



Environmental Research

Available online 13 February 2024, 118444

In Press, Journal Pre-proof  [What's this?](#)

Modulación de las interacciones océano-atmósfera con la abundancia de calamar en el Atlántico Sudoccidental.

Chia-Ying Ko^{a b c}, Yu-Chi Lee^{d e}, Yi-Chi Wang^d, Huang-Hsiung Hsu^d, Chun Hoe Chow^f, Ruei-Gu Chen^g, Tsung-Han Liu^a, Chih-Shin Chen^h, Tai-Sheng Chiu^b, Don-Hsieh Chiangⁱ, Ren-Fen Wuⁱ, Wan-Ling Tseng^j

a Institute of Fisheries Science, National Taiwan University, Taiwan

b Biodiversity Research Center, and Ocean Center, National Taiwan University, Taiwan

c Institute of Ecology and Evolutionary Biology, Department of Life Science, and Master's Program in Biodiversity, National Taiwan University, Taiwan

d Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica, Taiwan

e Department of Earth and Planetary Sciences, University of California, Riverside, USA

f Department of Marine Environmental Informatics, National Taiwan Ocean University, Taiwan

g Fisheries Research Institute, Council of Agriculture, Taiwan

h Institute of Marine Resource Management, National Taiwan Ocean University, Taiwan

i Overseas Fisheries Development Council of the Republic of China, Taiwan

j International Degree Program in Climate Change and Sustainable Development, National Taiwan University, Taiwan

Recibido el 5 de octubre de 2023, Revisado el 3 de febrero de 2024, Aceptado el 6 de febrero de 2024, Disponible en línea desde el 13 de febrero de 2024.

El presente constituye una traducción no oficial al español realizada por RESILIENCE – Consultora Ambiental, del pre-print publicado en Environmental Research, el 13 de febrero de 2024:

Chia-Ying Ko, Yu-Chi Lee, Yi-Chi Wang, Huang-Hsiung Hsu, Chun Hoe Chow, Ruei-Gu Chen, Tsung-Han Liu, Chih-Shin Chen, Tai-Sheng Chiu, Don-Hsieh Chiang, Ren-Fen Wu, Wan-Ling Tseng. 2024. Modulations of ocean-atmosphere interactions on squid abundance over Southwest Atlantic. Environmental Research, 2024, 118444, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118444>.

Resumen: Los cambios antropogénicos en los mares están dando forma a las tendencias pesqueras, con implicaciones significativas para las fuentes de alimentos acuáticos a lo largo de este siglo. Al examinar un conjunto de datos de abundancia de 21 años de calamar argentino (*Illex argentinus*) junto con un análisis oceánico regional, notamos fuertes

correlaciones entre la abundancia anual de calamares y la temperatura de la superficie del mar (TSM) en enero y febrero, así como la energía cinética de los giros (EKE) de marzo a mayo en el Atlántico Sudoccidental. Un análisis más profundo reveló interacciones combinadas océano-atmósfera, identificadas como el modo primario en un análisis de función ortogonal empírica rotada de la TSM. Este patrón produjo TSM más frías y amplificó la EKE en los mares circundantes, factores cruciales para las etapas de vida únicas de los calamares. Las proyecciones futuras del archivo CMIP6 indicaron que este patrón océano-atmósfera, conocido como el patrón simétrico Atlántico, persistiría en su fase de TSM fría, promoviendo un aumento en la abundancia de calamares. Sin embargo, el aumento de las TSM debido al calentamiento global podría contrarrestar las ganancias en abundancia. Nuestros hallazgos descubren un vínculo previamente no reconocido entre los calamares y condiciones ambientales específicas gobernadas por interacciones más amplias océano-atmósfera en el Atlántico Sudoccidental. La integración de estos conocimientos con proyecciones estacionales y decenales puede ofrecer información invaluable a los interesados en la pesca de calamares y la conservación marina en un clima cambiante.

Avance: Las interacciones océano-atmósfera afectan la abundancia de calamares y, por lo tanto, las capturas pesqueras.

1. Introducción

Los ecosistemas marinos y sus numerosos servicios, como el suministro de alimentos, están experimentando cambios rápidos en todo el mundo debido al cambio climático, la destrucción del hábitat, la contaminación, la pesca excesiva, entre otros, con diversas consecuencias potenciales para el bienestar humano (Gattuso et al., 2015; McCauley, 2015). Las proyecciones han señalado crisis en los ecosistemas marinos, que son aún mayores que las de los ecosistemas terrestres (Antão et al., 2020). Sin embargo, la evidencia empírica de cambios en los ecosistemas marinos, crucial para detectar y caracterizar impactos antropogénicos, evaluar las implicaciones de la dinámica del ecosistema para los humanos e informar medidas de monitoreo, conservación y gestión pesquera "ganar-ganar", sigue siendo limitada (Burrows et al., 2011; Molinos et al., 2015; Henson et al., 2017).

El renovado enfoque en el llamado "mundo azul" revela además un papel creciente de mayores participaciones en la producción pesquera utilizada por los humanos para alimentos y como fuente de ingresos, pero

prácticas perjudiciales y una gestión deficiente amenazan la sostenibilidad de las pesquerías y los recursos marinos (FAO, 2022). La evidencia de cambios y/o fluctuaciones en las poblaciones marinas locales y regionales y en la pesca, a menudo es compleja y contradictoria, y carece de datos suficientes y a largo plazo para respaldarla. Estudios recientes, aunque controvertidos, han señalado la falta de colapsos sistemáticos en las poblaciones locales o regionales de especies explotadas comercialmente en múltiples taxones, regiones y dominios (Jackson et al., 2001; Myers and Worm, 2003; Litzow et al., 2014; Cheung et al., 2018).

Dado que el mantenimiento del funcionamiento y los servicios de los ecosistemas marinos, así como garantizar la seguridad y el suministro de alimentos, son fundamentales para varios objetivos de la Convención sobre la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se necesita una evaluación más integral, idealmente acompañada de interacciones océano-atmósfera que permitan actualizaciones continuas sobre las poblaciones marinas a

medida que cambian los datos pesqueros. Por ejemplo, se especula que las poblaciones de cefalópodos aumentan, ya que conectan niveles tróficos diversos y forman redes alimentarias en los océanos (Nemoto et al., 1985), en respuesta a un entorno cambiante desde mediados del siglo XX a través de su alta capacidad de reproducción y mecanismos conductuales o genéticos (Pribil

y Houlahan, 2003; Doubleday et al. 2016). Sin embargo, se observa recientemente una disminución inversa en las capturas multidecadales recientes del calamar argentino, *Illex argentinus* (Figura 1a), que es uno de los principales recursos de calamares en las pesquerías globales, representando aproximadamente el 9,3% del total de capturas de cefalópodos (FAO, 2022).

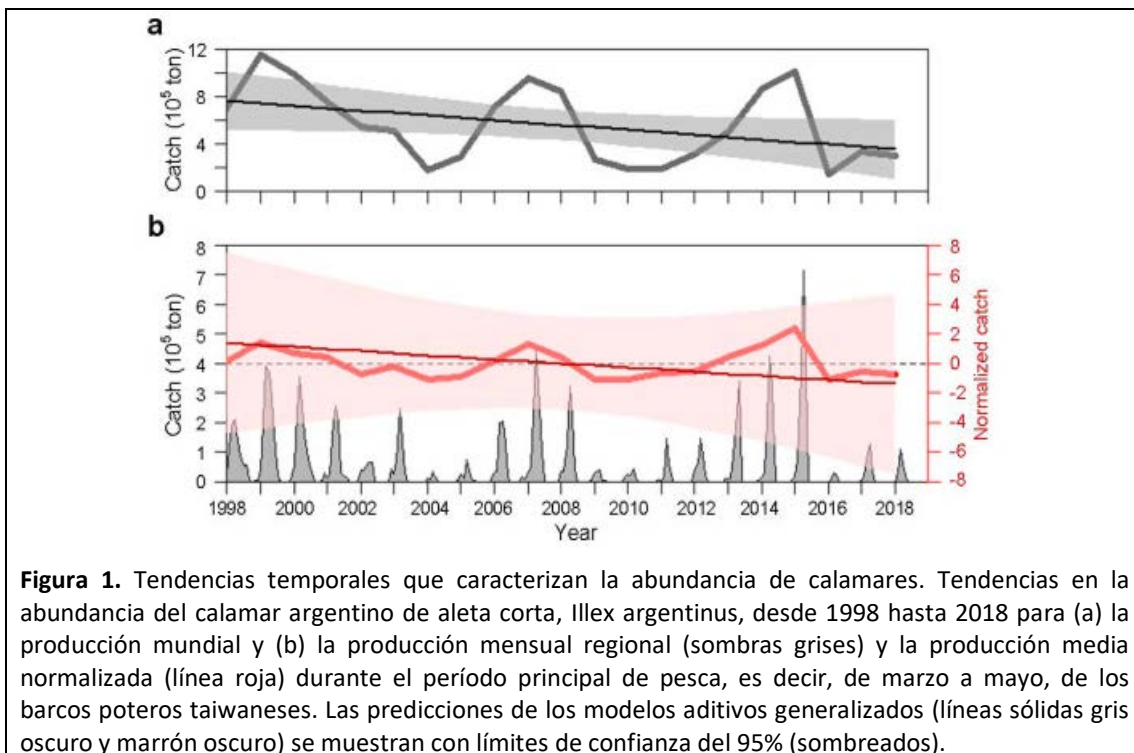


Figura 1. Tendencias temporales que caracterizan la abundancia de calamares. Tendencias en la abundancia del calamar argentino de aleta corta, *Illex argentinus*, desde 1998 hasta 2018 para (a) la producción mundial y (b) la producción mensual regional (sombras grises) y la producción media normalizada (línea roja) durante el período principal de pesca, es decir, de marzo a mayo, de los barcos poteros taiwaneses. Las predicciones de los modelos aditivos generalizados (líneas sólidas gris oscuro y marrón oscuro) se muestran con límites de confianza del 95% (sombreados).

La circulación a gran escala de las interacciones océano-atmósfera constituye la fuerza principal de los ecosistemas marinos, a pesar del reconocimiento de que no tiene en cuenta muchos tipos diferentes de corrientes dependientes de la escala y la estación, así como la dinámica de los vientos que comprenden los movimientos y, por lo tanto, pueden causar dificultades para tener en cuenta las implicaciones de los cambios en la población marina para la estabilidad, producción y suministro de los ecosistemas para los humanos (Litzow et al., 2020). Las pérdidas o ganancias de población marina en

ciertas etapas durante el ciclo de vida de una especie podrían tener implicaciones mucho mayores para los ecosistemas y los servicios pesqueros que las de otras y afectar la estructura y abundancia de la población de manera diferente (Stige et al., 2006; Litzow et al., 2014). Comprender y reconocer los atributos poblacionales de las especies es crucial para revelar los procesos responsables de las dinámicas espaciales y temporales de las distribuciones y abundancias de la población, y cada vez se considera más como una clave potencial para la conservación sostenible y la priorización de la pesca. Sin

embargo, pocos estudios han situado las influencias ambientales en los cambios de población y abundancia marina en especies en un contexto dependiente de las etapas de vida.

Además de las variables oceánicas y atmosféricas comúnmente utilizadas, como la temperatura de la superficie del mar (TSM) y las corrientes, recientemente se han aplicado técnicas de reducción de datos multivariados para describir modos de variabilidad en las condiciones de circulación de los océanos del mundo y se espera que ayuden a extraer de manera más efectiva los modos dominantes potenciales (De Mey y Benkiran, 2002; Furrer et al., 2007). Un análisis de función ortogonal empírica (EOF), comúnmente conocido como componentes principales (PC) para modos espacio-temporales que forman un conjunto de bases con ortogonalidad espacial y no correlación temporal para describir la variabilidad de los datos, se utiliza inicialmente para asociarse con una fase positiva o negativa para cada modo (Hannachi et al., 2007). Sin embargo, el EOF tiende a sobresalir en las variabilidades globales debido a restricciones de ortogonalidad. Para facilitar la extracción de patrones que describen variabilidades locales, es decir, que enfatizan específicamente la localidad donde la variabilidad climática es mayor en cualquier región estudiada, se desarrolla aún más un EOF rotado (REOF) y relaja las restricciones mencionadas, especialmente la ortogonalidad temporal, mediante la realización de una transformación de rotación para agrupar las variabilidades locales antes de realizar un análisis de autovalores (Mestas-Nunez, 2000; Lian y Chen, 2012). El análisis REOF puede evitar un patrón de análisis EOF parecido a un dipolo no físico que a menudo aparece cuando un modo dominante conocido tiene el mismo

signo en todo el dominio y simplifica las estructuras espaciales mientras conserva patrones robustos. Más importante aún, los índices desarrollados basados en el análisis REOF pueden preverse y proyectarse, lo que proporciona referencias para la gestión y estrategias en diferentes campos (Hannachi et al., 2007; Lian y Chen, 2012). Por lo tanto, el análisis REOF no solo puede ser una mejor elección en términos de precisión y eficacia, especialmente para identificar patrones localizados, sino que también tiene un mayor potencial para convertirse en otro índice climático oceánico novedoso que muestre las relaciones entre las variabilidades ambientales y la dinámica poblacional de los organismos marinos, independientemente de los desafíos ambientales actuales o futuros (Thorson et al., 2020).

En este trabajo utilizamos datos regionales detectados y corregidos, recopilados durante dos décadas por barcos poteros y exploramos cambios ecológicamente periódicos a lo largo de un gradiente latitudinal en las costas del Atlántico Sudoccidental para demostrar una dependencia mensual de los cambios en la abundancia y distribución del calamar argentino, *Illex argentinus*. La captura estandarizada por unidad de esfuerzo (CPUE), basada en las potencias relativas de pesca de los barcos, se utilizó para evaluar la abundancia diaria, mensual y ecológicamente periódica de las poblaciones de calamares en este estudio (Chen y Chiu, 2009). A pesar de que los datos pesqueros a menudo están sujetos a incertidumbres y están incompletos (Evans, 2003), proporcionamos la primera evaluación regional casi oceánica de los patrones de calamares subyacentes a las interacciones océano-atmósfera, y los patrones relativos aún pueden comunicar información sobre los cambios en los recursos de calamares. *Illex argentinus*, como especie tanto de vida corta como migratoria,

se considera particularmente vulnerable a perturbaciones climáticas y sus impactos correspondientes en términos de una gran inversión de energía cuando migra a hábitats de alta calidad para coincidir en el momento de su llegada con la abundancia óptima de recursos en su destino (Tuljapurkar, 1990; Benton y Grant, 1996; Both y Visser, 2001). Específicamente, nos preguntamos cómo la variación espacio-temporal en la abundancia de *Illex argentinus* fue influenciada por los cambios en los entornos de la dinámica océano-atmósfera. Además, las tendencias anuales de abundancia de calamares se enfocaron y utilizaron de manera consistente para comparar con variables en cada cuadrícula en este estudio, ya que se consideraba que la relación entre la cantidad total en la zona de pesca y los entornos marinos representaba mejor las fluctuaciones homogéneas de la circulación a gran escala en lugar de las señales de perturbación regional. También se exploraron y evaluaron los mecanismos que impulsan estas tendencias temporales y espaciales en la abundancia de calamares y los impactos continuos del calentamiento hasta finales de este siglo, cuando se espera que la probabilidad de abundancia y las fluctuaciones temporales cambien, generando preocupaciones sobre la seguridad alimentaria de las proteínas pesqueras y una economía azul sostenible.

2. Materiales y métodos

2.1. Abundancia de calamar

Las capturas de calamares en series temporales se calcularon a partir de los registros diarios de bitácoras de los barcos poteros taiwaneses desde 1998 hasta 2018 en alta mar, al este de Argentina y al norte de las Islas Malvinas en el Atlántico Sudoccidental, lo que constituyó una compilación de datos pesqueros regionales

de calidad controlada. El área de pesca se extendía principalmente desde los 34°S hasta los 55°S y desde los 50°W hasta los 70°W, abarcando aproximadamente la distribución del calamar argentino, *Illex argentinus*, desde las áreas de desove en la plataforma del norte de la Patagonia, migrando hacia el sur a lo largo de las costas de Argentina durante las etapas juveniles y tempranas de la vida, y migrando hacia el norte desde las Islas Malvinas cuando maduran (Haimovici et al., 1998; Wuluda et al., 1999). Las capturas anuales taiwanesas de calamar estuvieron fuertemente asociadas positivamente con las capturas globales ($R^2 = 0,94$; Figura 1; Figura S1). La captura estandarizada por unidad de esfuerzo (CPUE), basada en las potencias relativas de pesca de los barcos, se utilizó para evaluar la abundancia diaria de calamares (Chen y Chiu, 2009).

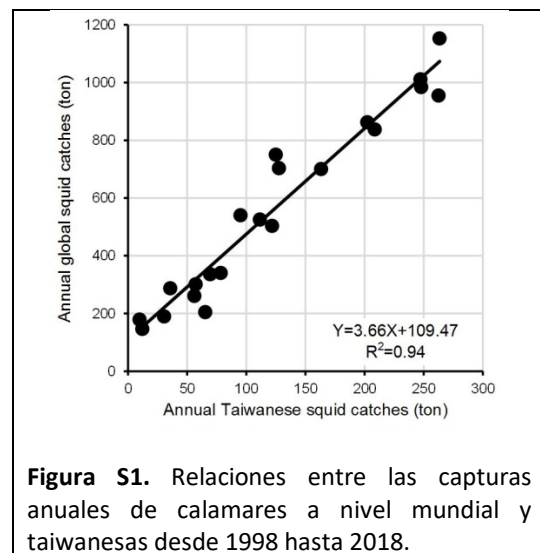


Figura S1. Relaciones entre las capturas anuales de calamares a nivel mundial y taiwanesas desde 1998 hasta 2018.

2.2. Fases periódicas de los calamares

Las pesquerías taiwanesas de calamares se enfocan principalmente en el grupo reproductor del Stock Bonaerense Nor-Patagónico (BNPS) (Jereb y Roper, 2010). Para el grupo BNPS, el área de desove se encuentra en las plataformas continentales nor-este de América del Sur. Los calamares maduros nacen cerca de la Confluencia Brasil-

Malvinas, y sus paralarvas y juveniles se desplazan hacia las plataformas y migran hacia el sur. Los calamares suelen agruparse alrededor de las plataformas y los bordes de las mismas, convirtiéndose en los principales recursos pesqueros durante este período. Posteriormente, los calamares maduran en las plataformas continentales del sur alrededor de las Islas Malvinas y comienzan a migrar hacia el norte después de alcanzar la madurez. Dado que *Illex argentinus* tiene un ciclo de vida anual y es una especie migratoria (Hatanaka, 1986; Sacau et al., 2005), para evaluar posibles correlaciones de las fases de vida del calamar con los entornos oceánicos y atmosféricos, agrupamos los meses en cuatro periodos ecológicos de calamares: (1) durante la maduración, alimentación, migración, desove y muerte, y a menudo en aguas marinas más profundas de junio a septiembre (JJAS) del año anterior, (2) durante la reproducción, eclosión y las primeras etapas de vida de octubre a diciembre (OND) del año anterior, (3) durante la etapa temprana de vida y el rápido crecimiento juvenil, con migración principalmente hacia el sur y el comienzo de la migración hacia el norte en enero y febrero (JF) del año de pesca, como la temporada previa a la pesca, y (4) durante la maduración, alimentación y crecimiento con migración hacia el norte y concentraciones máximas generalmente encontradas de marzo a mayo (MAM) del año de pesca, como la temporada principal de pesca.

2.3. Datos ambientales oceánicos y atmosféricos

Utilizamos cuatro variables oceánicas, que incluyen la temperatura de la superficie del mar (TSM), las direcciones zonal (Ucur) y meridional (Vcur) de las corrientes marinas, y la energía cinética de los giros (EKE), para calificar las correlaciones entre la abundancia

anual de calamares y los entornos oceánicos. La TSM, que caracteriza las condiciones térmicas y el calentamiento, ha afectado significativamente a los ecosistemas marinos (Levitus et al., 2005; Behrenfeld et al., 2006; Belkin, 2009). Las variables Ucur y Vcur revelaron las corrientes marinas de flujos continuos de aguas en una dirección específica dentro del océano. Para representar mejor las distribuciones y entornos de los calamares, se utilizaron respectivamente las variables Ucur y Vcur a una profundidad de 105 metros en este estudio, que también tuvo en cuenta la profundidad de las distribuciones de calamares (Roper et al., 1984). La EKE, como un aspecto importante de la dinámica oceánica regional, respaldó la comprensión de la difusión de giros oceánicos e identificó fuentes y sumideros de energía mecánica (Heywood et al., 1994; Qiu, 1999), y también representó comúnmente la actividad de variabilidades internas del océano, como giros a mesoescala, filamentos a submesoescala y ondas de inestabilidad tropical (Chen et al., 2012; Dong et al., 2012; Ding et al., 2020).

El conjunto de datos NOAA de Temperatura de la Superficie del Mar de Alta Resolución (OISSTv2) (Reynolds et al., 2007) en una resolución espacial diaria y temporal a nivel global de un cuarto de grado, proporcionado por NOAA/OAR/ESRL PSL, EE. UU. (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>), fue extraído durante el período de estudio. La Temperatura de la Superficie del Mar Reconstruida Extendida (ERSST) V5 de NOAA en una resolución espacial a nivel global de dos grados y resolución temporal mensual, que representa el rendimiento histórico del modelo, fue proporcionada por NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, EE. UU., desde su sitio web en <https://psl.noaa.gov/data/gridded/>

data.noaa.ersst.v5.html . Los datos de corrientes marinas se tomaron del conjunto de datos de reanálisis del Sistema Global de Asimilación de Datos Oceánicos (GODAS) (Behringer y Xue, 2004) desarrollado por NCEP y respaldado por NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado (<https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.godas.html>).

El modelo GODAS, basado en la versión 3 del GFDL MOM, tenía 40 niveles con una resolución de 10 metros en los primeros 200 m de aguas marinas. Fue forzado por el flujo de momento, el flujo de calor y el flujo de agua dulce del reanálisis atmosférico de NCEP. La EKE se derivó del campo de anomalía de altura de la superficie del mar (SSHA) asumiendo geostrofica, y la fórmula se dio de la siguiente manera:

$$EKE = (U^2 + V^2) / 2$$

donde U y V eran componentes de anomalías de velocidad geostrofica, derivadas de los gradientes zonales y meridionales del SSHA, respectivamente (Hwang et al., 2004). Los datos de SSHA se obtuvieron originalmente del Centro de Archivo Activo de Oceanografía Física (PO.DAAC) en una resolución espacial global de 1/6 de grado y resolución temporal de penta días (Fournier et al., 2022).

Para explorar los posibles mecanismos de la circulación a gran escala, se recopilamos seis variables atmosféricas, incluida la velocidad del viento, la presión atmosférica al nivel del mar y los flujos relacionados con la superficie, como el calor latente, el calor sensible, la radiación solar neta en la superficie y la radiación de onda larga neta en la superficie, del quinto conjunto de datos de reanálisis atmosférico de la climatología global de la ECMWF (ERA5) desarrollado por el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/reanalysis-datasets/era5>) (Hersbach et al.,

2020). El reanálisis ERA5 se produjo con los pronósticos del modelo de la versión CY41R2 del Sistema Integrado de Pronóstico de la ECMWF (IFS) y la asimilación de datos 4D-Var. La resolución del modelo IFS era una cuadrícula transformada con un espaciado nominal de puntos de cuadrícula de 9 km (0,08°) en la dirección zonal, 137 niveles híbridos sigma/presión (modelo) en la dirección meridional y el nivel superior a 0,01 hPa. Los datos mencionados anteriormente estaban a una resolución espacial global de medio grado y resolución temporal diaria. El flujo de calor neto en la superficie final se definió como:

$$Q_{\text{neto}} = LW + SW + LH + SH$$

donde LW y SW eran la radiación neta de onda larga y onda corta en la superficie, respectivamente, y LH y SH eran los flujos de calor latente y sensible, respectivamente. Cabe destacar que, en este estudio, el flujo de calor neto positivo en la superficie se definió como una fuerza descendente, es decir, la atmósfera influyendo en el océano.

Todas las variables oceánicas y atmosféricas se interpolaron bilinealmente a una cuadrícula de 0,5° x 0,5°.

2.4. Simulación histórica de la TSM y proyecciones futuras de CMIP6

En este estudio se utilizaron modelos climáticos globales del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) (Eyring et al., 2016). Se seleccionó el miembro del conjunto r1i1p1 de simulaciones históricas para cada modelo del conjunto de experimentos de Diagnóstico, Evaluación y Caracterización del Clima (Eyring et al., 2016). Se seleccionaron los escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas 3-7.0 y 5-8.5 (SSP370 y SSP585) para representar las características ambientales futuras (O'Neill et al., 2016).

Ambos escenarios se establecieron para representar entornos con desarrollo basado en combustibles fósiles que resultan en forzamiento radiativo global de hasta $7,0 \text{ W m}^{-2}$ y $8,5 \text{ W m}^{-2}$, y un aumento de temperatura de casi $4 \text{ }^\circ\text{C}$ y $5 \text{ }^\circ\text{C}$ en relación con 1850-1900, respectivamente, en 2100. El escenario SSP370 es un escenario de emisión media y un mundo fragmentado con renacimiento del nacionalismo, mientras que el escenario SSP585 es impulsado por combustibles fósiles y crecimiento no restringido en la producción económica y el uso de energía. En este estudio, simplemente, se utilizó el escenario SSP370 para representar un escenario más probable si no se implementaran políticas efectivas para controlar las emisiones de carbono, y el escenario SSP585 se utilizó para representar el escenario más extremo en términos de calentamiento futuro, describiendo un mundo donde las emisiones de gases de efecto invernadero continúan aumentando sin restricciones. Esta simplificación y énfasis en escenarios específicos, como se demuestra en varios estudios de proyección futura (Adeyeri et al., 2022), podrían permitir una presentación más clara y enfocada de los resultados, sin la necesidad de analizar todos los escenarios posibles en detalle. Los detalles de los modelos CMIP6 y la configuración experimental se encuentran en el sitio web de CMIP (<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>). Todos los datos de CMIP6 se descargaron del portal de datos para CMIP6 alojado por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, Departamento de Energía (<http://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>).

Para eliminar sesgos, evaluamos el rendimiento de los modelos CMIP6 en la simulación de patrones siguiendo la siguiente definición. Primero, la TSM en cada modelo se proyectó sobre el modo de patrón de

circulación observado para obtener la serie temporal de la intensidad del patrón en el modelo. Luego, evaluamos el rendimiento del modelo en función de qué tan bien reproducía la característica simétrica global de la altura geostrófica en dos niveles atmosféricos críticos sobre todo el Atlántico. Específicamente, la presión a nivel del mar y las alturas geostróficas a 850 hPa (Z850) y 200 hPa (Z200), que representaban niveles atmosféricos comunes inferiores y superiores, respectivamente, regresados sobre las regiones de 70°O - 30°E y 60°S - 60°N al índice de patrón simulado por el modelo en cada modelo, fueron seleccionados para la evaluación. La correlación de patrones se calculó mediante mapas de coeficientes de regresión entre los patrones observados y simulados por el modelo. Para seleccionar los buenos modelos, aplicamos tres criterios adicionales. Primero, el coeficiente de correlación de patrones (PCC) debe ser mayor que 0,5 y estar dentro del intervalo de confianza del 95% en comparación con las observaciones:

$$\text{PCC} = \frac{\sum_{i=1}^N [w_i (m_i - \bar{m})(o_i - \bar{o})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (w_i (m_i - \bar{m})^2) \sum_{i=1}^N (w_i (o_i - \bar{o})^2)}}$$

donde w representaba el coseno de la latitud como pesos, m eran datos basados en modelos individuales y o representaba observaciones, todo con respecto al número de cuadrículas i a N dentro del área de dominio. En segundo lugar, las razones de las desviaciones estándar de los niveles atmosféricos Z200 y Z850 entre el modelo y las observaciones podían obtenerse en el rango de $1 \pm 0,5$ para asegurar la variabilidad modal.

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i (m_i - \bar{m})^2)}{\sum_{i=1}^N w_i}}, \text{SD}_{\text{ratio}} = \frac{\text{SD}_m}{\text{SD}_o}$$

Finalmente, la relación de sesgo entre el modelo y las observaciones sería menor que la media del sesgo de los modelos CMIP6:

$$\text{Bias}_{\text{ratio}} = \frac{\bar{m} - \bar{o}}{\max(o) - \min(o)}$$

Por lo tanto, un total de tres y cinco modelos se utilizaron finalmente para investigar los patrones futuros y las distribuciones periódicas bajo los escenarios de calentamiento SSP370 y SSP585, respectivamente, incluyendo AWI-CM-1-1-MR, CAMS-CSM1-0, EC-Earth3, GFDL-CM4 y MPI-ESM1-2-HR. El PCC, la relación de desviación estándar, la relación de sesgo y el error cuadrático medio (RMSE) de los modelos se enumeraron en la Tabla S1.

Se llevaron a cabo proyecciones de cambio climático a finales del siglo (2080-2100) sobre el Atlántico Sur basadas en las fases ecológicamente periódicas de *Illex argentinus*, mediante modelos climáticos y escenarios de emisiones.

2.5. Estadísticas

Para minimizar el efecto del esfuerzo de muestreo, la abundancia diaria de calamares durante el período principal de pesca, es decir, de marzo a mayo de cada año, se promedió para representar la abundancia anual de calamares. Evaluamos los efectos temporales sobre la abundancia anual de calamares y promediamos las variables oceánicas y atmosféricas en función de cada fase ecológica periódica de *Illex argentinus* utilizando correlaciones de Pearson. Para capturar el control ambiental a gran escala en lugar de la información regional, la abundancia anual de calamares se utilizó consistentemente para comparar con los entornos oceánicos y atmosféricos en cuadrículas individuales. Se ajustaron y estimaron regresiones lineales entre la serie

temporal de la abundancia anual de calamares y las variables oceánicas en cada cuadrícula. Para caracterizar mejor los entornos regionales en la principal área de pesca, extrajimos específicamente las variabilidades de la serie temporal de la TSM mediante la realización del análisis REOF utilizando dos funciones "pca" y "rotatefactors" en el software MATLAB 9.8. Se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) para identificar los patrones espaciales de la serie temporal líder de REOF (REOF1) y su correspondiente primera componente principal de la serie temporal (PC1). Luego, estimamos las relaciones entre REOF1 PC1 y las variables atmosféricas en cada cuadrícula mediante regresiones lineales.

3. Resultados

3.1. Patrones identificados en series temporales y roles de la circulación a gran escala

Las series temporales de la abundancia de *Illex argentinus* en el Atlántico Sudoccidental mostraron dinámicas mensuales y fluctuaciones cuasi-cíclicas anuales (Figura 1b). La mayor abundancia se observó en 1999, 2007, 2014 y 2015, mientras que la menor abundancia ocurrió en 2004, 2009, 2010 y 2016. Para minimizar los efectos de la duración de la temporada de pesca, solo se utilizaron y representaron como valores anuales las sumas de la abundancia diaria de calamares durante el período principal de pesca, es decir, de marzo a mayo (MAM), que representan del 34,4% al 94,1% del total de capturas de los buques poteros taiwaneses, para análisis adicionales. Los análisis de correlación indicaron que la frecuencia de abundancia anual de calamares se explicaba mejor por la TSM en JF, es decir, la temporada previa a la pesca, la EKE durante

la temporada principal de pesca, es decir, MAM, y tanto Ucur como Vcur de junio a septiembre del año anterior que por otras combinaciones entre los periodos ecológicos de los calamares y las variables oceánicas (Tabla 1; Figura S2). Además, al estimar cambios para los años de mayor y menor

abundancia, la TSM en JF y la EKE en MAM también se distinguieron por patrones mensuales, lo que indica sus roles prominentes en la variación interanual en la abundancia de calamares, mientras que las variables Ucur y Vcur mostraron patrones relativamente consistentes (Figura S3).

Tabla S1. Patrones de coeficiente de correlación, razón de desviación estándar (SD), razón de sesgo y error cuadrático medio (RMSE) de los cinco modelos CMIP6 seleccionados utilizados para el análisis del calentamiento futuro para las altitudes geopotenciales de 850 hPa (Z850) y 200 hPa (Z200), respectivamente.

Modelo	Escenario#		Correlación		Razón SD		Razón sesgo			RMSE
	SSP370	SSP585	Z850	Z200	Z850	Z200	Z850	Z200	Z850	Z200
AWI-CM-1-1-MR		v	0,46	0,59	0,79	0,74	0,01	0,03	6,17	11,02
CAMS-CSM1-0	v	v	0,76	0,85	0,84	0,68	0,01	0,04	4,24	7,69
EC-Earth3	v	v	0,62	0,7	0,68	0,6	0,02	0,08	5,1	10,79
GFDL-CM4		v	0,65	0,74	0,73	0,7	0,01	0,04	4,9	9,11
MPI-ESM1-2-HR	v	v	0,56	0,66	0,73	0,68	0,01	0,06	5,49	10,65

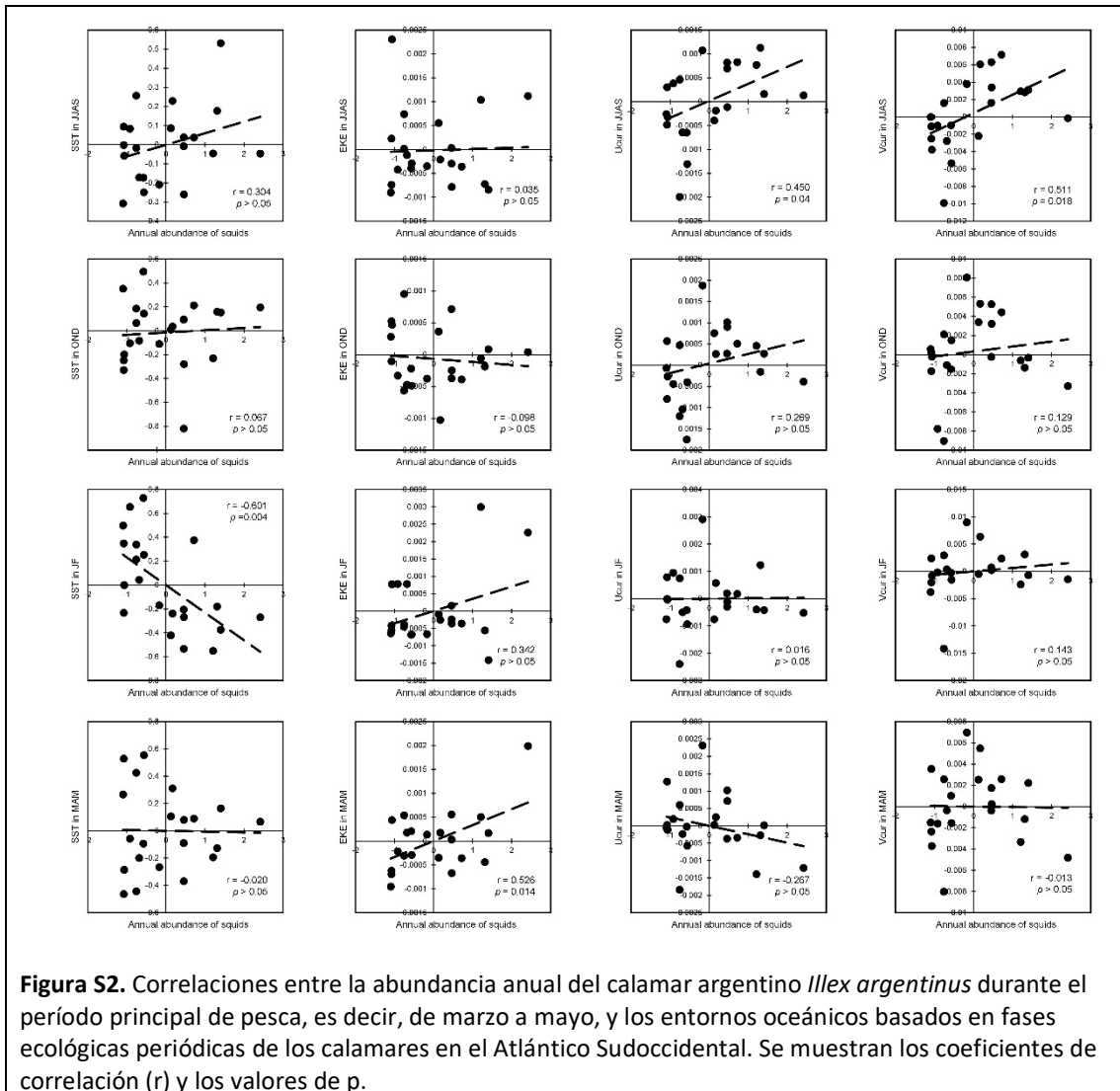
#Rutas Socioeconómicas Compartidas 3-7.0 y 5-8.5 (SSP370 y SSP585)

Tabla 1. Coeficientes de correlación (r) para la relación entre la abundancia anual de calamar argentino *Illex argentinus*, durante el período principal de pesca, es decir, de marzo a mayo, y los entornos oceánicos basados en fases ecológicamente periódicas de los calamares en el Atlántico Sudoccidental.

Fase Periódica	Variable Oceánica			
	TSM	EKE	Ucur	Vcur
JJAS	0.304	0.035	0.450*	0.511*
OND	0.067	-0.098	0.269	0.129
JF	-0.601**	0.342	0.016	0.143
MAM	-0.020	0.526*	-0.267	-0.013

*p < 0.05; **p < 0.01.

Abreviaturas: TSM, temperatura de la superficie del mar; EKE, energía cinética de vorticidad; Ucur, dirección zonal de las corrientes superficiales del mar a 105 metros de profundidad; Vcur, dirección meridional de las corrientes superficiales del mar a 105 metros de profundidad; JJAS, junio, julio, agosto y septiembre; OND, octubre, noviembre y diciembre; JF, enero y febrero; MAM, marzo, abril y mayo.



La mayoría de las áreas (65,2%) en la zona de pesca mostraron una relación lineal estadísticamente significativa y negativa entre la abundancia anual de calamares y las anomalías de la TSM en enero y febrero (JF), lo que indica que una TSM más baja proporcionó condiciones ambientales más adecuadas para una mayor abundancia de calamares (Figura 2a). La estructura de enfriamiento de la TSM se observó además como parte de un patrón de dipolo de la TSM en toda la cuenca sobre el Atlántico Sur, que estaba compuesto por una anomalía cálida de la TSM que se extendía desde la costa norte de Argentina hasta la costa sur de África (25°S a 38°S), y una anomalía fría de la TSM existía

desde la costa de la Patagonia hasta el centro del Atlántico sur (38°S a 54°S). Este dipolo de la TSM en toda la cuenca del Atlántico Sur se explicó principalmente mediante el patrón REOF1, con el 15,9% de la variación explicada en la banda multidecadal (Figura 2b). En particular, los dos centros del dipolo estaban en gran medida colocados en el mismo lugar y tenían orientaciones similares al mencionado patrón espacial entre la abundancia anual de calamares y las anomalías de la TSM en JF. El buen poder predictivo ($R^2 = 0,59$, $p < 0,001$) indicó que el REOF1 actuaba como una función positiva de la relación entre la abundancia anual de calamares y las anomalías de la TSM en JF

(Figura 2c). Además, al extraer el REOF1 PC1 para representar simplemente la variabilidad climática, también se observó una correlación significativa con la variación interanual en la abundancia anual de calamares ($r = 0,61$, $p = 0,003$). La respuesta cercana a la superficie del REOF1 PC1 estaba dominada por un patrón de ondas positivo-negativo-positivo de la presión atmosférica a nivel del mar sobre el Atlántico Sur local (Figura 2d). A lo largo de la costa norte de Argentina (30°S), había circulación anticiclónica, donde la actividad de las tormentas se veía suprimida, pero la circulación ciclónica principal estaba en cambio sobre el este de las Islas Malvinas. La zona de pesca de calamares generalmente

estaba ubicada en el borde oeste de este sistema de baja presión en toda la cuenca. Para investigar la circulación a gran escala en este modo, el análisis del presupuesto de calor mostró que las anomalías negativas de la TSM en JF estaban bien ubicadas con los flujos ascendentes de Q_{neto} y viceversa, lo que demostró que los cambios de las temperaturas oceánicas responderían a los flujos atmosféricos y serían influenciados por la atmósfera (Figura 2e). Modulaciones similares también se han observado en estudios anteriores (Gulev et al., 2013), lo que indica que el mar extratropical estaba altamente modulado por la fuerza atmosférica a escala de tiempo interanual.

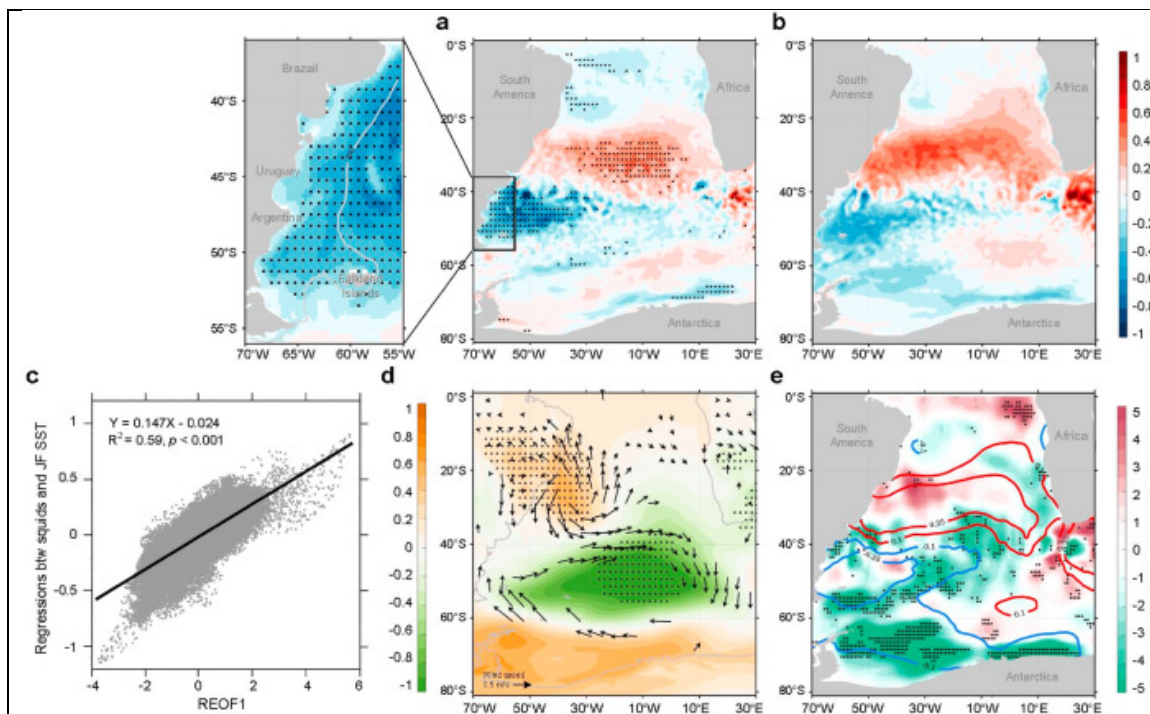


Figura 2. Mapas de regresión de series temporales de la abundancia anual de calamares y los entornos oceánicos y atmosféricos relacionados con la temperatura de la superficie del mar (TSM) en enero y febrero (JF), es decir, la temporada previa a la pesca. (a) Regresiones entre la abundancia anual de calamares y las anomalías de la TSM en JF. (b) El patrón principal rotado de la función ortogonal empírica (REOF1) de las anomalías de la TSM en JF. (c) Relación entre (a) y (b). (d) Regresiones entre el primer componente principal (PC1) del REOF1 y la presión atmosférica a nivel del mar en JF. La dirección y la intensidad del viento se indican con flechas. (e) Regresiones entre el PC1 del REOF1 y el flujo neto de calor en la superficie en JF. Los valores en $\pm 0,1$ y $\pm 0,25$ en (b) se señalan en rojo y azul, respectivamente, en (e). Todos los mapas tienen una resolución de cuadrícula de $0,5^{\circ}$ por $0,5^{\circ}$, y los puntos negros en las cuadrículas representan la significancia ($p < 0,05$).

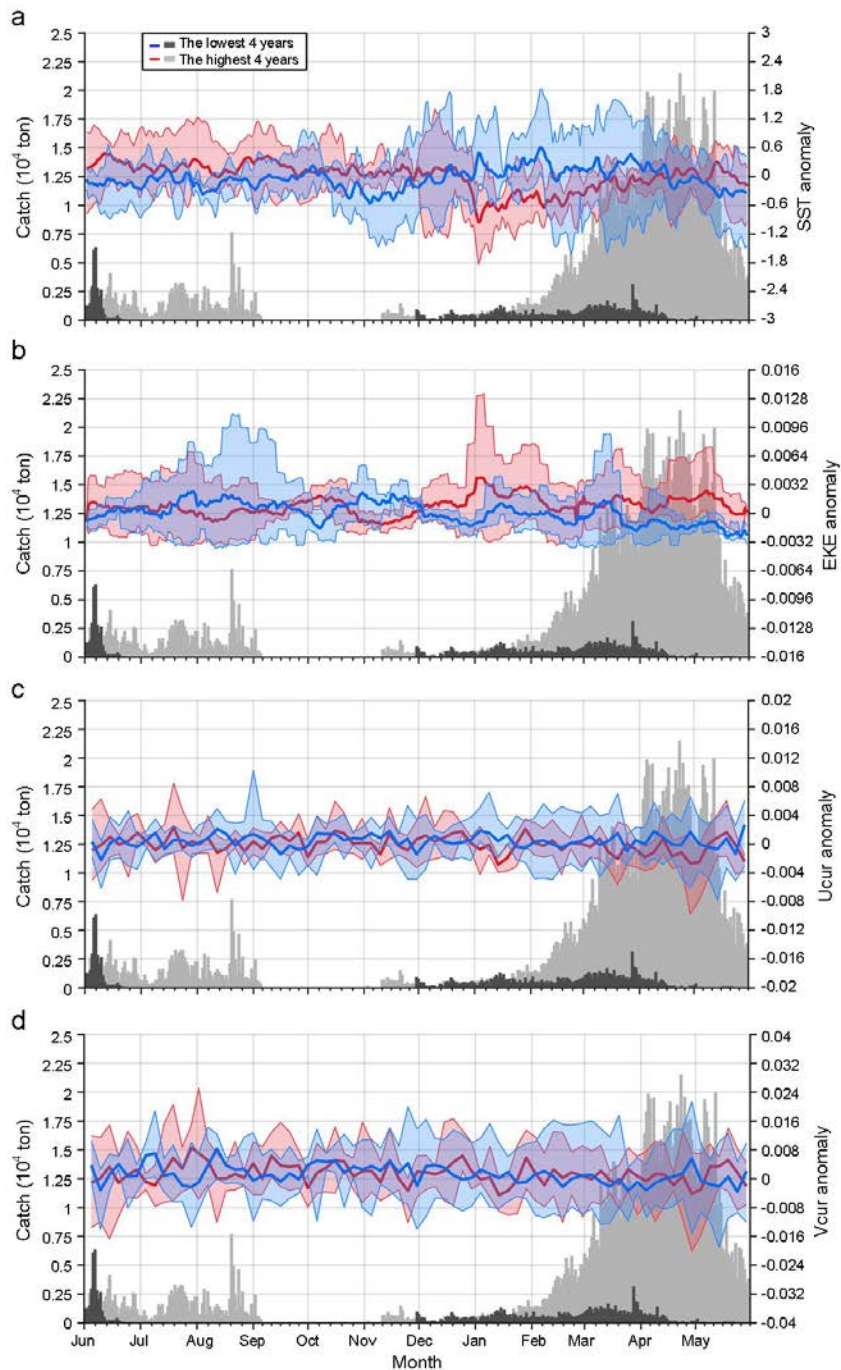


Figura S3. Tendencias temporales que caracterizan la abundancia de calamares y entornos oceánicos. Los entornos oceánicos incluyen anomalías diarias de (a) temperatura superficial del mar (TSM), (b) energía cinética de vorticidad (EKE), (c) direcciones zonales (Ucur) y (d) direcciones meridionales (Vcur) de las corrientes superficiales del mar. Las barras grises y negras muestran la abundancia diaria promedio de calamares argentinos de aleta corta entre los 4 años con las capturas más altas y más bajas, mientras que las líneas rojas y azules son anomalías diarias de los entornos oceánicos en los 4 años con las capturas más altas y más bajas. El rango de valores de anomalía se indica mediante un sombreado.

A diferencia de las omnipresentes anticorrelaciones entre la abundancia anual de calamares y las anomalías de la TSM en JF, la EKE en MAM mostró relaciones mixtas con la abundancia anual de calamares, con un 9,5 % y un 2,3 % de áreas con correlaciones

significativamente positivas y negativas, respectivamente, abarcando el área de pesca (Figura 3a; Figura S4). Este patrón de EKE en MAM sobre el área de pesca también se podría atribuir en gran medida a la variabilidad climática del REOF1, es decir, el PC1 del REOF1 (Figura 3b), que nuevamente demostró sus contribuciones espaciales a nivel de cuenca en la abundancia anual regional de calamares ($R^2 = 0,82$, $p < 0,001$; Figura 3c) y promovió fuertes vientos del oeste y suroeste como parte del anticiclón sobre el Atlántico Sur (Figura 3d). Los mecanismos detallados mostraron que el viento cercano a la superficie sobre la costa este de Argentina impulsó las anomalías hacia el sur de las corrientes marinas superiores mediante el transporte de Ekman sobre la plataforma de la Patagonia (Figuras 3e y 3f), reduciendo los vientos predominantes del noroeste y debilitando las

corrientes marinas superficiales del norte en MAM.

Por lo tanto, nuestros análisis sugieren que la variación en dos variables oceánicas asociadas con la abundancia anual de calamares, es decir, las anomalías de la TSM en JF y la EKE en MAM, está inextricablemente asociada con los patrones de la TSM a escala de cuenca, es decir, los patrones REOF1, todos los cuales forman parte de las interacciones océano-atmósfera. De hecho, este REOF1 ha sido identificado como una de las principales variabilidades climáticas interanuales sobre el Atlántico Sur en el verano austral (Tseng et al., 2023). En adelante, nos referiremos al PC1 del REOF1 en series temporales como el Patrón Simétrico del Atlántico (ASP) por conveniencia.

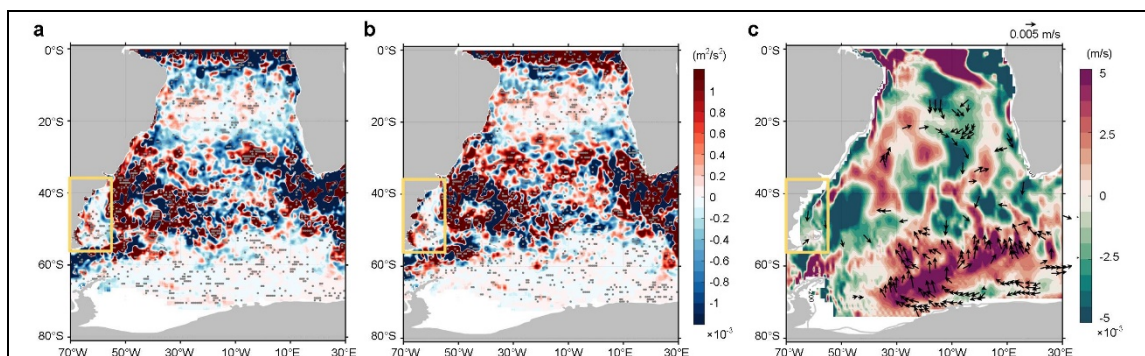
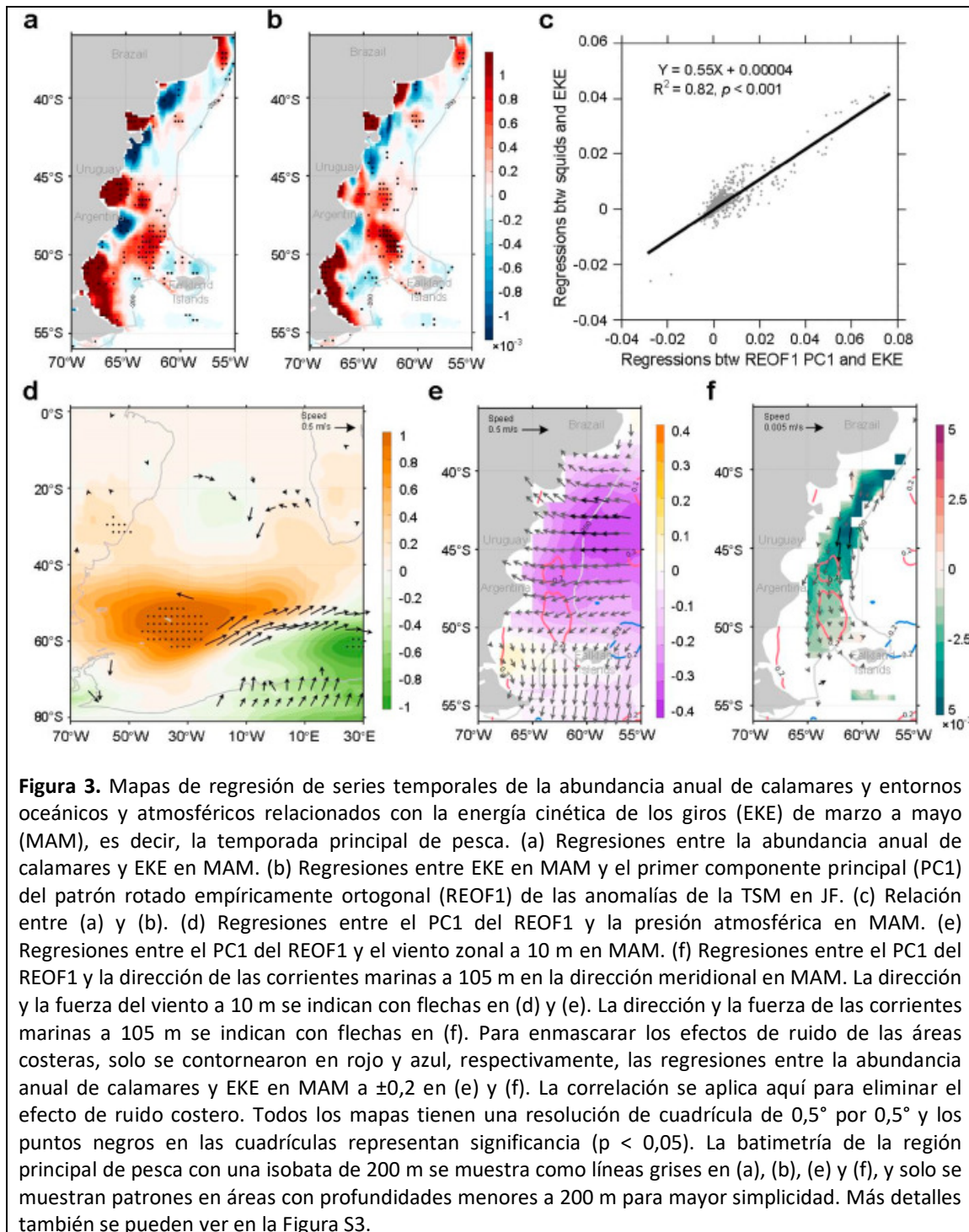


Figura S4. Mapas de regresión de la abundancia anual de calamares y ambientes oceánicos y atmosféricos relacionados con la energía cinética de las ondas (EKE) de marzo a mayo (MAM), es decir, la temporada principal de pesca. (a) Regresiones entre la abundancia anual de calamares y la EKE en MAM. (b) Regresiones entre la EKE en MAM y el primer componente principal (PC1) del patrón REOF1 (Función Ortogonal Empírica Rotada) de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en enero y febrero (JF). (c) Regresiones entre el PC1 de REOF1 y la presión del nivel del mar en MAM. Todos los mapas tienen una resolución de cuadrícula de $0,5^\circ$ por $0,5^\circ$, y los puntos negros en las cuadrículas representan la significancia ($p < 0,05$). Las cajas amarillas representan el área principal de pesca de los barcos poteros Taiwaneses.



3.2. Conectando dinámicas océano-atmósfera a escalas regional y global

Como parte del análisis realizado, se documentó una estructura global del sistema de circulación mostrando la función de corriente asociada con el ASP en diferentes niveles atmosféricos, incluyendo la presión

en la superficie del mar y las alturas geopotenciales a 850 hPa y 200 hPa (Figura S5). Los resultados mostraron que el patrón alto-bajo-alto mencionado sobre el Atlántico sur formaba parte de una estructura semejante a una onda de Rossby simétrica que se extendía desde el Atlántico tropical hasta las áreas polares del Atlántico norte y

sur (Carvalho et al., 2004; Kayano et al., 2013). La estructura ondulatoria era una estructura meridional profunda a lo largo de la troposfera y ejerce una fuerza de teleconexión desde las regiones tropicales hasta las extratropicales en ambos hemisferios (Salby y Garcia, 1987). Esta estructura simétrica llevó a la hipótesis de que la estructura interhemisférica del ASP era una respuesta a la fuerza tropical y ejercía su modulación más fuerte sobre el Atlántico sur, especialmente sobre la región de la Plataforma Patagónica. Como se mostró en

un estudio anterior (Tseng et al., 2023), este patrón estaba potencialmente influenciado por el sistema de monzones sudamericanos. Por lo tanto, nuestros resultados revelaron claramente percepciones espaciales y periódicas importantes sobre el potencial ASP y las tendencias en la abundancia anual de calamares; es decir, que la fuerza tropical en el Océano Atlántico podría proporcionar una predictibilidad potencial para la variación interanual en la TSM en el Atlántico sur y la variación en la abundancia anual de calamares sobre la Plataforma Patagónica.

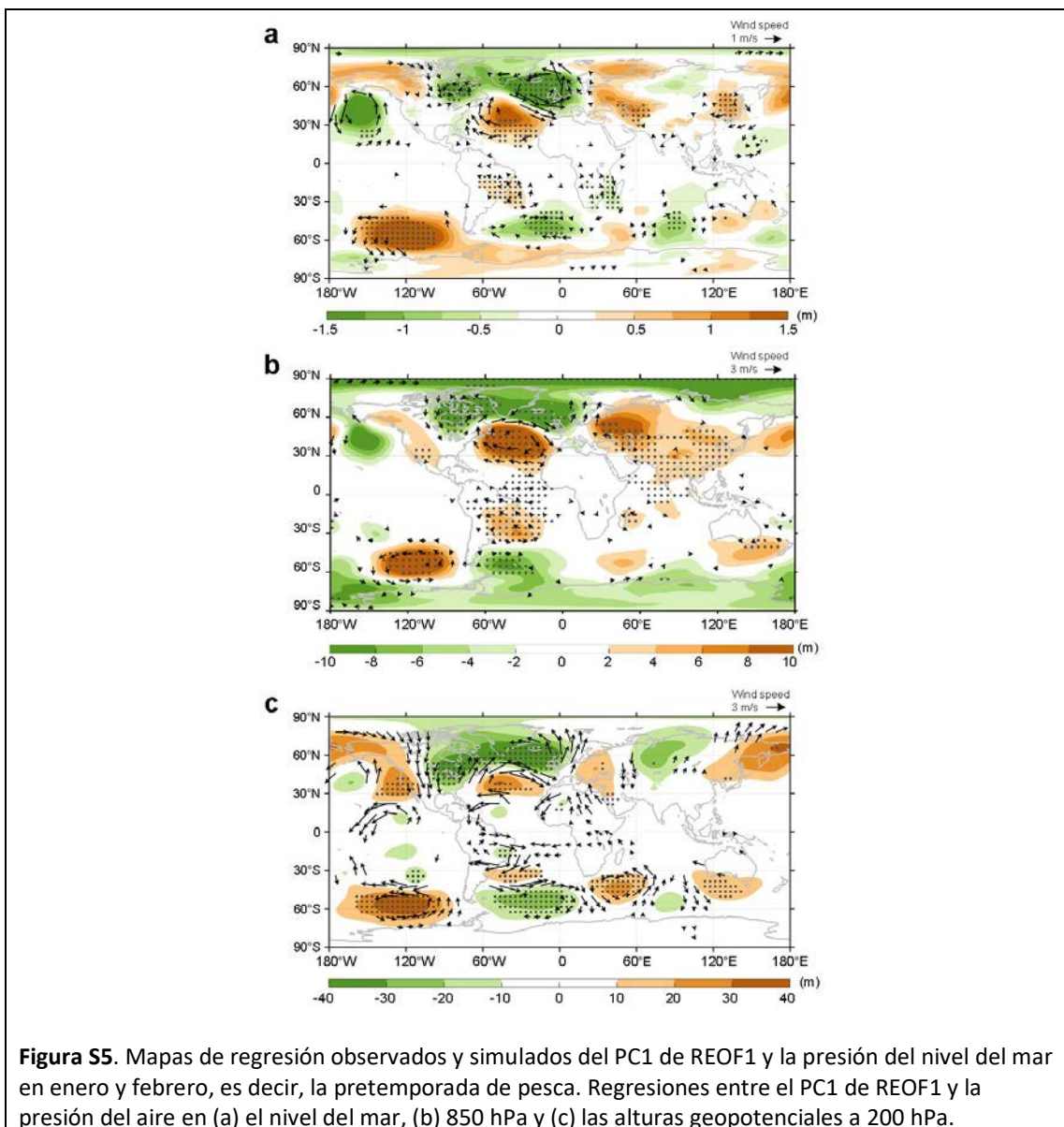
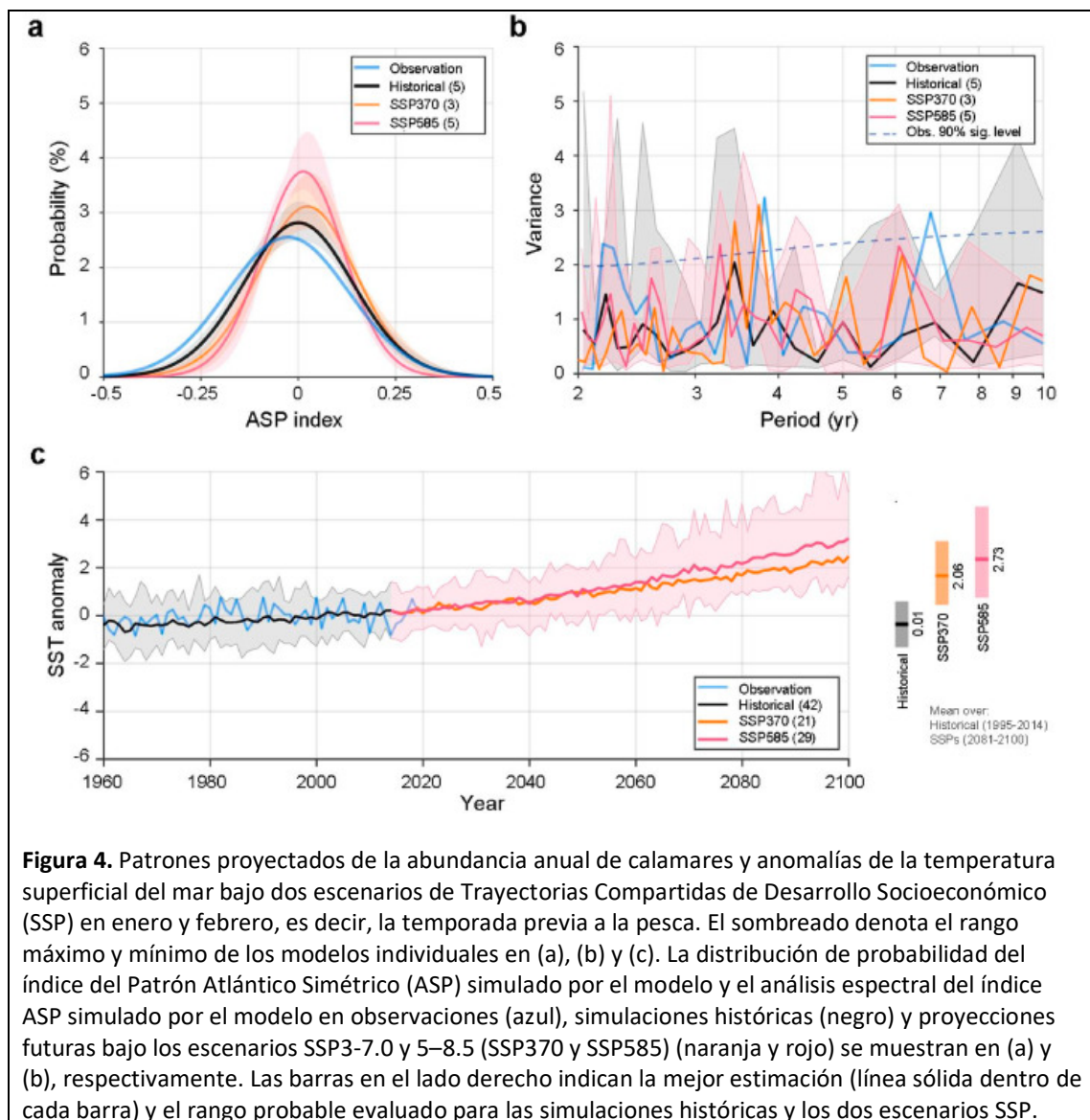


Figura S5. Mapas de regresión observados y simulados del PC1 de REOF1 y la presión del nivel del mar en enero y febrero, es decir, la pretemporada de pesca. Regresiones entre el PC1 de REOF1 y la presión del aire en (a) el nivel del mar, (b) 850 hPa y (c) las alturas geopotenciales a 200 hPa.

3.3. Proyección de la dinámica de la abundancia de calamares

Bajo ambos escenarios SSP370 y SSP585, se proyectaron fases más positivas y una variación dramáticamente menor del ASP simulado por el modelo, lo que implica un aumento ligeramente mayor en la abundancia anual de calamares pero menos oportunidades de alta abundancia para el año 2100 (Figura 4a). Las frecuencias de los ciclos de intervalos de alta abundancia serían más

cortas pero más inconsistentes (Figura 4b). Sin embargo, se proyectaron aumentos frecuentes en las anomalías de la TSM en enero y febrero sobre la zona de pesca de *Illex argentinus*, lo que implicaría adicionalmente una disminución proyectada en la abundancia anual de calamares y podría compensar en cambio los mencionados aumentos positivos en la abundancia anual de calamares beneficiados por el ASP simulado por el modelo (Figura 4c).

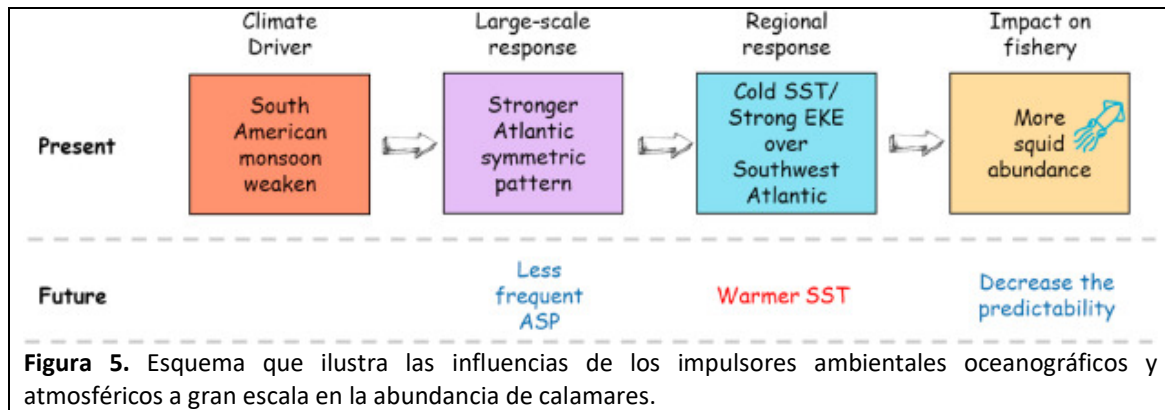


4. Discusión

El análisis realizado demuestra cómo los cambios oceánicos y atmosféricos recientes alterarían continuamente las tendencias temporoespaciales de la abundancia anual de calamares en el Atlántico Sudoccidental. ¿*Illex argentinus* todavía se beneficiaría de un entorno marino cambiante, proliferando poblaciones? Examinamos este problema utilizando tendencias de abundancia multidecadales más recientes de calamares con aspectos espaciales, en lugar de la práctica típica de examinar tendencias a largo plazo, generalmente durante más de un cuarto de siglo, de especies de manera colectiva. Nuestra razón fue la de identificar fluctuaciones en abundancia a corto plazo, como los 21 años de datos utilizados en este estudio, por sus implicancias económicas, de gestión pesquera instantánea y de conservación del ecosistema marino para especies comercialmente de vida corta. Por lo tanto, la abundancia anual fluctuada en términos de tendencias relativamente a corto plazo para especies particulares podría tener consecuencias económicas y ecológicas más profundas que las tendencias a largo plazo. Nuestros resultados indicaron que bajo el cambio climático en el siglo XXI, se espera una considerable fluctuación y/o incertidumbre en la abundancia anual y distribución de especies en diferentes ubicaciones geográficas de varios grupos taxonómicos en todo el mundo debido a las dinámicas oceánicas-atmosféricas a gran

escala. Con el aumento de la temperatura potencial y la variabilidad climática, se espera que las poblaciones de especies variables y los ingresos económicos adicionales limiten nuestra capacidad para predecir resultados probables.

Como se muestra en la Fig. 5, los impulsores climáticos desempeñan un papel fundamental en dar forma a las respuestas a gran escala y la variación regional, que afectan posteriormente a los recursos pesqueros. Si bien las respuestas locales no siempre están directamente influenciadas por la fuerza antropogénica, la circulación climática más amplia ofrece una medida más confiable de dicha variación. A pesar de los desafíos inherentes e incertidumbres asociadas con predecir respuestas locales, aprovechar las percepciones de la circulación a gran escala proporciona un marco más viable para comprender los cambios actuales y futuros. En nuestro análisis, la influencia climática principal se originó en el monzón sudamericano. Esto, a su vez, impulsó la respuesta regional del ASP, dando como resultado SST más frías y un aumento de EKE a lo largo de las costas del Atlántico Sudoccidental, promoviendo así una proliferación de la abundancia de calamares. A medida que nos adentramos más en la comprensión de estas dinámicas, perfeccionar la relación entre la abundancia de calamares y el monzón sudamericano se vuelve imperativo, especialmente en el contexto del calentamiento climático y las próximas predicciones a corto plazo.



La Temperatura Superficial del Mar (TSM) correspondiente a la dinámica de la abundancia calamares en el Atlántico Sudoccidental es consistente con la expectativa de que es la variable más importante que afecta las distribuciones de abundancia de *Illex argentinus*, y las TSM más frías son propicias para el ciclo de vida de los calamares y generan una alta abundancia de ellos. Este aumento en la abundancia de calamares relacionado con el enfriamiento de la TSM probablemente se basa, en parte, en la supervivencia favorable de las larvas en los hábitats y sus relaciones tróficas, y en la influencia en los patrones de crecimiento y la estructura poblacional de los calamares durante sus fases tempranas de crecimiento exponencial (Forsythe, 1993; Anderson y Rodhouse, 2001; Chang et al., 2015). En respuesta al enfriamiento ambiental, la mayoría de los cefalópodos parecen aumentar, especialmente correlacionados negativamente espacialmente con la TSM en verano, y están asociados con las aguas más frías o las zonas frontales (Waluda y Pierce, 1998; Pierce et al., 2001, 2008; Santurtun et al., 2004). Además, los gradientes longitudinales y latitudinales en este estudio mostraron contribuciones limitadas a las fluctuaciones decenales periódicas de los calamares y a las relaciones entre las especies y los ambientes, ya que se observaron asociaciones significativas que abarcan toda

la zona de pesca (Sacau et al., 2005; Chang et al., 2015).

Numerosos estudios han demostrado que la variabilidad climática ha influido considerablemente en los recursos naturales sensibles al clima en varios ecosistemas marinos (Bertrand et al., 2020; Clark and Hare, 2002; Overland et al., 2005; Heymans et al., 2007; Litzow et al., 2020). Por ejemplo, durante eventos del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), un conocido impulsor global de la variación interanual en el sistema climático, no solo resultan en la migración o el colapso de especies de peces, sino que también provocan la disminución de sus depredadores, alterando así la composición y agregación de la comunidad (Bertrand et al., 2020). Los cambios en la abundancia total de salmón de Alaska siguen patrones asociados con la oscilación decadal del Pacífico (PDO), con hipótesis que vinculan estos cambios con las etapas de vida en agua dulce, la productividad costera y la supervivencia de los salmones juveniles en el mar (Mantua et al., 1997). El aumento observado en la varianza de la oscilación del giro del Pacífico Norte (NPGO) en las últimas décadas estuvo acompañado por un aumento en la coherencia de las tasas de supervivencia locales de especies de salmón a través del efecto "portfolio" (Asch, 2015). El modo anular del Sur (SAM) se asoció con una mayor productividad y varianza en las comunidades

de fitoplancton en la zona estacional de hielo, lo que tendría implicancias para la disponibilidad de alimentos para niveles tróficos superiores en la zona (Greaves et al., 2020). El patrón REOF también fue reconocido en este estudio. Estos resultados diversos confirman una variedad de amenazas ecológicas enfrentadas por los organismos marinos, indicando que los cambios ambientales pueden alterar la dependencia original de los organismos marinos en macrohábitats, regímenes hidrológicos y sus limitadas capacidades de dispersión, exacerbando aún más la susceptibilidad de los organismos marinos a los cambios climáticos y oceánicos anticipados.

El novedoso procedimiento de promediar la descomposición espacio-temporal del análisis REOF y la extracción de componentes principales (PC) muestra su derivación matemática sencilla y permite una interpretación más fácil de las series temporales, por lo que es aplicable a cualquier índice de tiempo basado en temperaturas superficiales del mar (TSM) globales o regionales (Huang y Shukla, 2005; Chen y Tung, 2018). Proporcionamos aquí la primera observación de la REOF1 espacial a nivel de cuenca que se corresponde estrechamente con la abundancia anual regional de calamares. Aunque el porcentaje de varianza explicado por el primer modo no fue muy alto en este estudio, el mecanismo físico explicativo se había identificado en estudios previos, lo que indica una previsibilidad potencial en el modelo climático terrestre. Además, sugerimos que el creciente poder del aprendizaje automático, con su gran capacidad para mejorar la precisión de las predicciones del modelo y manejar relaciones no lineales, puede brindar oportunidades adicionales para combinar con los análisis de REOF y PC y ampliar las

aplicaciones de los modos espacio-temporales océano-atmósfera (Zhong et al., 2021; Xu et al., 2023). La dependencia estacional y los efectos sobre otros organismos marinos pueden estimarse y explorarse en futuros trabajos para corregir mejor cómo las anomalías de la TSM en el Atlántico Sudoccidental afectarían las fluctuaciones tanto de las pesquerías como de los ecosistemas marinos en sus regiones circundantes. Además, la estimación de la heterogeneidad espacial de las interacciones entre variables ha sido cada vez más valorada en los últimos años y las interacciones no lineales entre variables pueden afectar adicionalmente la variable focal original, lo que puede revelar mecanismos subyacentes entre las distribuciones de la abundancia de calamares y el entorno (Wang et al., 2016; Zhou et al., 2018).

Las proyecciones de la TSM que se utilizan con frecuencia para rastrear cambios en la distribución y composición de los organismos son sensibles a los rangos térmicos y límites a gran escala bajo el cambio climático (Albouy et al., 2014). Con cambios espaciales de los contornos proyectados de la TSM en comparación con las TSM actuales, se han observado cada vez más cambios en la abundancia y poblaciones de especies en la estructura a gran escala del océano a lo largo de gradientes espaciales (Fernandes et al., 2020). Por lo tanto, a diferencia del calentamiento climático, aunque la variabilidad climática aún no ha mostrado sus grandes influencias en las últimas décadas, la dinámica observada en la abundancia de calamares, explicada por los cambios en la circulación de inversión océano-atmósfera impulsada por el ASP, sugiere que se debe prestar más atención a las influencias de la variabilidad climática en el futuro, especialmente en los ecosistemas marinos (Francis et al., 1998; Pinsky et al., 2020).

Además, la demanda mundial de alimentos provenientes de los océanos está creciendo y se proyecta aumentar entre 21 y 44 millones de toneladas para 2050, lo que representa un incremento del 36 al 74% en comparación con los rendimientos actuales (Costello et al., 2020; FAO, 2022). Todos los cambios biogeográficos y fisiológicos pueden tener impactos negativos significativos en los sistemas socioecológicos contemporáneos de la Tierra. Cada vez más estudios han mostrado que, con los colapsos de las pesquerías marinas en los últimos 50 años, tanto la seguridad alimentaria como las oportunidades económicas en los océanos se están degradando a diversas escalas espaciales, desde local hasta continental (Cooper et al., 2020; FAO, 2022). Dado que los ecosistemas marinos grandes tienden a cambiar más lentamente que los pequeños, aunque son desproporcionadamente más rápidos, y las pesquerías en alta mar, como las pesquerías de calamares en este estudio, pueden considerarse como parte del gran sistema marino, se debe reconsiderar la posibilidad de colapsos potenciales de los sistemas sociales o económicos con duraciones de cambio desproporcionadamente lentas y umbrales críticos para la tolerancia climática (Jackson et al., 2001; Litzow et al., 2014; Britten et al., 2017). La humanidad ahora necesita prepararse mejor para los cambios en los ecosistemas marinos que pueden ser mucho más rápidos de lo que previamente imaginábamos, simplemente a través de la visión lineal tradicional del mundo.

Nuestros hallazgos destacan la necesidad de una mejor comprensión de los patrones ecológicamente periódicos no descubiertos para las especies explotadas comercialmente en el ámbito marítimo, a pesar de la existencia potencial de dependencias periódicas y regionales variables en los

ecosistemas. La conexión ecológica entre las poblaciones locales y regionales, es decir, la abundancia de calamares, y el sistema de circulación global, es decir, el ASP, observada en este estudio, insta a adoptar un enfoque holístico de los impactos ecológicos del cambio climático. Considerando los efectos combinados de las limitaciones de la variabilidad natural en las distribuciones y biología de las especies, esperamos una probabilidad pronunciada de efectos sobre los recursos y las regiones en la producción pesquera. Cuando las especies se adaptan a los cambios ambientales y climáticos, es probable que los cambios en la distribución y las estrategias de reproducción y supervivencia ocurran rápidamente a escalas locales y/o regionales antes de que los humanos puedan reconocerlos, pero esto puede ser diferente para especies de vida larga, que suelen tener mayor tamaño corporal y longevidad. Se necesita investigación adicional para capturar la dependencia ecológica periódica fundamental de los cambios en la población y la abundancia para más taxones. Dado que los períodos ecológicos, como las diferentes fases de *Illex argentinus* en este estudio, afectan a los recursos pesqueros, la vigilancia, detección y gestión de los cambios en las pesquerías deben conciliarse con las escalas espaciales y temporales más relevantes para las situaciones reales en los mares. En general, considerar simultáneamente una integración de cambios de abundancia y dinámicas de captura a través de escalas temporales, espaciales y cruzadas para especies explotadas comercialmente en el mar puede permitir una mejor comprensión y predicciones más precisas de las tendencias poblacionales esperadas en respuesta a las interacciones globales de los cambios y variabilidades ambientales y climáticas.

Referencias no citadas

Basson et al., 1996; Caddy, 1983; DoubledayProwse et al., 2016.

Contribución de autoría CRediT

Chia-Ying Ko: Escritura - revisión y edición, Escritura - borrador original, Administración del proyecto, Metodología, Investigación, Adquisición de fondos, Análisis formal, Gestión / preservación de datos, Conceptualización. **Yu-Chi Lee:** Escritura - revisión y edición, Escritura - borrador original, Visualización, Metodología, Análisis formal, Gestión/Preservación de datos, Conceptualización. **Yi-Chi Wang:** Escritura - revisión y edición, Escritura - borrador original, Administración del proyecto, Metodología, Análisis formal, Gestión/Preservación de datos, Conceptualización. **Huang-Hsiung Hsu:** Escritura - revisión y edición, Supervisión, Gestión/Preservación de datos, Conceptualización. **Chun Hoe Chow:** Escritura - revisión y edición, Supervisión. **Ruei-Gu Chen:** Escritura - revisión y edición, Supervisión, Investigación. **Tsung-Han Liu:** Escritura - revisión y edición, Investigación. **Chih-Shin Chen:** Escritura - revisión y edición, Supervisión. **Tai-Sheng Chiu:** Escritura - revisión y edición, Supervisión. **Don-Hsieh Chiang:** Investigación, Gestión/Preservación de datos. **Ren-Fen Wu:** Investigación, Gestión/Preservación de datos. **Wan-Ling Tseng:** Escritura - revisión y edición, Escritura - borrador original, Metodología, Análisis formal, Conceptualización.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o personales en competencia conocidos que podrían haber influido en el trabajo informado en este artículo.

Agradecimientos

Agradecemos a las tripulaciones y al personal de los barcos de pesca de calamares de Taiwán y a la Asociación de Pesquerías de Calamares y Saurios de Taiwán, así como a los revisores anónimos por sus comentarios y críticas perspicaces. Esta investigación fue financiada por la Agencia de Pesca, Consejo de Agricultura, Yuan Ejecutivo

(números de subvención 109AS-9.1.4-FA-F1, 110AS-6.1.1-FA-F6 y 111AS-6.4.1-FAF6) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (números de subvención MOST 111-2636-B-002-022 y NSTC 112-2636-B-002-013). Agradecemos al Centro Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NCHC) de Laboratorios Nacionales de Investigación Aplicada (NARLabs) en Taiwán por proporcionar recursos computacionales y de almacenamiento.

Disponibilidad de datos

Los datos estarán disponibles bajo petición.

Bibliografía

- Adeyeri, O.E., Zhou, W., Wang, X., Zhang, R., Laux, P., Ishola, K.A., Usman, M. 2022. The trend and spatial spread of multisectoral climate extremes in CMIP6 models. *Sci. Rep.* 12, 21000.
- Albouy, C., Velez, L., Coll, M., Colloca, F., Loc'h, F.L., Mouillot, D., Gravel, D., 2014. From projected species distribution to food-web structure under climate change. *Glob. Change Biol.* 20, 730-741.
- Anderson, C.I.H., Rodhouse, P.G., 2001. Life cycles, oceanography and variability: ommastrephid squid in variable oceanographic environments. *Fish. Res.* 54, 133-604 143.
- Antão, L.H., Bates, A.E., Blowes, S.A., Waldock, C., Supp, S.R., Magurran, A.E., Dornelas, M., Schipper, A.M., 2020. Temperature-related biodiversity change across temperate marine and terrestrial systems. *Nat. Ecol. Evol.* 4, 927-933.
- Asch, R.G., 2015. Climate change and decadal shifts in the phenology of larval fishes in the California Current ecosystem. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 112, E4065-610 E4074.
- Basson, M., Beddington, J.R., Crombie, J.A., Holden, S.J., Purchase, L.V., Tingley, G.A., 1996. Assessment and management techniques for migratory annual squid stocks: The *Illex argentinus* fishery in the Southwest Atlantic as an example. *Fish.* 614 Res. 28, 3-27.
- Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Siegel, D.A., McClain, C.R., Sarmiento, J.L., Feldman, G.C., Milligan, A.J., Falkowski, P.G., Letelier, R.M., Boss, E.S., 2006. Climate-driven trends in

- contemporary ocean productivity. *Nature* 444, 752-755.
- Behringer, D.W., Xue, Y., 2004. Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: the Pacific Ocean, paper presented at the Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation System for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, Am. Meteorol. Soc., Seattle, Wash., 11-15 Jan.
- Belkin, I.M., 2009. Rapid warming of large marine ecosystems. *Prog. Oceanogr.* 81, 207-213.
- Benton, T.G., Grant, A., 1996. How to keep fit in the real world: elasticity analyses and selection pressures on life histories in a variable environment. *Am. Nat.* 147, 115-139.
- Bertrand, A., Lengaigne, M., Takahashi, K., Avadi, A., Poulain, F., Harrod, C. 2020. El Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on fisheries and aquaculture. FAO, 660, 244 pp. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Papers, 978-92-5-132327-4. [ff10.4060/ca8348en](https://doi.org/10.4060/ca8348en). [ffhal-03411921f](https://doi.org/10.4060/ca8348en)
- Both, C., Visser, M.E., 2001. Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird. *Nature* 411, 296-298.
- Britten, G.L., Dowd, M., Canary, L., Worm, B., 2017. Extended fisheries recovery timelines in a changing environment. *Nat. Commun.* 8, 15325.
- Burrows, M.T., Schoeman, D.S., Buckley, L.B., Moore, P., Poloczanska, E.S., Beander, K.M., Brown, C., Bruno, J.F., Duarte, C.M., Halpern, B.S., Holding, J., Kappel, V.C., Kiessling, W., O'Connor, M.I., Pandolfi, J.M., Parmesan, C., Schwing, F.B., Sydeman, W.J., Richardson, A.J., 2011. The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems. *Science* 334, 652-655.
- Caddy, J.F., 1983. The Cephalopods: factors relevant to their population dynamics and to the assessment and management of the stocks. In: Caddy J.F. (Ed.), *Advances in Assessment of World Cephalopod Resources*. FAO Tech. Pap. 231, Rome.
- Carvalho, L.M., Jones, C., Liebmann, B., 2004. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *J. Clim.* 17, 88-108.
- Chang, K.-Y., Chen, C.-S., Wang, H.-Y., Kuo, C.-L., Chiu, T.-S., 2015. The Antarctic Oscillation index as an environmental parameter for predicting catches of the Argentine shortfin squid (*Illex argentinus*) (Cephalopoda: Ommastrephidae) in southwest Atlantic waters. *Fish. Bull.* 113, 202-212.
- Chen, C.S., Chiu, T.S., 2009. Standardizing the CPUE for the *Illex argentinus* fishery in the southeast Atlantic. *Fish. Sci.* 75, 265-272.
- Chen, G.X., Wang, D.X., Hou, Y.J., 2012. The features and interannual variability mechanism of mesoscale eddies in the Bay of Bengal. *Cont. Shelf Res.* 47, 178-185.
- Chen, X., Tung, K.-K., 2018. Global-mean surface temperature variability: space-time perspective from rotated EOFs. *Clim. Dyn.* 51, 1719-1732.
- Cheung, W.W.L., Jones, M.C., Reygondeau, G., Frölicher, T.L., 2018. Opportunities for climate risk reduction through effective fisheries management. *Glob. Change Biol.* 24, 5149-5163.
- Clark, W.G., Hare, S.R., 2002. Effects of climate and stock size on recruitment and growth of Pacific halibut. *N. Am. J. Fish. Manag.* 22, 852-862.
- Cooper, M.W., Brown, M.E., Niles, M.T., ElQadi, M.M., 2020. Text mining the food security literature reveals substantial spatial bias and thematic broadening over time. *Glob. Food Sec.* 26, 100392.
- Costello, C., Cao, L., Gelcich, S., Cisneros-Mata, M.A., Free, C.M., Froehlich, H.E., Golden, C.D., Ishimura, G., Maier, J., Macadam-Somer, I., Mangin, T., Melnychuk, M.C., Miyahara, M., de Moor, C.L., Naylor, R., Nøstbakken, L., Ojea, E., O'Reilly, E., Parma, A.M., Plantinga, A.J., Thilsted, S.H., Lubchenco, J., 2020. The future of food from the sea. *Nature* 588, 95-100.
- De Mey, P., Benkiran, M., 2002. A multivariate reduced-order optimal interpolation method and its application to the Mediterranean basin-scale circulation. In: Pinardi, N., Woods, J. (eds) *Ocean Forecasting*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Doubleday, Z.A., Prowse, T.A.A., 672 Arkhipkin, A., Pierce, G.J., Semmens, J., Steer, M., Leporati, S.C., Lourenço, S., Quetglas, A., Sauer, W., Gillanders, B.M., 2016. Global proliferation of cephalopods. *Curr. Biol.* 26, R387-R407.
- Dong, C.M., Lin, X.Y., Liu, Y., Nencioli, F., Chao, Y., Guan, Y.P., 2012. Threedimensional oceanic eddy analysis in the Southern California Bight from a numerical product. *J. Geophys. Res.* 117, C00H14.
- Ding, M., Lin, P., Liu, H., Hu, A., Liu, C., 2020. Lagrangian eddy kinetic energy of ocean mesoscale eddies and its application to the Northwestern Pacific. *Sci. Rep.* 10, 12791.
- Evans, D.W., 2003. Fisheries data quality indicators: review of progress and possible

- approaches to addressing data quality and cost-effectiveness. Rome. FAO.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9, 1937-1958.
- FAO, 2022. The state of world fisheries and aquaculture 2022. Towards blue transformation. Rome, FAO.
- Fernandes, J.A., Rutterford, L., Simpson, S.D., Butenschön, M., Frölicher, T.L., Yool, A., Cheung, W.W.L., Grant, A., 2020. Can we project changes in fish abundance and distribution in response to climate? *Glob. Change Biol.* 26, 3891-3905.
- Forsythe, J.W.A., 1993. A working hypothesis on how seasonal temperature change may impact the field growth of young cephalopods. In recent advances in cephalopod fisheries biology (T. Okutani, R. K. O'Dor, and T. Kubodera, eds.), p. 133-143. Tokai Univ. Press, Tokyo.
- Fournier, S., Willis, J., Killett, E., Qu, Z., Zlotnicki, V., 2022. JPL MEaSUREs gridded sea surface height anomalies version 2205. Ver. 2205. PO.DAAC, CA, USA.
- Francis, R.C., Hare, S.R., Hollowed, A.B., Wooster, W.S., 1998. Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the NE Pacific. *Fish. Oceanogr.* 7, 1-21.
- Furrer, R., Sain, S.R., Nychka, D., Meehl, G.A., 2007. Multivariate Bayesian analysis of atmosphere-ocean general circulation models. *Environ. Ecol. Stat.* 14, 249-266.
- Gattuso, J.-P., Magnan, A., Bille, R., Cheung, W.W.L., Howes, E.L., Joos, F., Allemand, D., Bopp, L., Cooley, S.R., Eakin, C.M., Hoegh-Guldberg, O., Kelly, R.P., Portner, H.-O., Rogers, A.D., Baxter, J.M., Laffoley, D., Osborn, D., Rankovic, A., Roche, J., Sumaila, U.R., Treyer, S., Turley, C., 2015. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science* 349, aac4722.
- Greaves, B.L., Davidson, A.T., Fraser, A.D., McKinlay, J.P., Martin, A., McMinn, A., Wright, S.W., 2020. The Southern Annular Mode (SAM) influences phytoplankton communities in the seasonal ice zone of the Southern Ocean. *Biogeosciences* 17, 3815-3835.
- Gulev, S.K., Latif, M., Keenlyside, N., Park, W., Koltermann, K.P., 2013. North Atlantic Ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales. *Nature* 499, 464-467.
- Haimovici, M., Brunetti, N.E., Rodhouse, P.G., et al., 1998. *Illex argentinus*. In: Rodhouse P G, Dawe E G, O'Dor P K, eds. Squid recruitment dynamics: The Genus *Illex* as a model, the commercial *Illex* species and influences on variability (FAO Fisheries Technical Paper 376). Rome: FAO, 27-58.
- Hannachi, A., Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B., 2007. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: a review. *Int. J. Climatol.* 27, 1119-1152.
- Hatanaka, H., 1986. Growth and life span of short-finned squid *Illex argentinus* in the waters off Argentina. *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.* 52, 11-17.
- Henson, S.A., Beaulieu, C., Ilyina, T., John, J.G., Long, M., Séférian, R., Tjiputra, J., Sarmiento, J.L., 2017. Rapid emergence of climate change in environmental drivers of marine ecosystems. *Nat. Commun.* 8, 14682.
- Hersbach, H., et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol.* 146, 1999-2049.
- Heymans, J.J., Guénette, S., Christensen, V., 2007. Evaluating network analysis indicators of ecosystem status in the Gulf of Alaska. *Ecosystems* 10, 488-502.
- Heywood, K.J., Mcdonagh, E.L., White, M.A., 1994. Eddy kinetic-energy of the North-Atlantic Subpolar Gyre from satellite altimetry. *J. Geophys. Res.* 99, 22525-22539.
- Huang, B., Shukla, J., 2005. Ocean-atmosphere interactions in the tropical and subtropical Atlantic Ocean. *J. Clim.* 18, 1652-1672.
- Hwang, C., Wu, C.-R., Kao, R., 2004. TOPEX/Poseidon observations of mesoscale eddies over the Subtropical Countercurrent: Kinematic characteristics of an anticyclonic eddy and a cyclonic eddy. *J. Geophys. Res.* 109, C08013.
- Jackson, J.B.C., Kirby, M.X., Berger, W.H., Bjorndal, K.A., Botsford, L.W., Bourque, B.J., Bradbury, R.H., Cooke, R., Erlandson, J., Estes, J.A., Hughes, T.P., Kidwell, S., Lange, C.B., Lenihan, H.S., Pandolfi, J.M., Peterson, C.H., Steneck, R. S.M., Tegner, J., Warnerr, R.R., 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science* 293, 629-638.
- Jereb, P., Roper, C.E.E., 2010. Cephalopods of the world. An annotated and illustrated catalogue of cephalopod species known to date. Volume 2. Myopsid and Oegopsid Squids. FAO Species Catalogue for Fishery Purposes. No. 4, Vol. 2. Rome, FAO. 605p.
- Kayano, M.T., Andreoli, R.V., Ferreira de Souza, R.A., 2013. Relations between ENSO and the South Atlantic SST modes and their effects on the South American rainfall. *Int. J. Climatol.* 33, 2008-2023.

- Levitus, S., Antonov, J., Boyer, T., 2005. Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophys. Res. Lett.* 32, L02604.
- Lian, T., Chen, D., 2012. An evaluation of rotated EOF analysis and its application to tropical Pacific SST variability. *J. Clim.* 25, 5361-5373.
- Litzow, M.A., Hunsicker, M.E., Bond, N.A., Zador, S.G., 2020. The changing physical and ecological meanings of North Pacific Ocean climate indices. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 17, 7665-7671.
- Litzow, M.A., Mueter, F.J., Hobday, A.J., 2014. Reassessing regime shifts in the North Pacific: incremental climate change and commercial fishing are necessary for explaining decadal-scale biological variability. *Glob. Change Biol.* 20, 38-50.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C., 1997. A pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Am Meteorol Soc.* 78, 1069-1080.
- McCauley, D.J., 2015. Marine defaunation: animal loss in the global ocean. *Science* 347, 247-254.
- Mestas-Nunez, A.M., 2000. Orthogonality properties of rotated empirical modes. *Int. J. Climatol.* 20, 1509-1516.
- Molinos, J.G., Halpern, B.S., Schoeman, D.S., Brown, C.J., Kiessling, W., Moore, P.J., Pandolfi, J.M., Poloczanska, E.S., Richardson, A.J., Burrows, M.T., 2015. Climate velocity and the future global redistribution of marine biodiversity. *Nat. Clim. Change* 6, 83-88.
- Myers, R.A., Worm, B., 2003. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* 423, 280-283.
- Nemoto, T., Okiyama, M., 772 Takahashi, M., 1985. Aspects of the roles of squid in food chains of marine Antarctic ecosystems. *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*, (ed. by W.R. Siegfried, P.R. Condy, and R.M. Laws), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 415-420.
- Qiu, B., 1999. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific subtropical countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory. *J. Phys. Oceanogr.* 29, 2471-2486.
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B.M., 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 9, 3461-3482.
- Overland, J.E., Boldt, J., Stabeno, P.J., 2005. Multiple indicators track major ecosystem shifts in the Bering Sea. *ICES J. Mar. Sci.* M, 21.
- Pierce, G.J., Valavanis, V.D., Guerra, A., Jereb, P., Orsi-Relini, L., Bellido, J.M., Katara, I., Piatkowski, U., Pereira, J., Balguerias, E., Sobrino, I., Lefkaditou, E., Wang, J., Santurtun, M., Boyle, P.R., Hastie, L.C., MacLeod, C.D., Smith, J.M., Viana, M., González, A.F., Zuur, A.F., 2008. A review of cephalopod-environment interactions in European Seas. *Hydrobiologia* 612, 49-70.
- Pierce, G.J., Wang, J., Zheng, X., Bellido, J.M., Boyle, P.R., Denis, V., Rbin, J.-P., 2001. A cephalopod fishery GIS for the northeast Atlantic: development and application. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 15, 763-784.
- Pinsky, M.L., Selden, R.L., Kitchel, Z.J., 2020. Climate-driven shifts in marine species ranges: scaling from organisms to communities. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 12, 153-179.
- Pribil, S., Houlahan, J.E., 2003. Life-history strategies associated with local population variability confer regional stability. *Proc. R. Soc. B: Biol. Sci.* 270, 1419-1423.
- Reynolds, R.W., Smith, 797 T.M., Liu, C., Chelton, D.B., Casey, K.S., Schlax, M.G., 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Clim.* 20, 5473-5496.
- Roper, C.F.E., Sweeney, M.J., Nauen, C.E., 1984. *FAO species catalogue. Vol. 3. Cephalopods of the world. An annotated and illustrated catalogue of species of interest to fisheries.* *FAO Fish. Synop.* 125(3):277p. Rome: FAO.
- Sacau, M., Pierce, G.J., Wang, J., Arkhipkin, A.I., Portela, J., Brickle, P., Santos, M.B., Zuur, A.F., Cardoso, X., 2005. The spatio-temporal pattern of Argentine shortfin squid *Illex argentinus* abundance in the southwest Atlantic. *Aquat. Living Resour.* 18, 361-372.
- Salby, M.L., Garcia, R.R., 1987. Transient response to localized episodic heating in the tropics. Part I: excitation and short-time near-field behavior. *J. Atmos. Sci.* 44, 458-498.
- Santurtun, M., Sagarminaga, Y., Lucio, P., Galparsoro, I., Quincoces, J., Iriondo, A., 2004. Interannual trends in catches of squid (*Loligo* spp.) in the Bay of Biscay (ICES Div. VIIIa, b, d) during 2000 in relation to oceanographic features. *ICES CM* 2004/CC.
- Stige, L.C., Ottersen, G., Brander, K., Chan, K.S., Stenseth, N.C., 2006. Cod and climate: effect of the North Atlantic Oscillation on recruitment in the North Atlantic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 325, 227-241.
- Thorson, J.T., Ciannelli, L., Litzow, M.A., 2020. Defining indices of ecosystem variability using biological samples of fish communities: A

- generalization of empirical orthogonal functions. *Prog. Oceanogr.* 181, 102244.
- Tseng, W.-L., Lee, Y.-C., Wang, Y.-C., Hsu, H.-H., Keenlyside, N., 2023. Characterizing Atlantic interhemispheric teleconnection established by South American monsoon in austral summer. *Environ. Res. Lett.* 18, 074003.
- Tuljapurkar, S., 1990. Delayed reproduction and fitness in variable environments. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 87, 1139-1143.
- Wang, J.F., Zhang, T L., Fu, B.J., 2016. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecol. Indic.* 67, 250-256.
- Waluda, C.M., Pierce, G.J., 1998. Temporal and spatial patterns in the distribution of squid *Loligo* spp. in United Kingdom waters. *Afr. J. Mar. Sci.* 20, 323-336.
- Waluda, C.M., Trathan, P.N., Rodhouse, P.G., 1999. Influence of oceanographic variability on recruitment in the *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) fishery in the South Atlantic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 183, 159-167.
- Xu, S., Dai, D., Cui, X., Yin, X., Jiang, S., Pan, H., Wang, G., 2023. A deep learning approach to predict sea surface temperature based on multiple modes. *Ocean Model.* 181, 102158.
- Zhong, S., Zhang, K., Bagheri, M., Burken, J.G., Gu, A., Li, B., Ma, X., Marrone, B.L., Ren, Z.J., Schrier, J., Shi, W., Tan, H., Wang, T., Wang, X., Wong, B.M., Xiao, X., Yu, X., Zhu, J.-J., Zhang, H. 2021. Machine Learning: new ideas and tools in environmental science and engineering. *Environ. Sci. Technol.* 55, 12741-12754.
- Zhou, C., Chen, J., Wang, S., 2018. Examining the effects of socioeconomic development on fine particulate matter (PM_{2.5}) in China's cities using spatial regression and the geographical detector technique. *Sci. Total Environ.* 619, 436-445.