

Efectos del ambiente sobre la pesquería de langosta espinosa (*Panulirus interruptus*) en la Península de Baja California.

Elaborado para Pronatura Noroeste por:
A. Medellín – Ortiz.
junio 2025

INTRODUCCIÓN	2
.....	4
OBJETIVO	4
MÉTODOS	5
<i>BASES DE DATOS EMPLEADAS</i>	5
<i>Langosta de Baja California</i>	5
<i>Langosta de FEDECOOP</i>	6
<i>VARIABLES FÍSICO-BIOLÓGICAS UTILIZADAS</i>	6
<i>Captura de erizo rojo, pez vieja y cabrilla sargacera</i>	6
<i>Biomasa de sargazo gigante</i>	7
<i>Variables locales (temperatura superficial, potencia del oleaje)</i>	7
<i>Variables regionales (índice de surgencia - Bakun)</i>	7
<i>Variables oceánicas (índice multivariado de El Niño - MEI, Oscilación del giro del Pacífico Norte - NPGO)</i>	7
<i>Otras variables importantes en la región (concentración de clorofila a, productividad primaria neta y velocidad de las corrientes superficiales y a profundidad)</i>	8
RESULTADOS	9
<i>CAPTURA DE LANGOSTA ROJA EN LA REGIÓN</i>	9
<i>Representación geográfica de las variables</i>	9
<i>Importancia relativa de las variables analizadas</i>	13
<i>Impacto causal de la variabilidad biológica y ambiental sobre la captura de langosta roja</i>	14
<i>Otras variables de importancia en la región</i>	15

Introducción

En el contexto del desarrollo del proyecto de mejora pesquera de langosta espinosa en Baja California, es imperativo realizar una evaluación del estado del recurso que determine si el stock se mantiene cerca del rendimiento máximo sostenible. Hasta la fecha, se dispone de una evaluación oficial elaborada por el IMIPAS (INAPESCA), donde se señala que, para la temporada 2018-2019, el stock de langosta en Baja California se encuentra en el límite de sobreexplotación (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Sin embargo, no existe información sobre los posibles efectos ambientales sobre la pesquería de langosta en la región.

El conocimiento de la variabilidad espacio-temporal de una población es vital para comprender los mecanismos subyacentes responsables del mantenimiento o cambio de la estructura de una comunidad natural. Factores físicos como el afloramiento, la temperatura del agua, la sedimentación, la acción de las olas o la pesca pueden ser determinantes en la abundancia de especies marinas (Hereu et al., 2012). La extracción sostenible de especies marinas comerciales requiere estimaciones precisas de las trayectorias poblacionales, así como una profunda comprensión de las causas de su variabilidad (O'Malley, 2009).

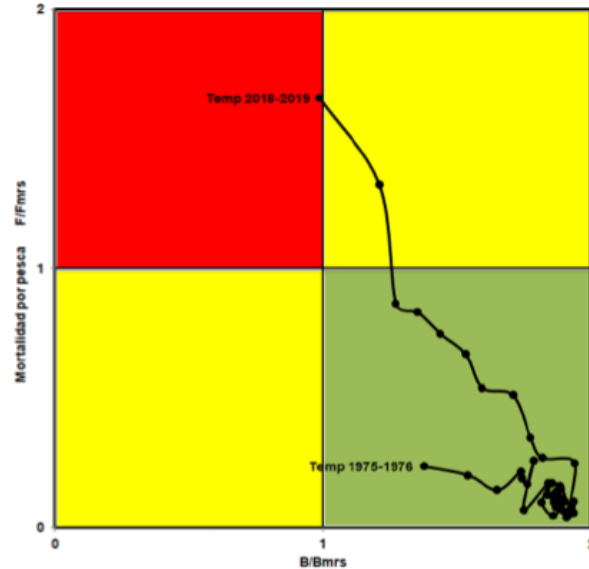


Figura 1. Diagrama de Kobe de la pesquería de langosta roja en todo el Estado de Baja California, desde la temporada 1975-1976 a 2018-2019. Fuente: INAPESCA, 2020.

Los cambios en el medio ambiente y la sobrepesca imponen un gran riesgo a las poblaciones de peces a nivel mundial. En la gestión pesquera, las estrategias se centran en reducir los riesgos de las poblaciones explotadas; cuando los datos son escasos, los métodos estadísticos para la evaluación de existencias no pueden proporcionar estimaciones precisas e imparciales sobre la dinámica de la pesquería, lo que aumenta la incertidumbre en los resultados. El desafío se vuelve aún mayor cuando los recursos económicos para adquirir dicha información también son escasos (Pulkkinen, 2015). A pesar de estos desafíos, existe la necesidad de estimaciones precisas de las poblaciones explotadas para lograr una pesca sostenible (Hilborn y Walters, 1992).

Los bosques de algas marinas (kelp) son ecosistemas altamente dinámicos y productivos, que muestran una considerable variación temporal y son resistentes a perturbaciones a pequeña escala, lo que resulta en una estabilidad considerable en una escala temporal de años (Tegner y Dayton, 2000). Eventos como El Niño (ENSO), tormentas, depredación (pastoreo) y, más recientemente, las olas de calor marinas, se encuentran entre las fuentes de perturbación más importantes para los bosques de kelp (Dayton, 1985a; Arafeh – Dalmau et al., 2019; Cavanaugh et al., 2019). Se ha documentado que El Niño tiene efectos adversos en las poblaciones de erizo rojo de mar en su distribución norte. Varios trabajos han logrado rastrear los cambios en los lechos de kelp, las tasas de reclutamiento y la densidad de erizos debido a los eventos de El Niño en California.



Se ha demostrado que los bosques de kelp son más propensos a ser afectados por las condiciones de agua cálida oligotrófica, la interrupción del afloramiento costero y las intensas tormentas invernales provocadas por el evento, causando una deforestación irregular (Grove et al., 2002; Tegner y Dayton, 1987; Tegner et al., 1997; Cavanaugh et al., 2011); sin embargo, los efectos sobre la dinámica poblacional y reclutamiento de las especies que los habitan varían desde inalterados (Tegner y Dayton, 1991) hasta altamente variables, impulsados por la variabilidad temporal diaria en los vientos de afloramiento y la topografía costera (Botsford, 2001). Además, se ha documentado que El Niño ha afectado la pesquería del erizo rojo de mar, disminuyendo el rendimiento de la gónada como resultado de la baja disponibilidad de alimento y una menor actividad alimentaria (Kato y Schroeter, 1985; Tegner y Dayton, 1991). En Baja California, se ha sugerido que los eventos de El Niño tienen efectos perjudiciales en las poblaciones y la pesquería de especies como el erizo rojo de mar al aumentar la mortalidad natural (Jiménez – Quiroz et al., 2013).

La Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO) es otra fuente relevante de variabilidad ambiental, siendo un fuerte indicador de las fluctuaciones en los mecanismos que impulsan la dinámica del ecosistema planctónico y su papel en el forzamiento de cambios decenales a escala global en los ecosistemas marinos (Di Lorenzo et al., 2008) porque influye directamente en el sistema de afloramiento de la Corriente de California (Chenillat et al., 2012). Específicamente, la biomasa de kelp se ha correlacionado con la NPGO en ciclos periódicos largos (más de diez años), y se ha demostrado que la NPGO afecta los ciclos de reclutamiento de kelp y la mortalidad de plantas enteras con un retraso de 3 años; observándose una gran cantidad de heterogeneidad en la respuesta de la biomasa de kelp a diferentes factores ambientales (Cavanaugh, et al., 2011, Bell et al., 2018). Más recientemente, el fenómeno de las Olas de Calor Marinas (OCM) ha tenido efectos perjudiciales en la estructura de la comunidad de los bosques de kelp (Arafteh – Dalmau et al., 2019), que tienen variación geográfica en respuesta a estos eventos, siendo los kelps formadores de dosel más sensibles al calentamiento en toda su distribución (Beas – Luna et al., 2020).

La abundancia de depredadores también se ve influenciada por los cambios en el hábitat, por ejemplo, la cabrilla sargacera (*Paralabrax clathratus*) que es un carnívoro generalista de actividad diurna con alta fidelidad al sitio (Hobson et al., 1981; Lowe et al., 2003), un posible depredador de la langosta roja (Young, 1963) y un competidor de espacio para el pez vieja (*Semicossyphus pulcher* Claisse et al., 2012), puede incrementar o disminuir su abundancia al incrementar o disminuir el hábitat disponible.

Los bosques de kelp tienen efectos significativos en la química del agua de mar, la productividad, los conjuntos microbianos (Pfister et al., 2019), y albergan una comunidad altamente diversa de micro y macro animales como moluscos, crustáceos, equinodermos, peces y mamíferos marinos (Steneck et al., 2002; Wilmers et al., 2012; Perez – Matus et al., 2012; Castorani et al., 2018). Algunas de estas especies son explotadas comercialmente (erizo rojo, pez vieja, cabrilla sargacera, abulón, langosta roja; Figura 2). Los esfuerzos por comprender los efectos de la variabilidad ambiental, los eventos extremos y la pesca en estos ecosistemas se han centrado principalmente en el kelp (Tegner y Dayton, 2000; Perez – Matus et al., 2012; Castorani et al., 2018; Arafteh – Dalmau et al., 2019; Cavanaugh et al., 2019); sin embargo, muy pocos se han enfocado en los efectos de la variabilidad, los eventos extremos y las interacciones ecológicas en las especies explotadas (ej., Tegner y Dayton, 1991; Pfister y Bradbury, 1996; Free et al., 2019), como el erizo rojo de mar (Medellin Ortiz et al., 2022) o la langosta roja.



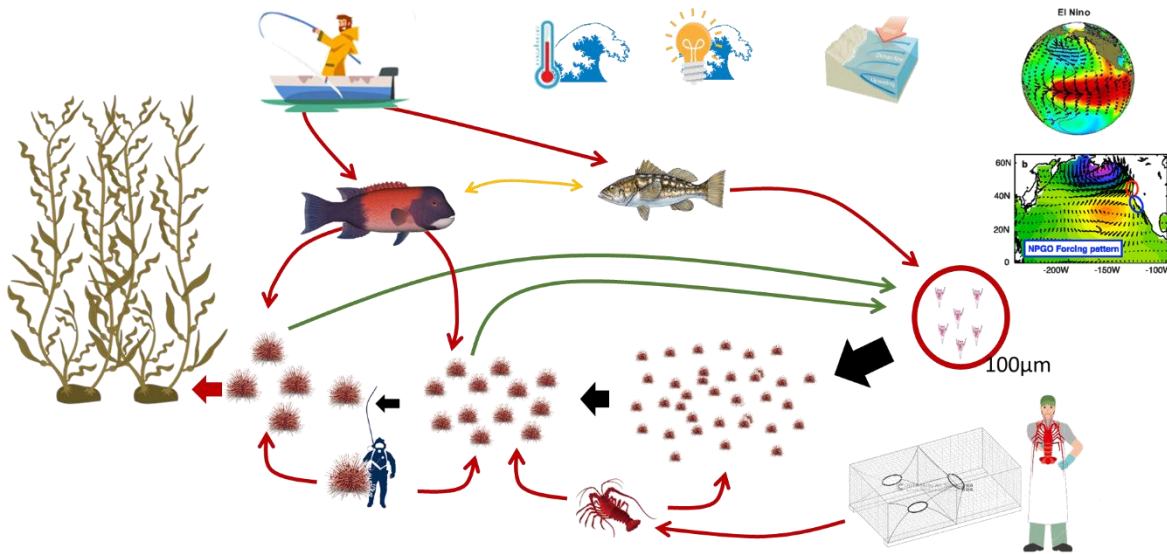


Figura 2. Diagrama conceptual de las interacciones ambientales y actividades humanas en los bosques de sargazo gigante en Baja California. Tomado de Medellín-Ortiz, 2021.

Objetivo

Evaluar posibles efectos del ambiente sobre la pesquería de la langosta roja aprovechada en Baja California.

Todos los análisis realizados en el presente documento son resultado del análisis original realizado por Medellín – Ortiz 2021 y Medellín – Ortiz et al., 2022. Understanding the impact of environmental variability and fisheries on the red sea urchin population in Baja California. *Front. Mar. Sci.* 9:987242. doi: 10.3389/fmars.2022.987242 <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.987242/full>



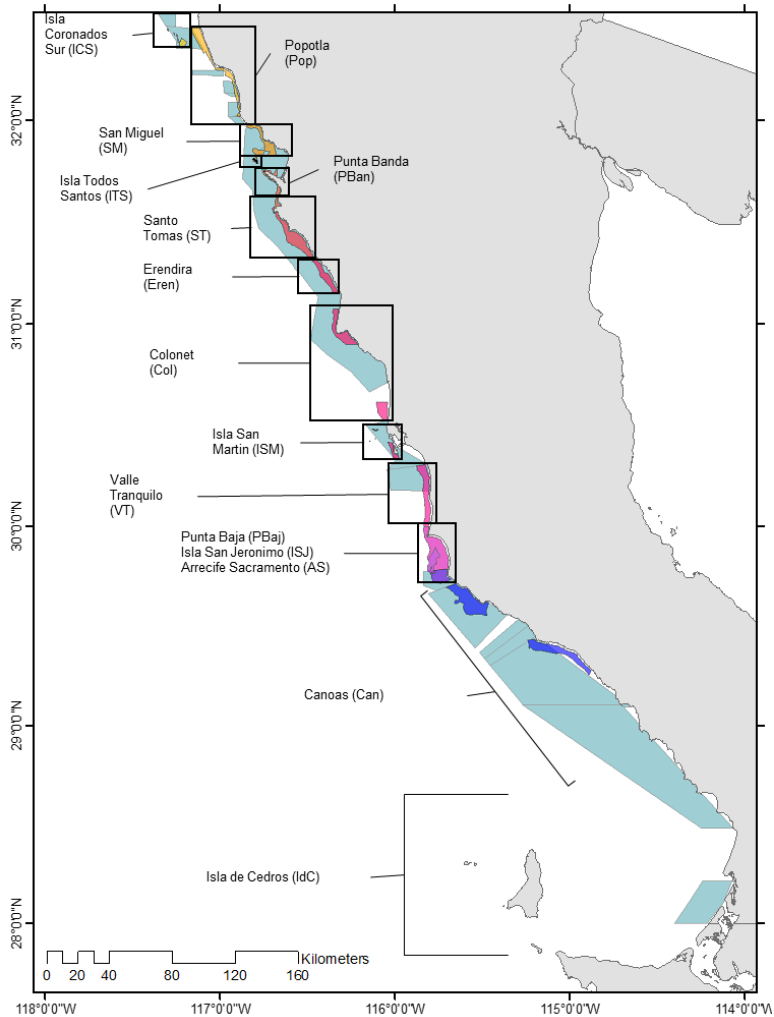
Métodos

Bases de datos empleadas

Langosta de Baja California

Se utilizaron datos de captura y esfuerzo provenientes de los registros oficiales obtenidos mediante el sistema de SIPESCA. Se calculó un índice de abundancia de tipo captura por unidad de esfuerzo o CPUE. Este CPUE se comparó de manera informal con los valores presentes en el reporte de evaluación proporcionado por el IMIPAS (INAPESCA) en el 2020¹. Se armonizaron las bases de datos de arribos y bases de datos de permisionarios de langosta para obtener el número autorizado de trampas por embarcación de cada permisionario, ya que la base de datos de captura no cuenta con el número de trampas utilizadas para la captura registrada. Este número de trampas fue utilizado como el número de trampas máximo que podían utilizar los permisionarios, sin embargo debido a la mecánica de la pesquería, los pescadores pueden o no revisar todas las trampas que colocan al inicio de la temporada de pesca, por lo que se consideró que únicamente podrían revisar el 50% del total de trampas. Además, se georreferenció la captura correspondiente a cada permisionario por polígono de pesca autorizado, asignándole una región con base en lo descrito por Medellín – Ortiz et al (2022², **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). De esta manera se obtuvo el número de días de pesca, trampas revisadas y captura de langosta para el cálculo de una CPUE en kilogramos de langosta por trampa revisada por día de pesca.

Figura 3. Regiones de captura de langosta roja en Baja California. Modificado de Medellín - Ortiz et al., 2022.

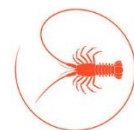


¹ INAPESCA. 2020. Informe Técnico. Situación y estado de la pesquería de langosta roja *Panulirus interruptus*, en el macizo costero del estado de BC. Temporada de pesca 2018-2019.

² Medellín–Ortiz A, Montaño–Moctezuma G, Álvarez–Flores C, Santamaría-del-Ángel E, García–Nava H, Beas–Luna R and Cavanaugh K. 2022. Understanding the impact of environmental variability and fisheries on the red sea urchin population in Baja California. *Front. Mar. Sci.* 9:987242. doi: 10.3389/fmars.2022.987242

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.987242/full>

Medellín – Ortiz, 2024



Langosta de FEDECOOP

Se analizó la base de datos de registros oficiales de captura de langosta espinosa reportada por las organizaciones que participan en la certificación (Figura 4); esta base de datos fue obtenida a través del INAI y comprende registros diarios de captura entre enero de 2000 y diciembre de 2024.

Se armonizaron las bases de datos de arribos y bases de datos de permisionarios de langosta para georreferenciar las capturas de langosta de la Federación. Todos los datos de capturas georreferenciados corresponden al periodo entre enero de 2000 y diciembre de 2018, para ser comparables con las variables ambientales reportadas por Medellín – Ortiz et al (2022), como de importancia para la población y pesquería de erizo rojo.

Variables físico-biológicas utilizadas

Captura de erizo rojo, pez vieja y cabrilla sargacera

La captura estas tres especies fue obtenida a través de la (extinta) Plataforma Nacional de Transparencia de México. La base de datos incluye: fecha, captura en kg, sitio de desembarque y número de embarcaciones utilizadas para la pesca; el pez vieja y cabrilla sargacera se capturan principalmente con anzuelo y línea, mientras que la langosta espinosa se captura con trampas cebadas. El pez vieja y la cabrilla sargacera se pescan bajo permisos comerciales de "escama", principalmente con anzuelo y línea a bordo de embarcaciones artesanales, con una pequeña flota de pesca de escama de mediana altura de 25 embarcaciones. La pesca de erizo rojo y langosta espinosa se puede realizar bajo permisos de pesca comercial o concesiones, solo con buceo y trampas autorizadas dentro del área de pesca autorizada, respectivamente. Las tres especies se capturan en toda Baja California, incluidas las islas Guadalupe y Cedros.

Los datos de captura de pez vieja y cabrilla sargacera se geolocalizaron suponiendo una mayor abundancia de pez vieja en las zonas exteriores de los bosques de kelp, mientras que la cabrilla sargacera habita en las zonas medias y exteriores del bosque (Claisse et al., 2012). Con base en los sitios de desembarque y las especies registradas, a la captura se le asignó una ubicación aleatoria, ya sea en las zonas exteriores o centrales de los bosques de kelp que rodean los sitios de desembarque. Las capturas de erizo rojo se geolocalizaron en función del área de pesca autorizada



Figura 4. Zonas de captura autorizadas para las organizaciones que participan en la certificación de langosta. Elaboración propia con información de los informes de certificación.



de cada titular de permiso, con base en lo descrito por Medellín – Ortiz et al. (2020) y Medellín – Ortiz et al. (2022).

Biomasa de sargazo gigante

Los datos de biomasa de kelp (*Macrocystis pyrifera*) se obtuvieron mensualmente utilizando imágenes satelitales de Landsat para estimar la biomasa del dosel en toda el área de estudio con una resolución de 30 m, desde 2000 hasta 2018, siguiendo los métodos descritos por Cavanaugh et al. (2011) y Bell et al. (2018).

Variables locales (temperatura superficial, potencia del oleaje)

Se recopilaron datos de temperatura superficial del mar (TSM) específicos para cada sitio mensualmente a partir de series temporales multisensoriales de TSM para el periodo 2000-2018 (píxel de 4 km, luz diurna a 11 μ ; de los sensores AVHRR, MODIS Terra, MODIS Aqua y VIIRS Suomi-NPP). Las imágenes se procesaron en SEDAS (7) siguiendo los criterios de Karu et al. (2015) y Karu et al. (2012).

La potencia del oleaje (CgE) se obtuvo del reanálisis IOWAGA (Raschle & Ardhuin, 2013), producido por el Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar (Ifremer). El reanálisis se basa en una implementación multigrad global del modelo Wave Watch 3, con una resolución espacial de ~ 18 km en el área de estudio. La potencia de las olas se calcula cada 3 horas a partir de los espectros direccionales de las olas $S(f, \theta)$:

$$CgE = \rho g \iint Cg(f)S(f, \theta) df d\theta$$

donde ρ es la densidad del agua (≈ 1024), g es la aceleración de la gravedad ($\approx 9.8 \text{ m s}^{-2}$), y Cg es la velocidad de grupo. Para cada sitio, se eligió el nodo del modelo más cercano para representar la potencia de las olas en dicho sitio. Todos los sitios estaban a menos de 8 km del nodo elegido.

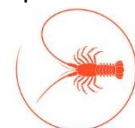
Además, se obtuvieron datos de temperatura superficial del mar a través del programa de acceso a datos de la división de investigación ambiental (ERDDAP) en el portal de la NOAA ([ERDDAP - Home Page](#)), a través de la librería `rerddap` en R.

Variables regionales (índice de surgencia - Bakun)

Los datos del índice de surgencia se obtuvieron de la División de Investigación Ambiental de la NOAA (<https://oceanview.pfeg.noaa.gov/products/upwelling/intro>). Utilizamos la serie temporal tradicional del índice de afloramiento de Bakun (1973, 1975) para dos nodos: 33 y 30 $^{\circ}$ N, ya que eran las estaciones más cercanas a las ubicaciones de los bosques de kelp de Baja California. Este índice se calcula con la teoría de Ekman sobre el transporte de masa debido al esfuerzo del viento; los valores positivos pueden considerarse como la cantidad de agua que aflora, mientras que los valores negativos implican hundimiento.

Variables oceánicas (índice multivariado de El Niño - MEI, Oscilación del giro del Pacífico Norte - NPGO)

Los datos del Índice Multivariado de El Niño (MEI) se obtuvieron del Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre de la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>). El MEI fue seleccionado debido a la importancia de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) como un fenómeno que causa variabilidad climática global en escalas de tiempo interanuales (Wolter y Timlin, 1993, 1998). El MEI se basa en las seis variables principales observadas sobre el Pacífico tropical: presión a nivel del mar, componentes zonal y meridional del viento superficial, temperatura superficial del



mar, temperatura del aire superficial y fracción total de nubosidad del cielo (Wolter y Timlin, 1993, 1998).

Los datos de la Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO) se obtuvieron del KNMI Climate Explorer³ para el mismo período que las otras variables.

Se construyeron matrices de correlación y gráficos de redes de correlación entre todas las variables utilizando los paquetes Corrr (Kuhn et al., 2020) y Ggraph (Lin Pedersen, 2020) en R (Ver. 4, 2020). Se implementaron modelos lineales generalizados (GLM), con las series de tiempo completas de todas las variables, como lo propuesto por Medellín – Ortiz et al. (2022):

$$\begin{aligned} \text{lobst. ct}_{ijk} = & \beta_0 + \beta_1 \text{kelp. biomass}_{ijk} + \beta_2 \text{Urchin. ct}_{ijk} + \beta_3 \text{Calsh. ct}_{ijk} \\ & + \beta_4 \text{Klpsbs. ct}_{ijk} + \beta_5 \text{SST}_{ijk} + \beta_6 \text{CgE}_{ijk} + \beta_7 \text{Upw}_{ijk} + \beta_8 \text{MEI}_{ijk} \\ & + \beta_9 \text{NPGO}_{ijk} + \epsilon_{ijk} \end{aligned}$$

donde lobst.ct es la captura de langosta del mes i , año j y sitio k , ϵ_i es el error aleatorio bajo el efecto de la captura de erizo rojo (urchin.ct), pez vieja (calsh.ct), cabrilla sargacera (klpsbs.ct), temperatura superficial (SST), potencia del oleaje (CgE), surgencia (upw), índice multivariado de El Niño (MEI) y la oscilación del giro del Pacífico Norte (NPGO) en el mes i , año j y sitio k , respectivamente; $\beta_0 \dots 9$ son parámetros a ser estimados.

Análisis de Causalidad y el Impacto de las Variables

Examinamos la causalidad de las variables que, según los GLM, tuvieron un efecto en la pesquería de langosta roja, utilizando el paquete **CausalImpact** (Brodersen et al., 2015; Brodersen y Hauser, 2020) en R. Este enfoque permite inferir el impacto causal que una "intervención" ha ejercido sobre una métrica de resultado a lo largo del tiempo. Se basa en un modelo de espacio de estados de regresión de difusión que predice la respuesta contrafactual en un control sintético que habría ocurrido sin la intervención (Brodersen et al., 2015). Modela el comportamiento que la variable de respuesta (lobst.ct) podría tener en ausencia de los posibles efectos producidos por las variables predictoras. Consideramos las variables significativas de los GLM como la "intervención" para evaluar su impacto en la pesquería de langosta como métrica de resultado durante el período de la ola de calor.

Otras variables importantes en la región (concentración de clorofila a , productividad primaria neta y velocidad de las corrientes superficiales y a profundidad)

La Productividad Primaria Neta (PPN) y la Clorofila- a (Chl- α) se procesaron a partir de los compuestos diarios globales de calidad científica de 4 km del Programa de Acceso a Datos de la División de Investigación Ambiental (ERDDAP) (conjuntos de datos noaacwNPPVIRSSQchlaMonthly, erdMH1pp1day, respectivamente), desde enero de 2003 hasta diciembre de 2024. Los conjuntos de datos de Chl- α contienen imágenes mapeadas estándar de Nivel 3 con una resolución de 4 km a partir de mediciones recopiladas por el Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS), y se consideran datos de calidad científica. Los conjuntos de datos de PPN son el resultado del cálculo de la productividad primaria integrada verticalmente utilizando el método de Behrenfeld

³ <http://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?WMO=O3Ddata/npgo&STATION=NPGO&TYPE=i&id=someone@somewhere>
Medellín – Ortiz, 2024



– Falkowski, empleando mediciones satelitales de Chl- α , la irradiancia superficial visible incidente y la temperatura superficial del mar (Behrenfeld y Falkowski, 1997).

La información sobre corrientes superficiales proviene de los compuestos diarios globales de ERDDAP (noaacwBLENDEDNRTcurrentsDaily), mientras que la información de corrientes a profundidad proviene del modelo híbrido coordinado del océano (HYCOM, a través de la librería hycom en R). Esta librería permite explorar la información de temperatura y salinidad, así como los componentes verticales y horizontales de las corrientes oceánicas desde la superficie hasta el fondo del océano. Para el caso de la región de interés, se extrajo información de los componentes de las corrientes correspondientes a 30 m de profundidad.

Se presentan los valores estacionales de las variables más importantes, debido a las características estacionales de la captura de langosta (veda en primavera y verano).

Resultados

Captura de langosta roja en la región

De acuerdo a la información contenida en avisos de arribo, se observa que la región central de la península presenta un mayor volumen de captura de langosta roja durante los meses de otoño e invierno (Figura 5). Durante la primavera y verano, la captura de langosta no esta permitida.

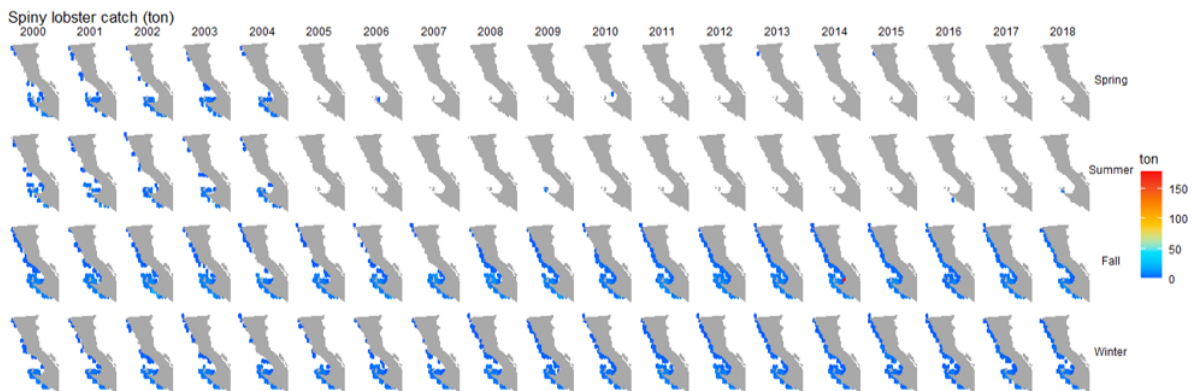
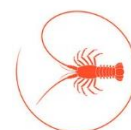


Figura 5. Captura de langosta roja en Baja California y la región central de la Península.

Representación geográfica de las variables

La biomasa de sargazo gigante presenta patrones estacionales e interanuales en la región, observándose mayores valores de biomasa en la zona de Punta Eugenia – Isla Cedros en algunos años, mientras que en otros los mayores valores de biomasa se observan en la región del norte de Baja California (Figura 6). Este patrón también se observa en el caso de la captura de erizo rojo, donde en algunos años los mayores volúmenes de captura provienen de la zona de Punta Banda (norte), mientras que para otros años las capturas son mayores en la zona de Punta Baja – Arrecife Sacramento (sur; Figura 7).



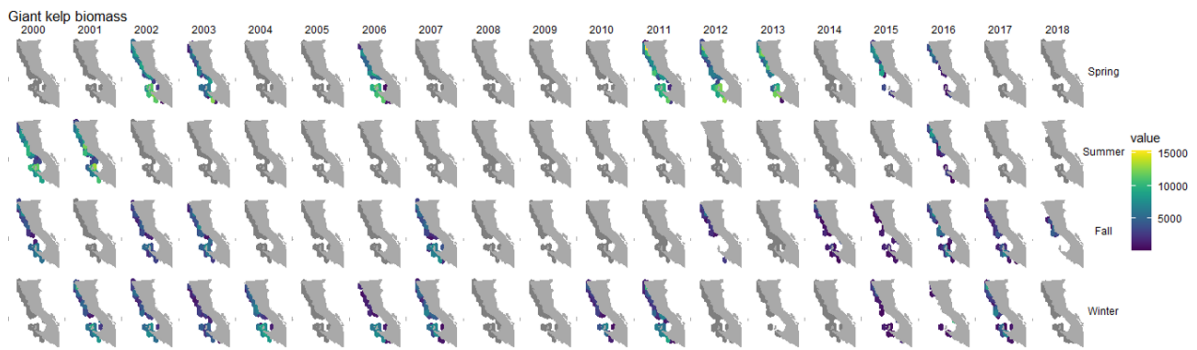


Figura 6. Biomasa de sargazo gigante en la región.

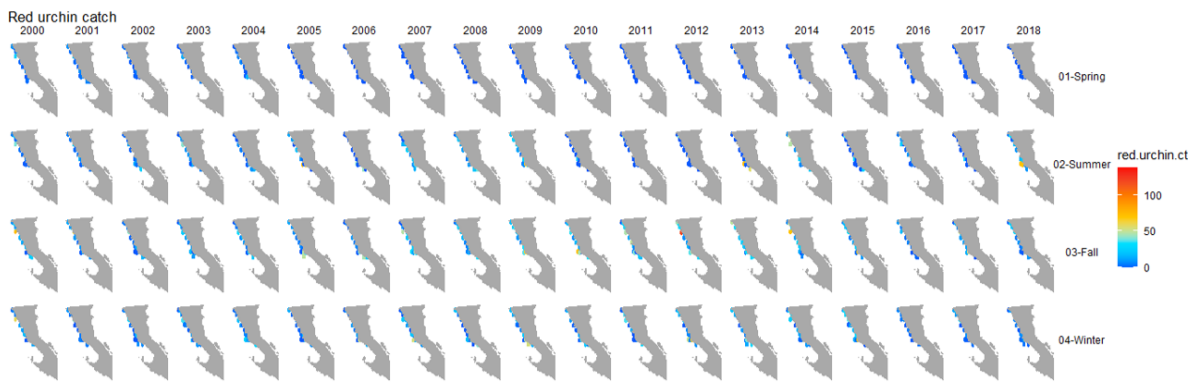


Figura 7. Captura de erizo rojo en la región. No se registran capturas de esta especie en la región de FEDECOOP.

En cuanto a la captura de pe vieja y cabrilla sargacera, las capturas no presentan un patrón estacional definido, sin embargo, los volúmenes de captura de cabrilla sargacera en algunos años representan el doble de las capturas de pez vieja (Figura 8 y Figura 9, respectivamente).

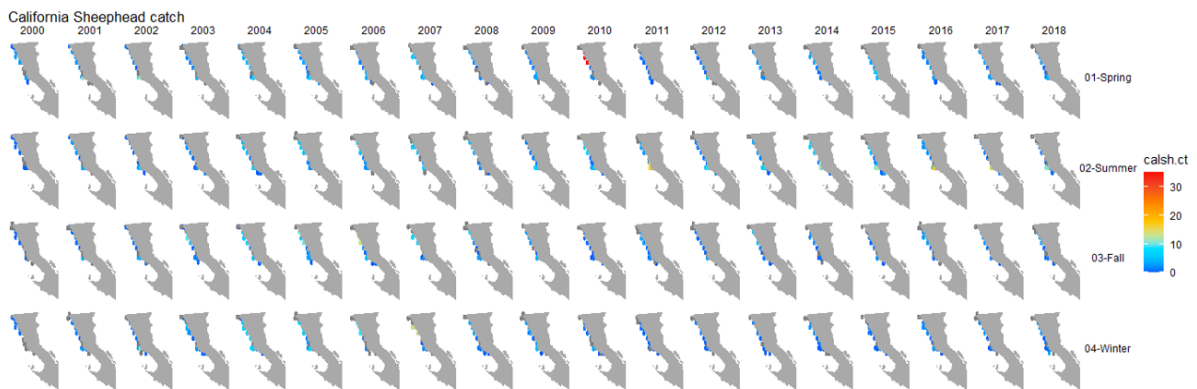


Figura 8. Captura de pez vieja en la región.



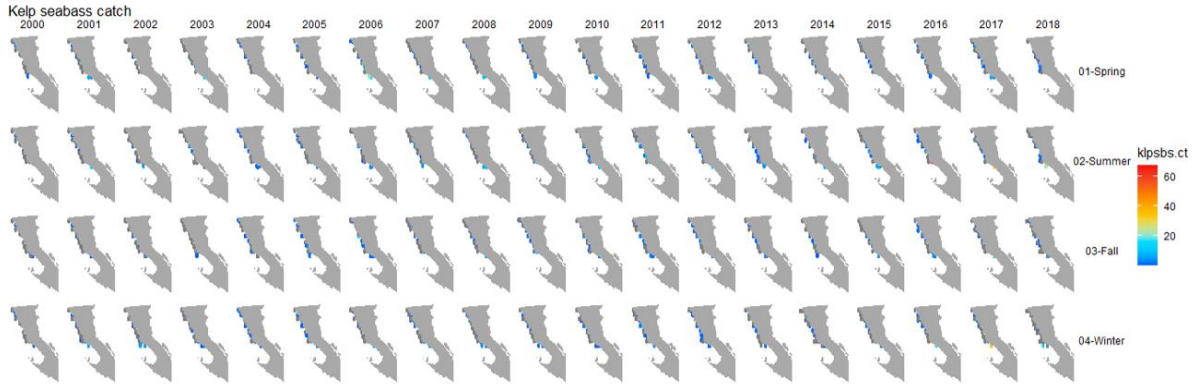


Figura 9. Captura de cabrilla sargacera en la región.

La temperatura superficial del mar en la región muestra un patrón estacional, con temperaturas entre los 12 – 17 °C durante el invierno y primavera, así como temperaturas entre 20 y 25 °C durante el verano. Durante 2010 se observaron las temperaturas más bajas para las 4 estaciones del año, mientras que para el periodo entre 2012 a 2020 se observaron las temperaturas más altas en las 4 estaciones (Figura 10).

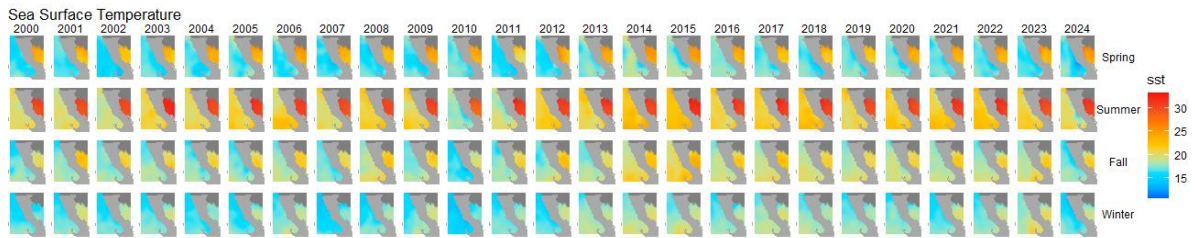


Figura 10. Cambios estacionales de la temperatura superficial en la región.

La potencia del oleaje (CgE) y el índice de surgencias también mostraron patrones estacionales, con valores altos en la potencia del oleaje durante el invierno y valores altos del índice de surgencias durante la primavera y verano (Figura 11 y Figura 12, respectivamente).

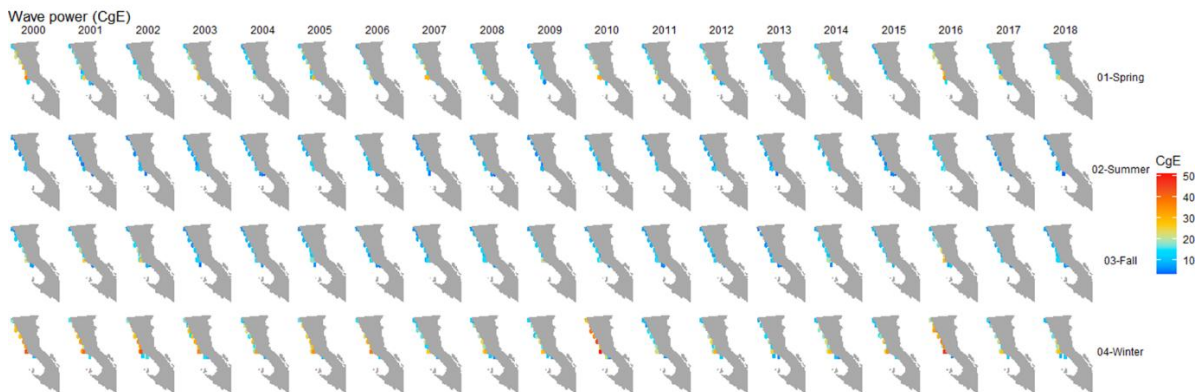


Figura 11. Cambios estacionales en la potencia del oleaje en la región.



Efectos del ambiente sobre la pesquería de langosta espinosa (Panulirus interruptus) en la Península de Baja California.



Figura 12. Cambios estacionales en el índice de surgencias en la región.

Las variables oceánicas (MEI y NPGO) no mostraron patrones estacionales definidos, sino que se observan variaciones interanuales. Estas variables tienen una escala mucho mayor a dos décadas, por lo que sus efectos en la actividad biológica pueden presentar un desfase mayor (Figura 13 y Figura 14, respectivamente).

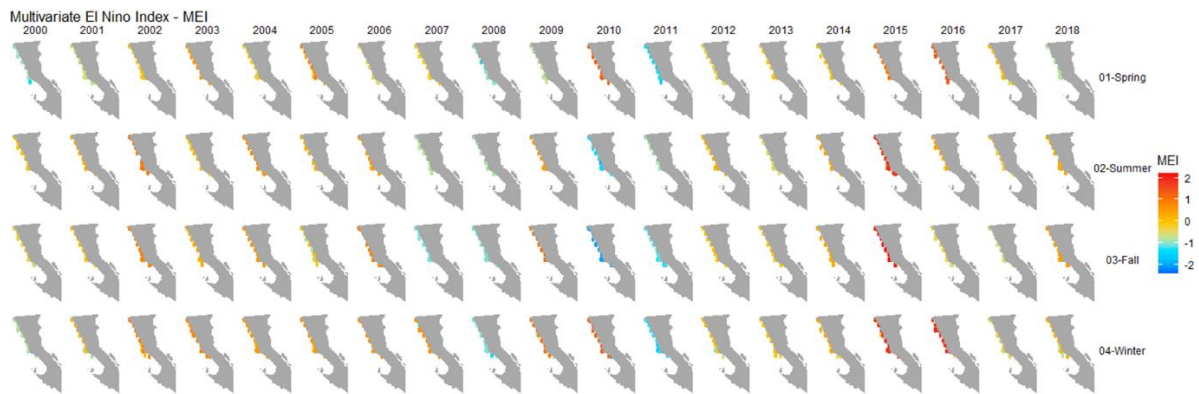


Figura 13. Efectos estacionales del Fenómeno de El Niño en la región.

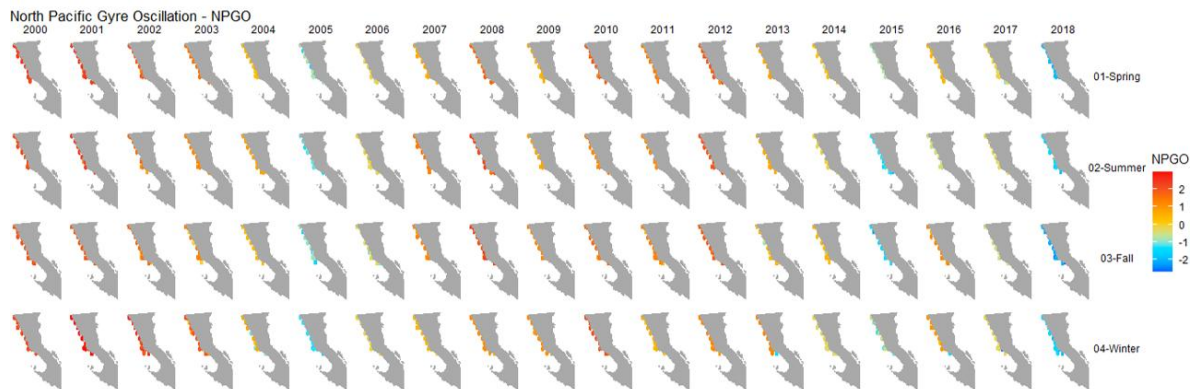


Figura 14. Efectos estacionales de la oscilación del giro del Pacífico Norte en la región.



Importancia relativa de las variables analizadas

Se analizó el valor de correlación de las diferentes variables bajo cuatro métodos distintos, con un muestreo de 1000 repeticiones. Se observa que las variables que aportan un mayor porcentaje de explicación a la variabilidad observada en la captura de langosta roja son la temperatura superficial, el índice de surgencias, la biomasa de sargazo gigante y la captura de pez vieja. La interacción de todas las variables seleccionadas aporta 52% de la variabilidad observada en la captura de langosta (Figura 15).

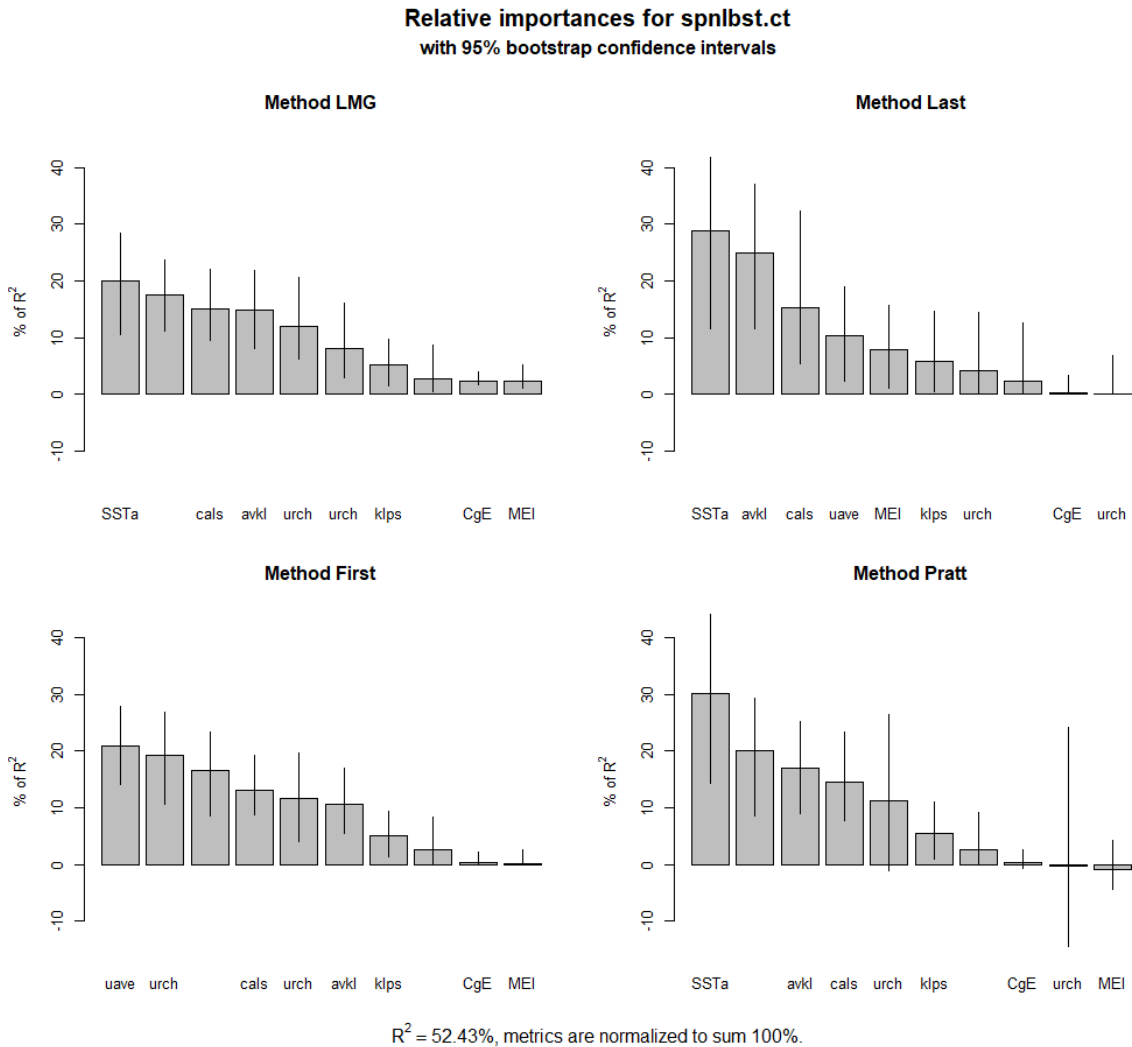


Figura 15. Importancia relativa de las variables analizadas bajo diferentes métodos sobre la captura de langosta roja.

Un diagrama de correlación muestra el sentido y valor de la correlación entre las variables analizadas y la captura de langosta, resaltando las relación positiva entre la captura de erizo rojo y la captura de langosta, así como la relación negativa entre el índice de surgencias y la captura de langosta (Figura 16).



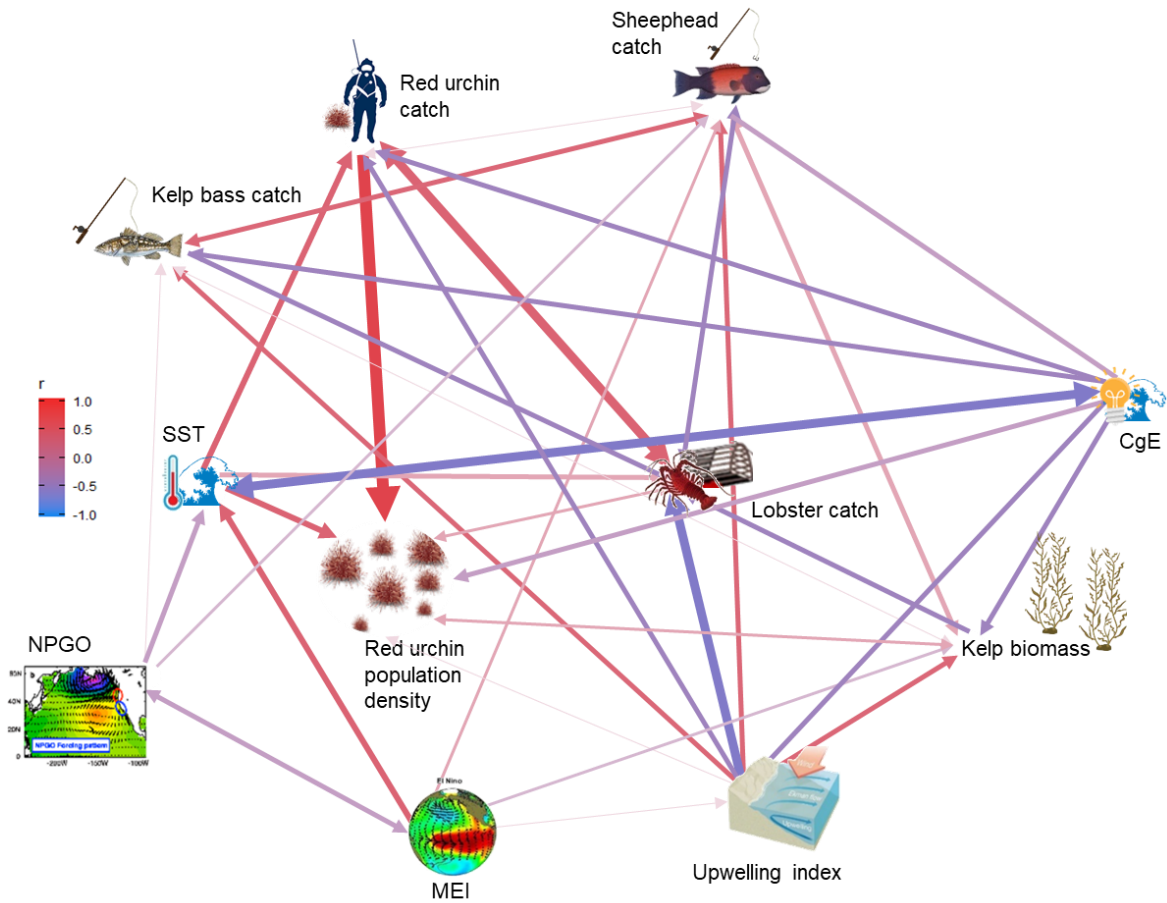


Figura 16. Diagrama de correlación entre las variables analizadas y su efecto sobre la captura de langosta roja. El grosor y dirección de las flechas indican el nivel de correlación.

Impacto causal de la variabilidad biológica y ambiental sobre la captura de langosta roja

El análisis de causalidad utilizando las variables seleccionadas como predictores de la captura de langosta durante la ola de calor, mostro que las variables tuvieron un efecto negativo sobre la captura de langosta. Durante la ola de calor, las capturas de langosta fueron casi 17% menores de lo que habrían sido si las condiciones anómalas no se hubieran presentado. La probabilidad de observar este efecto únicamente por factores aleatorios es muy pequeña (>0.05), por lo que el efecto causal de las variables sobre la captura de langosta puede considerarse como causal (Figura 17).



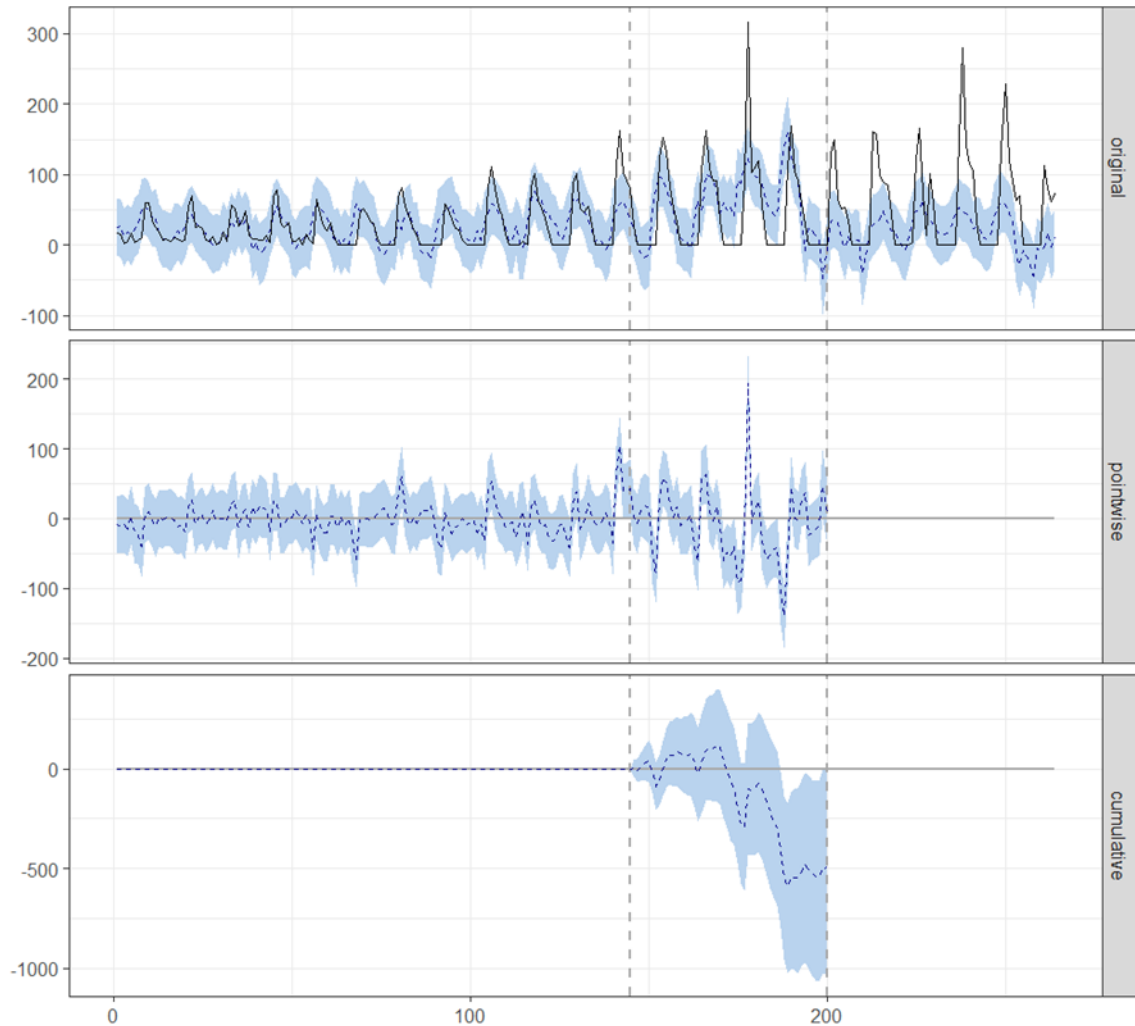


Figura 17. Resultados del análisis de causalidad de las variables sobre la captura de langosta roja durante el periodo de la ola de calor.

Otras variables de importancia en la región

Se observaron patrones estacionales en la concentración de clorofila a en la región, con los valores mas altos durante primavera y verano (Figura 18); esto se refleja en los valores de la productividad primaria neta calculada que presenta los valores más altos durante las mismas estaciones (Figura 19).



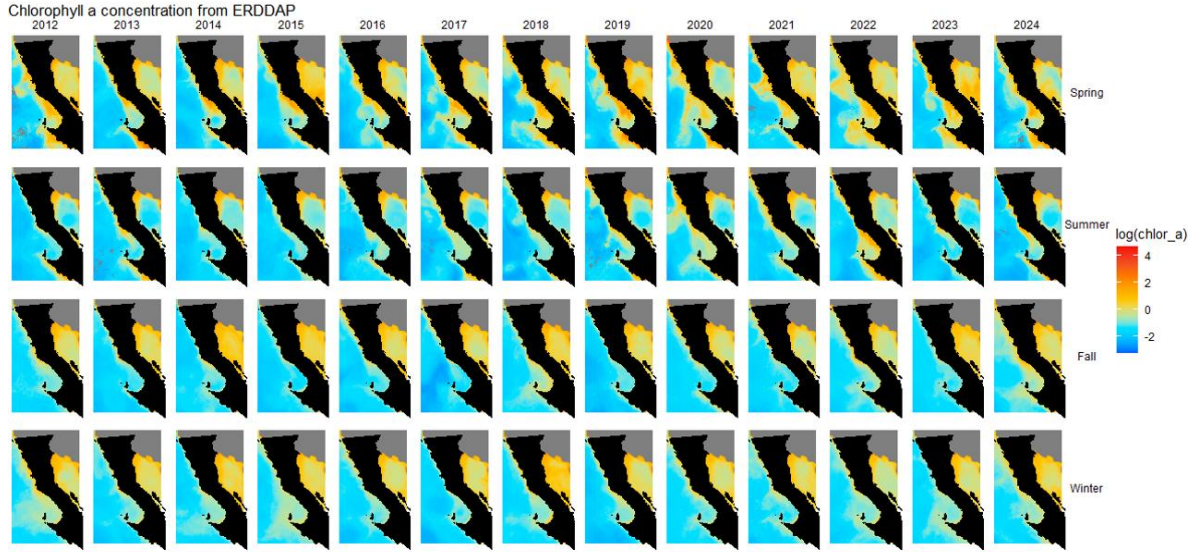


Figura 18. Concentración estacional de clorofila a en la región.

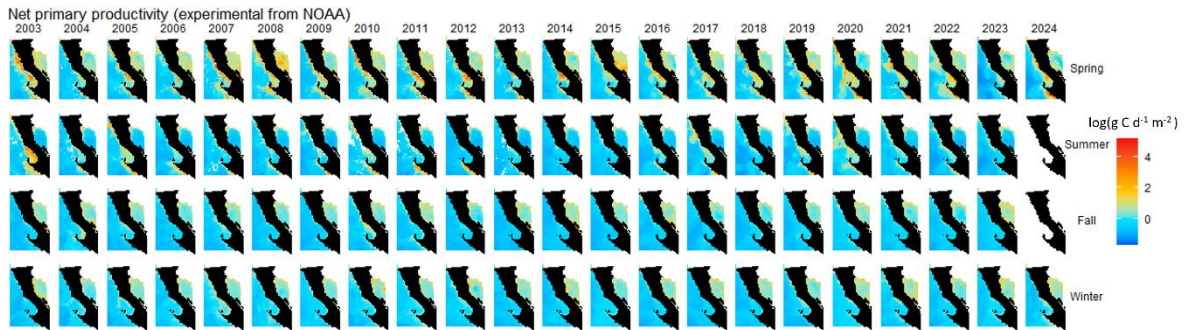


Figura 19. Productividad primaria neta estacional en la región.

No se observa un patrón claro en la información de corrientes obtenida a partir de ERDDAP, sin embargo, la información obtenida a partir de HYCOM muestra patrones a de corrientes en superficie y a diferentes profundidades. De igual manera, se puede observar que los meses de marzo, abril y mayo son meses con corrientes de magnitudes cercanas a 1 m s^{-1} a 30 m de profundidad, mientras que de septiembre a febrero la magnitud de la corriente a estas profundidades no excede 0.2 m s^{-1} (Figura 20, Figura 21 y Figura 22).



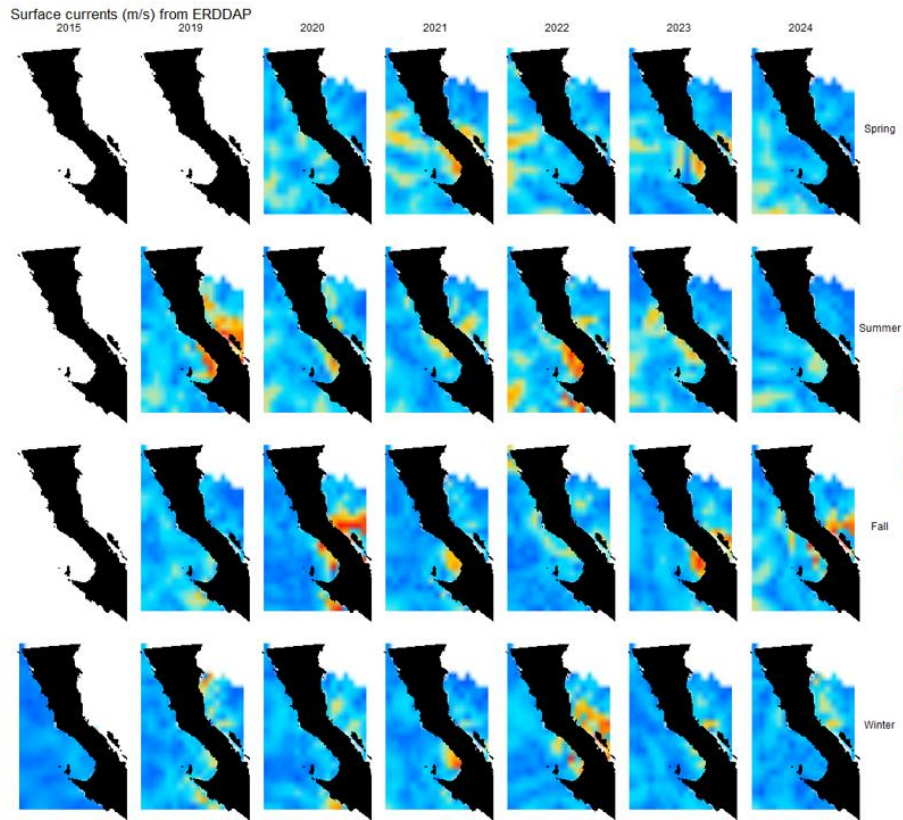


Figura 20. Estacionalidad de la velocidad de las corrientes en superficie en la región.

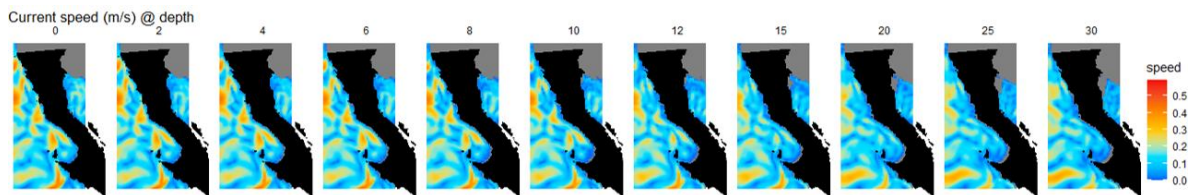


Figura 21. Velocidad de la corriente en la región a diferentes profundidades.

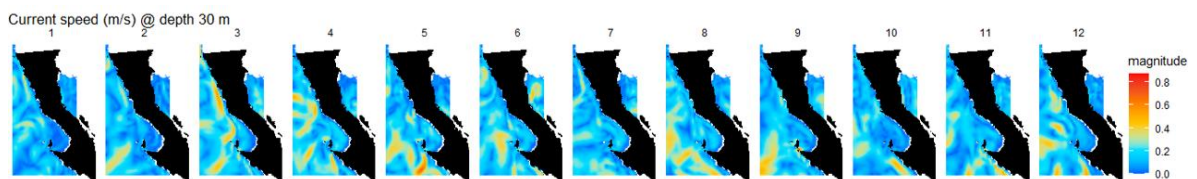


Figura 22. Variación mensual en la velocidad de las corrientes a 30 m de profundidad en la región.

