



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Análisis y caracterización de la distribución poblacional de la Macarela (*Scomber japonicus*) frente a las Costas de Ecuador durante el periodo 2020-2023, utilizando la integración biológica pesquera y los sensores remotos

AUTOR:

Ochoa Mendoza Luis Alfredo

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del grado académico de
MAGÍSTER EN BIODIVERSIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO

TUTOR:

PhD. Jerry Landívar Zambrano

Santa Elena - Ecuador.

2025

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios, fuente de mi fortaleza y guía, por permitirme llegar hasta este momento, su infinita bondad y sabiduría me han acompañado en cada paso de este camino.

A mis padres, esposa e hija, quienes han sido apoyo incondicional. Gracias por estar siempre a mi lado, motivándome y guiándome en los momentos importantes.

Mi agradecimiento en especial a la UPSE, por brindarme la oportunidad de formarme en un ambiente académico de excelencia. A cada uno de los docentes que compartieron su conocimiento y sabiduría, por su dedicación y apoyo durante el periodo de estudio.

Expresar sincero agradecimiento a la Subsecretaría de Recursos Pesqueros, entidad que, mediante la apertura de sus registros oficiales y el acceso a los datos requeridos sirvieron como insumo principal para el desarrollo de este estudio.

Extiendo también mi gratitud al Dr. Jerry Landívar Zambrano, tutor de este trabajo de tesis, por su guía constante y sus observaciones oportunas. Asimismo, agradezco el valioso respaldo del Msc. Isidro Andrade V., por su apoyo en la gestión mantenida.

Con aprecio y consideración,

LUIS ALFREDO OCHOA MENDOZA

APROBACIÓN DEL TUTOR

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por LUIS ALFREDO OCHOA MENDOZA, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Biodiversidad y Cambio Climático.

PhD. Jerry Landívar Zambrano
TUTOR

Santa Elena a los 30 días del mes de junio del año 2025.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Econ. Roxana Álvarez Acosta, PhD.
**COORDINADORA DEL
PROGRAMA**

PhD. Jerry Landívar Zambrano.
TUTOR

MSc. Nikita Gaibor Castro.
DOCENTE ESPECIALISTA 1

PhD. Freddy Hernández Vaca.
DOCENTE ESPECIALISTA 2

Ab. María Rivera González, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL

AUTORIZACIÓN DERECHOS DE AUTOR

Yo, LUIS ALFREDO OCHOA MENDOZA

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de Informe de Investigación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, a los 27 días del mes de junio del año 2025

Luis Alfredo Ochoa Mendoza
AUTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Luis Alfredo Ochoa Mendoza

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, “**Análisis y caracterización de la distribución poblacional de la Macarela (Scomber japonicus) frente a las costas de Ecuador durante el periodo 2020-2023, utilizando la integración biológica pesquera y sensores remotos**”, previo a la obtención del título en Magíster en Biodiversidad y Cambio Climático, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, a los 27 días del mes de junio del año 2025

Luis Alfredo Ochoa Mendoza
AUTOR

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TUTOR	iii
AUTORIZACIÓN DERECHOS DE AUTOR.....	v
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	vi
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1. Problemática	4
1.2. Justificación.....	5
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. General	7
1.3.2. Específicos	7
1.4. Hipótesis	8
1.5. Marco teórico	9
1.5.1. Generalidades teóricas	9
1.5.2. Definición y Características Eventos ENOS.	12
1.6. Uso de datos satelitales en investigación pesquera.	13
1.7. Temperatura Superficial del Mar (TSM).....	13
1.8. Clorofila.....	14
1.9. Aspectos biológicos de la Macarela (<i>Scomber japonicus</i>).....	15
1.9.1 Clasificación taxonómica	15
1.9.2. Morfología	16
1.9.3. Distribución.....	16
1.9.4. Reproducción	17
1.9.5. Alimentación	18
1.9.6. Importancia pesquera	18
CAPÍTULO 2	19
2. Materiales y métodos.....	19
2.1. Área de estudio	19
2.2. Datos biológicos pesqueros	20
2.3. Datos de captura	21
2.4. Procesamiento datos satelitales	22
2.5. Validación de datos.....	23
2.6. Análisis estadístico.....	23
CAPÍTULO 3	25
3. Resultados y Discusión	25

3.1. Productividad de la Macarela – KDE.....	25
3.1.1. Ciclos climatológicos en Ecuador (Región Litoral / Costera).....	25
3.1.2. Análisis de Ciclos de Productividad.....	25
3.2. Influencia de la Temperatura Superficial del Mar y zonas de capturas.	34
3.3. Influencia de la Clorofila-a y zonas de capturas.....	38
3.4. Análisis de Correlación entre la Temperatura Superficial del Mar y capturas	42
3.5. Modelos predictivos bajo escenarios climáticos.....	46
3.5.1. Tasas de incremento de TSM a escenario SSP2-4.5, periodo 2033 – TSM	
24.27 °C.....	47
3.5.2. Tasas de incremento de TSM escenario SSP5-8.5, periodo 2033 – TSM	
24.44 °C.....	50
3.6. Discusión.....	53
CAPÍTULO 4.....	57
4. Conclusiones y Recomendaciones	57
4.1. Conclusiones.....	57
4.2. Recomendaciones.....	58
Bibliografía.....	59

Resumen

La investigación examina y describe la distribución poblacional de *Scomber japonicus* (Macarela) en la costa de Ecuador durante el periodo 2020 - 2023, a través de la incorporación de registros pesqueros georreferenciados y datos satelitales ambientales, entendiendo las variaciones asociadas a eventos de El Niño y La Niña afectando la disponibilidad para esta pesquería nacional.

Para lograrlo, se optó por el método cuantitativo y predictivo, utilizando métodos de análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica (SIG), teledetección por satélite (MODIS Aqua – SeaDAS) y modelación ecológica con MaxEnt. La información pesquera se recolectó del Programa de Observadores a Bordo de la Subsecretaría de Recursos Pesqueros, con una duración temporal que comprendió cuatro años y ambos ciclos estacionales típicos del litoral de Ecuador.

Entre los hallazgos más relevantes, se descubrió que las áreas con mayor concentración de biomasa de macarela se situaban usualmente frente al Golfo de Guayaquil, bajo condiciones de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de 23 °C a 27 °C y niveles de clorofila-a que excedían los 0.8 mg/m³ de temperatura. Esto confirma el profundo vínculo entre la productividad primaria y la presencia de esta especie. No obstante, el año 2023, marcado por la aparición de condiciones climáticas extremas, mostró una disminución en la intensidad de la pesca, posiblemente asociada a alteraciones en la estructura trófica o desplazamiento del recurso fuera del área de pesca habitual.

El vínculo estadístico entre la TSM y las capturas no evidenció un impacto relevante, lo que señala que la variabilidad en la abundancia de la macarela es multifactorial y no puede ser explicada únicamente por la temperatura. En esta situación, el uso de modelación predictiva con MaxEnt permitió la proyección de futuros escenarios de distribución bajo las trayectorias climáticas SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del IPCC, evidenciando un patrón progresivo de reorientación del hábitat hacia el suroeste del Pacífico y su posterior regresión hacia las franjas costeras para el año 2103, en respuesta al aumento sostenido de la TSM.

Estas proyecciones, unidas a la descripción anual de la productividad y los gradientes del medio ambiente, resultan un recurso crucial para la gestión adaptativa de la pesquería de

Scomber japonicus, insinuando que las decisiones de organización espacial y temporal incluyan variables ambientales predictivas. Además, se enfatiza la relevancia de fortalecer los sistemas de observación oceánica y el monitoreo continuo, particularmente en el contexto del cambio climático global.

Summary

The objective of this study was to examine and describe the population distribution of *Scomber japonicus* (Macarela) on the coast of Ecuador during the period 2020 - 2023, through the incorporation of georeferenced fishing records and environmental satellite data, understanding the variations associated with El Niño and La Niña events affecting the availability for this national fishery.

To achieve this, a quantitative and predictive method was chosen, using spatial analysis methods with Geographic Information Systems (GIS), satellite remote sensing (MODIS Aqua - SeaDAS), and ecological modeling with MaxEnt. Fishing information was collected from the On-Board Observer Program of the Undersecretariat of Fisheries Resources, with a temporal duration that included four years and both seasonal cycles typical of the Ecuadorian coast

Among the most significant discoveries, it was found that the areas with the highest concentration of mackerel biomass were typically located off the Gulf of Guayaquil, under conditions of Sea Surface Temperature (SST) of 23°C to 27°C and chlorophyll-a levels exceeding 0.8 mg/m³. This corroborates the close relationship between primary productivity and the existence of this species. However, the year 2023, characterized by the emergence of extreme climatic conditions, evidenced a reduction in fishing intensity, likely linked to changes in the trophic structure or relocation of the resource outside the usual fishing area.

The statistical correlation between SST and catches did not show a significant effect, indicating that variability in mackerel abundance is multifactorial and cannot be explained solely by temperature. In this context, predictive modeling using MaxEnt enabled the projection of future distribution scenarios under the IPCC SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate trajectories, showing a gradual pattern of habitat reallocation towards the southwest Pacific and its subsequent regression towards the coastal strips by 2103, as a reaction to the constant increase in SST.

These estimates, combined with annual descriptions of productivity and environmental gradients, are an essential resource for adaptive management of the *Scomber japonicus* fishery, suggesting that spatial and temporal management decisions should consider predictive environmental variables. Additionally, they underscore the importance of

strengthening ocean observation systems and ongoing monitoring, especially in the context of global climate change

CAPÍTULO 1

1. Introducción

Las labores de pesca de peces pelágicos pequeños (PPP) desempeñan un rol crucial en la economía y la seguridad alimentaria de múltiples regiones del mundo especialmente en comunidades costeras.

Adicionalmente, constituyen un elemento importante de la biodiversidad marina y resultan imprescindibles para la cadena de alimentación oceánica (FAO, 2020).

La pesca en el Ecuador se ha transformado en una de sus principales actividades comerciales que sostienen su economía esto gracias a que posee extensa costa en el Pacífico Tropical Oriental, incluyendo el Archipiélago de Galápagos. Esta tarea se centra en la captura costera y oceánica de diversas especies como es el caso de pelágicas pequeñas, empleadas en embarcaciones industriales y también artesanales, utilizadas en la producción de harina de pescado, aceite, enlatados y congelados para consumo humano, conservas, entre otros (Anastacio, 2021).

El Ecuador mantiene vigente la Ley Orgánica para el Desarrollo de la Acuicultura y Pesca LODAP que establece el marco jurídico para la realización de actividades acuícolas, pesqueras y relacionadas, conforme a los principios constitucionales establecidos.

, contribuyendo a la seguridad, soberanía alimentaria, desarrollo sostenible e investigación de los recursos hidrobiológicos mediante la aplicación del enfoque ecosistémico pesquero como eje transversal de gestión (Asamblea Nacional del Ecuador, 2020).

Bajo ese contexto, es importante entrar en conocimiento sobre la dinámica poblacional de los peces pelágicos pequeños, recursos pesqueros categorizados comercialmente importante y estratégico para el Ecuador, en este caso específico la especie objeto del presente estudio *Scomber japonicus* llamada comúnmente Macarela o Morenillo una especie válida y reconocida científicamente, está sujeta a fluctuaciones afectadas tanto por factores biológicos como por condiciones ambientales como la TSM y Clorofila. Adicionalmente, ha representado históricamente un componente importante en los desembarques siendo un objetivo principal de la flota industrial de embarcaciones provistas con red de cerco de jareta, particularmente en la ecorregión de Guayaquil, donde se concentra la mayor parte del esfuerzo pesquero nacional (Canales et al., 2019). Sin embargo, la pesquería carece de límites máximos de captura y, a pesar de contar vedas, enfrenta riesgos de sobrepesca debido

al incremento no regulado del esfuerzo, especialmente en las embarcaciones artesanales tipo "rizo" (Canales et al., 2019, p. 7).

En contextos tropicales como el del Pacífico ecuatorial frente a las costas del Ecuador, estos recursos presentan variaciones significativas en su abundancia y distribución como respuesta a la variabilidad oceanográfica multiescalar (e.g., El Niño, La Niña, Oscilación Decadal del Pacífico, PDO), la cual afecta la TSM, la disponibilidad de nutrientes y la productividad primaria, elementos clave en los procesos reproductivos y de reclutamiento de estas especies (Ormaza-González, 2016; Lehodey et al., 2006).

Es importante señalar que los recursos de pesca sufren variaciones en casi todas las escalas temporales, por lo que resulta crucial supervisar de manera constante las variables biológicas, ambientales y socioeconómicas para conocer la condición de los diferentes inventarios que se están explotando, más aún que son clave para la seguridad alimentaria y reducción de pobreza (FAO, 2022).

Esta distribución de recursos pelágicos se altera durante un período cálido (Fenómeno El Niño de intensidad fuerte o extraordinario), lo que provoca fuertes migraciones: hacia zonas más frías - sur, hacia el norte y hacia la costa del pacífico oriental; hay una profundización de especies tradicionales; inmigración de especies tropicales y oceánicas; etc. Sin embargo, el comportamiento de los peces en cardúmenes, tamaño y forma varía de una especie a otra, así como en el espacio y el tiempo (Castillo V, R. 1995).

A nivel regional se cuenta con una serie de investigaciones, donde se da a conocer los efectos que la variabilidad ambiental ejerce en los rasgos biológicos de las poblaciones de especies pelágicas (Canales et al., 2018; Kreiner et al., 2001; Yáñez et al., 1992), así mismo en el Ecuador, la pesquería de peces pelágicos pequeños objeto de numerosos estudios orientados a la evaluación y manejo, aún tienen brechas relacionadas con el análisis de sensibilidad a los cambios en el ambiente marino, tanto de alta frecuencia en respuesta a eventos de variabilidad climática extrema como El Niño-Oscilación del Sur, o de más baja frecuencia, en un contexto de cambio climático (Ormaza-González et al., 2016).

Por lo anteriormente expuesto, en el presente informe de investigación tiene como propósito

analizar espacialmente las interacciones oceanográficas que inciden en la pesquería de la Macarela desde el 2020 hasta el 2023, a partir de parámetros específicos registrados a lo largo del perfil costero ecuatoriano, dando aquello al mejoramiento de la comprensión integral ante los impactos de fenómenos climáticos sobre los recursos marinos, lo que resulta esencial para fortalecer la gestión sostenible de la pesca y el mejor ordenamiento del espacio marino y no altere los ingresos pesqueros. Adicionalmente, combina el uso de información primaria obtenida y herramientas tecnológicas citando para este caso el uso de modelos predictivos orientados a anticipar posibles escenarios de redistribución espacial del *S. japonicus* frente a las costas del Ecuador bajo condiciones proyectadas de cambio climático utilizando como base la práctica de captura tradicional que se lleva a cabo.

1.1. Problemática

En las últimas décadas, los ecosistemas marinos del Pacífico ecuatorial han estado expuestos a cambios significativos producto de la interacción entre factores climáticos, oceanográficos y antrópicos teniendo fuerte impacto sobre los océanos. Específicamente, las variaciones en la TSM han representado una de las variables más influyentes sobre la distribución, abundancia y comportamiento de las especies pelágicas pequeñas, entre ellas la macarela (*Scomber japonicus*), la cual es de gran importancia comercial para el Ecuador. Estas fluctuaciones térmicas están asociadas a eventos como El Niño, La Niña y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), que modifican los patrones de productividad biológica marina, así como la estructura y función de los ecosistemas pelágicos (Juárez et al., 2014; Ormaza-González, 2016).

Gracias a los avances tecnológicos y el uso de imágenes satelitales ha permitido analizar la temperatura del mar de manera más detallada. No obstante, su precisión puede verse afectada por factores como la nubosidad y la duración limitada de las series temporales, lo que condiciona el análisis continuo y fiable de estos parámetros (Trujillo & Marzol, 2022).

El cambio climático ha intensificado los procesos de redistribución de especies marinas, desplazando a aquellas de aguas cálidas hacia latitudes más altas reduciendo su productividad en zonas tropicales y subtropicales como las del litoral ecuatoriano (Grajales-Quintero, 2008). Este fenómeno, además de alterar la disponibilidad de hábitat, también afecta la productividad y estructura trófica de los ecosistemas, especialmente en regiones tropicales como la costa ecuatoriana.

Eventos climáticos extremos como El Niño, con anomalías térmicas superiores a 2 °C, han generado históricamente colapsos en pesquerías clave, como la de anchoveta en los años 1972–1973, 1982–1983 y 1997–1998 (Rodríguez et al., 1993; Pauly & Tsukayama, 1987).

La disminución de la productividad de los ecosistemas costeros puede verse reflejada en una menor biomasa disponible, en cambios en la estructura de tallas y en una reducción en las tasas de crecimiento y capacidad reproductiva de las especies objetivo lo que repercute en la seguridad alimentaria. Las condiciones dominadas por la Niña (doble episodio) 2021 – 2022 se mantuvo mayoritariamente con anomalías negativas -0.5 °C. (Boletín ERFEN-Ecuador (2021). *Informe Técnico sobre la Situación del ENOS*).

En el año 2023, se observaron condiciones de calor extremadamente alto en las aguas del Pacífico oriental, lo que, de acuerdo con Muñoz (2023), ha impactado directamente en la dinámica de las pesquerías (distribución y disponibilidad) en la zona. Estos incrementos en la temperatura modifican las condiciones fisicoquímicas de la columna de agua, impactando no solo en la ubicación espacial de las especies, sino también en procesos fisiológicos esenciales como el crecimiento, la reproducción y el reclutamiento, elevando la probabilidad de sobreexplotación y desmoronamiento de las poblaciones pesqueras (Grajales-Quintero, 2008; Rodríguez et al., 1993; Pauly & Tsukayama, 1987)

Adicionalmente, las pesquerías artesanales e industriales del Ecuador no se encuentran lo suficientemente preparadas para enfrentar condiciones ambientales adversas lo que resulta prioritario aumentar la capacidad de adaptación en las comunidades humana y países en conjunto.

1.2. Justificación

El estudio tiene como finalidad profundizar en la comprensión de cómo la especie Macarela responde ante diversas fluctuaciones oceanográficas y atmosféricas teniendo en cuenta que desarrollan un papel muy importante en el ambiente marino considerando especialmente el periodo 2020 – 2023. En este intervalo, el litoral ha estado influenciado por fases frías como La Niña y por episodios de TSM superiores al promedio, lo que ha provocado cambios notables en la distribución, abundancia y migración del recurso (CIIFEN, 2023).

Por consiguiente, debido a la importancia socio-económica del recurso para las poblaciones que viven del y en torno al mar, es utilizado para la elaboración de productos destinados a distintos sectores, llegando a estar dentro de los primeros puestos que aportan al producto Interno Bruto (PIB), convirtiéndose en una fuente de desarrollo económico y social para el país (Subsecretaría de Recursos Pesqueros del Ecuador, 2021). Por tal motivo, el gremio pesquero asume estrategias para mejorar la logística de las faenas de pesca y responder con mayor precisión a las distintas temporadas que se presentan y evitar pérdidas en este caso económicas.

Mantener un registro histórico de respuestas de la macarela durante eventos climáticos específicos –como La Niña o El Niño– que, debido al cambio climático continuarán intensificándose, es vital fortalecer la capacidad de predicción del sistema pesquero constituyendo un insumo científico clave no solo para la gestión nacional, sino también para

investigaciones futuras orientadas a comparar patrones interanuales de comportamiento, distribución entre especies pelágicas y la comprensión de adaptación de los individuos y las comunidades a medida de la intensificación del cambio climático (Pollnac, R. et al, 2024).

Incrementar el conocimiento en el mar ecuatoriano acompañado de insumos técnicos robustos sobre el estado de situación de cualquier recurso en este caso pesquero permite gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros, fortaleciendo su resiliencia, evitando efectos negativos significativos y restaurar su salud y productividad, reglamentando su explotación pesquera teniendo en cuenta gestiones con fundamentos científicos, conociendo que durante años con anomalías térmicas positivas en el Pacífico ecuatorial (como eventos El Niño de 1997–98 o 2015–16), la macarela ha registrado disminuciones en los desembarques y una migración en el contexto de creciente variabilidad climática de sus cardúmenes hacia zonas menos accesibles para la flota nacional (Martínez et al, 2019).

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Analizar y caracterizar la distribución poblacional de la Macarela (*Scomber japonicus*) frente a la costa de Ecuador durante el periodo 2020-2023, utilizando la información pesquera y sensores remotos

1.3.2. Específicos

Elaborar mapas de distribución-producción mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Establecer la ubicación espacial de la Macarela basándose en la Temperatura Superficial del Mar y concentración de clorofila-a utilizando el software SeaDAS.

Desarrollar modelos estadísticos de los parámetros pesquero de la Macarela, capturada por la flota industrial en el periodo 2020 – 2023 ante la variabilidad de condiciones oceanográficas.

Proyectar escenarios o modelos de la distribución de la Macarela en la plataforma del Pacífico ecuatorial, bajo incremento de la TSM.

1.4. Hipótesis

H₀: La especie marina Macarela (*Scomber japonicus*), no modifica su distribución dependiendo de factores ambientales en el perfil costero del Ecuador

H₁: La especie marina Macarela (*Scomber japonicus*) varía su distribución en función de variables ambientales en el perfil costero del Ecuador.

1.5. Marco teórico

1.5.1. Generalidades teóricas

El Pacífico oriental ecuatorial, y en particular el litoral frente a Ecuador, constituye una región dinámica desde el punto de vista oceanográfico, debido a la interacción compleja entre sistemas de circulación oceánica. Este entorno marino está condicionado por la influencia simultánea de masas de agua de distinta procedencia: la Corriente de Panamá, que introduce aguas cálidas tropicales desde el norte; la Corriente de Humboldt, que aporta aguas frías y ricas en nutrientes desde latitudes australes; y la Corriente Subsuperficial Ecuatorial o de Cromwell, que transporta masas subsuperficiales cargadas de nutrientes desde el oeste hacia el este del Pacífico que afectan la productividad y la distribución biológica en la región (Fiedler & Talley, 2006).

De acuerdo con el Reporte Especial de Océanos y Criósfera, el Cambio Climático (CC) no solo afectará a los océanos y a la criósfera, sino que también podría crear oportunidades para el turismo y la pesca. Esto ocurre a causa del incremento de la TSM en el océano, lo que podría modificar las poblaciones de peces, generando así nuevas posibilidades de pesca y disminuyendo el efecto en ciertas pesquerías (Pörtner, H. O., & Peck, M. A., 2010).

En su edición sobre el impacto del CC en las pesquerías y la acuicultura, Barange et al. (2018) señalan que el forzamiento antropogénico ha hecho una contribución significativa al calentamiento del océano en sus capas superiores (cerca de los 700 m), que se ha observado desde 1960. Se prevé que la temperatura aumente en varias partes del mundo, pero el aumento será más notable en el hemisferio norte, particularmente en el Atlántico Norte. Además, se anticipa que el calentamiento persista durante el siglo XXI, en particular en el trópico y en las regiones subtropicales del hemisferio norte, mientras que se anticipa un aumento en el calentamiento en aguas profundas en el Océano Austral. El cambio climático es uno de los factores más determinantes de cambios profundos en los ecosistemas marinos, con impactos claros en la distribución, fenología y conducta de los seres vivos.

Estas alteraciones han sido ampliamente documentadas en múltiples especies tanto marinas como terrestres a escala global (Biro et al., 2010). En el caso de los peces, estudios recientes han comenzado a abordar cómo el calentamiento global puede afectar su crecimiento,

reproducción y supervivencia a lo largo de su ciclo de vida o persiste en un periodo prolongado (Gardner et al., 2011). Igualmente, describir que, las comunidades costeras en Ecuador han evolucionado entorno a las variaciones cíclicas conocidas como ENSO (Pollnac, R. et al, 2024).

En particular, los aumentos en la TSM pueden generar impactos que se extiende desde el fitoplancton y zooplancton —principales productores primarios— hasta los depredadores tope, afectando así la base trófica y la estructura del ecosistema que según disminuirá a nivel global de un 3% y un 9% para 2100 (Kwiatkowski et al. 2017). Las especies pelágicas pequeñas, como la macarela (*Scomber japonicus*), son especialmente sensibles a estas variaciones debido a su alta movilidad, corto ciclo de vida y dependencia de condiciones ambientales específicas para su reproducción y alimentación (Bakun, A., & Broad, K., 2003).

Según Monnier et al. (2020) afirma la alta vulnerabilidad térmica que presenta la Macarela, así como los cambios en los patrones estacionales de temperatura, pueden alterar significativamente procesos biológicos clave, como el comportamiento migratorio, el crecimiento, la madurez sexual y la tasa de regeneración poblacional (Alexander et al., 2018). Cada especie muestra una habilidad diferente de resistencia al calor, o sea, un rango concreto de adaptabilidad a las fluctuaciones de temperatura, lo que determina su habilidad para adaptarse y sobrevivir como sus procesos biológicos esenciales. (H. O. Pörtner y M. A. Peck, 2010).

En el caso de la macarela, se ha determinado que la temperatura óptima preferencial para su desarrollo integral (comportamiento, alimentación, distribución y éxito reproductivo) se encuentra entre su rango térmico óptimo entre los 24 °C y 27 °C (Binohlan, 2019; FAO, 2021). Por consiguiente, no solo favorece su presencia en zonas productivas sino condicionan su migración estacional y éxito reproductivo clave para la estabilidad de la pesquería que dependen de esta especie (Checkley et al., 2009; Chávez et al., 2008).

Sin embargo, el aumento sostenido de la temperatura fuera de este umbral podría alterar los patrones reproductivos, reducir la fecundidad, disminuir la tasa de huevos viables y comprometer la supervivencia de las larvas, lo que pondría en riesgo la estabilidad de su población a largo plazo. (Pörtner, H. O., & Peck, M. A. (2010).

Además, se ha observado que los patrones de migración de especies de la familia *Scombridae* presentan una alta variabilidad interanual, estrechamente asociada a las condiciones oceanográficas y la disponibilidad de alimento. Como especie de filtrador, la macarela fundamenta su alimentación principalmente en seres planctónicos como dinoflagelados, copépodos y larvas de bivalvos, cuya cantidad y composición fluctúan dependiendo del periodo anual y la región (Cervantes et al.,1992). Esto provoca una estrecha relación entre su distribución espacial y las condiciones tróficas locales, que también son modificadas por las variaciones climáticas.

Ormaza-González et al., (2016) resaltan que, en el estudio de desembarques pesqueros entre 1981 y 2012 en la región El Niño 1 - 2, la influencia de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) las especies pelágicas pequeñas experimentaron una disminución durante las etapas cálidas y un aumento en las etapas frías, lo cual podría ser beneficioso para la administración pesquera.

Es vital resaltar que el año 2023 fue el más caluroso jamás documentado a escala mundial. De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la media anual de la Tierra superó los niveles preindustriales en $1,45 \pm 0,12 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 1), aproximando de manera peligrosa al límite de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (SR1.5) fijado en el Acuerdo de París de calentamiento entre 2030 y 2052 (IPCC 2018). Este incremento térmico es resultado de la mezcla del fenómeno de El Niño y del calentamiento global provocado por la acción humana.



Figura 1. Anomalía de la temperatura global hasta 2023.
Fuente: Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2024.

1.5.2. Definición y Características Eventos ENOS.

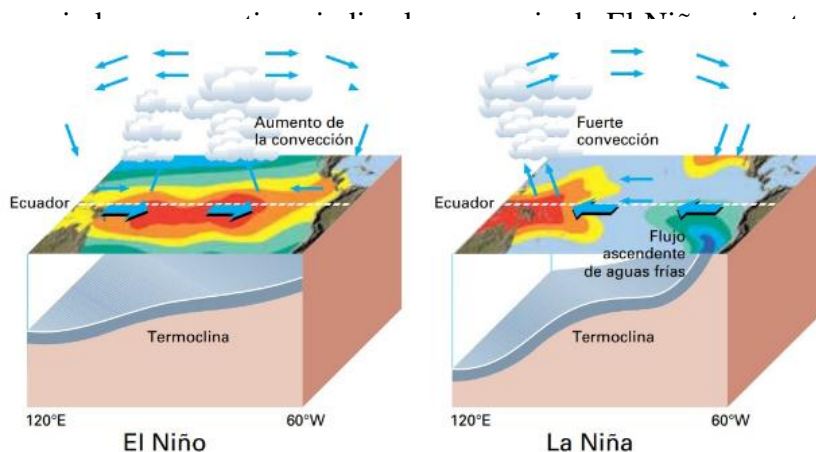
El fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es una interacción compleja entre el océano y la atmósfera en el Pacífico ecuatorial, que se manifiesta mediante fluctuaciones en la TSM y en los patrones de circulación atmosférica. Este fenómeno tiene una variabilidad interanual, con eventos que ocurren aproximadamente cada 2 a 7 años y pueden durar de 9 a 12 meses (McPhaden, M.J. et al.,2006).

ENOS comprende dos fases principales (Figura 2):

- El Niño (fase cálida): Caracterizada por un calentamiento anómalo de las aguas del Pacífico central y oriental, debilitamiento de los vientos alisios, profundización de la termoclina y alteraciones en los patrones de precipitación.
- La Niña (fase fría): Caracterizada por un enfriamiento anómalo de las aguas del Pacífico central y oriental, fortalecimiento de los vientos alisios, elevación de la termoclina y cambios en la distribución de las lluvias.

Para monitorear y clasificar estos eventos, se utiliza el Índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés), que calcula la anomalía promedio móvil de tres meses de la TSM en la región Niño 3.4 (5°N–5°S, 120°–170°W). Un valor del ONI igual o superior a +0.5 °C durante cinco

igual o inferior
(s.f.)



Climate.gov.

Figura 2. Esquema de la fase El Niño y La Niña
Fuente: NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL)

1.6. Uso de datos satelitales en investigación pesquera.

Según FAO (2021) cada vez más el uso de datos satelitales se ha convertido en una herramienta en la pesquería de suma importancia, ya que proporciona información crucial para la toma de decisiones, el monitoreo de las actividades pesqueras, la gestión sostenible de los recursos marinos y disminuir la pesca ilegal.

El uso de sensores remotos a bordo de satélites facilita el estudio de variables ambientales fundamentales como la TSM y la concentración de clorofila-a, ambas directamente vinculadas a la distribución y productividad de especies pelágicas como la macarela (*Scomber japonicus*). En este estudio se integrarán como herramientas principales el sensor remoto Aqua Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) con cobertura global, el Sistema de Información Geográfica QGIS (software gratuito y de código abierto), SeaDas (software especializado en el procesamiento, análisis y visualización de datos de sensores satelitales oceanográficos) y el software MaxEnt (Maximum Entropy) ampliamente utilizado para modelar la distribución geográfica potencial de especies.

1.7. Temperatura Superficial del Mar

La Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico oriental ecuatorial presenta una alta variabilidad estacional e interanual, fuertemente influenciada por la interacción de sistemas de corrientes marinas y patrones atmosféricos como la circulación de Walker. En condiciones normales, el litoral ecuatoriano se ve afectado por el afloramiento costero impulsado por los vientos alisios, lo que genera TSM relativamente más frías y una alta disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica (Fiedler & Talley, 2006; Ormaza-González, 2016).

Durante eventos de El Niño, este equilibrio se altera: La TSM se elevan por encima de los promedios climatológicos, generando impactos ecológicos negativos como el desplazamiento de especies (Chávez et al., 2008; Pauly & Tsukayama, 1987). Por el contrario, La Niña reduce la TSM y promoviendo condiciones más productivas.

Esta dinámica térmica tiene una repercusión directa sobre especies como la macarela (*Scomber japonicus*), un pez pelágico de hábitos costeros-neríticos cuya temperatura óptima de hábitat se encuentra entre los 20 °C y 26 °C, aunque su rango tolerable puede extenderse

hasta los 29 °C, dependiendo del estado fisiológico y la fase del ciclo de vida (Binohlan, 2019; FAO, 2021).

Diversos estudios señalan que temperaturas por encima de los 27–28 °C durante periodos prolongados pueden afectar negativamente su reproducción, disminuyendo el éxito del desove, la viabilidad de los huevos y la supervivencia larval. Además, cambios abruptos en la temperatura del mar suelen provocar desplazamientos hacia aguas más profundas o latitudes más altas, lo que altera la distribución tradicional del stock y complica su explotación por parte de las flotas industriales y artesanales (Alexander et al., 2018).

1.8. Clorofila

La clorofila, que es la medida de los pigmentos verdes y de la biomasa del fitoplancton a través de su fotosíntesis, suele ser un indicador de Productividad Primaria. Además, es el principal recurso nutricional directo o indirecto para todos los organismos marinos y pesqueros. La evaluación de la clorofila es uno de los indicadores de seguimiento de la salud de un sistema natural, y es empleada por los científicos y técnicos en todos los entornos acuáticos (Kirk, 1994); EPA, (2001).

Según la clasificación determinada por Tapia (2006) la Escala de Clorofila a, establece la productividad primaria de la siguiente manera:

< 0.20 mg/m³ Clorofila = Aguas de baja productividad;

0.20 – 0.50 mg/m³ Clorofila = Aguas ligeramente productivas;

> 0.50 mg/m³ Clorofila = Aguas productivas.

Además, recalca que durante el evento El Niño 2015–2016, se observaron valores bajos de clorofila-a en la mayoría de las estaciones estudiadas, con rangos que variaron de 0.02 a 0.09 mg/m³, lo que indica una fuerte inhibición del afloramiento y baja disponibilidad de nutrientes como fosfatos y silicatos. Esta disminución fue resultado de la presencia de anomalías térmicas positivas superiores a +2.4 °C.

En cambio, en el año 2016, ya bajo condiciones más similares a una fase fría (comienzo de La Niña), se registró una vez más un incremento en los niveles de clorofila-a, alcanzando valores superficiales de hasta 2.01 mg/m³ en la sección 82oW, y subsuperficiales de hasta 2.96 mg/m³ en la sección 86oW. Estas concentraciones fueron vinculadas a la reactivación del Frente Ecuatorial, particularmente en áreas con brotes localizados a 1°S - 2°S,

corroborando la importancia crucial de las condiciones de temperatura y circulación en la productividad primaria de la región.

1.9. Aspectos biológicos de la Macarela (*Scomber japonicus*)

1.9.1 Clasificación taxonómica

La familia Scombridae incluye especies de gran interés comercial como el atún, el bonito y la caballa. La taxonomía de esta familia ha sido revisada muchas veces y, aún hoy, no existe consenso en cuanto a su conformación. Recientemente, uno de los géneros más estudiados es *Scomber*, el cual suele describirse como compuesto por tres especies, a continuación, se presenta la clasificación de la especie en objeto (Figura 3):

- Kingdom: Animalia
- Phylum: Chordata
- Subphylum: Vertebrata
- Infraphylum: Gnathostomata
- Parvphylum: Osteichthyes
- Gigaclass: Actinopterygii
- Superclass: Actinopteri
- Class: Teleostei
- Order: Scombriformes
- Family: Scombridae
- Subfamily: Scombrinae
- Genus: *Scomber*.
- Species: *Scomber japonicus*



Figura 3. Macarela (*Scomber japonicus*)

Fuente: ken-ichi (2012), *Scomber japonicus*. iNaturalist. CC BY-NC 4.0.
<https://www.inaturalist.org/photos/188918>

1.9.2. Morfología

La especie *Scomber japonicus* (Houttuyn, 1782) presenta un cuerpo alargado, redondeado e hidrodinámico; párpado graso que cubre prácticamente todo el ojo; dientes frontales y laterales del paladar; dos aletas dorsales con IX-X espinas, la separación entre las dos dorsales es inferior al largo de la base de la primera aleta dorsal; 5 aletillas tras la segunda aleta dorsal y la aleta anal; aletas pectorales altas en el costado; aleta caudal fuertemente bifurcada; dos quillas pequeñas en cada costado de la base delgada de la cola; línea lateral sencilla; el cuerpo entero está cubierto con escamas cicloideas pequeñas.

Además, puede alcanzar un tamaño de 64 cm, teniendo un peso de hasta 2.9 Kg.; así mismo, el hábitat de esta especie es solo marino epipelágico, costero; vive en cardúmenes y realiza migraciones extensas hacia regiones templadas, se localiza desde 0 y 300 metros de profundidad.

1.9.3. Distribución

Es una especie cosmopolita distribuido en las aguas cálidas y templadas en los océanos Atlántico, Indico y Pacífico, así como en los mares circundantes (Figura 4). Según la distribución latitudinal, la pelágica costera predominante se extiende en el Pacífico noreste desde el sudeste de Alaska hasta la bahía de Banderas (México), y en el golfo de California

hasta Puerto Peñasco; en Pacífico sureste se extiende desde Panamá hasta la bahía de Darwin (Chile), incluyendo las islas Galápagos; desde Costa Rica hasta Valparaíso – Chile.

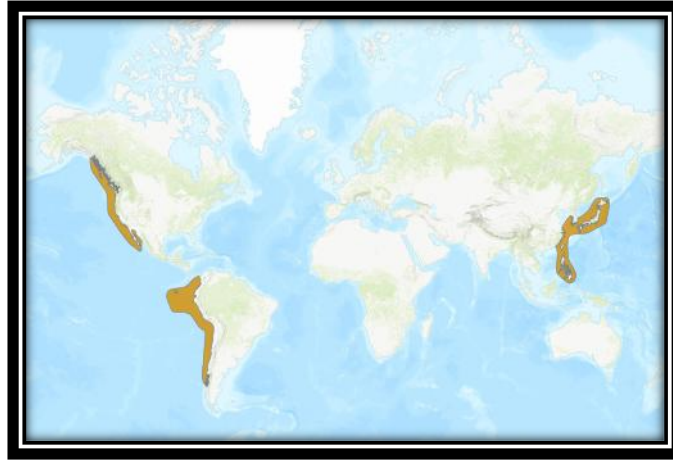


Figura 4. Distribución de la Macarela a nivel global

Fuente: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) 2023.

Así mismo, la distribución batimétrica en años normales se da entre 0 y 100 m, las mayores concentraciones se encuentran a los 60 m, sin embargo, se los haya desde la superficie hasta 300 m de profundidad.

Las migraciones son estacionales, principalmente para frezar, invernar y alimentarse. Efectúan migraciones estacionales bastante extensa, desplazándose en dirección norte durante los meses de diciembre hasta marzo de cada año, y hacia el sur en los meses de junio hasta septiembre (para el desove).

1.9.4. Reproducción

Como estrategia reproductiva es una especie heterossexual sin dimorfismo sexual visible, reproducción ovípara con fertilización de tipo externa, además tiene desoves sucesivos (múltiples); presenta desoves parciales teniendo un periodo de desove con mayor intensidad desde noviembre a marzo, área cercas al ecuador el desove se realiza todo el año presentando una talla media de madurez sexual de 25.3 cm de longitud furcal y los huevos y larvas son pelágicos y forman parte del plancton transportados por las corrientes marinas (Collette, B. B., & Nauen, C. E. ,1983).

1.9.5. Alimentación

La dieta de la especie consiste en ingerir fitoplancton: Diatomeas, Zooplancton: Copépodos, eufásidos, huevos y larvas de peces. Su dieta también se basa en la especie *Engraulis ringens* y especies de la familia Myctophidae y pequeños calamares. Se caracteriza por ser depredador oportunista, no selectivo y la dieta de los adultos incluye todo tipo de crustáceos, peces y cefalópodos (FishBase. 2024).

1.9.6. Importancia pesquera

El destino de producción de la Macarela en la parte industrial de pequeños pelágicos de Ecuador se destina para la producción de harina y en menor proporción para el consumo humano. Forma parte de los recursos más capturados después del atún en algunas regiones del Pacífico Ecuatorial. Cabe destacar, que existe algunas preocupaciones locales sobre la sobrepesca, pero no hay evidencias de disminuciones significativas a nivel global (Collette, B.B. 2011). Por consiguiente, el estado de conservación se encuentra en “Preocupación Menor” de acuerdo a la última evaluación para la Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN en 2022.

CAPÍTULO 2

2. Materiales y métodos

Este estudio adopta una perspectiva cuantitativa y descriptiva, basada en el estudio espacial y temporal de las variables ambientales, en relación con los patrones de distribución de las capturas de la especie *Scomber japonicus* en las costas ecuatorianas.

2.1. Área de estudio

La superficie de la plataforma continental de Ecuador oscila entre 0 y 200 metros de profundidad, constituyendo aproximadamente el 10% de la superficie nacional (Jimenez & bearez, 2004). En esta zona, el Océano Pacífico ofrece un espacio de transición entre aguas tropicales y subtropicales, siendo el hogar para numerosas especies de peces pelágicos (Aguilar, 1993)

Es conocido que el hábitat es indispensable para la supervivencia de al menos una etapa de vida de los peces (Langton, Steneck, Gotceitas, Juanes, & Lawton, 1996) y siendo esta pesquería una de las de mayor importancia socioeconómica en el país (Jurado & Romero, 2011), si el hábitat se ve alterado, podría afectar no solo la supervivencia de las especies, sino también la economía del Ecuador.

El área de trabajo de esta investigación se sitúa en todo el perfil costero del Ecuador (Figura 5) , comprendido entre los límites marítimo con Colombia (coordenada 1°28'10.49" N y 78°52'07.27" O) y Perú (coordenada 03°23'31.65" S y 81°09'12.53" O) proyectado en el sistema WGS 84, sitio que ejerce las embarcaciones pesqueras industriales para la captura pelágicos pequeños.

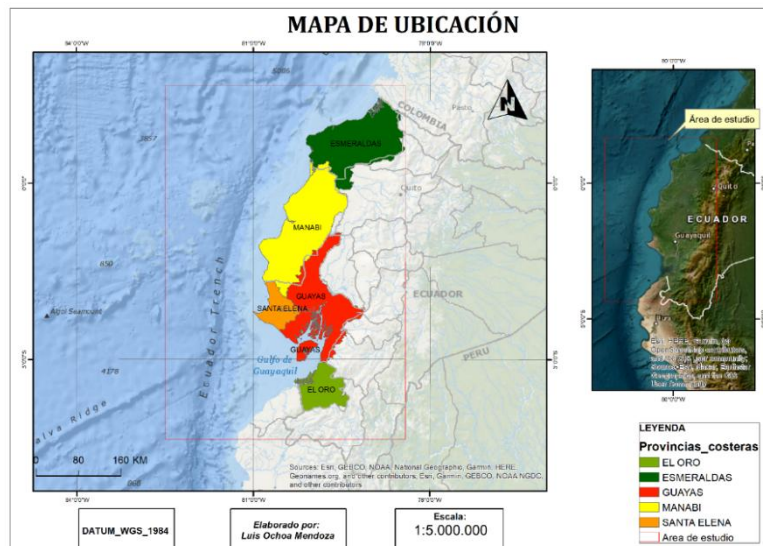


Figura 5. Perfil costero del Ecuador (área de estudio).

Fuente: Elaboración propia

Según establece Padilla, N. A. (2017) reviste importancia estas aguas del lado del pacífico por la presencia de la Corriente de Humboldt o Corriente de Perú que fluye en dirección norte y se genera por los vientos que soplan paralelos a la costa y arrastran el agua caliente de la superficie generando el ascenso del agua fría, por este motivo, la temperatura del agua es entre 5 y 10 °C más fría de lo que debería ser, inclusive en las proximidades de Ecuador. Siendo el agua fría la que transporta grandes cantidades de nutrientes y fauna, por lo que permite el desarrollo de la pesca y se transforma en una zona económicamente explotada especialmente de la especie *Scomber japonicus* (Espino, M., & Yamashiro, C., 2012), experimenta variaciones climáticas interanuales, cuyo máximo exponente son los fenómenos de El Niño y La Niña (Riofrío & Chavarría, 2004)

2.2. Datos biológicos pesqueros

El Instituto Público de Investigación de Acuicultura y Pesca realiza desde 1981 a través del “Programa de Peces Pelágicos Pequeños” el seguimiento mensual de la flota cerquera-costera, con el objetivo de obtener datos biológicos y pesqueros derivados de esta actividad, con el propósito de establecer la tendencia de la pesquería y su impacto en los recursos obtenidos. Además, desde mayo de 2015, se instaura el Programa de Observadores en la Pesquería de Peces Pelágicos con el objetivo de recopilar información en el lugar de los recursos capturados por dicha pesquería, expandiendo así su alcance espacial.

Los datos pesqueros a ser utilizados y que son la base fundamental del presente estudio fueron obtenidos a través de la observación de las faenas de pesca in situ realizada por el personal de observadores a bordo que monitorean 22 días continuos en fase de luna nueva denominada “oscura”, teniendo una paralización de 7 días durante la fase denominada “clara”. Tal información es registrada en bitácoras de pesca, basados en datos que provengan de una muestra con niveles de confianza estadísticamente representativos y que cumplan con la cobertura del 30% de la flota activa, tal como se dispone en el acuerdo ministerial 0056-A del 8 de mayo de 2020. Al inicio del monitoreo, específicamente de la especie en este estudio, se obtiene un peso de muestra mínimo de 30 kilos en este caso de la Macarela, tomando medidas de tallas furcal a bordo. Posterior, se obtiene una submuestra de 20 individuos por cada talla tomando los siguientes datos:

Longitud al mm exacto (longitud furcal)

Peso del pez entero con vísceras (gramos)

Peso eviscerado (gramos)

Peso de la gónada (gramos)

Peso del hígado (gramos)

Determinación de sexo (macho y hembra)

Determinación del estadio de madurez gonadal, según los cinco estadios descritos por Arriaga & Coello (1985), lo cual está fijado en los siguientes estados: I Sexualmente inmaduros / II Madurez virginal / recuperación III Sexualmente maduros / IV Próximos a Desovar / V Desovados

Adicionalmente, se toma observaciones de la faena de pesca:

- Coordenadas geográficas de inicio y fin del lance de pesca
- Profundidad del cardumen de la pesca
- Zonas pesqueras
- Temperatura, entre otros parámetros.

2.3. Datos de captura

Para el desarrollo del presente estudio, se utilizarán los registros de captura (Figura 6) de *Scomber japonicus* procedentes de la flota industrial recopilados en cada lance de pesca por los observadores pesqueros del Programa de Peces Pelágicos Pequeños, perteneciente a la

Subsecretaría de Recursos Pesqueros del Ecuador. Estos datos abarcan el período 2020–2023 y comprenden información del volumen aproximado capturado (en toneladas).

El procesamiento de estos datos permitirá identificar patrones temporales y espaciales en la distribución del recurso, especialmente respecto al ciclo con presencia de macarela en el perfil costero ecuatoriano, con el fin de analizar si la presencia del recurso presenta alguna tendencia recurrente vinculada a la dinámica ambiental.

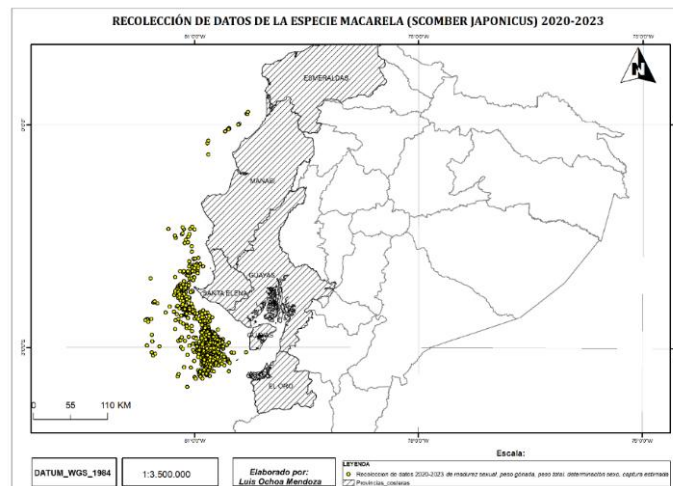


Figura 6. Datos de captura de la Macarela generados desde el 2020 – 2023
Fuente: Elaboración propia

2.4. Procesamiento datos satelitales

Como parte del análisis de variables ambientales, se procedió a la descarga y procesamiento de imágenes satelitales correspondientes a productos derivados del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite Aqua, operado por la NASA. El acceso a estos datos se realizó a través del portal de servicios Earthdata, en el marco del programa de Ocean Biology Processing Group (OBPG), el cual brinda soporte técnico para la recolección, validación y estandarización de productos biofísicos del océano, importante mencionar que a través de imágenes satelitales en algunas ocasiones presenta problemas debido a la interferencia de la nubosidad.

Se seleccionaron productos en formato estándar (standard product level 3), específicamente aquellos relacionados con:

- Concentración de clorofila-a (mg/m^3)

- Temperatura Superficial del Mar (°C)

Los productos se descargaron en una resolución espacial de 4 km y en formato PNG con proyección MERCATOR, a una escala mensual, cubriendo el lapso desde 2020 hasta 2023. Esta resolución facilita la identificación correcta de los patrones mesoescalares de productividad y temperatura en el perfil costero de Ecuador, sin poner en riesgo la cobertura espacial.

Adicionalmente, se delimitaron las regiones de interés mediante la selección de coordenadas geográficas específicas que comprenden el litoral norte y sur del Ecuador, incluyendo áreas cercanas al Golfo de Guayaquil donde existe zonas de mayor esfuerzo pesquero de la flota cerquera industrial.

2.5. Validación de datos

Tras la descarga de los productos satelitales provenientes del sensor MODIS–Aqua, se procedió a su procesamiento utilizando herramientas de software libre especializadas en teledetección y análisis geoespacial, principalmente:

- SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System) – desarrollado por la NASA para el procesamiento de datos oceanográficos multiespectrales.
- QGIS (Quantum GIS) – plataforma SIG de código abierto que permite integrar, visualizar y analizar datos georreferenciados.

Ambos entornos fueron utilizados de forma complementaria para extraer, transformar, visualizar variables ambientales clave como la concentración de clorofila-a (mg/m^3) y la TSM.

Con respecto a los modelos predictivos bajo escenarios climáticos IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) fueron estimados respecto al sexto informe de evaluación (AR6), donde el propósito es simular diferentes modelos y cómo se redistribuye la Macarela frente a las costas del Ecuador, por lo expuesto fue generado con la aplicación MaxEnt (basado en máxima entropía) para la especie.

2.6. Análisis estadístico

El análisis estadístico descriptivo de los datos referente a la TSM se realizó mediante el uso del software Minitab, aplicando pruebas de normalidad (Anderson-Darling) y correlación de Pearson para evaluar la relación entre la TSM y las capturas de la Macarela. Dando un tamaño muestral de 8 observaciones (Captura y TSM).

CAPÍTULO 3

3. Resultados y Discusión

3.1. Productividad de la Macarela – KDE

Con el objetivo de determinar las áreas de mayor productividad de *Scomber japonicus* en el perfil costero ecuatoriano durante el período 2020–2023, se implementó la herramienta no paramétrica de estimación de densidad de Kernel (Kernel Density Estimation, KDE) sobre los registros de captura georreferenciada expresado en tonelaje, lo cual facilita la identificación de zonas con mayor intensidad pesquera en función del volumen capturado y su distribución espacial, creando una superficie de densidad continua a partir de un conjunto de puntos de captura.

Este enfoque es relevante cuyo comportamiento gregario que presenta la especie depende de condiciones específicas; la implementación se realizó mediante el software QGIS.

3.1.1. Ciclos climatológicos en Ecuador (Región Litoral / Costera).

De modo similar en el contexto climático del Ecuador especialmente en la región costera, predomina dos estaciones climáticas principales claramente definida por variaciones de temperatura e interacciones de corrientes oceánicas (CIIFEN, 2021).

Bajo lo indicado se ha caracterizado la muestra de resultados en dos presentaciones:

-Primer ciclo: Estación húmeda/lluviosa comprendida desde los meses de diciembre a mayo de cada año de estudio. Existe reducción del afloramiento costero con valores promedios de 26 – 28 °C.

-Segundo ciclo: Estación seca comprendida desde los meses de junio a noviembre de cada año de estudio. Existe incremento de la productividad primaria con valores promedios de 20 – 24 °C.

3.1.2. Análisis de Ciclos de Productividad

En el primer ciclo correspondiente al periodo 2020 (Figura 7) representa visualmente la mayor densidad (núcleo de concentración) de biomasa de la macarela en el área sur del Ecuador específicamente frente al Golfo de Guayaquil, por el contrario, mostrando menor densidad frente Puntilla de Santa Elena.

Se identifica desplazamientos en la localización de las áreas del núcleo de densidad.

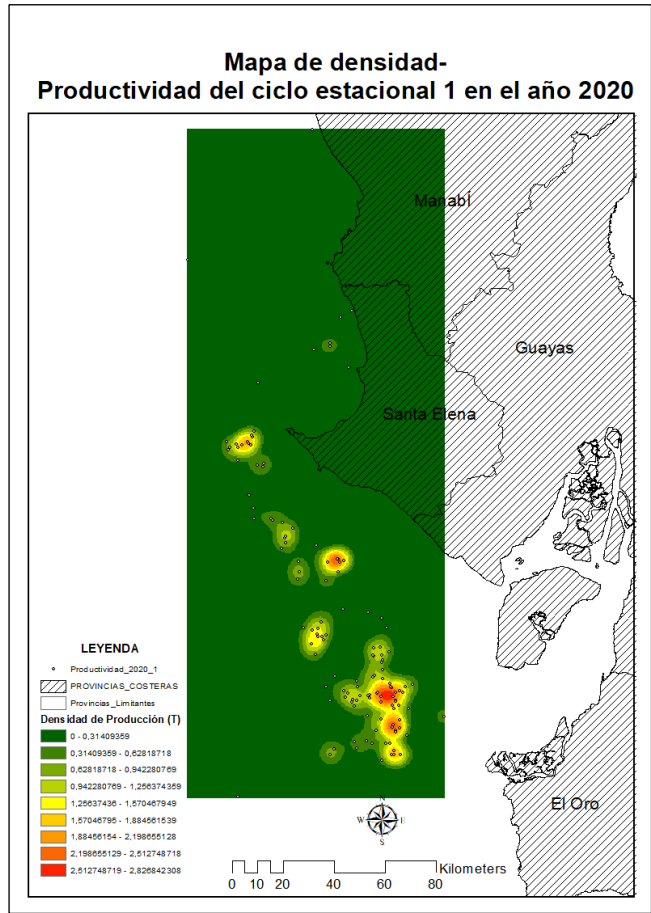


Figura 7. Primer ciclo productividad pesquera, periodo 2020, elaborado mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS.

Fuente: Elaboración propia

En el segundo ciclo correspondiente al periodo 2020 (Figura 8) representa visualmente la mayor densidad (núcleo de concentración) de biomasa de la macarela en el área sur del Ecuador específicamente frente al Golfo de Guayaquil (sectorización definida), por el contrario, mostrando menor densidad frente Puntilla de Santa Elena. La actividad se ejecutó con un comportamiento más oceánico.

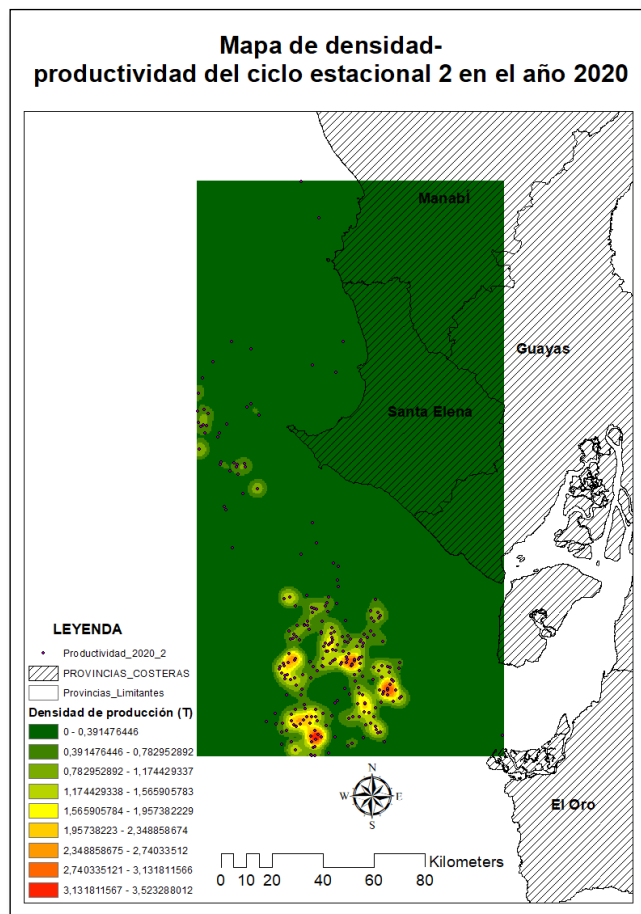


Figura 8. Segundo ciclo productividad pesquera, periodo 2020, elaborado mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS.

Fuente: Elaboración propia

En el primer ciclo correspondiente al periodo 2021 (Figura 9) representa visualmente la mayor densidad (núcleo de concentración) de biomasa de la macarela en el área sur del Ecuador específicamente frente al Golfo de Guayaquil, por el contrario, mostrando menor densidad, pero con capturas muy dispersas frente de la Provincia de Santa Elena.

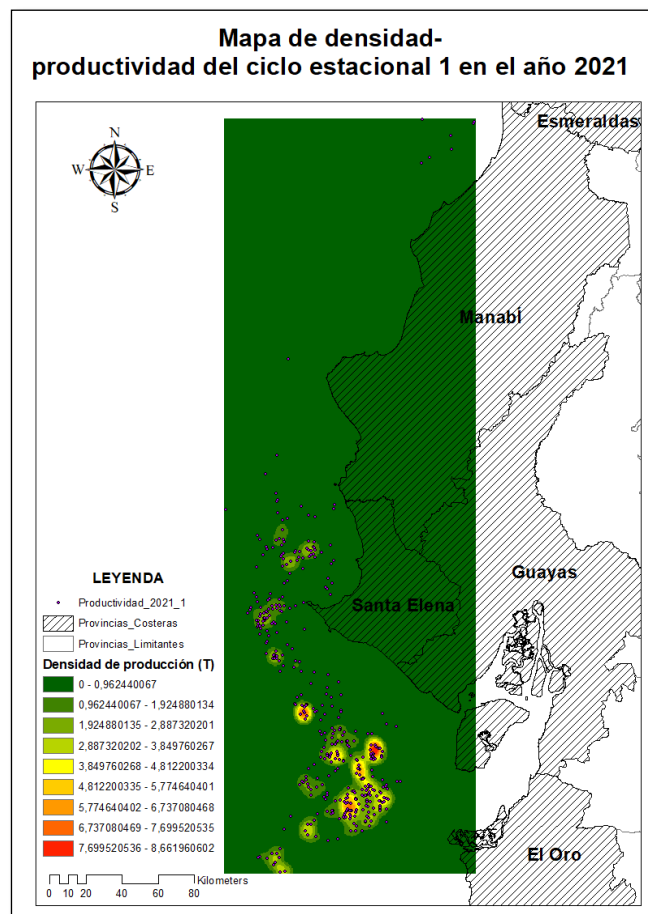


Figura 9. Primer ciclo productividad pesquera, periodo 2021, elaborado mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS.

Fuente: Elaboración propia

En el segundo ciclo correspondiente al periodo 2021 (Figura 10) representa visualmente la mayor densidad (núcleo de concentración) de biomasa de la macarela en el área sur del Ecuador específicamente frente al Golfo de Guayaquil con capturas dispersas y más oceánica, por el contrario, mostrando menor densidad importante frente Puntilla de Santa Elena.

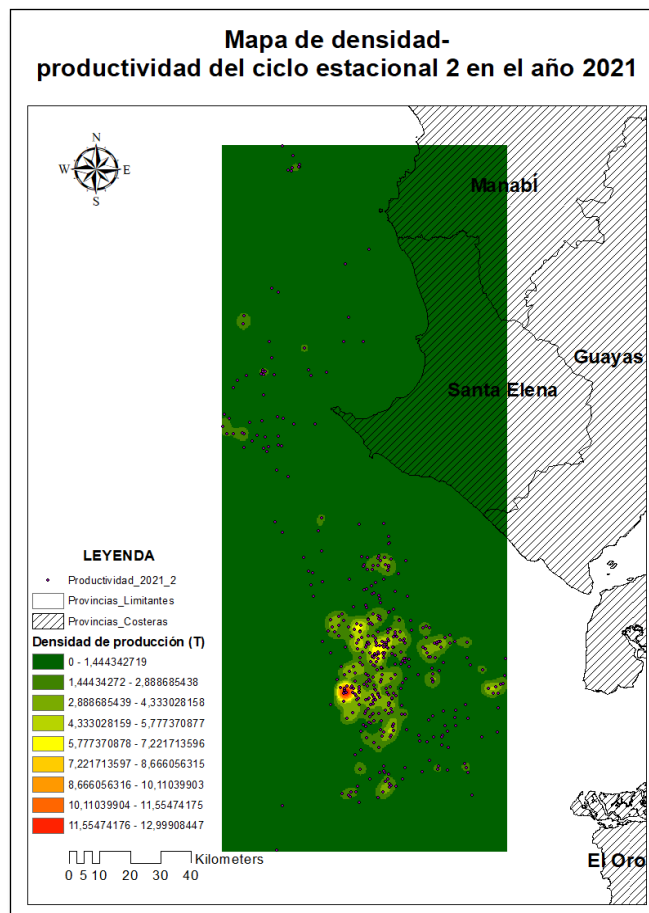


Figura 10. Segundo ciclo productividad pesquera, periodo 2021, elaborado mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS.

Fuente: Elaboración propia

En el primer ciclo correspondiente al periodo 2022 (Figura 11) representa visualmente una distribución homogénea en la densidad (núcleo de concentración) de biomasa de la macarela en el área del Golfo de Guayaquil hasta Puntilla de Santa Elena.

Se identifica desplazamientos en la localización de las áreas del núcleo de densidad.

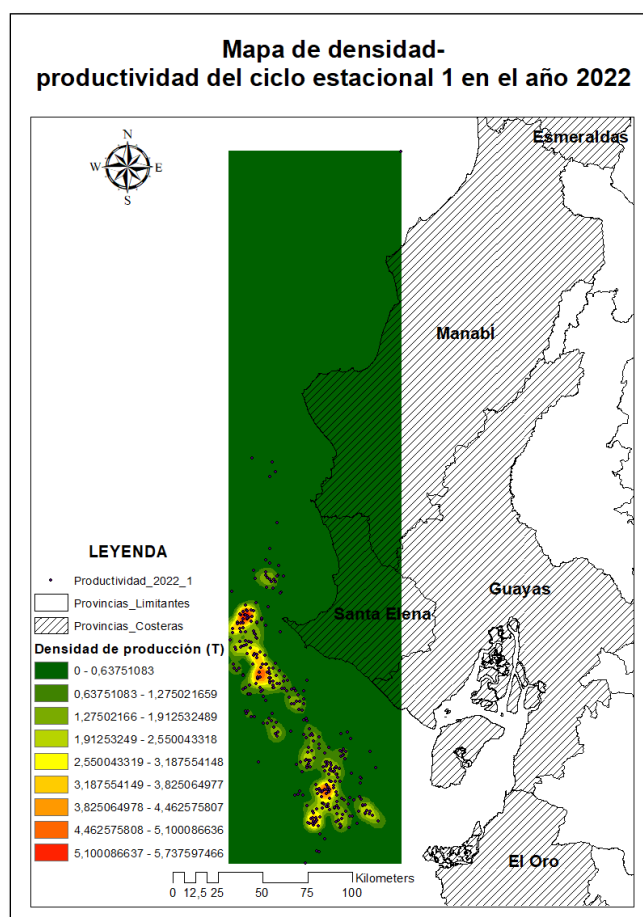


Figura 11. Primer ciclo productividad pesquera, periodo 2022, elaborado mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS.

Fuente: Elaboración propia

En el segundo ciclo correspondiente al periodo 2022 (Figura 12) representa visualmente la mayor densidad (núcleo de concentración) de biomasa de la macarela en el área sur del Ecuador específicamente frente al Golfo de Guayaquil, por el contrario, mostrando menor densidad importante frente Puntilla de Santa Elena. La actividad se ejecutó con un comportamiento más oceánico.

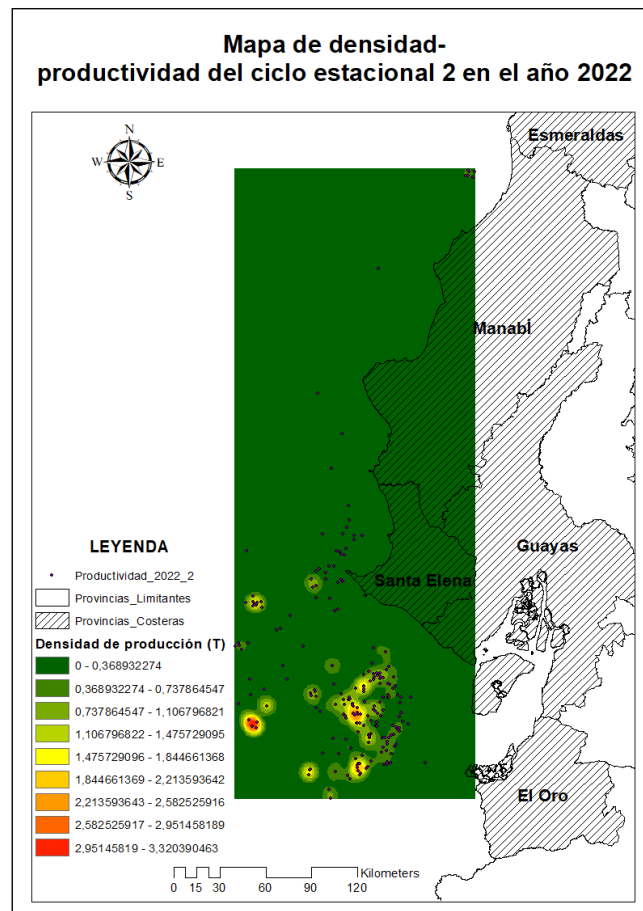


Figura 12. Segundo ciclo productividad pesquera, periodo 2022, elaborado mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS.

Fuente: Elaboración propia

En el primer ciclo correspondiente al periodo 2023 (Figura 13) representa visualmente la mayor densidad (núcleo de concentración) de biomasa de la macarela en el área sur del Ecuador específicamente frente al Golfo de Guayaquil, por el contrario, mostrando menor densidad importante frente Puntilla de Santa Elena. En comparación con los periodos 2021 y 2022 se identifica menor actividad.

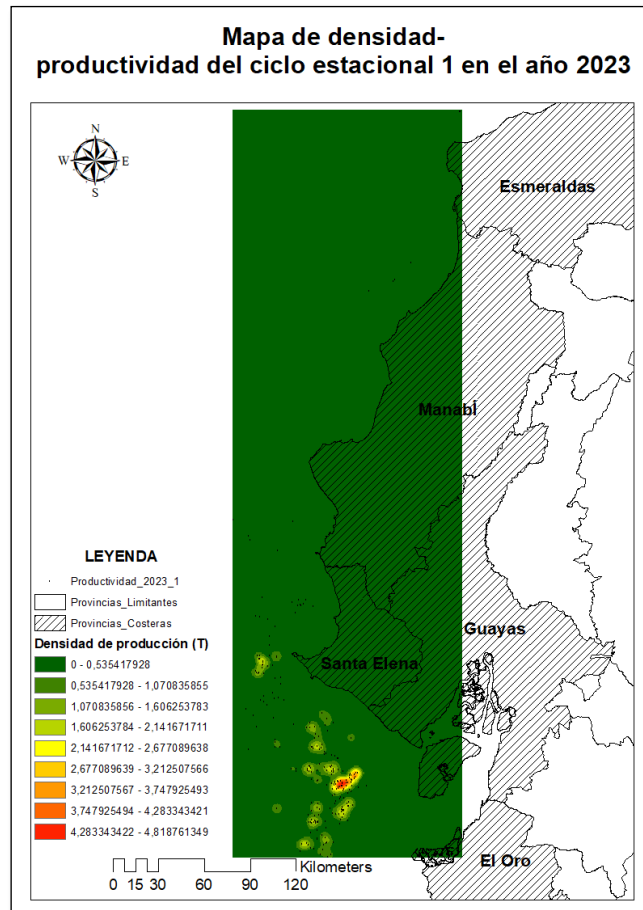


Figura 13. Primer ciclo productividad pesquera, periodo 2023, elaborado mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS.

Fuente: Elaboración propia

En el segundo ciclo correspondiente al periodo 2023 (Figura 14) representa visualmente la mayor densidad de biomasa (núcleo de concentración) de la macarela en el área sur del Ecuador específicamente frente Golfo de Guayaquil, por el contrario, mostrando nula densidad frente Puntilla de Santa. En comparación con los periodos 2021 y 2022 se identifica menor actividad.

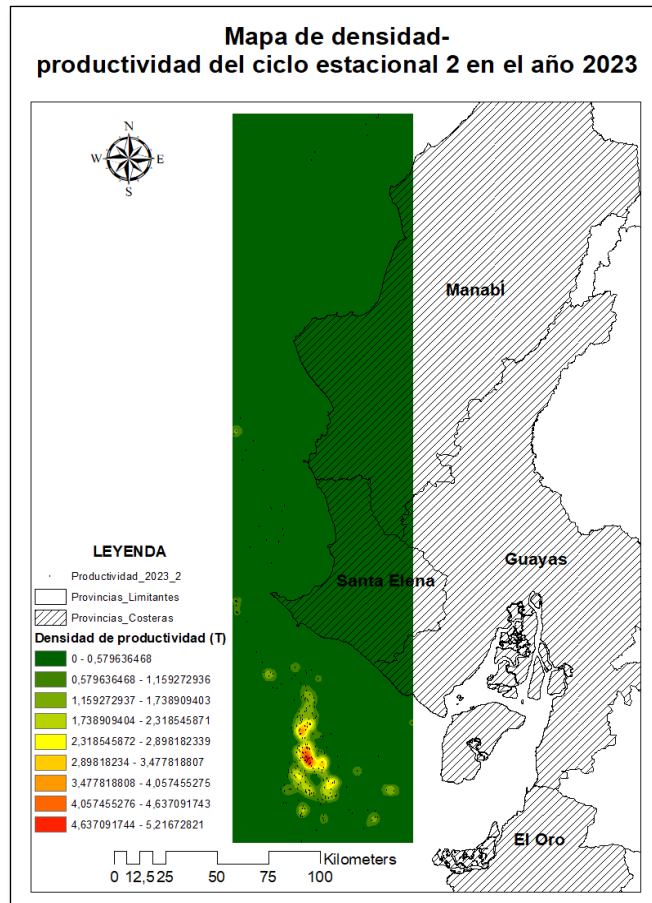


Figura 14. Segundo ciclo productividad pesquera, periodo 2023, elaborado mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS.

Fuente: Elaboración propia

3.2. Influencia de la Temperatura Superficial del Mar y zonas de capturas.

La estrecha relación de la TSM con la pesquería de peces pelágicos pequeños, va enmarcada con la ocurrencia y productividad que se ha presentado en cada ciclo determinado.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a este apartado, reflejados desde la figura 15 hasta la figura 22, en los cuales se detalla el valor promedio de la TSM registrado en cada ciclo a 11 micras (banda térmica en el infrarrojo) a una resolución espacial de 9 km.

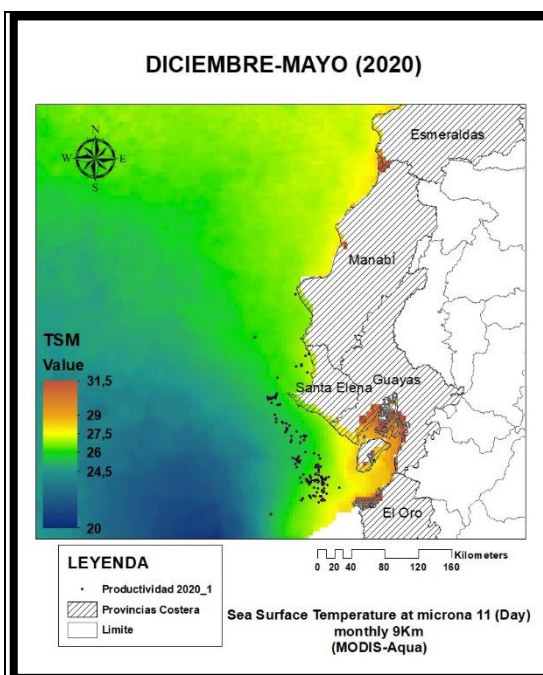


Figura 15. Primer ciclo de TSM (26.5 °C) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2020.

Fuente:
Elaboración propia

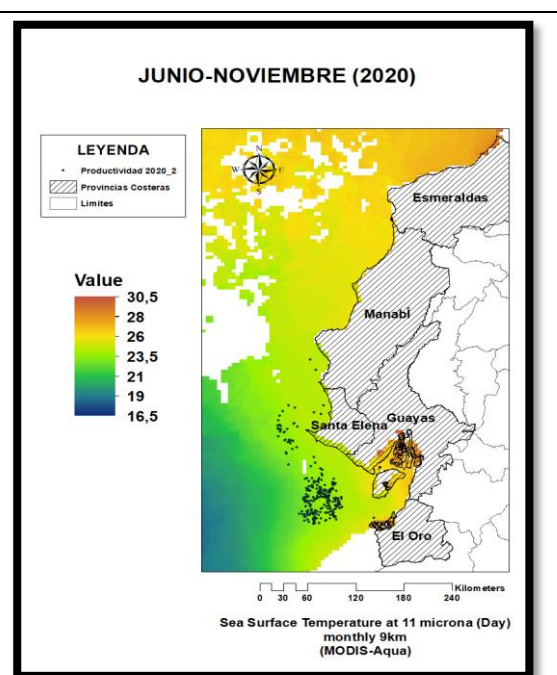


Figura 16. Segundo ciclo de TSM (23.5 °C) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2020.

Fuente:
Elaboración propia

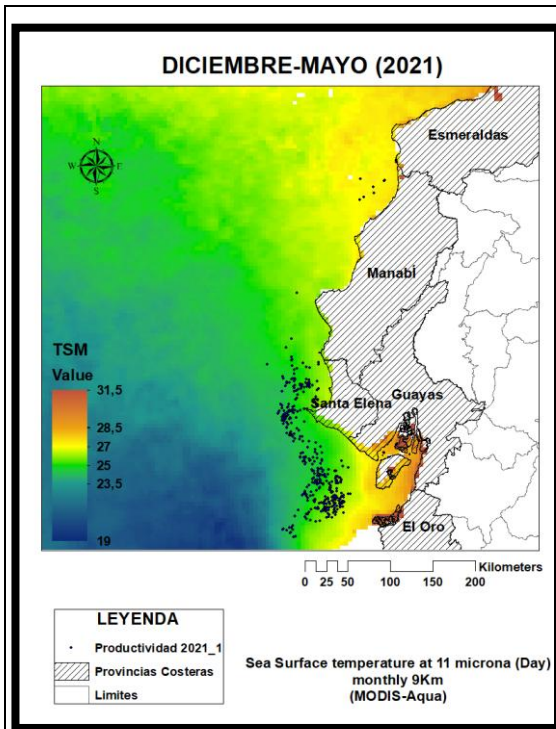


Figura 17. Primer ciclo de TSM (26.03 °C) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2021

Fuente:

Elaboración propia

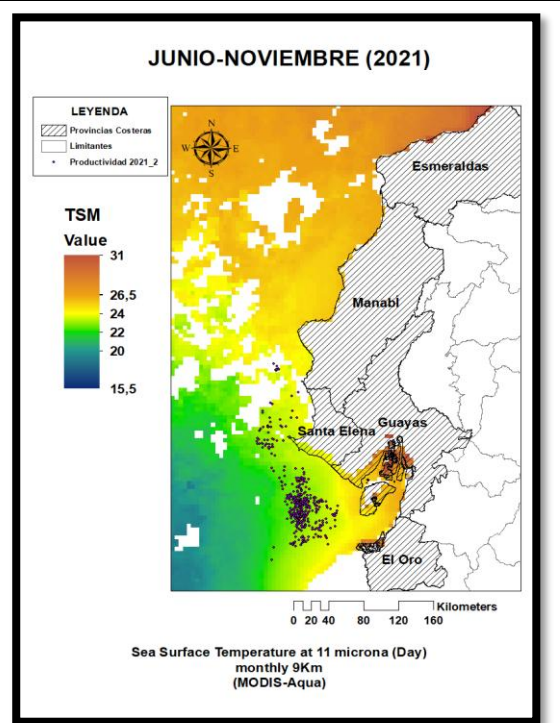


Figura 18. Segundo ciclo de TSM (23.37 °C) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2021

Fuente:

Elaboración propia

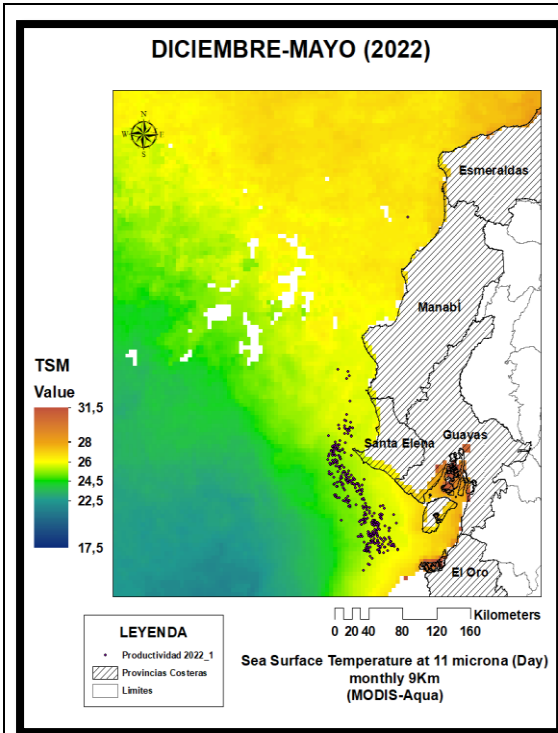


Figura 19. Primer ciclo de TSM (26 °C) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2022

Fuente:
Elaboración propia

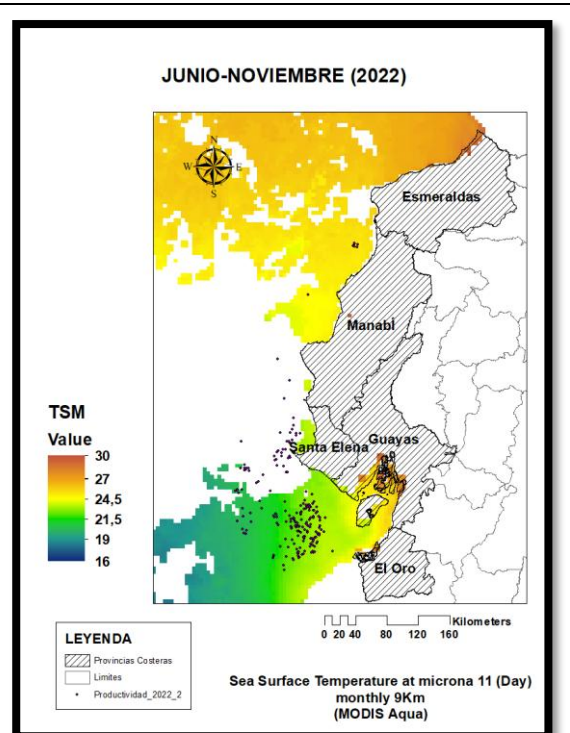


Figura 20. Segundo ciclo de TSM (22.5 °C) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2022

Fuente:
Elaboración propia

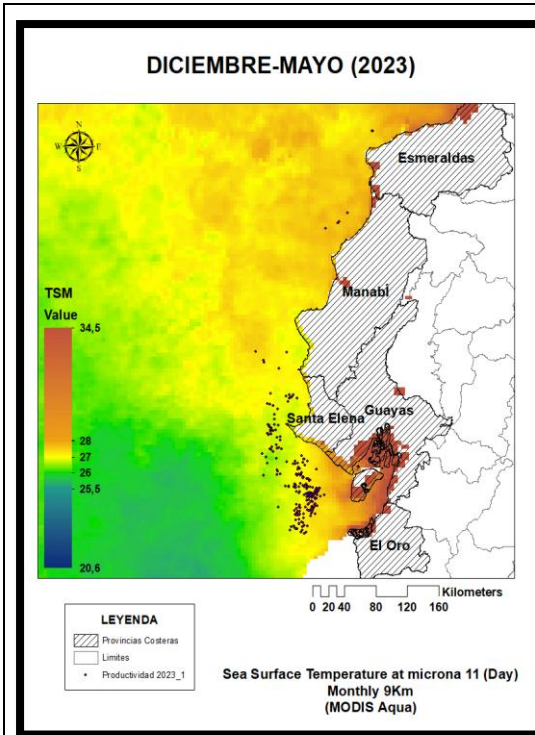


Figura 21. Primer ciclo de TSM (27 °C) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2023

Fuente:

Elaboración propia

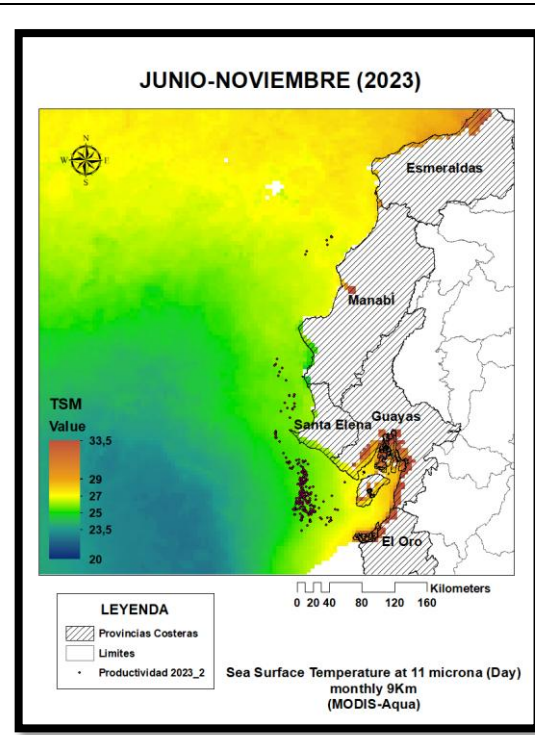


Figura 22. Segundo ciclo de TSM (26.2 °C) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2023

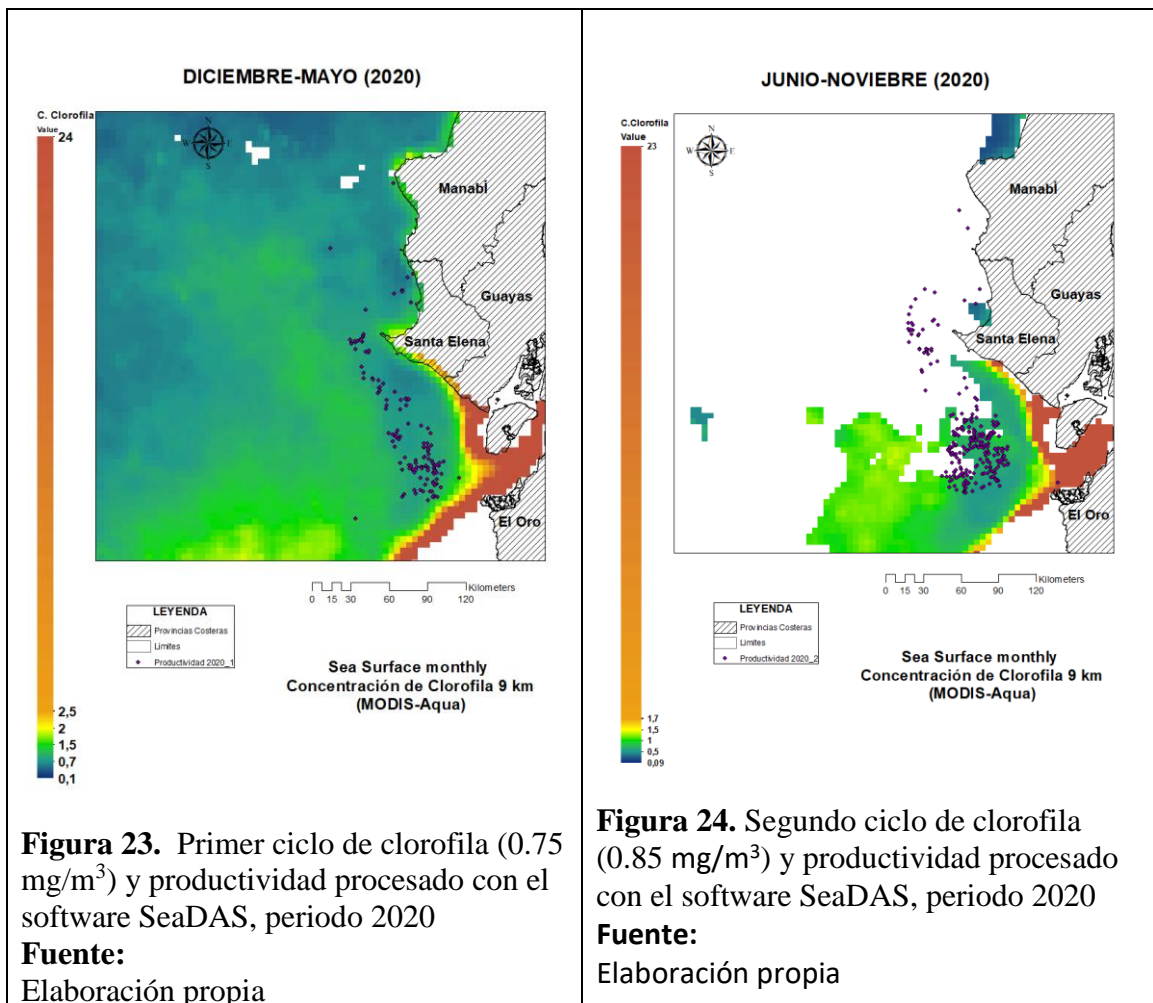
Fuente:

Elaboración propia

3.3. Influencia de la Clorofila-a y zonas de capturas

La concentración de clorofila-a, como indicador de la productividad primaria y su relación con la distribución de peces pelágicos pequeños que se ha determinado en cada ciclo.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a este apartado, reflejados desde la figura 23 hasta la figura 30, en los cuales se detalla el valor promedio de la Clorofila-a, registrado en cada ciclo a una resolución espacial de 9 km.:



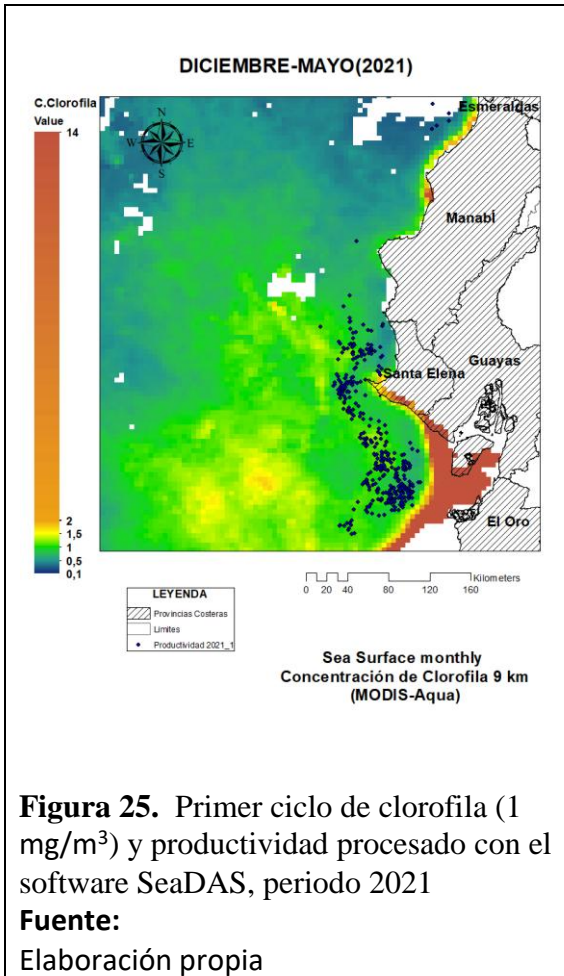


Figura 25. Primer ciclo de clorofila (1 mg/m^3) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2021

Fuente:
Elaboración propia

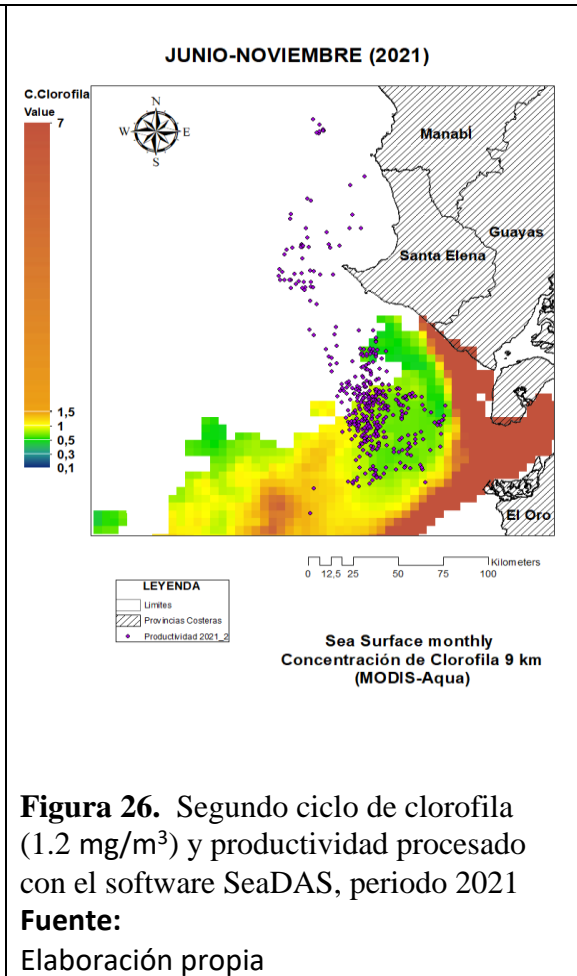


Figura 26. Segundo ciclo de clorofila (1.2 mg/m^3) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2021

Fuente:
Elaboración propia

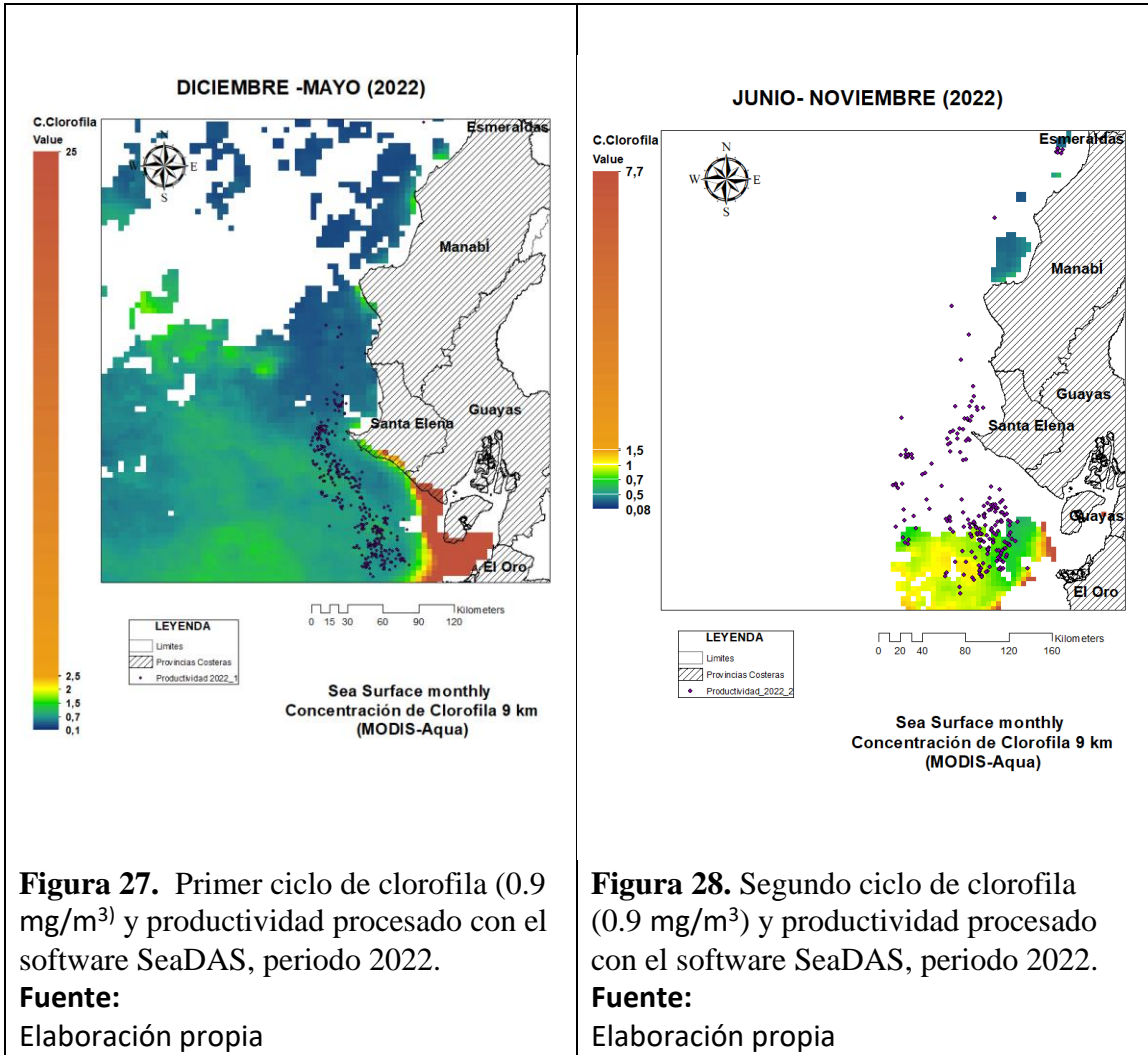


Figura 27. Primer ciclo de clorofila (0.9 mg/m^3) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2022.

Fuente:
Elaboración propia

Figura 28. Segundo ciclo de clorofila (0.9 mg/m^3) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2022.

Fuente:
Elaboración propia

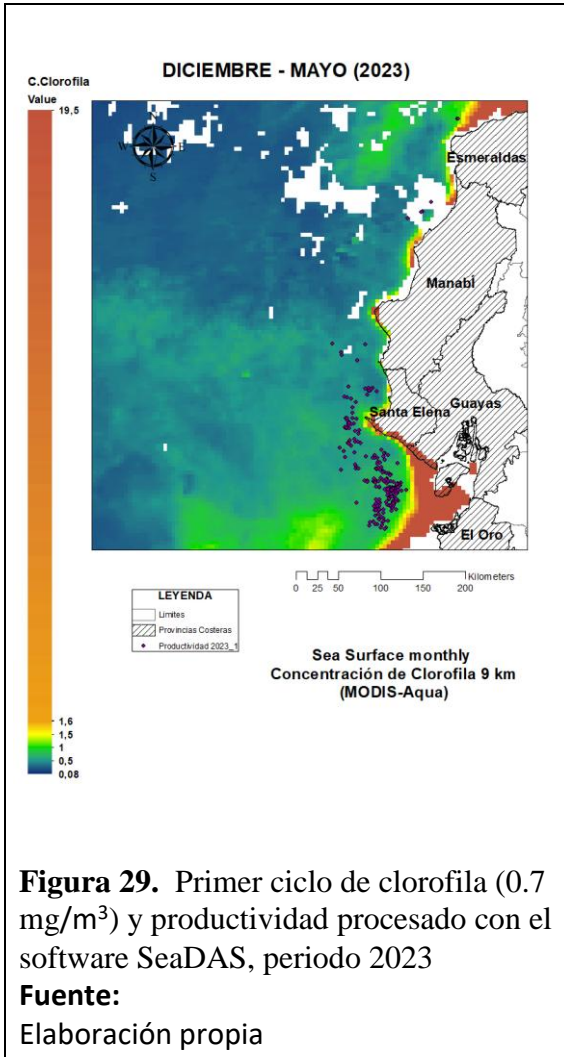


Figura 29. Primer ciclo de clorofila (0.7 mg/m^3) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2023

Fuente:
Elaboración propia

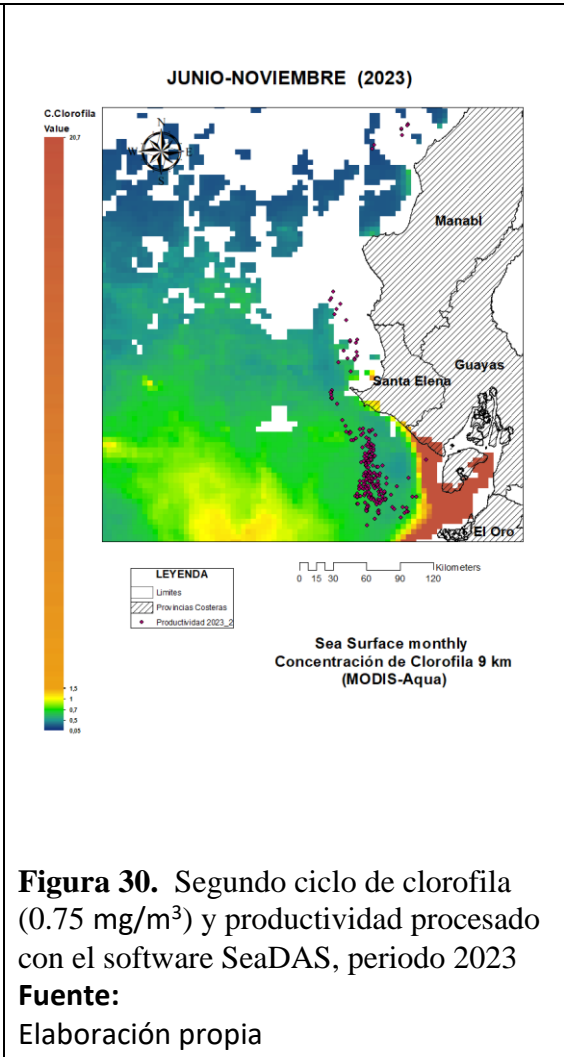


Figura 30. Segundo ciclo de clorofila (0.75 mg/m^3) y productividad procesado con el software SeaDAS, periodo 2023

Fuente:
Elaboración propia

3.4. Análisis de Correlación entre la Temperatura Superficial del Mar y capturas.

La variable "CAPTURA" establecida en la Tabla 1 simboliza la estadística proporcionada en toneladas de pescado por temporada, con un total de 8 observaciones. La captura promedio es de 3996 toneladas, presentando un error estándar de 761 toneladas. La desviación estándar se sitúa en 2151 toneladas, lo que señala una variabilidad significativa en las capturas. Los valores varían entre 1042 toneladas y 7386 toneladas. Los cuartiles señalan que el 25% de los rescates son inferiores a 2196 toneladas (Q1), la mediana es de 3722 toneladas, y el 75% de los rescates son inferiores a 5801 toneladas (Q3). La distribución muestra un leve desequilibrio positivo (0.26), sugiriendo que hay valores atípicos hacia el extremo superior. La curtosis es de -0.97, indicando una distribución más plana que la normal.

Variable	N	N*	Media	SE	D S	Mín	Q1	Mediana	Q3	Máx.	Asimetría	Curtosis
CAPTURA	8	0	3996	761	215 1	104 2	219 6	3722	5801	7386	0.26	-0.97

Tabla 1. Estadística de captura expresada en toneladas.

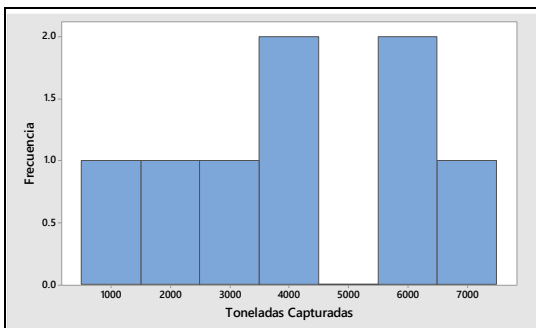


Figura 31. Histograma de toneladas capturadas

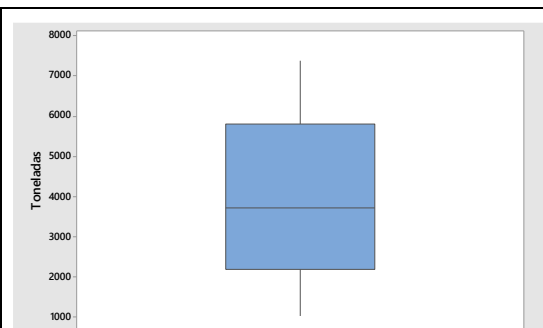


Figura 32. Caja de toneladas capturadas

Estadística sobre la Temperatura Superficial del Mar.

La variable "TEMPERATURA", establecida en la Tabla 2, simboliza la estadística proporcionada de los valores de temperatura respecto al nivel del mar durante la temporada, con un total de 8 observaciones. El promedio de la temperatura es de 25.43 °C, con un error estándar de 0.63 °C. La desviación estándar es de 1.78 °C, lo que señala una variabilidad moderada en la temperatura. Los niveles de temperatura varían entre 22.5 °C mínimo y 27 °C máximo. Los cuartiles muestran que el 25% de las temperaturas se encuentran bajo los 23.72 °C (Q1), la mediana es de 26.26°C, y el 75% de las temperaturas se encuentran bajo los 26.7 °C (Q3)

La distribución presenta una asimetría negativa (-1.04), sugiriendo que hay valores atípicos hacia el extremo inferior. La curtosis es de -0.37, indicando una distribución ligeramente más plana que la normal.

Variable	N	N*	Media	ES	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
TEMP_	8	0	25.430	0.628	1.777	22.5	23.723	26.260	26.735	27
Variable	Asimetría		Curtosis							
TEMP_	-1.04		-0.37							

Tabla 2. Estadística de la Temperatura Superficial del Mar expresada en °C.

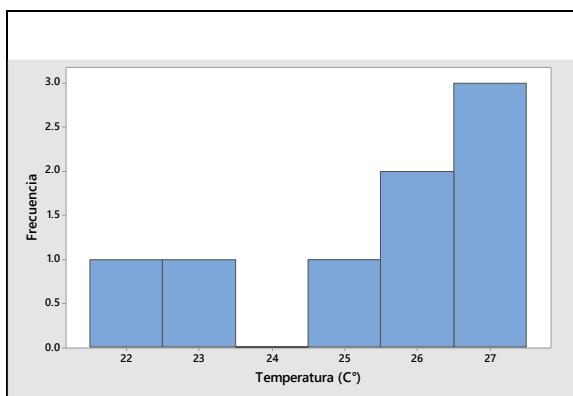


Figura 33. Histograma de Temperatura Superficial del Mar.

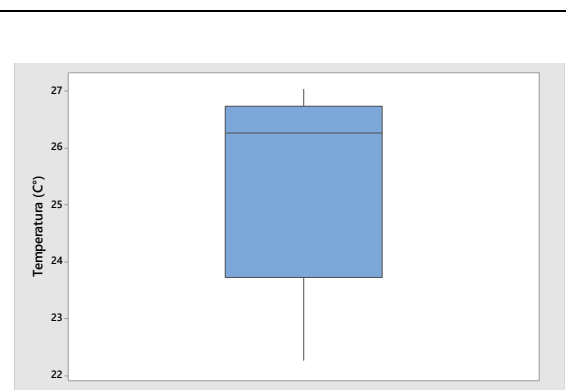


Figura 34. Caja de la Temperatura Superficial del Mar.

Prueba de Normalidad para la Temperatura Superficial del Mar.

Se llevó a cabo el test de normalidad de Anderson-Darling con el objetivo de analizar la ubicación de las temperaturas respecto al nivel del mar. Los hallazgos mostraron un promedio de 25.43 °C y una desviación estándar de 1.77 °C, con una muestra de 8 observaciones. El coeficiente de Anderson-Darling (AD) alcanzó el valor de 0.590, presentando un valor p de 0.082. De acuerdo con las directrices APA7, ya que p supera el nivel de significancia usualmente empleado ($\alpha = 0.05$), no se descarta la hipótesis nula de normalidad. Esto indica que no existen pruebas adecuadas para deducir que las temperaturas no mantienen una distribución normal.

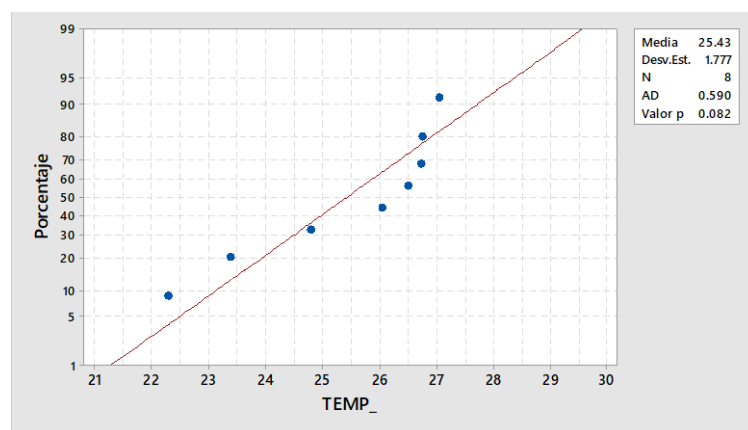


Figura 35. Prueba de Normalidad Anderson Darling para Temperatura.

Prueba de Normalidad para la Captura registrada.

Se aplicó la prueba de normalidad de Anderson-Darling a las toneladas capturadas ($N = 8$), obteniéndose un valor de $AD = 0.219$ y un valor $p = 0.755$. Dado que el valor p es significativamente mayor que el nivel de significancia comúnmente utilizado ($\alpha = 0.05$), no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. En consecuencia, no hay evidencia suficiente para afirmar que las toneladas capturadas no siguen una distribución normal. Estos resultados sugieren que las toneladas capturadas pueden considerarse normalmente distribuidas.

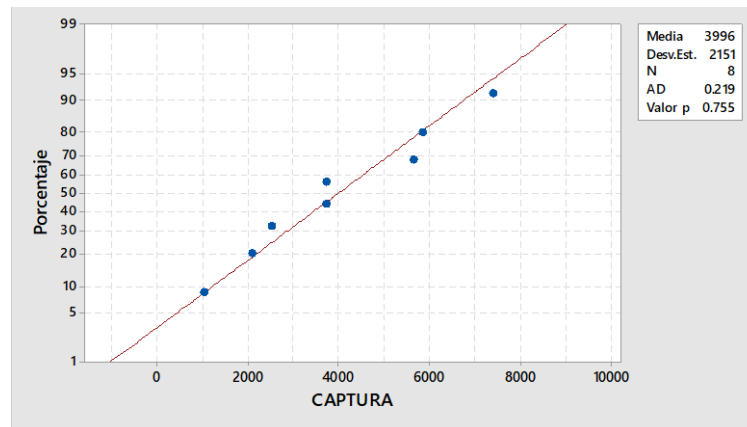


Figura 36. Prueba de Normalidad Anderson Darling para las capturas.

Reporte de Correlación R de Pearson entre la Temperatura Superficial del Mar y las Toneladas Capturadas de Macarela.

Correlaciones

Correlación de Pearson -0.275

Valor p 0.510

Se emplea el test de correlación de Pearson para analizar la correlación lineal entre dos variables continuas. En este escenario, esta prueba es apropiada ya que tanto la variable CAPTURA (toneladas de pescado por temporada) como la variable TEMP_ (temperatura en relación al nivel del mar) se miden en una escala continua. Además, se presupone que la distribución de los datos es normal o cerca de normal, lo que se evaluó anteriormente para TEMP_ a través del test de Anderson-Darling. Ya que la correlación de Pearson se adapta a las relaciones lineales, resulta adecuada para establecer si hay una relación lineal entre las dos variables.

Se realizó una correlación de Pearson para examinar la relación entre las toneladas pescadas por temporada (CAPTURA) y la TSM (TEMP_). Los resultados mostraron una correlación de Pearson de $r = -0.275$, con un valor $p > 0.510$. Según los lineamientos APA7, dado que el valor p es mayor que el nivel de significancia comúnmente utilizado $\alpha = < 0.05$, no se rechaza la hipótesis nula de que no existe una relación lineal significativa entre las variables CAPTURA y TEMP_. Esto sugiere que a pesar de mostrar asociación lineal inversa $r(8) = -0.275$ no hay evidencia suficiente para concluir la asociación entre la captura y la temperatura sea significativa $p > 0.510$.

3.5. Modelos predictivos bajo escenarios climáticos

Con el propósito de anticipar la posible redistribución de la Macarela frente a la costa de Ecuador se proyectó la TSM considerando dos trayectorias de referencia respecto al sexto informe de evaluación IPCC AR6 - 2021:

Escenario Trayectoria de temperatura media

SSP2-4.5: incremento medio global de +2.7 °C (Vía intermedia, esfuerzos moderados)

SSP5-8.5: incremento medio global de +4.4 (Altas emisiones)

Durante el procedimiento se aplicó el aumento sobre la TSM climatológica con base al promedio desde el 2020 – 2023 (periodo de estudio) proyectado para los siguientes años: 2033, 2043 y 2103, usando de base los datos de ocurrencias actuales de la Macarela.

Por consiguiente, en la figura 37 representa la variación de adecuación del hábitat (probabilidad de presencia relativa) en función de esta variable, existiendo rango de valores de eje X: TSM (°C) aprox. Desde 16.2 °C hasta 31.1°C, eje Y: Probabilidad relativa de presencia normalizada entre 0 y 1. Bajo este panorama, se presenta un pico de alrededor de 24°C de la temperatura marina superficial, indicando la probabilidad de presencia más alta con una temperatura óptima ambiental en la región de Ecuador.

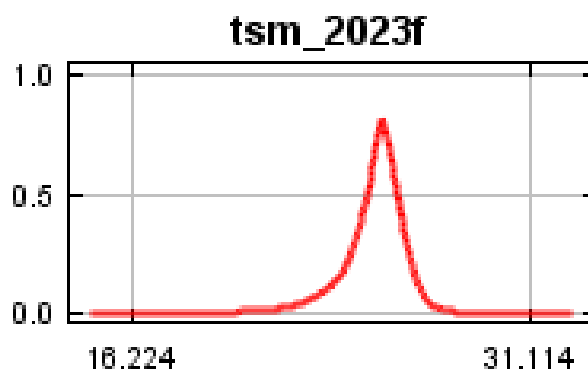


Figura 37. Curva de respuesta del promedio de la TSM, periodo 2020 - 2023

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra los modelos usando las capas modificadas de TSM para predecir la distribución futura bajo cada escenario, no obstante, pueden presentar incertidumbres. Están reflejados desde la figura 38 hasta la figura 49 teniendo en cuenta la siguiente escala de colores detallado en la tabla 3:

<i>Color</i>	<i>Valor aproximado</i>	<i>Interpretación ecológica</i>
<i>Rojo</i>	0.92 – 1.00	Alta idoneidad ambiental (zona óptima)
<i>Naranja</i>	0.77 – 0.85	Muy adecuada
<i>Amarillo</i>	0.54 – 0.69	Moderadamente adecuada
<i>Verde</i>	0.31 – 0.46	Baja-moderada idoneidad
<i>Azul</i>	0.00 – 0.23	Baja o nula idoneidad
<i>Blanco</i>	-----	Pesquería actual

Tabla 3. Escala de colores usados en la interpretación.

3.5.1. Tasas de incremento de TSM a escenario SSP2-4.5, periodo 2033 – TSM 24.27 °C

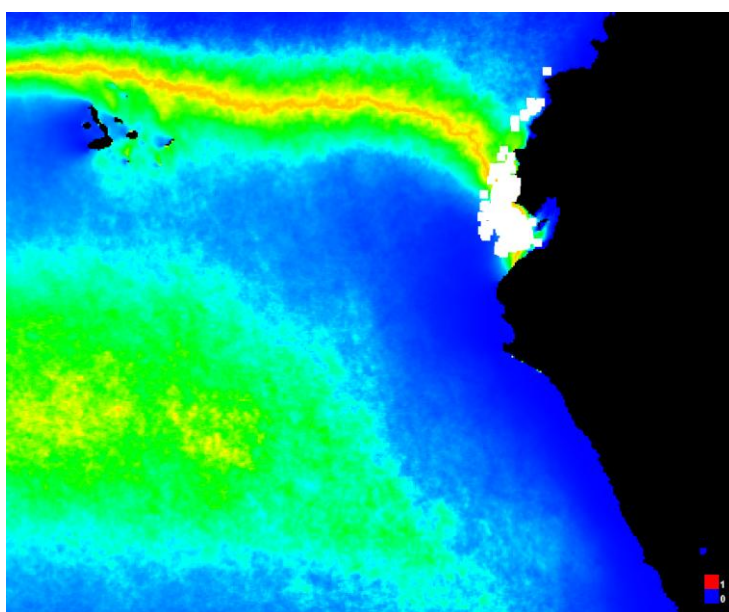


Figura 38. Mapa base referente a presencia de entrenamiento de Macarela a 24 °C – puntos blancos: Periodo promedio 2020 – 2023

Fuente: Elaboración propia

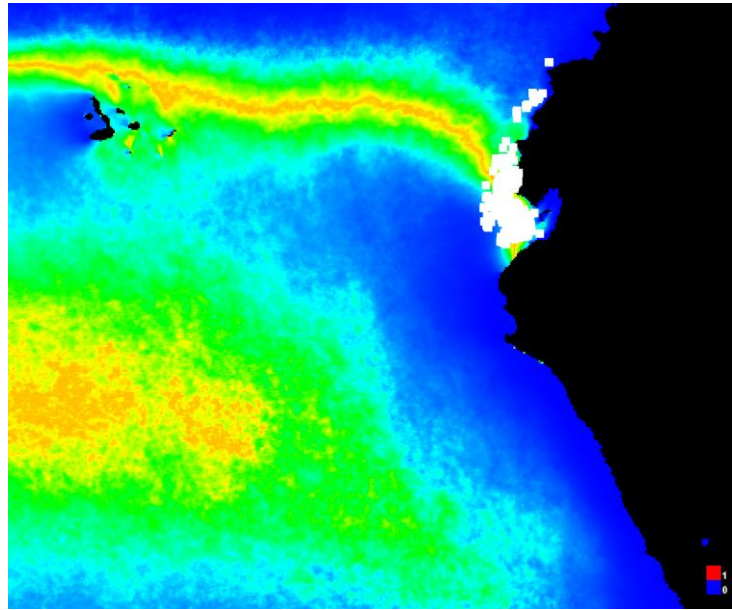


Figura 39. Bajo un escenario medio (SSP2-4.5), se espera un aumento de 0.27 °C para el 2033, teniendo expansión del hábitat más hacia el suroeste del Pacífico adecuado hacia zonas más oceánicas y, en la franja angosta frente a la costa de Ecuador.

Fuente: Elaboración propia

Tasas de incremento de TSM escenario SSP2-4.5, periodo 2043 – TSM 24.54 °C.

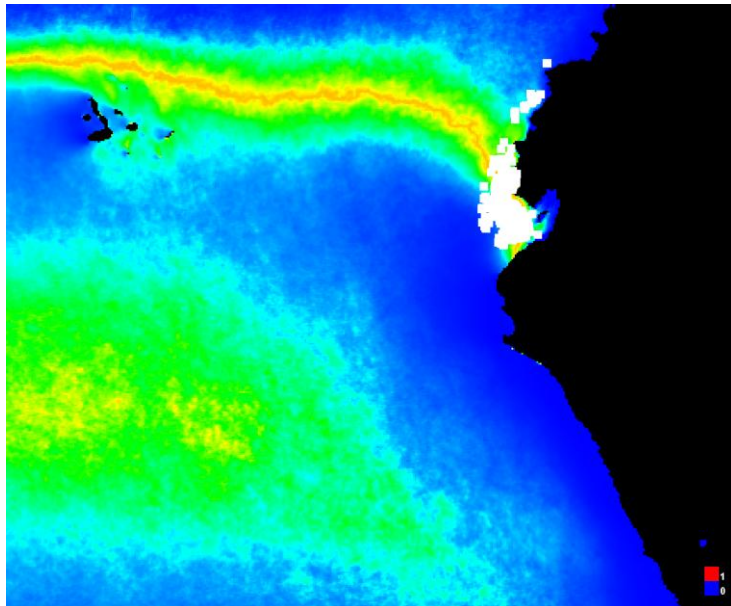


Figura 40. Mapa referente a presencia de entrenamiento de Macarela a 24 °C – puntos blancos: Periodo promedio 2020 - 2023

Fuente: Elaboración propia

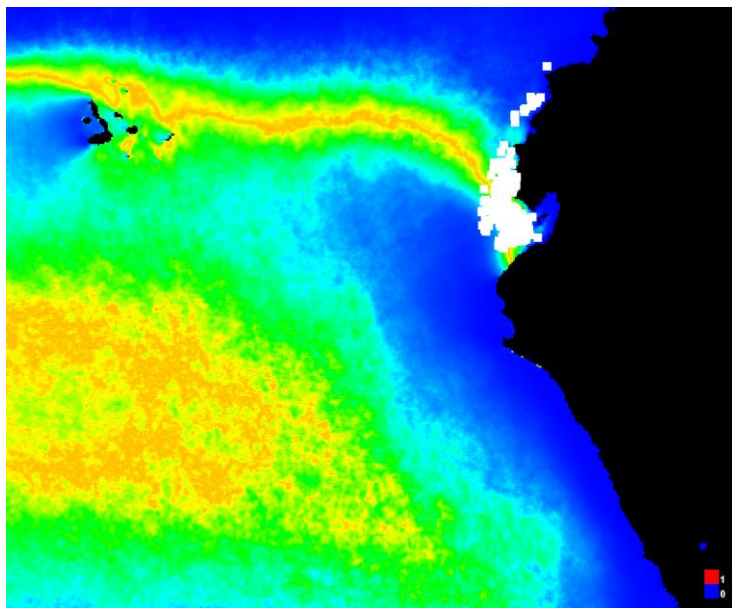


Figura 41. Bajo un escenario medio (SSP2-4.5), se espera un aumento de $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el 2043, teniendo mayor expansión oceánica del suroeste del Pacífico, constituyendo desplazamiento térmico óptimo hacia zonas más oceánicas, persistiendo la franja norte de idoneidad para la especie.

Fuente: Elaboración propia

Tasas de incremento de TSM escenario SSP2-4.5, periodo 2103 – TSM $26.16\text{ }^{\circ}\text{C}$

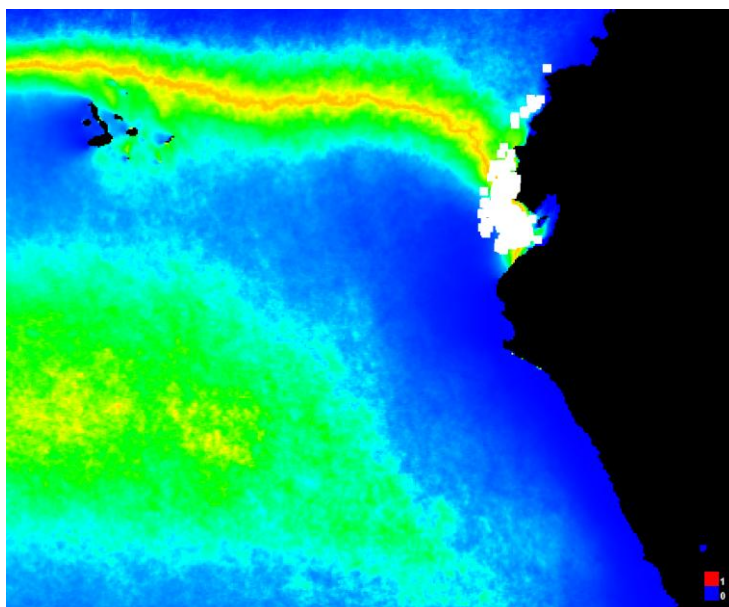


Figura 42. Mapa referente a presencia de entrenamiento de Macarela a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ – puntos blancos: Periodo promedio 2020 - 2023

Fuente: Elaboración propia

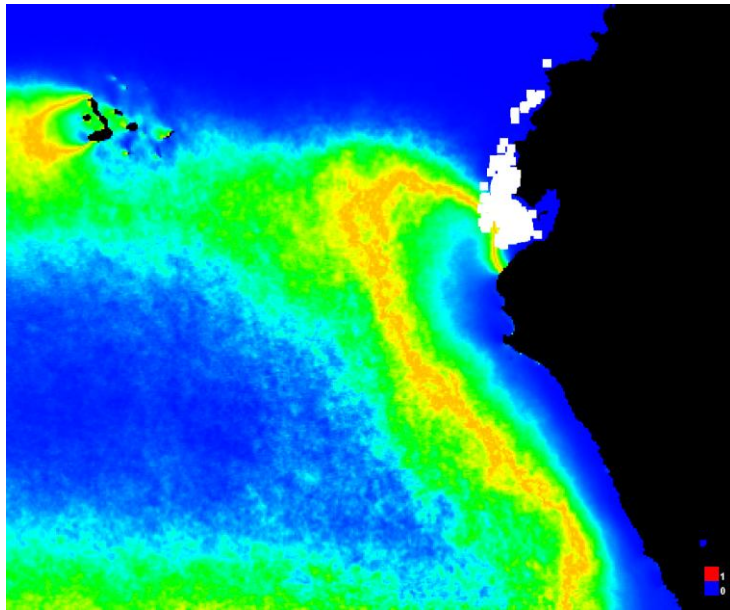


Figura 43. Bajo un escenario medio (SSP2-4.5), se espera un aumento de 2.16 °C para el 2103, presenta idoneidad reflejando un escenario de cambio climático avanzado, con una reconcentración del hábitat hacia la franja costera, sumando pérdida de áreas oceánicas al suroeste y, parte del archipiélago de Galápagos (frentes térmicos) generando cambios en la distribución espacial del recurso.

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Tasas de incremento de TSM escenario SSP5-8.5, periodo 2033 – TSM 24.44 °C

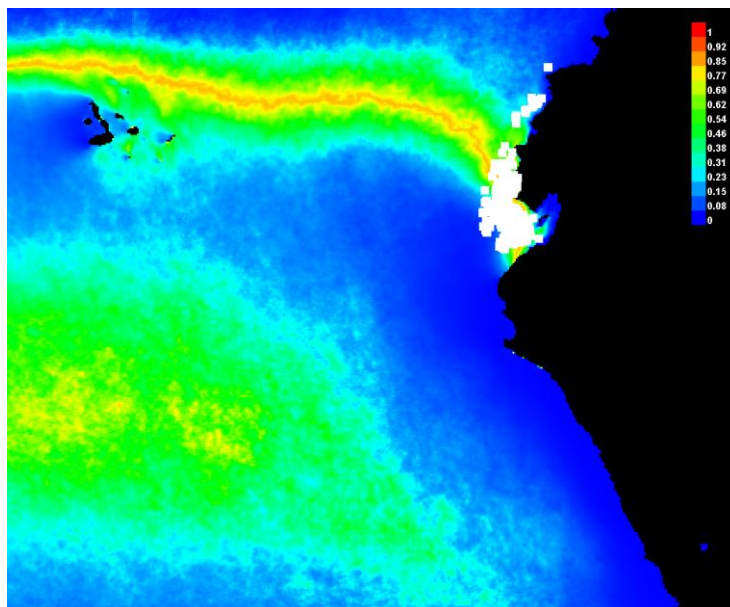


Figura 44. Mapa referente a presencia de entrenamiento de Macarela a 24 °C – puntos blancos: Periodo promedio 2020 - 2023

Fuente: Elaboración propia

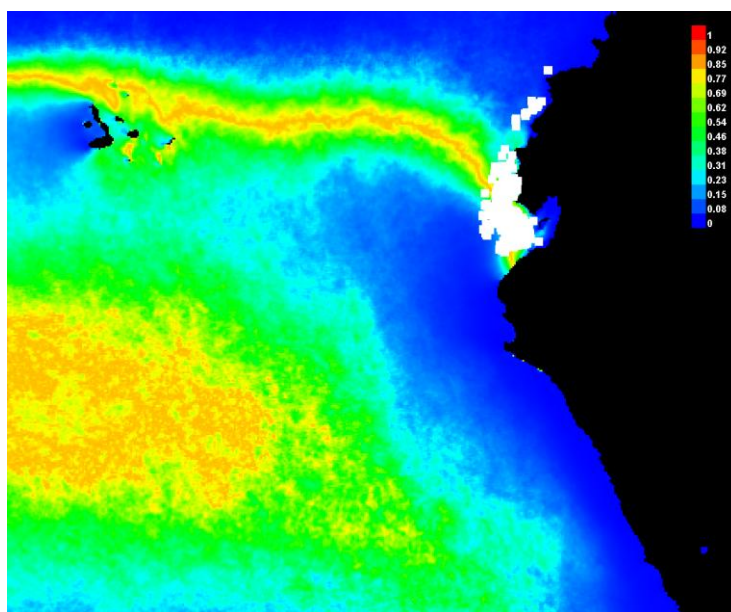


Figura 45. Bajo un escenario medio (SSP5-8.5), se espera un aumento de 0.44 °C para el 2033, teniendo expansión de alta probabilidad costa norcentral, extendiéndose oceánicamente oeste/suroeste, asimismo zona de Galápagos con una posible redistribución del hábitat.

Fuente: Elaboración propia

Tasas de incremento de temperatura escenario SSP5-8.5, periodo 2043 – TSM 24.88 °C

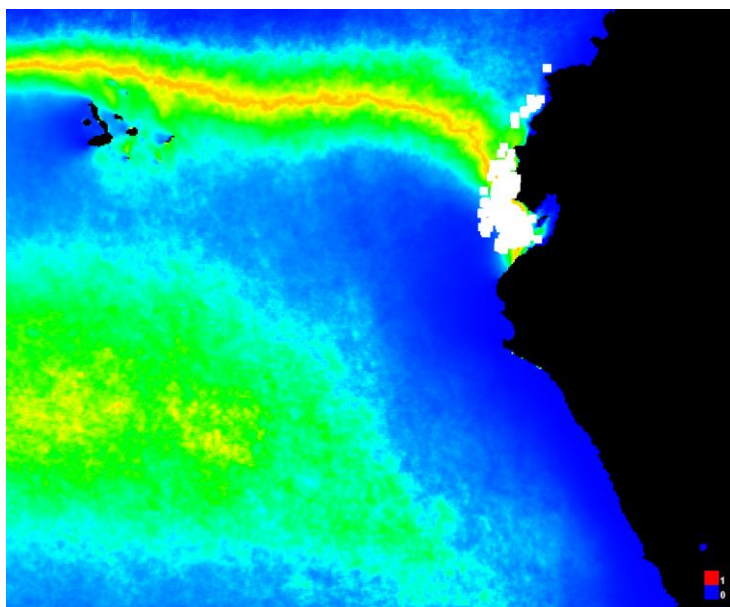


Figura 46. Mapa referente a presencia de entrenamiento de Macarela a 24 °C – puntos blancos: Periodo promedio 2020 – 2023

Fuente: Elaboración propia

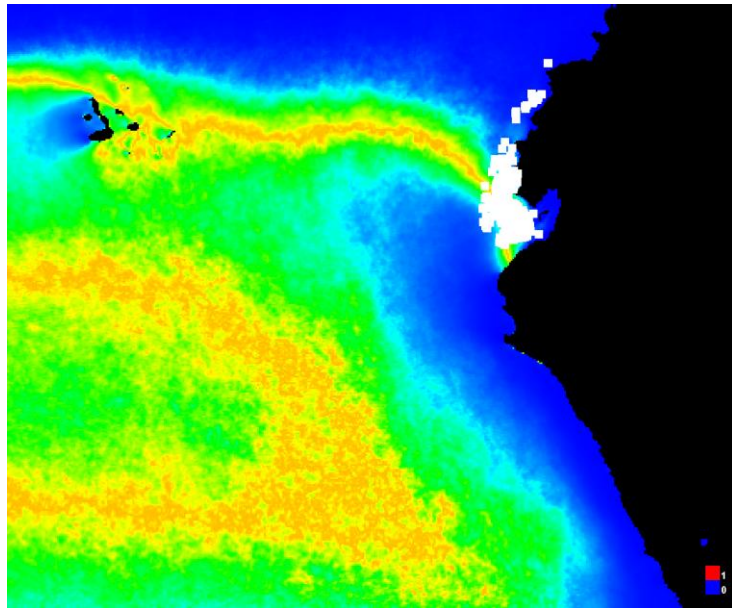


Figura 47. Bajo un escenario medio (SSP5-8.5), se espera un aumento de 0.88 °C para el 2043, teniendo mayor expansión oceánica del suroeste del Pacífico, constituyendo desplazamiento térmico óptimo forzado hacia zonas del continente (Pacífico suroccidental), ligera contracción costa norte – centro de Ecuador.

Fuente: Elaboración propia

Tasas de incremento de temperatura escenario ssp5-8.5, periodo 2103 – TSM 27.52 °C

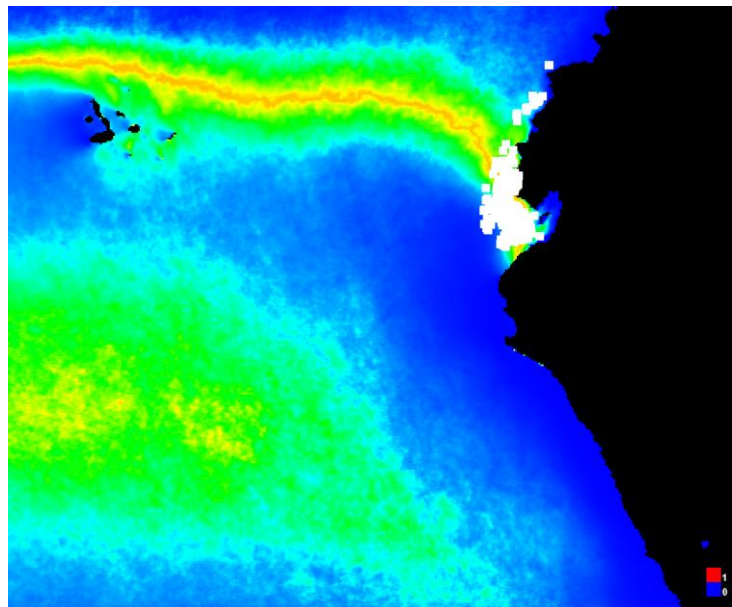


Figura 48. Mapa referente a presencia de entrenamiento de Macarela a 24 °C – puntos blancos: Periodo promedio 2020 - 2023

Fuente: Elaboración propia

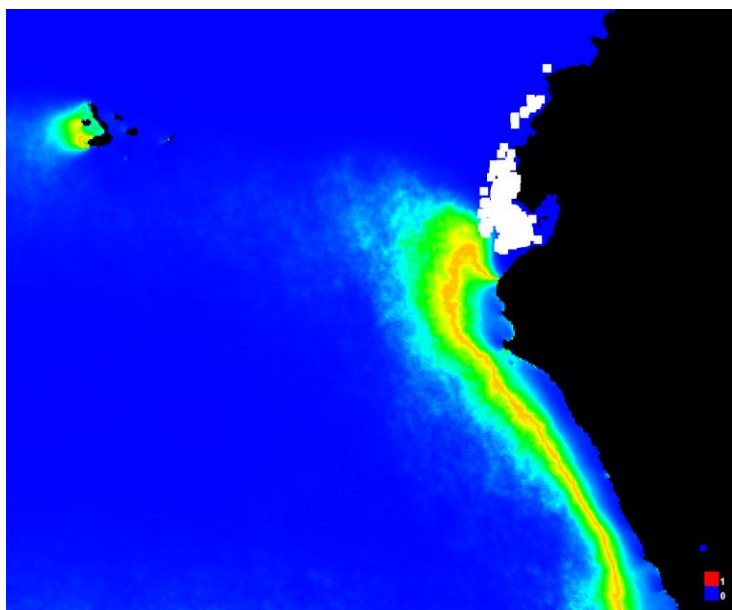


Figura 49. Bajo un escenario medio (SSP5-8.5), se espera un aumento de 3.52 °C para el 2103, teniendo fuerte concentración costera frente Ecuador y Perú y contracción del hábitat, ausencia de idoneidad oceánica presentando además algo puntual de condiciones favorables cerca de Galápagos

Fuente: Elaboración propia

3.6. Discusión

Los resultados obtenidos entre los años 2020 y 2023 evidencian una clara variabilidad espacial y temporal en la distribución y disponibilidad de la biomasa de *Scomber japonicus* en el perfil costero del Ecuador, principalmente concentrada frente al Golfo de Guayaquil, mientras que se registró una densidad marcadamente menor frente a la Puntilla de Santa Elena, especialmente durante los segundos ciclos (junio–noviembre). Este patrón concuerda con estudios previos que indican una preferencia de esta especie por zonas costeras cálidas y de alta productividad, asociadas a procesos oceanográficos dinámicos como el afloramiento y la interacción de corrientes como la de Humboldt y Cromwell (Ormaza-González et al., 2016; Jurado Maldonado, 2021).

En cuanto a la TSM, se observó una distinción marcada entre los dos ciclos climatológicos. Durante los primeros ciclos (estación húmeda), las TSM oscilaron entre 26 y 27 °C, condiciones que se acercan al límite superior del rango térmico óptimo para la especie, estimado entre 24 °C y 27 °C (FishBase, 2025; Yukami et al., 2009). A pesar de estas temperaturas favorables, la concentración de clorofila fue moderada, situándose entre 0.7 y

0.9 mg/m³, valores compatibles con aguas productivas, según la escala de Tapia (2006), pero inferiores a los observados en los segundos ciclos.

Durante los segundos ciclos (estación seca), se identificó un descenso sistemático de la TSM, con valores mínimos entre 22.5 y 23.5 °C, coincidiendo con un aumento en las concentraciones de clorofila, alcanzando hasta 1.2 mg/m³ en 2021, lo cual refleja un aumento de la productividad primaria costera. Estos resultados coinciden con la teoría de que la estación seca favorece la intensificación del afloramiento costero y la inyección de nutrientes, que a su vez promueven el crecimiento del fitoplancton, componente esencial en la dieta de los peces pelágicos pequeños como la macarela (Cervantes et al., 1992; Chavez et al., 2008).

No obstante, se observa una tendencia de menor densidad y actividad pesquera durante 2023, tanto en el primer como en el segundo ciclo, a pesar de que las TSM se mantuvieron en el rango preferido. Este comportamiento puede estar asociado a la intensificación de condiciones oceánicas anómalas, como el evento El Niño en desarrollo durante dicho año, que pudo alterar la disponibilidad de nutrientes y la ubicación del hábitat óptimo (OMM, 2024). Tal disminución de la productividad también ha sido reportada durante eventos cálidos extremos en otras pesquerías pelágicas del Pacífico oriental, como las de anchoveta (*Engraulis ringens*) (Pauly & Tsukayama, 1987).

Finalmente, se identificaron desplazamientos espaciales en los núcleos de densidad entre años y ciclos, lo que refuerza la hipótesis de que la distribución de *Scomber japonicus* es altamente sensible a los gradientes térmicos y la disponibilidad de alimento. La asociación observada entre mayores concentraciones de clorofila y mayor densidad pesquera, especialmente durante los segundos ciclos de 2021 y 2022, respalda la noción de que la clorofila-a es un excelente proxy de hábitat favorable para la especie (Binohlan, 2019; Tapia, 2006).

Respecto a la modelación de la distribución potencial de *Scomber japonicus* utilizando MaxEnt bajo escenarios climáticos proyectados para los años 2033, 2043 y 2103 permite evidenciar patrones espaciales de alta relevancia para la gestión pesquera y ecológica de esta especie pelágica. Los hallazgos indican una dinámica gradual de reasignación del hábitat apropiado conforme se intensifican las condiciones oceánicas asociadas al cambio climático,

especialmente en relación al aumento sostenido de la TSM, la variable explicativa principal del modelo que dejará de estar dentro de su rango ideal de temperatura.

Durante el escenario proyectado al año 2033, se observa una expansión del hábitat idóneo hacia el Pacífico suroccidental, con persistencia de zonas de alta adecuación térmica frente a la costa ecuatoriana. Este patrón refleja una fase de transición térmica, donde aún se mantienen condiciones favorables en la plataforma continental, pero con señales de desplazamiento de la franja óptima hacia áreas oceánicas más profundas. Estudios recientes como los de Lehodey et al. (2015) y Hazen et al. (2013) sostienen que especies pelágicas como la macarela tienden a seguir las isotermas favorables a medida que estas se alejan de la costa, en respuesta al calentamiento del océano tropical.

Para el escenario del año 2043, los mapas proyectados muestran una intensificación de dicha migración térmica, con una ampliación del hábitat adecuado hacia el oeste del Pacífico ecuatorial y una leve retracción de las zonas costeras. Este comportamiento es coherente con lo descrito por Robinson et al. (2015), quienes indican que las especies con alta movilidad horizontal, como *Scomber japonicus*, pueden reorganizar su distribución espacial en función de cambios en la termoclina y la disponibilidad de presas, asociadas a cambios en la productividad primaria.

Sin embargo, para el año 2103, los resultados muestran una clara contracción del área de idoneidad ambiental, restringida a una franja angosta frente a las costas del Ecuador y Perú, así como zonas aisladas en regiones insulares (e.g., Galápagos). Esta regresión puede explicarse por la posible saturación térmica del ecosistema oceánico ecuatorial, fenómeno discutido por Cheung et al. (2009), quienes señalan que bajo escenarios de alta emisión de gases de efecto invernadero, muchas especies tropicales podrían alcanzar sus límites fisiológicos, viéndose forzadas a disminuir su rango geográfico o experimentar declinaciones poblacionales que, según FAO (2018) e IPCC (2019) en zonas tropicales puede presentarse una reducción máxima de captura de hasta 40%.

Estos cambios en la distribución potencial proyectada deben entenderse como una respuesta adaptativa de la macarela a los desplazamientos de los frentes oceanográficos, zonas de afloramiento y corredores térmicos. Es importante considerar que este fenómeno puede tener implicaciones directas sobre las estrategias de manejo pesquero, particularmente en lo

referente a la localización de los principales caladeros, sostenibilidad del esfuerzo pesquero artesanal e industrial y la necesidad de incorporar escenarios climáticos en los planes de ordenamiento espacial marino.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

La distribución espacial de *Scomber japonicus* en el perfil costero de Ecuador entre 2020 y 2023 se vio marcada por las condiciones oceánicas, en particular por la variabilidad de la TSM y la concentración de clorofila-a. Las áreas de alta productividad pesquera se situaron frecuentemente frente al Golfo de Guayaquil, mostrando una inclinación hacia hábitats cálidos y costeros.

Los cálculos efectuados bajo escenarios climáticos futuros utilizando MaxEnt señalan una transición gradual del potencial hábitat de la especie hacia el suroeste del Pacífico, probablemente debido al incremento del TSM. Se prevé una expansión hacia zonas oceánicas para los años 2033 y 2043, mientras que para el año 2103 se observa una disminución del hábitat o la adopción de biomasa hacia franjas costeras estrechas, lo que representa desafíos para la operación pesquera tradicional y la muestra de condiciones ambientales sin precedentes lo que la especie enfrentará un entorno completamente nuevo (Monnier et al., 2020).

La reacción de la especie ante las variaciones ambientales se puso de manifiesto durante los ciclos de La Niña (2021–2022) y el comienzo del fenómeno El Niño (2023). Durante los años fríos se registró una mayor densidad de pescado, relacionada con niveles más elevados de clorofila-a, mientras que en 2023 se registró una reducción en la captura a pesar de condiciones climáticas propicias, lo que indica un posible desequilibrio trófico o una migración hacia zonas no supervisadas, es decir el impacto en el 2023 fue más notorio.

El estudio de correlación estadística entre los TSM y las capturas no reveló una relación relevante, aunque se observó una tendencia contraria. Esto confirma que la distribución de la macarela se basa en varios factores y no únicamente en la temperatura, siendo imprescindible tener en cuenta otras variables como la disponibilidad de alimento, la presión pesquera o la estructura del mar.

El rango óptimo de temperatura para *Scomber japonicus* en la costa de Ecuador se situó aproximadamente en los 24 °C, como lo evidencian tanto las curvas de respuesta del modelo

MaxEnt como los promedios climáticos del periodo estudiado. Este valor se alinea con las proyecciones mundiales y subraya su relevancia para las futuras definiciones de hábitats críticos y la planificación de pesca en el sentido de comprender el inicio, duración y término de la estación reproductiva sea variable dependiendo de la condición ambiental.

4.2. Recomendaciones

Potenciar el seguimiento oceanográfico integrado, incluyendo de manera sistemática sensores satelitales y modelos predictivos que posibiliten prever traslados de la biomasa de macarela en respuesta a variaciones en términos térmicos y productivos.

Incorporar escenarios climáticos en las estrategias de ordenamiento pesquero, modificando las tácticas de esfuerzo, localización de los caladeros y ventanas de captura en base a la redistribución prevista del recurso, particularmente en situaciones de incremento del TSM.

Fomentar estudios anuales que incluyan variables tróficas, como la presencia de presas (copépodos, dinoflagelados), junto con la temperatura y la clorofila, con el fin de obtener una perspectiva ecosistémica más integral del comportamiento de la especie.

Implementar un método de gestión adaptable con enfoque ecosistémico, fundamentado en el aprendizaje constante y en la incorporación de predictores climáticos, que posibilite prever modificaciones reproductivas, migratorias y de distribución espacial del recurso ante sucesos extremos, como también lograr las capacidades de adaptación es decir a la tecnología o financiamiento.

Potenciar el alcance espacial y temporal del Programa de Observadores de la Subsecretaría de Recursos Pesqueros, ampliando la vigilancia a áreas oceánicas y periodos de cambio climático, con el objetivo de identificar de manera oportuna nuevas áreas de concentración o desplazamiento del recurso, igualmente el monitoreo participativo y comunitario.

Los hallazgos encontrados impulsan a plantear la diversificación de los medios de vida para las comunidades costeras siendo aun cuando las condiciones climáticas cada vez son más severas.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, F. (1998). La pesquería de peces pelágicos pequeños en el Ecuador entre 1981 y 1998. Instituto Nacional de Pesca.

Alexander, M. A., Scott, J. D., & Friedland, K. D. (2018). Changes in fish distributions in response to climate change. *ICES Journal of Marine Science*, 75(5), 1612–1622.

Asamblea Nacional del Ecuador. (2020). Ley Orgánica para el Desarrollo de la Acuicultura y Pesca (Registro Oficial Suplemento No. 187 del 21 de abril de 2020). <https://www.asambleanacional.gob.ec/es/leyes-aprobadas>.

Binohlan, C. (2019). *Scomber japonicus* – Species summary. FishBase.

Canales, C., Romero, E., Jurado, R., Arcentales, G., & Barzola, F. (2019). Evaluación de stock de peces pelágicos pequeños en la costa continental ecuatoriana. Subsecretaría de Recursos Pesqueros del Ecuador – Instituto Público de Investigación de Acuicultura y Pesca (IPIAP).

Cervantes, F., Robles, A., & Cisneros, H. (1992). Los peces pelágicos menores: importancia ecológica y pesquera. Instituto Nacional de la Pesca, México.

Cervantes, J., Zárate, V., & Avendaño, P. (1992). Biología y dinámica poblacional de pelágicos pequeños. *Revista de Biología Marina*.

CIIFEN. (2021). Atlas Climático del Litoral del Ecuador.

CIIFEN. (2023). Boletines de monitoreo climático del Pacífico Oriental. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño <https://www.ciifen.org>

Collette, B. B., & Nauen, C. E. (1983). *FAO Species Catalogue*. Vol. 2. Scombrids of the world: An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos and related species known to date. *FAO Fisheries Synopsis* No. 125, Vol. 2. Rome: FAO.

Collette, B.B. 2011. *Scomber japonicus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2011: e.T170306A6751546. Disponible en: <https://www.iucnredlist.org/species/170306/6751546>

Cushing, D. H. (1982). *Climate and Fisheries*. Academic Press.

Chávez, F. P., & Messié, M. (2009). A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 53(1–4), 80–96.

Chavez, F. P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P., & Csirke, J. (2008). The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, 57(2–4), 95–105.

Chavez, F. P., Ryan, J., Lluch-Cota, S. E., & Ñiquen, M. (2008). From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 319(5864), 217–221.

Checkley, D. M., Alheit, J., Oozeki, Y., & Roy, C. (2009). *Climate change and small pelagic fish*. Cambridge University Press.

Cheung, W.W.L., Lam, V.W.Y., Sarmiento, J.L., et al. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*, 10(3), 235–251.

FAO (2020). *Diagnóstico oceánico-pesquero del Pacífico sudeste*.

FAO (2021). *Species fact sheets: Scomber japonicus*. Fisheries and Aquaculture Division.

FAO. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>

FAO. (2021). *Uso de tecnologías espaciales para el seguimiento, control y vigilancia de la pesca*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/cb4475es>

FAO. (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>

Fiedler, P. C., & Talley, L. D. (2006). Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2–4), 143–180.

FishBase. (2024). *Scomber japonicus* (Houttuyn, 1782) <https://www.fishbase.se/summary/Scomber-japonicus.html>

FishBase. (2025). *Scomber japonicus*. Recuperado de <https://www.fishbase.se/summary/Scomber-japonicus.html>

González, N., Chalén, X., Vicuña, H., Romero, E., & Jurado, R. (2018). Monitoreo y evaluación de peces pelágicos pequeños. Instituto Nacional de Pesca, Guayaquil, Ecuador.

Grajales-Quintero, A. (2008). Cambio climático y biodiversidad: impactos sobre los ecosistemas acuáticos. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 43(1), 1-10.

Hazen, E.L., Jorgensen, S., Rykaczewski, R.R., et al. (2013). Predicted hábitat shifts of Pacific top predators in a changing climate. *Nature Climate Change*, 3, 234–238.

INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). (2022). Boletines climáticos del Ecuador.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (Eds.)]. IPCC.

Jimmy Anastacio. (2021). La pesca es una de las tres industrias que aportaron de forma positiva al crecimiento de la economía nacional en el primer trimestre 2021. Cámara Nacional de Pesquería. <https://camaradepesqueria.ec/la-pesca-es-una-de-las-tres-industrias->

[que-aportaron-de-forma-positiva-al-crecimiento-de-la-economia-nacional-en-el-primer-trimestre-2021](#)

Juárez, M., Rodríguez, F., & Marín, L. (2014). Variabilidad oceanográfica y su impacto en la productividad biológica marina del Pacífico nororiental. *Revista Ciencias del Mar*, 48(2), 25-36.

Jurado Maldonado, R. (2021). Condiciones físico-biológicas del Pacífico oriental tropical frente a Ecuador. Instituto Público de Investigación de Acuicultura y Pesca.

ken-ichi. (2012). *Scomber japonicus*. iNaturalist. <https://www.inaturalist.org/photos/18891>

Kwiatkowski, L., Bopp, L., Aumont, O., Ciais, P., Cox, P. M., Laufkötter, C., Li, Y., & Séférian, R. (2017). Emergent constraints on projections of declining primary production in the tropical oceans. *Nature Climate Change*, 7(5), 355–358. <https://doi.org/10.1038/nclimate3265>

Lehodey, P., Chai, F., & Hampton, J. (2006). Modelling climate-related variability of tuna populations from a coupled ocean–biogeochemical–population dynamics model. *Fisheries Oceanography*, 12(4-5), 483–494.

Lehodey, P., Senina, I., Nicol, S., et al. (2015). Vulnerability of oceanic fisheries in the tropical Pacific to climate change. In: *Global Change in Marine Systems*.

Martínez-Ortiz, J., Aires, C., & Herrera, M. (2019). Impactos del Fenómeno El Niño en la pesca pelágica pequeña del Ecuador. Instituto Público de Investigación de Acuicultura y Pesca (IPIAP), Subsecretaría de Recursos Pesqueros.

McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*, 314(5806), 1740–1745.

Monnier, L., Gascuel, D., Alava, J.J., Barragán, M.J., Gaibor, N., Hollander, F.A., Kanstinger, P., Niedermueller, S., Ramírez, J., & Cheung, W.W.L. 2020. Small-scale

fisheries in a warming ocean: exploring adaptation to climate change. Scientific report. WWF Germany. International WWF Centre for Marine Conservation, Hamburg. 2020.

Muñoz, A. J. (2023). Condiciones oceanográficas anómalas en el Pacífico ecuatorial durante 2023. Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador.

NOAA Climate.gov. (s.f.). Climate Variability: Oceanic Niño Index. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-nino-index>

NOAA OceanWatch. (2021–2022). Tropical Pacific SST & Wind Patterns.

OMM. (2024). La temperatura global alcanzó un récord histórico en 2023. Organización Meteorológica Mundial.

Ormaza-González, F. I. (2016). Variabilidad oceanográfica multiescalar en el Pacífico ecuatorial oriental. Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador.

Ormaza-González, F. I., Espinoza-Celi, M. E., & Roa-López, H. M. (2022). Did Schwabe cycles 19–24 influence the ENSO events, PDO, and AMO indexes in the Pacific and Atlantic Oceans? *Global and Planetary Change*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103928>.

Ormaza-González, F. I., Mora-Cervetto, A., Bermúdez-Martínez, R. M., Hurtado-Domínguez, M. A., Peralta-Bravo, M. R., & Jurado-Maldonado, V. M. (2016). Can small pelagic fish landings be used as predictors of high-frequency oceanographic fluctuations in the 1–2 El Niño region. *Advances in Geosciences*, 42, 61-72.

Pauly, D., & Tsukayama, I. (1987). The Peruvian anchoveta and its upwelling ecosystem: Three decades of change. *ICLARM Studies and Reviews*, 15.

Pollnac, R., Beitzl, C. M., Viana, M. A., & Gaibor, N. (2024). Perceptions of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and La Niña Shape Fishers' Adaptive Capacity and Resilience. *Social Sciences*, 13(7), 356.

Pörtner, H. O., & Peck, M. A. (2010). Climate change effects on fishes and fisheries: towards a cause-and-effect understanding. *Journal of Fish Biology*, 77(8), 1745–1779. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02783.x>.

Robinson, L.M., Elith, J., Hobday, A.J., et al. (2015). Pushing the limits in marine species distribution modelling: lessons from the land present challenges and opportunities. *Global Ecology and Biogeography*, 24(6), 611–621.

Rodríguez, C., Aranda, M., & Paredes, L. (1993). Impacto de los eventos El Niño sobre la pesquería de anchoveta en el Perú. Instituto del Mar del Perú (IMARPE).

Schaefer, K. M. (1986). Location of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) spawning inferred from distributions of larvae and environmental conditions. *Fishery Bulletin*, 84(3), 687–703.

Subsecretaría de Recursos Pesqueros del Ecuador. (2021). Anuario de pesca y acuicultura del Ecuador 2020. Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca.

Takasuka, A., Oozeki, Y., & Kubota, H. (2008). Spawning temperature optima of anchovy and sardine in the western North Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 360, 235–244. <https://doi.org/10.3354/meps07358>.

Tapia, M. (2006). Escalas de productividad primaria en función de la clorofila-a para aguas marinas ecuatorianas. INOCAR.

Tapia, M. E., Palacios, O., & Naranjo, C. (2021). Variabilidad de la clorofila y su relación con el Frente Ecuatorial, Islas Galápagos durante los años 2014 y 2016. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 3(2), 39–52.

Terán, E., Morán, C., & Almeida, J. (2020). Influencia de la corriente de Cromwell sobre la pesquería pelágica en el Pacífico Oriental. *Revista de Oceanografía Tropical*, 55(1), 65-77.

Trujillo, G., & Marzol, J. (2022). Análisis de imágenes satelitales en estudios oceanográficos: limitaciones y potenciales. *Revista Iberoamericana de Ciencia y Tecnología del Mar*, 12(3), 45-58.

Yukami, R., Ohshimo, S., & Hiyama, Y. (2009). Estimation of spawning grounds of *Scomber japonicus* and *Scomber australasicus* in the East China Sea. *Fisheries Science*, 75(1), 167–174

Yukami, R., Ohshimo, S., & Hiyama, Y. (2009). Estimation of the spawning grounds of chub mackerel (*Scomber japonicus*) and spotted mackerel (*Scomber australasicus*) in the East China Sea based on catch statistics and biometric data. *Fisheries Science*, 75(1), 167–174. <https://doi.org/10.1007/s12562-008-0019-4>

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado **"ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POBLACIONAL DE LA MACARELA (SCOMBER JAPONICUS) FRENTE A LAS COSTAS DE ECUADOR DURANTE EL PERIODO 2020-2023, UTILIZANDO LA INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PESQUERA Y SENSOR REMOTO."** presentado por el estudiante, LUIS ALFREDO OCHOA MENDOZA fue enviado al Sistema Anti-plagio *turnitin*, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 8%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

The image shows a Turnitin plagiarism report interface. On the left is a document cover page from the Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSÉ), Facultad de Ciencias del Mar, Instituto de Postgrado. The document title is "Análisis y caracterización de la distribución poblacional de la Macarela (Scomber japonicus) frente a la costa de Ecuador durante el periodo 2020-2023, utilizando la integración de información pesquera y sensor remoto". The author is LUIS ALFREDO OCHOA MENDOZA and the tutor is Jerry Landívar Zambrano. On the right is the Turnitin report summary, showing a standard similarity score of 8%. It lists two sources: tumi.lamolina.edu.pe with a similarity of <1% (3 text blocks, 82 coinciding words) and www.institutopesca.gob.ec with a similarity of <1% (3 text blocks, 65 coinciding words).

PhD. Jerry Landívar Zambrano
TUTOR