuestas de conservación contextualizadas, evaluables y revisables en el tiempo.

## 2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Aunque el Parque Marino Francisco Coloane cuenta con un Plan de Manejo oficial y ha avanzado en la identificación de objetos de conservación y en la definición de una zonificación espacial, dicho instrumento presenta limitaciones estructurales frente a los desafíos del cambio climático. En particular, el plan no incorpora de manera sistemática los principios de gestión adaptativa establecidos por los Estándares Abiertos para la Conservación (CMP v4.0), lo que se traduce en la ausencia de metas SMART, indicadores de desempeño, mecanismos de monitoreo y protocolos de ajuste frente a nuevos escenarios.

Asimismo, el cambio climático, pese a ser reconocido como amenaza, no se aborda de manera integral en el plan, lo que genera incertidumbre sobre la eficacia futura del área protegida. Dado que *Megaptera novaeangliae* depende de condiciones oceanográficas sensibles a la temperatura y a la disponibilidad de presas como el kril, la falta de estrategias explícitas de adaptación podría comprometer la idoneidad del hábitat dentro del parque.

Este escenario plantea como problema central la brecha entre la planificación existente y las necesidades de conservación de una especie altamente móvil y vulnerable al cambio climático, lo que vuelve imprescindible evaluar el plan vigente bajo los criterios de gestión adaptativa y proyectar la representatividad futura del hábitat de la ballena jorobada mediante modelos de distribución de especies.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer medidas de gestión para la conservación de *Megaptera novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane ante escenarios de cambio climático.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el Plan de Manejo del AMCP-MU Francisco Coloane en relación con la conservación de *Megaptera novaeangliae*, identificando sus alcances, limitaciones y brechas bajo los lineamientos de los Estándares Abiertos para la Conservación (CMP v4.0).
- Modelar la distribución potencial de *Megaptera novaeangliae* en escenarios climáticos actuales y futuros (SSP1-1.9, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) para los horizontes 2020 y 2050, utilizando registros de ocurrencia y variables ambientales procesadas en MaxEnt.
- Formular propuestas de gestión para la conservación de *Megaptera novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane, fundamentadas en el diagnóstico institucional y en los resultados de la modelación de hábitat.
- Estimar los costos de implementación de las propuestas de gestión orientadas a la conservación de *Megaptera novaeangliae*.

## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 Evaluación del plan de gestión del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de *Megaptera novaeangliae*.

Con el propósito de cumplir el primer objetivo específico, se realizó un análisis cualitativo del Plan de Manejo vigente del Parque Marino Francisco Coloane (PMFC), evaluando su pertinencia, coherencia y suficiencia respecto a las necesidades de conservación de *Megaptera novaeangliae*. Esta evaluación se llevó a cabo mediante una revisión sistemática de los contenidos del plan, considerando tanto su estructura general como las acciones específicas orientadas a la protección de cetáceos.

Como marco de referencia se empleó la versión 4.0 de los Estándares Abiertos para la Conservación, los cuales permiten identificar y analizar los elementos esenciales de una gestión adaptativa, tales como: definición de objetos de conservación, identificación de amenazas, establecimiento de metas SMART, diseño de estrategias, mecanismos de monitoreo y procesos de ajuste adaptativo.

Para organizar el análisis, se desarrolló en tres etapas consecutivas:

#### 4.1.1 Primera Etapa, Caracterización del Plan de Gestión

Se procedió a una lectura analítica del documento oficial del Plan de Manejo, identificando sus objetivos, medidas de manejo, actividades planificadas, indicadores, responsables institucionales y mecanismos de seguimiento.

En esta etapa se registró de forma estructurada los siguientes componentes clave del plan:

1. Objetos de conservación.
2. Diagnóstico de amenazas directas.
3. Factores causales o indirectos.
4. Metas de conservación (criterios SMART).
5. Estrategias y medidas de manejo.
6. Monitoreo e indicadores.
7. Participación de actores y gobernanza.
8. Mecanismos de gestión adaptativa.

9. Inclusión del cambio climático como amenaza transversal.
10. Inclusión explícita de *Megaptera novaeangliae* como objeto prioritario.

Para organizar esta información se utilizó una matriz de caracterización (**Tabla 4.1**), en la que se consignó:

- El componente identificado.
- Su descripción en el documento.
- Presencia en el plan (Sí / No / Parcial).
- Nivel de especificidad (Alta / Media / Baja).
- Pertinencia para *M. novaeangliae* (Directa / Indirecta / Nula).
- Observaciones y brechas detectadas.

La **Tabla 4.1** permitió documentar de forma estructurada la presencia, ausencia o debilidad de los elementos relevantes para la especie. Esta sistematización constituye una línea base de análisis, que posteriormente fue complementada con la comparación frente a los Estándares Abiertos (**Sección 4.1.2**).

**Tabla 4.4.1.** Matriz de caracterización del Plan de Manejo del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de *Megaptera novaeangliae*

Nº	Componente clave del Plan de Manejo	Descripción encontrada en el documento	¿Presente en el plan? (Sí / No / Parcial)	Nivel de especificidad (Alta / Media / Baja)	Pertinencia con <i>M. novaeangliae</i> (Directa / Indirecta / Nula)	Observaciones o brechas identificadas
1	Objeto(s) de conservación					
2	Diagnóstico de amenazas					
3	Factores causales o indirectos					
4	Metas de conservación					
5	Estrategias y medidas de manejo					
6	Monitoreo y evaluación					
7	Participación de actores					
8	Mecanismos de gestión adaptativa					

Nº	Componente clave del Plan de Manejo	Descripción encontrada en el documento	¿Presente en el plan? (Sí / No / Parcial)	Nivel de especificidad (Alta / Media / Baja)	Pertinencia con <i>M. novaeangliae</i> (Directa / Indirecta / Nula)	Observaciones o brechas identificadas
9	Enfoque sobre cambio climático					
10	Inclusión explícita de <i>M. novaeangliae</i>					

#### 4.1.2 Segunda Etapa, Análisis comparativo con los Estándares Abiertos

A partir de la información sistematizada en la caracterización inicial, se construyó una matriz de evaluación comparativa (**Tabla 4.2**) que compare los contenidos del Plan de Manejo del PMFC con los componentes metodológicos definidos en la versión 4.0 de los Estándares Abiertos para la Conservación.

El propósito de esta etapa fue identificar de manera explícita las fortalezas, limitaciones y brechas del plan vigente en relación con los principios de gestión adaptativa. Para ello, cada componente fue evaluado aplicando los siguientes criterios:

- Presencia/ausencia: Sí / Parcial / No.
- Nivel de especificidad: Alta / Media / Baja.
- Pertinencia para *Megaptera novaeangliae*: Directa / Indirecta / Nula.
- Observaciones: descripción de brechas, vacíos o limitaciones detectadas (por ejemplo: ausencia de indicadores, metas poco medibles, falta de protocolos de ajuste adaptativo).

La **Tabla 4.2** representa estos elementos, junto con notas justificativas que respaldan cada calificación asignada. De este modo, el análisis comparativo sirve como insumo central para la formulación de recomendaciones y la elaboración de propuestas de gestión adaptativa que fortalezcan la efectividad del área protegida frente a escenarios de cambio climático.

Tabla 4.4.2. Matriz de evaluación del plan de manejo del PMFC según los Estándares Abiertos para la Conservación.

Componente de los Estándares Abiertos	Descripción esperada	Presencia en el Plan de Manejo del PMFC	Pertinencia para la conservación de <i>M. novaeangliae</i>	Observaciones / Brechas identificadas
<b>Objetos de conservación</b>	Identificación clara de los elementos clave a conservar (especies, hábitats, procesos ecológicos)	Sí / No / Parcial	Alta / Media / Baja	¿La ballena jorobada está explícitamente incluida como objeto prioritario?
<b>Amenazas directas</b>	Diagnóstico detallado de amenazas que afectan a los objetos de conservación	Sí / No / Parcial	Alta / Media / Baja	¿Se identifican amenazas específicas como el cambio climático o tráfico marítimo?
<b>Factores indirectos o causales</b>	Análisis de causas subyacentes de las amenazas (p. ej. actividades humanas, políticas públicas, etc.)	Sí / No / Parcial	Alta / Media / Baja	¿Se consideran factores como debilidad normativa o vacíos de gobernanza?
<b>Metas de conservación</b>	Definición de metas medibles y alcanzables para los objetos de conservación	Sí / No / Parcial	Alta / Media / Baja	¿Existen metas específicas asociadas a la recuperación o protección de la especie?
<b>Estrategias de manejo</b>	Propuesta de acciones claras y estructuradas para mitigar amenazas y alcanzar las metas	Sí / No / Parcial	Alta / Media / Baja	¿Incluye acciones orientadas a la protección de <i>M. novaeangliae</i> ?
<b>Monitoreo y evaluación</b>	Indicadores, líneas base, frecuencia de seguimiento y mecanismos de evaluación de desempeño	Sí / No / Parcial	Alta / Media / Baja	¿Existen mecanismos específicos de monitoreo para cetáceos?
<b>Participación de actores</b>	Inclusión de comunidades, organizaciones, academia y sector público en el diseño e implementación del plan	Sí / No / Parcial	Alta / Media / Baja	¿Hay participación de actores relevantes para la conservación marina?
<b>Enfoque de gestión adaptativa</b>	Capacidad de ajustar el plan en función de resultados de monitoreo o cambios en el contexto ecológico	Sí / No / Parcial	Alta / Media / Baja	¿Se contempla la adaptación ante escenarios de cambio climático?

### 4.1.3 Tercera Etapa, Evaluación de alcances y limitaciones

En esta etapa se realizó un análisis crítico integrando los resultados obtenidos en la caracterización (**Tabla 4.1**) y en la evaluación comparativa (**Tabla 4.2**). El objetivo de esto es sintetizar de manera ordenada los alcances y limitaciones del Plan de Manejo del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de *Megaptera novaeangliae*.

- Fortalezas identificadas: se entenderán como los elementos positivos presentes en el plan, tales como la identificación de objetos de conservación, la incorporación de amenazas directas, la existencia de zonificación espacial o la participación de actores locales.
- Limitaciones estructurales relevantes: se refiere a las ausencias, debilidades estructurales o vacíos detectados, como la falta de metas SMART, indicadores específicos, mecanismos de monitoreo, protocolos de ajuste adaptativo o estrategias explícitas frente al cambio climático.

El balance entre estos dos aspectos permite elaborar un diagnóstico institucional que servirá de base para la formulación de propuestas de gestión. Asimismo, este análisis permitió vincular directamente la planificación institucional con la evidencia espacial proveniente de la modelación de distribución de hábitat (**Sección 4.2**), garantizando la coherencia entre ambos enfoques.

## 4.2 Modelación de distribución de especies

La modelación de distribución de hábitat potencial de *Megaptera novaeangliae* se ejecutó utilizando el algoritmo MaxEnt v3.4.4, ampliamente validado en estudios de biogeografía y conservación con datos de presencia. Según Pliscoff y Fuentes-Castillo (2011, p. 62): “Los Modelos de Distribución de Especies (SDM) constituyen herramientas fundamentales para la predicción de áreas potenciales de distribución, integrando la información de ocurrencia con variables ambientales, lo cual es clave para escenarios de cambio climático y planificación de la conservación”. El uso de MaxEnt se justifica por su capacidad de generar predicciones robustas aun con bases de datos reducidas, aprovechando al máximo la información disponible (Phillips et al., 2006).

### 4.2.1 Registros de ocurrencia de la especie (fuentes, criterios de selección)

Los registros de ocurrencia se obtuvieron desde OBIS (Ocean Biodiversity Information System) y GBIF (Global Biodiversity Information Facility), priorizando la temporada de alimentación (verano austral) y el área de influencia del Parque Marino Francisco Coloane.

La depuración se realizó en RStudio, siguiendo criterios descritos en Pliscoff et al. (2014):

- Eliminación de duplicados espaciales.
- Exclusión de registros con coordenadas erróneas o baja precisión.
- Rarefacción espacial a 1 km para reducir autocorrelación espacial.

Tal como señalan Pliscoff y Fuentes-Castillo (2011, p. 70), “Una adecuada depuración de datos de ocurrencia es esencial para mejorar la calidad predictiva de los modelos, evitando sesgos generados por registros redundantes o imprecisos”.

#### **4.2.2 Variables ambientales (actuales y futuras, escenarios SSP del IPCC)**

Las variables ambientales utilizadas en este estudio se obtuvieron desde la base de datos Bio-ORACLE v3.0, la cual provee información oceanográfica a escala global con una resolución espacial de 5 arcmin (~9 km). Esta base de datos contiene tanto condiciones actuales como proyecciones futuras de variables relevantes para estudios ecológicos y de modelación de distribución de especies.

En una primera etapa, se consideró un total de 17 variables ambientales relacionadas con características fisicoquímicas y biológicas del océano, entre las que se incluyen temperatura superficial del mar, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes (nitrato, fosfato y silicato), productividad primaria, biomasa fitoplanctónica, clorofila-a y parámetros atmosféricos como la temperatura del aire y la cobertura nubosa.

El preprocesamiento consideró la:

- Descarga y estandarización de las capas en formato NetCDF, posteriormente convertidas a GeoTIFF para su manipulación en entornos GIS.
- Recorte espacial al polígono del Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos Francisco Coloane (AMCP-MU FC).
- Interpolación puntual en los casos donde existan celdas sin información dentro del área de estudio.
- Renombrado y estandarización de variables, asociando cada código técnico del dataset a su denominación científica, con el fin de asegurar consistencia metodológica y facilitar su interpretación ecológica.

La selección final de variables a utilizar en los modelos se realizó aplicando un análisis de colinealidad (coeficiente de correlación de spearman,  $r < 0.7$ ), a fin de reducir redundancia entre predictores.

Posteriormente, se priorizó aquellas variables que presenten mayor relevancia ecológica y estadística para la distribución de *Megaptera novaeangliae*.

Para garantizar su reproducibilidad, el flujo de procesamiento de variables se implementó mediante un script en R desarrollado específicamente para este trabajo, el cual incluye las rutinas de conversión de archivos NetCDF a GeoTIFF, recorte al área de estudio, interpolación espacial de celdas vacías y conversión final a formato ASCII requerido por MaxEnt.

En particular, se espera que variables asociadas a la temperatura superficial (*thetao*), la productividad primaria (*phyc*), la concentración de clorofila-a (*chl*) y la dinámica de la columna de agua (*m1otst*, *o2*) sean las más determinantes, dado que influyen directamente en la disponibilidad de presas y en la idoneidad del hábitat de la especie (Meynecke et al., 2021)

### 4.2.3 Preprocesamiento de datos

Las capas ambientales fueron recortadas al área de estudio, correspondiente al Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos (AMCP-MU) Francisco Coloane incluyendo el Parque Marino Francisco Coloane y su entorno inmediato en la Región de Magallanes. Posteriormente, se estandarizó bajo los siguientes parámetros:

- Resolución espacial: 5 arcmin.
- Sistema de referencia: WGS84.
- Formato: ASCII, compatible con MaxEnt.

Este proceso se llevó a cabo mediante el uso combinado de QGIS y RStudio, empleando librerías como *raster*, *terra* y *rgdal*. El preprocesamiento es un paso crítico, ya que asegura la coherencia espacial y temporal de las capas ambientales, evitando sesgos en los resultados del modelo.

#### 4.2.3.1 Limpieza de datos de ocurrencia

Los registros de presencia fueron revisados y depurados en RStudio. Se eliminaron los duplicados espaciales, coordenadas erróneas, registros terrestres y aquellos con baja precisión espacial. También se validaron los puntos que se encuentren dentro del área marina de interés. Posterior a esto, se aplicará rarefacción de 5 km para cada ocurrencia. Finalmente, los datos se prepararon en formato compatible con Maxent (CSV con columnas de Especie, latitud y longitud).

#### **4.2.4 Recorte y estandarización de variables ambientales**

Las capas raster se recortaron geográficamente a una extensión que incluye el Parque Marino Francisco Coloane y su entorno, se utilizó el polígono oficial del AMCP-MU Francisco Coloane (shapefile del MMA) en conjunto al polígono del Parque Marino Francisco Coloane. Estos se procesaron la misma en resolución, sistema de coordenadas (WGS84) y formato. Para el modelado en Maxent, las capas se llevaron a formato ASCII (.asc) para verificar la correspondencia espacial con los registros de ocurrencia. Este proceso fue ejecutado en QGIS y R-estudio, utilizando paquetes como raster, terra y rgdal.

#### **4.2.5 Modelo exploratorio para la selección de variables ambientales**

Con el fin de reducir el sobreajuste y definir un subconjunto compacto y no redundante de predictores, se implementó un modelo de distribución exploratorio (MDE) en MaxEnt para *Megaptera novaeangliae*. El procedimiento se llevó a cabo del siguiente modo:

##### **4.2.5.1 Insumos y preprocesamiento.**

Se utilizaron capas ambientales estandarizadas (misma proyección, extensión y resolución) y registros de ocurrencia depurados y rarefaccionados para minimizar la autocorrelación espacial. El área de calibración se restringió al ámbito de estudio.

##### **4.2.5.2 Colinealidad y criterio ecológico.**

Con los valores de las capas en los puntos de ocurrencia se generó una matriz de correlación de Spearman en Rstudio y se evaluó la colinealidad entre pares de variables. La selección final se realizó manteniendo solo variables con  $|r| < 0.7$ .

De forma explícita, la decisión se fundamenta también en la relevancia ecológica documentada en la literatura, priorizando aquellas variables vinculadas a temperatura, productividad primaria y nutrientes (p. ej., temperatura superficial del mar, clorofila-a, nitrato, fosfato, silicato, hierro disuelto), para representar de mejor manera los procesos oceanográficos que determinan la disponibilidad de presas y, en consecuencia, la distribución de la ballena jorobada.

#### **4.2.5.3 Configuración del MDE en MaxEnt.**

Se cargó el set completo de variables ambientales junto con las ocurrencias no auto correlacionadas de la especie. Se ejecutaron 5 réplicas; ya que el número de ocurrencias fue  $\geq 50$  se empleó validación cruzada, descartando la opción de utilizar Bootstrap para cuando las ocurrencias sean  $< 50$ . Posterior a esto se activaron las casillas para generar curvas de respuesta y el test de jackknife para evaluar la contribución de cada variable.

#### **4.2.5.4 Subconjunto final.**

Como producto del MDE se obtuvo un set no colineal de variables con coherencia ecológica y estadística, las cuales se utilizaron en las etapas posteriores de calibración/validación y en las proyecciones a escenarios. Esta estrategia asegura un equilibrio entre capacidad predictiva y simplicidad del modelo, minimizando el riesgo de sobreajuste.

#### **4.2.6 Algoritmo Maxent**

El algoritmo MaxEnt se fundamenta en el principio de máxima entropía, estimando la distribución de probabilidad más uniforme posible sujeta a las restricciones impuestas por los datos de presencia y las variables ambientales (Phillips et al., 2006).

En este estudio se configuró de la siguiente manera:

- Replicates: 5
- Replicated run type: Despues de aplicar rarefacción
  - Crossvalidate  $\geq 50$  Ocurrencias
  - Bootstrap  $< 50$  Ocurrencias
- Output: cloglog
- Random seed: ON
- Extrapolate: OFF
- Clamp: ON
- Response curves: ON
- Jackknife: ON
- Background: 10 000 (por defecto)
- Cloglog: ON

La elección de estos parámetros responde a la literatura previa en modelación de cetáceos y otros organismos marinos, donde MaxEnt ha demostrado alta capacidad predictiva incluso con bases de datos reducidas (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

#### **4.2.6.1 Evaluación del modelo (AUC, TSS)**

El rendimiento y la interpretación de los modelos se evaluó mediante tres enfoques complementarios:

##### **4.2.6.1.1 Área Bajo la Curva ROC (AUC)**

El Área Bajo la Curva ROC (Receiver Operating Characteristic) evalúa la capacidad del modelo para distinguir correctamente entre ubicaciones de presencia y ausencia (pseudo-ausencias). Un valor de  $AUC \geq 0.7$  será considerado indicativo de una capacidad predictiva aceptable, mientras que valores superiores a 0.9 serán interpretados como excelente desempeño.

##### **4.2.6.1.2 Test de Jackknife**

Se aplicó la prueba de Jackknife integrado en MaxEnt para evaluar la importancia relativa de las variables ambientales. Esta prueba compara la ganancia del modelo en tres condiciones: con todas las variables, con una sola variable y excluyendo cada variable de manera secuencial.

Según Phillips et al. (2006, p. 659), “El test de Jackknife permite identificar cuáles variables aportan mayor poder predictivo al modelo y cuáles resultan prescindibles, constituyendo una herramienta clave para interpretar la contribución relativa de los predictores”.

Este procedimiento se utilizó como complemento al análisis de colinealidad inicial, asegurando que las variables seleccionadas sean tanto independientes estadísticamente como relevantes predictivamente para el modelo.

#### **4.2.7 Análisis de representatividad**

El análisis de representatividad busca cuantificar la proporción del hábitat potencialmente adecuado para *Megaptera novaeangliae* que se encuentra contenido dentro de los límites del Parque Marino Francisco Coloane (PMFC) bajo condiciones actuales y escenarios futuros de cambio climático. Esta evaluación permite determinar en qué medida el área protegida cumple con su función de conservar hábitats esenciales para la especie y anticipar su eficacia futura frente a posibles desplazamientos del hábitat por efectos del cambio climático.

#### 4.2.7.1 Clasificación binaria del hábitat

Las salidas continuas generadas por MaxEnt (probabilidad de presencia "Idoneidad") se convirtieron en mapas binarios de hábitat "adecuado" o "no adecuado" aplicando un umbral de corte que discrimine áreas relevantes para la conservación. Se empleó el criterio de "máxima sensibilidad + especificidad", por su buen equilibrio entre errores de omisión y comisión en SDM, lo que facilita el análisis espacial posterior.

#### 4.2.7.2 Intersección espacial con el Parque Marino Francisco Coloane

Para evaluar la representatividad espacial del hábitat, se realizó una superposición los mapas llevándolos a mapas binarios de hábitat adecuado con el polígono oficial del AMCP-MU Francisco Coloane (shapefile). Esta operación permitió cuantificar el área de hábitat adecuado contenida dentro del parque en cada escenario.

El resultado de la intersección permitió obtener dos indicadores clave para cada escenario climático:

- Área absoluta de hábitat adecuado dentro del parque (km<sup>2</sup>).
- Porcentaje de representatividad, calculado como:

$$\text{Representatividad (\%)} = \left( \frac{\text{Área del Hábitat dentro del PMFC}}{\text{Área Total del Hábitat adecuado}} \right) \cdot 100$$

La representatividad espacial del hábitat adecuado dentro del área protegida se estimó mediante el cálculo del porcentaje del hábitat total que coincide espacialmente con los límites del parque, siguiendo métricas empleadas en análisis de brechas de conservación (Rodrigues et al., 2004; Margules y Pressey, 2000).

#### 4.2.7.3 Análisis comparativo Multitemporal

Con el propósito de evaluar la dinámica espacial del hábitat adecuado de *Megaptera novaeangliae* dentro del Parque Marino Francisco Coloane, se realizó una comparación multitemporal de la representatividad espacial entre el escenario actual y las proyecciones futuras correspondientes a los años 2020 y 2050, bajo los tres escenarios climáticos SSP seleccionados (SSP1-1.9, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) (**Ver tabla 4.3**). Enfocándose en:

- Cuantificar los cambios absolutos (en km<sup>2</sup>) y relativos (en %) del área de hábitat adecuado contenida dentro del parque en cada escenario.
- Evaluar la ganancia, pérdida o mantenimiento de la capacidad del parque para albergar hábitats esenciales.
- Detectar patrones de desplazamiento del hábitat hacia áreas externas al parque, que puedan implicar nuevas prioridades de conservación.

Los resultados se presentan en tabla resumen para sintetizar los resultados por escenario y año.

**Tabla 4.4.3.** Matriz Representación espacial del hábitat adecuado de *Megaptera novaeangliae* dentro del Parque Marino Francisco Coloane bajo escenarios actuales y futuros 2025

Escenario	Área total hábitat adecuado (km <sup>2</sup> )	Área dentro del parque (km <sup>2</sup> )	Representatividad (%)
SSP1-1.9 (2020)			
SSP1-1.9 (2100)			
SSP2-4.5 (2025)			
SSP2-4.5 (2100)			
SSP5-8.5 (2025)			
SSP5-8.5 (2100)			

#### 4.2.8 Proyección de Escenarios

Los modelos de distribución generados bajo condiciones actuales se proyectaron sobre los escenarios de cambio climático definidos por el IPCC: SSP1-1.9 (bajo), SSP2-4.5 (intermedio) y SSP5-8.5 (alto), para los años 2020 y 2050. Estas proyecciones permitieron anticipar posibles transformaciones en la distribución espacial del hábitat adecuado para la especie en función de diferentes trayectorias de emisiones y variabilidad climática oceánica.

#### 4.2.9 Comparativo entre presente y futuro.

Los modelos proyectados fueron comparados con la distribución actual para identificar:

- Desplazamientos geográficos del hábitat potencial hacia nuevas áreas.
- Reducción o expansión del hábitat dentro del parque marino.
- Emergencia de zonas externas al área protegida con alto valor potencial de conservación.

#### 4.2.10 Interpretación para la gestión

Los resultados del análisis fueron interpretados a la luz del enfoque de gestión adaptativa, permitiendo establecer recomendaciones sobre posibles ajustes en los límites del área protegida, creación de zonas buffer, o inclusión de nuevas áreas prioritarias para la conservación. Este análisis se vincula con la evaluación del plan de manejo y con los Estándares Abiertos para la Conservación. Como señalan Pliscoff y Fuentes-Castillo (2011, p. 75), “La utilidad principal de los modelos de distribución no es solo predictiva, sino también su aplicación como herramienta de apoyo a la gestión, orientando decisiones de conservación y planificación adaptativa”.

### 4.3 Propuestas de Gestión Adaptativas: Estándares Abiertos de conservación Versión 4.0

Con el objetivo de operacionalizar las acciones de conservación propuestas, se elaboró una matriz de gestión adaptativa fundamentada en los principios de los *Estándares Abiertos para la Práctica de la Conservación*, versión 4.0, desarrollados por el *Conservation Measures Partnership* (CMP). Este marco metodológico permite integrar de manera estructurada los distintos elementos de la planificación adaptativa, facilitando la toma de decisiones informadas, el monitoreo continuo y la retroalimentación basada en evidencia. La matriz asocia cada estrategia de manejo con los siguientes componentes:

- Objetivo de conservación asociado
- Amenaza que se busca mitigar
- Indicador SMART para evaluación
- Fuente de verificación (documental/técnica)
- Periodicidad de evaluación

Cada propuesta de gestión se formuló con base en los resultados de los modelos de distribución de especies junto a la evaluación del plan de manejo del parque marino Francisco Coloane, permitiendo identificar áreas de alta y baja idoneidad futura para *Megaptera novaeangliae* bajo distintos escenarios de cambio climático. De este modo, las estrategias propuestas no solo responderán a las condiciones actuales, sino que estarán preparadas para anticipar los cambios proyectados, fortaleciendo así un enfoque de gestión adaptativa proactiva, estas propuestas se clasificaron por “Eje” dada su importancia en la gestión del parque y su influencia en el objeto de conservación de referencia.

**Tabla 4.4.** Matriz técnica de propuestas de gestión adaptativa para la conservación de *Megaptera novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane, basada en los Estándares Abiertos para la Conservación CMP v4.

Elemento	Descripción
Objetivo de conservación asociado	Resultado ecológico esperado (alineado al objeto <i>M. novaeangliae</i> )
Amenaza que se busca mitigar	Identificada en el análisis previo (ej. pérdida de hábitat, cambio climático, tráfico marítimo)
Estrategia propuesta	Acción concreta, con fundamentos técnicos y alineada a las capacidades del área protegida
Indicador SMART	Para medir el cumplimiento (específico, medible, alcanzable, relevante, temporal)
Fuente de verificación	Documento, dato o reporte que sustenta el monitoreo
Periodicidad de evaluación	Frecuencia en la que se debe revisar el avance (ej. anual, bienal)
Institución responsable	Actor o entidad encargada de implementar o coordinar la acción

#### 4.4 Estimación de costos de implementación de propuestas de gestión.

Para el cumplimiento del cuarto objetivo específico, se realizó una evaluación preliminar de los costos asociados a la implementación de las propuestas de gestión adaptativa orientadas a la conservación de *Megaptera novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane. Esta evaluación tuvo como finalidad estimar la viabilidad financiera de las acciones sugeridas, considerando los requerimientos técnicos, logísticos y humanos necesarios para su ejecución, en concordancia con los resultados obtenidos de la modelación de distribución de la especie.

El análisis se desarrolló mediante un acercamiento cualitativo y cuantitativo, en las siguientes etapas:

- Identificación de recursos necesarios para cada propuesta, considerando equipamiento, personal técnico, servicios profesionales, logística de campo, monitoreo ambiental, análisis de datos y difusión pública.
- Levantamiento de referencias económicas a partir de licitaciones públicas y programas nacionales (Mercado Público, MMA, Subpesca, IFOP, CORFO, SERNATUR y SBAP), con rangos de fechas entre 2016 y 2025, así como de estudios técnicos previos y presupuestos de proyectos comparables.
- Estimación de costos referenciales para cada ítem, expresados en pesos chilenos (CLP) y unidades de fomento (UF), utilizando un valor medio de \$39.546 CLP por UF (octubre 2025).

- Incorporación de rangos salariales profesionales (según escalas SBAP y licitaciones públicas) para cargos asociados a coordinación técnica, asesorías especializadas, facilitadores y personal de apoyo.
- Clasificación del nivel de costo (bajo, medio o alto) y evaluación de factibilidad operativa, considerando la complejidad de ejecución, disponibilidad presupuestaria y capacidad institucional local o nacional.
- Síntesis de resultados en tablas individuales por eje (Propuesta) y una matriz comparativa final que permite visualizar la inversión total requerida y priorizar acciones según su impacto ecológico y costo beneficio.

Este procedimiento permitió establecer una proyección económica verificable, ajustada a la escala del PMFC y a los mecanismos de financiamiento disponibles en el contexto nacional. Los resultados obtenidos constituyen una referencia base para la planificación financiera y la postulación de proyectos de implementación de las medidas de gestión adaptativa propuestas.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Evaluación del plan de gestión del Parque Marino Francisco Coloane en relación con *Megaptera novaeangliae*

En función de lo propuesto en la metodología (**Sección 4.1**), se desarrolló un análisis integral del Plan de Manejo del AMCP-MU Francisco Coloane, con el objetivo de evaluar su nivel de alineación con los principios de gestión adaptativa contenidos en los Estándares Abiertos para la Conservación, y su eficacia para abordar la conservación de *Megaptera novaeangliae* frente al cambio climático.

#### 5.1.1 Caracterización del Plan de Manejo

Del análisis del Plan de Manejo del AMCP-MU Francisco Coloane, se logró identificar que el documento reconoce explícitamente a *Megaptera novaeangliae* como uno de los principales objetos de conservación, lo cual representa un punto de partida importante desde una perspectiva ecosistémica y focalizada en especies clave. El plan establece como uno de sus objetivos específicos “preservar el área de alimentación de la ballena jorobada”, lo que confirma la prioridad de conservar los espacios marinos utilizados estacionalmente por esta especie.

Entre los elementos destacados, se constata la existencia de una zonificación espacial con áreas núcleo, de uso y de amortiguación, así como la inclusión de antecedentes ecológicos y culturales que justifican la creación del área protegida. El diagnóstico de amenazas es detallado en su dimensión local, incluyendo el turismo náutico no regulado, el enmallamiento con aparejos de pesca, la contaminación acústica, y la creciente presión del tráfico marítimo.

No obstante, también se identificaron debilidades importantes. El plan no formula metas de conservación cuantificables ni establece indicadores operativos asociados a *M. novaeangliae*. Tampoco incluye un sistema de monitoreo ecológico o seguimiento adaptativo de su estado poblacional o del estado de su hábitat. Asimismo, si bien se mencionan factores indirectos que inciden sobre las amenazas (como el desconocimiento, la débil fiscalización y la escasa coordinación entre actores), estos no son tratados de forma sistemática.

Por otra parte, el enfoque sobre el cambio climático es superficial. Aunque se reconoce como una amenaza emergente, no se incorpora en el diseño de estrategias, ni se analizan sus implicancias para la viabilidad ecológica de los objetos de conservación. El plan tampoco contempla escenarios futuros ni herramientas prospectivas como modelación de distribución de especies.

En términos de gobernanza, el documento evidencia avances en cuanto a la participación de actores sociales, especialmente el pueblo Kawésqar, organizaciones de pescadores y operadores turísticos.

Sin embargo, dicha participación se presenta de forma declarativa, sin instrumentos concretos para garantizar continuidad, evaluación de su efectividad o mecanismos de resolución de conflictos.

Estos hallazgos se sistematizaron mediante una matriz de caracterización, donde se clasificó el grado de presencia de diez componentes estructurales, su nivel de especificidad y pertinencia directa respecto a la conservación de *Megaptera novaeanglia*. La **Tabla 5.1** muestra la caracterización del Plan de Manejo del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de *M.novaeangliae*.

**Tabla 5.1.** Caracterización del Plan de Manejo del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de *M.novaeangliae*.

Nº	Componente clave del Plan de Manejo	Descripción encontrada en el documento	¿Presente en el plan? (Sí / No / Parcial)	Nivel de especificidad (Alta / Media / Baja)	Pertinencia con <i>M. novaeangliae</i> (Directa / Indirecta / Nula)	Observaciones o brechas identificadas
1	Objeto(s) de conservación	Identificación de zonas de alimentación de la ballena jorobada como objeto prioritario.	Sí	Media	Directa	No se detallan aspectos ecológicos funcionales ni zonas específicas.
2	Diagnóstico de amenazas	Amenazas como turismo, pesca, residuos, colisiones y cambio climático son identificadas.	Sí	Alta	Directa	No se priorizan amenazas ni se relacionan con escenarios futuros.
3	Factores causales o indirectos	Se mencionan algunos factores indirectos como desconocimiento, falta de coordinación y fiscalización.	Parcial	Media	Indirecta	Falta mayor desarrollo de modelos conceptuales de causalidad.
4	Metas de conservación	No se formulan metas específicas ni cuantificables.	No	Nula	Directa	Ausencia total de metas SMART.
5	Estrategias y medidas de manejo	Estrategias generales sin formulación como teorías del cambio.	Parcial	Media	Directa	Faltan indicadores y cronograma de implementación.
6	Monitoreo y evaluación	No se incluyen mecanismos formales de seguimiento ni evaluación.	No	Nula	Directa	No hay protocolos de seguimiento o evaluación.
7	Participación de actores	Incluye participación del pueblo Kawésqar, pescadores artesanales y sector turismo.	Sí	Alta	Indirecta	No se sistematizan los aportes ni se establece retroalimentación.
8	Mecanismos de gestión adaptativa	No se identifican mecanismos para revisar o ajustar las acciones.	No	Nula	Directa	No hay planificación para revisión periódica ni ajuste de estrategias.
9	Enfoque sobre cambio climático	El cambio climático es mencionado pero sin acciones ni escenarios prospectivos.	Parcial	Baja	Directa	No se consideran medidas de adaptación o resiliencia.
10	Inclusión explícita de <i>M. novaeangliae</i>	Se menciona directamente a la especie como objeto de conservación prioritaria.	Sí	Alta	Directa	Presencia reconocida pero sin indicadores ni metas específicas.

### 5.1.2 Revisión comparativa respecto a los Estándares Abiertos para la Conservación (v4.0)

La revisión comparativa entre el Plan de Manejo del PMFC y los seis componentes del ciclo de gestión adaptativa propuestos por los Estándares Abiertos para la Conservación permitió identificar brechas significativas que afectan su coherencia metodológica y capacidad operativa para enfrentar cambios dinámicos en el entorno ecológico.

Respecto al primer componente “definir el contexto” se identifican avances parciales, el plan reconoce objetos de conservación, amenazas y actores relevantes. No obstante, no se articula un modelo conceptual que relacione explícitamente las presiones, los factores causales y los valores ecológicos protegidos, lo cual limita la visión sistémica del problema.

En cuanto a “diseñar estrategias”, el plan presenta medidas generales, especialmente orientadas a la regulación del turismo y la fiscalización pesquera. Sin embargo, estas estrategias no están estructuradas en función de teorías del cambio ni cuentan con metas e indicadores de logro, lo que reduce su capacidad de implementación efectiva.

El componente “implementar acciones” presenta un nivel limitado de desarrollo. Aunque se identifican líneas estratégicas, no se asignan claramente responsables institucionales, plazos, recursos financieros ni mecanismos de coordinación, lo cual dificulta su ejecución.

En el componente “monitoreo y evaluación”, se evidenció una ausencia total de mecanismos. No se establecen indicadores ecológicos, sociales o de gestión que permitan evaluar el avance o efectividad del plan. Asimismo, no existe un sistema de retroalimentación que conecte el monitoreo con ajustes en la planificación.

Respecto a “gestión adaptativa”, el documento no contempla revisión periódica, ni incorpora procedimientos para actualizar el plan frente a nueva información, cambios normativos o variaciones ecológicas relevantes, como aquellas derivadas del cambio climático.

Finalmente, el componente de “documentación y aprendizaje” está ausente. No se proponen mecanismos de sistematización de experiencias ni de incorporación de aprendizajes desde otros contextos o áreas marinas protegidas del país.

Estos resultados se consolidan en la matriz de comparativa (**Tabla 5.2**), donde se clasificó el nivel de cumplimiento del plan para cada componente del estándar CMP v4.0, junto con su pertinencia específica respecto a la conservación de *Megaptera novaeangliae*

**Tabla 5.2.** Matriz comparativa del plan de manejo del PMFC según los estándares abiertos de conservación V4.0.

Componente de los Estándares Abiertos	Descripción esperada	Presencia en el Plan de Manejo del PMFC	Pertinencia para la conservación de <i>M. novaeangliae</i>	Observaciones / Brechas identificadas
<b>Objetos de conservación</b>	Identificación clara de los elementos clave a conservar (especies, hábitats, procesos ecológicos)	Sí	Alta	La ballena jorobada está explícitamente incluida como objeto prioritario.
<b>Amenazas directas</b>	Diagnóstico detallado de amenazas que afectan a los objetos de conservación	Sí	Alta	Se identifican amenazas específicas como el turismo y tráfico marítimo, pero no se desarrollan en escenarios futuros.
<b>Factores indirectos o causales</b>	Análisis de causas subyacentes de las amenazas (p. ej. actividades humanas, políticas públicas, etc.)	Parcial	Media	Se consideran factores como desconocimiento, poca fiscalización y falta de coordinación.
<b>Metas de conservación</b>	Definición de metas medibles y alcanzables para los objetos de conservación	No	Nula	No existen metas específicas asociadas a la recuperación o protección de la especie.
<b>Estrategias de manejo</b>	Propuesta de acciones claras y estructuradas para mitigar amenazas y alcanzar las metas	Parcial	Alta	Se proponen acciones generales, pero sin indicadores ni cronograma de implementación.
<b>Monitoreo y evaluación</b>	Indicadores, líneas base, frecuencia de seguimiento y mecanismos de evaluación de desempeño	No	Baja	No se mencionan mecanismos de seguimiento específicos para cetáceos.
<b>Participación de actores</b>	Inclusión de comunidades, organizaciones, academia y sector público en el diseño e implementación del plan	Sí	Media	Participación de Kawésqar y pescadores, pero sin planificación sistemática ni continuidad.
<b>Enfoque de gestión adaptativa</b>	Capacidad de ajustar el plan en función de resultados de monitoreo o cambios en el contexto ecológico	No	Baja	No se contempla adaptación explícita ante escenarios de cambio climático o nuevos datos.

### 5.1.3 Evaluación crítica: alcances y limitaciones

El análisis del Plan de Manejo del AMCP-MU Francisco Coloane revela que, si bien existen avances importantes en cuanto a la identificación de objetos de conservación y amenazas directas, el documento carece de elementos estructurales fundamentales para una gestión adaptativa basada en evidencia. Esta situación compromete la capacidad del área protegida para responder adecuadamente a los desafíos que plantea el cambio climático sobre la conservación de *Megaptera novaeangliae*.

Fortalezas identificadas:

- Reconocimiento explícito de *M. novaeangliae* como objeto de conservación prioritario, destacando su rol ecológico y simbólico en la región subantártica.
- Diagnóstico de amenazas directas, tales como tráfico marítimo, colisiones, enmallamientos y perturbación turística, que afectan directamente el hábitat de alimentación de la especie.
- Participación de actores clave, como comunidades Kawésqar, pescadores artesanales y operadores turísticos, lo que sienta las bases para procesos de gobernanza participativa.
- Zonificación del espacio marino, con áreas núcleo, de uso y amortiguación, que permite un cierto ordenamiento del territorio marino en función de los usos y conservación.

Limitaciones estructurales relevantes:

- Ausencia de metas de conservación específicas y medibles (SMART): El plan no define metas operativas orientadas a la protección o recuperación de *M. novaeangliae*. Esta omisión impide establecer estándares de evaluación del éxito de las acciones implementadas.
- Falta de indicadores de desempeño y protocolos de monitoreo: No se incluyen líneas base, frecuencias de seguimiento ni mecanismos de evaluación. Esto impide detectar cambios en el estado del hábitat o en la presencia estacional de la especie, lo cual es crítico en un contexto de cambio climático.
- Escasa integración de factores causales o indirectos: Si bien se reconocen amenazas directas, el plan no desarrolla suficientemente los factores estructurales que las originan o perpetúan, tales como vacíos normativos, limitada fiscalización o descoordinación institucional.
- Inexistencia de mecanismos de gestión adaptativa: El plan no contempla la posibilidad de revisar, ajustar o reformular sus estrategias a partir de resultados de monitoreo, cambios ecológicos o proyecciones climáticas. Esta rigidez es una limitante crítica ante escenarios de alta incertidumbre.

- Consideración parcial del cambio climático: Aunque se menciona como amenaza, el cambio climático no es tratado de forma estructurada ni se integran escenarios futuros, ni medidas de mitigación ni adaptación, lo cual resulta especialmente grave para una especie migratoria dependiente de condiciones oceanográficas dinámicas.
- Debilidad en el enfoque ecosistémico e interconectado: No se consideran procesos ecológicos a gran escala, como la conectividad entre zonas de alimentación y migración. Tampoco se analiza la relación entre *M. novaeangliae* y la productividad del sistema (disponibilidad de kril), ni su sensibilidad a cambios oceanográficos.

## 5.2 Modelación de distribución de especies

### 5.2.1 Registro de ocurrencias

Conforme a lo establecido en el procedimiento metodológico, se integraron las bases de datos provenientes de GBIF y OBIS, estandarizando sus campos principales (especie, latitud, longitud) y aplicando los filtros espaciales definidos. El recorte espacial se realizó utilizando la unión del polígono del Parque Marino Francisco Coloane con el del Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos (AMCP-MU FC), con el propósito de capturar tanto el núcleo de protección estricta como la zona de usos múltiples que conforman el ámbito efectivo de conservación y manejo.

Posteriormente, se efectuó un proceso de rarefacción espacial de 1 km, a fin de reducir el sesgo derivado de registros cercanos y sobre representación. Este procedimiento permite homogeneizar la distribución espacial de las ocurrencias, garantizando que cada celda de análisis aporte información independiente y evitando la sobreestimación de hábitats adecuados en zonas con mayor esfuerzo de muestreo. Los resultados del procesamiento se resumen en la **Tabla 5.3**.

**Tabla 5.3.** Resumen de datos de Ocurrencia.

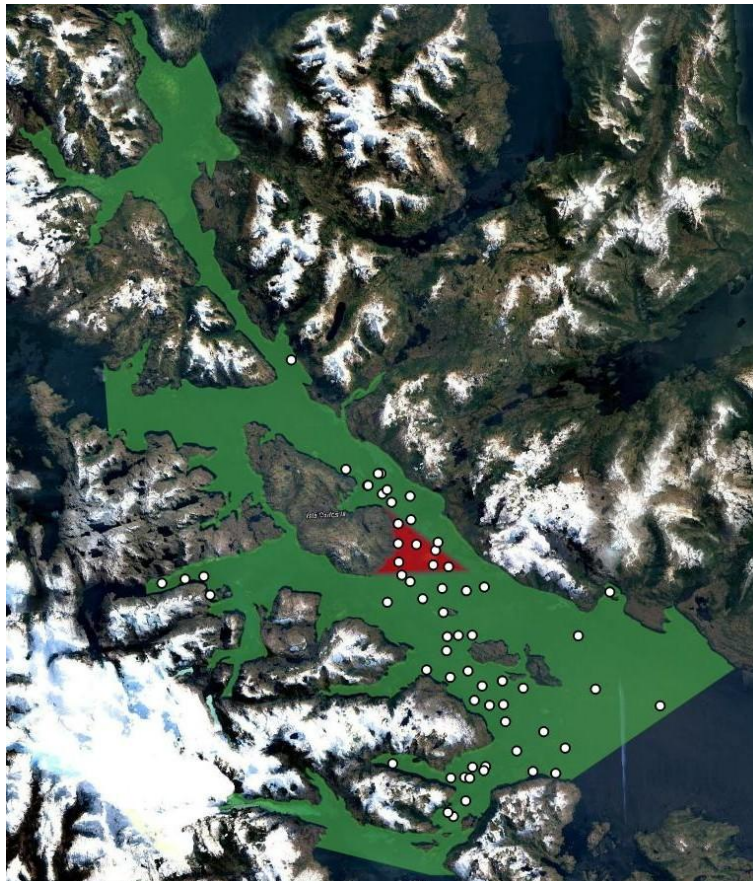
Fuente de datos	Registros válidos
GBIF	2.769
OBIS	212
Combinado (sin depurar)	2.981
Final procesado (tras recorte + rarefacción 1 km)	65

El procesamiento final recopiló 65 registros únicos de ocurrencia de *Megaptera novaengliae* dentro del polígono combinado (Parque Marino + AMCP-MU FC) (**Figura 5.1**). Ningún registro fue eliminado en la verificación final de duplicados o coordenadas inválidas, lo que indica una base depurada y consistente. El bounding box de la distribución espacial resultante corresponde a las coordenadas: -72.5331° a -71.94667° longitud y -53.8442° a -53.517° latitud.

Los archivos generados fueron exportados en dos formatos complementarios:

- CSV MaxEnt-ready, con columnas de latitud y longitud (requerido por el software de modelación).
- GPKG (GeoPackage), que permite la visualización y análisis en sistemas GIS.

Este conjunto de datos constituye la base de entrada para la modelación de distribución de hábitat potencial en condiciones históricas y bajo escenarios futuros de cambio climático. El script utilizado en Rstudio se puede revisar en el **Anexo 3**.



**Figura 5.1.** Ocurrencias *Megaptera novaengliae*

## 5.2.2 Preprocesamiento y correspondencia de variables ambientales

Durante la fase de preprocesamiento se generó una tabla de correspondencia que permitió estandarizar y clarificar la nomenclatura de las variables ambientales descargadas desde la base de datos Bio-ORACLE v3.0. Los archivos originales se encontraban en formato NetCDF con códigos poco intuitivos, por lo que fue necesario elaborar una tabla de referencia que vincula cada identificador técnico con su denominación científica y ecológica. Este procedimiento aseguró la correcta identificación de las variables en los análisis posteriores y facilitó su integración en los modelos de distribución de especies. La **Tabla 5.4** enlista las 17 variables consideradas tras el preprocesamiento, indicando el código original, la denominación estandarizada y su descripción ecológica.

**Tabla 5.4.** Correspondencia de variables ambientales utilizadas en el modelado.

Código	Variable estandarizada	Descripción ecológica
thetao	Temperatura del mar	Temperatura potencial del agua de mar en superficie
so	Salinidad	Concentración de sales en el agua de mar
sws	Velocidad de la corriente	Magnitud de las corrientes marinas
sdw	Dirección de la corriente	Dirección predominante de las corrientes marinas
no3	Nitrato	Concentración de nitrato disuelto (nutriente clave)
po4	Fosfato	Concentración de fosfato disuelto (nutriente clave)
si	Silicato	Concentración de silicato disuelto
o2	Oxígeno disuelto	Concentración de oxígeno en la columna de agua
dfe	Hierro disuelto	Concentración de hierro disuelto
phyc	Productividad primaria	Biomasa de fitoplancton (productividad primaria)
pH	pH	Acidez del agua de mar
chl	Clorofila-a	Indicador de biomasa Fito planctónica y productividad
sithick	Espesor de hielo marino	Grosor promedio de la capa de hielo marino
siconc	Cobertura de hielo marino	Porcentaje de superficie cubierta por hielo marino
clt	Cobertura nubosa	Proporción de nubosidad en la superficie
m1otst	Capa de mezcla oceánica	Profundidad de la capa de mezcla
tas	Temperatura del aire	Temperatura del aire a 2 metros de altura

En términos ecológicos, no todas las variables resultan igualmente relevantes para *Megaptera novaeangliae*. Estudios previos han demostrado que la ballena jorobada responde principalmente a la disponibilidad de alimento, lo que se refleja en la fuerte asociación con indicadores de productividad como la clorofila-a (*chl*), la biomasa fitoplanctónica (*phyc*) y la temperatura superficial del mar (*thetao*). Estos factores, junto con la estratificación de la columna de agua (*m1otst*) y la disponibilidad de oxígeno disuelto (*o2*), influyen directamente en la localización de áreas de alimentación (Meynecke et al., 2021). Del mismo modo, variables atmosféricas como la cobertura nubosa (*clt*) y la temperatura del aire (*tas*) se consideran secundarias, pues su efecto sobre la ecología de la especie es indirecto.

En consecuencia, si bien el conjunto inicial de variables ambientales contempladas son 17, la selección final se realiza mediante un análisis de colinealidad ( $r < 0.7$ ) y con base en la relevancia ecológica documentada en la literatura, priorizando aquellas relacionadas con temperatura, productividad primaria y nutrientes, que representan de mejor forma los procesos que determinan la distribución de la ballena jorobada.

### 5.2.3 Recorte y estandarización de variables ambientales

Siguiendo lo descrito en la metodología, se procedió al procesamiento de las variables ambientales obtenidas desde la base de datos Bio-ORACLE v3.0, con el fin de estandarizar su extensión espacial y formato para su uso en el modelado de distribución con MaxEnt.

En primer lugar, se aplicó un recorte espacial al polígono combinado (Parque Marino Francisco Coloane + AMCP-MU FC), asegurando que todas las capas representaran únicamente el ámbito geográfico de estudio. Este procedimiento permitió excluir información de áreas externas, reduciendo la carga computacional y aumentando la precisión del análisis.

Posteriormente, se realizó un proceso de interpolación de valores faltantes (NA) dentro del polígono, utilizando métodos de distancia inversa (IDW) para estimar valores ambientales en celdas sin información. Este paso fue necesario debido a que, en áreas de fiordos y canales, ciertos píxeles no contenían registros de variables climáticas oceánicas, lo que hubiera afectado la continuidad espacial de los modelos.

El preprocesamiento se implementó en RStudio, mediante un script que automatizó la lectura de archivos en formato NetCDF (.nc), la conversión a GeoTIFF (.tif), el recorte al polígono de estudio y la interpolación de valores faltantes. El resultado de este flujo generó un conjunto de 17 variables climáticas recortadas e interpoladas para cada horizonte temporal y escenario climático (Histórico 2010–2020, SSP1-1.9, SSP2-4.5 y SSP5-8.5; periodos 2020–2030, 2030–2040 y 2040–2050).

Finalmente, las variables fueron convertidas a formato ASCII (.asc) mediante un script en PyQGIS, el cual permitió procesar en lote todas las capas contenidas en las carpetas de salida del preprocesamiento, replicando la estructura de subcarpetas de escenarios y horizontes temporales. Como resultado, cada variable quedó disponible en formato compatible con MaxEnt, manteniendo su resolución de 5 arcmin (~9 km) y nomenclatura estandarizada según la tabla de variables ambientales (*thetao* = temperatura, *so* = salinidad, *chl* = clorofila, etc). **Revisar Anexo 4.**

El flujo completo puede resumirse en los siguientes productos:

- GeoTIFF recortados e interpolados: 17 variables por escenario/horizonte temporal.
- ASCII estandarizados para MaxEnt: 17 variables por escenario/horizonte temporal, organizadas en subcarpetas.
- Archivo resumen de variables (TXT), indicando el tipo de variable (continua o categórica), extensión espacial y resolución.

## 5.2.4 Modelo exploratorio para la selección de variables ambientales

### 5.2.4.1 Colinealidad y criterio ecológico.

El análisis de correlación de Spearman permitió evaluar la colinealidad entre las variables ambientales preseleccionadas, con el objetivo de evitar redundancia entre predictores y garantizar la parsimonia del modelo de distribución de *Megaptera novaeangliae*. El umbral adoptado fue  $|\rho| \geq 0.7$ , de acuerdo con criterios comúnmente empleados en estudios de modelación ecológica (Dormann et al., 2013; Merow et al., 2014). **Revisar Anexo 5**. Antes de realizar la modelación en Rstudio, se descartaron las variables sithick (espesor hielo marino), Siconc (Cobertura de hielo marino), Clt (cobertura nubosa) y Tas (Temperatura del aire superficial).

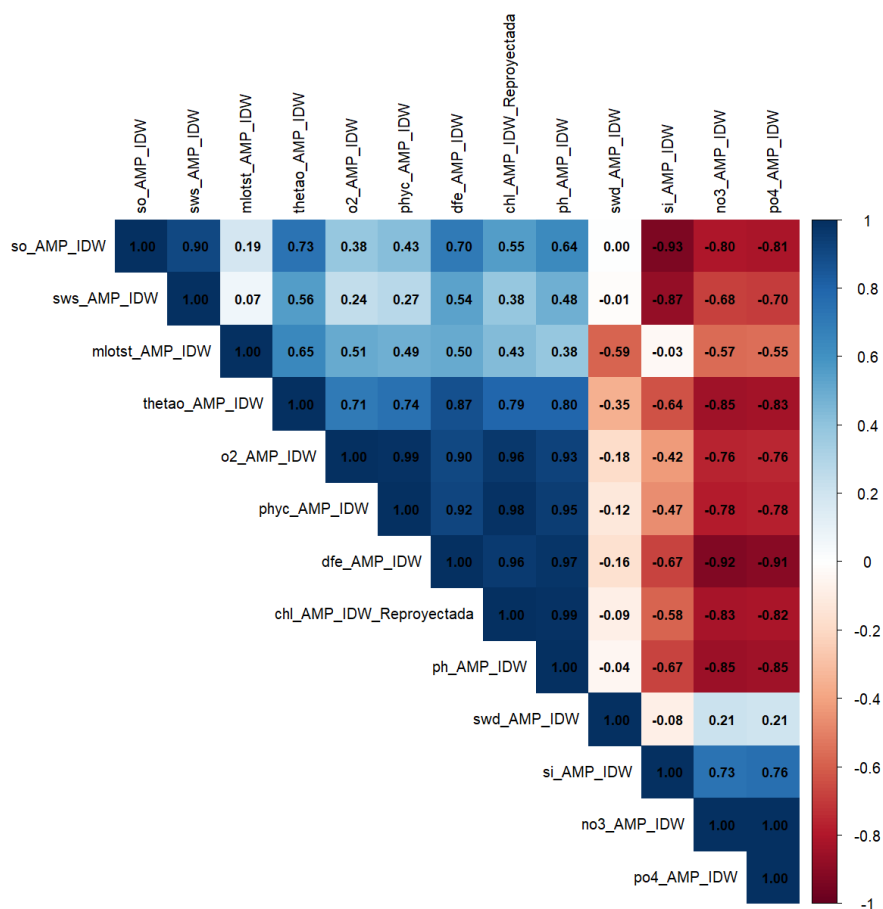


Figura 5.2. Matriz de spearman cálculo de colinealidad.

Producto de la matriz se desarrollaron dos tablas para clasificar los resultados, la **Tabla 5.5** de identificación general de colinealidad entre variables ambientales con su respectiva interpretación y la **Tabla 5.6** donde se puede observar una marcada colinealidad entre grupos de variables que representan procesos similares: (a) productividad primaria (o2, phyc, dfe, chl), y (b) nutrientes

inorgánicos (si, no3, po4). En cambio, variables fisicoquímicas como pH, salinidad, dirección de corrientes y profundidad de mezcla mostraron correlaciones bajas, aportando información independiente al modelo.

**Tabla 5.5.** Identificación general de colinealidad entre variables ambientales

Variable	Descripción	Rango de correlación ( $\rho$ )	Nivel de colinealidad	Interpretación
so	Salinidad superficial	0.19 – 0.90	Moderada a alta	Alta correlación con sws_AMP_IDW, pero baja con otras variables físicas.
sws	Velocidad superficial de la corriente marina	0.07 – 0.90	Alta	Colineal con salinidad; representa forzamiento físico similar.
m1otst	Profundidad de capa de mezcla	0.03 – 0.65	Baja a moderada	Relación parcial con temperatura (thetao).
thetao	Temperatura superficial del mar	0.35 – 0.79	Alta (con O <sub>2</sub> )	Variable térmica clave, correlacionada con oxígeno disuelto.
o2	Oxígeno disuelto	0.71 – 0.99	Muy alta	Colineal con productividad y temperatura.
phyc	Biomasa	0.74 – 1.00	Muy alta	Redundante con clorofila a y O <sub>2</sub> .
dfe	Hierro disuelto	0.79 – 0.98	Muy alta	Altamente correlacionado con indicadores de productividad.
chl	Clorofila a	0.55 – 1.00	Muy alta	Variable representativa de productividad primaria.
ph	pH	0.00 – 0.67	Baja	Independiente; indicador químico relevante.
swd	Dirección de corriente	0.08 – 0.21	Baja	Baja colinealidad; refleja circulación superficial.
si	Silicato	0.64 – 0.92	Alta	Correlacionado con nitrato y fosfato.
no3	Nitrato	0.68 – 0.85	Alta	Redundante con fosfato y silicato.
po4	Fosfato	0.76 – 0.91	Alta	Fuertemente correlacionado con nitrato y silicato.

**Tabla 5.6.** Variables altamente correlacionadas.

Grupo de colinealidad	Variables asociadas	$\rho$ máx. observado	Proceso ambiental representado
Grupo 1 – Productividad primaria	o2, phyc, dfe, chl	0.90 – 1.00	Procesos fotosintéticos y biogeoquímicos
Grupo 2 – Nutrientes disueltos	si, no3, po4	0.73 – 0.91	Disponibilidad de nutrientes y productividad secundaria
Grupo 3 – Propiedades físicas	so, sws	0.90	Dinámica de masas de agua superficiales
Grupo 4 – Intercambio térmico-oxígeno	thetao, o2	0.71	Estratificación térmica y ventilación oceánica

Los resultados presentes en la **Tabla 5.6** variables altamente correlacionadas, confirman que varias variables representan facetas del mismo proceso oceanográfico. Si se mantienen todas simultáneamente generarían sobreajuste en el modelo MaxEnt. Dado esto, se seleccionó un subconjunto mínimo que mantenga independencia estadística y relevancia ecológica, estas se pueden verificar en la **Tabla 5.7** selección final de variables ambientales.

**Tabla 5.7.** Selección final variables ambientales.

Variable seleccionada	Tipo	Rol ecológico	Justificación de selección	$\rho$ máx. observado
thetao	Temperatura superficial	Controla la distribución térmica y migratoria de <i>M. novaeangliae</i> .	Variable principal de los procesos oceánicos superficiales.	0.71
chl	Clorofila	Indicador de productividad primaria y disponibilidad de alimento.	Representa el proceso trófico más directamente vinculado a la especie.	0.55
so	Salinidad superficial	Refleja la estructura de masas de agua y su estabilidad.	Independiente y complementaria a la temperatura.	0.38
ph	Potencial de hidrógeno	Indica procesos de acidificación oceánica y balance químico.	Baja colinealidad; integra dimensión química del hábitat.	0.67
swd	Dirección de corriente marina	Refleja patrones de circulación y transporte de presas.	Baja colinealidad, aporta componente físico-dinámico al modelo.	0.21

El análisis de colinealidad permitió depurar el conjunto original de predictores ambientales, garantizando la independencia entre variables y evitando el sobreajuste del modelo. La selección final contempla la temperatura superficial, clorofila, salinidad, pH y dirección de corriente marina, constituye un conjunto ecológicamente coherente y estadísticamente estable para describir las condiciones que determinan la distribución potencial de *Megaptera novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane.

## 5.2.5 Pruebas modelo exploratorio y evaluación del modelo

### 5.2.5.1 Desempeño general del modelo

El modelo obtuvo un AUC promedio de prueba =  $0,678 \pm 0,077$ , valor que refleja una capacidad discriminativa moderada y consistente con un modelo exploratorio bien calibrado. La curva de omisión/comisión evidencia una alta concordancia entre la omisión observada y la predicha, sin evidencias de sobreajuste. Las desviaciones estándar fueron bajas, confirmando estabilidad entre réplicas. En la **Figura 5.3** se puede apreciar la capacidad discriminativa moderada del modelo.

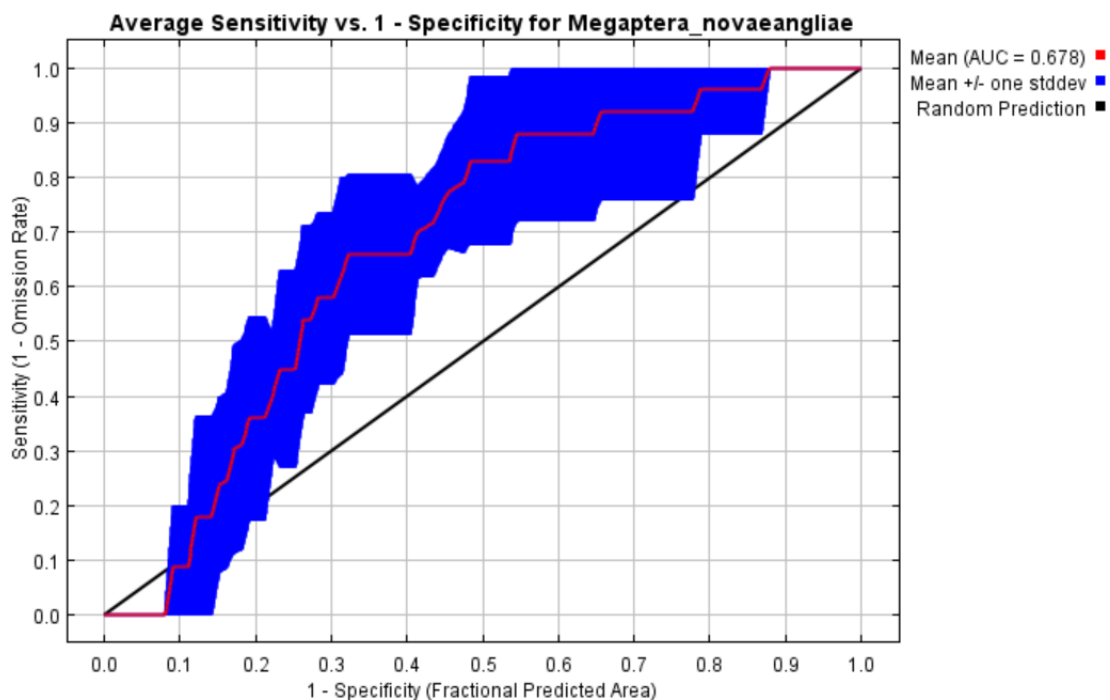
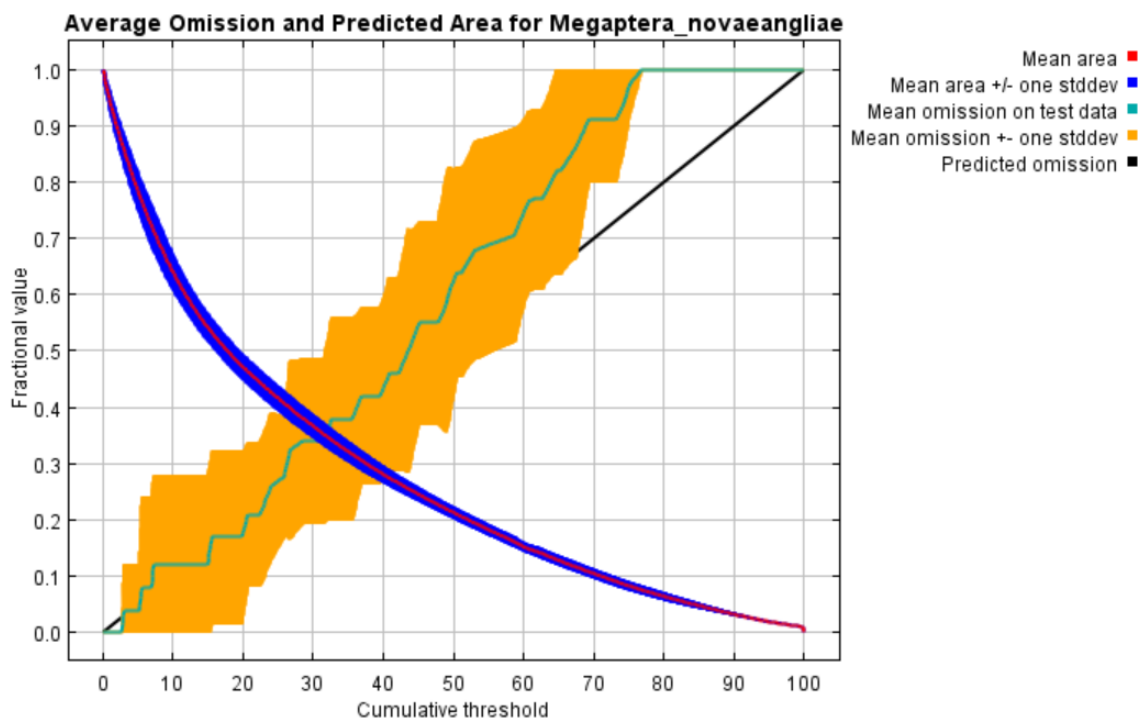


Figura 5.3. Promedio de prueba de sensibilidad.

### 5.2.5.2 curva de omisión/comisión

El gráfico de omisión-comisión **Figura 5.4** evidencia una adecuada calibración del modelo exploratorio (SSP1-1.9, 2020–2030). La tasa de omisión observada (línea verde) se mantiene muy próxima a la omisión predicha (línea negra), lo que indica coherencia entre los datos de entrenamiento y prueba y ausencia de sobreajuste. La banda de desviación estándar (zona naranja) es estrecha a lo largo de todo el rango de umbrales, reflejando alta estabilidad entre réplicas.

Asimismo, la curva de área promedio (línea roja) muestra una disminución progresiva del área predicha a medida que aumenta el umbral acumulado, lo que denota un comportamiento lógico del modelo, en el que la extensión del hábitat adecuado se reduce conforme se incrementa la exigencia en la idoneidad ambiental. En conjunto, estos resultados confirman que el modelo presenta una calibración interna sólida, bajo error de omisión y predicciones estables, siendo representativo para la fase exploratoria del escenario histórico considerado.



**Figura 5.4.** Gráfico curvo de Omisión y comisión modelo exploratorio.

### 5.2.5.3 Contribución e importancia del modelo

Como resultado de la contribución e importancia del modelo, se diseñó la **Tabla 5.8** donde se presenta el porcentaje de contribución y la importancia por permutación de las variables, las tres primeras variables explican el 96,3 % del ajuste total, evidenciando un modelo dominado por gradientes físicos de la capa superficial del océano.

**Tabla 5.8.** Porcentaje de contribución de las variables ambientales al modelo.

Variable	Contribución (%)	Importancia por permutación (%)
so_AMP_IDW	64,4	51,6
swd_AMP_IDW	20,0	27,4
ph_AMP_IDW	11,9	17,7
chl_AMP_IDW	3,2	2,8
thetao_AMP_IDW	0,5	0,5

### 5.2.5.4 Jackknife de AUC

El Jackknife de AUC evidencia que la salinidad superficial (so\_AMP\_IDW) es la variable con mayor poder discriminativo (**Figura 5.5**). Cuando se utiliza de manera aislada, el AUC alcanza valores cercanos a 0,69, prácticamente iguales al modelo completo (AUC total =  $0,678 \pm 0,077$ ). Al eliminarla, el AUC cae por debajo de 0,63, reflejando una pérdida significativa de capacidad predictiva.

En contraste, la exclusión de las variables chl\_AMP\_IDW o thetao\_AMP\_IDW apenas modifica el AUC, confirmando su bajo aporte informativo. La Dirección de corriente marina (swd\_AMP\_IDW) y el pH superficial (ph\_AMP\_IDW) mantienen valores intermedios (AUC entre 0,67 y 0,65) cuando se usan individualmente, indicando una contribución secundaria pero relevante.

En conjunto, el Jackknife de AUC indica que la salinidad superficial contiene la mayor cantidad de información independiente, seguida por la corriente superficial, mientras que las demás variables poseen señales redundantes o marginales.

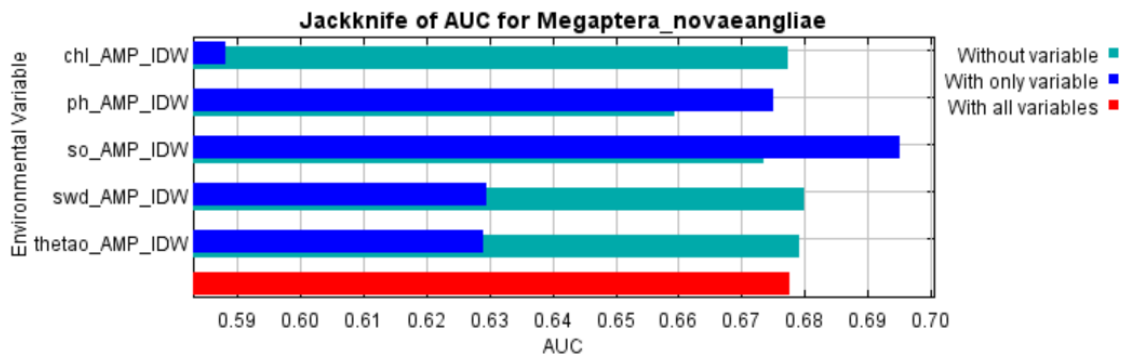


Figura 5.5. Prueba Jackknife de AUC *M. Novaengliae*.

### 5.2.5.5 Jackknife de ganancia de prueba

En la ganancia de prueba, que mide la capacidad del modelo para generalizar en datos independientes, se observa una clara diferenciación en la contribución de las variables ambientales (Figura 5.6):

- so\_AMP\_IDW alcanza la mayor ganancia individual (~0,16), confirmándose como la variable más influyente en la discriminación entre sitios de presencia y fondo.
- ph\_AMP\_IDW y thetao\_AMP\_IDW presentan aportes moderados (~0,08–0,09), contribuyendo de manera complementaria al ajuste global del modelo.
- swd\_AMP\_IDW muestra una ganancia individual baja (~0,04), pero su exclusión reduce ligeramente la ganancia global, lo que sugiere que aporta información secundaria relevante al interactuar con otras variables.
- chl\_AMP\_IDW exhibe una ganancia individual prácticamente nula, indicando que no añade información predictiva independiente.

En conjunto, este patrón confirma que la información ambiental clave para diferenciar presencias y fondo se concentra principalmente en la salinidad, complementada por las condiciones químicas (pH) y dinámicas del agua (corrientes).

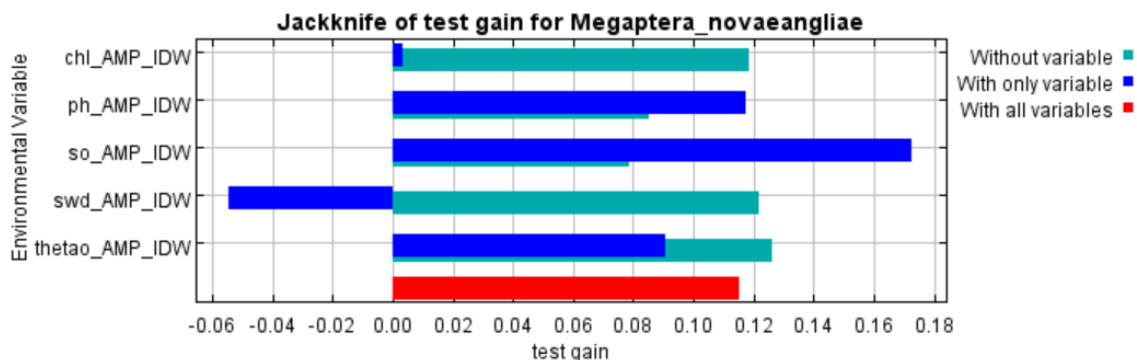


Figura 5.6. Prueba Jackknife de ganancia *M. novaengliae*.

### 5.2.5.6 Jackknife de ganancia regularizada de entrenamiento

La ganancia regularizada de entrenamiento que evalúa la capacidad explicativa interna penalizando la complejidad muestra un patrón paralelo (Figura 5.7):

- **so\_AMP\_IDW** es nuevamente la variable más informativa cuando se usa de forma individual ( $\sim 0,21$ ), y su exclusión provoca una reducción notable en la ganancia total, lo que evidencia su carácter no redundante y su alta relevancia en el ajuste.
- **ph\_AMP\_IDW** presenta una ganancia individual elevada ( $\sim 0,17$ ) y una reducción considerable al ser excluida, destacándose como el segundo predictor más importante.
- **swd\_AMP\_IDW** exhibe baja ganancia individual ( $\sim 0,06$ ), pero su exclusión también reduce la ganancia global, sugiriendo que aporta información complementaria relacionada con la dinámica de las corrientes.
- **chl\_AMP\_IDW** y **thetao\_AMP\_IDW** muestran contribuciones mínimas, sin impacto apreciable al ser incluidas o excluidas.

En conjunto, la salinidad y el pH emergen como las principales variables explicativas del modelo, seguidas por las corrientes, mientras que la clorofila y la temperatura potencial presentan escasa relevancia predictiva.

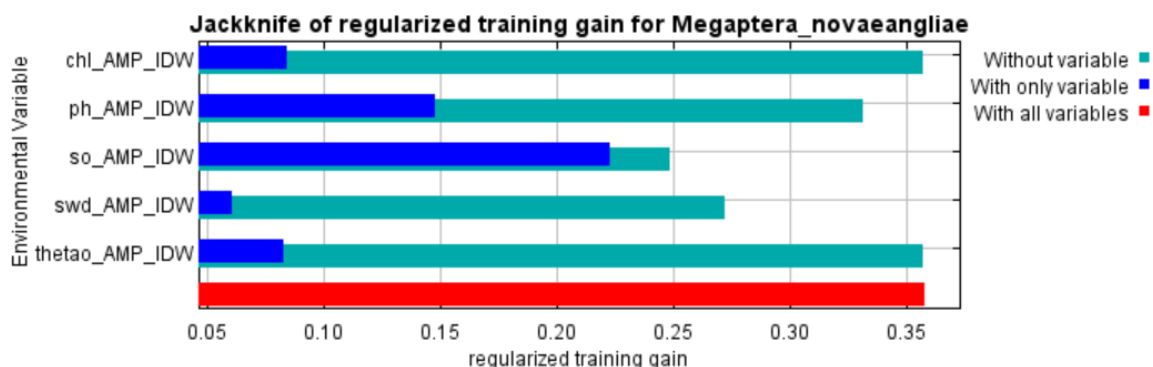
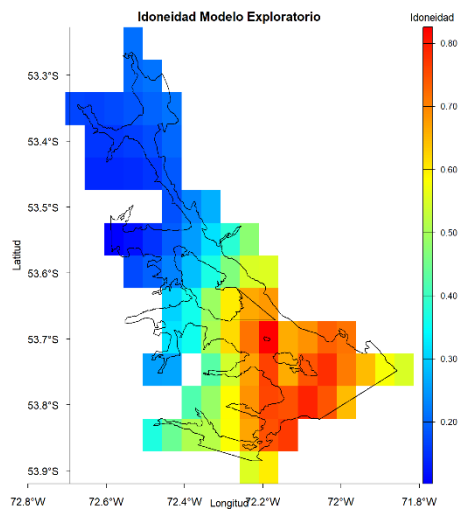


Figura 5.7. Prueba Jackknife de ganancia de entrenamiento *M. Novaengliae*.

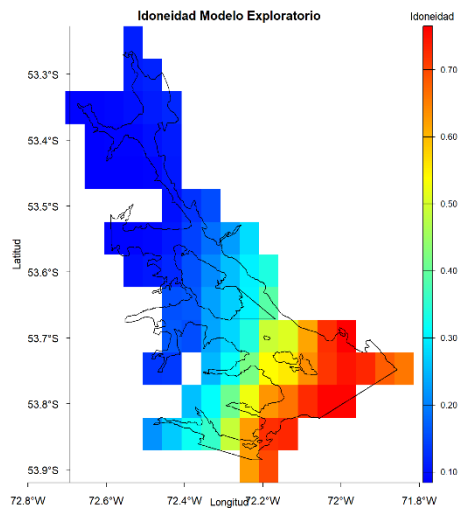
El análisis conjunto de las tres pruebas Jackknife permite afirmar que la salinidad (**so\_AMP\_IDW**) explica la mayor parte de la variabilidad del modelo, funcionando como predictor dominante e independiente. La dirección de corriente marina (**swd\_AMP\_IDW**) y el pH (**ph\_AMP\_IDW**) contribuyen a refinar el ajuste, pero no son determinantes por sí solas. En contraste, las variables **chl\_AMP\_IDW** y **thetas\_AMP\_IDW** no afectan significativamente la ganancia ni el AUC, por lo que pueden ser descartadas o sustituidas en etapas de calibración posterior.

### 5.2.5.7 Mapas de Idoneidad

Se obtuvieron dos mapas de idoneidad en el modelo exploratorio, el primero **Figura 5.8:** Mapa de idoneidad histórico y el segundo **Figura 5.9:** Mapa de idoneidad SSP1 1.9 2020-2030. Ambos mapas procesados con los resultados de Maxent trabajando con la media de las cinco iteraciones en Rstudio.



**Figura 5.8.** Mapa idoneidad media Histórico modelo exploratorio *M. Novaengliae*.



**Figura 5.9.** Mapa Idoneidad Futuro escenario Ssp 1 1.9 2020-2030.

## 5.2.6 Análisis de representatividad

Los resultados del análisis de representatividad se obtuvieron a partir de la clasificación binaria realizada en cada escenario, los mapas se encuentran en el apartado de anexos desde el **Anexo 10**, hasta el **Anexo 10.10**. Los resultados del cálculo de áreas se presentan en la **Tabla 5.9**.

### 5.2.6.1 Clasificación Binaria del hábitat

#### Clasificación Binaria del hábitat para Escenario Histórico 2010-2020

El modelo correspondiente al escenario histórico (mediana del periodo base) muestra que las áreas con condiciones ambientales favorables para *Megaptera novaeangliae* se concentran principalmente en el sector sur y sureste del Parque Marino Francisco Coloane, entre las coordenadas aproximadas 53.75°S y 53.85°S de latitud sur, y 72.3°W y 72.1°W de longitud oeste (**Anexo 10.1**). Estas zonas, representadas en color rojo, corresponden a áreas interiores y resguardadas del parque, caracterizadas por condiciones oceanográficas estables y alta productividad biológica. En contraste, las áreas clasificadas como no adecuadas (en azul) se ubican mayormente hacia el sector norte y central del sistema, entre 53.35°S-53.6°S y 72.5°W-72.3°W, donde la exposición al océano abierto y las variaciones térmicas son mayores. Estas condiciones disminuyen la probabilidad de presencia de la especie y reducen la idoneidad del hábitat.

En conjunto, el escenario histórico representa una condición base de alta representatividad del hábitat dentro del sistema de conservación, validando la efectividad del PMFC para proteger las áreas críticas de alimentación y descanso de *M. novaeangliae* bajo condiciones ambientales actuales.

#### Clasificación Binaria del Hábitat para Escenario SSP1-1.9 (2020-2030)

El modelo correspondiente al escenario SSP1-1.9 para el periodo 2020-2030 muestra que las áreas con condiciones ambientales favorables para *Megaptera novaeangliae* se concentran principalmente en el sector sur y sureste del sistema Francisco Coloane, entre las coordenadas aproximadas 53.7°S y 53.85°S de latitud sur, y 72.3°W y 72.1°W de longitud oeste. Estas zonas, representadas en color rojo, incluyen porciones interiores y resguardadas del canal, caracterizadas por aguas más estables, elevada productividad fitoplanctónica y abundancia de presas zooplanctónicas. **Revisar Anexo 10.2.**

Las áreas clasificadas como no adecuadas (en azul) se ubican mayormente hacia el sector norte y central, entre 53.4°S y 53.6°S, donde la exposición al océano abierto, las corrientes más intensas y las variaciones térmicas limitan la idoneidad del hábitat.

Estos resultados sugieren una alta representatividad del hábitat adecuado dentro del Parque Marino Francisco Coloane, lo que evidencia su efectividad para conservar zonas críticas de alimentación estival. En tanto, el Área Marina de Múltiples Usos Francisco Coloane mantiene

sectores de menor idoneidad al oeste del parque, que podrían actuar como zonas de conectividad y amortiguación ecológica. En conjunto, este escenario inicial proyecta una condición estable y representativa del hábitat bajo bajas emisiones, coherente con las condiciones actuales de productividad en el canal.

#### **Clasificación Binaria del Hábitat para Escenario SSP1-1.9 (2030-2040)**

En el periodo 2030-2040, el modelo proyecta una ampliación significativa del hábitat adecuado, evidenciada por la cobertura continua de áreas rojas a lo largo del sistema, desde los 53.35°S hasta 53.85°S, y entre 72.5°W y 72.0°W. A diferencia del escenario anterior, casi la totalidad del polígono presenta condiciones favorables, incluyendo sectores del norte y del canal central que anteriormente se clasificaban como no aptos. **Revisar Anexo 10.3.**

Este patrón indica una expansión de las condiciones óptimas de hábitat para la especie bajo escenarios de mitigación climática fuerte (SSP1-1.9), probablemente asociada a temperaturas moderadas del mar y alta disponibilidad trófica durante el periodo estival. La homogeneidad observada sugiere una mayor estabilidad oceanográfica y posible incremento en la productividad fitoplanctónica en todo el sistema. Desde una perspectiva de conservación, el PMFC y la AMCP presentan una cobertura casi total del hábitat adecuado, lo que refleja un escenario de máxima representatividad y conectividad ecológica interna, favoreciendo la permanencia y actividad trófica de *M. novaeangliae* en toda la región del canal.

#### **Clasificación Binaria del Hábitat para Escenario SSP1-1.9 (2040-2050)**

El modelo correspondiente al periodo 2040-2050 muestra un patrón de retracción parcial del hábitat adecuado, con una distribución espacial similar a la observada en el escenario inicial (2020-2030). Las áreas favorables se concentran nuevamente en el sector sur y sureste del parque, entre 53.7°S–53.85°S y 72.3°W–72.1°W, y en menor medida en porciones interiores del canal central. **Revisar anexo 10.4.** En contraste, se observa un aumento de áreas no adecuadas (en azul) en el sector norte (53.3°S–53.5°S) y zonas medias expuestas al océano abierto hacia 72.5°W, lo que sugiere un posible aumento en la variabilidad térmica y disminución en la estabilidad trófica hacia mediados de siglo, aun bajo un escenario de bajas emisiones.

Desde el punto de vista de la conservación, el PMFC mantiene la mayor proporción del hábitat adecuado, mientras que el AMUFC conserva su rol secundario de conectividad, aunque con una ligera reducción del área favorable respecto al escenario anterior. Este comportamiento podría interpretarse como una respuesta no lineal a la variabilidad climática, reflejando una fase de ajuste en las condiciones oceanográficas locales. En síntesis, el periodo 2040-2050 conserva una alta representatividad, aunque ligeramente inferior a la década anterior.

### **Clasificación Binaria del Hábitat para Escenario SSP2-4.5 (2020–2030)**

El modelo correspondiente al escenario SSP2-4.5 para el periodo 2020–2030 muestra que las áreas con condiciones ambientales favorables para *Megaptera novaeangliae* se concentran principalmente en el sector sur y sureste del sistema Francisco Coloane, entre las coordenadas 53.7°S y 53.85°S de latitud sur, y 72.3°W-72.1°W de longitud oeste. Estas zonas, representadas en color rojo, corresponden a los canales interiores y áreas protegidas del Parque Marino Francisco Coloane (PMFC), donde predominan condiciones oceanográficas más estables, aguas frías y elevada productividad biológica.

Las áreas clasificadas como no adecuadas (en azul) se distribuyen hacia el norte y centro del parque, aproximadamente entre 53.35°S–53.6°S y 72.5°W-72.3°W, lo que refleja una mayor exposición a corrientes oceánicas y variabilidad térmica. Estas condiciones reducen la estabilidad del hábitat y limitan su idoneidad para actividades de alimentación.

En términos de conservación, el PMFC mantiene una alta representatividad del hábitat adecuado, mientras que el Área Marina de Múltiples Usos Francisco Coloane conserva una franja secundaria al oeste que podría funcionar como zona de conectividad trófica. En conjunto, este primer periodo del escenario intermedio proyecta un estado ambiental aún favorable, aunque ligeramente más restringido que en el escenario de bajas emisiones (SSP1-1.9).

### **Clasificación Binaria del Hábitat para Escenario SSP2-4.5 (2030–2040)**

Durante el periodo 2030–2040, el modelo muestra una reducción notoria del hábitat adecuado en el sistema Francisco Coloane. Las áreas de idoneidad (rojo) se limitan principalmente al sector sur del PMFC, entre 53.7°S y 53.8°S, y a una pequeña porción del canal central hacia 72.2°W-72.1°W, mientras que las zonas norte y oeste pasan a clasificarse como no adecuadas (azul).

Esta contracción podría asociarse a un aumento en la temperatura superficial del mar y una mayor estratificación de la columna de agua, lo que reduce la mezcla vertical y, en consecuencia, la disponibilidad de nutrientes y presas zooplanctónicas. Tales cambios limitan la presencia de condiciones favorables para la alimentación de *M. novaeangliae*, restringiendo su distribución a sectores interiores más resguardados.

Desde una perspectiva de gestión, este resultado sugiere un periodo de vulnerabilidad transitoria del hábitat dentro del PMFC, con disminución de la conectividad hacia el AMUFC. La reducción espacial observada enfatiza la necesidad de monitorear las condiciones oceanográficas del canal y su influencia en los patrones tróficos de la especie.

### **Clasificación Binaria del Hábitat para Escenario SSP2-4.5 (2040–2050)**

El modelo proyectado para el periodo 2040-2050 evidencia una recuperación sustancial del hábitat adecuado, alcanzando nuevamente una cobertura amplia y continua en todo el sistema Francisco Coloane. Las áreas idóneas (rojo) se extienden desde los 53.35°S hasta 53.85°S, abarcando tanto los sectores interiores como los más externos hacia 72.5°W-72.0°W.

Este patrón de expansión sugiere una reestabilización de las condiciones oceanográficas locales, posiblemente asociada a procesos de mezcla vertical y renovación de aguas frías que restauran la productividad primaria y la disponibilidad de presas eufáusidas. En consecuencia, el hábitat de alimentación y descanso de *M. novaeangliae* vuelve a ocupar la mayor parte del PMFC y se extiende hacia el AMCP, reforzando su rol como zona de conectividad ecológica.

Desde el punto de vista de conservación, este resultado refleja la capacidad de resiliencia del ecosistema de Francisco Coloane frente a las fluctuaciones ambientales de un escenario de emisiones moderadas. El PMFC mantiene su papel de núcleo ecológico estable, mientras que el AMUFC aporta flexibilidad espacial ante variaciones climáticas de mediano plazo

### **Clasificación Binaria del Hábitat para Escenario SSP5-8.5 (2020–2030)**

El modelo correspondiente al escenario SSP5-8.5 para el periodo 2020-2030 muestra que las áreas ambientalmente favorables para *Megaptera novaeangliae* se concentran principalmente en el sector sur y sureste del Parque Marino Francisco Coloane (PMFC), entre aproximadamente 53.7°S y 53.85°S de latitud sur y 72.3°W-72.1°W de longitud oeste. Estas zonas, representadas en color rojo, corresponden a canales interiores y sectores resguardados caracterizados por condiciones oceanográficas frías, alta estabilidad térmica y elevada productividad biológica.

Por contraste, las áreas no adecuadas (en azul) se localizan en el sector norte y central del sistema, entre 53.4°S y 53.6°S, y hacia el oeste del canal (72.5°W-72.3°W), donde la exposición al océano abierto y las fluctuaciones de temperatura superficial son mayores. Este patrón sugiere una disminución inicial del hábitat adecuado respecto al escenario SSP2-4.5, reflejando el inicio de los efectos de un contexto climático más cálido sobre la estabilidad ambiental del área.

El PMFC mantiene la mayor proporción del hábitat adecuado, mientras que el Área Marina de Múltiples Usos Francisco Coloane conserva una función secundaria, principalmente en su límite sur, lo que indica una reducción espacial progresiva del hábitat óptimo bajo condiciones de emisiones elevadas.

### **Clasificación Binaria del Hábitat para Escenario SSP5-8.5 (2030–2040)**

Durante el periodo 2030-2040, el modelo proyecta una disminución adicional del hábitat adecuado, manteniendo únicamente áreas favorables en el sector sur del PMFC entre 53.75°S y 53.85°S y en zonas interiores hacia 72.2°W–72.1°W. La franja central y norte del sistema presenta una dominancia de áreas no adecuadas (azul), evidenciando una pérdida progresiva de idoneidad ambiental en comparación con décadas anteriores.

Este patrón sugiere que el aumento sostenido de la temperatura superficial del mar (TSM) y la reducción de la productividad primaria afectan de manera directa la disponibilidad de presas zooplanctónicas, reduciendo la calidad trófica del hábitat. Además, el incremento en la estratificación de la columna de agua limita la mezcla vertical, disminuyendo la concentración de nutrientes en la capa superficial.

En términos de conservación, el PMFC mantiene un núcleo funcional de hábitat favorable, pero la conectividad hacia el AMCP se ve comprometida. Este escenario anticipa un deterioro gradual de las condiciones oceanográficas locales, especialmente en los sectores expuestos al océano abierto, lo que podría afectar la persistencia de áreas de alimentación estival.

### **Clasificación Binaria del Hábitat para Escenario SSP5-8.5 (2040–2050)**

El modelo correspondiente al periodo 2040–2050 refleja una reducción drástica del hábitat adecuado dentro del sistema Francisco Coloane. Las zonas clasificadas como favorables (rojas) se restringen a una pequeña franja en el extremo noroeste, cerca de los 53.4°S y 72.6°W, mientras que la totalidad del PMFC y el AMCP se presentan como no adecuadas (azul).

Esta situación representa un escenario crítico de pérdida de idoneidad ambiental, probablemente resultado del aumento pronunciado de la temperatura, la disminución en la productividad fitoplanctónica y los cambios en la circulación marina asociados al calentamiento global. Bajo este contexto, las condiciones oceanográficas locales dejarían de ser favorables para la alimentación y el descanso de *M. novaeangliae*, provocando una relocalización potencial de la especie hacia zonas más australes o expuestas al estrecho de Magallanes.

Desde el punto de vista de conservación, este periodo evidencia una pérdida casi total del hábitat adecuado dentro del parque, lo que subraya la vulnerabilidad del sistema ante escenarios de altas emisiones y el riesgo de pérdida funcional del PMFC como sitio crítico para la especie. Este resultado resalta la importancia de implementar medidas de gestión adaptativa y monitoreo oceanográfico continuo frente a escenarios de cambio climático extremo.

## 5.2.6.2 Representatividad espacial del hábitat adecuado

La **Tabla 5.9** presenta los resultados del análisis de representatividad espacial del hábitat potencialmente adecuado para *Megaptera novaeangliae*, considerando los tres escenarios climáticos evaluados (SSP1-1.9, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) y tres períodos decenales proyectados (2020–2030, 2030–2040 y 2040–2050). Los valores expresan tanto las áreas absolutas (km<sup>2</sup>) como los porcentajes relativos de hábitat adecuado contenidos dentro del Parque Marino Francisco Coloane y dentro del Área Marina de Múltiples Usos (Excluyendo el parque).

**Tabla 5.9.** Matriz resumen espacial del hábitat adecuado de *Megaptera novaeangliae* dentro del Parque Marino Francisco Coloane bajo escenarios actuales y futuros 2025

Escenario	Área total de hábitat (km <sup>2</sup> )	Hábitat dentro del PMFC (km <sup>2</sup> )	Hábitat en AMUFC fuera del PMFC (km <sup>2</sup> )	% dentro del PMFC	% dentro del AMUFC (sin PMFC)
histórico 2010-2020	307,8	8,1	294,5	2,6	95,7
SSP1 1.9 2020–2030	396,1	10,3	380,4	2,6	96,0
SSP1 1.9 2030–2040	664,8	10,3	649,2	1,6	97,6
SSP1 1.9 2040-2050	396,1	10,3	380,5	2,6	96,0
SSP2 4.5 2020-2030	410,0	10,3	394,4	2,5	96,2
SSP2 4.5 2030-2040	351,5	2,2	344,0	0,6	97,8
SSP2 4.5 2040-2050	664,8	10,3	649,2	1,6	97,6
SSP5 8.5 2020-2030	374,9	2,2	367,4	0,6	97,9
SSP5 8.5 2030-2040	219,9	0	214,7	0	97,6
SSP5 8.5 2040-2050	104,1	0	104,1	0	100

La **Tabla 5.9** resume estos resultados en valores absolutos y relativos. En ella se puede observar que:

- El área total de hábitat adecuado disminuye progresivamente desde el escenario SSP1-1.9 hacia el SSP5-8.5, confirmando la tendencia de contracción del hábitat bajo condiciones climáticas más severas.
- El porcentaje del hábitat dentro del PMFC es máximo en el escenario SSP1-1.9, intermedio en SSP2-4.5 y mínimo en SSP5-8.5, evidenciando una pérdida gradual de representatividad interna.
- El porcentaje dentro del AMUFC fuera del parque sigue la tendencia inversa, lo que refleja el papel compensatorio del área de múltiples usos en los escenarios de mayor estrés ambiental.

### 5.2.6.3 Análisis comparativo multitemporal

Los resultados del análisis comparativo multitemporal permiten evaluar la variación en la extensión y representatividad espacial del hábitat adecuado de *Megaptera novaeangliae* dentro del Parque Marino Francisco Coloane (PMFC) bajo distintos escenarios climáticos y periodos proyectados. En la **Tabla 5.9** se sintetizan las áreas totales, la superficie de hábitat dentro del parque y la proporción porcentual respecto del total proyectado, considerando los tres escenarios climáticos seleccionados (SSP1-1.9, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) para los periodos 2020–2030 y 2040–2050.

#### Escenario SSP1-1.9 (bajas emisiones)

El escenario SSP1-1.9 muestra una alta estabilidad en el área total de hábitat adecuado entre los periodos analizados. Tanto en 2020-2030 como en 2040-2050, el área total se mantiene en 396,1 km<sup>2</sup>, con 10,35 km<sup>2</sup> dentro del PMFC, equivalentes a un 2,61% de representatividad. Esta condición indica que el parque mantiene su capacidad para albergar hábitats esenciales de la especie, sin variaciones significativas a lo largo del tiempo. Además, el 96% del hábitat proyectado se localiza fuera del parque, principalmente dentro del Área Marina de Múltiples Usos Francisco Coloane (AMUFC), lo que sugiere una distribución estable y continua del hábitat en el sistema bajo condiciones de bajas emisiones. En síntesis, el escenario SSP1-1.9 evidencia un mantenimiento total del hábitat y de su representatividad, confirmando la resiliencia ambiental del sistema frente a condiciones climáticas moderadas y reforzando el rol del PMFC como área núcleo de conservación.

#### Escenario SSP2-4.5 (emisiones intermedias)

El escenario intermedio SSP2-4.5 presenta variaciones más notorias entre los periodos comparados. En el intervalo 2020-2030, el área total de hábitat adecuado alcanza 410,03 km<sup>2</sup>, mientras que para 2040–2050 aumenta a 664,8 km<sup>2</sup>, lo que representa una ganancia de 254,77 km<sup>2</sup>, equivalente a un incremento del 62,1% respecto del valor inicial. A pesar de este aumento en la extensión total, la representatividad dentro del PMFC disminuye levemente de 2,52% a 1,56%, manteniendo una superficie interna constante de 10,35 km<sup>2</sup>. Esto indica que, si bien el parque conserva su área favorable, el hábitat adecuado se expande principalmente fuera de sus límites, en dirección al AMUFC, donde se concentra más del 97% del hábitat proyectado. El escenario SSP2-4.5, por tanto, refleja una expansión externa del hábitat asociada a condiciones oceanográficas variables, lo que sugiere un aumento de conectividad ecológica fuera del PMFC, pero también una reducción relativa de su representatividad interna. En términos de gestión, este patrón enfatiza la necesidad de ampliar la mirada de conservación hacia las áreas colindantes del parque.

## Escenario SSP5-8.5 (altas emisiones)

Bajo el escenario de altas emisiones, se observa una pérdida drástica y progresiva del hábitat adecuado. Entre 2020-2030 y 2040-2050, el área total disminuye de 374,94 km<sup>2</sup> a 104,1 km<sup>2</sup>, lo que equivale a una reducción del 72,2% del hábitat proyectado. La situación dentro del PMFC es aún más crítica: la superficie de hábitat adecuado desaparece completamente, pasando de 2,28 km<sup>2</sup> (0,61%) en 2020-2030 a 0 km<sup>2</sup> (0%) en 2040-2050. Esto indica una pérdida total de la capacidad del parque para albergar hábitats esenciales bajo un escenario de calentamiento acelerado. En este contexto, el 100% del hábitat remanente se proyecta fuera del parque, principalmente en áreas externas del AMCP. Este comportamiento refleja un colapso funcional del hábitat dentro del PMFC, asociado al aumento sostenido de la temperatura superficial del mar, la disminución de la productividad biológica y la alteración de la circulación oceánica local. En consecuencia, el hábitat de *M. novaeangliae* tendería a desplazarse hacia latitudes más australes o abiertas al estrecho de Magallanes, fuera del sistema de protección actual.

### 5.2.7 Proyección de escenarios

#### 5.2.7.1 Distribución Actual *Megaptera novaeangliae* en Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos (AMCP-MU) Francisco Coloane y Parque Marino Francisco Coloane

El modelo exploratorio de idoneidad de hábitat para *Megaptera novaeangliae* representa una condición base del sistema marino Francisco Coloane, construida a partir de variables ambientales actuales y patrones observados de presencia de la especie. Bajo este contexto, el mapa de la **Figura 5.10** Idoneidad del hábitat, permite identificar los sectores que presentan las condiciones más favorables para la especie dentro del Parque Marino Francisco Coloane (PMFC) y su entorno inmediato.

Las zonas con mayor idoneidad ambiental (valores entre 0.7 y 0.8) se concentran principalmente hacia el sector oriental y sudoriental del parque, entre las coordenadas 53.7°S-53.85°S de latitud y 72.3°W-72.1°W de longitud. Estas áreas corresponden a canales interiores y bahías protegidas, caracterizadas por aguas más estables, alta disponibilidad de presas zooplanctónicas y elevada productividad fitoplanctónica, factores que favorecen la alimentación y el descanso estival de la especie.

En cambio, las zonas del sector occidental y norte del sistema muestran valores bajos de idoneidad (<0.3), asociados a aguas más frías, profundas y turbulentas, propias de sectores más expuestos a la influencia oceánica del estrecho de Magallanes. Este patrón sugiere que la ballena jorobada prefiere ambientes interiores y semi-protegidos dentro del parque, donde las condiciones oceanográficas son más favorables para sus actividades tróficas.

En conjunto, el modelo indica una distribución espacial asimétrica del hábitat adecuado, concentrada hacia el este y sureste del PMFC. Este patrón es consistente con observaciones previas de alimentación estival reportadas por Hucke-Gaete et al. (2004) y Gibbons et al. (2010), confirmando que el Parque Marino Francisco Coloane constituye un área núcleo fundamental para la conservación de la especie bajo las condiciones ambientales actuales.

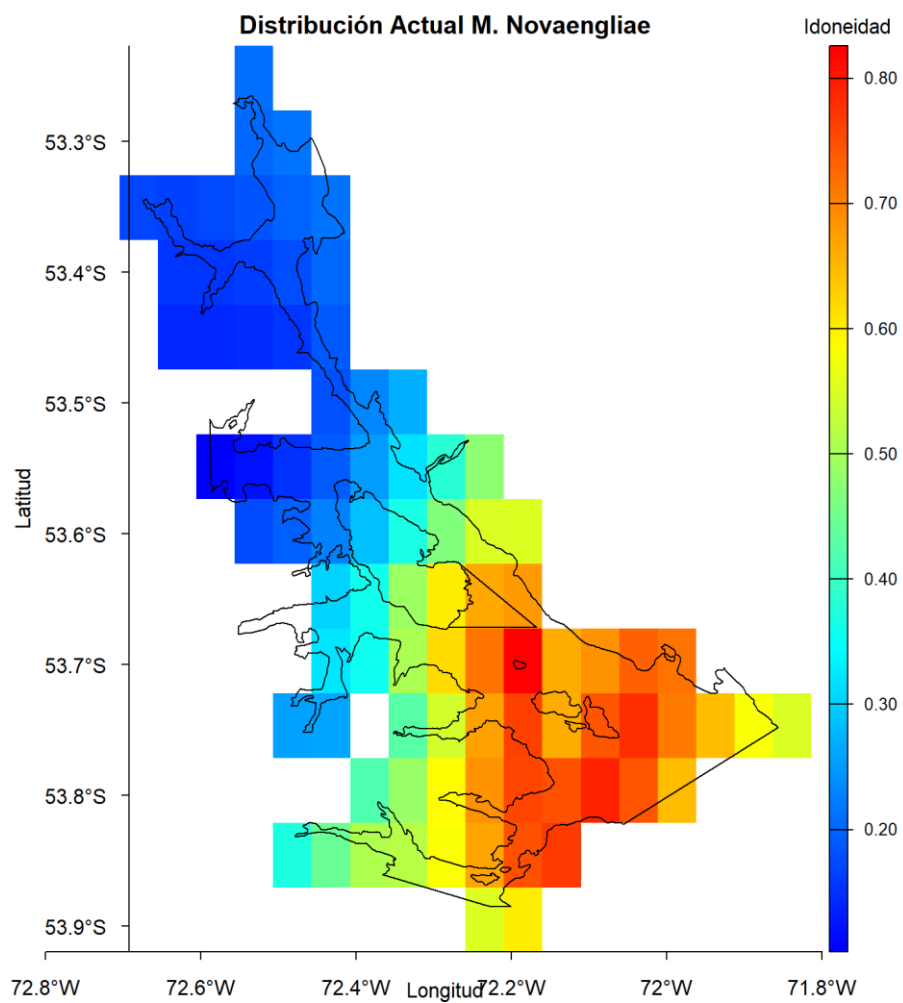


Figura 5.10. Mapa de Idoneidad actual *M. Novaengliae* 2010-2020

### 5.2.7.2 Distribución Futura *Megaptera novaengliae* en Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos (AMCP-MU) Francisco Coloane y Parque Marino Francisco coloane

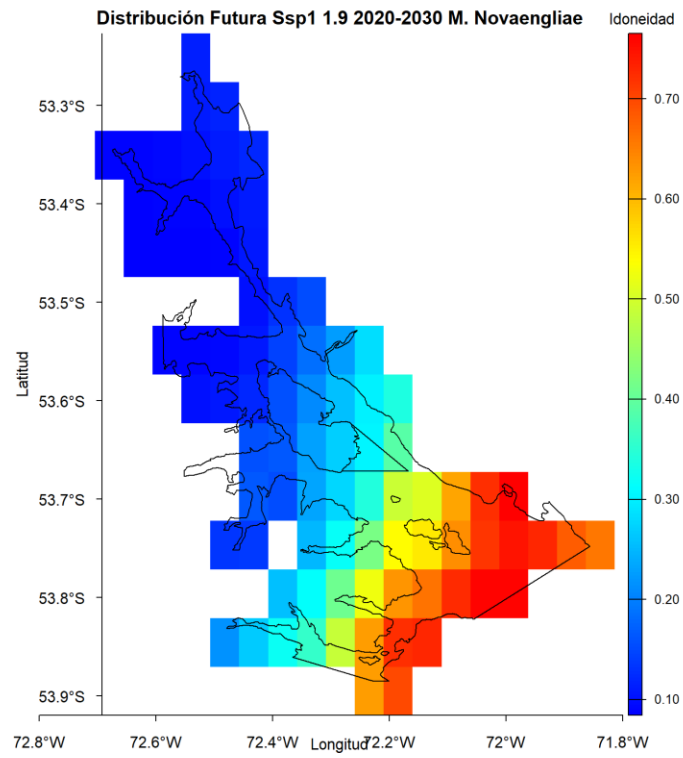
#### Distribución futura bajo el escenario SSP1-1.9

El escenario SSP1-1.9 representa una trayectoria de bajas emisiones y alta sostenibilidad, en la cual las proyecciones climáticas anticipan cambios moderados en la temperatura superficial del mar y en la productividad primaria. Bajo este contexto, los modelos de idoneidad de hábitat para *Megaptera novaengliae* evidencian variaciones espaciales sutiles pero relevantes dentro del sistema marino Francisco Coloane.

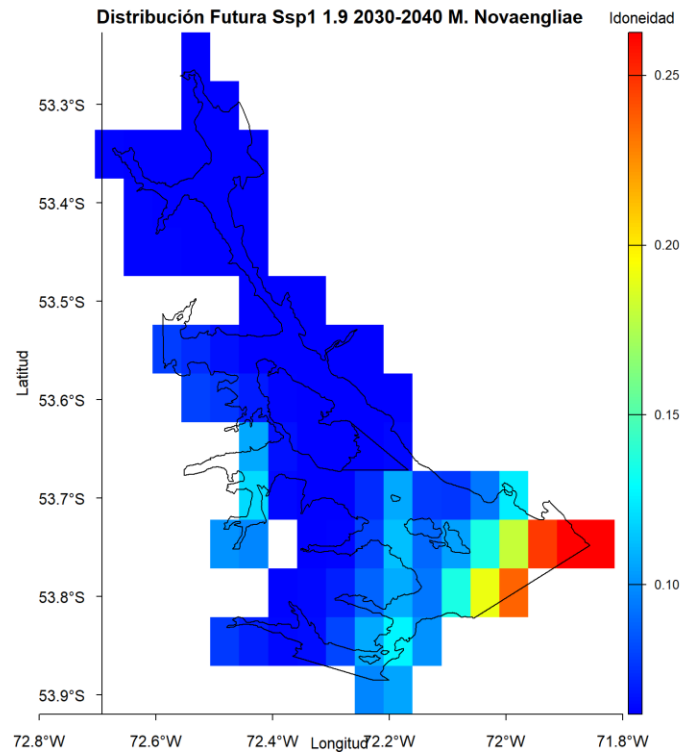
En la **Figura 5.11**. Distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP1-1.9 (2020-2030), se observa que las zonas con mayor idoneidad (valores entre 0.6 y 0.7) se concentran principalmente hacia el sector oriental y sudoriental del Parque Marino Francisco Coloane, extendiéndose ligeramente hacia la frontera con el Área de Múltiples Usos. Estas áreas coinciden con sectores de mayor productividad y temperaturas relativamente estables, condiciones favorables para la presencia estacional de la especie durante los periodos reproductivos y de alimentación. En contraste, las zonas más occidentales presentan valores de idoneidad bajos (< 0.3), asociados a aguas más frías y turbulentas, lo que sugiere una distribución costera más acotada en el corto plazo (2020-2030).

La **Figura 5.12**. Distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP1-1.9 (2030-2040) evidencia una disminución general en la idoneidad del hábitat, con valores máximos reducidos (~0.25). Este descenso podría atribuirse a ligeros cambios en las condiciones oceanográficas proyectadas, como variaciones en la temperatura superficial y la disponibilidad de presas, reflejando una potencial contracción temporal del hábitat adecuado dentro del PM-FC. Las áreas de mayor idoneidad persisten marginalmente hacia el extremo oriental, manteniendo un patrón espacial similar al decenio anterior, aunque con menor intensidad.

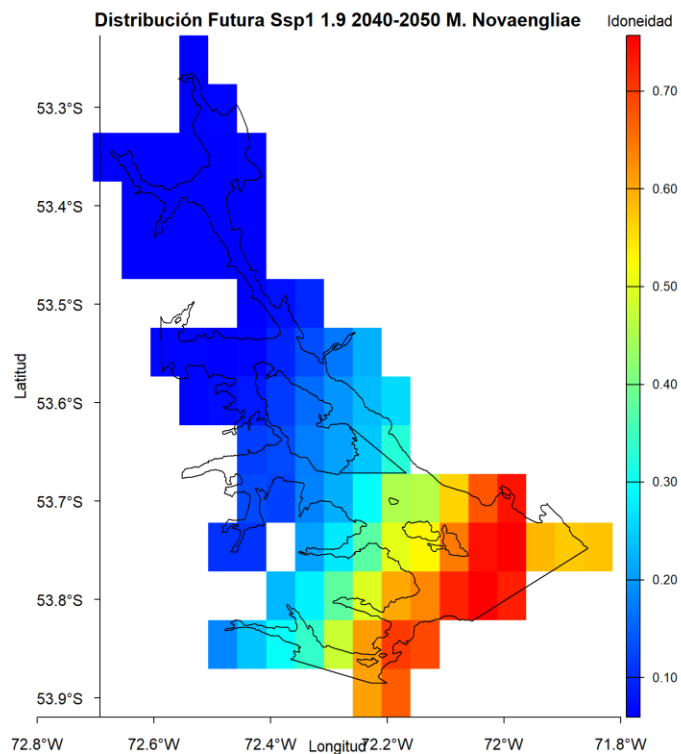
Finalmente, en la **Figura 5.13**. Distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP1-1.9 (2040-2050) se aprecia una recuperación parcial de las condiciones favorables, donde la idoneidad vuelve a alcanzar valores cercanos a 0.7 en las zonas orientales y sudorientales del parque. Este comportamiento sugiere una resiliencia del hábitat potencial bajo escenarios de mitigación efectiva, donde la reducción global de emisiones podría contribuir a restablecer gradientes térmicos y de productividad adecuados para la especie. En conjunto, el escenario SSP1-1.9 muestra una estabilidad relativa en la distribución espacial, con leves fluctuaciones, pero con evidencias de desplazamientos significativos fuera de los límites actuales del AMCP-FC y PMFC.



**Figura 5.11.** Mapa Idoneidad distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP1-1.9 (2020-2030)



**Figura 5.12.** Mapa Idoneidad distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP1-1.9 (2030-2040)



**Figura 5.13.** Mapa Idoneidad distribución futura de *M. novaeangliae* bajo el escenario SSP1-1.9 (2040-2050)

#### Distribución futura bajo el escenario SSP2-4.5

El escenario SSP2-4.5 representa una trayectoria intermedia de emisiones, en la cual el crecimiento económico y demográfico continúa, pero con una mitigación climática moderada. En este contexto, las condiciones oceanográficas proyectadas para el sistema Francisco Coloane sugieren alteraciones más notorias en la idoneidad del hábitat de *Megaptera novaeangliae* en comparación con el escenario de bajas emisiones.

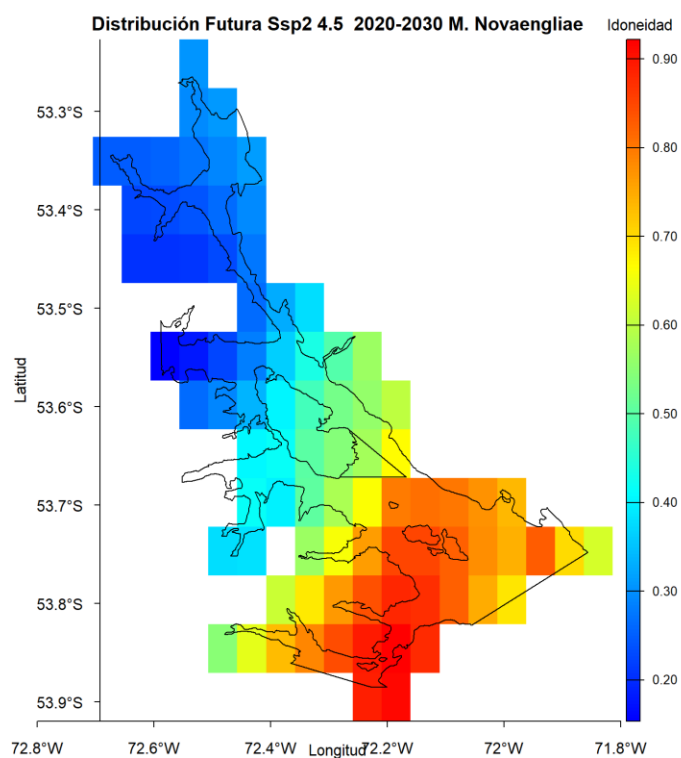
En la **Figura 5.14.** Distribución futura de *M. novaeangliae* bajo el escenario SSP2-4.5 (2020-2030), se aprecia una alta idoneidad del hábitat (valores entre 0.7 y 0.9) concentrada principalmente en la zona suroriental del Parque Marino Francisco Coloane y hacia el límite este del Área de Múltiples Usos. Estas áreas coinciden con sectores caracterizados por aguas más templadas y de alta productividad primaria, condiciones propicias para la alimentación y presencia estacional de la especie. La distribución proyectada para este periodo inicial evidencia un patrón de gradiente longitudinal bien definido, donde la idoneidad disminuye progresivamente hacia el sector occidental (valores < 0.4), posiblemente debido a un menor grado de estabilidad térmica y cambios en la circulación costera.

La **Figura 5.15.** Distribución futura de *M. novaeangliae* bajo el escenario SSP2-4.5 (2030-2040) mantiene un patrón espacial similar, aunque con una ligera expansión de las áreas de alta idoneidad hacia el centro del parque, indicando una persistencia de condiciones favorables a pesar del incremento moderado de las emisiones. Esta estabilidad podría estar asociada a la inercia de las

condiciones oceanográficas locales del estrecho de Magallanes, donde los procesos de mezcla vertical y afloramiento podrían amortiguar parcialmente los efectos del cambio climático global durante esta etapa intermedia.

Por el contrario, en la **Figura 5.16**. Distribución futura de *M. novaeangliae* bajo el escenario SSP2-4.5 (2040-2050) se observa una disminución abrupta en la idoneidad general, con valores inferiores a 0.6 en la mayor parte del área y solo pequeñas manchas residuales de hábitat favorable ubicadas en el noroeste y extremo oriental del sistema. Este cambio sugiere una pérdida significativa de hábitat potencial hacia mediados de siglo, probablemente vinculada al aumento de la temperatura superficial del mar y a la redistribución del zooplancton y fitoplancton, elementos clave en la cadena trófica que sostiene la presencia de la ballena jorobada en estas latitudes.

En conjunto, el escenario SSP2-4.5 proyecta una tendencia de declive progresivo en la idoneidad del hábitat de *M. novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane, con una posible relocalización de áreas óptimas hacia sectores periféricos y más fríos. Este patrón refuerza la importancia de estrategias de gestión adaptativa que integren la variabilidad ambiental y la conectividad ecológica entre el parque y el área de múltiples usos, garantizando la conservación de la especie bajo condiciones climáticas intermedias de cambio.



**Figura 5.14.** Mapa Idoneidad distribución futura de *M. novaeangliae* bajo el escenario SSP2-4.5 (2020-2030)

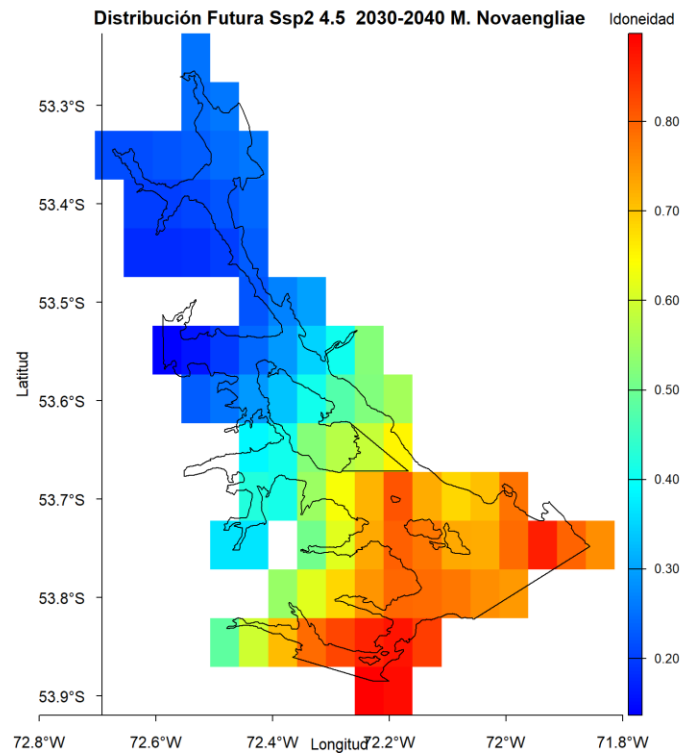


Figura 5.15. Mapa Idoneidad distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP2-4.5 (2030-2040)

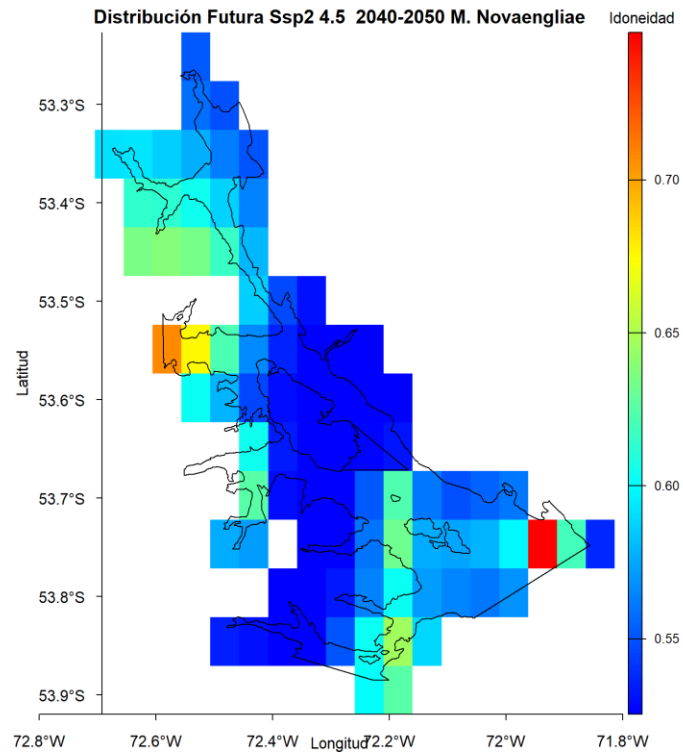


Figura 5.16. Mapa Idoneidad distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP2-4.5 (2040-2050)

## Distribución futura bajo el escenario SSP5-8.5

El escenario SSP5-8.5 representa una trayectoria de altas emisiones caracterizada por un crecimiento económico intensivo y una fuerte dependencia de combustibles fósiles. En este contexto, las proyecciones climáticas indican aumentos significativos en la temperatura superficial del mar y alteraciones en la productividad primaria, factores que repercuten directamente en la idoneidad del hábitat potencial de *Megaptera novaeangliae* en el sistema Francisco Coloane.

En la **Figura 5.17**. Distribución futura de *M. novaeangliae* bajo el escenario SSP5-8.5 (2020-2030), se observa una idoneidad moderada a baja (valores entre 0.2 y 0.6) concentrada hacia el sector oriental del Parque Marino Francisco Coloane, con una marcada disminución en el resto del área. Este patrón inicial sugiere una contracción temprana del hábitat adecuado, donde solo las zonas cercanas a los canales interiores mantienen condiciones favorables, posiblemente debido a la estabilidad térmica y mayor disponibilidad de alimento en áreas más resguardadas del sistema.

La **Figura 5.18**. Distribución futura de *M. novaeangliae* bajo el escenario SSP5-8.5 (2030-2040) muestra un aumento considerable en la idoneidad en comparación con el decenio anterior, alcanzando valores superiores a 0.8 en amplias zonas del centro y sureste del parque. Este cambio abrupto podría reflejar una respuesta transitoria del sistema frente a la variabilidad climática de corto plazo, donde el incremento térmico aún se encuentra dentro de los umbrales de tolerancia fisiológica de la especie y favorece la concentración de presas en sectores determinados. Sin embargo, este aumento no representa necesariamente una mejora ecológica sostenida, sino más bien una fluctuación temporal dentro de una tendencia general hacia el deterioro ambiental.

En contraste, la **Figura 5.19**. Distribución futura de *M. novaeangliae* bajo el escenario SSP5-8.5 (2040-2050) evidencia un cambio drástico en el patrón espacial, con una reducción marcada de las zonas de alta idoneidad y una redistribución de las áreas favorables hacia los márgenes norte y suroeste del sistema. Los valores de idoneidad descienden a niveles moderados (0.6-0.7) en estas zonas periféricas, mientras que la mayor parte del Parque Marino y del Área de Múltiples Usos presenta condiciones marginales (< 0.5). Este desplazamiento sugiere que, bajo un escenario de calentamiento extremo, la especie podría modificar su uso espacial del hábitat, favoreciendo zonas con temperaturas más bajas y mayor estabilidad oceanográfica, lo cual coincide con las predicciones globales de migración hacia latitudes más altas o sectores más profundos.

En conjunto, el escenario SSP5-8.5 proyecta un futuro altamente dinámico e inestable para el hábitat de *M. novaeangliae* en Francisco Coloane, caracterizado por fluctuaciones interdecadal pronunciadas y una pérdida sostenida de idoneidad promedio hacia mediados de siglo. Este escenario refuerza la importancia de implementar estrategias de monitoreo continuo y gestión adaptativa, capaces de anticipar desplazamientos de la especie y conservar la funcionalidad ecológica del área frente a los impactos de un escenario climático de alta presión antropogénica.

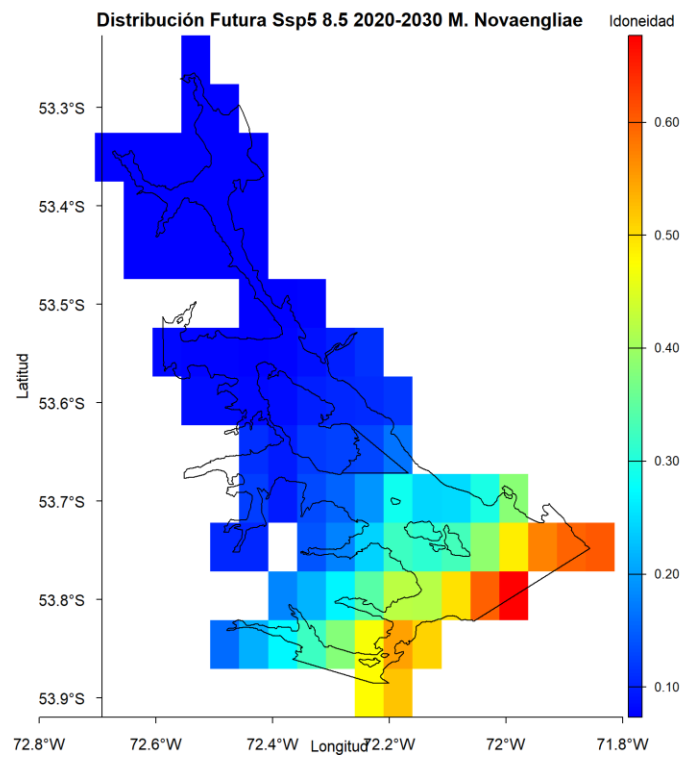


Figura 5.17. Mapa Idoneidad distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP5-8.5 (2020-2030)

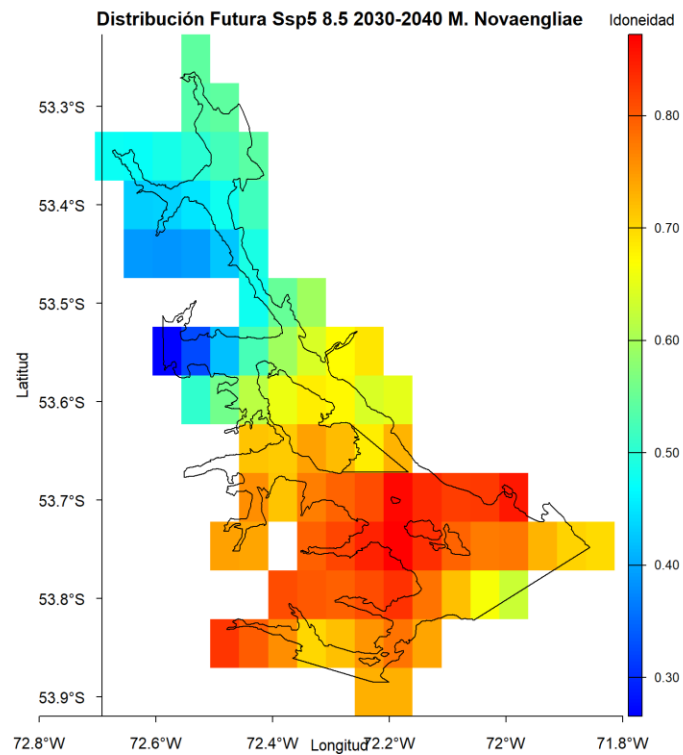
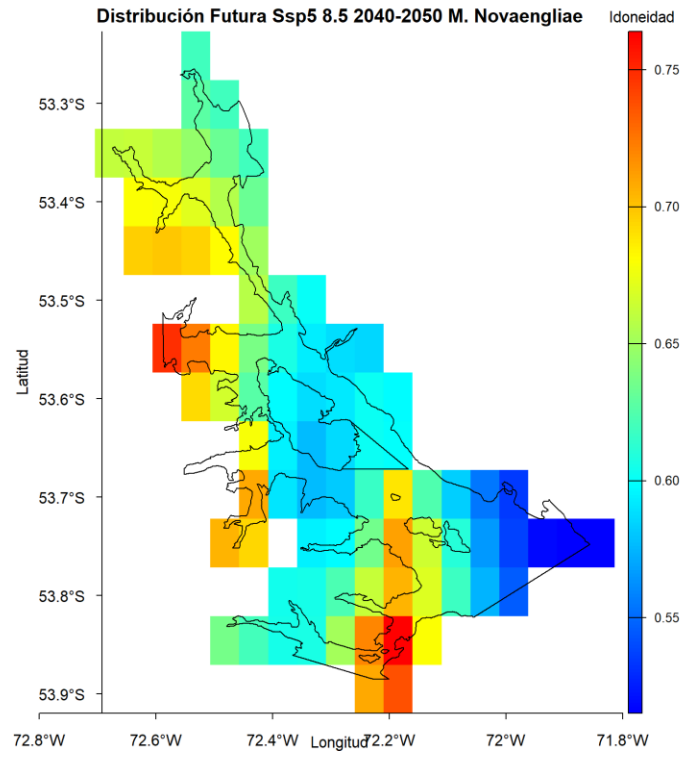


Figura 5.18. Mapa Idoneidad distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP5-8.5 (2030-2040)



**Figura 5.19.** Mapa Idoneidad distribución futura de *M. novaengliae* bajo el escenario SSP5-8.5 (2040-2050)

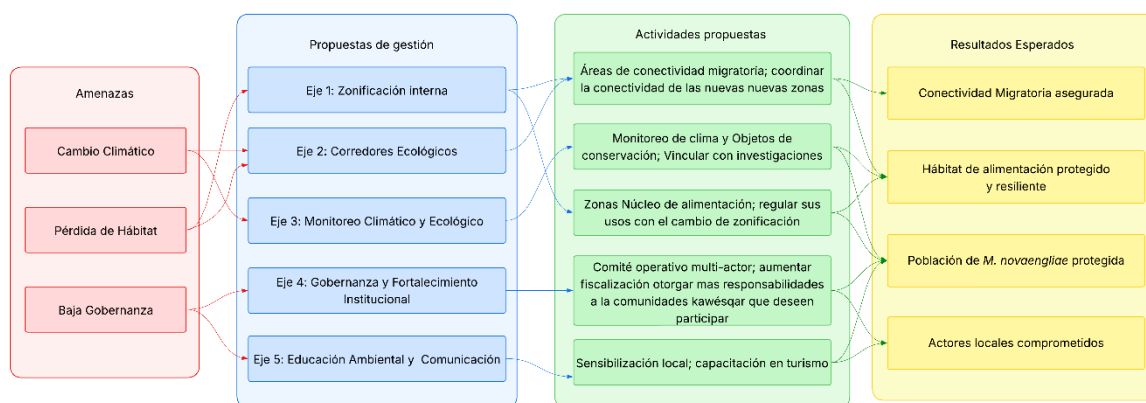
### 5.3 Propuestas de gestión adaptativas

La formulación de propuestas de gestión adaptativa para el Parque Marino Francisco Coloane y su área adyacente de múltiples usos se sustenta en los principios metodológicos establecidos por los Estándares Abiertos para la Práctica de la Conservación en su cuarta versión. Este marco promueve un proceso cíclico y flexible de planificación, implementación, monitoreo y ajuste de las acciones de conservación, permitiendo incorporar la incertidumbre ecológica y los efectos del cambio climático dentro de la toma de decisiones. A partir de los resultados obtenidos en la modelación de distribución de *Megaptera novaeangliae*, se identificaron zonas de estabilidad, pérdida y desplazamiento del hábitat adecuado bajo diferentes escenarios climáticos. Estas evidencias sirvieron como insumo principal para definir líneas estratégicas de intervención que integran tanto los componentes ecológicos como los institucionales analizados previamente en el Plan de Manejo del AMCP-MU Francisco Coloane.

El enfoque adaptativo adoptado reconoce que la conservación efectiva en entornos marino-costeros requiere procesos de aprendizaje continuo, donde la información científica se retroalimenta constantemente con la gestión territorial. Bajo esta premisa, se estructuraron cinco ejes estratégicos de acción, orientados a:

1. Reforzar la representatividad espacial del hábitat
2. Mantener la conectividad ecológica
3. Fortalecer el monitoreo ambiental
4. Regular los usos humanos compatibles con la conservación
5. Consolidar la gobernanza y participación local

Estos ejes conforman la base de la matriz preliminar de gestión adaptativa, la cual resume los principales objetivos, amenazas, estrategias y mecanismos de evaluación propuestos. Dicha matriz constituye el puente metodológico entre la evidencia obtenida mediante el modelado y la formulación de medidas concretas de gestión y zonificación que se presentan en el siguiente apartado, ejemplificada en la **Figura 5.20**.



**Figura 5.20.** Diagrama relación de amenazas, propuestas de gestión, actividades propuestas y resultados esperados

En la siguiente tabla (**Tabla 5.10**) se presentan los cinco ejes temáticos definidos a partir del ciclo de gestión adaptativa propuesto por los Estándares Abiertos. Cada eje sintetiza un conjunto de acciones orientadas a fortalecer la resiliencia del sistema marino Francisco Coloane frente al cambio climático, vinculando los resultados de la modelación con los componentes institucionales y de manejo.

**Tabla 5.10.** Matriz técnica de propuestas de gestión adaptativa para la conservación de *Megaptera novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane, basada en los Estándares Abiertos para la Conservación (CMP v4.0).

<b>Eje temático Propuestas de gestión</b>	<b>Objetivo estratégico</b>	<b>Acciones propuestas</b>	<b>Vinculación con CMP v4.0</b>	<b>Justificación según modelación y diagnóstico</b>
<b>Eje 1: Revisión y ajuste de zonificación interna</b>	Actualizar la zonificación del PMFC incorporando las áreas con mayor idoneidad futura ( $\geq 0.6$ ) bajo escenarios SSP1-1.9 y SSP2-4.5.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Revisión técnica de los límites de ZRT, ZRPE y ZPH.</li> <li>- Redefinir las zonas de protección prioritaria hacia el este y sur del parque.</li> <li>- Validar la nueva zonificación con actores locales y SBAP.</li> </ul>	<i>Fase CMP:</i> Planificar acciones e indicadores.	La modelación proyecta desplazamientos del hábitat hacia sectores oriental y meridional, lo que justifica actualizar los límites de las zonas de protección.
<b>Eje 2: Implementación de corredores ecológicos marinos</b>	Establecer un corredor de conectividad entre el PMFC y el Canal Jerónimo para mantener la continuidad ecológica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Delimitar preliminarmente un corredor basado en idoneidad <math>\geq 0.5</math>.</li> <li>-Gestionar acuerdos interinstitucionales y comunitarios.</li> <li>- Restringir actividades de alto impacto (ruido, tránsito marítimo).</li> </ul>	<i>Fases CMP:</i> Conceptualizar → Planificar.	Bajo escenarios SSP5-8.5 el hábitat adecuado se expande hacia el sureste, lo que requiere asegurar conectividad funcional entre áreas protegidas.
<b>Eje 3: Monitoreo climático y ecológico adaptativo</b>	Diseñar un sistema de monitoreo permanente de variables oceanográficas, biológicas y climáticas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Seleccionar indicadores (TSM, clorofila-a, fitoplancton, O<sub>2</sub>).</li> <li>-Incorporar estaciones oceanográficas y sensores remotos.</li> <li>-Implementar monitoreo participativo con operadores turísticos.</li> <li>-Integrar datos en SIMBIO-SBAP-Plataforma CHONOS.</li> </ul>	<i>Fases CMP:</i> Implementar → Monitorear → Adaptar.	Las variables más influyentes del modelo (temperatura, productividad, oxígeno) presentan alta sensibilidad al cambio climático, requiriendo observación continua.
<b>Eje 4: Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa</b>	Consolidar un comité de gestión adaptativa que integre SBAP, MMA, academia y comunidades locales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Establecer un comité permanente de gestión adaptativa.</li> <li>- Incorporar CMP v4.0 en el plan de manejo.</li> <li>-Formalizar convenios con universidades</li> </ul>	<i>Fases CMP:</i> Monitorear → Aprender → Adaptar.	El análisis del plan de manejo evidenció brechas de coordinación institucional y falta de mecanismos de gestión adaptativa.

Eje temático Propuestas de gestión	Objetivo estratégico	Acciones propuestas	Vinculación con CMP v4.0	Justificación según modelación y diagnóstico
		para actualización de modelos.		
<b>Eje 5: Educación ambiental y participación comunitaria</b>	Desarrollar un programa educativo y de sensibilización climática enfocado en la conservación de <i>M. novaeangliae</i> .	-Elaborar materiales educativos basados en los resultados del modelo. -Capacitar a operadores turísticos como monitores ciudadanos. -Implementar campañas de difusión sobre cambio climático.	<i>Fases CMP:</i> Implementar → Aprender.	Las zonas de alta idoneidad coinciden con áreas turísticas; su uso como plataforma educativa fortalece la legitimidad social y la corresponsabilidad en la conservación.

### 5.3.1 Eje 1. Revisión y ajuste de la zonificación interna del PMFC

Los mapas de idoneidad del hábitat muestran un desplazamiento de las áreas de mayor probabilidad de presencia hacia los sectores oriental y sur del parque, especialmente bajo el escenario SSP2-4.5. Esta redistribución indica una pérdida parcial de representatividad ecológica en zonas actuales de alta protección (Zonas restringidas con propósito especial) y un aumento de idoneidad en zonas de menor protección.

**Propuesta:** Actualizar los límites y categorías de zonificación interna considerando las proyecciones de hábitat adecuado. Se propone ampliar las Zonas de Protección de Hábitat (ZPH) hacia el sector este y sur, reforzando la protección de áreas que mantendrán condiciones favorables bajo escenarios de bajas y medias emisiones. Revisar **Tabla 5.11**.

#### Acciones específicas:

- Revisión técnica de los polígonos de ZRT, ZRPE y ZPH según resultados de modelación.
- Definición de límites mediante criterios de idoneidad como umbral ecológico de protección.
- Validación participativa con actores locales y SBAP.
- Inclusión de la actualización en el próximo ciclo de revisión del plan de manejo (CMP fase “Planificar acciones e indicadores”).

**Resultado esperado:** Una zonificación espacialmente coherente con la distribución proyectada del hábitat de *M. novaeangliae*, fortaleciendo la representatividad ecológica del PMFC.

**Tabla 5.11.** Matriz técnica de la propuesta de gestión - Eje 1: Revisión y ajuste de la zonificación interna

Elemento	Descripción
<b>Objetivo de conservación asociado</b>	Asegurar la representatividad espacial del hábitat crítico de <i>Megaptera novaeangliae</i> dentro del Parque Marino Francisco Coloane, considerando su desplazamiento estacional.
<b>Amenaza que se busca mitigar</b>	Pérdida o subrepresentación del hábitat adecuado como consecuencia del cambio climático y la alteración de las condiciones oceanográficas.
<b>Estrategia propuesta</b>	Actualizar los límites y categorías de zonificación interna (ZRT, ZRPE, ZPH) según los resultados de la modelación de distribución de <i>M. novaeangliae</i> , priorizando áreas con idoneidad $\geq 0.6$ bajo escenarios SSP1-1.9 y SSP2-4.5.
<b>Indicador SMART</b>	Zonificación revisada y aprobada por la autoridad ambiental antes del año 2028.
<b>Fuente de verificación</b>	Resolución o informe técnico del MMA/SBAP y actualización de cartografía oficial del PMFC.
<b>Periodicidad de evaluación</b>	Bienal (cada 2 años).
<b>Institución responsable</b>	Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP), Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Gobierno Regional de Magallanes y el Comité Operativo.

### 5.3.2 Eje 2. Implementación de corredores ecológicos marinos

Bajo escenarios de mayor estrés climático (SSP5-8.5), los modelos predicen una expansión del hábitat adecuado hacia el sureste, especialmente en dirección al Canal Jerónimo y el Área de Múltiples Usos (AMU). Este patrón sugiere la necesidad de asegurar conectividad ecológica entre ambos sistemas.

**Propuesta:** Diseñar e implementar un corredor de conectividad marina que vincule el PMFC con zonas de alta idoneidad futura en el Canal Jerónimo, garantizando la continuidad ecológica de las rutas de alimentación y desplazamiento estacional de la especie. Revisar **Tabla 5.12**.

#### Acciones específicas:

- Delimitación preliminar del corredor utilizando los mapas de Idoneidad.
- Coordinación entre SBAP, MMA y organizaciones locales para evaluar su factibilidad administrativa.
- Promover acuerdos de conservación voluntarios y restricciones de actividades de alto impacto (ruido, tráfico marítimo), trazar nuevas rutas para el desplazamiento de embarcaciones.
- Integración del corredor en la planificación espacial marina regional.

**Resultado esperado:** Una red de conectividad funcional que permita la movilidad de *M. novaeangliae* frente a la redistribución de su hábitat inducida por el cambio climático.

**Tabla 5.12.** Matriz técnica de la propuesta de gestión - Eje 2: Implementación de corredores ecológicos marinos.

Elemento	Descripción
<b>Objetivo de conservación asociado</b>	Mantener la conectividad ecológica entre el PMFC y áreas adyacentes utilizadas por <i>M. novaeangliae</i> durante sus desplazamientos estacionales.
<b>Amenaza que se busca mitigar</b>	Fragmentación del hábitat marino y pérdida de continuidad funcional entre zonas de alimentación y tránsito.
<b>Estrategia propuesta</b>	Diseñar e implementar un corredor ecológico marino entre el PMFC y el Canal Jerónimo (AMU), integrando información de modelación de hábitat y variables oceanográficas.
<b>Indicador SMART</b>	Corredor ecológico delimitado, validado y formalizado por organismos competentes antes de 2027.
<b>Fuente de verificación</b>	Informe técnico interinstitucional (SBAP, Subpesca, MMA) y publicación cartográfica del corredor.
<b>Periodicidad de evaluación</b>	Bienal.
<b>Institución responsable</b>	SBAP, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (Subpesca), IFOP, Gobierno Regional de Magallanes, junto al comité operativo.

### 5.3.3 Eje 3. Monitoreo climático y ecológico adaptativo

Las variables ambientales con mayor peso en el modelo presentan tendencias proyectadas de variación significativa, lo que justifica un sistema de monitoreo orientado a detectar cambios en la idoneidad del hábitat y validar las proyecciones.

Propuesta: Establecer un sistema de monitoreo continuo que integre indicadores oceanográficos, biológicos y climáticos relevantes para *M. novaeangliae*, vinculados con las variables de modelación. Revisar **Tabla 5.13**.

#### Acciones específicas:

- Seleccionar indicadores clave (TSM, clorofila-a, biomasa fitoplanctónica, presencia estacional).
- Incorporar estaciones oceanográficas automáticas y sensores remotos.
- Implementar protocolos de monitoreo participativo con operadores turísticos y comunidades locales.
- Integrar los datos en el sistema SIMBIO-SBAP y plataforma CHONOS para análisis periódicos y ajustes de gestión (fases “Monitorear” y “Adaptar”).

**Resultado esperado:** Un sistema de monitoreo adaptativo que permita retroalimentar la planificación del parque con información actualizada, mejorando la capacidad de respuesta ante escenarios de cambio ambiental.

**Tabla 5.13.** Matriz técnica de la propuesta de gestión adaptativa - Eje 3: Monitoreo climático y ecológico adaptativo.

Elemento	Descripción
<b>Objetivo de conservación asociado</b>	Detectar y evaluar variaciones ambientales que afecten la distribución y presencia estacional de <i>M. novaeangliae</i> en el PMFC.
<b>Amenaza que se busca mitigar</b>	Ausencia de información sistemática y continua que permita una respuesta temprana frente a cambios climáticos y oceanográficos.
<b>Estrategia propuesta</b>	Implementar una red de monitoreo integrada de variables oceanográficas y biológicas, incluyendo boyas multiparamétricas, estaciones meteorológicas y registros de presencia de cetáceos.
<b>Indicador SMART</b>	Sistema de monitoreo operativo con datos validados y publicados anualmente desde 2026.
<b>Fuente de verificación</b>	Reportes anuales de monitoreo IFOP-SBAP, base de datos institucional y publicaciones científicas.
<b>Periodicidad de evaluación</b>	Anual.
<b>Institución responsable</b>	IFOP, SBAP, Universidad de Magallanes, SHOA.

### 5.3.4 Eje 4. Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa

El análisis del plan de manejo reveló brechas en la implementación de mecanismos de gestión adaptativa y participación vinculante. La magnitud del cambio proyectado en la distribución del hábitat requiere una coordinación interinstitucional efectiva entre SBAP, MMA, SERNAPESCA y actores locales.

**Propuesta:** Consolidar un comité de gestión adaptativa del PMFC integrado por instituciones públicas, comunidades locales, sector académico y organizaciones no gubernamentales, bajo el liderazgo técnico del SBAP. Revisar **Tabla 5.14**.

#### **Acciones específicas:**

- Establecer el comité como instancia permanente de revisión de resultados de modelación y monitoreo.
- Promover la adopción de los Estándares Abiertos CMP v4.0 en los procesos de planificación y evaluación.
- Incorporar criterios de adaptación climática en los instrumentos de gestión del SBAP y la Estrategia nacional de biodiversidad 2030.
- Desarrollar convenios con universidades para análisis de datos y actualización de modelos de distribución.

**Resultado esperado:** Una estructura de gobernanza adaptativa y colaborativa que asegure la continuidad del proceso de conservación basado en evidencia.

**Tabla 5.14.** Matriz técnica de la propuesta de gestión - Eje 4: Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa

Elemento	Descripción
<b>Objetivo de conservación asociado</b>	Consolidar un modelo de gobernanza colaborativa para la gestión adaptativa del PMFC, integrando actores públicos, privados y comunitarios.
<b>Amenaza que se busca mitigar</b>	Debilidad en la coordinación interinstitucional y en la participación efectiva de actores locales en la toma de decisiones.
<b>Estrategia propuesta</b>	Crear comités técnico-científicos interinstitucionales, fortalecer la coordinación entre SBAP, Subpesca y organizaciones locales, e incorporar asesorías especializadas en conservación marina.
<b>Indicador SMART</b>	Comités activos con al menos tres sesiones anuales y acuerdos de cooperación formalizados al año 2027.
<b>Fuente de verificación</b>	Actas de reuniones, convenios interinstitucionales y reportes de gestión SBAP.
<b>Periodicidad de evaluación</b>	Anual.
<b>Institución responsable</b>	SBAP, MMA, Gobernanza local del PMFC, Gobierno Regional de Magallanes.

### 5.3.5 Eje 5. Educación ambiental y participación comunitaria

La modelación evidencia que los sectores de mayor idoneidad coinciden con áreas utilizadas por el turismo científico y observación de cetáceos. Esto representa una oportunidad para vincular la educación ambiental con la gestión adaptativa.

Propuesta: Desarrollar un programa de educación y sensibilización climática marina enfocado en la conservación de la ballena jorobada y la resiliencia de los ecosistemas australes.

Acciones específicas:

- Elaborar materiales educativos y talleres basados en los resultados del modelo de distribución.
- Capacitar a operadores turísticos como monitores ciudadanos en la recopilación de datos ecológicos.
- Implementar campañas de comunicación sobre cambio climático y biodiversidad marina en la región.
- Establecer un “Centro de interpretación del PMFC” vinculado al SBAP y a la red de áreas protegidas subantárticas.

Resultado esperado: Una comunidad local y de visitantes informada, que participe activamente en la protección del parque y fortalezca su sostenibilidad social y ecológica.

**Tabla 5.15.** Matriz técnica de la propuesta de gestión adaptativa - Eje 5: Educación ambiental y divulgación científica

Elemento	Descripción
<b>Objetivo de conservación asociado</b>	Incrementar el conocimiento y la valoración social del hábitat de <i>M. novaeangliae</i> y la importancia ecológica del PMFC.
<b>Amenaza que se busca mitigar</b>	Bajo nivel de conocimiento ambiental y limitada participación ciudadana en la conservación marina.
<b>Estrategia propuesta</b>	Desarrollar programas de educación ambiental y divulgación científica dirigidos a comunidades costeras, docentes y operadores turísticos.
<b>Indicador SMART</b>	Al menos 500 personas capacitadas o alcanzadas mediante actividades educativas y materiales de divulgación antes del año 2027.
<b>Fuente de verificación</b>	Registros de asistencia, informes de talleres y material audiovisual publicado.
<b>Periodicidad de evaluación</b>	Anual.
<b>Institución responsable</b>	SBAP, SEREMI del Medio Ambiente, Municipalidades, ONG y universidades regionales.

## 5.4 Estimación de costos para la gestión

La implementación de las cinco propuestas de gestión formuladas en este estudio implica una planificación económica que considere la magnitud, complejidad y temporalidad de las acciones propuestas. Cada eje aborda componentes técnicos distintos, desde la actualización de la zonificación interna hasta la educación ambiental, por lo que los requerimientos presupuestarios varían en función de los recursos humanos, logísticos y tecnológicos necesarios para su ejecución.

En este sentido, la presente estimación de costos busca establecer un marco financiero de referencia que permita orientar la toma de decisiones, identificar fuentes potenciales de financiamiento y evaluar la factibilidad de implementación de las medidas propuestas en el Parque Marino Francisco Coloane. Los valores utilizados provienen de licitaciones públicas y antecedentes presupuestarios oficiales (Mercado Público, 2022-2025), expresados tanto en pesos chilenos (CLP) como en unidades de fomento (UF), con un valor medio de \$39.546 CLP por UF correspondiente al año 2025.

### 5.4.1 Eje 1: Estimación de costos para estudio de cambio de zonificación

El primer eje de gestión, correspondiente a la revisión y ajuste de la zonificación interna del Parque Marino Francisco Coloane, representa una de las acciones más relevantes desde el punto de vista técnico y económico. Esta propuesta busca redefinir las zonas de regulación del parque (ZRT, ZRPE y ZPH) en función de los resultados de modelación de distribución de *Megaptera novaeangliae*, los cuales evidencian un desplazamiento del hábitat. Para estimar los costos asociados a su ejecución se analizaron antecedentes de licitaciones nacionales vinculadas a procesos de zonificación costera, levantamientos cartográficos y estudios de adaptación climática, obteniéndose un rango de inversión representativo que permite proyectar los requerimientos económicos de esta acción dentro del marco del plan de gestión adaptativa (**Revisar Anexo 12**).

**Tabla 5.16.** Matriz Estimación de costos del Eje 1 - Revisión y ajuste de zonificación interna del PMFC

Componente técnico	Descripción resumida	Porcentaje estimado del total	Costo estimado (CLP)	Costo estimado (UF)
Personal técnico y consultores	Especialistas en SIG, modelación y biología marina.	35 %	\$28 250 000	785 UF
Cartografía y procesamiento SIG	Levantamiento y redefinición de límites zonales.	25 %	\$20 180 000	561 UF
Trabajo de campo y validación participativa	Talleres, verificación y consulta local.	15 %	\$12 110 000	336 UF
Análisis y mapas finales	Elaboración de informes y productos cartográficos.	15 %	\$12 110 000	336 UF
Gestión y contingencias	Logística, revisión institucional, imprevistos.	10 %	\$8 070 000	224 UF
<b>Total estimado</b>		<b>100 %</b>	<b>\$80 720 000</b>	<b>≈ 2 240</b>

#### 5.4.2 Eje 2: Estimación de costos para la Implementación de corredores ecológicos marinos

El segundo eje de gestión adaptativa propone la implementación de un corredor ecológico marino que conecte el Parque Marino Francisco Coloane con el Canal Jerónimo y el Área de Múltiples Usos, con el objetivo de mantener la continuidad funcional de las rutas de desplazamiento y alimentación de *Megaptera novaeangliae*. Para estimar los costos de esta acción se consideraron referencias de estudios de conectividad ecológica marina, planificación espacial de zonas protegidas y programas de conservación costera, disponibles en licitaciones públicas de los años 2022-2025. (Revisar anexo 13)

**Tabla 5.17.** Estimación de costos del Eje 2 - Implementación de corredores ecológicos marinos

Componente técnico	Descripción resumida	Porcentaje estimado del total	Costo estimado (CLP)	Costo estimado (UF)
Diseño técnico y delimitación del corredor	Análisis espacial y definición de zonas núcleo y amortiguamiento.	30 %	\$8 343 000	211 UF
Análisis ecológico y validación biológica	Evaluación de conectividad de hábitat y desplazamientos de cetáceos.	25 %	\$6 953 000	176 UF
Talleres y participación local	Consultas, acuerdos y socialización con comunidades locales.	20 %	\$5 562 000	141 UF
Comunicación y materiales técnicos	Elaboración de mapas, informes y difusión pública.	15 %	\$4 172 000	106 UF
Coordinación institucional y contingencias	Logística, coordinación SBAP–MMA, imprevistos.	10 %	\$2 780 000	69 UF
<b>Total estimado</b>		<b>100 %</b>	<b>\$27 810 000</b>	<b>703 UF</b>

El costo promedio de \$27,8 millones CLP (703 UF) se basa en valores reales de proyectos de gestión y planificación marina en Chile. Este monto permite cubrir las etapas de diseño, análisis espacial, participación y coordinación institucional, necesarias para la creación de un corredor ecológico marino.

### 5.4.3 Eje 3: Estimación de costos para el Monitoreo climático y ecológico adaptativo

El tercer eje de gestión contempla la creación de un sistema permanente de monitoreo climático y ecológico en el Parque Marino Francisco Coloane y sus zonas adyacentes. Esta iniciativa busca integrar observaciones oceanográficas y datos biológicos sobre presencia estacional de *Megaptera novaeangliae*, con el fin de validar los resultados de modelación y detectar cambios ambientales a mediano y largo plazo. Para su estimación económica se consideraron licitaciones públicas asociadas al equipamiento oceanográfico, adquisición de boyas, estaciones meteorológicas y programas de monitoreo IFOP (2019-2025). Estas referencias permiten establecer un rango de costos para la instalación, operación y gestión técnica del sistema de monitoreo. **(Revisar Anexo 14)**

**Tabla 5.18.** Estimación de costos del Eje 3 - Monitoreo climático y ecológico adaptativo

Componente técnico	Descripción resumida	Porcentaje estimado del total	Costo estimado (CLP)	Costo estimado (UF)
Equipamiento oceanográfico y boyas de monitoreo	Boyas multiparamétricas, sensores de temperatura, oxígeno, clorofila y fondeo.	40 %	\$24 400 000	617 UF
Estaciones meteorológicas y sistemas de datos	Implementación de estaciones automáticas, transmisión remota y almacenamiento.	25 %	\$15 250 000	386 UF
Operación y logística marina	Arriendo de embarcaciones, fondeo, mantenimiento técnico anual.	20 %	\$12 200 000	308 UF
Procesamiento y análisis de datos	Gestión y validación de información oceanográfica.	10 %	\$6 100 000	154 UF
Coordinación institucional y contingencias	Supervisión, reportes técnicos y gastos administrativos.	5 %	\$3 050 000	77 UF
<b>Total estimado</b>		<b>100 %</b>	<b>\$61 000 000</b>	<b>≈ 1 540 UF</b>

El costo promedio de \$61 millones CLP (1540 UF) se ajusta a los valores de referencia de proyectos del IFOP y CORFO orientados a monitoreo ambiental. La mayor proporción de recursos (65 %) se concentra en equipamiento especializado y operación marina, dado que el eje requiere infraestructura tecnológica de alta inversión inicial y mantenimiento continuo. Los componentes de procesamiento y coordinación representan costos recurrentes menores pero esenciales para garantizar la calidad y continuidad del sistema de monitoreo adaptativo.

#### 5.4.4 Eje 4: Estimación de costos para el Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa

Este eje contempla el diseño e implementación de un sistema de gobernanza participativa que permita articular de manera efectiva a los distintos actores involucrados en la gestión del Parque Marino Francisco Coloane y su entorno. Para ello, se consideran cuatro líneas de acción:

- Coordinación técnica institucional
- Instalación de comités técnico-científicos interinstitucionales
- Asesorías especializadas en gobernanza y conservación
- Procesos de formación y participación ciudadana

La presente tabla entrega una estimación referencial de los costos asociados, basada en rangos salariales y valores de licitaciones públicas en contextos similares, adaptados a un horizonte de implementación de 2 a 3 años.

**Tabla 5.19.** Estimación de costos del Eje 4 - Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa

Componente técnico	Descripción	% del total	Costo estimado (CLP)	Costo estimado (UF)
Coordinación técnica institucional	Profesional responsable de articular y supervisar la ejecución intersectorial del plan de gestión.	30%	\$48.000.000	1.214 UF
Comités científico-técnicos interinstitucionales	Reuniones periódicas con representantes técnicos de instituciones clave (SBAP, academia, comunidad).	15%	\$24.000.000	607 UF
Asesorías especializadas	Contratación de expertos en gobernanza, planificación, conservación marina y políticas públicas.	35%	\$56.000.000	1.416 UF
Facilitadores y talleres participativos	Implementación de talleres locales, capacitaciones y apoyo metodológico a la participación ciudadana.	20%	\$32.000.000	809 UF
<b>Total estimado</b>		<b>100%</b>	<b>\$160.000.000</b>	<b>4.046 UF</b>

#### 5.4.5 Eje 5: Estimación de costos para la propuesta de Educación ambiental y divulgación científica

El presente eje propone fortalecer el vínculo entre la sociedad y el Parque Marino Francisco Coloane mediante estrategias integrales de educación ambiental y divulgación científica. Se busca promover la valoración del patrimonio natural marino entre las comunidades locales, visitantes y actores clave, fomentando la participación informada. Las acciones contempladas se articulan en torno a cuatro líneas: producción de materiales educativos, campañas de sensibilización, talleres de formación y eventos públicos de divulgación.

Las estimaciones de costos aquí presentadas se basan en referencias de licitaciones públicas en áreas de turismo responsable, programas de formación técnica y campañas comunicacionales vinculadas al ámbito marino y costero, considerando un horizonte de implementación de 2 años.

**Tabla 5.20.** Estimación de costos del Eje 5 - Educación ambiental y divulgación científica

Componente técnico	Descripción	% del total	Costo estimado (CLP)	Costo estimado (UF)
Diseño e impresión de material educativo	Producción de material impreso y digital: afiches, guías didácticas, fichas de especies, cuadernillos.	25%	\$15.000.000	379 UF
Campañas audiovisuales de sensibilización	Producción de cápsulas audiovisuales, videos breves y difusión radial o digital.	25%	\$15.000.000	379 UF
Talleres de educación ambiental y formación	Jornadas educativas con estudiantes, formación docente y actividades comunitarias.	30%	\$18.000.000	455 UF
Activaciones y ferias de divulgación científica	Eventos de carácter público, stands interactivos, actividades culturales con enfoque marino-costero.	20%	\$12.000.000	303 UF
<b>Total estimado</b>		<b>100%</b>	<b>\$60.000.000</b>	<b>1.516 UF</b>

#### 5.4.6 Costo Total de propuestas de gestión

La estimación total de las cinco propuestas de gestión adaptativa alcanza los \$389.530.000 CLP, equivalentes a 9.847 UF, lo que representa un presupuesto coherente con la magnitud ecológica y logística del Parque Marino Francisco Coloane. Por otra parte, el Eje 4 (Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa) concentra el mayor porcentaje de inversión (41%), reflejando la relevancia de consolidar estructuras de coordinación y capacidades técnicas para una gestión efectiva del área protegida. Le siguen el Eje 1 (Zonificación interna) y el Eje 3 (Monitoreo adaptativo), que suman aproximadamente un 36% del total, evidenciando el peso de las acciones vinculadas a la planificación espacial y la generación de información científica. Por su parte, los Ejes 2 y 5 presentan costos moderados, enfocados en la conectividad ecológica y la educación ambiental, respectivamente, los cuales, aunque de menor costo unitario, son esenciales para garantizar la continuidad ecológica y el involucramiento social en la conservación de *Megaptera novaeangliae*.

**Tabla 5.21.** Matriz resumen de costos estimados por propuesta de gestión

Propuesta de gestión	Costo estimado (CLP)	Costo estimado (UF)
1. Revisión y ajuste de zonificación interna	\$80.720.00	2.042 UF
2. Implementación de corredores ecológicos marinos	\$27.810.000	703 UF
3. Monitoreo climático y ecológico adaptativo	\$61.000.000	1.540 UF
4. Fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa	\$160.000.000	4.046 UF
5. Educación ambiental y divulgación científica	\$60.000.000	1.516 UF
<b>Total estimado</b>	<b>\$389.530.000</b>	<b>9.847 UF</b>

#### 5.4.7 Horizonte temporal, tipo de costos e instrumentos de financiamiento

La estimación de costos asociada a las propuestas de gestión adaptativa para el Parque Marino Francisco Coloane corresponde a la inversión total necesaria para un primer ciclo de implementación, y no a un presupuesto anual. Este ciclo se plantea de manera coherente con la lógica de planificación por fases de los Estándares Abiertos para la Conservación (CMP v4.0) y con los marcos de programación de instrumentos públicos de financiamiento en Chile.

##### Horizonte temporal de implementación

Se propone un horizonte general de planificación de cinco años para el conjunto de las propuestas, dentro del cual se espera:

- Implementar los ajustes de zonificación interna y corredores ecológicos marinos.

- Poner en marcha el sistema de monitoreo climático y ecológico.
- Consolidar las estructuras de fortalecimiento institucional y gobernanza colaborativa.
- Desarrollar e institucionalizar las líneas de educación ambiental y participación ciudadana.

Este horizonte de cinco años permite cerrar un ciclo adaptativo completo: diseño, implementación, seguimiento y evaluación de resultados, generando insumos para la eventual reformulación de las medidas.

No obstante, algunos ejes operan en ciclos operativos más acotados (2-3 años), en particular:

- El fortalecimiento institucional y la gobernanza colaborativa (Eje 4), asociado a instalación de comités, generación de protocolos, asesorías y procesos formativos.
- La educación ambiental y participación ciudadana (Eje 5), cuyo impacto requiere continuidad, pero cuyos programas específicos suelen diseñarse y evaluarse en bloques de 2-3 años.

En todos los casos, aun cuando la planificación se formula en horizontes plurianuales, la ejecución presupuestaria se materializa mediante presupuestos anuales, en concordancia con el sistema de inversión pública chileno. Por ello, los montos presentados en este capítulo deben entenderse como costos totales del ciclo de implementación, que luego se desagregan en asignaciones anuales según la programación presupuestaria de cada instrumento de financiamiento.

### **Tipo de costos considerados**

En la estimación de costos se distinguen dos grandes categorías:

**Costos de inversión inicial:** Corresponden a gastos no recurrentes, tales como;

- Estudios técnicos (ajuste de zonificación, diseño de corredores ecológicos, modelación complementaria).
- Adquisición de equipos y plataformas para monitoreo oceanográfico y ecológico.
- Desarrollo de materiales educativos, sistemas de información y herramientas para la toma de decisiones.
- Instalación o fortalecimiento de estructuras de gobernanza (mesas, comités técnico-científicos, adecuación de espacios de trabajo).

**Costos de operación:** Asociados a la marcha regular de las acciones durante el período de implementación:

- Campañas recurrentes de monitoreo climático y ecológico.
- Funcionamiento de instancias de gobernanza y coordinación interinstitucional.
- Actividades de formación, capacitación y participación comunitaria.
- Actualización de indicadores, elaboración de informes y evaluación de resultados.

Las tablas de costos presentadas en los subapartados anteriores representan, por tanto, la suma de inversión inicial más los costos operacionales mínimos necesarios para asegurar la implementación de las propuestas en el horizonte definido. Esta diferenciación es relevante para la articulación con los instrumentos de financiamiento, ya que algunos están orientados preferentemente a inversión, mientras otros pueden cubrir gastos de operación y gestión.

### **Instrumentos de financiamiento aplicables**

La viabilidad económica de las propuestas no depende de un único fondo, sino de la articulación de diversos instrumentos de financiamiento nacionales e internacionales que hoy se encuentran disponibles para iniciativas de conservación marina, gobernanza y adaptación al cambio climático.

A nivel nacional, destacan:

- El Fondo Nacional de la Biodiversidad administrado por el SBAP, orientado a proyectos de conservación de la biodiversidad y restauración de ecosistemas.
- El Fondo de Protección Ambiental (FPA) del Ministerio del Medio Ambiente, que financia proyectos comunitarios y de educación ambiental, incluyendo iniciativas ligadas a áreas marinas protegidas.
- El Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR), que puede financiar estudios, infraestructura y programas ambientales regionales, tanto mediante proyectos de inversión como a través de fondos concursables.
- El Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura (FIPA) de SUBPESCA, que financia estudios científico-técnicos para la gestión sustentable de recursos marinos.
- Programas sectoriales del MMA y otros ministerios vinculados a conservación marina y adaptación al cambio climático.

A nivel internacional, existen fuentes relevantes que pueden complementar el financiamiento nacional:

- El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), a través de proyectos de biodiversidad y gobernanza marino-costera.
- Iniciativas filantrópicas y alianzas como WWF, Blue Nature Alliance y Pristine Seas (National Geographic), que han apoyado la creación y gestión de grandes áreas marinas protegidas en Chile.
- El Fondo Verde para el Clima (GCF), especialmente para proyectos de adaptación basada en ecosistemas en contextos marino-costeros.
- El Blue Action Fund, que financia proyectos de ONG orientados a AMP y medios de vida costeros sostenibles.

- Proyectos implementados por FAO y otros organismos de Naciones Unidas en pesca responsable, gobernanza marina y gestión integrada de zonas costeras, muchas veces cofinanciados por GEF u otros donantes.
- Iniciativas enmarcadas en la Agenda Azul de Naciones Unidas y la Década de las Ciencias Oceánicas (2021-2030), que actúan como plataforma para movilizar recursos hacia proyectos de investigación aplicada, monitoreo y conservación marina.

A modo de síntesis, la **tabla 5.22** resume los principales instrumentos considerados, su ámbito y el tipo de aporte que pueden realizar a las propuestas de gestión para el Parque Marino Francisco Coloane:

**Tabla 5.22.** Instrumentos de financiamiento considerados y montos que manejan.

Instrumento / fondo	Ámbito	Foco principal	Montos	Uso en las propuestas
Fondo Nacional de la Biodiversidad (SBAP)	Nacional	Conservación, monitoreo, restauración, gestión	\$50 - \$600 millones CLP por proyecto (estimación basada en fondos sectoriales previos del MMA)	Monitoreo ecológico-adaptativo, fortalecimiento institucional, implementación de acciones del plan
Fondo de Protección Ambiental (FPA/ MMA)	Nacional	Educación ambiental y participación ciudadana	\$6 - \$12 millones CLP por proyecto	Programas educativos y de participación comunitaria en torno al PMFC
FNDR: Fondo Nacional de Desarrollo Regional	Nacional	Estudios, infraestructura, programas ambientales regionales	\$80 - \$800 millones CLP en estudios	Estudios de zonificación, adquisición de equipamiento, programas de implementación
FIPA: Fondo de Investigación Pesquera y Acuícola (SUBPESCA)	Nacional	Investigación ecosistémica y pesquera	\$40 - \$150 millones CLP por estudio	Estudios sobre interacción de usos, monitoreo marino, investigación aplicada
Programas Sectoriales de Adaptación Climática (MMA)	Nacional	Cambio climático, vulnerabilidad.	\$100 - \$400 millones CLP por proyecto	Monitoreo climático, indicadores de vulnerabilidad, corredores ecológicos
GEF: Global Environment Facility	Internacional	Biodiversidad, gobernanza marino-costera	US\$1 - US\$8 millones por proyecto nacional/regional	Fortalecimiento de AMP, gobernanza, corredores ecológicos, monitoreo
WWF (grants y acuerdos de cooperación)	Internacional	Conservación marina, megafauna, capacidades locales	US\$50.000 - US\$500.000	Monitoreo de cetáceos, fortalecimiento comunitario, corredores migratorios
Blue Nature Alliance	Internacional	Gestión, gobernanza	US\$500.000 - US\$3 millones por intervención	Implementación de AMP, gobernanza colaborativa, cofinanciamiento de PMFC
Pew Charitable Trusts-Oceans	Internacional	Conservación y gobernanza oceánica	US\$100.000 - US\$1 millón	Gobernanza, políticas públicas, fortalecimiento institucional
Pristine Seas-National Geographic	Internacional	Investigación aplicada, creación/gestión de AMP	US\$200.000 - US\$1 millón	Expediciones científicas, evaluación ecológica, apoyo a gestión

Fondo Verde para el Clima (GCF)	Internacional	Adaptación climática, ecosistemas vulnerables	US\$5 - US\$50 millones por país/proyecto	Adaptación basada en ecosistemas marinos, monitoreo climático
Blue Action Fund	Internacional	AMP, medios de vida costeros, ONG	€1 - €3 millones por proyecto	Implementación de medidas de conservación y gobernanza costera
FAO-Proyectos ONU (GEF/Cooperación Sur-Sur)	Internacional	Pesca sostenible, gobernanza marina	US\$300.000 - US\$3 millones	Planificación integrada, fortalecimiento institucional

La información presentada en la **tabla 5.22** permite contextualizar las estimaciones de costos desarrolladas para los distintos ejes de gestión propuestos en el Parque Marino Francisco Coloane. Los montos asociados a cada instrumento evidencian las necesidades presupuestarias identificadas en el estudio pueden ser abordadas con una correcta gestión.

## 6 DISCUSIÓN

### **Sobre la evaluación del Plan de Gestión del Parque Marino Francisco Coloane**

Los resultados obtenidos en la evaluación del Plan de Manejo del Parque Marino Francisco Coloane muestran un avance significativo en la consolidación de un marco de conservación marina, pero también evidencian debilidades que limitan su efectividad frente al cambio climático y a la gestión adaptativa requerida para la protección de *Megaptera novaeangliae*.

El análisis comparativo con los Estándares Abiertos para la Conservación en su cuarta versión permitió identificar que el instrumento actual presenta logros parciales en la definición del contexto y los objetos de conservación, pero adolece de carencias en el diseño de estrategias, la implementación operativa, el monitoreo y la retroalimentación del proceso de gestión.

Entre los hallazgos más relevantes destaca que el plan reconoce adecuadamente la importancia ecológica del área y de sus objetos de conservación incluyendo explícitamente a la ballena jorobada, pero no articula un modelo conceptual que relacione de forma causal las presiones, amenazas y factores subyacentes que afectan su hábitat. Tampoco establece metas SMART ni indicadores que permitan evaluar resultados de conservación, lo cual dificulta medir avances o detectar desviaciones en la ejecución de las estrategias.

Además, el componente de implementación carece de asignación de responsables, cronogramas y presupuestos, lo que restringe la operatividad del instrumento. El monitoreo ecológico y social se encuentra ausente, y el plan no contempla mecanismos de revisión periódica ni aprendizaje institucional. Estos resultados se vinculan directamente con el primer objetivo específico del estudio, que buscaba evaluar el Plan de Manejo del AMCP-MU Francisco Coloane en relación con la conservación de *Megaptera novaeangliae* bajo los lineamientos de los Estándares Abiertos para la Conservación. La evidencia obtenida confirma la hipótesis inicial: el plan presenta avances conceptuales, pero no incorpora de forma sistemática los principios de gestión adaptativa ni mecanismos para enfrentar amenazas dinámicas como el cambio climático.

Esto concuerda con el marco de los Estándares Abiertos, que define la gestión adaptativa como un ciclo iterativo basado en la definición del contexto, la planificación de estrategias, la implementación, el monitoreo, la evaluación y el aprendizaje. El PMFC cumple parcialmente las primeras fases, pero no completa el ciclo, lo que reduce su capacidad de adaptación y mejora continua.

Igualmente, los hallazgos respaldan el diagnóstico institucional planteado en el problema de investigación, donde se advertía que el plan “no incorpora de manera sistemática los principios de gestión adaptativa” ni estrategias explícitas frente al cambio climático”, afectando la eficacia futura del área protegida.

La importancia práctica de estos hallazgos es la necesidad de actualizar el Plan de Manejo bajo un enfoque de gestión adaptativa, que incorpore indicadores de desempeño, mecanismos de monitoreo y procedimientos de retroalimentación. La ausencia de estos elementos limita la capacidad del PMFC para responder a los cambios impactos del cambio climático en la conservación de la Ballena jorobada.

Del mismo modo, la falta de coordinación entre los diferentes actores y de un sistema de seguimiento unificado, debilita la eficacia del instrumento frente a los nuevos desafíos normativos

derivados de la creación del Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP), cuya función será articular los planes de manejo bajo criterios estandarizados de monitoreo y conservación.

En este contexto los resultados de la evaluación entregan insumos de alta importancia para la formulación de las propuestas de gestión adaptativa desarrolladas en el capítulo 5.2.8, donde se orienta la actualización del plan hacia el fortalecimiento de su coherencia metodológica y la integración de herramientas basadas en evidencia, como los modelos de distribución de especies.

Una de las limitaciones detectadas en la evaluación es que el análisis se centra en la revisión documental del Plan de Manejo vigente, sin incorporar información empírica reciente sobre su implementación o sobre los avances de gobernanza local. Esto impide evaluar en detalle la eficacia real de las acciones ejecutadas. No obstante, los resultados obtenidos permiten formular recomendaciones para la actualización del plan:

- Incorporar metas e indicadores SMART asociados a cada objeto de conservación, con énfasis en *M. novaeangliae*.
- Establecer un sistema de monitoreo ecológico que permita evaluar la idoneidad del hábitat y los cambios ambientales dentro del área protegida.
- Desarrollar un modelo conceptual que relacione amenazas, factores causales y estrategias, siguiendo el marco de los Estándares Abiertos.
- Implementar un mecanismo formal de revisión periódica y aprendizaje institucional, que asegure la retroalimentación de resultados y la mejora continua del plan.

Por tanto, la evaluación del Plan de Manejo confirma que, si bien el PMFC constituye un avance significativo en la conservación marina de Chile austral, su estructura actual requiere una actualización metodológica profunda que incorpore la gestión adaptativa como principio rector. Solo de este modo será posible fortalecer su eficacia frente al cambio climático y garantizar la persistencia del hábitat de *Megaptera novaeangliae* como objeto de conservación prioritario.

## Sobre los resultados del modelo de distribución

Los resultados obtenidos mediante el modelo de distribución de especies para *Megaptera novaeangliae* evidencian patrones espaciales coherentes con el comportamiento ecológico conocido de la especie en el sistema Francisco Coloane. El modelo desarrollado a través del algoritmo MaxEnt muestra que, bajo las condiciones ambientales actuales, las áreas de mayor idoneidad se concentran principalmente en el sector oriental y sudoriental del Parque Marino Francisco Coloane, donde predominan aguas interiores, más estables y con alta productividad biológica. Estas zonas presentan condiciones óptimas para la alimentación y el descanso estival, asociadas a la abundancia de presas zooplanctónicas y a procesos de mezcla vertical que favorecen la disponibilidad de nutrientes. Este resultado coincide con observaciones empíricas previas realizadas por Hucke-Gaete et al. (2004) y Gibbons et al. (2010), quienes identificaron al parque como un área núcleo de alimentación estacional para la especie, confirmando su relevancia dentro del corredor migratorio austral.

Cuando se proyectan los escenarios futuros de cambio climático, se observa una tendencia progresiva a la contracción y desplazamiento del hábitat adecuado hacia sectores más orientales del parque y, eventualmente, hacia zonas exteriores del estrecho de Magallanes. En los escenarios de bajas emisiones (SSP1-1.9), los cambios son moderados y la distribución de alta idoneidad se mantiene relativamente estable, aunque con valores levemente reducidos. Sin embargo, bajo trayectorias de mayor forzamiento radiativo, como SSP2-4.5 y especialmente SSP5-8.5, la idoneidad disminuye de forma más pronunciada, lo que sugiere un proceso de pérdida de hábitat y un desplazamiento hacia áreas no protegidas. Este patrón refleja la sensibilidad de *M. novaeangliae* a las variaciones oceanográficas y confirma la vulnerabilidad de su hábitat frente a escenarios de mayor calentamiento global.

Estos resultados se relacionan directamente con el segundo objetivo específico del estudio, que buscaba modelar la distribución potencial de la especie en escenarios climáticos actuales y futuros. La modelación permite comprender cómo las condiciones oceanográficas determinan la presencia de la ballena jorobada y proyectar su posible respuesta frente a las alteraciones del sistema marino. Desde una perspectiva teórica, los hallazgos reafirman el valor de los modelos de distribución de especies como herramientas predictivas y de apoyo a la planificación adaptativa, al ofrecer una base científica para anticipar cambios en la representatividad ecológica y orientar decisiones de manejo basadas en evidencia.

En términos de gestión, la disminución de la idoneidad del hábitat proyectada bajo escenarios de altas emisiones tiene implicaciones directas para la conservación. La actual delimitación del Parque Marino Francisco Coloane podría resultar insuficiente para resguardar las áreas de mayor valor ecológico si estas se desplazan fuera de sus límites administrativos. Esto plantea la necesidad de revisar la zonificación interna del parque e incorporar corredores marinos o zonas de amortiguación que aseguren la conectividad funcional entre las áreas críticas de alimentación y desplazamiento. Asimismo, los resultados resaltan la importancia de integrar variables climáticas y de productividad en los futuros planes de manejo, de manera que se implementen mecanismos de monitoreo continuo que permitan detectar cambios en la distribución del hábitat y en la presencia estacional de la especie. La información generada por los modelos puede, además, servir como un sistema de

alerta temprana ante posibles pérdidas de idoneidad o alteraciones en las condiciones ambientales locales.

El enfoque adoptado en este estudio también aporta elementos prácticos para fortalecer la articulación institucional entre el Parque Marino Francisco Coloane y el futuro Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas. Incorporar herramientas de modelación en la planificación operativa y en la evaluación periódica de los planes de manejo permitirá avanzar hacia una gestión más dinámica y basada en resultados, en concordancia con los principios de análisis y adaptación de los Estándares Abiertos para la Conservación. Esta integración resulta fundamental para enfrentar los nuevos desafíos asociados al cambio climático y a la protección de especies migratorias altamente móviles, especialmente considerando el mandato establecido por la Ley Marco de Cambio Climático N.º 21.455, que obliga al Estado a integrar la adaptación y la resiliencia en la gestión ambiental en todos los niveles territoriales (Ministerio del Medio Ambiente, 2022)

Si bien el modelo ofrece una aproximación a la distribución potencial de *M. novaeangliae*, es necesario considerar ciertas limitaciones. La resolución espacial de las variables ambientales (Bio-ORACLE, 5 arc-min) puede limitar la identificación de microhábitats costeros relevantes, y la cantidad de registros de presencia fuera del parque restringe la capacidad de extrapolación hacia otras zonas del estrecho. No obstante, pese a estas limitaciones, los resultados obtenidos constituyen una base sólida para la planificación adaptativa, ofreciendo una visión prospectiva sobre cómo el hábitat de la especie podría transformarse en las próximas décadas. Según Klaassen (2025) señalan que uno de los desafíos centrales en la modelación de distribución de especies marinas es la inadecuación de la resolución espacial y temporal de muchas de las covariables ambientales disponibles, especialmente aquellas derivadas de bases de datos globales o productos satelitales. Los autores enfatizan que los sistemas marinos al ser tridimensionales, dinámicos y altamente heterogéneos requieren datos ambientales capaces de capturar variaciones a escalas finas, algo que no siempre es posible con resoluciones de grilla relativamente gruesas como 5 arc-minutos. Según su análisis, estas limitaciones pueden llevar a subestimar microhábitats relevantes, reducir la precisión de las predicciones en zonas costeras complejas y aumentar la incertidumbre cuando se extrapolan modelos fuera de las áreas donde existen registros suficientes.

A partir de esto, se recomienda priorizar el monitoreo oceanográfico y biológico para validar las proyecciones del modelo, integrar variables ambientales particulares de los sectores donde podría existir una alta heterogeneidad de condiciones ambientales, esto permitiría evaluar la conectividad entre el PMFC y otras áreas de uso frecuente como el Canal Jerónimo, e incorporar explícitamente las dimensiones climáticas únicas que se encuentran en los fiordos y canales patagónicos de forma más precisa. La integración de estos elementos fortalecerá la capacidad del parque para responder de manera anticipada a las variaciones ambientales y garantizar la conservación efectiva de la ballena jorobada. En conjunto, la modelación confirma que el Parque Marino Francisco Coloane mantiene actualmente una alta representatividad del hábitat de *Megaptera novaeangliae*, pero que su sostenibilidad futura dependerá de la adopción de estrategias adaptativas y del fortalecimiento institucional de la gestión marina en el contexto del cambio climático.

## Sobre la Estimación de costos de implementación

Las propuestas de gestión elaboradas a partir de los resultados del modelo de distribución de especies representan un avance hacia la implementación de un enfoque de conservación adaptativo en el Parque Marino Francisco Coloane. Cada una de las cinco líneas estratégicas formuladas se articula con las fases operativas de los Estándares Abiertos para la Conservación, buscando transformar la información científica en acciones concretas que fortalezcan la resiliencia ecológica y la eficacia de gestión del área protegida.

La primera propuesta, orientada a la revisión y ajuste de la zonificación interna, surge como respuesta directa a los desplazamientos del hábitat proyectados para *Megaptera novaeangliae* bajo los escenarios de cambio climático. Los modelos evidenciaron que, en escenarios intermedios y de altas emisiones, las áreas de mayor idoneidad tienden a concentrarse hacia el sur-este del parque, fuera de las actuales zonas de protección estricta. Esta condición justifica la redefinición de los límites de las Zonas de Protección de Hábitat (ZPH) y de las Zonas Restringidas con Propósito Especial (ZRPE), de modo que la estructura espacial del parque acompañe la dinámica proyectada del hábitat. La implementación de esta medida no solo se ajusta a la fase de planificación de los Estándares Abiertos, sino que además es financieramente viable, ya que los estudios técnicos requeridos pueden ser cubiertos por instrumentos como el Fondo Nacional de Desarrollo Regional, cuyos montos pueden superar los \$800 millones CLP para proyectos ambientales (Gobierno Regional de Magallanes y Antártica Chilena, 2023), o por el Fondo Nacional de la Biodiversidad del SBAP, que financia iniciativas entre \$50 y \$600 millones CLP (Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas, 2024).

En paralelo, la implementación de corredores ecológicos marinos busca abordar la fragmentación funcional del hábitat identificada por el modelo, especialmente la conexión entre el PMFC y el Canal Jerónimo, proyectado como área de alta idoneidad futura. Esta acción refleja el principio de integridad ecosistémica más allá de los límites administrativos, promovido por el Conservation Measures Partnership (CMP, 2020). Además, su magnitud exige recursos superiores pero alcanzables mediante fondos internacionales como el GEF, cuyos proyectos en biodiversidad marina oscilan entre US\$1 y US\$8 millones (Global Environment Facility, 2023), o el Blue Nature entregado por Blue Action Fund, que financia acciones de conservación marina con montos entre €1 y €3 millones (Blue Action Fund, 2023). La articulación entre SBAP, MMA y estos mecanismos constituye un camino para avanzar hacia una conectividad ecológica a escala regional.

La tercera propuesta, relativa al monitoreo climático y ecológico, se concibe como un componente estratégico del ciclo adaptativo del CMP v4.0, permitiendo retroalimentar continuamente la toma de decisiones con base en evidencia empírica. La instalación de estaciones oceanográficas, sensores remotos y protocolos de monitoreo requiere inversiones que se alinean con los rangos ofrecidos por los programas sectoriales del MMA entre \$100 y \$400 millones CLP (Ministerio del Medio Ambiente, 2022) y por SUBPESCA a través del FIPA, cuyos proyectos fluctúan entre \$40 y \$150 millones CLP (Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, 2023). En paralelo, organizaciones como WWF y Pew Charitable Trusts aportan financiamiento entre US\$50.000 y US\$500.000 para monitoreo de megafauna, investigación aplicada y fortalecimiento comunitario (World Wildlife Fund, 2023; The Pew Charitable Trusts, 2022). Iniciativas multilaterales mayores, como el Fondo Verde para el clima

que financia proyectos entre US\$5 y US\$50 millones también pueden apoyar sistemas de monitoreo climático y adaptación basada en ecosistemas (Green Climate Fund, 2023).

El fortalecimiento institucional y la participación local, cuarta línea de acción, responde directamente a uno de los vacíos identificados en la evaluación del plan de manejo del parque. La creación del SBAP ofrece un contexto favorable para establecer mecanismos estables de coordinación interinstitucional y participación comunitaria. Estas acciones pueden desarrollarse en ciclos operativos de 2 a 3 años, completamente compatibles con los programas de gobernanza del MMA y SUBPESCA, que financian asesorías y articulación institucional dentro del rango de \$40 a \$400 millones CLP (Ministerio del Medio Ambiente, 2022; Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, 2023). Asimismo, organismos como FAO financian iniciativas de gobernanza pesquera y manejo integrado por montos que alcanzan los US\$300.000 (Food and Agriculture Organization, 2022).

Finalmente, la estrategia de educación y comunicación ambiental destaca como un componente clave para consolidar una cultura de conservación a largo plazo. Sus costos son menores, pero requieren continuidad. En este ámbito, el Fondo de Protección Ambiental financia iniciativas comunitarias por \$6 - \$12 millones CLP (Ministerio del Medio Ambiente, 2023), mientras que organizaciones como National Geographic (Pristine Seas) financian proyectos de investigación y divulgación ambiental entre US\$200.000 y US\$1 millón (National Geographic Society, 2022). A escala internacional, la Agenda Azul de Naciones Unidas y la Década de las Ciencias Oceánicas también promueven el financiamiento y cooperación científica en conservación marina (UNESCO, 2021).

En conjunto, las cinco propuestas de gestión traducen los resultados científicos en instrumentos operativos que fortalecen la capacidad de respuesta del Parque Marino Francisco Coloane ante escenarios de cambio climático. La integración de los instrumentos de financiamiento nacionales e internacionales demuestra que las medidas propuestas son no solo ecológicamente pertinentes, sino económicamente viables, ya que los costos estimados se encuentran dentro de los rangos típicos de financiamiento disponibles. La convergencia entre SBAP, MMA, SUBPESCA, FNDR y fondos multilaterales como GEF, Blue Action Fund y el Fondo Verde para el Clima permite proyectar un esquema sostenible de financiamiento mixto. Así, la implementación sostenida de estas acciones, respaldada por monitoreo continuo y financiamiento estable, será fundamental para asegurar la conservación efectiva de la ballena jorobada y de los ecosistemas críticos que sustentan su presencia en la Patagonia austral.

## 7 CONCLUSIÓN

La presente investigación evaluó las implicancias del cambio climático en la representatividad del hábitat de *Megaptera novaeangliae* en el Parque Marino Francisco Coloane (PMFC), integrando modelación de distribución de especies, análisis espacial, evaluación institucional y estimación de costos de propuestas de gestión. Este enfoque interdisciplinario permitió comprender de manera integral la efectividad actual del parque frente a escenarios climáticos futuros, aportando evidencia científica y lineamientos operativos para fortalecer la gestión de la conservación marina en el sur de Chile.

Los modelos de distribución obtenidos mediante el algoritmo MaxEnt mostraron un desempeño aceptable, identificando la salinidad superficial como la variable de mayor peso en la distribución de la especie, seguida por factores asociados a la circulación y pH del agua. Estos resultados vinculan la sensibilidad de *M. novaeangliae* a los gradientes oceanográficos característicos de la Patagonia austral, y destacan la relevancia de los sectores interiores del parque como áreas de alta idoneidad ambiental y de alimentación estacional. Las proyecciones bajo escenarios futuros de cambio climático (SSP1-1.9, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) evidencian desplazamientos marginales del hábitat hacia sectores más cercano a la Isla Charles, lo que refuerza la necesidad de mantener la conectividad ecológica entre el PMFC y su área de influencia, en particular con el Canal Jerónimo.

El análisis de representatividad espacial demostró que el parque cubre una porción significativa del hábitat actual de la especie, aunque existen zonas adyacentes ubicadas dentro del Área Marina de Múltiples Usos que desempeñan funciones ecológicas complementarias. Este hallazgo enfatiza la importancia de adoptar un enfoque ecosistémico en la planificación de la conservación, superando la visión fragmentada de los límites administrativos. En este contexto, los resultados sugieren la conveniencia de una revisión de la zonificación interna del PMFC, incorporando áreas de amortiguación o corredores marinos que aseguren la protección continua del hábitat frente a los desplazamientos inducidos por el cambio climático.

El análisis institucional del plan de manejo vigente evidencia avances importantes en el reconocimiento de la ballena jorobada como objeto de conservación, pero también identifica vacíos asociados a la ausencia de metas medibles, la falta de monitoreo sistemático y la escasa integración de la variable climática en la planificación. La incorporación de los resultados de esta investigación en la próxima revisión del plan representaría una oportunidad concreta para transitar hacia un modelo de gestión adaptativa, donde la evidencia científica oriente de manera dinámica las decisiones de manejo y evaluación.

Las propuestas de gestión como el ajuste de la zonificación interna, implementación de corredores ecológicos marinos, establecimiento de un sistema de monitoreo adaptativo, fortalecimiento institucional y educación ambiental conforman un marco operativo coherente con los principios de los Estándares Abiertos para la Conservación en su versión 4.0. Su implementación simultánea

permitiría aumentar la resiliencia ecológica del parque frente a escenarios de cambio climático, consolidando al PMFC como un modelo de referencia para la conservación de mamíferos marinos en Chile austral. La estimación de costos realizada complementa este marco al identificar los recursos técnicos, financieros y humanos necesarios, proporcionando una base para priorizar acciones según su factibilidad y contribución al logro de resultados.

Desde una perspectiva metodológica, esta investigación reafirma la utilidad de los modelos de distribución de especies como herramientas aplicadas a la gestión de áreas marinas protegidas, pero también evidencia las limitaciones inherentes a la información y resolución de los datos empleados. El uso de bases globales como Bio-ORACLE permitió obtener una cobertura homogénea, pero su resolución espacial (~9 km en latitudes altas) puede subestimar la heterogeneidad ambiental de los canales y fiordos patagónicos. En estos ambientes, las interacciones entre masas de agua continentales, oceánicas y de glaciares, junto con la variabilidad batimétrica, generan microhábitats difíciles de representar a escala global. Asimismo, la necesidad de extrapolar o interpolar datos en sectores sin cobertura completa introduce incertidumbre en las proyecciones, mientras que los escenarios CMIP6, aunque validados internacionalmente, presentan limitaciones en la resolución regional y la calibración local para el extremo sur de Chile.

A pesar de estas restricciones, los resultados obtenidos constituyen una aproximación para la gestión del PMFC y de *M. novaeangliae*. A futuro, se recomienda fortalecer los modelos mediante la incorporación de datos oceanográficos locales temperatura, salinidad, productividad y pH, y el uso de sensores satelitales de mayor resolución espacial y temporal, junto con registros acústicos y observaciones directas de comportamiento y presencia. Estas mejoras permitirán reducir la incertidumbre de los modelos, optimizar su capacidad predictiva y ampliar su aplicabilidad en procesos de planificación marina.

Finalmente, el estudio confirma que el Parque Marino Francisco Coloane cumple actualmente una función esencial en la conservación del hábitat de la Ballena Jorobada, pero su efectividad futura dependerá de la capacidad institucional para adaptarse a escenarios climáticos cambiantes. La consolidación del Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP) y la integración de herramientas de monitoreo y modelación espacial en los planes de manejo ofrecen una oportunidad única para avanzar hacia una conservación marina más dinámica, participativa y basada en evidencia. El fortalecimiento del monitoreo climático y ecológico, junto con la planificación y la cooperación entre el Estado, las universidades y los actores locales, se perfila como el camino más prometedor para garantizar la persistencia de *Megaptera novaeangliae* y la funcionalidad ecológica del sistema marino en el largo plazo.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Alaniz, A. J., Galleguillos, M., y Pérez-Quezada, J. (2020). Optimizing climate change impact assessment tools for conservation planning: An integrated methodology for endemic species under multiple climate models. *Ecological Indicators*, 117, 106519. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106519>
- Alaniz, A. J., Grez, A. A., y Zaviezo, T. (2018). Potential spatial interaction of the invasive species *Harmonia axyridis* (Pallas) with native and endemic coccinellids. *Journal of Applied Entomology*, 142(6), 505–517. <https://doi.org/10.1111/jen.12498>
- Assis, J., Tyberghein, L., Bosch, S., Verbruggen, H., Serrão, E. A., y Tittensor, D. P. (2018). Bio-ORACLE v2.0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 27(3), 277–284. <https://doi.org/10.1111/geb.12693>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2023). *Ley N° 21.600 crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas*. Santiago, Chile. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1210000>
- Bennett, N. J., & Dearden, P. (2014). Why local people do not support conservation: Community perceptions of marine protected area livelihood impacts, governance and management in Thailand. *Marine Policy*, 44, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.08.017>
- Blue Action Fund. (2023). *Funding for marine protected areas and coastal communities*. <https://www.blueactionfund.org>
- Clapham, P. J. (2000). The humpback whale: seasonal feeding and breeding in a baleen whale. *Cetacean Societies: Field Studies of Dolphins and Whales*, 173–196.
- Congreso Nacional de Chile. (2023). Ley N.º 21.600: Crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas. <https://www.bcn.cl>
- Consejo de Monumentos Nacionales. (2023). Listado oficial de santuarios de la naturaleza. <https://www.monumentos.gob.cl>
- Conservation Measures Partnership. (2020). Estándares abiertos para la práctica de la conservación (versión 4.0). *Conservation Standards*. <https://conservationstandards.org/resources/>
- Cooke, J. G. (2018). Megaptera novaeangliae. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T13006A50362794. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T13006A50362794.en>
- Convention on Biological Diversity (CBD). (1992). *Convention on Biological Diversity*. United Nations. Recuperado de <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf>
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., ... & Lautenbach, S. (2013). *Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance*. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Elith, J., y Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Fisheries, N. (2024, January 22). Humpback whale. NOAA. <https://www.fisheries.noaa.gov/species/humpback-whale>

- Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) & Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2024). *Proyecto GEF-SBAP Chile: Hacia la implementación del Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas*. Ministerio del Medio Ambiente, Chile.
- Food and Agriculture Organization. (2022). *Fisheries & aquaculture: Global governance and sustainable management programs*. <https://www.fao.org>
- Fundación Kreen. (s. f.). *Objetos de conservación*. <https://www.fundacionkreen.cl/objetos-de-conservacion/>
- Garland, E. C., Goldizen, A. W., Rekdahl, M. L., Constantine, R., Garrigue, C., Hauser, N. D., ... y Noad, M. J. (2011). Dynamic horizontal cultural transmission of humpback whale song at the ocean basin scale. *Current Biology*, 21(8), 687–691. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.03.019>
- Granizo, T., Pacheco, C., Maldonado, H., Peralvo, M., & Sierra, R. (2006). *Objetos de conservación y amenazas: Área Protegida Pichimahuida*. Pichimahuida Conservación. [https://www.pichimahuida.info/baseline-linea\\_base\\_files/Objetos%20conservacion%20y%20amenazas.pdf](https://www.pichimahuida.info/baseline-linea_base_files/Objetos%20conservacion%20y%20amenazas.pdf)
- GBIF. (2024). Global Biodiversity Information Facility. <https://www.gbif.org>
- Gibbons, J., Capella, J., y Valladares, C. (2003). Rediscovery of a humpback whale group in the Straits of Magellan, Chile. *Marine Mammal Science*, 19(1), 219–224. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2003.tb01105.x>
- Global Environment Facility. (2023). *GEF projects and funding overview*. <https://www.thegef.org>
- Gobierno Regional de Magallanes y de la Antártica Chilena. (2023). *Fondo Nacional de Desarrollo Regional: Lineamientos presupuestarios 2023*. <https://www.goremagallanes.cl>
- Green Climate Fund. (2023). *Funding proposals: Adaptation and climate resilience*. <https://www.greenclimate.fund>
- Hooker, S. K., y Gerber, L. R. (2004). Marine reserves as a tool for ecosystem-based management: The potential importance of megafauna. *Bioscience*, 54(1), 27–39. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0027:MRAATF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0027:MRAATF]2.0.CO;2)
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Iriarte, J. L., González, H. E., Nahuelhual, L., y Cáceres, M. (2010). Patagonian fjord ecosystems in southern Chile as a highly vulnerable region: Problems and needs. *Ambio*, 39(7), 463–466. <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0055-0>
- Kennedy, A. S., Zerbini, A. N., Rone, B. K., y Clapham, P. J. (2014). Individual variation in movements of satellite-tracked humpback whales *Megaptera novaeangliae* in the eastern Aleutian Islands and Bering Sea. *Endangered Species Research*, 23(2), 187–195. <https://doi.org/10.3354/esr00571>

- Katz, E. (2024). Chile's biodiversity at a crossroads: The challenges and promise of law 21.600. Landconservationnetwork.org. <https://landconservationnetwork.org/wp-content/uploads/2024/09/Chiles-Biodiversity-at-a-Crossroads.pdf>
- Kwiatkowski, L., et al. (2020). Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 models. *Biogeosciences*.
- Klaassen, M., Marques, T. A., Alves, F., & Fernández, M. (2025). Trends in marine species distribution models: a review of methodological advances and future challenges. *Ecography*. <https://doi.org/10.1002/ecog.07702>
- Ley N.º 21.600. (2023). Crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1183760>
- Margules, C. R., y Pressey, R. L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*, 405(6783), 243–253. <https://doi.org/10.1038/35012251>
- Merow, C., Smith, M. J., y Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058–1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. (2008). Ley 20.293. Declara a los espacios marítimos chilenos como santuario de cetáceos. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=276801>
- Ministerio del Medio Ambiente y PNUD. (2023). Proceso de actualización participativa de la ENB. <https://mma.gob.cl>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2018). Estrategia Nacional de Biodiversidad 2017–2030. <https://mma.gob.cl>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2021). Plan de Manejo Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos Francisco Coloane. Gobierno de Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2022). Áreas marinas costeras protegidas de múltiples usos. <https://areasprotegidas.mma.gob.cl>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2023). Ley que crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas. <https://www.leychile.cl>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Estrategia Nacional de Biodiversidad 2017–2030*. Gobierno de Chile. Recuperado de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/07/Estrategia-Nacional-de-Biodiversidad-2017-2030.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2022). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. <https://mma.gob.cl>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2023). *Fondo de Protección Ambiental: Bases de concurso*. <https://fondos.mma.gob.cl>
- Meynecke, J. O., Zerbini, A. N., Blasi, M. F., Johnston, D. W., & Cato, D. H. (2021). The role of environmental variables in humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) distribution and habitat use. *Frontiers in Marine Science*, 8, 720774. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.720774>

- Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2025, junio 11). *Chile llegará a más de la mitad de su océano protegido: ministra Maisa Rojas anuncia la propuesta de expansión de las áreas marinas protegidas*. <https://mma.gob.cl>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2025). *Informe N.º 3 de avance del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático – Biodiversidad*. Gobierno de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y Global Environment Facility (GEF). [https://expedientes.mma.gob.cl/storage/2025/06/09/expedientes/pdf/doc\\_7\\_202506091\\_44833.pdf](https://expedientes.mma.gob.cl/storage/2025/06/09/expedientes/pdf/doc_7_202506091_44833.pdf)
- NOAA Fisheries. (2023). Humpback Whale (*Megaptera novaeangliae*). <https://www.fisheries.noaa.gov/species/humpback-whale>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Asamblea General de Naciones Unidas. Recuperado de <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- National Geographic Society. (2022). *Pristine Seas: Marine conservation and exploration*. <https://www.nationalgeographic.org>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... y Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- OBIS. (2024). Ocean Biogeographic Information System. <https://www.obis.org>
- Ogalde, J. P., Rodríguez, M., y Molina, J. (2021). Marine co-management and Indigenous rights in Chile: The experience of the Lafkenche Law. *Marine Policy*, 130, 104564. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104564>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pliscoff, P., y Fuentes-Castillo, C. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 56, 61–78.
- Protecting Blue Corridors — Explore. (2025). Protecting Blue Corridors. <https://bluecorridors.org/explore/species>
- Quiroga, E., Palma, M., Tapia, F. J., y Gutiérrez, D. (2020). Evaluación de impactos de la salmonicultura sobre los ecosistemas bentónicos de la Patagonia chilena. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*.
- Ramírez, F., y Gelcich, S. (2021). Conservation progress and challenges in Chile's marine protected areas. *Marine Policy*, 128, 104469. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104469>
- RICHARDSON, D. M., y WHITTAKER, R. J. (2010). Conservation biogeography-foundations, concepts and challenges. *Diversity and Distributions*, 16(3), 313-320.
- Rodrigues, A. S. L., Andelman, S. J., Bakarr, M. I., Boitani, L., Brooks, T. M., Cowling, R. M., ... y Yan, X. (2004). Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. *Nature*, 428(6983), 640–643. <https://doi.org/10.1038/nature02422>

- SERNAPESCA. (Consulta: 29 mayo 2025.). Ballena jorobada. Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura. <https://www.sernapesca.cl>
- Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA). (2023). Áreas marinas protegidas. <https://www.subpesca.cl>
- Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. (2023). Espacios costeros marinos para pueblos originarios (ECMPO). <https://www.subpesca.cl>
- van Proosdij, A. S. J., Sosef, M. S. M., Wieringa, J. J., y Raes, N. (2016). Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography*, 39(6), 542–552. <https://doi.org/10.1111/ecog.01509>
- Steven J. Phillips, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire. [Internet] Software Maxent para modelar nichos y distribuciones de especies (Versión 3.4.1). Disponible en: [http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/).
- Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas. (2023). *Ley N° 21.600: Crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas*. Gobierno de Chile. <https://www.carey.cl/se-publica-ley-n-21-600-que-crea-el-servicio-de-biodiversidad-y-areas-protegidas-y-el-sistema-nacional-de-areas-protegidas/>
- Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas. (2024). *Fondo Nacional de la Biodiversidad: Bases y lineamientos*. <https://www.sbap.gob.cl>
- Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. (2023). *Fondos de Investigación Pesquera y de Acuicultura: Bases de concurso*. <https://www.subpesca.cl/fipa>
- The Pew Charitable Trusts. (2022). *Ocean conservation and governance initiatives*. <https://www.pewtrusts.org>
- UNESCO. (2021). *United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030)*. <https://oceandecade.org>
- Universidad Santo Tomás. (s. f.). *Objetos de conservación — Santuario de la Naturaleza Humedal Bahía Lomas*. <https://www.ust.cl/bahia-lomas/santuario-de-la-naturaleza-humedal-bahia-lomas/objetos-de-conservacion/>
- World Wildlife Fund. (2023). *Oceans conservation initiatives*. <https://www.worldwildlife.org>
- WHITTAKER, R. J., ARAÚJO, M. B., JEPSON, P., LADLE, R. J., WATSON, J. E. M., y WILLIS, K. J. (2005). Conservation biogeography: assessment and prospect. *Diversity and Distributions*, 11, 3-23.
- WWF. (2020). La importancia de las ballenas en la salud del océano. World Wildlife Fund. <https://www.worldwildlife.org>
- Zizka, A., Silvestro, D., Andermann, T., Azevedo, J., Ritter, C. D., Edler, D., ... y Antonelli, A. (2019). CoordinateCleaner: Standardized cleaning of occurrence records from biological collection databases. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(5), 744–751. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13152>

#### Variables climáticas:

- v.3.0 Assis, J., Fernández Bejarano, S.J., Salazar, V.W., Schepers, L., Gouvêa, L., Fragkopoulou, E., Leclercq, F., Vanhoorne, B., Tyberghein, L., Serrão, E.A., Verbruggen, H., De Clerck, O. (2024) Bio-ORACLE v3.0. Pushing marine data layers to the CMIP6 Earth

system models of climate change research. *Global Ecology and Biogeography*. DOI: 10.1111/geb.13813

- v.1.0 Tyberghein L, Verbruggen H, Pauly K, Troupin C, Mineur F, De Clerck O (2012) Bio-ORACLE: A global environmental dataset for marine species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 272–281. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2011.00656.x

## 9 ANEXOS

### 9.1 Anexo 1: Aplicación de “Matriz de caracterización del Plan de Manejo del Parque Marino Francisco Coloane en relación con la conservación de *Megaptera novaeangliae*” (Elaboración Propia)

Nº	Componente clave del Plan de Manejo	Descripción encontrada en el documento	¿Presente en el plan? (Sí / No / Parcial)	Nivel de especificidad (Alta / Media / Baja)	Pertinencia con <i>M. novaeangliae</i> (Directa / Indirecta / Nula)	Observaciones o brechas identificadas
1	Objeto(s) de conservación	Identificación de zonas de alimentación de la ballena jorobada como objeto prioritario.	Sí	Media	Directa	No se detallan aspectos ecológicos funcionales ni zonas específicas.
2	Diagnóstico de amenazas	Amenazas como turismo, pesca, residuos, colisiones y cambio climático son identificadas.	Sí	Alta	Directa	No se priorizan amenazas ni se relacionan con escenarios futuros.
3	Factores causales o indirectos	Se mencionan algunos factores indirectos como desconocimiento, falta de coordinación y fiscalización.	Parcial	Media	Indirecta	Falta mayor desarrollo de modelos conceptuales de causalidad.
4	Metas de conservación	No se formulan metas específicas ni cuantificables.	No	Nula	Directa	Ausencia total de metas SMART.
5	Estrategias y medidas de manejo	Estrategias generales sin formulación como teorías del cambio.	Parcial	Media	Directa	Faltan indicadores y cronograma de implementación.
6	Monitoreo y evaluación	No se incluyen mecanismos formales de seguimiento ni evaluación.	No	Nula	Directa	No hay protocolos de seguimiento o evaluación.
7	Participación de actores	Incluye participación del pueblo Kawésqar, pescadores artesanales y sector turismo.	Sí	Alta	Indirecta	No se sistematizan los aportes ni se establece retroalimentación.
8	Mecanismos de gestión adaptativa	No se identifican mecanismos para revisar o ajustar las acciones.	No	Nula	Directa	No hay planificación para revisión periódica ni ajuste de estrategias.
9	Enfoque sobre cambio climático	El cambio climático es mencionado pero sin acciones ni escenarios prospectivos.	Parcial	Baja	Directa	No se consideran medidas de adaptación o resiliencia.
10	Inclusión explícita de <i>M. novaeangliae</i>	Se menciona directamente a la especie como objeto de conservación prioritaria.	Sí	Alta	Directa	Presencia reconocida pero sin indicadores ni metas específicas.

## 9.2 Anexo 2: Aplicación de Matriz de evaluación del plan de manejo del PMFC según los Estándares Abiertos para la Conservación (Elaboración Propia).

Componente de los Estándares Abiertos	Descripción esperada	Presencia en el Plan de Manejo del PMFC	Pertinencia para la conservación de <i>M. novaeangliae</i>	Observaciones / Brechas identificadas
<b>Objetos de conservación</b>	Identificación clara de los elementos clave a conservar (especies, hábitats, procesos ecológicos)	Sí	Alta	La ballena jorobada está explícitamente incluida como objeto prioritario.
<b>Amenazas directas</b>	Diagnóstico detallado de amenazas que afectan a los objetos de conservación	Sí	Alta	Se identifican amenazas específicas como el turismo y tráfico marítimo, pero no se desarrollan en escenarios futuros.
<b>Factores indirectos o causales</b>	Análisis de causas subyacentes de las amenazas (p. ej. actividades humanas, políticas públicas, etc.)	Parcial	Media	Se consideran factores como desconocimiento, poca fiscalización y falta de coordinación.
<b>Metas de conservación</b>	Definición de metas medibles y alcanzables para los objetos de conservación	No	Nula	No existen metas específicas asociadas a la recuperación o protección de la especie.
<b>Estrategias de manejo</b>	Propuesta de acciones claras y estructuradas para mitigar amenazas y alcanzar las metas	Parcial	Alta	Se proponen acciones generales, pero sin indicadores ni cronograma de implementación.
<b>Monitoreo y evaluación</b>	Indicadores, líneas base, frecuencia de seguimiento y mecanismos de evaluación de desempeño	No	Baja	No se mencionan mecanismos de seguimiento específicos para cetáceos.
<b>Participación de actores</b>	Inclusión de comunidades, organizaciones, academia y sector público en el diseño e implementación del plan	Sí	Media	Participación de Kawésqar y pescadores, pero sin planificación sistemática ni continuidad.
<b>Enfoque de gestión adaptativa</b>	Capacidad de ajustar el plan en función de resultados de monitoreo o cambios en el contexto ecológico	No	Baja	No se contempla adaptación explícita ante escenarios de cambio climático o nuevos datos.



### 9.3 Anexo 3: Script Preprocesamiento Registros de ocurrencia lenguaje R.

```
# Paquetes
options(repos = c(CRAN = "https://cloud.r-project.org"))
.cran <- c("sf", "dplyr", "stringr", "lubridate", "janitor", "readr", "geodist")
for(p in .cran) if(!requireNamespace(p, quietly = TRUE)) install.packages(p, dependencies = TRUE)
library(sf); library(dplyr); library(stringr); library(lubridate); library(janitor); library(readr)

# Rutas
in_gbif <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Registro de
ocurrencias/gbif_ocurrencias/gbif_ocurrencias.csv"
in_obis <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Registro de
ocurrencias/Obis_ocurrencias/Obis_Ocurrencias.csv"
shape_path <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Shapes/Area de conservacion de multiples usos FC/polygon.shp"
out_dir <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Registro de ocurrencias/Mn_Ocurrencias_Procesadas"
dir.create(out_dir, recursive = TRUE, showWarnings = FALSE)

# Utilidades
detect_delim <- function(path){
  # intenta detectar delimitador (csv o tsv)
  lines <- readLines(path, n = 5, warn = FALSE)
  score <- function(s, d) max(lengths(strsplit(s, d, fixed = TRUE)))
  cands <- c(", " = 0, "\t" = 0, ";" = 0, "|" = 0)
  for(d in names(cands)){
    cands[d] <- max(vapply(lines, score, integer(1), d = d))
  }
  names(which.max(cands))
}

standardize_df <- function(path, src_label="SRC"){
  delim <- detect_delim(path)
  df_raw <- suppressWarnings(read_delim(path, delim = delim, guess_max = 100000, show_col_types = FALSE))
  df <- janitor::clean_names(df_raw)
  nms <- names(df)

# mapeo de nombres
lon_candidates <- c("decimal_longitude", "longitude", "lon", "long", "x", "decimallon", "decimal_longitude_deg")
lat_candidates <- c("decimal_latitude", "latitude", "lat", "y", "decimallat", "decimal_latitude_deg")
date_candidates <- c("event_date", "date", "eventdate", "fecha", "year_month_day", "ymd")
sp_candidates <- c("species", "scientific_name", "taxon", "binomial", "sp", "nombre_cientifico")

pick <- function(cands) cands[cands %in% nms][1]

lon_col <- pick(lon_candidates); lat_col <- pick(lat_candidates)
date_col <- pick(date_candidates); sp_col <- pick(sp_candidates)

if(is.na(lon_col) || is.na(lat_col)) stop("No se encontraron columnas de longitud/latitud en: ", src_label)

# construir base estandarizada
out <- tibble::tibble(
  source = src_label,
  longitude = suppressWarnings(as.numeric(df[[lon_col]])),
  latitude = suppressWarnings(as.numeric(df[[lat_col]])),
  event_date = NA_Date_,
  species = if(!is.na(sp_col)) as.character(df[[sp_col]]) else "Megaptera novaeangliae"
)
```

```

# fecha
if(!is.na(date_col)){
  # intenta como Date o ymd flexible
  ed <- suppressWarnings(as.Date(df[[date_col]]))
  if(all(is.na(ed))){
    ed <- suppressWarnings(lubridate::ymd(df[[date_col]]))
  }
  out$event_date <- ed
}

# limpieza
out <- out %>%
  filter(!is.na(longitude), !is.na(latitude),
         is.finite(longitude), is.finite(latitude)) %>%
  filter(!(longitude == 0 & latitude == 0)) %>%
  mutate(species = dplyr::if_else(is.na(species) | species == "", "Megaptera novaeangliae", species))

#duplicar por lon/lat/fecha
out <- out %>% distinct(longitude, latitude, event_date, .keep_all = TRUE)
attr(out, "delim") <- delim
out
}

# Rarefacción geodésica (km). Mantiene registros más recientes.
thinning_km <- function(df, km = 1){
  if(nrow(df) <= 1) return(df)
  # ordenar por fecha desc; si no hay fecha, mantiene orden
  df <- df %>% arrange(dplyr::desc(event_date))
  keep <- rep(TRUE, nrow(df))
  coords <- as.matrix(df[, c("longitude", "latitude")])

  for(i in seq_len(nrow(df))){
    if(!keep[i]) next
    if(i < nrow(df)){
      d <- geodist::geodist(coords[i,,drop=FALSE], coords[(i+1):nrow(df),,drop=FALSE], measure = "geodesic") / 1000
      too_close <- which(d < km)
      if(length(too_close)) keep[(i+1):nrow(df)][too_close] <- FALSE
    }
  }
  df[keep, , drop = FALSE]
}

# Recorte al polígono (puntos dentro)
clip_within_polygon <- function(df, poly_sf){
  if(nrow(df) == 0) return(df)
  pts <- sf::st_as_sf(df, coords = c("longitude", "latitude"), crs = 4326, remove = FALSE)
  inside <- sf::st_within(pts, poly_sf, sparse = FALSE)
  pts[inside, ] %>% sf::st_drop_geometry()
}

write_maxent_files <- function(label, df, out_dir){
  # Con encabezados (útil para revisar):
  out_ready <- file.path(out_dir, paste0("MN_", label, "_MaxEnt_ready.csv"))
  readr::write_csv(
    df %>% transmute(species = "Megaptera_novaeangliae", longitude, latitude),
    out_ready
  )
  # sin encabezados (al cargar "samples"):
  out_final <- file.path(out_dir, paste0("MN_", label, "_MaxEnt_final.csv"))
}

```

```

write.table(
  df %>% transmute(species = "Megaptera_novaeangliae", longitude, latitude),
  out_final, sep = ",", row.names = FALSE, col.names = FALSE, quote = FALSE
)
list(ready = out_ready, final = out_final)
}

# Cargar polígono AMCP-MU (WGS84)
stopifnot(file.exists(shape_path))
area <- sf::st_read(shape_path, quiet = TRUE) |> sf::st_make_valid() |> sf::st_transform(4326)
area_u <- sf::st_union(area)

# Leer y estandarizar GBIF / OBIS ----
gbif_df <- standardize_df(in_gbif, "GBIF")
obis_df <- standardize_df(in_obis, "OBIS")

# Recorte estricto al polígono ----
gbif_clip <- clip_within_polygon(gbif_df, area_u)
obis_clip <- clip_within_polygon(obis_df, area_u)

# Rarefacción a 1 km (manteniendo los más recientes) ----
gbif_thin <- thinning_km(gbif_clip, km = 1)
obis_thin <- thinning_km(obis_clip, km = 1)

# Exportes por fuente
# GPKG (para GIS)
gbif_gpkg <- file.path(out_dir, "MN_GBIF_final.gpkg")
obis_gpkg <- file.path(out_dir, "MN_OBIS_final.gpkg")
sf::st_as_sf(gbif_thin, coords = c("longitude", "latitude"), crs = 4326, remove = FALSE) |>
  sf::st_write(gbif_gpkg, delete_dsn = TRUE, quiet = TRUE)
sf::st_as_sf(obis_thin, coords = c("longitude", "latitude"), crs = 4326, remove = FALSE) |>
  sf::st_write(obis_gpkg, delete_dsn = TRUE, quiet = TRUE)

# CSV MaxEnt-ready (con y sin encabezados)
gbif_csv <- write_maxent_files("GBIF", gbif_thin, out_dir)
obis_csv <- write_maxent_files("OBIS", obis_thin, out_dir)

# COMBINADO (y rarefacción)
comb_all <- dplyr::bind_rows(
  dplyr::mutate(gbif_thin, source = "GBIF"),
  dplyr::mutate(obis_thin, source = "OBIS")
) %>%
  # deduplicar otra vez por lon/lat/fecha por si hay coincidencias entre fuentes
  dplyr::distinct(longitude, latitude, event_date, .keep_all = TRUE)

comb_thin <- thinning_km(comb_all, km = 1)

# Exportes combinado
comb_gpkg <- file.path(out_dir, "MN_COMBINADO_final.gpkg")
sf::st_as_sf(comb_thin, coords = c("longitude", "latitude"), crs = 4326, remove = FALSE) |>
  sf::st_write(comb_gpkg, delete_dsn = TRUE, quiet = TRUE)

comb_csv <- write_maxent_files("COMBINADO", comb_thin, out_dir)

#Resumen
txt_path <- file.path(out_dir, paste0("resumen_ocurrencias_", format(Sys.time(), "%Y%m%d_%H%M%S"), ".txt"))
sink(txt_path)
cat("Resumen preparación de ocurrencias - Megaptera novaeangliae\n")
cat("Área: AMCP-MU FC (recorte estricto, sin buffer)\n\n")

```

```

cat("GBIF (crudo estandarizado): ", nrow(gbif_df), "\n")
cat("GBIF dentro polígono: ", nrow(gbif_clip), "\n")
cat("GBIF tras rarefacción 1km: ", nrow(gbif_thin), "\n\n")
cat("OBIS (crudo estandarizado): ", nrow(obis_df), "\n")
cat("OBIS dentro polígono: ", nrow(obis_clip), "\n")
cat("OBIS tras rarefacción 1km: ", nrow(obis_thin), "\n\n")
cat("COMBINADO dentro polígono: ", nrow(comb_all), "\n")
cat("COMBINADO rarefacción 1km: ", nrow(comb_thin), "\n\n")
cat("Archivos:\n")
cat(" - GPKG GBIF: ", gbif_gpkg, "\n")
cat(" - GPKG OBIS: ", obis_gpkg, "\n")
cat(" - GPKG COMBINADO: ", comb_gpkg, "\n")
cat(" - CSV GBIF ready: ", gbif_csv$ready, "\n")
cat(" - CSV GBIF final: ", gbif_csv$final, "\n")
cat(" - CSV OBIS ready: ", obis_csv$ready, "\n")
cat(" - CSV OBIS final: ", obis_csv$final, "\n")
cat(" - CSV COMB ready: ", comb_csv$ready, "\n")
cat(" - CSV COMB final: ", comb_csv$final, "\n")
sink()

message(">> Listo.")
message(" Carpeta de salida: ", out_dir)
message(" Resumen: ", txt_path)

```

## 9.4 Anexo 4: Script Preprocesamiento de variables ambientales en Rstudio Lenguaje R.

```

options(repos = c(CRAN = "https://cloud.r-project.org"))
for(p in c("terra","sf","gstat","stringr","tools")) {
  if(!requireNamespace(p, quietly=TRUE)) install.packages(p, dependencies=TRUE)
}
library(terra); library(sf); library(gstat); library(stringr); library(tools)

terra::terraOptions(progress = 1, memfrac = 0.8)

# Rutas AMP y salida
amp_shape <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Shapes/Union/Union parque Area de multiples usos.shp"
out_root <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Salidas preprocesamientoV1_ASC_IDW"

# Plantilla para alinear a un grid
template_path <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Salidas
preprocesamientoV1/_plantilla/TEMPLATE_grid.asc"
use_template <- file.exists(template_path)
tpl <- if (use_template) rast(template_path) else NULL

# Mapa de carpetas a procesar
dirs_map <- c(
  "ROOT_VARS" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales",
  "HIST_2010_2020" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Historico 2010-2020",

  "SSP19_ROOT" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp1 1.9 2020-2050",
  "SSP19_2020_2030" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp1 1.9 2020-
2050/Ssp1.9 2020-2030",
  "SSP19_2030_2040" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp1 1.9 2020-
2050/Ssp1.9 2030-2040",

```

```

"SSP19_2040_2050" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp1 1.9 2020-2050/Ssp1.9 2040-2050",

"SSP245_ROOT" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp2 4.5 2020-2050",
"SSP245_2020_2030" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp2 4.5 2020-2050/Ssp2 4.5 2020-2030",
"SSP245_2030_2040" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp2 4.5 2020-2050/Ssp2 4.5 2030-2040",
"SSP245_2040_2050" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp2 4.5 2020-2050/Ssp2 4.5 2040-2050",

"SSP585_ROOT" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp5 8.5 2020-2050",
"SSP585_2020_2030" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp5 8.5 2020-2050/Ssp5 8.5 2020-2030",
"SSP585_2030_2040" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp5 8.5 2020-2050/Ssp5 8.5 2030-2040",
"SSP585_2040_2050" = "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Variables ambientales/Ssp5 8.5 2020-2050/Ssp5 8.5 2040-2050"
)

# Parámetros de IDW
idw_nmax <- 12 # vecinos
idw_p <- 2 # potencia
epsg_idw <- 32719 # CRS métrico para IDW (ajusta si corresponde a tu zona)

# Utilidades
safe_name <- function(x) gsub("[^A-Za-z0-9_\\-]+", "_", x)
simplify_name <- function(path) {
  stem <- tools::file_path_sans_ext(basename(path))
  var <- tolower(str_replace(stem, "_.*$", ""))
  if(nzchar(var)) var <- tolower(stem)
  safe_name(var)
}
fix_longitude <- function(r){ ex <- ext(r); if (!is.na(xmax(ex)) && xmax(ex) > 180) rotate(r) else r }
temporal_mean <- function(r) if (nlyr(r) > 1) app(r, mean, na.rm=TRUE) else r

# Asignar WGS84 si no hay CRS (cuando la extensión parece lon/lat); si hay CRS ≠ WGS84, re proyecta
ensure_wgs84 <- function(r) {
  crs_str <- try(as.character(terra::crs(r)), silent = TRUE)
  if (inherits(crs_str, "try-error") || is.na(terra::crs(r)) || crs_str == "") {
    e <- terra::ext(r)
    if (is.finite(terra::xmin(e)) && is.finite(terra::xmax(e)) &&
        is.finite(terra::ymin(e)) && is.finite(terra::ymax(e)) &&
        terra::ymax(e) <= 90.5 && terra::ymin(e) >= -90.5 &&
        terra::xmin(e) >= -360.5 && terra::xmax(e) <= 360.5) {
      message(" * CRS ausente → asigno EPSG:4326 (lon/lat).")
      terra::crs(r) <- "EPSG:4326"
    } else {
      stop("CRS ausente y la extensión no parece lon/lat; revisar archivo.")
    }
  } else if (!grepl("4326|longlat|WGS", crs_str, ignore.case = TRUE)) {
    message(" * CRS no WGS84 → re proyecta a EPSG:4326 ...")
    r <- terra::project(r, "EPSG:4326", method = "bilinear")
  }
  r
}

# AMP
stopifnot(file.exists(amp_shape))

```

```

amp_sf <- st_read(amp_shape, quiet=TRUE) |> st_make_valid() |> st_transform(4326)
amp_u <- st_union(amp_sf) |> st_as_sf()
amp_v <- vect(amp_u)
amp_ex <- ext(amp_v)

# Función principal para una carpeta
process_dir <- function(in_dir, out_dir) {
  dir.create(out_dir, recursive = TRUE, showWarnings = FALSE)
  message("\n=== Carpeta: ", in_dir, " ===")
  files <- list.files(in_dir, pattern="\\.nc|nc4|tif|tiff$", full.names=TRUE, recursive=TRUE, ignore.case=TRUE)
  if (length(files) == 0) { message(" (Sin .nc/.tif en esta carpeta)"); return(invisible(NULL)) }

  qa <- data.frame(file=character(), out_file=character(), ncell=integer(),
                  nonNA_cells=integer(), filled_pct=numeric(),
                  min=numeric(), max=numeric(), stringsAsFactors = FALSE)

  for (i in seq_along(files)) {
    f <- files[i]; message(sprintf(" [%d/%d] %s", i, length(files), basename(f)))
    var_tag <- simplify_name(f)

# Leer
    r_in <- try(rast(f), silent=TRUE)
    if (inherits(r_in,"try-error")) { message(" → no se pudo leer, salto."); next }

# 2) Asegurar WGS84 y corregir longitudes
    r_in <- ensure_wgs84(r_in)
    r_in <- fix_longitude(r_in)

# 3) Promedio temporal si hay múltiples bandas
    r_in <- temporal_mean(r_in)

# 4) (Opcional) Alinear a plantilla
    if (use_template) r_in <- project(r_in, tpl, method="bilinear")

# Recorte a extensión del AMP y materializar valores antes de mask
    r_c <- try(crop(r_in, amp_ex), silent=TRUE)
    if (inherits(r_c,"try-error") || ncell(r_c)==0) { message(" → sin solape con AMP, salto."); next }
    r_c <- writeRaster(r_c, filename = tempfile(fileext = ".tif"), overwrite = TRUE) # <- CORREGIDO

# Enmascarar por AMP
    r_amp <- try(mask(r_c, amp_v), silent=TRUE)
    if (inherits(r_amp,"try-error")) { message(" → mask() falló, salto."); next }

# IDW solo en NA internos
    amp_mask <- init(r_amp, 1) |> mask(amp_v) # 1 dentro del AMP, NA fuera
    vals_before <- values(r_amp)
    inside_idx <- which(is.na(vals_before) & !is.na(values(amp_mask)))
    filled_pct <- 0

    if (length(inside_idx) > 0) {
      df_all <- as.data.frame(r_amp, xy=TRUE, na.rm=FALSE)
      obs_idx <- which(!is.na(vals_before) & !is.na(values(amp_mask)))

      if (length(obs_idx) >= 10) {
        pts_obs <- data.frame(x=df_all$x[obs_idx], y=df_all$y[obs_idx], z=vals_before[obs_idx])
        pts_sf <- st_as_sf(pts_obs, coords=c("x","y"), crs=4326) |> st_transform(epsg_idw)

        grid_pred <- data.frame(x=df_all$x[inside_idx], y=df_all$y[inside_idx])
        grid_sf <- st_as_sf(grid_pred, coords=c("x","y"), crs=4326) |> st_transform(epsg_idw)

```

```

g <- gstat::gstat(formula = z ~ 1, data = pts_sf, nmax = idw_nmax, set = list(idp = idw_p))
pred <- predict(g, grid_sf)
r_amp[inside_idx] <- pred$var1.pred

vals_after <- values(r_amp)
ok <- sum(!is.na(vals_after[inside_idx]))
filled_pct <- 100 * ok / length(inside_idx)
message(sprintf(" → IDW: %.2f%% de NA internos rellenos.", filled_pct))
} else {
  message(" → pocos puntos observados dentro del AMP (" , length(obs_idx), "); no se aplica IDW.")
}
} else {
  message(" → sin NA internos; no se requiere IDW.")
}

#Seguridad: NA fuera del AMP
r_amp <- mask(r_amp, amp_v)

# 9) QA y escritura .asc
rng <- try(global(r_amp, c("min","max"), na.rm=TRUE), silent=TRUE)
nn <- try(global(!is.na(r_amp), "sum", na.rm=TRUE)[1,1], silent=TRUE); nn <- if (inherits(nn,"try-error")) NA else nn

out_file <- file.path(out_dir, paste0(var_tag, "_AMP_IDW.asc"))
if (!is.na(nn) && nn > 0) {
  writeRaster(r_amp, out_file, filetype="AAIGrid", NAflag=-9999, overwrite=TRUE)
} else {
  message(" → todo NA dentro del AMP; no se escribe .asc.")
  out_file <- NA
}

qa[nrow(qa)+1,] <- list(
  file = f,
  out_file = ifelse(is.na(out_file), "", out_file),
  ncell = ncell(r_amp),
  nonNA_cells = ifelse(is.na(nn), 0, nn),
  filled_pct = filled_pct,
  min = ifelse(inherits(rng,"try-error"), NA, rng[1,1]),
  max = ifelse(inherits(rng,"try-error"), NA, rng[1,2])
)

rm(r_in, r_c, r_amp, amp_mask); gc()
}

# Guardar QA por carpeta
qa_path <- file.path(out_dir, "QA_recorte_IDW.csv")
write.csv(qa, qa_path, row.names = FALSE)
message("✓ Carpeta procesada → ", out_dir)
}

# Ejecutar todas las carpetas indicadas
for (tag in names(dirs_map)) {
  in_dir <- dirs_map[[tag]]
  out_dir <- file.path(out_root, tag)
  process_dir(in_dir, out_dir)
}

message("\n Terminado. Revisar las subcarpetas en: ", out_root)

```

## 9.5 Anexo 5: Script para cálculo de colinealidad Spearman

```
# PARÁMETROS
input_csv <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Correlacion/Calcular correlacion spearman.csv"
out_dir <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Correlacion/Salidas_Spearman"
cutoff_r <- 0.7 # umbral de colinealidad (|rho|)
sample_n <- 0 # 0 = sin muestreo; p.ej. 10000 para acelerar
id_cols <- c() # nombres de columnas ID/fecha a excluir de la correlación (si aplica)

# INSTALAR/CARGAR PAQUETES
install_if_missing <- function(pkgs) {
  for (p in pkgs) {
    if (!requireNamespace(p, quietly = TRUE)) {
      install.packages(p, dependencies = TRUE)
    }
  }
}
install_if_missing(c("Hmisc", "corrplot", "caret", "readr", "stringi"))

library(Hmisc) # rcorr: Spearman + p-values
library(corrplot) # visualización
library(caret) # nearZeroVar, findCorrelation
library(readr) # lectura rápida
library(stringi)

# LECTURA DEL CSV
if (!dir.exists(out_dir)) dir.create(out_dir, recursive = TRUE)
message("Leyendo CSV: ", input_csv)

read_csv_robusto <- function(path) {
  # Inspección rápida de primera línea para inferir separador
  primera_linea <- readLines(path, n = 1, warn = FALSE)
  # Heurística: si hay muchos ';', probablemente separador ';' y coma decimal
  sep_puntoycoma <- (stri_count_fixed(primera_linea, ";") > stri_count_fixed(primera_linea, ","))
  if (sep_puntoycoma) {
    # Intento base R con sep=';' y dec=',' (común en CSV europeos/latam)
    suppressWarnings(read.csv(path, sep = ";", dec = ",", stringsAsFactors = FALSE, check.names = FALSE))
  } else {
    # Intento readr::read_csv (coma como separador, punto decimal)
    suppressWarnings(readr::read_csv(path, show_col_types = FALSE))
  }
}

dat0 <- tryCatch(
  read_csv_robusto(input_csv),
  error = function(e) {
    message("Lectura estándar falló, intentando alternativa sep=';' y dec=',' ...")
    suppressWarnings(read.csv(input_csv, sep = ";", dec = ",", stringsAsFactors = FALSE, check.names = FALSE))
  }
)

if (!is.data.frame(dat0) || nrow(dat0) == 0) {
  stop("El archivo CSV está vacío o no se pudo leer correctamente.")
}
```

```

# Excluir columnas ID/fecha
if (length(id_cols)) {
  keep <- setdiff(names(dat0), id_cols)
  dat0 <- dat0[, keep, drop = FALSE]
}

# Mantener solo columnas numéricas
is_num <- vapply(dat0, is.numeric, logical(1))
if (!any(is_num)) stop("No hay columnas numéricas en el CSV (tras excluir id_cols).")
dat <- dat0[, is_num, drop = FALSE]

# Remover columnas con varianza ~0
nzv_idx <- caret::nearZeroVar(dat, saveMetrics = TRUE)
if (any(nzv_idx$nzv)) {
  message("Eliminando columnas con varianza ~0: ",
    paste(rownames(nzv_idx)[nzv_idx$nzv], collapse = ", "))
  dat <- dat[, !nzv_idx$nzv, drop = FALSE]
}

# Eliminar filas completamente NA
all_na_rows <- apply(dat, 1, function(x) all(is.na(x)))
if (any(all_na_rows)) {
  dat <- dat[!all_na_rows, , drop = FALSE]
  message("Filas completamente NA eliminadas: ", sum(all_na_rows))
}

if (ncol(dat) < 2) stop("Quedó una sola columna numérica tras la limpieza; no se puede correlacionar.")

# MATRIZ SPEARMAN + p-VALUES
mat <- as.matrix(dat)
rc <- Hmisc::rcorr(mat, type = "spearman")

R <- rc$r # matriz de correlaciones (rho)
P <- rc$p # matriz de p-values

# Guardar resultados
out_cor_csv <- file.path(out_dir, "spearman_cor_matrix.csv")
out_p_csv <- file.path(out_dir, "spearman_pvalues_matrix.csv")
readr::write_csv(as.data.frame(R), out_cor_csv)
readr::write_csv(as.data.frame(P), out_p_csv)

message("Matrices exportadas:\n- ", out_cor_csv, "\n- ", out_p_csv)

# GRAFICAR CORR PLOT
png(file.path(out_dir, "spearman_corrplot.png"), width = 1400, height = 1200, res = 150)
corrplot::corrplot(R,
  method = "color",
  type = "upper",
  order = "hclust",
  tl.col = "black",
  tl.cex = 0.8,
  number.cex = 0.7,
  addCoef.col = NA) # cambiar a "black" si quieres ver números sobre cada celda
dev.off()
message("Gráfico guardado: ", file.path(out_dir, "spearman_corrplot.png"))

```

```

#DETECTAR COLINEALIDADES
# findCorrelation usa |rho|; reemplazar NAs fuera de diagonal por 0 para evitar falsos positivos
R2 <- R
diag(R2) <- 0
R2[is.na(R2)] <- 0

remove_idx <- caret::findCorrelation(R2, cutoff = cutoff_r, names = FALSE, exact = TRUE)
vars_all <- colnames(R2)
vars_remove <- if (length(remove_idx)) vars_all[remove_idx] else character(0)
vars_keep <- setdiff(vars_all, vars_remove)

# Exportar listas
readr::write_lines(vars_all, file.path(out_dir, "variables_todas.txt"))
readr::write_lines(vars_remove, file.path(out_dir, sprintf("variables_remover_rgt%.2f.txt", cutoff_r)))
readr::write_lines(vars_keep, file.path(out_dir, sprintf("variables_conservar_rlt%.2f.txt", cutoff_r)))

message("Umbral |rho| >= ", cutoff_r)
message("Variables a remover (colineales): ",
       ifelse(length(vars_remove), paste(vars_remove, collapse = ", "), "Ninguna"))
message("Variables a conservar (no colineales): ", paste(vars_keep, collapse = ", "))

# RESUMEN
cat("\n===== RESUMEN =====\n")
cat("Columnas numéricas analizadas: ", ncol(dat), "\n")
cat("Umbral de colinealidad (|rho|): ", cutoff_r, "\n")
cat("Remover (", length(vars_remove), "): ",
    ifelse(length(vars_remove), paste(vars_remove, collapse = ", "), "Ninguna"), "\n", sep = "")
cat("Conservar (", length(vars_keep), "): ", paste(vars_keep, collapse = ", "), "\n", sep = "")
cat("Salidas en: ", out_dir, "\n")
cat("Archivos:\n- spearman_cor_matrix.csv\n- spearman_pvalues_matrix.csv\n- spearman_corrplot.png\n-
variables_todas.txt\n- variables_remover_*.txt\n- variables_conservar_*.txt\n")
cat("=====\n")

```

## 9.6 Anexo 6: Script para procesar en PyQgis Lenguaje para Python

```

import os
from qgis.PyQt.QtCore import QApplication
from qgis.core import QgsRasterLayer, QgsProject
import processing

# Intentar usar GDAL nativo si está disponible
try:
    from osgeo import gdal
except Exception:
    gdal = None

# Carpeta de entrada
in_dir = r"C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Salidas preprocesamiento/Historico 2010-
2020_recortado_interpolado"
out_root = os.path.join(in_dir, "ASC")
os.makedirs(out_root, exist_ok=True)

# Configuración de conversión
NODATA_VALUE = -9999
force_float32 = True # True: todo Float32; False: heurística por nombre

```

```

CATEGORICAL_HINTS = ("flag", "mask", "class", "quality", "categoria", "categ")

def decide_dtype_name(path):
    if force_float32:
        return "Float32"
    name = os.path.basename(path).lower()
    return "Int16" if any(h in name for h in CATEGORICAL_HINTS) else "Float32"

def to_ascii_gdal_native(in_tif, out_asc, dtype_name):
    assert gdal is not None, "GDAL nativo no disponible"
    ds = gdal.Open(in_tif, gdal.GA_ReadOnly)
    if ds is None:
        raise RuntimeError("GDAL no pudo abrir el archivo")
    # AAIGrid = 1 banda (si hay varias, usar 1a)
    if ds.RasterCount > 1:
        tmp_vrt = gdal.BuildVRT("", [in_tif], options=gdal.BuildVRTOptions(bandList=[1]))
        src = tmp_vrt
    else:
        src = ds
    gdt_map = {
        "Byte": gdal.GDT_Byte, "Int16": gdal.GDT_Int16, "UInt16": gdal.GDT_UInt16,
        "Int32": gdal.GDT_Int32, "UInt32": gdal.GDT_UInt32,
        "Float32": gdal.GDT_Float32, "Float64": gdal.GDT_Float64
    }
    opts = gdal.TranslateOptions(format="AAIGrid", outputType=gdt_map.get(dtype_name, gdal.GDT_Float32),
noData=NODATA_VALUE)
    out = gdal.Translate(out_asc, src, options=opts)
    if out is None:
        raise RuntimeError("gdal.Translate devolvió None")
    out.FlushCache()

def to_ascii_fallback(in_tif, out_asc, dtype_name):
    dtype_code = 5 if dtype_name == "Float32" else 2 # 5=Float32, 2=Int16
    params = {
        'INPUT': in_tif,
        'TARGET_CRS': None,
        'NODATA': NODATA_VALUE,
        'COPY_SUBDATASETS': False,
        'OPTIONS': "",
        'EXTRA': f'-of AAIGrid -a_nodata {NODATA_VALUE}',
        'DATA_TYPE': dtype_code,
        'OUTPUT': out_asc
    }
    processing.run("gdal:translate", params)

def convert_one(in_tif, out_folder):
    base = os.path.splitext(os.path.basename(in_tif))[0]
    out_asc = os.path.join(out_folder, base + ".asc")
    dtype = decide_dtype_name(in_tif)
    try:
        if gdal is not None:
            to_ascii_gdal_native(in_tif, out_asc, dtype)
        else:
            raise RuntimeError("GDAL nativo no disponible")
        if not os.path.exists(out_asc) or os.path.getsize(out_asc) == 0:
            raise RuntimeError("Salida ASCII vacía tras GDAL, probando fallback")
    except Exception:
        to_ascii_fallback(in_tif, out_asc, dtype)
    return out_asc

```

```

# Recolectar y convertir
tifs = []
for root, _, files in os.walk(in_dir):
    for f in files:
        if f.lower().endswith(".tif"):
            tifs.append(os.path.join(root, f))

asc_paths = []
for i, tif in enumerate(tifs, 1):
    rel = os.path.relpath(os.path.dirname(tif), in_dir)
    out_dir = os.path.join(out_root, rel) if rel != "." else out_root
    os.makedirs(out_dir, exist_ok=True)
    try:
        asc_path = convert_one(tif, out_dir)
        if os.path.exists(asc_path) and os.path.getsize(asc_path) > 0:
            print(f"[{i}/{len(tifs)}] OK -> {asc_path}")
            asc_paths.append(asc_path)
        else:
            print(f"[{i}/{len(tifs)}] ERROR: {asc_path} vacío")
    except Exception as e:
        print(f"[{i}/{len(tifs)}] ERROR en {tif}: {e}")

print(f">> ASCII guardados bajo: {out_root}")

# Cargar en QGIS
if asc_paths:
    project = QgsProject.instance()
    group_name = f"ASC - {os.path.basename(in_dir.rstrip('/\\'))}"
    group = project.layerTreeRoot().findGroup(group_name)
    if group is None:
        group = project.layerTreeRoot().addGroup(group_name)

    asc_paths_sorted = sorted(asc_paths, key=lambda p: os.path.basename(p).lower())
    first_extent = None
    for pth in asc_paths_sorted:
        rl = QgsRasterLayer(pth, os.path.splitext(os.path.basename(pth))[0])
        if rl.isValid():
            project.addMapLayer(rl, False)
            group.addLayer(rl)
            if first_extent is None:
                first_extent = rl.extent()

    if first_extent and iface is not None:
        iface.mapCanvas().setExtent(first_extent)
        iface.mapCanvas().refresh()

    print(f">> Capas ASCII cargadas en el grupo: {group_name}")
else:
    print("Error No hay ASCII para cargar.")

```

## 9.7 Anexo 7: Script Ploteo de mapas proyección de escenarios Rstudio lenguaje R

```
if (!requireNamespace("terra", quietly = TRUE)) install.packages("terra")
library(terra)

# Rutas de ENTRADA
asc_path <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/Resultados modelación/Resultado
10/Megaptera_novaeangliae_SSP585_2040_2050_median.asc"
shp_path <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Shapes/Union Parques/union.shp"

# Carpeta de SALIDA
out_dir <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Shapes/Salida_fix/Proyeccion ssp5 8.5 2040-2050"
dir.create(out_dir, recursive = TRUE, showWarnings = FALSE)

# insumos
stopifnot(file.exists(asc_path), file.exists(shp_path))
r <- rast(asc_path)
v <- vect(shp_path)
if (is.na(crs(v))) stop("El shapefile no tiene CRS definido. Defínelo antes.")

#Definir CRS del ASC
if (is.na(crs(r))) {
  crs(r) <- "EPSG:4326" # ajusta si tu ASC no es WGS84
  message("CRS del ASC definido como EPSG:4326 (solo etiqueta, no reproyecta).")
}

# Convertir ASC -> GeoTIFF base
base_name <- tools::file_path_sans_ext(basename(asc_path))
tif_base <- file.path(out_dir, paste0(base_name, "_base.tif"))
writeRaster(r, tif_base, overwrite = TRUE) # GeoTIFF por defecto
message("ASC -> TIF base: ", normalizePath(tif_base))

# Reproyectar al CRS del polígono
r <- rast(tif_base)
if (crs(r) != crs(v)) {
  message("Reproyectando raster al CRS del polígono...")
  r_proj <- project(r, crs(v), method = "bilinear") # "near" si categórico
} else {
  r_proj <- r
}

#Recortar y enmascarar por el polígono
message("Recortando a la extensión del polígono y aplicando máscara...")
r_crop <- crop(r_proj, v, snap = "out")
r_mask <- mask(r_crop, v)

# Guardar TIF ALINEADO (CRS del polígono)
aligned_tif <- file.path(out_dir, paste0(base_name, "_alineado.tif"))
writeRaster(r_mask, aligned_tif, overwrite = TRUE)
message("TIF alineado (CRS polígono): ", normalizePath(aligned_tif))

#Reproyectar a WGS84 (grados) para visualización
message("Reproyectando a WGS84 (EPSG:4326) para plot en grados...")
r_ll <- project(r_mask, "EPSG:4326", method = "bilinear")
wgs84_tif <- file.path(out_dir, paste0(base_name, "_WGS84.tif"))
writeRaster(r_ll, wgs84_tif, overwrite = TRUE)
message("TIFF WGS84: ", normalizePath(wgs84_tif))
```

```

# Plot WGS84 ejes en grados y eje X
fmt_lon <- function(x) paste0(abs(x), "°", ifelse(x < 0, "W", "E"))
fmt_lat <- function(y) paste0(abs(y), "°", ifelse(y < 0, "S", "N"))

# reproyectar vector a WGS84 para superponer limpio
v_ll <- project(v, "EPSG:4326")

# ticks
ex <- ext(r_ll)
xt <- pretty(c(ex$xmin, ex$xmax))
yt <- pretty(c(ex$ymin, ex$ymax))

# paleta/cortes (si es 0-1 usamos cortes fijos)
cols <- colorRampPalette(c("blue","cyan","yellow","red"))(200)
vr <- range(values(r_ll), na.rm = TRUE)
use_levels <- (!any(is.infinite(vr)) && vr[1] >= 0 && vr[2] <= 1)
brks <- if (use_levels) seq(0, 1, 0.2) else NULL

# función de dibujo con eje X
hacer_plot <- function() {
  par(
    mar = c(5, 6, 3, 6), # margen inferior más pequeño (como te funcionó)
    mgp = c(2.5, 0.9, 0), # separación títulos/etiquetas
    tcl = -0.3
  )

  if (is.null(brks)) {
    plot(r_ll, col = cols, axes = FALSE, frame = FALSE,
         plg = list(title = if (use_levels) "Idoneidad" else "Valor"),
         main = "Distribución Futura Ssp5 8.5 2040-2050 M. Novaengliae")
  } else {
    plot(r_ll, col = cols, axes = FALSE, frame = FALSE,
         levels = brks, plg = list(title = "Idoneidad"),
         main = "Distribución Futura Ssp5 8.5 2040-2050 M. Novaengliae")
  }

  plot(v_ll, add = TRUE, border = "black", lwd = 1.2)

  # Ejes (X = Longitud, Y = Latitud)
  axis(1, at = xt, labels = fmt_lon(xt), line = 3.0) # baja la "regla" de Longitud
  axis(2, at = yt, labels = fmt_lat(yt), las = 1)

  # Títulos correctos de ejes (acercados)
  mtext("Longitud", side = 1, line = 4.0) # más cerca del eje X
  mtext("Latitud", side = 2, line = 3.8)
  # No usar box(): evita recuadro extra
}

# Mostrar en pantalla
hacer_plot()

#Exportar PNG con los mismos ajustes
out_png <- file.path(out_dir, paste0(base_name, "_WGS84_preview.png"))
dir.create(dirname(out_png), recursive = TRUE, showWarnings = FALSE)
png(out_png, width = 1600, height = 1600, res = 200)
hacer_plot()
dev.off()
message("PNG guardado: ", normalizePath(out_png))

```

## 9.8 Anexo 8: Tabla Representatividad Calculo Representatividad

file	thre shol d	area_total _union_k m2	area_p mfc_k m2	area_amufc_ sin_pmfc_k m2	area_unio n_sum_k m2	pct_ pmf c	pct_amuf c_sin_pm fc	pct_ unio n
Megaptera_novaeangliae_SP19_2020_2030_median.asc	0.24 232 7	396.104	10.353	380.473	390.826	2.61	96.05	98.6 7
Megaptera_novaeangliae_SP19_2030_2040_median.asc	0.06 179 2	664.805	10.353	649.174	659.527	1.56	97.65	99.2 1
Megaptera_novaeangliae_SP19_2040_2050_median.asc	0.18 826 2	396.104	10.353	380.473	390.826	2.61	96.05	98.6 7
Megaptera_novaeangliae_SP245_2020_2030_median.asc	0.51 669 5	410.028	10.353	394.398	404.75	2.52	96.19	98.7 1
Megaptera_novaeangliae_SP245_2030_2040_median.asc	0.54 729 1	351.594	2.276	344.048	346.324	0.65	97.85	98.5
Megaptera_novaeangliae_SP245_2040_2050_median.asc	0.52 531 7	664.805	10.353	649.174	659.527	1.56	97.65	99.2 1
Megaptera_novaeangliae_SP585_2020_2030_median.asc	0.11 290 9	374.939	2.276	367.393	369.669	0.61	97.99	98.5 9
Megaptera_novaeangliae_SP585_2030_2040_median.asc	0.76 617 6	219.946	0	214.677	214.677	0	97.6	97.6
Megaptera_novaeangliae_SP585_2040_2050_median.asc	0.69 559 3	104.098	0	104.098	104.098	0	100	100
Megaptera_novaeangliae_median.asc	0.54 662 4	307.878	8.077	294.523	302.6	2.62	95.66	98.2 9

## 9.9 Anexo 9: Script calculo Representatividad de hábitat Rstudio lenguaje R

```
# Paquetes
req <- c("terra","sf","dplyr","readr","stringr","exactextractr",
        "openxlsx","tools","ggplot2","raster","tidyr","pROC")
for(p in req){
  if(!requireNamespace(p, quietly = TRUE)){
    install.packages(p, dependencies = TRUE)
  }
  library(p, character.only = TRUE)
}

# CONFIG de las Rutas
# Entradas
res_path <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/MN_COMBINADO_MaxEnt_MaxEnt_final_limpio.csv" # puede o no tener thresholds
dir_rasters <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/rasters"
shp_pmfc <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Parque nacional FC/polygon.shp"
shp_amufc <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Area de conservacion de multiples usos FC/polygon.shp"
shp_union_op <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Union Parques/union.shp"

# CSV de presencias (lon/lat en WGS84):
occ_csv <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/MN_COMBINADO_MaxEnt_MaxEnt_final_limpio.csv"
# Si el autodetector no encuentra lon/lat, puedes forzar nombres:
force_lonlat <- NULL
# force_lonlat <- c(lon="decimalLongitude", lat="decimalLatitude")

# Salidas
out_dir <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Resultados"
thr_dir <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Threshold"
thr_out_csv <- file.path(thr_dir, "thresholds_median.csv")
thr_files_csv <- file.path(thr_dir, "thresholds_median_files.csv")
out_bin_dir <- file.path(out_dir, "binarios")
rep_csv <- file.path(out_dir, "representatividad_median_exact_descomp.csv")
rep_xlsx <- file.path(out_dir, "Tabla_4X_Representatividad.xlsx")
fig_path <- file.path(out_dir, "Figura_4X_Representatividad.png")

# CRS de trabajo (Magallanes)
crs_area <- "EPSG:32719"

# Crear carpetas y log
dir.create(thr_dir, recursive = TRUE, showWarnings = FALSE)
dir.create(out_dir, recursive = TRUE, showWarnings = FALSE)
dir.create(out_bin_dir, recursive = TRUE, showWarnings = FALSE)
log_file <- file.path(out_dir, paste0("log_representatividad_", format(Sys.time(), "%Y%m%d_%H%M%S"), ".txt"))
sink(log_file, split = TRUE)
cat("=== INICIO PIPELINE:", format(Sys.time()), "===\n")

# Utilidades
mk_norm <- function(x){
```

```

x |>
  tolower() |>
  stringr::str_replace_all("[^a-z0-9]+", "_") |>
  stringr::str_replace_all("_+", "_") |>
  stringr::str_replace_all("^_|_$", "")
}

read_sf_valid <- function(p){
  if(!file.exists(p)) stop("No existe el shape: ", p)
  v <- sf::st_read(p, quiet = TRUE)
  v <- sf::st_make_valid(v)
  v <- sf::st_transform(v, crs_area)
  v
}

assure_crs <- function(r){
  if(is.na(terra::crs(r))){
    warning("Raster sin CRS. Asignando temporalmente EPSG:4326 (WGS84) para reproyección.")
    terra::crs(r) <- "EPSG:4326"
  }
  r
}

to_bin <- function(r, thr_val){
  terra::ifel(r >= thr_val, 1, 0) |> `names<-`("habitat_bin")
}

area_in_poly_km2_exact <- function(r_bin, poly_sf){
  # cálculo en CRS métrico: proyectar el raster a 32719
  r_bin <- assure_crs(r_bin)
  r_bin_utm <- terra::project(r_bin, crs_area, method = "near")
  r_crop <- terra::crop(r_bin_utm, terra::vect(poly_sf))
  r_ras <- raster::raster(r_crop)
  eff_cells <- exactextractr::exact_extract(
    r_ras, poly_sf,
    fun = function(values, coverage_fraction){
      sum(values * coverage_fraction, na.rm = TRUE)
    }
  )
  cell_area_m2 <- prod(raster::res(r_ras))
  km2 <- (sum(eff_cells, na.rm = TRUE) * cell_area_m2) / 1e6
  as.numeric(km2)
}

# Helper para extraer valores numéricos desde un raster
extract_vals_numeric <- function(r, pts){
  df <- suppressWarnings(terra::extract(r, terra::vect(pts), ID = FALSE))
  if(is.null(df) || (is.data.frame(df) && ncol(df) == 0)) return(numeric(0))
  v <- unlist(df, use.names = FALSE)
  v <- suppressWarnings(as.numeric(v))
  v[is.finite(v)]
}

# Detectar columnas lon/lat en CSV de presencias
guess_lonlat <- function(df, force_map=NULL){
  if(!is.null(force_map)){
    stopifnot(all(c("lon", "lat") %in% names(force_map)))
    return(list(lon=force_map["lon"], lat=force_map["lat"]))
  }
}

```

```

nms <- names(df)
lon_candidates <- c("lon", "long", "longitude", "x", "decimalLongitude", "Longitude", "LONGITUDE")
lat_candidates <- c("lat", "latitude", "y", "decimalLatitude", "Latitude", "LATITUDE")
pick <- function(cands){
  for(cn in cands){
    hit <- nms[tolower(nms)==tolower(cn)]
    if(length(hit)>0) return(hit[1])
  }
  return(NULL)
}
list(lon = pick(lon_candidates), lat = pick(lat_candidates))
}

# maxSSS (Youden) por raster/capa SIN pROC (estable ante listas/atributos)
compute_maxSSS_for_raster <- function(r, union_sf, occ_sf, n_bg = 10000, seed = 123){
  r <- assure_crs(r)
  if(terra::nlyr(r) > 1) r <- r[[1]]

  # Reproyectar insumos al CRS del raster
  crs_r <- terra::crs(r)
  occ_in_r_crs <- sf::st_transform(occ_sf, crs_r)
  union_in_r_crs <- sf::st_transform(union_sf, crs_r)

  # Valores en presencias (vector numérico limpio)
  pres_vals <- extract_vals_numeric(r, occ_in_r_crs)

  # Background dentro de la unión
  set.seed(seed)
  union_geom <- sf::st_make_valid(union_in_r_crs)
  if(any(sf::st_geometry_type(union_geom) %in%
c("GEOMETRYCOLLECTION", "MULTISURFACE", "CURVEPOLYGON"))){
    union_geom <- sf::st_collection_extract(union_geom, "POLYGON", warn = FALSE)
  }
  bg_pts <- try(sf::st_sample(union_geom, size = n_bg, type = "random", exact = FALSE), silent = TRUE)
  if(inherits(bg_pts, "try-error") || length(bg_pts) == 0){
    for(frac in c(0.5, 0.25, 0.1)){
      bg_try <- try(sf::st_sample(union_geom, size = max(2000, floor(n_bg*frac)), type = "random", exact = FALSE),
silent = TRUE)
      if(!inherits(bg_try, "try-error") && length(bg_try) > 0){ bg_pts <- bg_try; break }
    }
  }
  if(inherits(bg_pts, "try-error") || length(bg_pts) == 0){
    warning("No fue posible muestrear background en la unión.")
    return(NA_real_)
  }
  bg_pts <- sf::st_as_sf(bg_pts)
  bg_vals <- extract_vals_numeric(r, bg_pts)

  # Sanitizar
  pres_vals <- pres_vals[is.finite(pres_vals)]
  bg_vals <- bg_vals[is.finite(bg_vals)]
  cat(sprintf(" presencias válidas: %d | background válido: %d\n", length(pres_vals), length(bg_vals)))

  if(length(pres_vals) < 10 || length(bg_vals) < 100){
    warning("Valores insuficientes para calcular maxSSS (pres/bg).")
    return(NA_real_)
  }
}

```

```

# Si parece estar en [0,1], recortamos por seguridad
sample_vals <- c(sample(pres_vals, min(length(pres_vals), 1000)),
  sample(bg_vals, min(length(bg_vals), 1000)))
share_01 <- mean(sample_vals >= 0 & sample_vals <= 1)
if(share_01 > 0.95){
  pres_vals <- pmin(pmax(pres_vals, 0), 1)
  bg_vals <- pmin(pmax(bg_vals, 0), 1)
}

#Cálculo manual de ROC y Youden (sens + spec)
# Ordenamos por score y usamos sumas acumuladas para eficiencia
scores <- c(pres_vals, bg_vals)
labels <- c(rep(1L, length(pres_vals)), rep(0L, length(bg_vals))) # 1=pres, 0=bg
o <- order(scores, decreasing = TRUE) # umbral t: predicho=1 si score >= t
scores_o <- scores[o]
labels_o <- labels[o]

P <- sum(labels_o == 1L)
N <- sum(labels_o == 0L)

# TP acumulados al ir bajando el umbral (de alto a bajo)
tp_cum <- cumsum(labels_o == 1L)
fp_cum <- cumsum(labels_o == 0L)

# En cada posición i (umbral = scores_o[i]):
# Sens = TP/P
# Spec = TN/N = (N - FP)/N
sens <- tp_cum / P
spec <- (N - fp_cum) / N
youden <- sens + spec # (Youden + 1)

# Elegir el índice con máximo (sens + spec); en empates, el de mayor spec y luego el umbral más conservador
best_idx <- which(youden == max(youden, na.rm = TRUE))
if(length(best_idx) > 1){
  # desempate por especificidad más alta, luego por sensibilidad más alta
  best_spec <- spec[best_idx]
  best_idx <- best_idx[best_spec == max(best_spec, na.rm = TRUE)]
  if(length(best_idx) > 1){
    best_sens <- sens[best_idx]
    best_idx <- best_idx[best_sens == max(best_sens, na.rm = TRUE)]
    best_idx <- best_idx[1]
  } else {
    best_idx <- best_idx[1]
  }
}

thr <- as.numeric(scores_o[best_idx])
cat(sprintf(" maxSSS threshold = %.6f (sens=%.3f, spec=%.3f)\n", thr, sens[best_idx], spec[best_idx]))
thr
}

# Shapes base y áreas
cat("\n[0] Preparando shapes base (EPSG:32719)... \n")
pmfc_sf <- read_sf_valid(shp_pmfc)
amufc_sf <- read_sf_valid(shp_amufc)
union_sf_file <- tryCatch(read_sf_valid(shp_union_op), error=function(e) NULL)

pmfc_geom <- sf::st_union(sf::st_geometry(pmfc_sf))
amufc_geom <- sf::st_union(sf::st_geometry(amufc_sf))

```

```

amufc_only_geom <- sf::st_make_valid(sf::st_difference(amufc_geom, pmfc_geom))
union_calc_geom <- sf::st_make_valid(sf::st_union(pmfc_geom, amufc_only_geom))

pmfc_clean <- sf::st_sf(geometry = pmfc_geom, crs = crs_area)
amufc_only_clean <- sf::st_sf(geometry = amufc_only_geom, crs = crs_area)
union_clean <- sf::st_sf(geometry = union_calc_geom, crs = crs_area)

area_km2 <- function(g) as.numeric(sf::st_area(g)) / 1e6
rnd <- function(x) round(x, 3)

cat("\n===== ÁREAS EN KM² =====\n")
cat(" PMFC          :", rnd(area_km2(pmfc_clean)), " km²\n")
cat(" AMUFC sin PMFC  :", rnd(area_km2(amufc_only_clean)), " km²\n")
cat(" UNIÓN calculada  :", rnd(area_km2(union_clean)), " km²\n")
if(!is.null(union_sf_file)){
  cat(" UNIÓN (archivo)  :", rnd(area_km2(sf::st_union(sf::st_geometry(union_sf_file)))), " km²\n")
}
cat("===== \n")

# Thresholds: leer CSV o calcular con presencias
cat("\n[A] Thresholds: intentando leer CSV (MaxEnt) y/o calcular maxSSS con presencias...\n")

ras_files <- list.files(dir_rasters, pattern = "(?i)\\.\\.(tif|tiff|asc|nc)$", full.names = TRUE, recursive = TRUE)
stopifnot(length(ras_files) > 0)
cat("> Rasters encontrados:", length(ras_files), "\n")

# Intento de lectura de thresholds desde CSV "tipo MaxEnt"
thr_from_csv <- NULL
if(file.exists(res_path)){
  res <- try(readr::read_csv(res_path, show_col_types = FALSE), silent = TRUE)
  if(!inherits(res, "try-error")){
    cand_cols <- names(res)
    col_thr <- dplyr::case_when(
      "Maximum test sensitivity plus specificity Cloglog threshold" %in% cand_cols ~
        "Maximum test sensitivity plus specificity Cloglog threshold",
      "Maximum training sensitivity plus specificity Cloglog threshold" %in% cand_cols ~
        "Maximum training sensitivity plus specificity Cloglog threshold",
      "Maximum test sensitivity plus specificity logistic threshold" %in% cand_cols ~
        "Maximum test sensitivity plus specificity logistic threshold",
      "Maximum training sensitivity plus specificity logistic threshold" %in% cand_cols ~
        "Maximum training sensitivity plus specificity logistic threshold",
      TRUE ~ NA_character_
    )
    if(!is.na(col_thr)){
      thr_from_csv <- res %>%
        dplyr::transmute(
          species = .data$Species,
          species_norm = mk_norm(.data$Species),
          threshold_sens_spec = .data[[col_thr]]
        )
      readr::write_csv(thr_from_csv, thr_out_csv)
      message(" thresholds_median.csv creado desde CSV: ", thr_out_csv)
    } else {
      message("CSV no contiene columna estándar de threshold. Se calculará maxSSS por raster.")
    }
  } else {
    message(" No se pudo leer el CSV de resultados. Se calculará maxSSS por raster.")
  }
}
}

```

```

#Tabla de archivos/capas
files_tbl <- lapply(ras_files, function(f){
  ext <- tolower(tools::file_ext(f))
  if (ext == "nc") {
    r <- try(terra::rast(f), silent = TRUE)
    if (inherits(r, "SpatRaster")) {
      data.frame(
        file_full = f,
        layer = names(r),
        file = paste0(basename(f), ":", names(r)),
        file_norm = mk_norm(paste0(basename(f), "_", names(r))),
        stringsAsFactors = FALSE
      )
    } else {
      data.frame(file_full=f, layer=NA_character_, file=basename(f),
        file_norm=mk_norm(basename(f)), stringsAsFactors=FALSE)
    }
  } else {
    data.frame(file_full=f, layer=NA_character_, file=basename(f),
      file_norm=mk_norm(tools::file_path_sans_ext(basename(f))), stringsAsFactors=FALSE)
  }
}) |> dplyr::bind_rows()

# Cargar presencias (CSV) -> sf (WGS84)
occ_sf <- NULL
if(!is.na(occ_csv) && file.exists(occ_csv)){
  occ_df <- readr::read_csv(occ_csv, show_col_types = FALSE)
  gl <- guess_lonlat(occ_df, force_map = force_lonlat)
  if(is.null(gl$lon) || is.null(gl$lat)){
    warning("No se detectaron columnas de lon/lat en occ_csv. (Puedes forzarlas con force_lonlat). Se ignorarán presencias.")
  } else {
    occ_sf <- sf::st_as_sf(occ_df, coords = c(gl$lon, gl$lat), crs = "EPSG:4326")
    cat("✓ Presencias cargadas (n=", nrow(occ_sf), ") columnas: ", gl$lon, "/", gl$lat, "\n", sep="")
  }
} else {
  message("No se proporcionó occ_csv con presencias. Si quieres maxSSS 'real', define occ_csv.")
}

# Construcción de thresholds por archivo/capa
thr_rows <- list()

# Si hay thresholds por especie en CSV, mapear heurísticamente por nombre
if(!is.null(thr_from_csv)){
  thr_from_csv$species_norm <- mk_norm(thr_from_csv$species)
  prelim <- files_tbl %>%
  dplyr::mutate(species_guess = sapply(file_norm, function(fn){
    sp <- thr_from_csv$species_norm[stringr::str_detect(fn, thr_from_csv$species_norm)]
    if(length(sp) == 0) NA_character_ else sp[1]
  })) %>%
  dplyr::left_join(thr_from_csv, by = c("species_guess" = "species_norm")) %>%
  dplyr::select(file, file_full, layer, threshold_sens_spec)
  thr_rows[[length(thr_rows)+1]] <- prelim
}

# Para cada raster/capa: calcular maxSSS si no hay threshold (o no hay CSV)
for(i in seq_len(nrow(files_tbl))){

```

```

f <- files_tbl$file_full[i]
nm <- files_tbl$file[i]
ly <- files_tbl$layer[i]

have_thr <- FALSE
if(length(thr_rows) > 0){
  merged <- dplyr::bind_rows(thr_rows)
  idx <- match(nm, merged$file)
  if(!is.na(idx)){
    tv <- merged$threshold_sens_spec[idx]
    if(!is.na(tv)) have_thr <- TRUE
  }
}
if(have_thr) next

message("Calculando threshold maxSSS para: ", nm)
r <- try(terra::rast(f), silent = TRUE)
if(inherits(r, "try-error")){ warning("No pude abrir raster: ", f); next }
if(!is.na(ly)) r <- r[[ly]]
message(" CRS del raster: ", terra::crs(r))

thr_val <- NA_real_
if(!is.null(occ_sf)){
  thr_val <- compute_maxSSS_for_raster(r, union_clean, occ_sf, n_bg = 10000)
}
if(is.na(thr_val)){
  warning("No fue posible calcular maxSSS (falta occ_csv o datos insuficientes). Se asigna umbral fallback 0.5: ", nm)
  thr_val <- 0.5
}

thr_rows[[length(thr_rows)+1]] <- dplyr::tibble(
  file = nm, file_full = f, layer = ly, threshold_sens_spec = thr_val
)
}

thr_tbl <- dplyr::bind_rows(thr_rows) %>%
  dplyr::group_by(file, file_full, layer) %>%
  dplyr::summarise(threshold_sens_spec = dplyr::first(threshold_sens_spec), .groups = "drop")

readr::write_csv(thr_tbl, thr_files_csv)
message("✓ thresholds_median_files.csv creado: ", thr_files_csv)

# Binarización + Representatividad (CRS=EPSG:32719)
cat("\n[B] Binarizando rasters y calculando representatividad (áreas en EPSG:32719)... \n")

rows <- list()
for (i in seq_len(nrow(files_tbl))){
  f <- files_tbl$file_full[i]
  nm <- files_tbl$file[i]
  ly <- files_tbl$layer[i]

  thr_val <- thr_tbl$threshold_sens_spec[match(nm, thr_tbl$file)]
  if(is.na(thr_val)) { warning("Sin umbral para ", nm, " (no debería ocurrir). Se salta."); next }

  message("Procesando: ", nm, " | thr=", round(thr_val,6))
  r <- terra::rast(f); if(!is.na(ly)) r <- r[[ly]]

  r_bin <- to_bin(r, thr_val)

```

```

r_bin_utm <- terra::project(assure_crs(r_bin), crs_area, method = "near")
out_bin <- file.path(out_bin_dir, paste0(gsub("[^A-Za-z0-9_-]+", "", nm), "_bin_32719.tif"))
terra::writeRaster(r_bin_utm, out_bin, overwrite = TRUE)

total_union_km2 <- area_in_poly_km2_exact(r_bin, union_clean)
pmfc_km2 <- area_in_poly_km2_exact(r_bin, pmfc_clean)
amufc_only_km2 <- area_in_poly_km2_exact(r_bin, amufc_only_clean)
union_sum_km2 <- pmfc_km2 + amufc_only_km2

pct_pmfc <- ifelse(total_union_km2 > 0, (pmfc_km2 / total_union_km2) * 100, NA_real_)
pct_amufc_only <- ifelse(total_union_km2 > 0, (amufc_only_km2 / total_union_km2) * 100, NA_real_)
pct_union <- ifelse(total_union_km2 > 0, (union_sum_km2 / total_union_km2) * 100, NA_real_)

rows[[length(rows)+1]] <- dplyr::tibble(
  file = nm,
  threshold = round(thr_val, 6),
  area_total_union_km2 = round(total_union_km2, 3),
  area_pmfc_km2 = round(pmfc_km2, 3),
  area_amufc_sin_pmfc_km2 = round(amufc_only_km2, 3),
  area_union_sum_km2 = round(union_sum_km2, 3),
  pct_pmfc = round(pct_pmfc, 2),
  pct_amufc_sin_pmfc = round(pct_amufc_only, 2),
  pct_union = round(pct_union, 2),
  raster_bin_32719 = out_bin
)
}

rep_tab <- dplyr::bind_rows(rows) |> dplyr::arrange(file)
readr::write_csv(rep_tab, rep_csv)
message("Representatividad exportada a: ", rep_csv)

# Tabla excel
cat("\n[C] Generando Tabla 4.X en Excel...\n")

parse_info <- function(fname){
  ssp <- toupper(stringr::str_extract(fname, "SSP\\s*\\d(?:[. _-])\\s*\\d+?"))
  ssp <- gsub("\\s+", "", ssp); ssp <- gsub("_", "-", ssp)
  dec <- stringr::str_extract(fname, "(19|20)\\d{2}[ _-]{19|20}\\d{2}")
  dec <- gsub("_", "-", dec)
  if(is.na(ssp) || nchar(ssp)==0) ssp <- "SSP?"
  if(is.na(dec) || nchar(dec)==0) dec <- "PERIODO?"
  c(ssp, dec)
}

tmp <- t(sapply(rep_tab$file, parse_info))
rep_tab$Escenario <- tmp[,1]
rep_tab$Década <- tmp[,2]

grp <- rep_tab %>%
  dplyr::group_by(Escenario, Década) %>%
  dplyr::summarise(
    `Área total de hábitat (km²)` = sum(area_total_union_km2, na.rm = TRUE),
    `Hábitat dentro del PMFC (km²)` = sum(area_pmfc_km2, na.rm = TRUE),
    `Hábitat en AMUFC fuera del PMFC (km²)` = sum(area_amufc_sin_pmfc_km2, na.rm = TRUE),
    .groups = "drop"
  ) %>%
  dplyr::mutate(
    `% dentro del PMFC` = 100 * `Hábitat dentro del PMFC (km²)` / `Área total de hábitat (km²)`,
    `% dentro del AMUFC (sin PMFC)` = 100 * `Hábitat en AMUFC fuera del PMFC (km²)` / `Área total de hábitat (km²)`
  )

```

```

)

scn <- rep_tab %>%
  dplyr::group_by(Escenario) %>%
  dplyr::summarise(
    `Área total de hábitat (km²)` = sum(area_total_union_km2, na.rm = TRUE),
    `Hábitat dentro del PMFC (km²)` = sum(area_pmfc_km2, na.rm = TRUE),
    `Hábitat en AMUFC fuera del PMFC (km²)` = sum(area_amufc_sin_pmfc_km2, na.rm = TRUE),
    .groups = "drop"
  ) %>%
  dplyr::mutate(
    Década = "Resumen del escenario",
    `% dentro del PMFC` = 100 * `Hábitat dentro del PMFC (km²)` / `Área total de hábitat (km²)`,
    `% dentro del AMUFC (sin PMFC)` = 100 * `Hábitat en AMUFC fuera del PMFC (km²)` / `Área total de hábitat (km²)`
  )

tabla_4x <- dplyr::bind_rows(grp, scn) %>%
  dplyr::mutate(across(where(is.numeric), ~round(., 2))) %>%
  dplyr::arrange(Escenario, factor(Década, levels=c("2020–2030", "2030–2040", "2040–2050", "Resumen del
escenario")))

wb <- openxlsx::createWorkbook()
openxlsx::addWorksheet(wb, "Tabla_4X")
openxlsx::writeData(wb, "Tabla_4X", tabla_4x)
openxlsx::saveWorkbook(wb, rep_xlsx, overwrite = TRUE)
message(" 📄 Tabla 4.X exportada a: ", rep_xlsx)

# Chequeos
cat("\n[D] Chequeos de consistencia...\n")
rep_tab %>%
  dplyr::mutate(diff_union_vs_sum = round(area_total_union_km2 - (area_pmfc_km2 + area_amufc_sin_pmfc_km2),
3)) %>%
  dplyr::summarise(max_abs_diff = max(abs(diff_union_vs_sum), na.rm=TRUE),
    mean_abs_diff = mean(abs(diff_union_vs_sum), na.rm=TRUE)) %>%
  print()

rep_tab %>%
  dplyr::mutate(pct_sum = round(pct_pmfc + pct_amufc_sin_pmfc, 2)) %>%
  dplyr::summarise(min = min(pct_sum, na.rm=TRUE),
    max = max(pct_sum, na.rm=TRUE),
    mean = mean(pct_sum, na.rm=TRUE)) %>%
  print()

# Figura
cat("\n[E] Generando Figura 4.X...\n")
df_plot <- tabla_4x %>%
  dplyr::filter(Década != "Resumen del escenario") %>%
  dplyr::select(Escenario, Década, `% dentro del PMFC`, `% dentro del AMUFC (sin PMFC)`) %>%
  tidyr::pivot_longer(cols = c(`% dentro del PMFC`, `% dentro del AMUFC (sin PMFC)`),
    names_to = "Área", values_to = "Porcentaje")
df_plot$Década <- factor(df_plot$Década, levels = c("2020–2030", "2030–2040", "2040–2050"))

gg <- ggplot2::ggplot(df_plot, ggplot2::aes(x = Década, y = Porcentaje, fill = Área)) +
  ggplot2::geom_bar(stat = "identity", width = 0.7, color = "black") +
  ggplot2::facet_wrap(~Escenario, ncol = 1, scales = "free_y") +
  ggplot2::scale_fill_manual(values = c("#1F77B4", "#FF7F0E")) +
  ggplot2::labs(
    title = "Figura 4.X – Representatividad del hábitat adecuado de Megaptera novaeangliae",

```

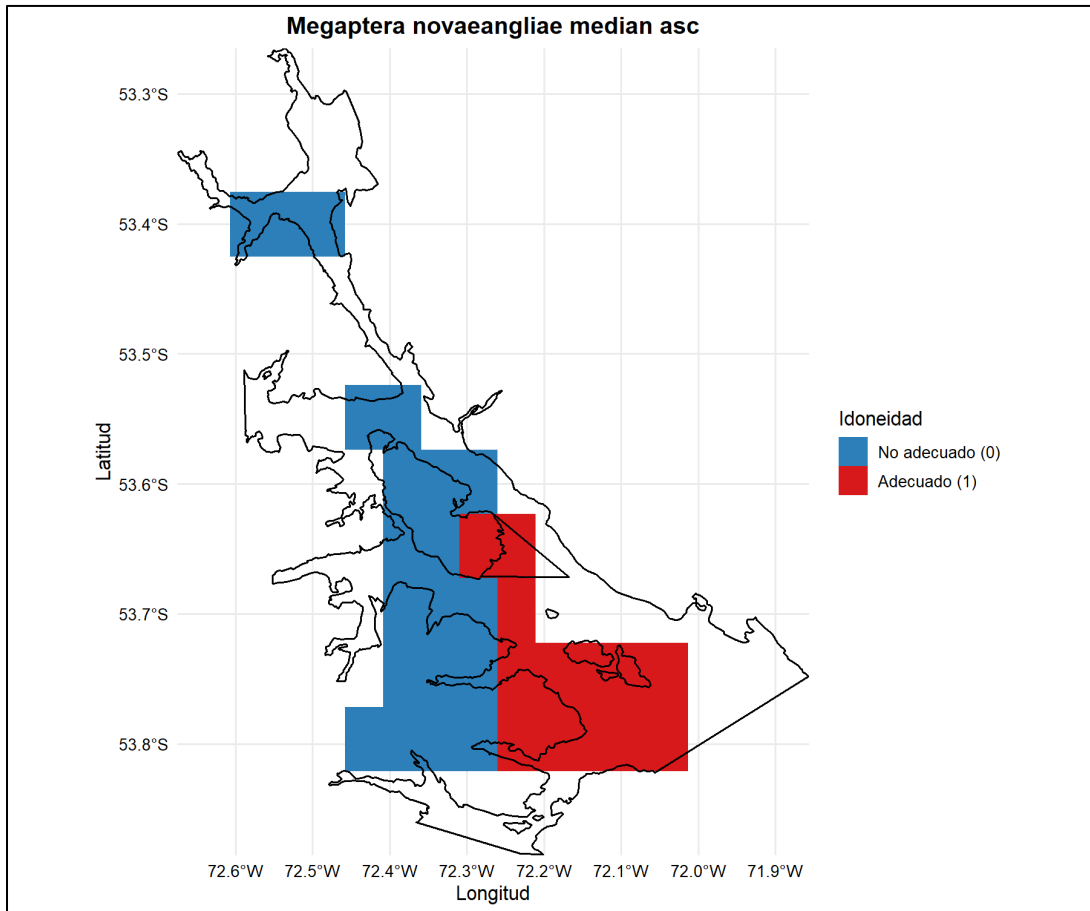
```
  subtitle = "Comparación porcentual entre PMFC y AMUFC (sin PMFC) por escenario y década",
  x = "Período (Década)",
  y = "Porcentaje de hábitat adecuado (%)",
  fill = "Unidad de conservación"
) +
ggplot2::theme_minimal(base_size = 12) +
ggplot2::theme(
  plot.title = ggplot2::element_text(face = "bold", size = 14, hjust = 0.5),
  plot.subtitle = ggplot2::element_text(size = 11, hjust = 0.5),
  axis.text = ggplot2::element_text(color = "black"),
  panel.grid.minor = ggplot2::element_blank(),
  legend.position = "bottom"
)

ggplot2::ggsave(fig_path, gg, width = 8, height = 10, dpi = 300)
message("Figura 4.X exportada correctamente a: ", fig_path)
print(gg)

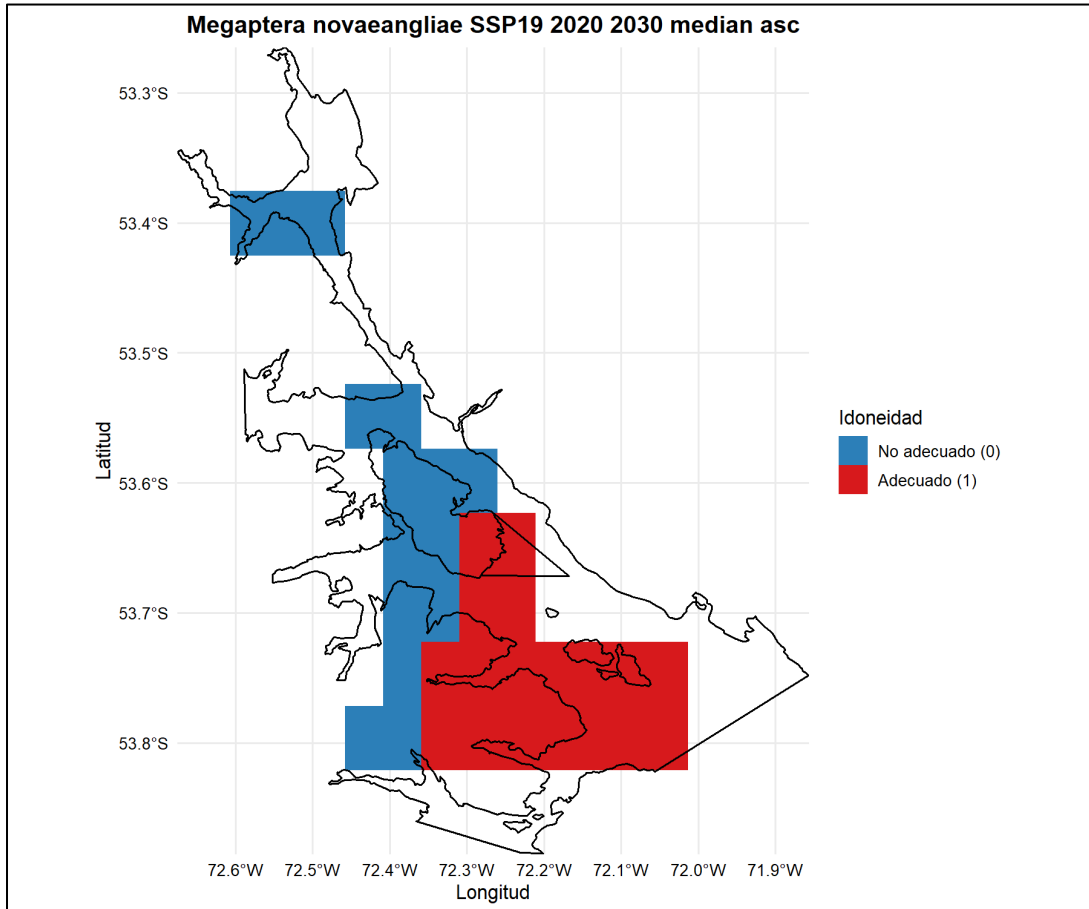
cat("\n=== FIN PIPELINE:", format(Sys.time()), "===\n")
sink(NULL)
```

## 9.10 Anexo 10: Mapas binarios Calculo de Áreas

### 9.10.1 Anexo 10.1: Mapa binario histórico

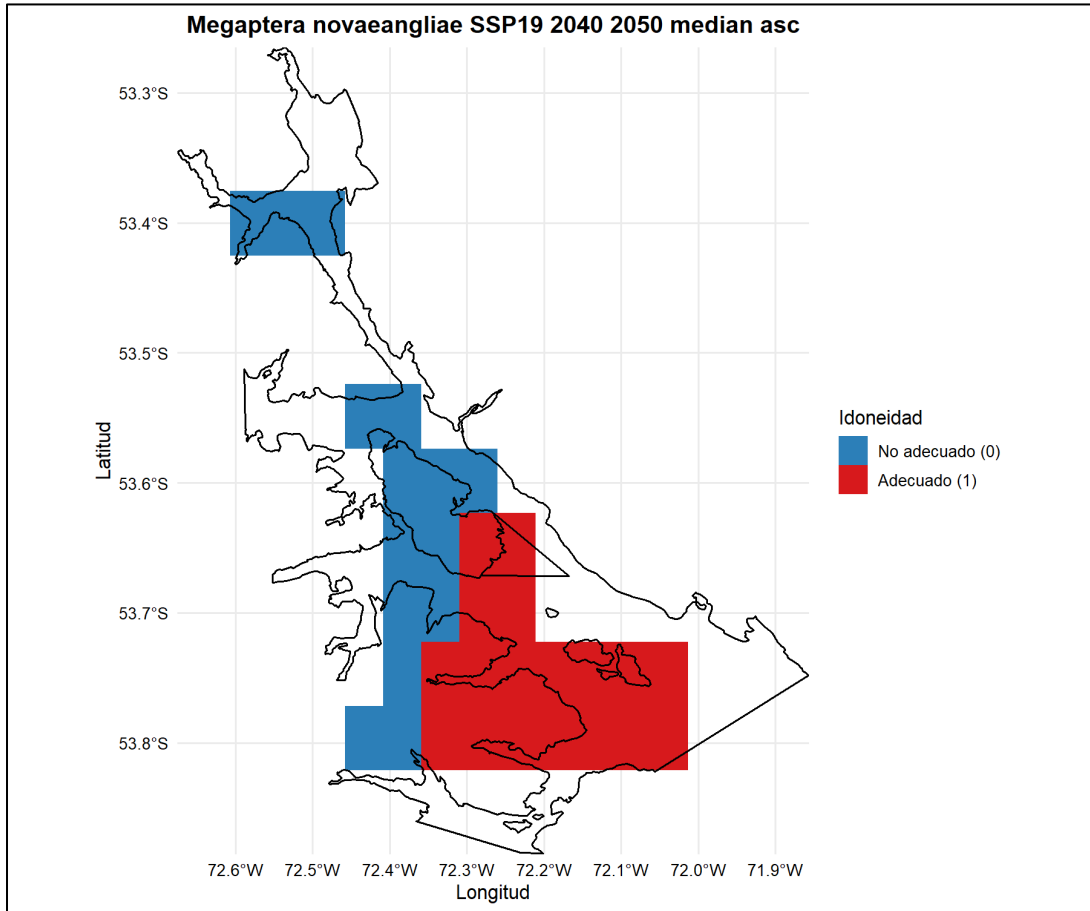


### 9.10.2 Anexo 10.2: Mapa Binario Escenario Ssp1 1.9 2020-2030

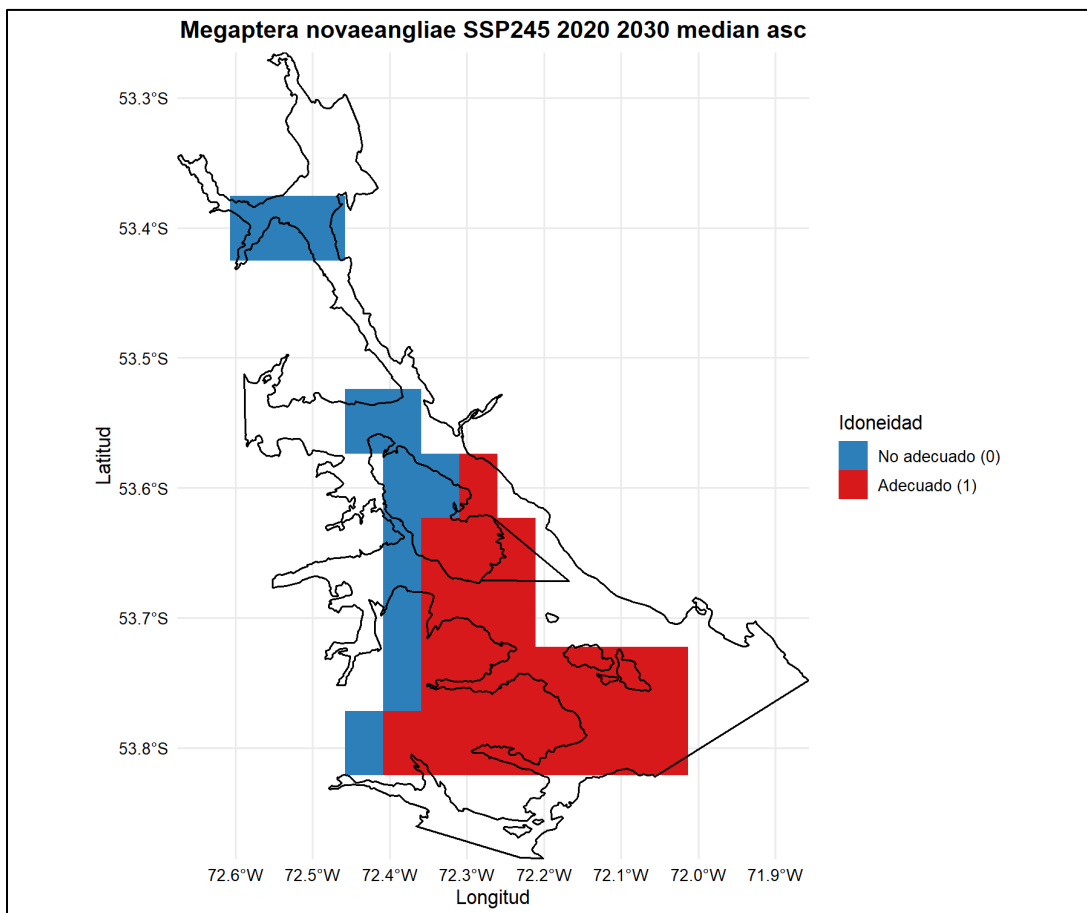




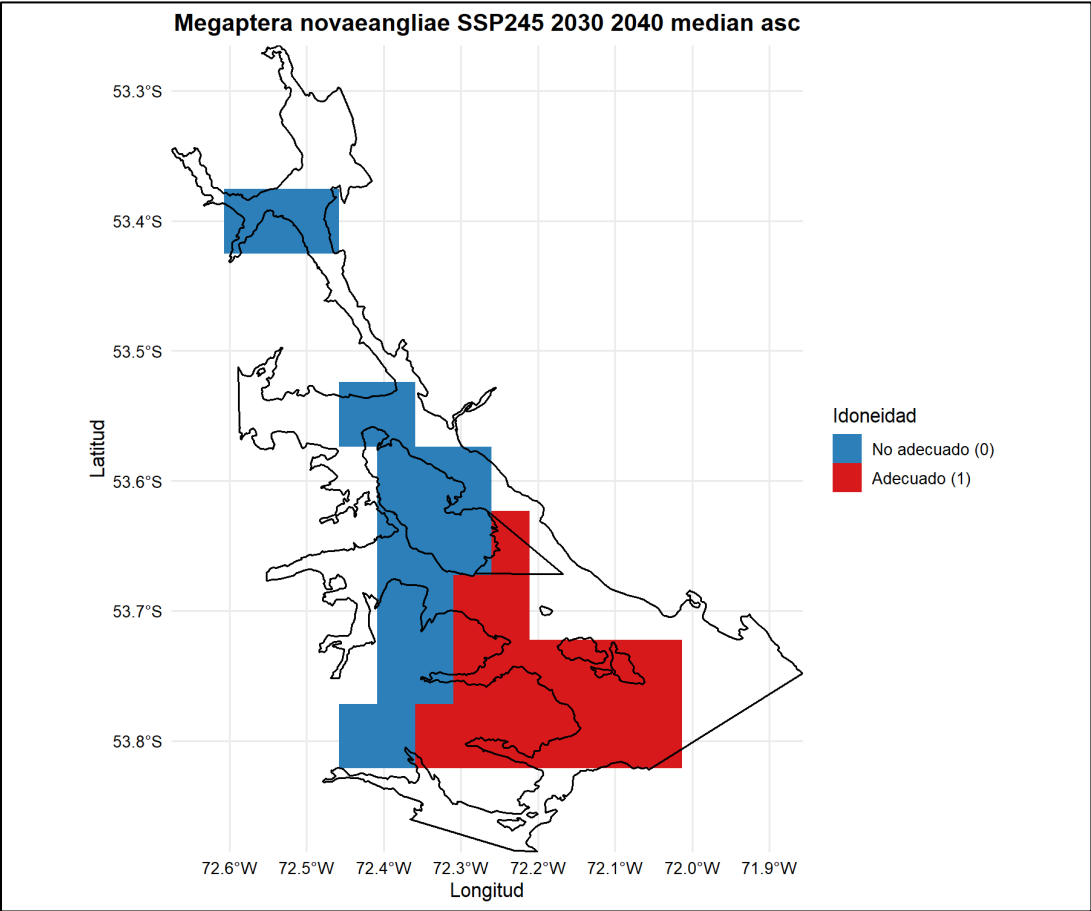
### 9.11 Anexo 10.4: Mapa Binario Escenario Ssp1 1.9 2040-2050



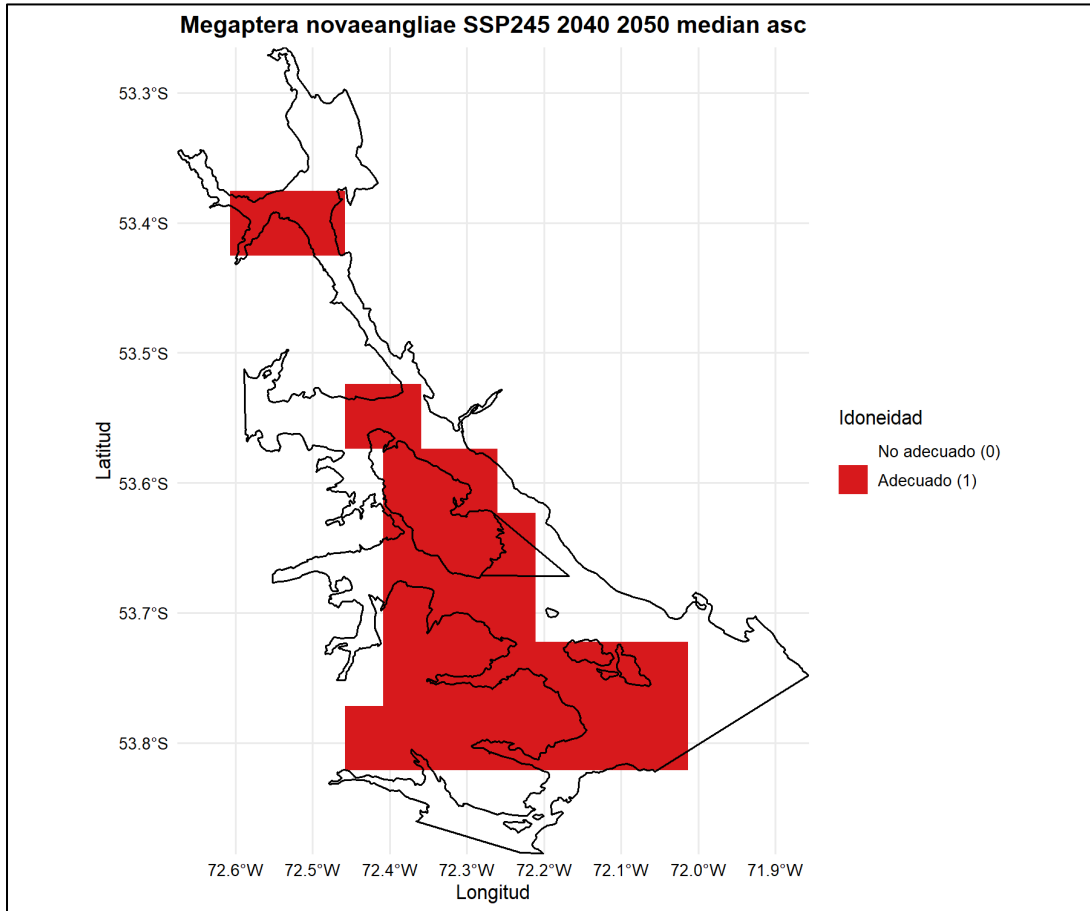
### 9.11.1 Anexo 10.5: Mapa Binario Escenario Ssp2 4.5 2020-2030



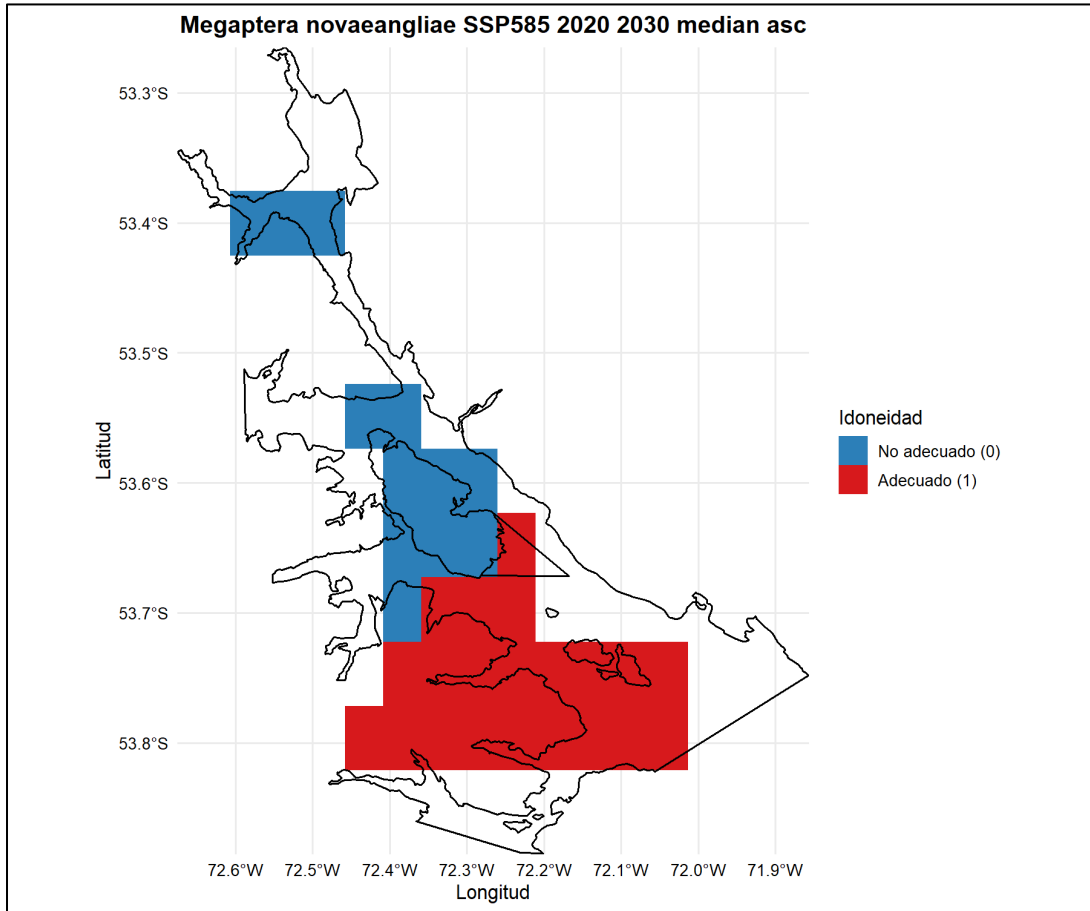
9.11.2 Anexo 10.6: Mapa Binario Escenario Ssp2 4.5 2030-2040



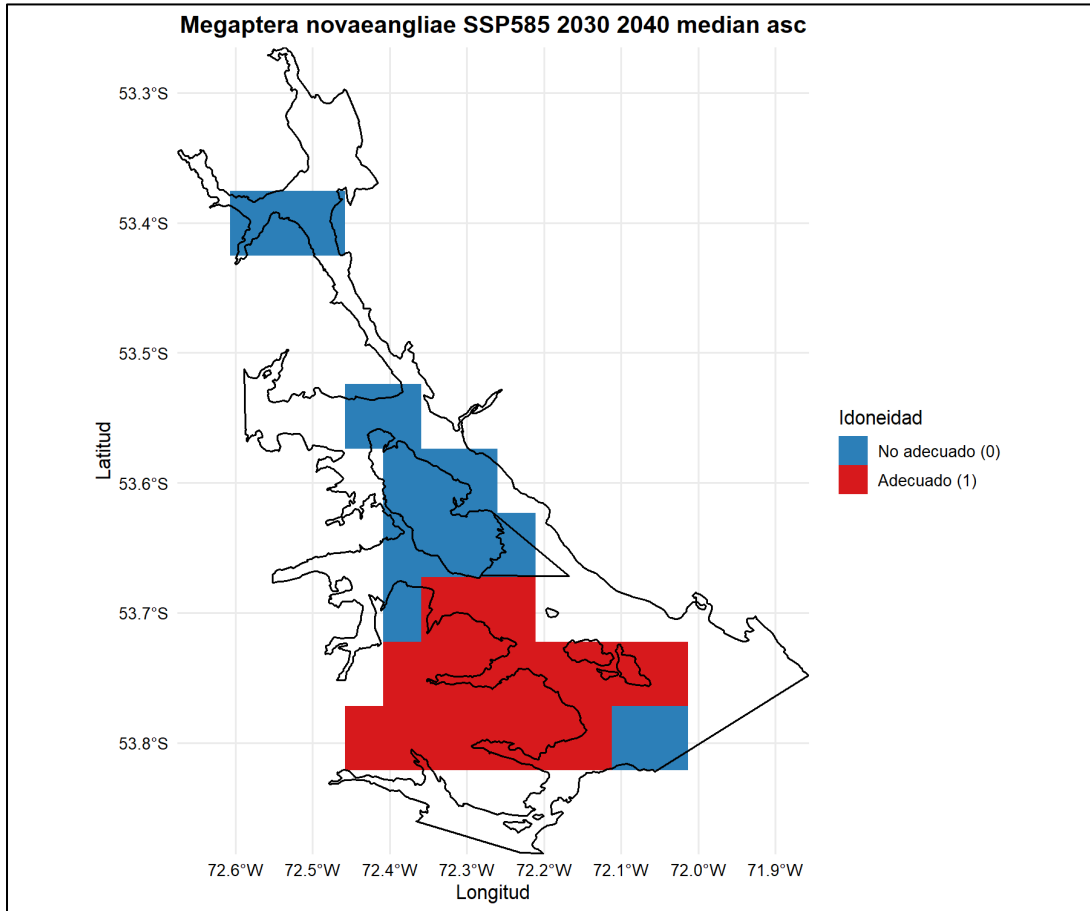
### 9.11.3 Anexo 10.7: Mapa Binario Escenario Ssp2 4.5 2040-2050



### 9.11.4 Anexo 10.6: Mapa Binario Escenario Ssp5 8.5 2020-2030



### 9.11.5 Anexo 10.7: Mapa Binario Escenario Ssp5 8.5 2030-2040





## 9.12 Anexo 11: Script Ploteo de mapas Binarios Rstudio Lenguaje R

```
# Paquetes
req <- c("terra","sf","ggplot2","tools")
for(p in req){
  if(!requireNamespace(p, quietly = TRUE)) install.packages(p, dependencies = TRUE)
  library(p, character.only = TRUE)
}

# Rutas
out_dir <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Resultados"
in_bin_dir <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Resultados/binarios"
shp_pmfc <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Parque nacional FC/polygon.shp"
shp_amufc <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Area de conservacion de multiples usos FC/polygon.shp"
shp_union_op <- "C:/Users/Atenas/Desktop/Tesis/Objetivo 2/insumos para probar otro calculo de
representatividad/Union Parques/union.shp"

# CRS
crs_area <- "EPSG:32719" # CRS de trabajo (Magallanes)
crs_plot <- "EPSG:4326" # Para mostrar ejes en lat/lon (grados)

# Salidas
out_maps_dir <- file.path(out_dir, "Mapas_binarios_estilo")
dir.create(out_maps_dir, showWarnings = FALSE, recursive = TRUE)

# Utilidades
read_sf_valid <- function(p, to_crs){
  v <- sf::st_read(p, quiet = TRUE)
  v <- sf::st_make_valid(v)
  v <- sf::st_transform(v, to_crs)
  v
}
deg_label_lon <- function(x){ paste0(sprintf("%.1f", abs(x)), "°W") }
deg_label_lat <- function(x){ paste0(sprintf("%.1f", abs(x)), "°S") }

# UNIÓN (y opcional PMFC/AMUFC)
if(file.exists(shp_union_op)){
  message("✓ Cargando UNIÓN desde archivo: ", shp_union_op)
  union_sf <- read_sf_valid(shp_union_op, to_crs = crs_plot)
} else {
  message("⚠ No existe union.shp. Se construye UNIÓN = PMFC U (AMUFC \\ PMFC).")
  pmfc_area <- read_sf_valid(shp_pmfc, to_crs = crs_area)
  amufc_area <- read_sf_valid(shp_amufc, to_crs = crs_area)
  pmfc_g <- sf::st_union(sf::st_geometry(pmfc_area))
  amufc_g <- sf::st_union(sf::st_geometry(amufc_area))
  amufc_only_g <- sf::st_make_valid(sf::st_difference(amufc_g, pmfc_g))
  union_g <- sf::st_make_valid(sf::st_union(pmfc_g, amufc_only_g))
  union_sf <- sf::st_sf(geometry = union_g, crs = crs_area)
  union_sf <- sf::st_transform(union_sf, crs_plot)
}

# (Opcional) contornos PMFC/AMUFC para el plot:
# pmfc_plot <- read_sf_valid(shp_pmfc, to_crs = crs_plot)
```

```

# amufc_plot <- read_sf_valid(shp_amufc, to_crs = crs_plot)

# Listado de binarios
bin_files <- list.files(in_bin_dir, pattern = "(?i)_bin(_32719)?\\.tif$", full.names = TRUE)
if(length(bin_files) == 0){
  stop("No se encontraron binarios en: ", in_bin_dir)
}
message("Archivos binarios encontrados: ", length(bin_files))

# Estilo
pal_bin <- c("0" = "#2C7FB8", # Azul: No adecuado
            "1" = "#D7191C") # Rojo: Adecuado
lbl_bin <- c("0" = "No adecuado (0)", "1" = "Adecuado (1)")
apply_smoothing <- TRUE # <- TRUE para suavizar visualmente
focal_window <- 3 # ventana de suavizado (3x3)

# PDF
pdf_path <- file.path(out_maps_dir, "Mapas_binarios_union_estilo.pdf")
pdf(pdf_path, width = 8.5, height = 7) # tamaño aprox. carta apaisado

# Loop y exportación
for(f in bin_files){
  nm <- tools::file_path_sans_ext(basename(f))
  ttl <- gsub("_bin_32719$", "", nm)
  ttl <- gsub("_bin$", "", ttl)
  ttl <- gsub("[_]+", " ", ttl)

  message("• Mapa: ", basename(f))
  r <- terra::rast(f)

  # Asegurar CRS correcto
  if(is.na(terra::crs(r))) terra::crs(r) <- crs_area
  r_wgs <- terra::project(r, crs_plot, method = "near")

  # Suavizado visual (solo para mostrar)
  if(apply_smoothing){
    r_plot <- try(terra::focal(r_wgs, w = focal_window, fun = "mean", na.policy = "omit"), silent = TRUE)
    if(inherits(r_plot, "try-error")) r_plot <- r_wgs
    r_plot <- terra::clamp(r_plot, lower = 0, upper = 1, values = TRUE)
  } else {
    r_plot <- r_wgs
  }

  df <- as.data.frame(r_plot, xy = TRUE, na.rm = TRUE)
  colnames(df) <- c("lon", "lat", "val")

  # Forzar clases binarias y factores
  df$clase <- ifelse(df$val >= 0.5, "Adecuado (1)", "No adecuado (0)")
  df$clase <- factor(df$clase, levels = c("No adecuado (0)", "Adecuado (1)"))

  # Colores fijos (azul y rojo)
  pal_bin <- c("No adecuado (0)" = "#2C7FB8",
              "Adecuado (1)" = "#D7191C")

  # PNG individual
  png_file <- file.path(out_maps_dir, paste0(nm, "_map_union_estilo.png"))
  png(png_file, width = 1800, height = 1500, res = 200)

  p <- ggplot() +

```

```

geom_raster(data = df, aes(x = lon, y = lat, fill = clase)) +
scale_fill_manual(values = pal_bin, name = "Idoneidad", drop = FALSE) +
geom_sf(data = union_sf, fill = NA, color = "black", linewidth = 0.6) +
coord_sf(expand = FALSE) +
labs(title = ttl, x = "Longitud", y = "Latitud") +
scale_x_continuous(labels = deg_label_lon) +
scale_y_continuous(labels = deg_label_lat) +
theme_minimal(base_size = 12) +
theme(
  plot.title = element_text(face = "bold", size = 14, hjust = 0.5),
  axis.text = element_text(color = "black"),
  legend.position = "right",
  panel.grid.minor = element_blank()
)

print(p)
dev.off()
print(p)
}

# Resumen en consola
cat("\nMapas generados (PNG):\n")
print(data.frame(
  archivo = basename(bin_files),
  png = file.path("Mapas_binarios_estilo", paste0(tools::file_path_sans_ext(basename(bin_files)),
  "_map_union_estilo.png")),
  stringsAsFactors = FALSE
))

```

### 9.13 Anexo 12: Matriz Licitaciones de referencia utilizadas para la estimación de costos estudio cambio de zonificación

ID Licitación	Año	Entidad / Fondo	Nombre del estudio	Costo de licitación (CLP)	Costo en UF (≈ \$36 000 CLP/UF)	Observaciones relevantes
1609-2-LQ22	2022	FNDR, Región de Magallanes y Antártica	Actualización de la Zonificación del Borde Costero e Implementación de la Evaluación Ambiental Estratégica.	\$1 000 000	<b>27,8 UF</b>	Estudio base de referencia para costos administrativos menores.
4374-13-LQ24	2024	FNDR, Región de O'Higgins	Levantamiento cartográfico, identificación y restitución de elementos principales del borde costero y generación de modelos digitales de terreno.	\$136 280 704	<b>3 786 UF</b>	Referencia principal para costos de cartografía SIG y digitalización.
4728-41-LP25	2025	Subsecretaría de Pesca y Acuicultura	Estudio de vulnerabilidad al cambio climático de mamíferos marinos, pingüinos y tortugas en la costa chilena.	\$78 000 000	<b>2 167 UF</b>	Referencia para estudios biológicos y climáticos de fauna marina.
4728-40-LE25	2025	Subpesca	Regularización cartográfica de 40 propuestas de decreto AMERB y verificación en terreno.	\$34 500 000	<b>958 UF</b>	Estudio de referencia para actualización y validación de polígonos costeros.
4728-43-LP25	2024	Subpesca	Determinación de áreas apropiadas para acuicultura A.A.A. según escenarios climáticos-oceanográficos.	\$74 119 150	<b>2 059 UF</b>	Referencia mixta para costos de modelación y escenarios climáticos.

### 9.14 Anexo 13: Matriz Licitaciones de referencia para la estimación de costos del Eje 2 – Implementación de corredores ecológicos marinos.

Nombre del estudio	Año	ID Licitación	Monto licitación (CLP)	Monto licitación (UF)	Observaciones relevantes
Bases técnicas para la gestión del Parque Marino Nazca-Desventuradas y propuesta del plan general de administración	2016	4728-44-LE16	\$15 000 000	379 UF	Estudio base para planificación y gestión en parques oceánicos.
Estudio para el diseño y elaboración del plan general de administración del Parque Marino Motu Motiro Hiva	2018	4728-6-LP18	\$1 000 000	25 UF	Plan de administración de referencia para parques remotos.
Diseño de un plan de manejo para el Área Marina Costera Protegida de Múltiples Usos Mar de Juan Fernández (AMCP-MU MJF) y planes generales de administración para parques marinos contiguos	2019	608897-76-LE19	\$39 050 000	987 UF	Proyecto integral de manejo y conectividad de áreas marinas protegidas.
Elaboración de un instrumento de gestión y administración del AMCP-MU Francisco Coloane	2017	612543-1-LE17	\$4 000 000	101 UF	Referencia directa para el área de estudio.
Bases técnicas para la gestión del Parque Marino “Islas Diego Ramírez–Paso Drake” y propuesta de plan general de administración	2019	4728-27-LP19	\$80 000 000	2 023 UF	Proyecto de planificación marina de alta complejidad y extensión.
<b>Promedio general</b>			<b>\$27 810 000</b>	<b>≈ 703 UF</b>	Promedio utilizado para la estimación del Eje 2.

### 9.15 Anexo 14: Matriz Licitaciones de referencia para la estimación de costos del Eje 3 – Monitoreo climático y ecológico adaptativo.

ID Licitación	Año	Tipo de Fondo / Institución	Nombre del estudio o servicio	Costo licitación (CLP)	Observaciones relevantes
3073-20-LQ19	2019	—	Contrato Estudios científicos Crucero CIMAR25 Fiordos (UMAG y SHOA).	\$12 852 000	Referencia para cruceros científicos en fiordos australes.
1049-42-LR25	2025	—	Servicio de arriendo de embarcación para crucero de evaluación de merluza del sur.	\$485 000 000	Valor alto, usado como límite superior para operaciones embarcadas.
1049-33-LE25	2025	—	Servicios profesionales en gestión informática (IFOP).	\$2 000 000	Referencia para soporte técnico y datos.
1049-75-LE25	2024	IFOP	Adquisición de equipamiento y licencias para red SD-WAN.	\$30 000 000	Valor medio para equipos informáticos y red de transmisión.
1049-102-LE25	2025	IFOP	Adquisición de boya oceanográfica costera.	\$35 200 000	Referencia directa para equipos oceanográficos.
1049-103-LE25	2025	CORFO	Instalación de estaciones meteorológicas.	\$13 000 000	Referencia para estaciones climáticas terrestres.
3187-21-L121	2021	—	Servicio de transporte de boya tipo pilar.	\$4 000 000	Logística de transporte e instalación.
728-7-L120	2025	—	Servicio de embarcación para fondeo de boya de oleaje (Puerto Coloso).	\$2 023 000	Referencia de operación marina puntual.
1049-46-LE25	2025	—	Adquisición de equipos computacionales para IFOP.	\$16 064 048	Complemento tecnológico y de respaldo de datos.
1049-17-LE25	2024	IFOP	Transporte para programa de monitoreo de microalgas nocivas y toxinas marinas (marea roja).	\$16 500 000	Referencia directa a monitoreo ambiental costero.

**9.16 Anexo 15: Referencias y valores utilizados para la estimación de costos – Eje 4  
Gobernanza colaborativa.**

<b>Componente</b>	<b>Cargo / Actividad Referencial</b>	<b>Tipo de Contratación</b>	<b>Honorario Mensual Estimado (CLP)</b>	<b>Duración Estimada</b>	<b>Subtotal (CLP)</b>	<b>Fuente / Justificación</b>
Coordinación técnica institucional	Coordinador(a) institucional de proyecto ambiental	Jornada completa (honorarios)	\$2.000.000	24 meses	\$48.000.000	MMA y SBAP – Grado 11–10 / Licitaciones FNDR
Comités científico-técnicos interinstitucionales	8 sesiones anuales con 8 miembros (dietas por reunión + logística)	Por sesión (viáticos + operación)	\$300.000 / sesión	10 sesiones	\$24.000.000	Promedio dietas comité + soporte operativo
Asesorías especializadas	4 asesorías de expertos en gobernanza y conservación marina	Consultoría por proyecto	\$14.000.000 c/u	1 mes x asesoría	\$56.000.000	Contratos consultorías ambientales SBAP y MMA
Facilitadores y talleres participativos	Talleres regionales + facilitador/a (honorarios + logística)	Honorarios por actividad	\$2.000.000 x taller	16 talleres	\$32.000.000	Licitaciones participación ciudadana / FAO / MMA
<b>Total estimado</b>					<b>\$160.000.000</b>	

### 9.17 Anexo 16: Referencias para estimación de costos – Eje 5: Educación ambiental y divulgación científica

Componente	Nombre de la Licitación / Programa	ID Licitación	Año	Monto Referencial (CLP)	Observaciones
Campañas audiovisuales de sensibilización	Campaña comunicacional FNDR Turismo Social – SERNATUR	1871-5-LQ25	2025	\$205.000.000	Campaña integral; se usó solo como referencia de tope máximo
Campañas de turismo responsable	Campaña CORFO para turismo responsable	-	2019	\$2.700.000	Campaña focalizada; escala menor útil para actividades puntuales
Formación y educación ambiental	Programa SIGO Innovación – Formación en empresas de turismo	21PFC-175193	2022	\$57.960.000	Formación técnica en contexto turístico; comparable a talleres de sensibilización
Talleres y cursos científicos	Cursos IFOP para observadores científicos y revalidación de conocimientos	1049-82-LE25	2025	\$18.000.000	Formación técnica aplicada al contexto marino; escala útil para estimar talleres