



Universidad Veracruzana

Facultad de Estadística e Informática

Región Xalapa

Especialización en Métodos Estadísticos

Análisis de la relación entre temperatura, clorofila-a y la producción pesquera en el Golfo de México (2013-2022)

Reporte de aplicación
para obtener el diploma de Especialista en
Métodos Estadísticos

Presenta:

César Linton Izquierdo

Jesús Hernández Suárez (Director):

José Juan Muñoz León (Codirector)

Saúl Domínguez Isidro (Asesor)

Octubre de 2025

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”



Universidad Veracruzana

Facultad de Estadística e Informática
Región Xalapa

Especialización en Métodos Estadísticos

*Temperatura y Clorofila-a como Factores Clave en la Producción
Pesquera del Golfo de México*

Reporte de aplicación para obtener el diploma de Especialista
en
Métodos Estadísticos

Presenta:
César Linton Izquierdo

Jesús Hernández Suárez (Director):

José Juan Muñoz León (Codirector)
Saúl Domínguez Isidro (Asesor)

Dedicatoria

A mis padres, César y Elizabeth, por ser la base de todos mis logros. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, por su ejemplo constante, y por su amor incondicional e interminable. Jamás podré pagarles todo lo que han hecho por mí; los admiro profundamente y los amo con todo mi corazón. Esta meta también les pertenece.

A mi novia Isabela, por ser mi inspiración, por acompañarme en cada etapa de mi formación, en momentos buenos y malos. Por su apoyo, su guía y sus consejos durante todo el proceso de la especialización. Eres la mejor compañera, te amo.

A mi tía Paty, por acompañarme con tanto cariño a lo largo de toda mi vida. Tu apoyo siempre llegó justo cuando más lo necesité, y tu amor ha sido uno de los regalos más bonitos que he tenido.

A mi prima Mili, por ser el mejor ejemplo de dedicación y perseverancia, y por estar siempre dispuesta a compartir su cariño conmigo. Te admiro mucho y te quiero.

A mis abuelas Hilda (QEPD) y Noemí (QEPD), cuyo recuerdo permanece presente en todo lo que hago. Gracias por todo lo que me enseñaron y sobre todo por el amor que dejaron en mí. Mucho de lo que soy y seré es gracias a ustedes.

A mi querido Steel (QEPD) que, aunque ya no me acompaña, me apoyó en silencio en los momentos que más lo necesitaba.

Dedico también este logro a mis compañeros de la especialización, fueron una generación increíble. Dedicatoria especial para nuestro compañero y amigo Chuy (QEPD), quien fue una luz para todos nosotros a lo largo de este camino, te recordaremos siempre con cariño.

Gracias por estar, por creer en mí y por ayudarme a llegar hasta aquí.

Agradecimientos

A la Universidad Veracruzana, una institución que ha sido parte esencial de mi vida desde pequeño y a la cual le estaré siempre agradecido. En esta ocasión, agradezco especialmente a la Facultad de Estadística e Informática, su respaldo académico y logístico durante mi formación como especialista.

A mi director de tesis, Mtro. Jesús Hernández, por guiarme en mi trabajo y enriquecerlo de manera extraordinaria. Gracias por su paciencia para conmigo a pesar de que en ocasiones parecía complicado continuar. Su apoyo fue indispensable para que hoy pueda concluir esta etapa.

A mi comité de tesis, Dr. Juan Muñoz y Dr. Saúl Domínguez por sus aportaciones al proyecto, sus consejos ayudaron a que el presente documento se realizara de una mejor manera.

A los profesores de la especialización, quienes con su dedicación contribuyeron a que viera la estadística de una manera distinta, y que se convirtiera en un arma que seguramente será muy útil en nuestro futuro profesional.

A mi jurado de tesis, Dr. Sergio Juárez, Dra. Aurora Montano, y Mtra. Lourdes Velasco quienes, con sus observaciones y consejos, ayudaron a que tanto el presente documento como la presentación estuvieran mejor elaborados

A mis compañeras y compañeros de la especialización, quienes hicieron más llevadero este proceso con sus conversaciones, consejos y solidaridad. También por su apoyo con la parte académica, siempre me tendieron la mano cuando lo necesité ¡Les deseo un gran futuro a todos!

A todos ustedes ¡Muchas gracias!

Índice

1. Introducción	5
1.1 Planteamiento del problema	5
1.2 Preguntas de investigación.....	7
1.3 Objetivos	8
1.4 Hipótesis	9
1.5 Justificación	9
2. Marco teórico.....	11
2.1. Marco Contextual	11
2.2 Teorías	15
2.3 Antecedentes.....	17
3. 3. Materiales y métodos.....	22
3.1 Tipo de estudio.....	22
3.2 Población objetivo.....	22
3.3 Diseño de muestreo.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4 Análisis de datos.....	24
4. Resultados	25
5. Discusión	34
6. Conclusiones	38
7. Referencias	40

I. Introducción

I.1 Planteamiento del problema

La pesca y la acuicultura en el Golfo de México son pilares de la economía y de la seguridad alimentaria de las comunidades costeras de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán. Este estudio se centra en el análisis de estas actividades durante el periodo 2013-2022, evaluando el impacto de variables ambientales en la productividad pesquera. A nivel regional, la productividad está condicionada por procesos como la eutrofización, las descargas continentales y la dinámica de surgencias costeras (IOC-UNESCO et al., 2011). En nuestras series, la producción muestra una variabilidad temporal marcada con máximos estacionales en septiembre–noviembre (por ejemplo, noviembre de 2017 supera 6,500 t, octubre de 2018 supera 5,600 t, noviembre de 2015 supera 5,700 t) y mínimos frecuentes en junio–julio (por ejemplo, junio de 2020 ronda 1,800 t).

La literatura documenta que cambios en temperatura superficial del mar y en la disponibilidad de nutrientes explican buena parte de esa variación: eventos cálidos extremos reducen biomasa y potencial de captura en torno a 6 por ciento adicional al efecto medio del calentamiento (Cheung y Frölicher, 2021), mientras que picos de nutrientes elevan la clorofila-a y la productividad primaria, con respuestas estacionales moduladas por la estratificación (Sun et al., 2023). A escala global, análisis con modelos dependientes de temperatura en 235 poblaciones muestran que la productividad pesquera ya disminuyó 4.1 por ciento entre 1930 y 2010, con pérdidas de 15 a 35 por ciento en cinco ecorregiones, lo que contextualiza la magnitud del problema que aborda este estudio (Free et al., 2019). En el norte del Golfo de México, la zona hipóxica estival puede alcanzar áreas del fondo cercanas a 23,000 km² y volúmenes de 140 km³, reforzando la necesidad de gestionar nitrógeno y fósforo a escala de cuenca para sostener la productividad pesquera regional (Rabalais et al., 2019).

A pesar de la importancia económica y social de estas pesquerías, persisten incertidumbres sobre cómo la temperatura superficial del mar y la clorofila-a se traducen en cambios de captura a escala mensual y por entidad federativa. En particular, faltan modelos operativos que integren datos satelitales de temperatura y clorofila con registros de producción para el Golfo de México, y que consideren respuestas no lineales y posibles desfases entre ambiente y capturas. Este vacío limita la capacidad para diseñar estrategias de manejo adaptativo frente al calentamiento y a la variabilidad hidroclimática.

Por lo anterior, el propósito de esta investigación es cuantificar la relación entre temperatura superficial del mar y clorofila-a con la producción pesquera mensual de Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Yucatán en 2013-2022, identificando rangos ambientales asociados a mayores rendimientos y evaluando la evidencia de interacciones y no linealidades. Con ello se busca generar insumos prácticos, basados en evidencia, para apoyar la toma de decisiones en la gestión de los recursos pesqueros de la región.

I.2 Preguntas de investigación

1. ¿Cuál es la relación entre la temperatura superficial del mar y la producción pesquera mensual en el Golfo de México durante 2013–2022?
2. ¿Qué relación existe entre la concentración de clorofila-a y la producción pesquera mensual en 2013–2022, y hay rangos o umbrales de clorofila-a asociados con mayores rendimientos?
3. ¿Existen patrones temporales o estacionales y desfases entre ambiente y capturas durante 2013–2022?
4. ¿Cómo varían estas relaciones entre Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Yucatán?

I.3 Objetivos

General

Evaluar el impacto de las variables ambientales clave, como la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila-a, en la producción pesquera de los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Yucatán, durante el periodo 2013-2022.

Específicos

1. Analizar la tendencia temporal de la producción pesquera regional y por estado en 2013–2022 (desembarques), cuantificando pendiente anual y estacionalidad.
2. Evaluar la asociación estadística entre temperatura superficial del mar y producción pesquera mensual en 2013–2022, mediante modelos lineales y, cuando sea necesario, funciones no lineales y desfases de 0 a 3 meses.
3. Determinar el efecto combinado de temperatura y clorofila-a sobre la producción pesquera mensual en 2013–2022 mediante regresión múltiple (con interacción), comparando ajuste y capacidad predictiva.

I.4 Hipótesis

Las condiciones ambientales, particularmente la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila-a, tienen un impacto significativo en la producción pesquera en el Golfo de México. Se espera que mayores concentraciones de clorofila-a estén asociadas con un incremento en la productividad pesquera, mientras que aumentos en la temperatura superficial del mar reducen la producción de especies clave.

I.5 Justificación

El Golfo de México es una de las regiones pesqueras más importantes de México, con un papel vital en la economía y en la seguridad alimentaria de Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Yucatán. La disponibilidad de recursos está fuertemente condicionada por la variabilidad ambiental; cambios en la temperatura superficial del mar y en la clorofila-a alteran la productividad y generan incertidumbre operativa. Aunque existe información satelital y registros mensuales de desembarques, aún falta integrar ambos para explicar con precisión las fluctuaciones de la producción a escala estacional y de largo plazo. Este estudio aborda esa brecha para el periodo 2013–2022.

El valor metodológico radica en aplicar análisis de series de tiempo y regresión para cuantificar relaciones, probar hipótesis y estimar incertidumbre. Se modelarán temperatura y clorofila-a sobre capturas con interacción y desfases de 0 a 3 meses, comparando especificaciones por criterios de ajuste como R^2 ajustada y AIC, y verificando su desempeño con validación temporal. A diferencia de una descripción gráfica, este enfoque separa tendencia y estacionalidad, controla la heterogeneidad entre estados y produce efectos marginales interpretables.

Los resultados tienen uso inmediato en la gestión y en política pública: permiten identificar ventanas ambientales asociadas a mayor rendimiento, emitir avisos operativos ante anomalías térmicas, ajustar calendarios de esfuerzo o vedas y priorizar acciones en estuarios con mayor influencia de nutrientes. Con métricas reproducibles y trazabilidad de supuestos, el estudio fortalece la toma de decisiones y la resiliencia socioeconómica de las comunidades del Golfo de México, manteniendo la productividad y reduciendo impactos ambientales.

Además, el proyecto entregará productos concretos para su adopción por autoridades y comités de manejo: series armonizadas 2013–2022, modelos documentados y replicables, estimaciones con intervalos de confianza y mapas o tablas de umbrales operativos por estado. Este esquema es escalable a nuevas variables (salinidad, oxígeno disuelto o esfuerzo pesquero) cuando se disponga de datos comparables, y contempla diagnóstico de supuestos y de residuos para asegurar validez estadística y transparencia.

2. Marco teórico

2.1. Marco Contextual

El Golfo de México es una de las regiones marinas más importantes para México, tanto por su biodiversidad como por su impacto económico y social. Los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Yucatán dependen significativamente de las actividades pesqueras y acuícolas, que generan empleo, alimentos y sustento para las comunidades costeras (CONAPESCA, 2021). Sin embargo, estos beneficios enfrentan crecientes amenazas derivadas del cambio climático, la presión antropogénica y las prácticas de manejo inadecuadas (Díaz-Uribe et al., 2013).

Variables ambientales

Las variables ambientales son factores físicos, químicos y biológicos que influyen en los ecosistemas marinos y las especies que los habitan. Entre ellas se destacan la temperatura superficial del mar, la salinidad, el oxígeno disuelto, la concentración de nutrientes y la clorofila-a, que afectan directamente la productividad primaria y la salud de los ecosistemas marinos (Karnauskas et al., 2015; Li et al., 2022). La temperatura superficial del mar (TSM) es un parámetro clave en la oceanografía física, ya que regula procesos esenciales como la reproducción, migración y distribución de especies marinas, y se mide generalmente en los primeros milímetros hasta los primeros metros del agua (Reynolds et al., 2002). Por otro lado, la clorofila-a es el principal pigmento fotosintético presente en las algas y cianobacterias, y se utiliza comúnmente como un indicador de la biomasa fitoplanctónica, reflejando la cantidad de fitoplancton presente en una masa de agua y, por ende, la productividad primaria del ecosistema (Kirk, 1994). Estas variables, al estar influenciadas por el cambio climático y las actividades humanas, generan alteraciones en los patrones biológicos y en la disponibilidad de recursos pesqueros. Las fluctuaciones en la TSM y la concentración de clorofila-a, exacerbadas por fenómenos como la acidificación de los

océanos y la contaminación por nutrientes, afectan los ciclos de vida de especies comerciales como el camarón y la sardina (Muhling et al., 2011; IPCC, 2019).

La influencia de las variables ambientales en la productividad pesquera ha sido ampliamente documentada en diversas regiones del mundo. En el Pacífico suroriental, la pesquería de anchoveta fue gravemente afectada durante el evento de El Niño de 1972, que provocó una reducción de las capturas de 10 millones de toneladas en 1971 a 4 millones de toneladas en 1973, debido al calentamiento del agua y la reducción de nutrientes (Ñiquen & Bouchon, 2004). Estos cambios disminuyeron la productividad primaria y afectaron significativamente la economía de Perú.

En la Sonda de Campeche, México, las capturas de camarón rosado de 12,000 toneladas en la década de 1980 a menos de 5,000 toneladas en los últimos años, como resultado del aumento de 1-2°C en la TSM, que afectó negativamente las tasas de supervivencia y crecimiento del camarón (Arreguín-Sánchez & Arcos-Huitrón, 2011).

En el Golfo de California, un aumento de 1.5°C en la TSM durante el periodo 2015-2016 provocó una reducción del 20% en las capturas de pulpo, alterando los ciclos reproductivos de la especie (Arzola-Sotelo, 2010). De manera similar, en el Golfo de Nicoya, Costa Rica, el calentamiento de las aguas resultó en una disminución del 30% en las capturas de peces comerciales entre 2000 y 2015, afectando la seguridad alimentaria de las comunidades costeras (Chávez, 2015).

Pesca ribereña

La pesca ribereña, realizada en zonas costeras mediante técnicas artesanales y embarcaciones pequeñas, representa una actividad económica fundamental para las comunidades costeras del Golfo de México. Este tipo de pesca es vital como fuente de ingresos y alimento, pero enfrenta desafíos como la sobreexplotación de recursos, la degradación de hábitats y la falta de regulación adecuada en algunas áreas (Díaz-Uribe et al., 2013; Arreguín-Sánchez & Arcos-Huitrón, 2011). Medidas como la implementación de vedas temporales y la regulación

de artes de pesca han sido propuestas para mitigar estos problemas, aunque su efectividad depende de la capacidad de monitoreo y cumplimiento de las normativas (FAO, 2020).

Acuacultura

La acuacultura, o cultivo controlado de organismos acuáticos, ha crecido considerablemente en el Golfo de México en respuesta al declive de las poblaciones silvestres y al aumento de la demanda de productos pesqueros. Esta actividad incluye el cultivo de peces, moluscos y crustáceos destinados al consumo humano (Soto et al., 2008; FAO, 2020). Sin embargo, también presenta retos significativos, como la contaminación del agua, la introducción de especies exóticas y la alteración de los ecosistemas costeros. En este contexto, la implementación de tecnologías sostenibles y políticas regulatorias más estrictas es crucial para garantizar su viabilidad a largo plazo (Bautista-Ortega et al., 2021).

Cambio climático

El cambio climático es uno de los factores más determinantes en la transformación de los ecosistemas marinos del Golfo de México. Los incrementos en la temperatura superficial del mar, la acidificación de los océanos y los cambios en las corrientes marinas están afectando la distribución, abundancia y migración de especies comerciales clave (Li et al., 2022; Karnauskas et al., 2015). Adicionalmente, los fenómenos climáticos extremos, como huracanes más intensos, generan impactos adversos tanto en los ecosistemas como en las comunidades costeras que dependen de ellos (Muhling et al., 2011; IPCC, 2019).

Sostenibilidad pesquera

La sostenibilidad pesquera es un enfoque que busca garantizar la salud de los ecosistemas marinos mediante prácticas responsables, como límites de captura, vedas y el uso de artes de pesca selectivas. Este enfoque es especialmente relevante en el Golfo de México, donde la sobreexplotación de especies comerciales ha llevado a la necesidad de adoptar estrategias basadas en el manejo por ecosistemas (Arreguín-Sánchez et al., 2011; FAO, 2020). Estas estrategias están alineadas con la Ley General de Pesca y Acuacultura Sustentables, que promueve un equilibrio entre la explotación de recursos y la conservación ambiental (CONAPESCA, 2021).

Economía circular

La economía circular es un modelo que promueve el aprovechamiento eficiente de los recursos, minimizando el desperdicio y maximizando su reutilización. En el contexto de la pesca en el Golfo de México, esto implica el uso de descartes pesqueros como insumos para la producción de harinas de pescado o alimentos para ganado, lo cual reduce el impacto ambiental y mejora la rentabilidad de las comunidades pesqueras (Bautista-Ortega et al., 2021; Soto et al., 2008).

Además, existen otras iniciativas innovadoras que también han adoptado el enfoque de la economía circular en la región. Un ejemplo de esto es la reutilización de redes de pesca en desuso, que se han recolectado y transformado en productos como skates, lentes y casacas. Esta práctica contribuye a la reducción de la contaminación marina y genera ingresos adicionales para las comunidades involucradas (González-Caro, 2025). Por otro lado, en el Caribe mexicano, cooperativas turístico-pesqueras han trabajado en la transición hacia un modelo de economía circular enfocado en la infraestructura sostenible, la reutilización de materiales, y la gobernanza costera, con el objetivo de fortalecer la economía local y preservar los ecosistemas marinos (Cortés-Gómez, 2022).

Otra iniciativa destacable es el uso de biodigestores para transformar residuos de pescado en biogás, una fuente de energía renovable. Esta tecnología se ha implementado en algunas comunidades pesqueras del Golfo de México, ayudando a reducir los residuos y a proporcionar una fuente alternativa de energía para las familias locales, promoviendo un uso más eficiente de los recursos disponibles (MSPGlobal, 2020).

Estas acciones reflejan el esfuerzo por transitar de un modelo lineal de extracción y desperdicio a uno circular que permita la sostenibilidad y resiliencia de las comunidades costeras del Golfo de México, fomentando un aprovechamiento más consciente y responsable de los recursos disponibles.

2.2 Teorías

Teoría del ecosistema pesquero

La teoría del ecosistema pesquero propone que la gestión de las pesquerías debe basarse en el manejo integral de los ecosistemas marinos, en lugar de enfocarse únicamente en una especie. Esta teoría se enfoca en las interacciones complejas entre las especies, los factores ambientales y las actividades humanas, recalcando la necesidad de abordar la pesca desde una perspectiva que considere todo el ecosistema. En el Golfo de México, esta teoría es particularmente importante debido a la diversidad de especies y la influencia de factores ambientales en la productividad pesquera (Pikitch et al., 2004; NOAA Fisheries, 2021).

La gestión pesquera basada en ecosistemas incluye medidas como la creación de áreas protegidas y la implementación de vedas temporales, que no solo protegen a especies individuales, sino que también preservan las relaciones ecológicas entre las especies y su entorno (Ha, 2024). Este enfoque es relevante en la región del Golfo de México, donde las interacciones entre variables como la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila-a impactan significativamente las dinámicas de las pesquerías comerciales.

Teoría del cambio climático en ecosistemas marinos

La teoría del cambio climático explica cómo el calentamiento global, el aumento de dióxido de carbono y la acidificación de los océanos están afectando la salud de los ecosistemas marinos. Estos cambios han alterado la distribución y abundancia de especies comerciales importantes, como camarones y sardinas, en el Golfo de México (Li et al., 2022; Karnauskas et al., 2015). Las variaciones en la temperatura superficial del mar y otros factores ambientales no solo afectan los ciclos de vida de las especies, sino que también generan patrones migratorios distintos y alteraciones en la disponibilidad de recursos. En este contexto, los estudios que relacionan las condiciones ambientales con la productividad pesquera son esenciales para comprender el impacto del cambio climático y desarrollar estrategias de adaptación efectivas.

Teoría de la sostenibilidad

La teoría de la sostenibilidad establece que las actividades humanas, incluidas las pesquerías, deben gestionarse de manera que puedan mantenerse indefinidamente sin agotar los recursos ni dañar los ecosistemas. Este enfoque se centra en preservar la biodiversidad y la salud de los ecosistemas para asegurar la sostenibilidad de los recursos pesqueros. En el Golfo de México, estrategias de gestión como las vedas, los límites de captura y los enfoques basados en ecosistemas han demostrado ser herramientas eficaces para minimizar el impacto ambiental de las actividades pesqueras (NOAA, 2021; FAO, 2020). Además, la implementación de estas estrategias está alineada con la Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables en México, que busca equilibrar la explotación de recursos con la conservación, especialmente en regiones altamente dependientes de la pesca como Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Yucatán.

Teoría de la economía circular

La teoría de la economía circular sostiene que los recursos deben utilizarse de manera eficiente, minimizando los desechos y maximizando su reutilización. En el contexto de la pesca y la acuicultura en el Golfo de México, esta teoría se aplica mediante el aprovechamiento de descartes pesqueros como fuente de alimento o materia prima para otros productos. Este enfoque no solo reduce el impacto ambiental, sino que también genera beneficios económicos para las comunidades pesqueras (Huo et al., 2020; SpringerLink, 2020).

Cada teoría fundamenta aspectos clave del análisis estadístico propuesto, consolidando un enfoque robusto para abordar las interacciones ambientales y biológicas. Este marco teórico permite contextualizar el impacto de las variables estudiadas en la producción pesquera y acuícola del Golfo de México.

2.3 Antecedentes

El Golfo de México es una región clave para la pesca y la acuicultura por su alta biodiversidad y su peso económico para México y Estados Unidos. A la vez, enfrenta presiones combinadas de cambio climático, sobrepesca, pérdida de hábitat y contaminación. El diagnóstico transfronterizo del Golfo identificó la sobrepesca, la destrucción de hábitats y la contaminación como amenazas principales y subrayó la necesidad de cooperación binacional (IOC-UNESCO et al., 2011). En el uso de datos, varias reevaluaciones advierten que interpretar desembarques agregados como “salud del recurso” puede conducir a errores si no se consideran composición de especies, esfuerzo y cambios de manejo (Hilborn et al., 2007; de Mutsert et al., 2016; Hilborn et al., 2017; Keithly y Roberts, 2017).

Durante las últimas décadas se ha documentado, con series satelitales de más de 30 años, un calentamiento sostenido de la superficie del mar y variaciones de la clorofila-a con estacionalidad marcada e interanualidad asociada a frentes, surgencias y descargas fluviales (Li et al., 2022; Sun et al., 2023). A escala costera, la expansión latitudinal de manglares

hacia el norte sugiere un proceso de tropicalización y cambios en la conectividad de hábitats (Yáñez-Arancibia et al., 2014). Proyecciones regionales estiman temperaturas superficiales entre 29.5 y 31.1 °C hacia finales de siglo durante la temporada de ciclones, con riesgos para ventanas fisiológicas y procesos de reclutamiento (Rivera-Arriaga et al., 2023). En el plano global, años con temperaturas marinas extremas reducen el potencial máximo de captura en torno de 6 por ciento adicional al efecto promedio del calentamiento (Cheung et al., 2021).

Los efectos ambientales muestran respuestas especie-específicas y desfases temporales. En Setúbal, Portugal, la temperatura superficial media anual aumentó 0.9 °C entre 1926 y 2012, con sardina correlacionada negativamente con temperatura y con NAO invernal, mientras lenguado, sepia y pulpo mostraron correlaciones positivas; las correlaciones cruzadas revelaron desfases de 0 a 5 años compatibles con ventanas de reclutamiento (Gamito et al., 2015). En mares de China, la temperatura media de la captura aumentó y presentó rezagos de alrededor de tres años respecto de la temperatura del mar, evidenciando cambios de composición bajo calentamiento (Liang et al., 2018; Cheung et al., 2013).

La productividad primaria se reconoce como pieza central en la dinámica pesquera. En ambientes tropicales insulares se describe una relación inversa temperatura–clorofila-a y rangos preferidos de captura cercanos a 30.75 ± 0.21 °C y 0.31 ± 0.10 mg m⁻³ (dan Teknik et al., 2015). En sistemas de afloramiento como Benguela, bandas costeras de clorofila de 3 a más de 10 mg m⁻³ se asocian a aguas frías de 12–14 °C y a altas densidades de pelágicos (Shannon et al., 1984). A escala de cuenca, series largas y modelos biogeoquímicos muestran que la clorofila-a responder a nutrientes, con el fosfato como impulsor fuerte, y al grado de estratificación y mezcla; además, se relaciona positivamente con la productividad primaria neta y negativamente con el dióxido de carbono disuelto (Sun et al., 2023).

Los estudios que vinculan ambiente y rendimiento pesquero han usado con frecuencia regresión múltiple y variantes no lineales para cuantificar efectos de temperatura y clorofila-a. Los hallazgos tienden a señalar ventanas de mayor rendimiento en lugar de relaciones monótonas. En el Mar de Arafura, con temperaturas entre 24.6 y 28.4 °C y clorofila entre 0.30 y 8.04 mg m⁻³, se describen asociaciones muy fuertes entre clorofila y captura, cercanas a 0.93, y fuertes entre temperatura y captura, cercanas a 0.66 (Welliken et al., 2018). Cuando el objetivo es estimar probabilidad de presencia o éxito operativo, la regresión logística con

predictores satelitales ha permitido delimitar umbrales de productividad; para atunes en Indonesia, la clorofila-a resultó significativa con coeficientes negativos para barrilete y aleta amarilla, formalizando un intervalo útil para la toma de decisiones (Abidin y Marzuki, 2020).

El análisis de series temporales se ha usado para separar estacionalidad, tendencia y señal interanual y para construir pronósticos. Con descomposiciones estacionales, funciones de autocorrelación y correlaciones cruzadas se han descrito ciclos de clorofila vinculados a mezcla, estratificación y nutrientes (Sun et al., 2023). Con registros largos y homogéneos, ARIMA y SARIMA, junto con armónicos estacionales, han servido para pronosticar variables ambientales a horizontes cortos de decisión; en aplicaciones operativas, pronósticos a 10 días basados en estacionalidad histórica mostraron precisión competitiva frente a modelos forzados, evaluando explícitamente los errores respecto de umbrales críticos (Hague y Patterson, 2014). A escala regional, análisis reproducibles de series armonizadas de captura detectan cambios de régimen y heterogeneidad espacial y temporal, dejando claro que las tendencias dependen de composición de especies y manejo además del ambiente (Essington et al., 2013; Free et al., 2018).

La evaluación a múltiples especies se ha apoyado en marcos ecosistémicos. En el Golfo de México se ha desarrollado un portafolio de modelos que integra Ecopath con Ecosim y Ecospace, Atlantis y OSMOSE, útiles para estimar mortalidades por talla, simular efectos acumulativos de pesca y ambiente y realizar evaluaciones de estrategia de manejo con cuotas y eventos episódicos de mortalidad. Estos estudios documentan supuestos, calibraciones y análisis de sensibilidad (NOAA, 2016; Grüss et al., 2015; Grüss et al., 2016a; Grüss et al., 2016b; Grüss et al., 2016c; Farmer et al., 2016).

Los impactos sobre poblaciones explotadas se han cuantificado con modelos de hábitat acoplados a proyecciones climáticas. Para el atún rojo del Golfo se anticipó contracción del hábitat de desove bajo calentamiento sostenido, usando predictores ambientales como temperatura, salinidad y frentes, con validación cruzada espacial (Muhling et al., 2011). En la Sonda de Campeche, un análisis retrospectivo combinó series de desembarques con información ambiental y de manejo y mostró que la convergencia de cambio ambiental y esfuerzo inadecuado contribuyó al colapso del camarón rosado (Arreguín-Sánchez, 2009).

Los contextos sociales y económicos condicionan la respuesta del sistema. En Campeche se ha mostrado que el aprovechamiento de subproductos reduce desperdicios y genera ingresos complementarios, en consonancia con propuestas de economía circular (Adams et al., 2004; Soto et al., 2008; Bautista-Ortega et al., 2021). La pesca incidental afecta a especies no objetivo, incluidos tiburones y rayas de baja fecundidad, lo que requiere regulación específica (López-Martínez et al., 2010; Smith et al., 2009). El conocimiento ecológico local de pescadores que reportan menor disponibilidad, temporadas alteradas y cambios en corrientes es consistente con la señal ambiental y conviene integrarlo a la vigilancia y la toma de decisiones (Reyes-Grande et al., 2020; Núñez-Márquez, 2014; Díaz-Uribe et al., 2013).

Las implicaciones metodológicas apuntan a varios cuidados analíticos. Las respuestas ambiente–captura suelen ser curvilíneas y con desfases temporales, de modo que un ajuste estrictamente lineal puede subestimar efectos o introducir sesgos (dan Teknik et al., 2015; Gamito et al., 2015). La varianza no constante y las colas en los residuos son frecuentes, por lo que es útil considerar errores estándar robustos o familias no normales cuando corresponda (Cheung et al., 2021). Las series de desembarques, sin esfuerzo real ni composición de especies, pueden llevar a diagnósticos erróneos, por ejemplo, interpretaciones de colapso, y deben contextualizarse con indicadores de esfuerzo, selectividad y regulación (Hilborn et al., 2007; de Mutsert et al., 2016; Hilborn et al., 2017; Keithly y Roberts, 2017). Para pronóstico, ARIMA y SARIMA funcionan mejor con series largas y cercanas a la estacionariedad; la no estacionariedad climática hace necesarias recalibraciones frecuentes y la comunicación explícita de la incertidumbre (Hague y Patterson, 2014). En aplicaciones operativas, la observación remota aporta umbrales útiles, como clorofila-a superior a 0.2 mg m^{-3} , y mapas de ayuda a la pesca que han reducido entre 25 y 50 por ciento el tiempo de búsqueda; además, aprendizajes recientes con visión computacional permiten identificar frentes, anomalías térmicas y señales de mezcla y estratificación con valor para la localización de hábitats productivos (Klemas, 2013; Bhattacharya et al., 2022; Lin et al., 2023).

En conjunto, la evidencia indica que las pesquerías del Golfo responden a forzantes físicos y biogeoquímicos que operan a distintas escalas, con efectos no lineales y a menudo desfasados en el tiempo, y que su interpretación exige marcos estadísticos explícitos y cuidadosos en supuestos. Los estudios revisados muestran que la combinación de modelos de regresión

(lineales y no lineales), análisis de series temporales y, cuando procede, enfoques ARIMA/SARIMA y modelos ecosistémicos, ofrece una ruta sólida para separar estacionalidad, tendencia y variación interanual, y para relacionar temperatura y clorofila con el rendimiento, siempre considerando la calidad de los datos y el papel del esfuerzo de pesca. Este trabajo se inserta en ese marco: analiza de manera conjunta temperatura superficial del mar y clorofila-a, contrasta patrones espaciales y estacionales, y aplica controles y diagnósticos estadísticos para sostener inferencias prudentes a partir de series de desembarques, integrando, cuando es pertinente, información ambiental observada por satélite y la experiencia de estudios previos.

3. Materiales y métodos

3.1 Tipo de estudio

El presente estudio adopta un diseño no experimental, longitudinal y correlacional, debido a que no es posible controlar o modificar las variables independientes de interés, como la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila-a. En su lugar, se analizaron datos históricos recolectados entre 2013 y 2022. Este enfoque es adecuado para evaluar la relación entre las variables ambientales seleccionadas y la producción pesquera en los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Yucatán. La naturaleza longitudinal del diseño permitió analizar cambios a lo largo del tiempo, mientras que el enfoque correlacional busca identificar relaciones significativas entre las variables. Este diseño no experimental es adecuado debido a la naturaleza de los datos disponibles y la imposibilidad de manipular directamente las condiciones ambientales, que son fenómenos naturales no controlables. En su lugar, se hace uso de datos observacionales que permiten explorar cómo estas variables influyen en la producción pesquera, asegurando una alta validez ecológica y la relevancia de los resultados en un contexto real.

3.2 Población objetivo

La población objeto de estudio está constituida por las principales especies pesqueras del Golfo de México, incluyendo especies como el camarón, la sardina y robalo, las cuales son clave tanto económica como ecológicamente para la región. Se seleccionaron estas especies ya que reflejan la importancia económica y ecológica de la pesca en el Golfo de México. La sardina, con el mayor volumen de captura, es fundamental tanto para la economía como para la salud del ecosistema, ya que conecta la productividad primaria con la abundancia de recursos para otras especies. El camarón es crucial por su alto valor económico, que beneficia a muchas comunidades costeras, y también porque responde sensiblemente a cambios en la temperatura y salinidad, lo que lo convierte en un indicador de las condiciones del ecosistema. El robalo, por otro lado, es una especie esencial para la pesca ribereña, de la cual dependen muchas familias para su sustento. Su capacidad de vivir en diferentes tipos de aguas permite evaluar cómo los cambios en el ambiente impactan a especies en distintos hábitats. Al considerar estas tres especies, se logra una visión integral del impacto de las variables

ambientales tanto en la pesca industrial como en la artesanal, lo cual es clave para diseñar estrategias sostenibles de manejo en la región.

Los datos abarcan un total de 111,108 registros de producción pesquera distribuidos entre los cuatro estados estudiados durante el periodo 2013-2022. Estos registros se complementan con datos ambientales que incluyen 103,680 mediciones horarias de temperatura superficial del mar, promediadas por mes, y 4,320 mediciones diarias de concentración de clorofila-a, también promediadas por mes. Las especies seleccionadas representan pilares de la economía pesquera en el Golfo de México y reflejan patrones ecológicos clave que justifican su análisis. Estas especies no solo tienen un valor económico significativo, sino que también son indicadores de la salud de los ecosistemas marinos de la región. Además, para evitar que la estacionalidad y la heterogeneidad espacial distorsionaran las asociaciones ambiente–capturas, se incorporaron variables de control en los modelos: Mes (enero–diciembre) para la estacionalidad, Estado (Veracruz, Tabasco, Campeche, Tamaulipas y Yucatán) y un índice de Tiempo (mes consecutivo) para la tendencia de largo plazo.

Tabla 1. Variables, definiciones y unidades empleadas en el análisis (2013–2022)

Variable	Definición conceptual	Mediciones y unidades	Tipo de variable	Escala de medición
Temperatura superficial	Temperatura promedio diaria del agua en superficie	Mediciones horarias agregadas como promedios mensuales en °C	Cuantitativa	Razón
Concentración de clorofila-a	Cantidad de clorofila-a en la superficie marina	Mediciones diarias agregadas como promedios mensuales en mg/m ³	Cuantitativa	Razón
Producción pesquera	Volumen de especies capturadas	Toneladas desembarcadas reportadas en los anuarios estadísticos	Cuantitativa	Razón

3.3 Análisis de datos

El procesamiento inició con la depuración de los archivos de captura y de variables ambientales. Se homologaron los nombres de las columnas, se filtró el periodo 2013–2022, se convirtieron los pesos de kilogramos a toneladas y se normalizaron las claves de estado y mes. Las bases de datos se integraron mediante la combinación por estado, año y mes; posteriormente, se verificó la consistencia de rangos y unidades. Debido a la baja proporción de datos faltantes y a la ausencia de un patrón evidente, se aplicó eliminación por lista. Todo el procesamiento y la elaboración de figuras se realizaron en MATLAB versión R2024a (The MathWorks, Inc., 2024).

Se efectuó un análisis exploratorio para identificar patrones y valores atípicos. Este incluyó: series temporales, diagramas de dispersión de capturas frente a temperatura y clorofila-a, un diagrama tridimensional capturas–temperatura–clorofila, diagramas de caja (boxplots) por estado y por mes, así como un mapa de calor año–mes de capturas promedio. Estas visualizaciones permitieron describir la variabilidad espacial y la estacionalidad del sistema, y sirvieron de base para orientar la especificación de los modelos.

Adicionalmente, se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANVA) para evaluar diferencias en la producción mensual desembarcada entre estados, siguiendo los procedimientos descritos por Steel y Torrie (1980) y Sokal y Rohlf (2012). Este análisis permitió determinar si existían variaciones estadísticamente significativas en las capturas promedio según la localización geográfica.

Para formalizar las asociaciones se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple, utilizando como variable de respuesta la producción mensual desembarcada y como predictores la temperatura superficial del mar, la concentración de clorofila-a, el estado, el mes y un índice de tiempo mensual. El estado y el mes se incluyeron como efectos fijos para controlar la heterogeneidad espacial y la estacionalidad, mientras que el índice de tiempo representó la tendencia de largo plazo. Con base en diagnósticos preliminares de normalidad y heterocedasticidad, la variable respuesta se transformó a logaritmo base 10, lo que permitió interpretar los coeficientes de manera multiplicativa sobre la escala original de capturas.

La bondad de ajuste se evaluó mediante el R^2 ajustado y los criterios de información AIC y BIC (Akaike, 1974; Schwarz, 1978). La capacidad predictiva se midió con validación cruzada de 10 pliegues. Como análisis de sensibilidad, se estimó también una versión robusta del modelo. El esquema adoptado es afín al reportado por Ruelas-Mesa et al. (2025), a partir de una exploración de los datos y avanzar hacia un modelo multivariable en un marco espacio-temporal.

La verificación de supuestos incluyó pruebas y diagnósticos gráficos: normalidad de residuos (prueba de Lilliefors y gráfico Q-Q), independencia (Durbin-Watson), homocedasticidad (prueba de Breusch-Pagan sobre los residuos al cuadrado) y colinealidad entre predictores continuos mediante factores de inflación de la varianza (VIF). La especificación funcional se evaluó con la prueba de Ramsey RESET. Asimismo, se inspeccionaron el histograma de residuos y el gráfico de residuos frente a valores ajustados en la escala logarítmica. La detección de observaciones influyentes se basó en residuos estudentizados con corrección de Bonferroni y en la distancia de Cook.

Las técnicas aplicadas están fundamentadas en literatura estadística clásica y aplicada, como Steel y Torrie (1980), Sokal y Rohlf (2012) y Kutner et al. (2005), y en los fundamentos del diseño experimental de Fisher (1925, 1935), entre otros.

4. Resultados

Las series mensuales 2013–2022 reúnen 564 observaciones (cinco estados a lo largo de diez años, con algunos meses faltantes). La dinámica interanual muestra un ascenso general hasta 2016–2018, seguido de un descenso marcado en 2019–2021 y recuperación parcial en 2022. En la variación interanual sobresalen dos picos en Veracruz, identificados como atípicos: 11,005.2 t y 10,251.7 t, ambos en noviembre. Por estado, Campeche sostiene volúmenes altos y relativamente estables durante todo el periodo; Tabasco mantiene los niveles más bajos de manera consistente; Yucatán alterna meses bajos con eventos muy altos; y Tamaulipas se ubica en el rango intermedio. Estos rasgos se aprecian en la serie multianual por estado (Figura 1).

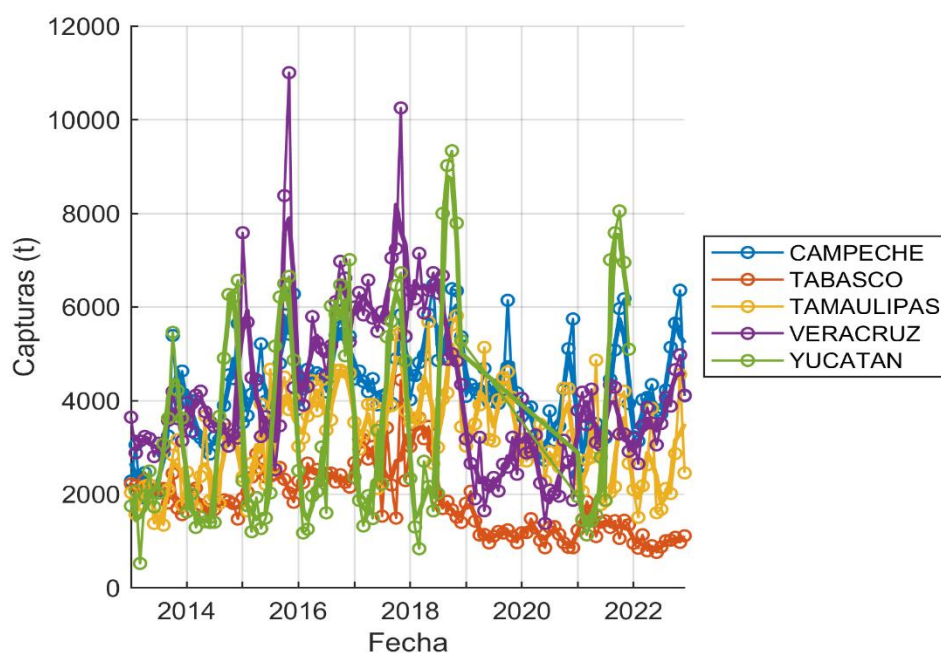


Figura 1. Serie temporal de capturas mensuales por estado (2013–2022)

En el plano ambiental, la relación bivariada entre capturas y clorofila-a coloreada por temperatura revela dos regímenes: (i) un bloque denso con clorofila entre 0.08 y 0.22 mg m^{-3} y capturas típicas de $3,000$ a $5,000 \text{ t}$, y (ii) un conjunto con clorofila por arriba de 0.30 mg m^{-3} donde la mayoría de las capturas cae por debajo de $2,500 \text{ t}$ y coincide con temperaturas altas ($29\text{--}31^\circ\text{C}$). En conjunto, el máximo rendimiento aparece asociado a clorofila baja-media bajo condiciones térmicas moderadas. (Figura 2) Visto desde la temperatura, los valores de captura más altos se concentran sobre todo entre 24 y 28°C ; por encima de 30°C , la nube de puntos se comprime y rara vez supera $3\,000\text{--}4\,000 \text{ t}$ (Figura 3).

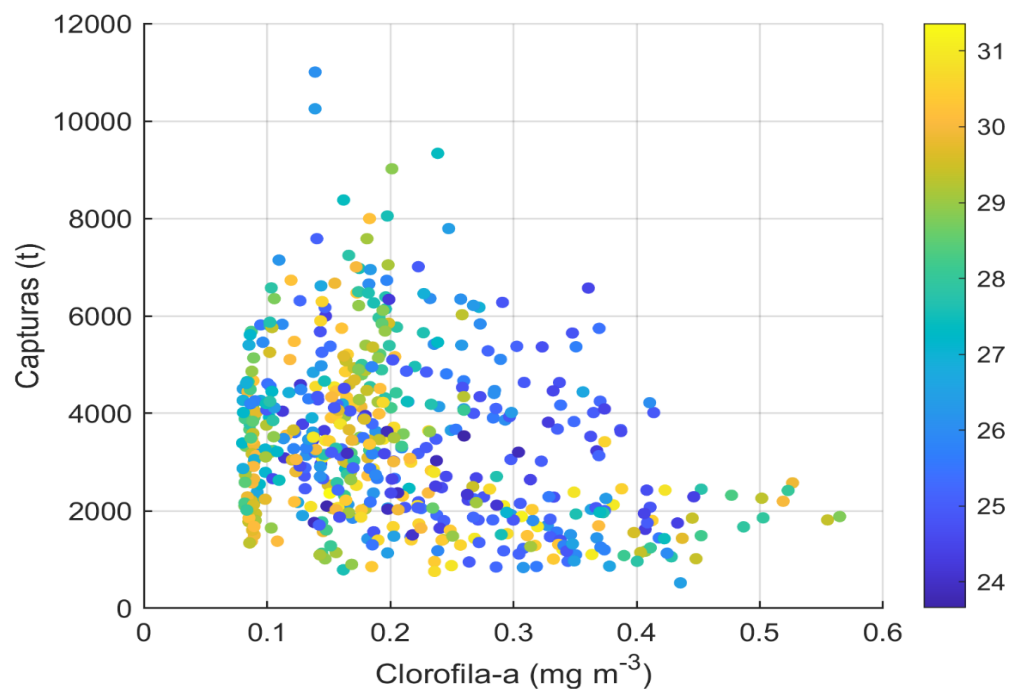


Figura 2. Relación entre capturas (t) y clorofila-a (mg m⁻³); el color representa la temperatura superficial del mar (°C).

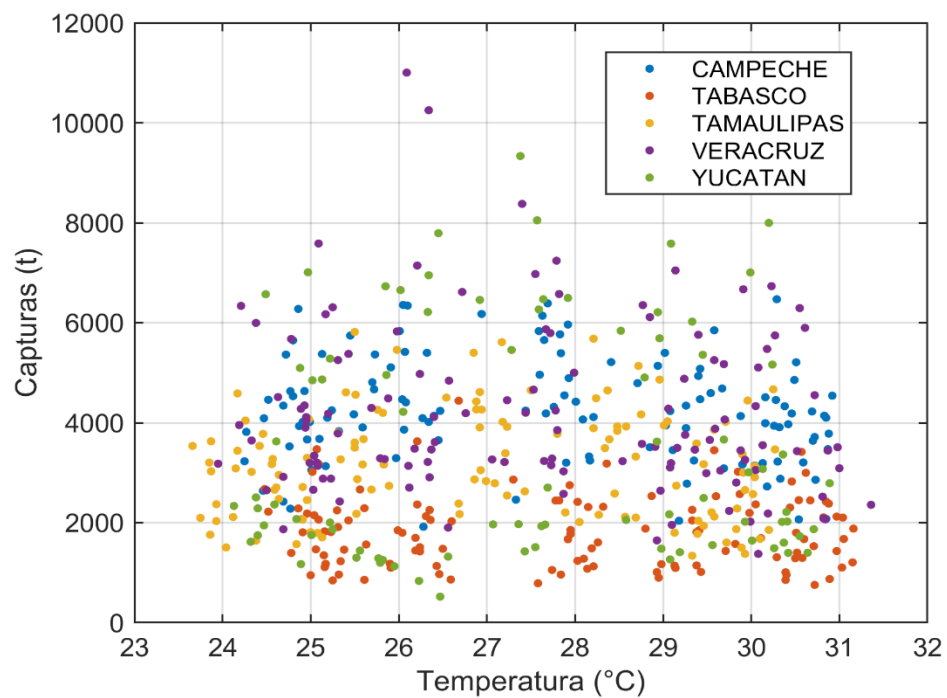


Figura 3. Relación entre capturas (t) y temperatura superficial del mar (°C), diferenciada por estado.

Los niveles altos corresponden a Campeche, Veracruz y Yucatán; después, Tamaulipas; y Tabasco en el nivel más bajo. Las medianas visuales son cercanas a 4,100 t (Campeche), 3,600 t (Veracruz), 3,100 t (Tamaulipas), 2,300 t (Yucatán) y 1,800 t (Tabasco). El análisis formal confirma diferencias globales entre estados mediante ANVA de un factor ($F(4, 559) = 57.33, p < 0.001$). En las comparaciones de Tukey, los contrastes más amplios corresponden a Campeche–Tabasco (diferencia media 2,067 t, $p < 0.001$) y Campeche–Tamaulipas (1,665 t, $p < 0.001$), mientras que Campeche–Veracruz y Veracruz–Yucatán no muestran diferencias estadísticamente significativas (Tukey, 1949; véase Figura 5)

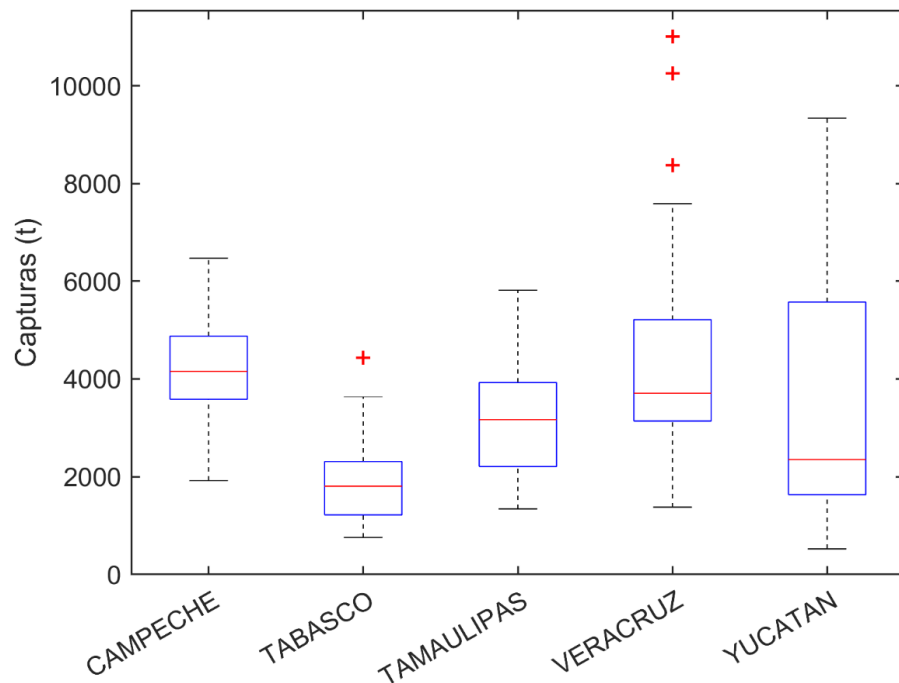


Figura 4. Distribución de capturas mensuales por estado

El patrón estacional es claramente creciente hacia el último trimestre del año. Las medianas mensuales (líneas rojas de las cajas) rondan 3,000 t en enero, 2,600 t en febrero y vuelven a

situarse entre 3,100 y 3,400 t en abril–agosto; alcanzan 3,900 t en septiembre, 4,600 t en octubre y 4,500 t en noviembre, con una ligera caída a 3,800 t en diciembre. La dispersión (amplitud intercuartílica) se amplía en octubre–noviembre, consistente con la ocurrencia de eventos pico (Figura 5).

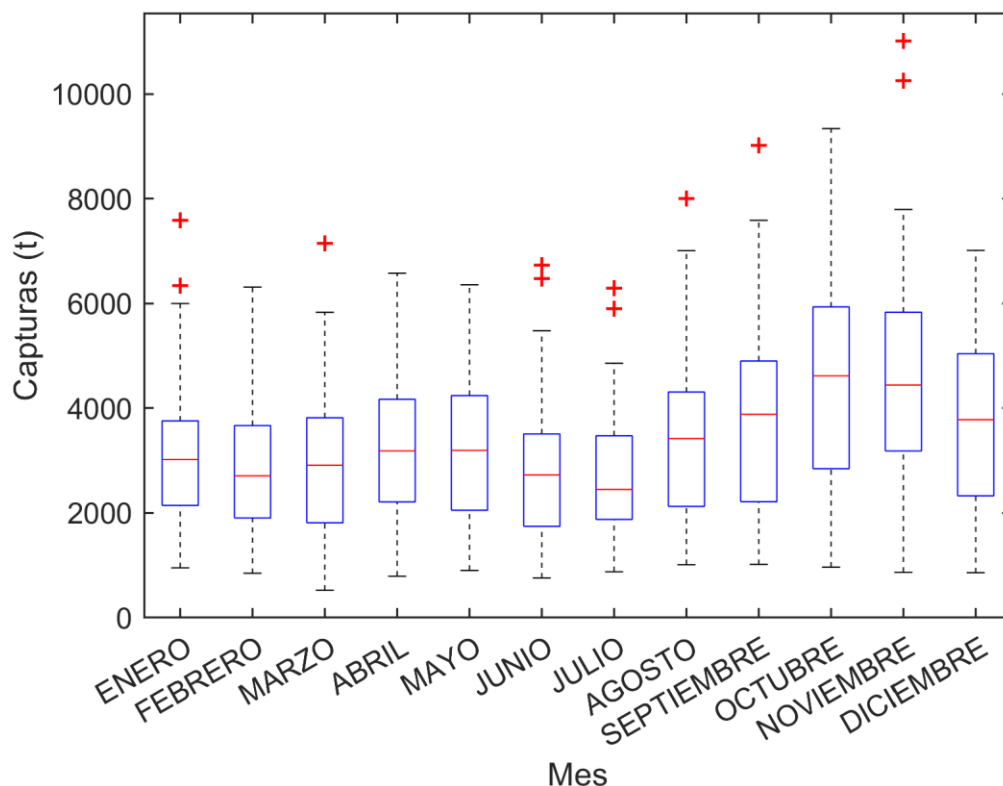


Figura 5. Estacionalidad: capturas mensuales (t) por mes del año para 2013–2022.

Los promedios anuales (Figura 6) sintetizan estos cambios. Veracruz alcanza cerca de 6,500 t en 2017 y desciende a aproximadamente 2,500 t en 2019; Campeche sube hasta alrededor de 5,300 t en 2018 y después baja a cerca de 3,800 t en 2020, con recuperación a 4,300 t en 2022. Tamaulipas marca un máximo próximo a 4,000 t en 2016; Yucatán ronda 4,400 t en 2018 y 4,200 t en 2022; Tabasco pasa de unos 2,000 t en 2013 a 2,800 t en 2017 y termina en torno de 950 t en 2022 (Figura 7). Al acumular 2013–2022, los totales por estado son del orden de 510,000 t (Campeche), 505,000 t (Veracruz), 380,000 t (Tamaulipas), 300,000 t (Yucatán) y 220,000 t (Tabasco) (Figura 7).

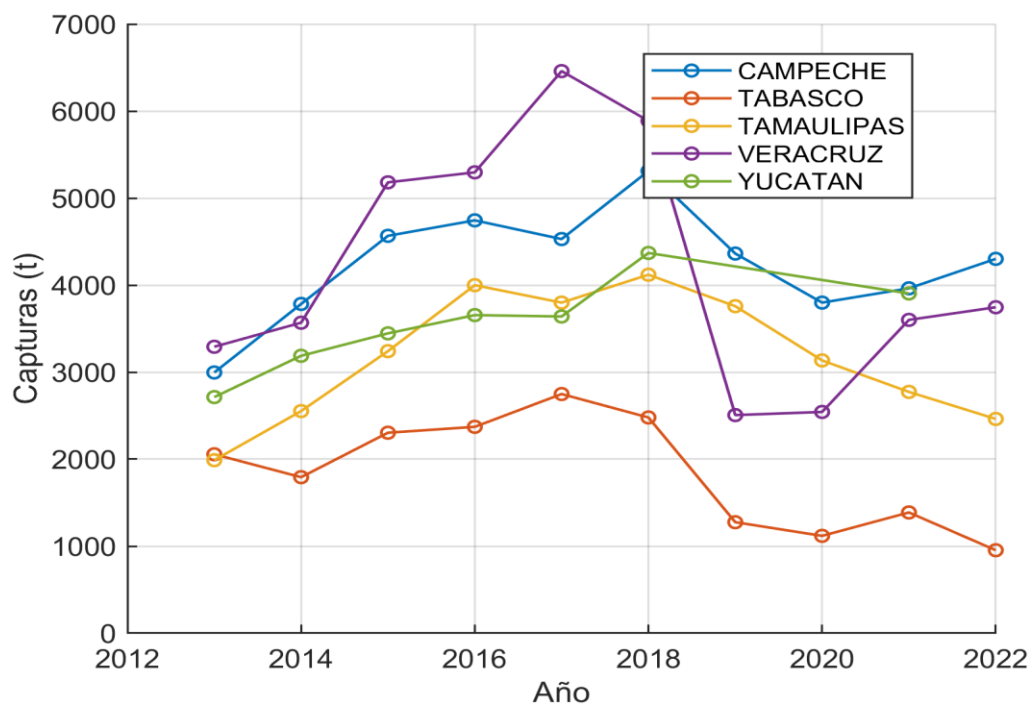


Figura 6. Capturas promedio anuales (t) por estado; puntos muestran la media de cada año.

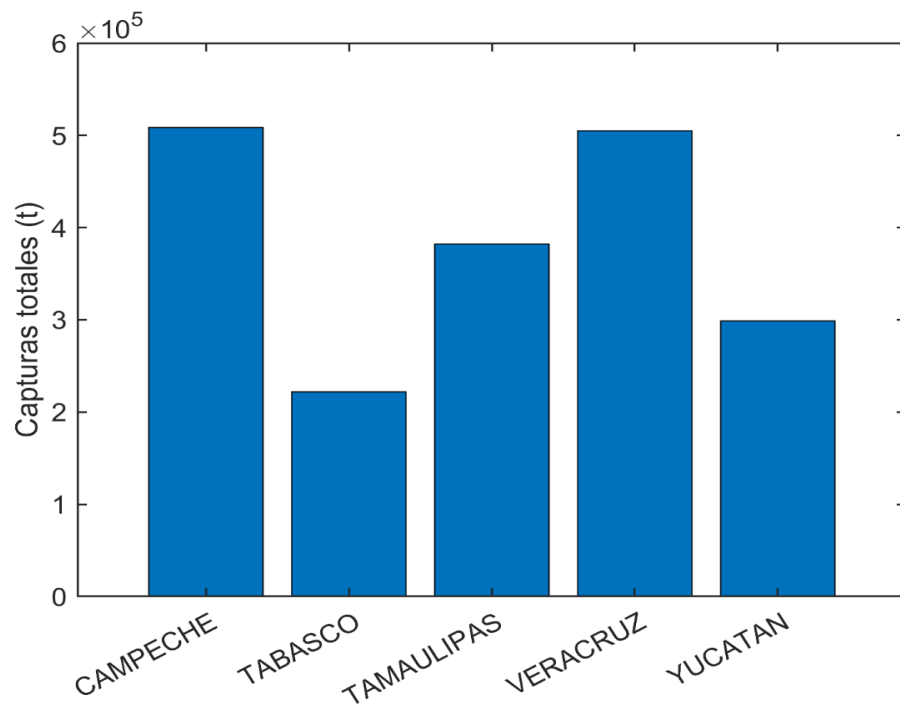


Figura 7. Capturas totales acumuladas (t) por estado en el periodo 2013–2022.

El modelo lineal con controles espaciales (estado), estacionales (mes) y de tendencia temporal ofrece un R^2 ajustado de 0.443 (versión robusta 0.426). En los coeficientes, la temperatura no resulta significativa ($\hat{\beta} = 21.5$, error estándar 174.9, $p = 0.902$), mientras que la clorofila-a mostró un efecto negativo y significativo ($\hat{\beta} = -5\,628.0$, error estándar 804.0, $p < 0.001$). Tomando a Campeche como referencia, Tabasco y Tamaulipas presentan efectos negativos: Tabasco $-2\,067.2$ t ($p < 0.001$), Tamaulipas $-1\,664.9$ t ($p < 0.001$), en tanto que Veracruz -548.3 t ($p = 0.0022$) y Yucatán -503.7 t ($p = 0.0063$) también se ubican por debajo de Campeche. Por mes, noviembre presenta un incremento significativo $1,148.6$ t ($p = 0.0022$) y octubre un efecto marginal $1,120.5$ t ($p = 0.058$). La tendencia lineal en el tiempo no fue significativa ($\hat{\beta} = -1.77$, $p = 0.259$). La comparación de especificaciones mediante AIC y BIC respaldó el modelo reportado (Akaike, 1974; Schwarz, 1978).

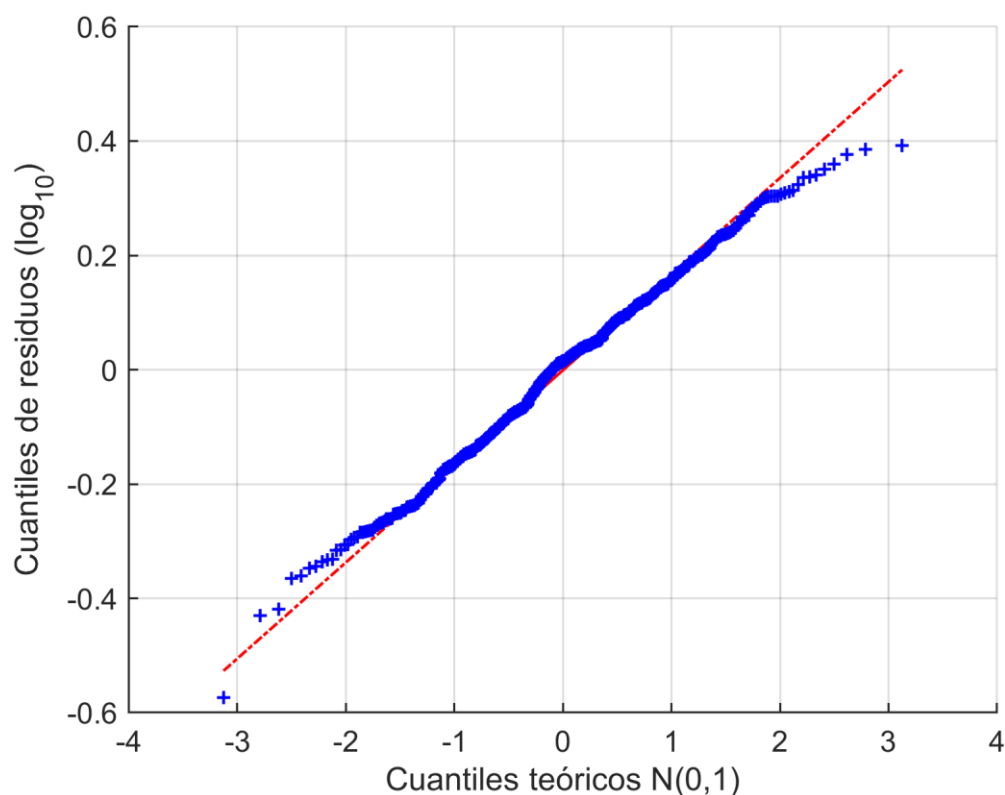


Figura 8. QQ-plot de los residuos del modelo con $\log_{10}(\text{capturas})$.

Tras transformar la variable de capturas a logaritmo base 10, los diagnósticos mejoran de forma visible. El gráfico Q–Q (Figura 8) muestra a los residuos alineados con la recta teórica en la mayor parte de la amplitud, con desviaciones leves en las colas que no alteran el patrón central. El histograma (Figura 9) se concentra alrededor de cero y es más simétrico que en la escala original, lo que es consistente con una aproximación razonable a normalidad. El diagrama de residuos frente a valores ajustados en la misma escala logarítmica (Figura 10) no presenta forma de embudo ni tendencia clara, por lo que la varianza residual luce aproximadamente constante a lo largo del rango de predicción. En conjunto, estas evidencias respaldan el uso del modelo lineal sobre capturas transformadas, con interpretaciones en términos relativos: cambios en los predictores se traducen en multiplicadores sobre las capturas, dado que una diferencia de 0.1 en $\log_{10}$ equivale aproximadamente a 26 % en la escala original.

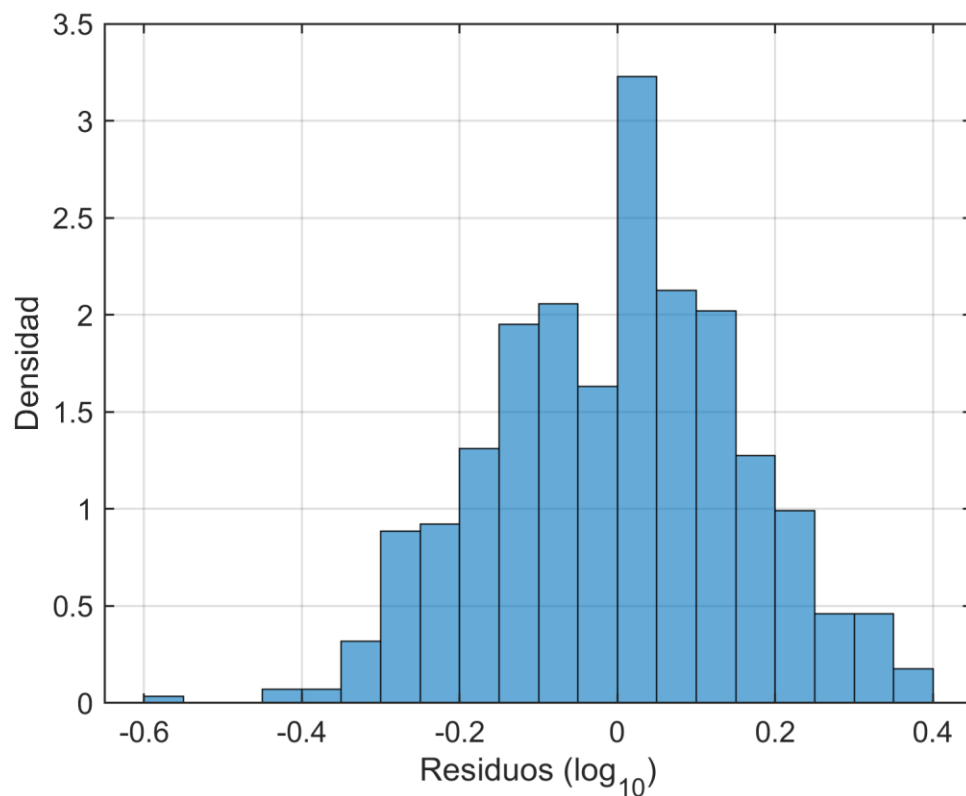


Figura 9. Histograma de los residuos del modelo lineal ajustado con $\log_{10}(\text{capturas})$ como variable respuesta.

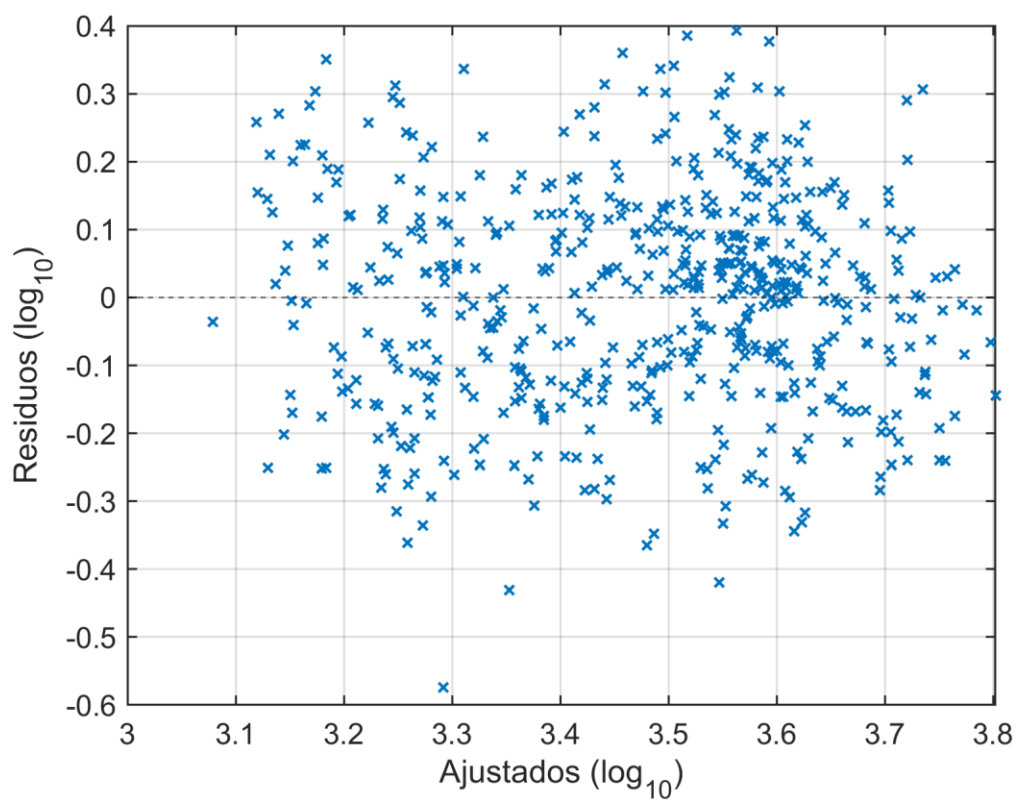


Figura 10. Residuos frente a valores ajustados del modelo con $\log_{10}(\text{capturas})$.

Discusión

Los resultados evidencian que la producción pesquera en el Golfo de México (2013–2022) presenta una marcada variabilidad espacial y temporal, con pulsos estacionales y una influencia no estrictamente lineal de la temperatura superficial del mar (TSM) y la clorofila-a (Chl-a). En la serie temporal se observan picos recurrentes intercalados con descensos y un quiebre entre 2019 y 2020 con recuperación parcial hacia 2022, patrón compatible con forzamientos ambientales y operativos que varían entre años (Figura 1). A nivel estacional, los resúmenes mensuales muestran máximos en septiembre–noviembre (por ejemplo, noviembre de 2017 con 6,543 t, octubre de 2018 con 5,602 t, noviembre de 2015 con 5,783 t) y mínimos frecuentes en junio–julio (por ejemplo, junio de 2020 con 1,810 t), lo que coincide con pulsos de productividad ligados a nortes, lluvias y descargas fluviales (Figura 5). Esto es coherente con el Transboundary Diagnostic Analysis del Golfo, que resalta el papel de la eutrofización, las descargas continentales y la dinámica de surgencias costeras como motores de la productividad regional (IOC-UNESCO et al., 2011).

En los controles ambientales, la relación entre TSM y capturas es negativa en promedio, pero no lineal: la nube de puntos sugiere una ventana de mayor rendimiento entre 27 y 30 °C, con disminuciones hacia los extremos fríos y cálidos (Figura 3). La Chl-a muestra una asociación positiva con las capturas hasta aproximadamente 0.15–0.35 mg m⁻³; por encima de ese rango la señal se vuelve incierta o tiende a saturarse (Figura 2). La combinación de TSM moderada con productividad intermedia aparece de manera consistente en nuestras figuras (Figuras 2 y 3) y coincide con evidencia que documenta respuestas no lineales y ventanas ambientales acotadas para maximizar rendimientos, así como desfases ligados al reclutamiento (Cheung et al., 2013; Gamito et al., 2015; Nurdin et al., 2015; Sun et al., 2023). Bajo escenarios de calentamiento, con TSM proyectadas de 29.5 a 31.1 °C hacia finales de siglo durante la temporada de ciclones, es previsible que el sistema se desplace fuera de esa ventana óptima, afectando especies sensibles a temperatura y salinidad, como el camarón rosado, tal como se ha documentado (Rivera-Arriaga et al., 2023; Arreguín-Sánchez, 2009).

Paralelos internacionales refuerzan este marco: la Temperatura Media de la Captura mostró tropicalización de capturas en los mares de China, con incrementos de 0.41 °C por década y 0.22 °C por década y rezagos de alrededor de tres años respecto a la TSM (Liang et al., 2018;

Cheung et al., 2013). En Setúbal (Portugal) se registró un aumento de 0.9 °C de TSM entre 1926 y 2012 y respuestas especie-específicas: sardina con correlación negativa con TSM ($\rho = -0.60$) y NAO invernal ($\rho = -0.36$), mientras que lenguado, sepia y pulpo se correlacionaron positivamente ($\rho = 0.37, 0.32$ y 0.45), con correlaciones cruzadas que delatan ventanas de reclutamiento (Gamito et al., 2015). En el Golfo se ha reportado, además, expansión latitudinal de manglares hacia el norte, indicador de tropicalización del ecosistema (Yáñez-Arancibia et al., 2014), con implicaciones en conectividad, composición de comunidades y tasas de reclutamiento.

Desde la productividad, en ambientes tropicales insulares se ha observado correlación negativa entre TSM y Chl-a ($R = -0.54$) y rangos preferidos de captura con TSM alrededor de 30.75 ± 0.21 °C y Chl-a alrededor de 0.31 ± 0.10 mg m⁻³ (Nurdin et al., 2015). En sistemas de afloramiento como Benguela, bandas costeras de 3 a más de 10 mg m⁻³ de Chl-a acompañan aguas frías (12–14 °C) y altas densidades de pelágicos (Shannon et al., 1984). A escalas de cuenca, la Chl-a responde a nutrientes, con el fosfato como promotor fuerte, y a la estratificación y mezcla, correlacionándose positivamente con productividad primaria neta y negativamente con pCO₂ (Sun et al., 2023). En el Mar de Arábia (TSM 24.6–28.4 °C; Chl-a 0.30–8.04 mg m⁻³) se han reportado correlaciones muy fuertes entre Chl-a y captura ($r = 0.934$) y fuertes entre TSM y captura ($r = 0.664$) (Welliken et al., 2018). En el norte del Golfo, la hipoxia estacional (< 2 mg L⁻¹) es un riesgo reconocido, aunque sus efectos sobre el nekton dependen de la concurrencia de nutrientes, estratificación, esfuerzo y hábitats, complejizando la relación productividad–rendimiento (Chesney y Baltz, 2001). Además, eventos térmicos extremos disminuyen el potencial máximo de captura alrededor de 6 por ciento adicional al efecto medio del calentamiento (Cheung et al., 2021), lo que justifica planes de adaptación a extremos cálidos además de la gestión frente a tendencias graduales.

A escala interanual, los promedios estatales aumentan hasta 2017–2018, descienden con fuerza en 2019–2020 y repuntan en 2021–2022 (Figura 6). En la comparación espacial, los boxplots describen dispersión distinta entre estados: Veracruz y Campeche con medianas altas y colas superiores largas; Yucatán con variabilidad elevada y meses extremadamente altos; Tamaulipas en niveles intermedios; Tabasco más bajo y estable (Figura 4). El análisis formal confirmó diferencias globales entre estados mediante ANOVA de un factor ($F(4, 559) = 57.33, p < 0.001$); en las comparaciones de Tukey, Tabasco difiere de los demás, mientras

que ciertos pares, como Campeche con Veracruz, no presentan diferencias significativas. Los acumulados 2013–2021 son consistentes con esa lectura: Campeche con 510,000 t, Veracruz con 505,000 t, Tamaulipas con 380,000 t, Yucatán con 300,000 t y Tabasco con 220,000 t (Figura 7). Además del ambiente, la literatura sugiere que el esfuerzo, la estructura de flota y las prácticas de manejo modulan la señal espacial, y que una mayor variabilidad en la presión de pesca incrementa la sensibilidad al ambiente y altera la estructura de tallas (Tu et al., 2018; Lluch-Cota y Ponce-Díaz, 2000).

Estos patrones son coherentes con una dinámica físico-biológica donde procesos como frentes térmicos, surgencias y descargas fluviales explican la distribución de Chl-a y, en consecuencia, de las capturas. Esta base físico-biológica se traduce en respuestas tróficas: cuando varía el forzamiento físico y la productividad, cambia el fitoplancton y, con él, la disponibilidad de alimento para zooplancton, peces forrajeros y depredadores, alterando distribución, abundancia y tallas explotadas (Gutiérrez-Estrada et al., 2022). Entre las especies bénticas, como el ostión, pequeñas variaciones de temperatura y salinidad durante la reproducción afectan el éxito larval y el reclutamiento (Rivera-Arriaga et al., 2023). También se observan compensaciones dentro de pelágicos: por ejemplo, la captura por unidad de esfuerzo de sardina se correlacionó negativamente con la de *Scomber colias* ($\rho = -0.41$; $p < 0.05$) y desde 2,000 aumentó *S. colias* mientras disminuyó la sardina, lo que sugiere reconfiguración de la composición de captura bajo calentamiento y variabilidad climática (Gamito et al., 2015).

Limitaciones y pasos siguientes. Tras ajustar el modelo en escala log10, los diagnósticos muestran mejoras claras en los supuestos: el QQ-plot de los residuos presenta alineación casi lineal con desviaciones leves en colas (Figura 8), el histograma es aproximadamente simétrico alrededor de cero (Figura 9) y el gráfico de residuos frente a valores ajustados no exhibe patrón en abanico, lo que indica varianza más estable (Figura 10). Persisten algunos meses atípicos de Veracruz con capturas superiores a 10,000 t y, dado que se observan relaciones no lineales en los exploratorios, trabajos futuros pueden probar modelos más flexibles como aditivos generalizados o aproximaciones semiparamétricas que capten curvaturas y posibles desfases entre ambiente y captura. Operativamente, el monitoreo conjunto de TSM, Chl-a y señales físicas detectables con teledetección, apoyado por herramientas de análisis automatizado, puede mejorar la localización de zonas productivas y

reducir tiempos de búsqueda en la flota (Bhattacharya et al., 2022; Lin et al., 2023; Klemas, 2013).

Finalmente, este trabajo respalda la importancia de mantener monitoreo continuo de TSM y Chl-a e integrar salinidad, oxígeno disuelto, esfuerzo real de pesca y nivel del mar, dentro de un enfoque de sostenibilidad que reconozca los límites ecológicos del sistema y fortalezca la resiliencia socioeconómica de las comunidades costeras (Mina-Rivas, 2023). La incorporación del conocimiento ecológico local, con pescadores que señalan menor productividad asociada a calor excesivo, falta de lluvias y cambios en corrientes, puede aumentar la pertinencia de las acciones de manejo (Reyes-Grande et al., 2020). En conjunto, los hallazgos sugieren que las capturas máximas emergen cuando coinciden TSM moderadas (27–30 °C) y Chl-a intermedia (0.15–0.35 mg m⁻³) (Figuras 2 y 3), con picos otoñales (Figura 5) y contrastes espaciales consistentes con las distribuciones y totales por estado (Figuras 4 y 7).

Conclusiones

Este estudio evaluó cómo la temperatura superficial del mar y la clorofila-a se relacionan con la producción pesquera en el Golfo de México entre 2013 y 2022. Se confirmó una variabilidad marcada en el espacio y en el tiempo: la serie temporal muestra pulsos notorios en otoño y un descenso entre 2019 y 2020, con recuperación parcial en 2021–2022. En la estacionalidad, los máximos se concentran de septiembre a noviembre; por ejemplo, noviembre de 2017 alcanzó 6,543 t, octubre de 2018 llegó a 5,602 t y noviembre de 2015 a 5,783 t, mientras que los mínimos aparecen con mayor frecuencia en junio–julio (junio de 2020 registró 1,810 t). Estos patrones son coherentes con la influencia de nortes, lluvias y descargas fluviales que modulan la productividad costera.

Las relaciones ambiente-captura no fueron estrictamente lineales. En promedio, las capturas disminuyeron cuando la temperatura se alejó de un intervalo intermedio y aumentaron con la productividad hasta un punto. Las figuras sugieren una ventana de mejor rendimiento con temperaturas entre 27 y 30 °C y clorofila-a entre 0.15 y 0.35 mg m⁻³; fuera de esos rangos, las ganancias tienden a debilitarse. Esto respalda la importancia de procesos físicos (frentes, surgencias y descargas) que proveen nutrientes y estructuran los hábitats.

En la comparación espacial, los estados mostraron niveles y dispersiones diferentes. Veracruz y Campeche concentraron los mayores volúmenes totales del periodo (alrededor de 505,000 y 510,000 t, respectivamente); Tamaulipas se ubicó en un nivel intermedio (cerca de 380 000 t); Yucatán exhibió gran variabilidad con meses muy altos (en torno de 300,000 t acumulados), y Tabasco se mantuvo como el más bajo (cerca de 220,000 t). Estas diferencias concuerdan con los resúmenes por estado y con el análisis formal de promedios, y probablemente reflejan una combinación de forzamiento ambiental, esfuerzo y composición de especies objetivo.

Desde el punto de vista metodológico, al verificar supuestos con la respuesta transformada a log10, los residuos resultaron aproximadamente normales y sin patrón de abanico, con menor

influencia de valores extremos, lo que mejora la validez de las inferencias del modelo lineal. Aun así, la evidencia visual de curvaturas sugiere explorar en el futuro modelos más flexibles que capten no linealidades y posibles desfases ambiente-captura, reportar errores robustos, y, cuando se busque separar variación espacial y temporal, emplear efectos mixtos; con series largas y homogéneas, se recomienda evaluar modelos de series de tiempo para propósitos de pronóstico.

En cuanto al monitoreo y manejo, los resultados refuerzan que la temperatura y la clorofila-a deben seguirse de manera continua, y que vale la pena incorporar salinidad, oxígeno disuelto, viento, caudales y un indicador más preciso del esfuerzo pesquero (por ejemplo, días de mar, potencia y artes). La integración del conocimiento ecológico local percepciones de pescadores sobre el calor, las lluvias y los cambios de corrientes puede mejorar la pertinencia de las medidas. Finalmente, herramientas de teledetección y análisis automatizado pueden apoyar la localización operativa de zonas productivas y aportar alertas tempranas sobre condiciones favorables o de riesgo, contribuyendo a una gestión adaptativa y a la resiliencia de las comunidades costeras.

Referencias

- Abidin, A. F., & Marzuki, M. I. (2020). Relationship between chlorophyll-a and sea surface temperature to tuna catch in the southern water of Java. *Jurnal Penelitian Sains*, 22(2), 55–68. doi: 10.56064/jps.v22i2.582.
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Arreguín-Sánchez, F., & Arcos-Huitrón, E. (2011). La pesca en México: Estado de la explotación y uso de los ecosistemas. *Hidrobiológica*, 21(3), 431–462.
- Bautista-Ortega, J., Rosales-Martínez, V., Santillán-Fernández, A., Huicab-Pech, Z. G., & Galicia-Galicia, F. (2021). Fisheries discard as an alternative for agricultural feed in the state of Campeche, Mexico. *Ciencia Pesquera*, 29(2), 101–115. doi: <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i14.1805>
- Chávez, E. A. (2010). Influencia ambiental en la pesquería de camarón: factores ambientales y esfuerzo pesquero. En Libro de Pesca: Estudio de Producción de Camarón en el Golfo de México.
- Chesney, E. J., & Baltz, D. M. (2001). The effects of hypoxia on the northern Gulf of Mexico coastal ecosystem: A fisheries perspective. En *Coastal Hypoxia: Consequences for Living Resources and Ecosystems* (pp. 321–354). American Geophysical Union. doi: <https://doi.org/10.1029/CE058p0321>
- Cheung, W. W., & Frölicher, T. L. (2020). Marine heatwaves exacerbate climate change impacts for fisheries in the northeast Pacific. *Scientific Reports*, 10(1), 6678. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63650-z>.
- Cheung, W. W., Frölicher, T. L., Lam, V. W., Oyinlola, M. A., Reygondeau, G., Sumaila, U. R., Wabnitz, C. C., & Watson, R. (2021). Marine high temperature extremes amplify the impacts of climate change on fish and fisheries. *Science Advances*, 7(40), eabh0895. doi: 10.1126/sciadv.abh0895.
- Cheung, W. W., Watson, R., & Pauly, D. (2013). Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature*, 497(7449), 365–368. <https://doi.org/10.1038/nature12156>.

Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA). (2021). Reporte anual de producción pesquera nacional. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca.

Cortés-Gómez, C., Cervantes-Martínez, A., Enseñat-Soberanis, F., & Gutiérrez-Aguirre, M. A. (2022). De la economía lineal al manejo circular: análisis de una propuesta para cooperativas turístico-pesqueras. *Sociedad y ambiente*, (25), 1-30. <https://doi.org/10.31840/sya.vi25.2589>

De Mutsert, K., Steenbeek, J., Lewis, K., Buszowski, J., Cowan, J. H. Jr., & Christensen, V. (2016). Exploring effects of hypoxia on fish and fisheries in the northern Gulf of Mexico using a dynamic spatially explicit ecosystem model. *Ecological Modelling*, 331, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.10.013>

Díaz-Uribe, J. G., Valdez-Ornelas, V. M., Danemann, G. D., Torreblanca-Ramírez, E., Castillo López, A., & Cisneros-Mata, M. A. (2013). Regionalización de la pesca ribereña en el noroeste de México como base práctica para su manejo. *Ciencia Pesquera*, 21(1), 41–54.

FAO. (2020). The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in action. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fisher, R. A. (1925). Statistical methods for research workers. Oliver & Boyd.

Fisher, R. A. (1935). The design of experiments. Macmillan.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Free, C. M., Thorson, J. T., Pinsky, M. L., Oken, K. L., Wiedenmann, J., & Jensen, O. P. (2019). Impacts of historical warming on marine fisheries production. *Science*, 363(6430), 979–983. doi: 10.1126/science.aau1758

Gamito, R., Teixeira, C. M., Costa, M. J., & Cabral, H. N. (2015). Are regional fisheries' catches changing with climate? *Fisheries Research*, 161, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.07.014>.

González-Caro, Á. (2025). Economía circular en el sector de la construcción. Aplicación a las conchas *Acanthocardia tuberculata*.

Ha, L. T. (2024). Achieving a blue economy through the circular initiatives: a path towards sustainable marine living resources. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 13656-13672. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31951-9>.

Hague, M. J., & Patterson, D. A. (2014). Evaluation of statistical river temperature forecast models for fisheries management. *North American Journal of Fisheries Management*, 34(1), 132–146. <https://doi.org/10.1080/02755947.2013.847879>.

Huo, X., Zhao, L., & Li, J. (2020). Evaluation of marine economy influence factors: A top-level factor analysis. *Journal of Coastal Research*, 152–156. <https://doi.org/10.2112/SI106-037.1>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. IPCC.

IOC-UNESCO; UNIDO; Gulf of Mexico LME Project. (2011). Transboundary Diagnostic Analysis of the Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem. Executive Summary. Paris: Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO.

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). An Introduction to Statistical Learning: With Applications in R (2nd ed.). Springer.

Karnauskas, M., Schirripa, M. J., Kelble, C. R., Cook, G. S., & Craig, J. K. (2015). Evidence of climate-driven ecosystem reorganization in the Gulf of Mexico. *Global Change Biology*, 21(7), 2554–2568. <https://doi.org/10.1111/gcb.12894>.

Keithly, W. R. Jr., & Roberts, K. J. (2017). Commercial and recreational fisheries of the Gulf of Mexico. En *Habitats and Biota of the Gulf of Mexico: Before the Deepwater Horizon Oil Spill*. Volume 2 (pp. 1039–1188). Springer.

Kirk, J. T. O. (1994). Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems (2nd ed.). Cambridge University Press.

Klemaš, V. (2013). Fisheries applications of remote sensing: An overview. *Fisheries Research*, 148, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.02.027>.

Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). Applied linear statistical models (5th ed.). McGraw-Hill/Irwin.

Li, G., Wang, Z., & Wang, B. (2022). Multidecade trends of sea surface temperature, chlorophyll-a concentration, and ocean eddies in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 267–287. <https://doi.org/10.3390/rs14153754>.

Liang, C., Xian, W., & Pauly, D. (2018). Impacts of ocean warming on China's fisheries catches: An application of the “mean temperature of the catch” concept. *Frontiers in Marine Science*, 5, 26. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00026>.

MSPGlobal. (2020). Hacia la economía azul sustentable.

Muhling, B. A., Lee, S. K., Lamkin, J. T., & Liu, Y. (2011). Predicting the effects of climate change on bluefin tuna spawning habitat in the Gulf of Mexico. *ICES Journal of Marine Science*, 68(6), 1051–1062. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsr008>.

NOAA Fisheries. (2021). Ecosystems: Evolving Management. NOAA Fisheries.

Núñez-Márquez, G. (2014). Determinación del esfuerzo de pesca de la flota camaronera ribereña en Ciudad del Carmen, Campeche, mediante conteos visuales. *Ciencia Pesquera*, 22(2), 3–17.

Nurdin, S., Mustapha, M. A., Lihan, T., & Abd Ghaffar, M. (2015). Determination of potential fishing grounds of *Rastrelliger kanagurta* using satellite remote sensing and GIS technique. *Sains Malaysiana*, 44(2), 225–232. doi: 10.17576/jsm-2015-4402-09.

Ñiquen, M., & Bouchon, M. (2004). Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6–9), 563–574. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.03.001>.

Pikitch, E. K., Santora, C., Babcock, E. A., Bakun, A., Bonfil, R., Conover, D. O., Dayton, P. (2004). Ecosystem-based fishery management. *Science*, 305(5682), 346–347. doi: 10.1126/science.1098222

Rabalais, N. N., & Turner, R. E. (2019). Gulf of Mexico hypoxia: Past, present, and future. *Limnology and Oceanography Bulletin*, 28(4), 117–124. <https://doi.org/10.1002/lob.10351>.

Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C., & Wang, W. (2002). An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15(13), 1609–1625. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2)

Ruelas-Mesa, I., Hernández-Suárez, J., Muñoz-León, J. J., & Argüello-Ortiz, Ángel F. (2025). Análisis de los factores de riesgo de la brucelosis en México en 2020, 2021 y 2022. *Emergentes - Revista Científica*, 5(1), 333–347. <https://doi.org/10.60112/erc.v5.i1.325>

Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*, 6(2), 461–464. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344136>

Shannon, L. V., Hutchings, L., Bailey, G. W., & Shelton, P. A. (1984). Spatial and temporal distribution of chlorophyll in southern African waters as deduced from ship and satellite measurements and their implications for pelagic fisheries. *South African Journal of Marine Science*, 2(1), 109–130. <https://doi.org/10.2989/02577618409504363>.

Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2017). *Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples* (4th ed.). Springer.

Smith, W. D., Bizzarro, J. J., & Cailliet, G. M. (2009). The artisanal elasmobranch fishery on the east coast of Baja California, Mexico: Characteristics and management considerations. *Marine and Coastal Fisheries*, 1(1), 229–249. <https://doi.org/10.7773/cm.v35i2.1534>.

Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (2012). *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research* (4th ed.). W.H. Freeman.

Solanki, H. U., Mankodi, P. C., Nayak, S. R., & Somvanshi, V. S. (2005). Evaluation of remote-sensing-based potential fishing zones forecast methodology. *Continental Shelf Research*, 25(18), 2163–2173. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.08.025>.

Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J., & Hishamunda, N. (Eds.). (2008). Building an ecosystem approach to aquaculture. *FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings* No. 14. FAO.

Steel, R. G. D., & Torrie, J. H. (1980). Principles and procedures of statistics: A biometrical approach (2nd ed.). McGraw-Hill.

Sun, K., Deng, W., Jia, J., & Gao, Y. (2023). Spatiotemporal patterns and drivers of phytoplankton primary productivity in China's lakes and reservoirs at a national scale. *Global and Planetary Change*, 228, 104215. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104215>.

The MathWorks, Inc. (2024). MATLAB (versión R2024a) [Software]. The MathWorks, Inc. <https://www.mathworks.com>

Tu, C. Y., Chen, K. T., & Hsieh, C. H. (2018). Fishing and temperature effects on the size structure of exploited fish stocks. *Scientific Reports*, 8(1), 7132. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25403-x>.

United Nations Industrial Development Organization. (2011). Transboundary Diagnostic Analysis of the Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem.

Yáñez-Arancibia, A., Day, J. W., Twilley, R. R., & Day, R. H. (2014). Manglares: ecosistema centinela frente al cambio climático, Golfo de México. *Madera y Bosques*, 20(SPE), 39–75. ~~Cómo citar~~

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”

www.uv.mx

