

Este documento ha sido traducido por la Biblioteca del Congreso de la República con fines meramente informativos para los usuarios de la institución. «Esta versión en español no es una traducción oficial de la revista ni de los autores, ni la traducción ha sido revisada por estos; por tanto, estos no son responsables del contenido ni de los errores que pudiera contener la traducción».

Título del documento:

Inglés: «Possible link between temperatures in the seashore and open ocean waters of Peru identified by using new seashore water data»

Nº de páginas: 12

Enlace: <https://progearthplanetosci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-023-00571-1#:~:text=We%20confirmed%20that%20monthly%20mean,were%20significant%20at%20p%20%3C%200.01.>

Fecha de documento: 2023*

Español: «Posible relación entre las temperaturas de las aguas costeras y el mar abierto del Perú identificadas mediante el uso de nuevos datos sobre el agua costera»

Nº de páginas: 16

Fecha de documento: 2024*

Autores: **Shuhei Masuda¹, Masato Kobayashi, Luis Alfredo Icochea Salas and Gandy Maria Rosales Quintana**

Institución: *Progress in Earth and Planetary Science (PEPS)*, es una revista electrónica sujeta a revisión por pares y de acceso abierto. Fue lanzada por la Unión Japonesa de Geociencias (JpGU) en el 2014. Esta revista internacional está dedicada a artículos originales de alta calidad, revisiones y trabajos con datos completos adjuntos en los campos de investigación de ciencias espaciales y planetarias, ciencias atmosféricas e hidrosféricas, geociencias humanas, ciencias de la tierra sólida y biogeociencias. El PEPS promueve la publicación de artículos excelentes sujetos a revisión y acepta artículos con anexos electrónicos, incluidos vídeos, animaciones y archivos de datos originales de gran tamaño. PEPS también alienta la publicación de artículos con datos completos adjuntos (los artículos con datos completos adjuntos son artículos científicos que conservan todos los datos de investigación brutos detallados y los metadatos que se recopilaron en su preparación y ponen estos datos a libre disposición de la comunidad investigadora para su posterior análisis).

Derechos de autor: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



CC BY 4.0 DEED

Atribución 4.0 Internacional

* N.T.: Esta traducción ha sido realizada por la Biblioteca del Congreso (traductora: MPZ).

DOCUMENTO CON DATA COMPLETA ADJUNTA

Acceso abierto

POSIBLE RELACIÓN ENTRE LAS TEMPERATURAS DE LAS AGUAS COSTERAS Y EL MAR ABIERTO DEL PERÚ IDENTIFICADAS MEDIANTE EL USO DE NUEVOS DATOS SOBRE EL AGUA COSTERA

Shuhei Masuda*¹ , Masato Kobayashi², Luis Alfredo Icochea Salas³ y Gandy Maria Rosales Quintana^{3,4}

Resumen:

La relación entre las condiciones medioambientales del océano costero y del mar abierto varía mucho según la región. Es importante aclarar, zona por zona, qué revela la información de vigilancia costera sobre el océano abierto y cuánta información predictiva para el océano abierto puede ser aplicable al océano costero. El Océano Pacífico frente a las costas del Perú es una zona de vigilancia de El Niño y La Niña, un fenómeno oceánico y atmosférico de importancia mundial. Sin embargo, no hay muchos datos fiables a lo largo de la costa peruana. Por ello, desplegamos una red de 6 sitios de registro a lo largo de la costa peruana del 2017 al 2020, y compilamos un conjunto de datos útiles y de alta resolución de las temperaturas del agua. Examinamos un posible vínculo entre las temperaturas en las aguas costeras de Perú y el mar abierto comparando el nuevo conjunto de datos con las temperaturas históricas en el océano abierto. Confirmamos que las anomalías medias mensuales de las temperaturas de las aguas costeras del Perú estaban fuertemente correlacionadas con las de las temperaturas superficiales del mar abierto. Con una sola excepción, los coeficientes de correlación oscilaron entre 0.80 y 0.92, y fueron significativos a $p < 0.01$. Este resultado sugirió que los datos obtenidos del monitoreo a lo largo de la costa del Pacífico del Perú podrían ser utilizados para indicar el estado del océano abierto y que los pronósticos de El Niño para el océano abierto podrían ser aplicados a la costa del Perú. El análisis espectral reveló que los periodos de cambios de la temperatura del agua de la orilla del mar alcanzaron picos de 80 y 120 días en la región al norte de 5° S. Este resultado sugirió que el monitoreo costero podría capturar la dinámica intraestacional de las ondas Kelvin ecuatoriales. La ausencia de picos claros al sur de 5° S implicaba que la energía de las olas ecuatoriales no penetraba mucho en las regiones no ecuatoriales a lo largo de la costa peruana en escalas de tiempo intraestacionales.

Palabras clave: Cambio climático, costa peruana, temperatura del agua, datos de observación

* Correspondencia: Shuhei Masuda, smasuda@jamstec.go.jp

¹ Research Institute for Global Change (Instituto de Investigación para el cambio climático), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) (Agencia Japonesa para Ciencia y Tecnología Marítimo-Terrestres), Yokosuka, Japón

² Escuela Superior de Comercio de Yokohama, Yokohama, Japón.

³ Departamento de Pesca, Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina, Perú.

⁴ Departamento de Ciencias Oceánicas, Universidad de Ciencias y Tecnología Marinas de Tokio, Tokio, Japón.

© Autor(es) 2023. **Acceso abierto** Este artículo está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional, que permite su uso, compartición, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre que se cite debidamente al autor o autores originales, y la fuente, se facilite un enlace a la licencia Creative Commons y se indique si se han realizado cambios. Las imágenes u otro material de terceros en este artículo están incluidos en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito al material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del artículo y su uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener permiso directamente del titular de los derechos de autor. Para ver una copia de esta licencia, visite:

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

1- Introducción

El océano desempeña un papel fundamental en los fenómenos climáticos que se producen en escalas de tiempo anuales a decenales. Entre ellos se encuentran los fenómenos de El Niño —durante el cual se produce un aumento de 2-3°C de la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico oriental tropical— que puede inducir cambios importantes en la circulación atmosférica que provoquen condiciones meteorológicas anormales y desastres naturales a escala mundial (por ejemplo, Kovats *et al.* 2003; Philander 2004). Por tanto, resulta fundamental tener un conocimiento preciso de la variabilidad oceánica a fin de dilucidar y predecir cambios climáticos a medio y largo plazo relacionados con los fenómenos de El Niño.

La agricultura, la pesca y otras actividades socioeconómicas se concentran en las regiones costeras. Desde finales del siglo XX, numerosos programas internacionales puestos en marcha han llevado a cabo intensas observaciones oceanográficas para comprender con precisión los cambios en los océanos. Entre ellos cabe citar el programa Experimento Mundial sobre la Circulación Oceánica (*Ocean Circulation Experiment*, WOCE) y el despliegue mundial de flotadores Argo para vigilar una amplia gama de cambios de temperatura y salinidad en el océano (p. ej., Roemmich y Gilson 2009; Johnson *et al.* 2022). Las regiones tropicales, en particular, han sido objeto de un seguimiento intensivo, a fin de comprender mejor los principales

impactos globales de El Niño-La Niña Oscilación del Sur (ENOS) (por ejemplo, McPhaden y Hayes 1989; McPhaden *et al.* 2019). Sin embargo, las variaciones climáticas pueden diferir mucho en mar abierto y en entornos costeros (p. ej., Santos *et al.* 2012).

En estudios anteriores sobre el cambio climático tropical se han desplegado redes de observación organizadas en mar abierto para captar fenómenos a escala de cuencas oceánicas. La mayor parte de los flotadores Argo y las redes de boyas fijas se han desplegado al oeste de las islas Galápagos. Las observaciones oceanográficas sistemáticas han sido comparativamente escasas cerca de la costa ecuatorial de Sudamérica (por ejemplo, la región NINO1 + 2 delimitada por 0°-10° S y 90°-80° O), que es una zona estrechamente asociada a las influencias costeras de los fenómenos de El Niño y a las actividades socioeconómicas de Perú.

Sin embargo, hasta ahora se han organizado o publicado pocos conjuntos de datos sobre la costa y las orillas del mar, y el estudio de los vínculos entre la costa y el mar abierto se ha visto limitado por la escasez de datos pertinentes. La dificultad técnica del seguimiento mediante teledetección en zonas costeras también ha aumentado el valor de los datos *in situ* disponibles públicamente.

En este estudio, hemos utilizado instrumentos registradores autónomos para monitorizar las temperaturas del agua a lo largo de la costa peruana

durante tres años, con el fin de obtener por primera vez observaciones sistemáticas en lugares estratégicos de la costa norte del Perú y publicar los datos como un conjunto de datos abiertos. Este artículo pretende describir los detalles de las observaciones que hemos realizado y las propiedades básicas de los datos. Además, describimos los cambios interanuales de la temperatura del agua en las aguas costeras que revelaron los datos, y discutimos las relaciones entre estos cambios y los cambios correspondientes en el océano abierto. Asimismo, utilizamos los datos de capturas para arrojar algo de luz sobre la relación entre las condiciones ambientales marinas y las capturas.

2 Construcción y contenido

2.1 Nuevas temperaturas de control *in situ*

Las temperaturas del agua de la costa fueron monitoreadas continuamente desde el 2017 hasta el 2020 en seis lugares a lo largo de la costa del Perú utilizando registradores de datos con termómetros incorporados (registradores automáticos de medición de temperatura, HOBO U22-001). Estos registradores de datos se instalaron en Mancora (4° 06' S, 81° 04' O), Cabo Blanco (4° 14' S, 81° 13' O), Talara (4° 34' S, 81° 16' O), Paita (5° 04' S, 81° 08' O, también conocida como Tierra Colorada), Chicama (7° 41' S, 79° 26' O) y La Punta en el Callao (12° 04' S, 77° 10' O) (fig. 1, tabla 1). Los intervalos espaciales variaron de 20 a 50 km entre los primeros cuatro de estos registradores y alrededor de 500 km entre Paita, Chicama y Callao. Las temperaturas del agua a profundidades de aproximadamente 2-8 m se adquirieron a intervalos de 15 minutos en cada ubicación. Para asegurar un conjunto de datos continuo, reemplazamos cada registrador cada seis meses antes de que se llenara la memoria interna del registrador. Los sensores se calibraron en un baño de agua termostático de la Agencia Japonesa para Ciencia y Tecnología Marítimo-Terrestres.

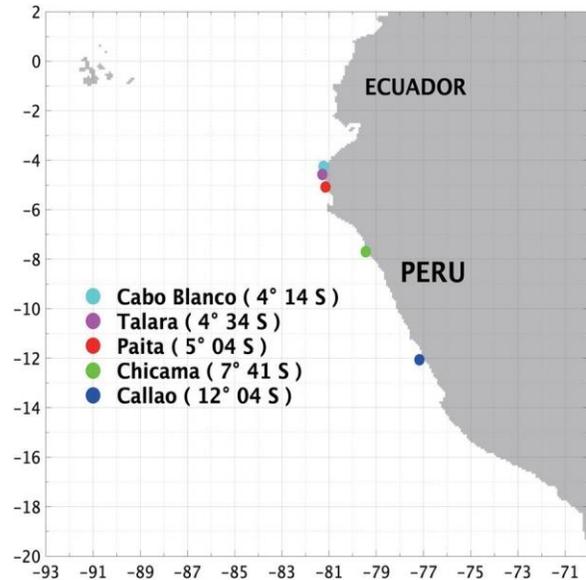


Fig. 1 Ubicación de los registradores de datos. Mapa que muestra las ubicaciones de los registradores de datos desplegados para este estudio en Perú (véase la tabla 1).

Los datos pueden descargarse gratuitamente en https://www.jamstec.go.jp/goorc/data/peru_smasuda/. Los datos constan de seis archivos zip, cada uno de los cuales contiene aproximadamente seis meses de datos del registrador obtenidos entre febrero del 2017 y febrero del 2020. Cada carpeta contiene archivos (en formato TXT y MS Excel) con el nombre del lugar donde se recogieron los datos. Los archivos contienen las fechas, horas, temperaturas de los sensores y temperaturas corregidas.

Tabla 1 Ubicación de los registradores y EN4 para los sitios de estudio en la costa peruana

Muelle Nombre y ubicación	Ubicación de registrador		Locación EN4	
	Lat. (S)	Long. (O)	Lat. (S)	Long. (O)
Mancora	4° 06'	81° 04'	4°	81°
Cabo Blanco	4° 14'	81° 13'	4°	81°
Talara	4° 34'	81° 16'	5°	81°
Paita	5° 04'	81° 08'	5°	81°
Chicama	7° 41'	79° 26'	8°	79°
Callao	12° 04'	77° 10'	12°	77°

2.2 Datos utilizados en los análisis

2.2.1 Conjuntos de datos de observación de alta mar

Nos basamos en temperaturas oceánicas subsuperficiales de calidad controlada del conjunto de datos EN4.2.1.f.analysis.g10.201812 (EN4). Se utilizaron temperaturas a profundidades de 5.02 m y 207.4 m para representar las temperaturas en la superficie y a 200 m de profundidad, respectivamente. La EN4 ha sido compilada por el Centro Hadley de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (Good *et al.* 2013) y se basa en la Base de Datos Oceánicos Mundiales del 2009 (WOD09) junto con datos de flotadores Argo de los Centros Mundiales de Ensamblaje de Datos Argo (GDAC) y datos complementarios de calidad controlada del Centro Nacional de Datos Oceanográficos de Estados Unidos compilados por el proyecto Arctic Synoptic Basin-wide Oceanography y el Global Temperature and Salinity Profile Program. Los detalles del conjunto de datos EN4 han sido resumidos por Good *et al.* (2013) y sus referencias (por ejemplo, Ingleby y Huddleston 2007; Gronell y Wijffels 2008; Guine- hut *et al.* 2009). Cabe señalar que los datos del registrador y el conjunto de datos de la EN4 son completamente independientes; es decir, el conjunto de datos de la EN4 no contiene datos del registrador y viceversa.

Identificamos las variaciones de las isotermas de 15 °C y 20 °C en el océano abierto utilizando el conjunto de datos diarios de temperatura subsuperficial de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) procedentes de boyas de fondeo del conjunto TAO/TRITON en 0° N, 110° O (a profundidades de 1, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 180, 300 y 500 m.) y 0° N, 95° O (a profundidades de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 40, 45, 60, 80, 100, 120, 140, 180, 300 y 500 m).

2.2.2 Datos de pesca

Para comparar con el conjunto de datos diarios de temperatura del agua de mar, obtuvimos un conjunto de datos de desembarques diarios de anchoveta del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) desde

noviembre del 2019 hasta febrero del 2020. Los datos solo estaban disponibles para Chicama y Callao.

En Perú, los buques pesqueros se clasifican en pequeños buques artesanales (capacidad < 32.6 m³), buques de pequeña escala (capacidad < 32.6 m³) y buques de gran escala (capacidad > 32.6 m³). No se disponía de datos sobre la primera clase de buques, que solo utilizan técnicas manuales. Estimamos el desembarque total como la suma de las capturas desembarcadas por los buques de pequeña y gran escala.

3 Entornos regionales

Nuestra zona de estudio se encuentra en el extremo oriental del Pacífico ecuatorial, donde las ondas Kelvin ecuatoriales implicadas en el desarrollo de los fenómenos de El Niño cambian su morfología (por ejemplo, McPhaden y Yu 1999). Las condiciones oceánicas en esta zona son complejas. La figura 2 muestra la distribución climatológica de la temperatura de la superficie del mar y dos secciones transversales de la temperatura del agua subsuperficial recopiladas a partir del conjunto de datos EN4. En esta zona se observa una estructura de dos capas. La termoclina principal se encuentra aproximadamente en la isoterma de 15 °C, y el afloramiento se produce cerca de la costa en respuesta a los vientos alisios permanentes del este. Este afloramiento trae nutrientes de las profundidades marinas a la superficie y convierte las aguas costeras en un rico caladero (por ejemplo, Chávez *et al.* 1998; Chávez y Messié 2009; Qin *et al.* 2016; Espinoza-Morriberón *et al.* 2019). Bajo la influencia de esta estructura de la temperatura del agua y la presión superficial del mar, el sistema de corrientes consiste en una subcorriente ecuatorial profunda hacia el este y sus ramas subsuperficiales (por ejemplo, Lukas 1986; Johnson *et al.* 2002; Montes *et al.* 2010; Kuntz y Schrag 2018; Rosales Quintana *et al.* 2021) y corrientes superficiales que están dominadas por una contracorriente ecuatorial hacia el este frente al ecuador en el hemisferio norte y una corriente ecuatorial del sur hacia el oeste en el lado del hemisferio sur. La corriente submarina subsuperficial

Perú-Chile fluye hacia el polo a lo largo de la costa en el hemisferio sur. Las ondas ecuatoriales que se propagan con el fenómeno El Niño-La Niña transfieren energía hacia el este en ondas Kelvin ecuatoriales (principalmente cambios en la energía potencial resultantes del movimiento vertical de la termoclina principal, por ejemplo, Goddard y Philander 2000), transfieren energía hacia el oeste a través de ondas Rossby ecuatoriales y transfieren energía meridionalmente a través de ondas Kelvin costeras que viajan desde la banda ecuatorial a regiones subtropicales a lo largo de la costa continental.

4. Resultados y debate

4.1 Características de los datos mensuales

Aquí analizamos la coherencia de las medias mensuales de nuestros nuevos datos con los datos existentes sobre alta mar. Compilamos conjuntos de datos separados que consistían en temperaturas medias aritméticas mensuales y temperaturas medias diarias. Aplicamos un filtro de 48 horas a los datos para eliminar las mareas diurnas antes de hacer las compilaciones (Thompson 1982).

Los datos medios mensuales del registrador presentan una variabilidad interanual con amplitudes comparables a la variabilidad anual típica, que exhibe un pico de alrededor de 26°C en febrero-marzo (fig. 3a). Los valores calibrados de la temperatura del agua tendieron a ser más altos cerca de la línea ecuatorial; de norte a sur estos fueron $23.5 \pm 1.6^\circ\text{C}$ en Máncora, $21.1 \pm 1.6^\circ\text{C}$ en Cabo Blanco, $20.0 \pm 2.5^\circ\text{C}$ en Talara, $18.7 \pm 2.8^\circ\text{C}$ en Paita, $17.3 \pm 2.1^\circ\text{C}$ en Chicama y $16.6 \pm 1.4^\circ\text{C}$ en el Callao. En Chicama y el Callao, las variaciones estacionales y espaciales fueron relativamente pequeñas.

La variabilidad anual típica según los datos registrados indica temperaturas más altas durante el verano austral (diciembre a febrero) que durante el invierno (junio a agosto). Este patrón es más claro en las cuatro localidades más meridionales desde Talara al Callao (4° S a 12° S), en parte porque están más alejadas de las variaciones del frente ecuatorial que

suele estar ubicado al norte de Paita (por ejemplo, Fiedler y Talley 2006; Grados *et al* 2018). Las anomalías mensuales de este patrón estacional, expresadas como desviaciones estándares, fueron similares a las seis localidades: 0.8°C para Máncora, 1.0°C para Cabo Blanco, 1.1°C para Talara, 1.5°C para Paita, 1.5°C para Chicama y 0.9°C para Callao (fig. 3b). La relación promedio entre la variación estacional e interanual (valores anómalos versus variación estacional) de 0.79 indica que la temperatura del agua superficial reflejó forzamientos casi equivalentes del ciclo anual y variabilidad interanual.

Las temperaturas del agua EN4 y sus anomalías para los lugares más cercanos a los registradores (tabla 1) se muestran en la fig. 3c y d, respectivamente. Debe tenerse en cuenta que la resolución espacial de 1 grado del conjunto de datos EN4 no resolvió algunos de los puntos de los registradores más cercanos (fig. 4). Las temperaturas del agua en el punto EN4 más meridional, correspondiente a Callao (12° S, 77° O), fueron más bajas que las temperaturas en el resto de los puntos EN4. Aunque las temperaturas en los seis registradores fluctuaron alrededor del mismo rango de 16-28°C, sus medias difirieron de las del conjunto de datos EN4, que fueron 21.1°C en Máncora y Cabo Blanco (en la celda 4° S, 81° O), 20.6°C en Talara y Paita (en la celda 5° S, 81° O), 20.8°C en Chicama (en la celda 8° S, 79° O) y 19.6°C en el Callao (en la célula 12° S, 77° O). Las desviaciones estándar oscilaron entre 2.6 y 3.0°C.

Cada evolución temporal del conjunto de datos EN4 fue similar a la de los datos del registrador. Las anomalías de temperatura del ciclo estacional fueron de 1.2°C en Máncora y Cabo Blanco, 1.2°C en Talara y Paita, 0.9°C en Chicama y 1.1°C en Callao (fig. 3d). La baja relación promedio de las variaciones interanuales a estacionales de los valores de anomalía (0.49) se debió a las variaciones anuales relativamente grandes en el conjunto de datos EN4. Debido a que EN4 es un conjunto de datos de análisis integrado con celdas de cuadrícula de un grado,

deducimos que el componente estacional está algo acentuado en las zonas con datos escasos.

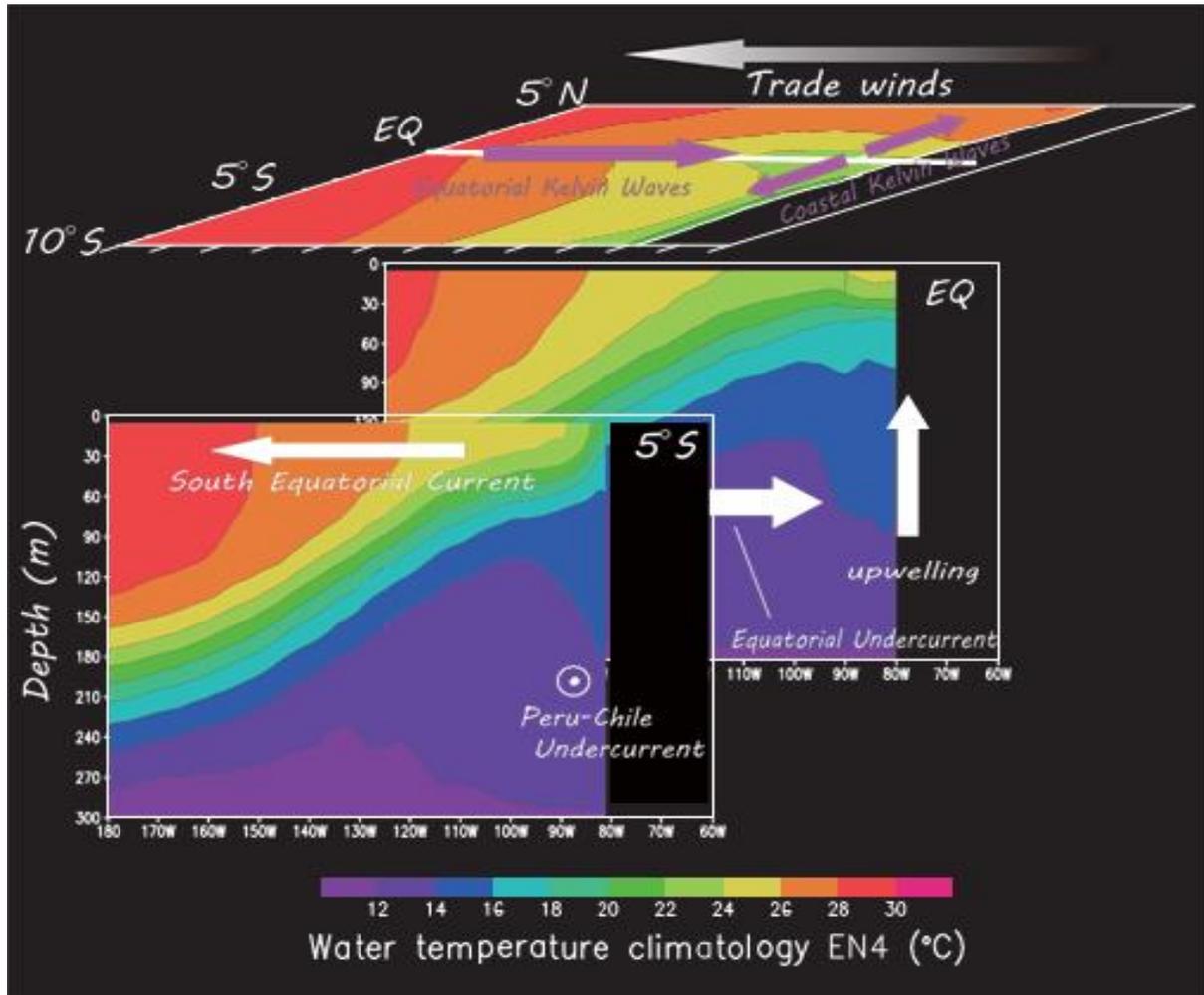
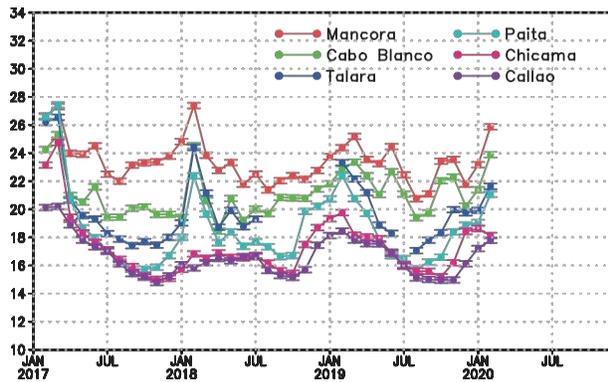


Fig. 2 Vista esquemática del estado climatológico del océano frente a Perú. La distribución de la temperatura de la superficie del mar y secciones transversales de la temperatura del agua sub-superficial del conjunto de datos EN4 durante el período 2017-2020. Las flechas blancas indican corrientes principales, y las flechas magenta denotan ondas oceánicas relacionadas con la energética ENSO.

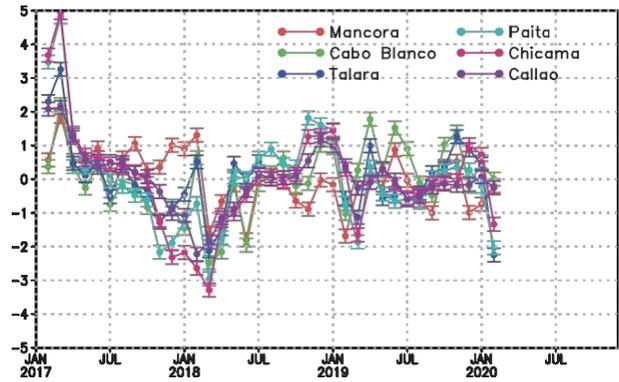
Leyenda: (traducción de términos de la figura 2)

<i>Trade winds:</i>	Vientos alisios
<i>Equatorial Kelvin Waves:</i>	Ondas Kelvin ecuatoriales
<i>Coastal Kelvin Waves:</i>	Ondas Kelvin costeras
<i>South Equatorial Current:</i>	Corriente ecuatorial meridional
<i>Peru-Chile undercurrent:</i>	Corriente subsuperficial del Perú-Chile
<i>Upwelling:</i>	Surgencia
<i>Equatorial undercurrent:</i>	Corriente subsuperficial ecuatorial

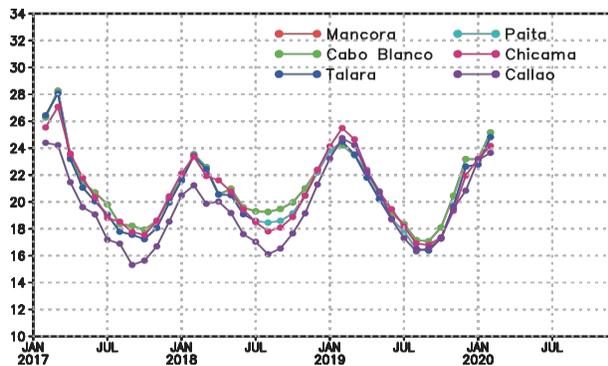
(a) Temperatura mensual del agua superficial (°C)



(b) Anomalía de la temperatura mensual del agua superficial (°C)



(c) Temperatura superficial del mar EN4 mensual (°C)



(d) Anomalía de la temperatura superficial del mar mensual

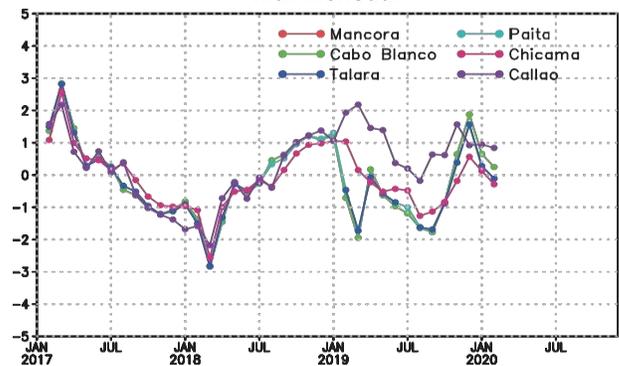


Fig. 3 Series temporales de la temperatura mensual del agua superficial (SWT) en seis puntos de la costa peruana. (a) Temperatura de la orilla del mar calibrada a partir de los registradores; (b) anomalías de la temperatura costera a partir de los datos de los registradores; (c) temperaturas de la superficie del mar a partir del conjunto de datos EN4, y (d) anomalías de la temperatura costera a partir del conjunto de datos EN4.

Climatología de la temperatura superficial del mar (SST) del EN4 (°C)

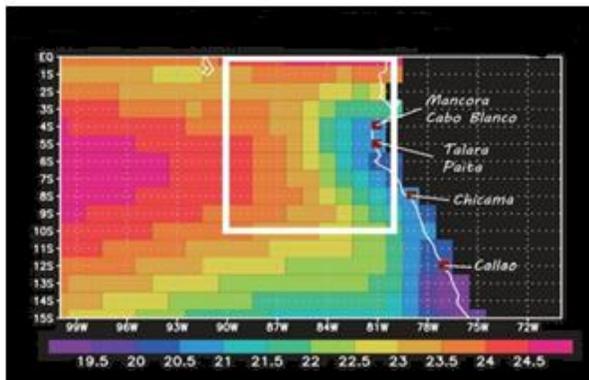


Fig. 4 Distribución climatológica de la temperatura superficial del mar. Mapa de la distribución climatológica de la temperatura superficial del mar en la malla espacial EN4 a 1° de resolución durante 2017-2020. El rectángulo blanco delimita la región NINO1+2.

El resto de este análisis se centra en los valores de anomalía, que se representan gráficamente para cada emplazamiento del registrador en la fig. 5. Se observaron fuertes correlaciones entre los datos de EN4 y los del registrador para cinco de los seis emplazamientos. Hubo fuertes correlaciones entre EN4 y los datos del registrador para cinco de las seis localizaciones. Los coeficientes de correlación oscilaron entre 0.80 y 0.92 ($p < 0.01$). En Máncora, el sitio más septentrional, la falta de significación estadística del coeficiente de correlación de 0.26 ($p < 0.10$) se debió quizás al hecho de que las interacciones altamente variables del Frente Ecuatorial frente al norte del Perú no están bien representadas en EN4. Para los otros sitios de registro, las temperaturas medias

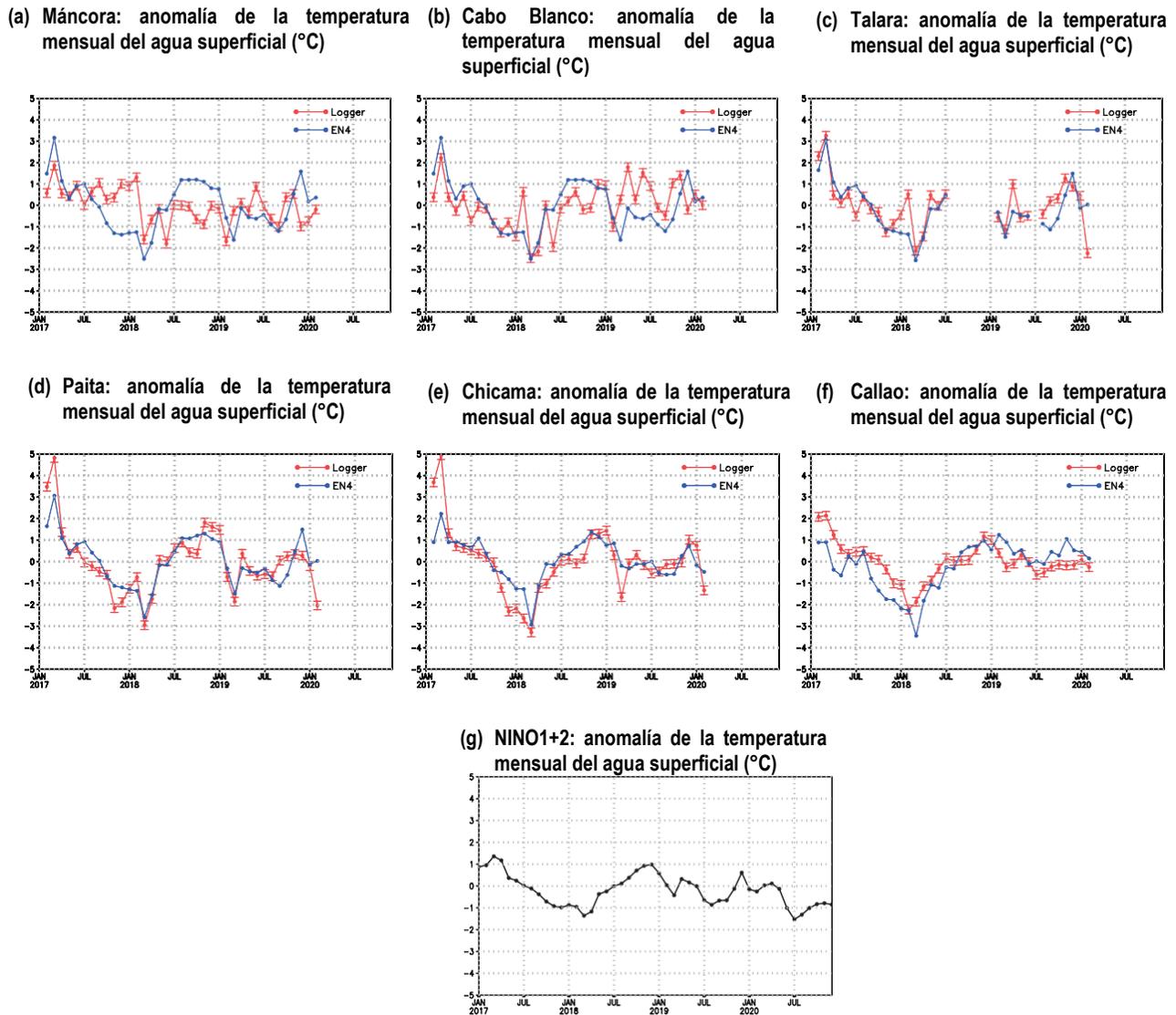


Fig. 5 Series temporales de anomalías mensuales de temperatura superficial. Anomalías en (a) Máncora, (b) Cabo Blanco, (c) Talara, (d) Paita, (e) Chicama y (f) Callao. (G) NINO1 + 2 anomalía de la temperatura superficial del mar del conjunto de datos EN4.

mensuales parecían estar bien sincronizadas con las anomalías de la temperatura superficial del mar NINO1+2 (fig. 5g). Es interesante notar que las anomalías mensuales de los datos del registrador estaban muy correlacionadas con los datos del mareógrafo costero (0.77 en Talara y 0.70 en el Callao, no se muestran las cifras). Estos resultados recuerdan una estrecha relación con los resultados de las investigaciones anteriores (Clarke 1992; Jigena-Antelo *et al.* 2023).

Se investigó la correlación espacial entre los datos de los registradores y el conjunto de datos EN4 sobre una base mensual y estacional. Se utilizaron únicamente el sitio de registro más septentrional (Cabo Blanco) y más meridional (Callao) para tener en cuenta la resolución espacial más gruesa del conjunto de datos EN4

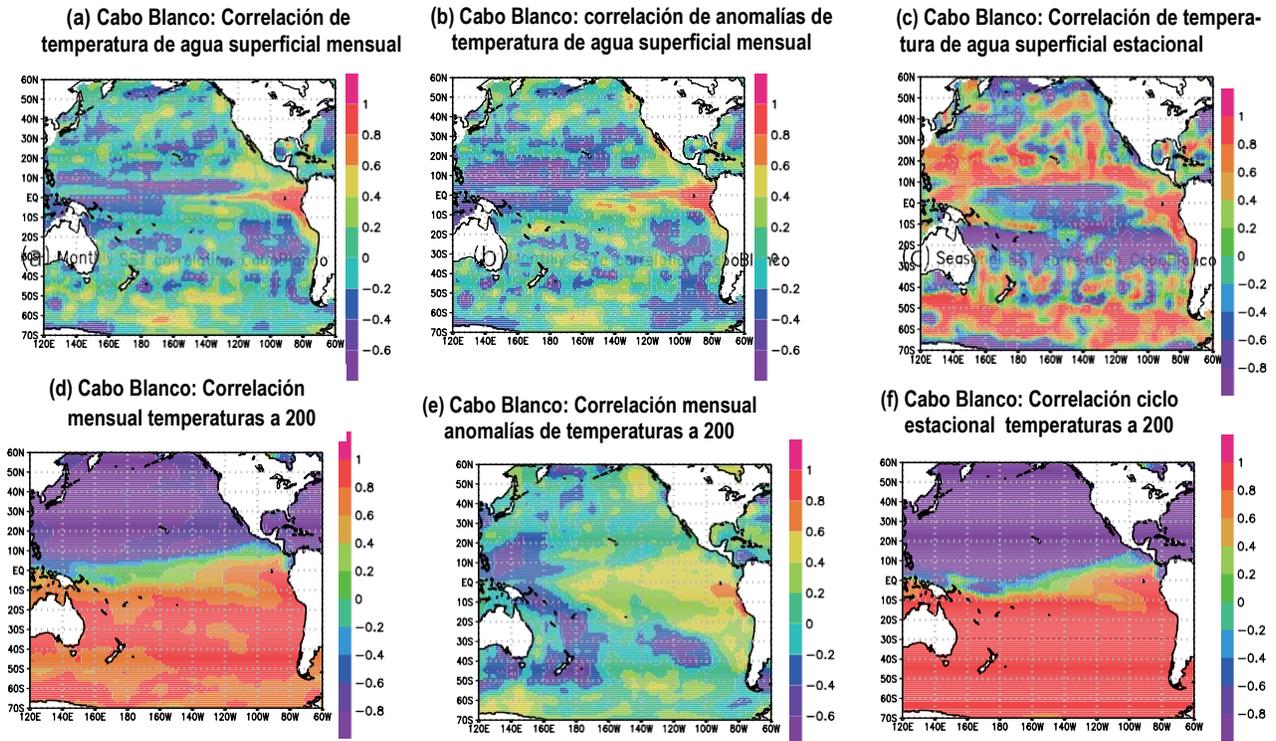


Fig. 6 Correlación espacial de la temperatura mensual del agua. Los mapas muestran correlaciones espaciales (coeficientes de correlación) de la temperatura mensual del agua entre Cabo Blanco (81° O, 4° S) y la cuenca del Pacífico a partir del conjunto de datos EN4 para 2010-2019 en relación con (a) temperaturas superficiales, (b) anomalías superficiales, (c) ciclo estacional superficial, (d) temperaturas a 200 m de profundidad, (e) anomalías a 200 m de profundidad y (f) ciclo estacional a 200 m de profundidad.

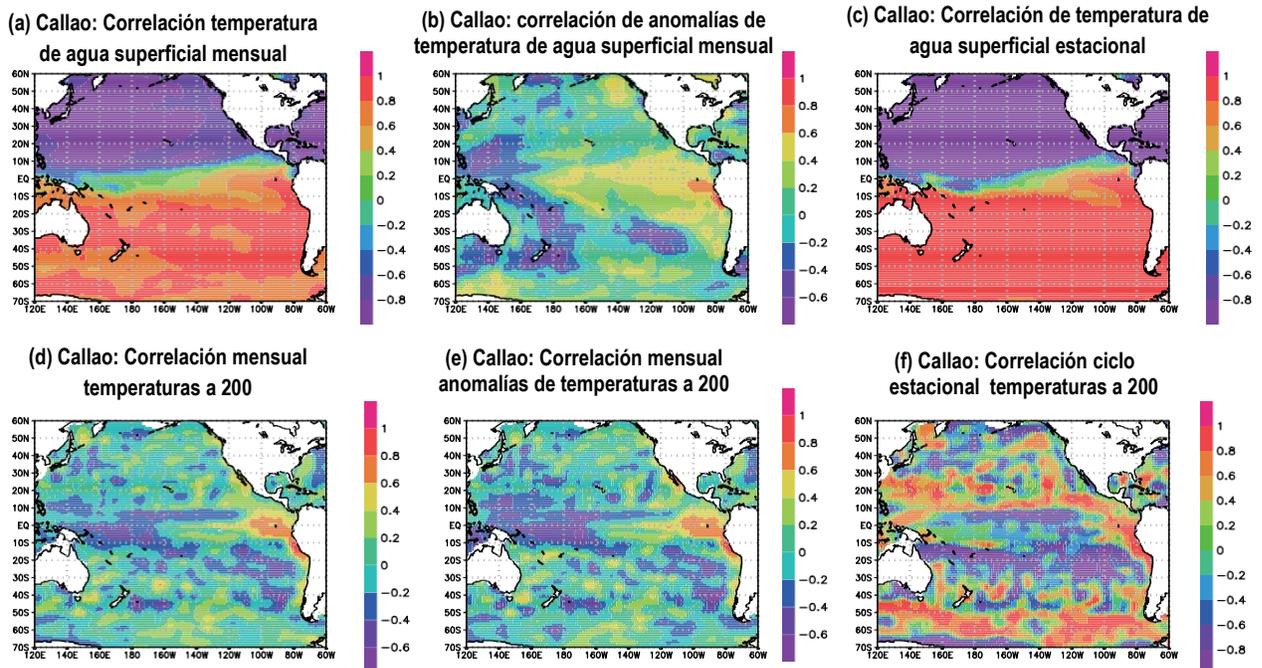


Fig. 7 Igual que fig. 6, pero para el Callao (77° O, 12° S).

(a) Callao: correlación mensual con rezago de temperatura superficial del mar: 3 meses (b) Callao: correlación mensual con rezago de temperatura superficial del mar: 1 mes (c) Callao: correlación mensual con rezago de temperatura superficial del mar

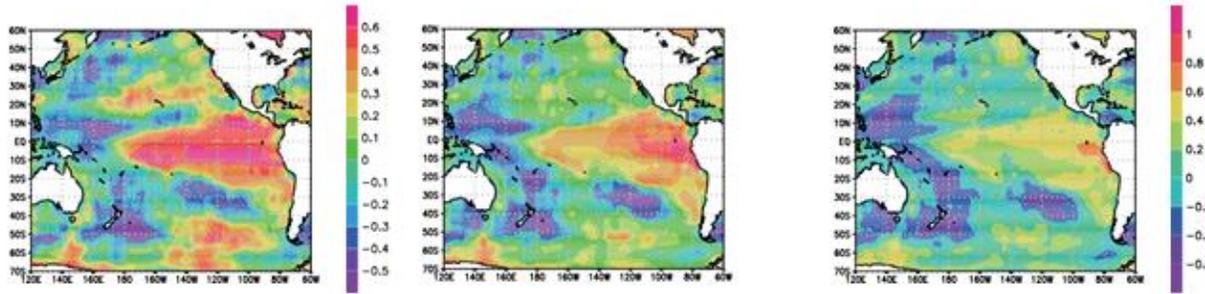


Fig. 8 Correlación espacial con retardo de la temperatura mensual del agua. Igual que la Fig. 7b, pero para correlaciones con rezagos de datos de la cuenca del Pacífico de (a) 3 meses, (b) 1 mes, y (c) 0 mes (igual que la fig. 7b).

El diagrama de correlación para la anomalía mensual de la temperatura superficial en Cabo Blanco muestra el conocido patrón espacial de El Niño (fig. 6b). En el diagrama para la subsuperficie (200 m de profundidad), el hecho de que el área de fuerte correlación estuviera más concentrada en la guía de ondas ecuatoriales (fig. 6e) refleja la fuerte influencia de las ondas ecuatoriales subsuperficiales y la contribución de la corriente subsuperficial ecuatorial, que se bifurca en las Islas Galápagos y posteriormente alimenta a la corriente subsuperficial del Perú-Chile a lo largo de la costa peruana (Montes *et al.* 2010; Rosales Quintana *et al.* 2021).

En el diagrama de correlación para el componente estacional, la temperatura de la superficie parecía estar determinada por el forzamiento atmosférico a partir de la insolación solar. Los hemisferios norte y sur, como era de esperar, estaban fuertemente diferenciados (fig. 6c). A 200 m de profundidad, el ciclo estacional, mucho menos diferenciado, reflejaba causas más complejas (fig. 6d). En resumen, las variaciones de la temperatura superficial mensual (fig. 6a) reflejaban tanto la dinámica de las ondas ecuatoriales subsuperficiales como el forzamiento térmico superficial. La primera tendía a estar sujeta a fluctuaciones interanuales; mientras que la segunda se caracterizaba por fluctuaciones estacionales. Estos patrones son en general coherentes con el hecho de que la relación entre las variaciones interanuales y estacionales osciló entre 0.49 y 0.79 (véase). Los

patrones espaciales de las temperaturas subsuperficiales y sus anomalías fueron casi idénticos (fig. 6d y e).

Los diagramas de correlación para el sitio de Callao fueron similares a los de Cabo Blanco, excepto que los patrones de anomalías mensuales para aguas superficiales y profundas exhibieron una fase de decaimiento durante El Niño (fig. 7b y e). Este hallazgo fue consistente con la propagación de las ondas Kelvin costeras de norte a sur y fue corroborado por diagramas que incorporan un desfase de uno a tres meses que mostraron la conocida secuencia ENSO (fig. 8). La anomalía de la temperatura superficial del mar en el Callao lideró la distribución de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar mostradas en la fig. 8a y b en tres meses y un mes, respectivamente. La conclusión es que, en el Callao las variaciones de la superficie del agua pueden ser rastreadas, en parte, hasta las ondas Kelvin ecuatoriales asociadas con eventos ENSO. De manera similar, Rosales Quintana *et al.* (2021) han reportado que el desarrollo de un flujo anómalo de la corriente subsuperficial ecuatorial en el Pacífico occidental (relacionado con ENSO) puede ser detectable desde el Pacífico más oriental, donde una señal fuertemente correlacionada puede ser detectada entre 30 y 34 días después en las Islas Galápagos.

Nuestros resultados sugieren que la anomalía mensual de la temperatura superficial costera está

dominada por El Niño. Esta hipótesis es coherente con lo que se desprende de estudios anteriores de esta zona y los cambios de la temperatura del agua obtenidos con las nuevas observaciones se validaron en parte sobre la base de medias mensuales.

4.2 Características de los datos diarios

Para demostrar la utilidad de nuestros datos, presentamos aquí un análisis de los datos medios diarios. Aplicamos un filtro de 48 horas a los datos para eliminar la señal de las mareas diurnas antes de hacer las compilaciones diarias (Thompson 1982).

Hay muchas fuentes posibles de variación de la temperatura media diaria en el océano y nuestros datos por sí solos no pueden utilizarse para identificar la dinámica. Sin embargo, aquí intentamos hacer una comparación con las olas ecuatoriales como una de las posibles causas. Hemos sometido los datos de temperatura media diaria de cuatro de los seis puntos de registro (fig. 9) a un análisis espectral. Los resultados para los dos sitios del norte, Máncora y Cabo Blanco, mostraron dos picos claros en periodos de 80 y 120 días (fig. 10). Esos picos tenían características similares a las de la segunda y primera ondas Kelvin ecuatoriales baroclínicas con periodos de 70 y 120 días, respectivamente, reportadas por Cravatte *et al.* (2003).

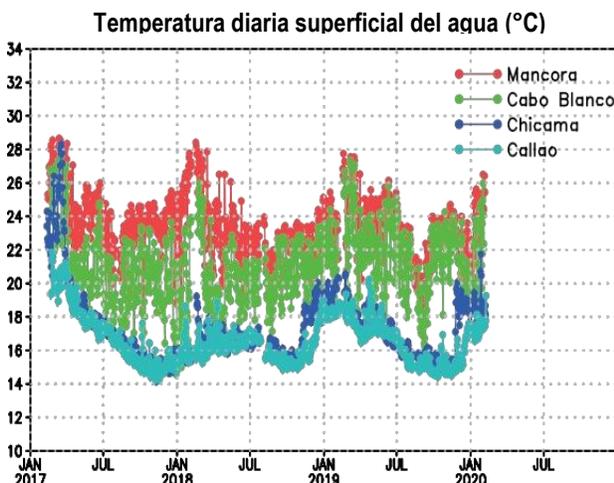


Fig. 9 Series temporales de las temperaturas diarias del agua de la orilla del mar en cuatro lugares de la costa peruana.

El cambio de frecuencia de 70 a 80 días puede deberse a los diferentes periodos de tiempo analizados por aquel estudio (la década de 1990) y este (por ejemplo, Dewitte *et al.* 2008). Sin embargo, la causa de este cambio debe abordarse mediante un análisis exhaustivo que utilice datos de reanálisis y no mediante especulaciones.

En contraste, los datos para Chicama y Callao no mostraron estos picos (fig. 10). La implicación de este descubrimiento, que las ondas ecuatoriales de período más corto pueden no filtrarse más allá del ecuador, proporciona una visión que puede mejorar la comprensión del balance energético global de ENOS y las influencias de ENOS en los cambios oceánicos en latitudes medias y lejanas al ecuador.

Espectro de potencias de temperatura superficial del agua diaria (°C)

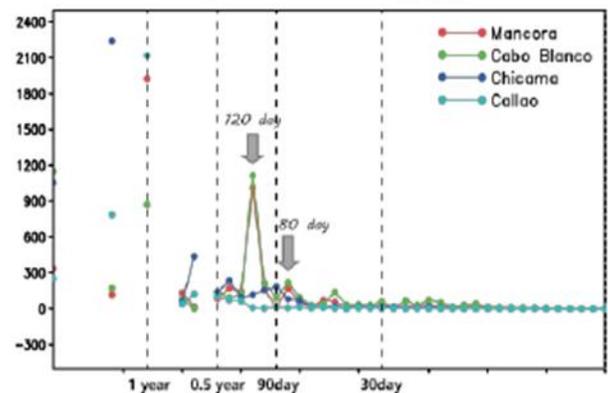


Fig. 10 Análisis espectral de los datos diarios del registrador mostrados en la fig. 9. Cada color denota Máncora, Cabo Blanco, Chicama y Callao respectivamente.

4.3 Comparación con los datos de pesca

Las ondas Kelvin costeras y los cambios relacionados en las propiedades del agua pueden afectar a las principales pesquerías de Perú a través de su influencia en la migración de los peces. La figura 11 muestra los desembarques de anchoveta junto con la temperatura diaria en los muelles de Paita, Chicama y el Callao. En el muelle de Paita (también conocido como muelle de Tierra Colorada), la temperatura del agua aumentó rápidamente en más de 6 °C (de 15.2 a 21.8 °C) del 13 al 18 de noviembre del 2019.

Aunque no hay datos de capturas en este muelle porque la flota de anchoveta no operaba cerca de Paita, se produjeron cambios de temperatura similares, con una amplitud decreciente y un desfase temporal de 5-8 días, en los dos sitios al sur de Paita que pueden haber estado relacionados con las ondas Kelvin costeras. En el muelle de Chicama (350 km al sur de Paita), un aumento abrupto de la temperatura del agua a unos 20°C comenzó el 25 de noviembre y la captura diaria total de anchoveta disminuyó drásticamente de alrededor de 15,000 t a menos de 3,000 t. La persistencia de temperaturas de agua cálidas hasta el 17 de enero puede haber estado relacionada con la reducción de los desembarques diarios durante ese periodo. En el muelle del Callao (400 km al sur de Chicama) se produjo un pequeño aumento de la temperatura a partir del 28 de noviembre. La temperatura alcanzó los 16.8 °C sin un cambio claramente relacionado con los desembarques. La velocidad estimada de propagación de la señal fue de 0.51 m/s de Paita a Chicama y de 1.15 m/s de Chicama al Callao. Dado que la velocidad de propagación de una onda Kelvin costera sería generalmente de alrededor de 0.4 m/s

(Chelton y Davis 1982), una evaluación detallada que tuvo en cuenta factores como la topografía y la estratificación serían necesarias para revelar la verdadera naturaleza de esta «propagación».

Cabe señalar que el aumento de la proporción de peces juveniles en el muelle del Callao comenzó en enero, cuando las autoridades peruanas cerraron la temporada de pesca (IMARPE 2020). Una causa del abrupto aumento de la temperatura del agua en noviembre de 2019 habrían sido los cambios en mar abierto que se observaron en los meses precedentes (fig. 12). Las temperaturas del agua subsuperficial en 0° N, 110° O, y 0° N, 95° O revelan una profundización de las isotermas de 15 °C y 20 °C que sugiere el paso de una onda Kelvin en octubre de 2019 que alcanzó la costa peruana en noviembre. Fue observada por primera vez en 0° N, 110° O el 9 de octubre y alcanzó la boya a 0° N, 95° O el 22 de octubre (barras blancas discontinuas en la fig. 12). Dado que este único ejemplo no puede servir de base para ninguna conclusión firme, será cada vez más necesario adquirir y publicar datos que permitan acumular ejemplos de este tipo.

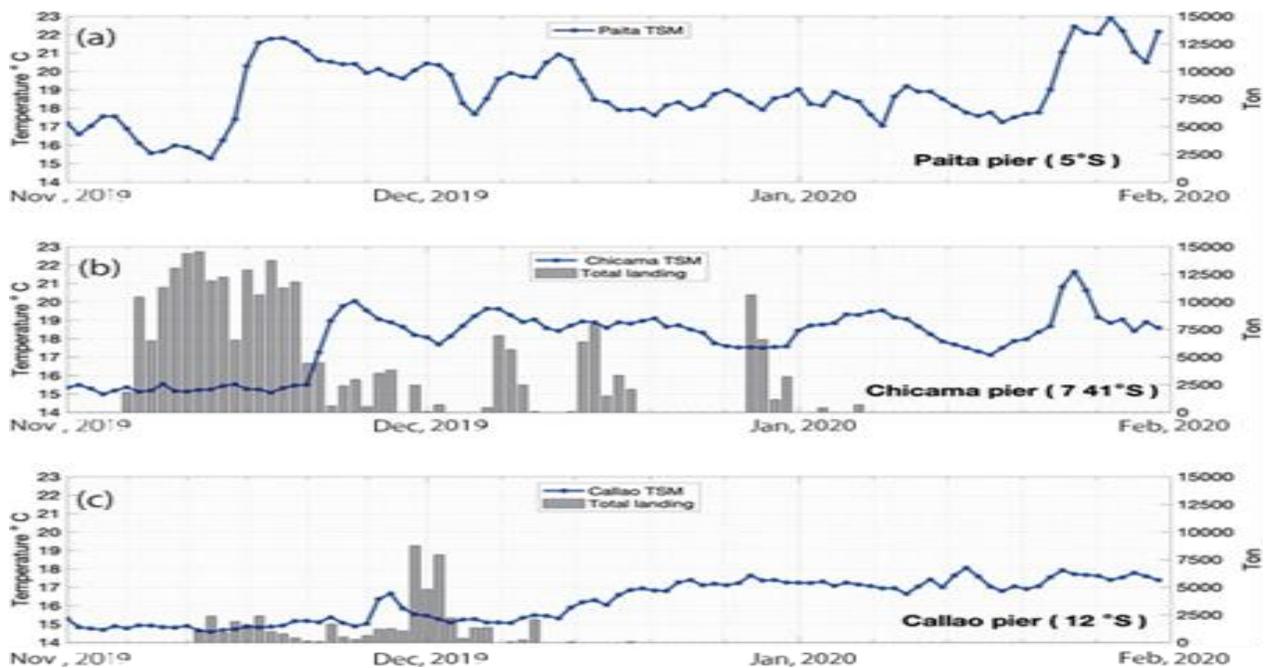


Fig. 11 Gráfico de datos de pesca. Series temporales de desembarques diarios de anchoveta y temperaturas diarias del agua en los muelles de (a) Paita, (b) Chicama y (c) Callao desde noviembre del 2019 hasta febrero del 2020.

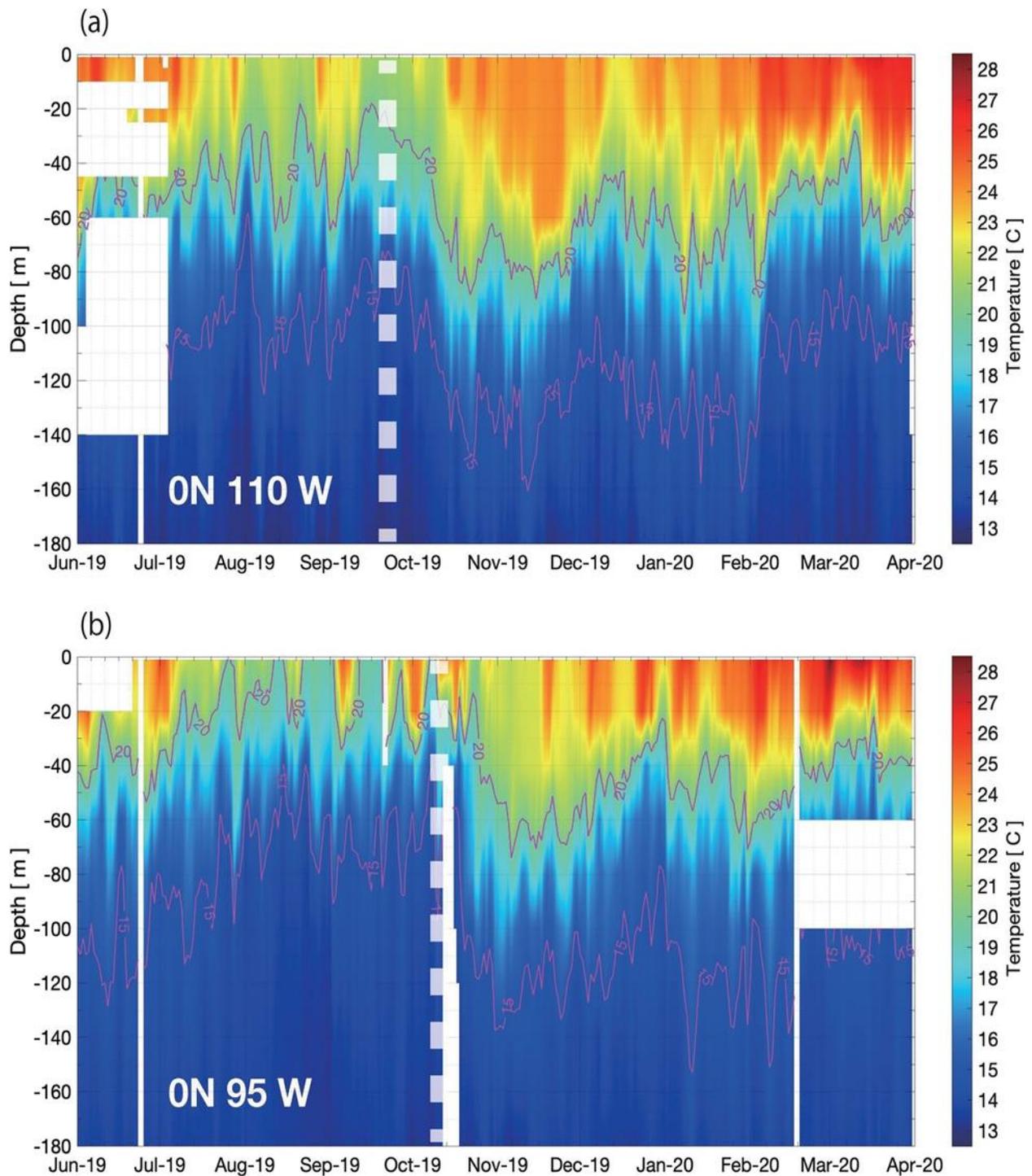


Fig. 11. Gráfico de datos de pesca. Series temporales de desembarques diarios de anchoveta y temperaturas diarias del agua en los muelles de (a) Paite, (b) Chicama y (c) el Callao desde noviembre del 2019 hasta febrero del 2020.

5 Conclusiones

Instalamos nuevos registradores para monitorizar la temperatura del agua del mar en seis lugares costeros de Perú entre 2017 y 2020. Los datos están abiertos y disponibles en un conjunto de datos gratuito y bien organizado. Este valioso conjunto de datos es el resultado de una monitorización de alta resolución de las aguas costeras peruanas.

El uso de este conjunto de datos nos permitió confirmar que las temperaturas de las aguas superficiales costeras estaban estrechamente vinculadas a las anomalías mensuales de temperatura y a los aspectos de El Niño en el océano abierto. Las anomalías de temperatura en las zonas costeras del sur se retrasaron aproximadamente un mes con respecto a las de las zonas costeras del norte. Esta diferencia puede atribuirse al paso de las ondas Kelvin costeras.

La alta resolución temporal de nuestro sistema de vigilancia puede permitir la detección de ondas Kelvin ecuatoriales y fenómenos oceánicos de corta duración. La demostración por nuestros datos de que las temperaturas del agua de la orilla del mar mostraron variabilidad con periodos de 80 y 120 días en la parte norte (ecuatorial) del área de estudio sugiere que las ondas ecuatoriales pueden no penetrar mucho en latitudes más altas en escalas de tiempo subestacionales. No obstante, no es posible extraer conclusiones generales a partir del análisis de un breve periodo de solo tres años, en el que predominó la fase fría del ENOS.

Existen muchas incertidumbres en nuestro conocimiento de la zona del límite oriental del Océano Pacífico debido a la insuficiente cobertura de observación. El tipo de red organizada de observaciones a lo largo de la costa peruana que aquí se describe y la publicación de los datos comunicados pueden mejorar mucho ese conocimiento.

Abreviaturas

ENSO El Niño/La Niña Southern Oscillation
GDAC Argo Global Data Assembly Centre
IMARPE Peruvian Sea Institute
JAMSTEC Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration
WOCE World Ocean Circulation Experiment
WOD09 World Ocean Database 2009

Agradecimientos

Agradecemos al Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero (FONDEPES), a la Dirección Hidrográfica de la Marina de Guerra del Perú (DIHIDRONAV), al Instituto Peruano del Mar y a la Industrial Pesquera Santa Mónica por el permiso para instalar registradores de datos dentro de sus instalaciones. Nuestro trabajo se benefició del apoyo del Dr. H. Uchida con respecto a la calibración de los sensores que utilizamos. Los cálculos numéricos se realizaron en el Data Analyzer de JAMSTEC.

Contribuciones de los autores

SM concibió y diseñó el estudio. MK propuso el tema y llevó a cabo las observaciones en la costa. LAIS apoyó las observaciones en la costa y analizó los datos. GMRQ apoyó las observaciones en la orilla del mar, analizó los 20 datos y ayudó a interpretarlos. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

Financiación

Este trabajo ha sido financiado en parte por la Japan Society for the Promotion of Science KAKENHI Grant 17H04579, JP22H05207 y por la Japan Science and Technology Agency, AIP Trilateral AI Research Grant Number JPMJCR20G5.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos del registrador que apoyan las conclusiones de este artículo están disponibles en https://www.jamstec.go.jp/goorc/data/peru_smasuda Los datos de la boya disponibles en <https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/pmel-theme/pacific-ocean-tao>.

Declaraciones

Intereses contrapuestos

Los autores declaran que no tienen intereses contrapuestos.

Recibido: 25 de julio de 2022 Aceptado: 7 de julio de 2023

Referencias

- Chavez FP, Messié M (2009) A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems. *Prog Oceanogr* 83:80-96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
- Chavez FP, Strutton PG, McPhaden MJ (1998) Biological-physical coupling in the central equatorial Pacific during the onset of the 1997-98 El Niño. *Geophys Res Lett* 25:3543-3546. <https://doi.org/10.1029/98GL02729>
- Chelton DB, Davis RE (1982) Monthly mean sea-level variability along the west coast of North America. *J Phys Oceanogr* 12:757-784
- Clarke AJ (1992) Low frequency reflection from a non-meridional eastern ocean boundary and the use of coastal sea level to monitor eastern Pacific equatorial Kelvin waves. *J Phys Oceanogr* 22:163-183. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1992\)022%3c0163:LFRFAN%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1992)022%3c0163:LFRFAN%3e2.0.CO;2)
- Cravatte S, Picaut J, Eldin G (2003) Second and first baroclinic Kelvin modes in the equatorial Pacific at intraseasonal time scales. *J Geophys Res* 108:3266. <https://doi.org/10.1029/2002JC001511>
- Dewitte B, Purca S, Illig S, Renault L, Giese B (2008) Low frequency modulation of the intra-seasonal equatorial Kelvin wave activity in the Pacific Ocean from SODA: 1958-2001. *J Clim* 21:6060-6069
- Espinoza-Morriberón D, Echevin V, Colas F, Tam J, Gutiérrez D, Graco M, Ledesma J, Quispe-Ccalluari C (2019) Variabilidad del oxígeno durante el ENSO en el Pacífico Suroriental Tropical. *Front Mar Sci* 5:1-20. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00526>
- Fiedler PC, Talley LD (2006) Hydrography of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog Oceanogr* 69:143-180. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.008>
- Goddard L, Philander S-G (2000) The energetics of El Niño and La Niña. *J Clim* 13:1496-1516
- Good SA, Martin MJ, Rayner NA (2013) EN4: perfiles de temperatura y salinidad oceánicas de calidad controlada y análisis objetivos mensuales con estimaciones de incertidumbre. *J Geophys Res* 118:6704-6716. <https://doi.org/10.1002/2013JC009067>
- Grados C, Chaigneau A, Echevin V, Domínguez N (2018) Upper ocean hydrography of the Northern Humboldt current system at seasonal, interannual and interdecadal scales. *Prog Oceanogr* 165:123-144. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.05.005>
- Gronell A, Wijffels SE (2008) A semiautomated approach for quality controlling large historical ocean temperature archives. *J Atmos Ocean Technol* 25:990-1003. <https://doi.org/10.1175/JTECHO539.1>
- Guinehut S, Coatanoan C, Dhomps A-L, Traon P-YL, Larnicol G (2009) On the use of satellite altimeter data in Argo quality control. *J Atmos Ocean Technol* 26:395-402. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHO648.1>
- IMARPE (2020) Situación del stock norte-centro de la anchoveta peruana (*Engraulis ringens*) al mes de mayo de 2020 y perspectivas de explotación para la primera temporada de pesca del año. Reporte técnico Oficio N.330-2020-IMARPE, pp 1-57. <http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/descarga-informe.php?archivo=107> (en español)
- Ingleby B, Huddleston M (2007) Quality control of ocean temperature and salinity profiles-Historical and real-time data. *J Mar Syst* 65:158-175. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.11.019>
- Jigena-Antelo B, Estrada-Ludeña C, Howden S, Rey W, Paz-Acosta J, Lopez-García P, SalazarRodríguez E, Endrina N, Muñoz-Pérez JJ (2023) Evidence of sea level rise at the Peruvian Coast (1942-2019). *Sci Total Environ* 859:160082. https://aquila.usm.edu/fac_pubs/20517
- Johnson GC, Sloyan BM, Kessler WS, McTaggart KE (2002) Direct measurements of upper ocean currents and water properties across the tropical Pacific during the 1990s. *Prog Oceanogr* 52:31-61. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00021-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00021-6)
- Johnson GC, Hosoda S, Jayne SR, Oke PR, Riser SC, Roemmich D, Suga T, Thierry V, Wijffels SE, Xu J (2022) Argo-two decades: global oceanography, revolutionized. *Ann Rev Mar Sci* 14:379-403
- Kovats R-S, Bouma M-J, Hajat S, Worrall E, Haines A (2003) El Niño y la salud. *The Lancet* 362:1481-1489
- Kuntz LB, Schrag DP (2018) Asimetría hemisférica en la termoclina ventilada del Pacífico tropical. *J Clim* 31:1281-1288. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0686.1>
- Lukas R (1986) The termination of the equatorial undercurrent in the eastern Pacific. *Prog Oceanogr* 16:63-90. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(86\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0079-6611(86)90007-8)
- McPhaden MJ, Hayes SP (1989) Moored observations of the Pacific north equatorial countercurrent. *Eos Trans Am Geophys Union* 70:1148
- McPhaden MJ, Yu X (1999) Equatorial waves and the 1997-98 El Niño. *Geophys Res Lett* 26:2961-2964. <https://doi.org/10.1029/1999GL004901>
- McPhaden MJ, Santoso A, Cai W (2019) Comprensión de ENSO en un clima de carga.

- Eos Trans Am Geophys Union.
<https://doi.org/10.1029/2019E O124159>
- Montes I, Colas F, Capet X, Schneider W (2010) On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru-Chile Undercurrent. *J Geophys Res Oceans* 115:1-16.
<https://doi.org/10.1029/2009JC005710>
- Philander S-G (2004) *Our affair with El Niño: how we transformed an enchanting Peruvian current into a global climate hazard*. Princeton Univ Press, Princeton
- Qin X, Menviel L, Sen Gupta A, van Sebille E (2016) Iron sources and pathways into the Pacific Equatorial Undercurrent. *Geophys Res Lett* 43:98439851. <https://doi.org/10.1002/2016GL07001>
- Roemmich D, Gilson J (2009) The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program. *Prog Oceanogr* 82:81-100
- Rosales Quintana GM, Marsh R, Icochea Salas LA (2021) Interannual variability in contributions of the Equatorial Undercurrent (EUC) to Peruvian upwelling source water. *Ocean Sci* 17:1385-1402.
<https://doi.org/10.5194/os-17-1385-2021>
- Santos F, Gómez-Gesteira M, deCastro M, Álvarez I (2012) Variability of coastal and ocean water temperature in the upper 700 m along the Western Iberian Peninsula from 1975 to 2006. *PLoS ONE* 7:e50666. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050666>
- Thompson RORY (1982) Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *J Phys Oceanogr* 13:1077-1108