

INFORME SOBRE EL PRONÓSTICO DE EFECTOS DE ENOS SOBRE LAS CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS FRENTE A LA COSTA PERUANA EN BASE A FORZANTES DEL PACÍFICO ECUATORIAL Y SUDESTE

Setiembre 2022

Carlos Quispe, Jorge Tam, Cinthia Arellano, Adolfo Chamorro, Dante Espinoza, Carlos Yván Romero y Jorge Ramos

LABORATORIO DE MODELADO OCEANOGRÁFICO, ECOSISTEMICO Y DEL CAMBIO CLIMÁTICO (LMOECC)

1. Resumen

Usando datos hasta setiembre 2022, se calcularon medias móviles centradas en agosto (trimestre JAS) de los indicadores de impactos de ENOS: el Índice del Anticiclón del Pacífico Sur (IAPS) presentó una condición intensa y se mantuvo desplazado al noroeste de su posición habitual, el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) mantuvo una condición fría, el Índice del Área de Afloramiento (IAA) presentó una condición alta y el Índice de Clorofila Superficial presentó una condición media.

Según el modelo oceánico se pronostica que una OKE fría (modo 1) llegará a Sudamérica en octubre 2022, y otra OKE fría (modo 2) llegaría a Sudamérica en noviembre. Una OKE cálida (modo 1) llegaría en diciembre, y otra OKE cálida (modo 2) llegaría en enero 2023. El análisis de Ondas Atrapadas a la Costa (OAC) identificó la propagación de una OAC fría en setiembre frente a la costa peruana asociada al arribo de una OKE fría (modo 2).

Se usaron 2 modelos de pronóstico de efectos térmicos de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) frente a la costa peruana y la variable pronosticada fue el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP): el modelo empírico basado en el volumen de agua cálida ecuatorial y el Anticiclón del Pacífico Sur, pronostica el debilitamiento de las actuales condiciones frías con una tendencia hacia las condiciones neutras durante octubre y que podría alcanzar el umbral de las condiciones cálidas en noviembre, y posteriormente indicar condiciones neutras entre diciembre 2022 y enero 2023. Mientras que el modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia basado en forzantes del Pacífico Ecuatorial Tropical pronostica que las condiciones frías continuarán entre octubre 2022 y enero 2023.

2. Indicadores oceanográficos y atmosféricos del Pacífico Sudeste.

Índice del APS (IAPS)

Se usó el Índice del APS (IAPS) para caracterizar la intensidad del Anticiclón del Pacífico Sur (APS), el cual se calculó mediante la media móvil trimestral de la anomalía de la presión atmosférica (hPa) mensual máxima en el núcleo del APS con datos de la base de datos Reanálisis NCEP/NOAA (Kalnay et al. 1996). El IAPS fue clasificado en 3 condiciones: débil, neutro e intenso (Fig. 1a). Durante el trimestre JAS 2022 el IAPS (+3.85) presentó una condición intensa.

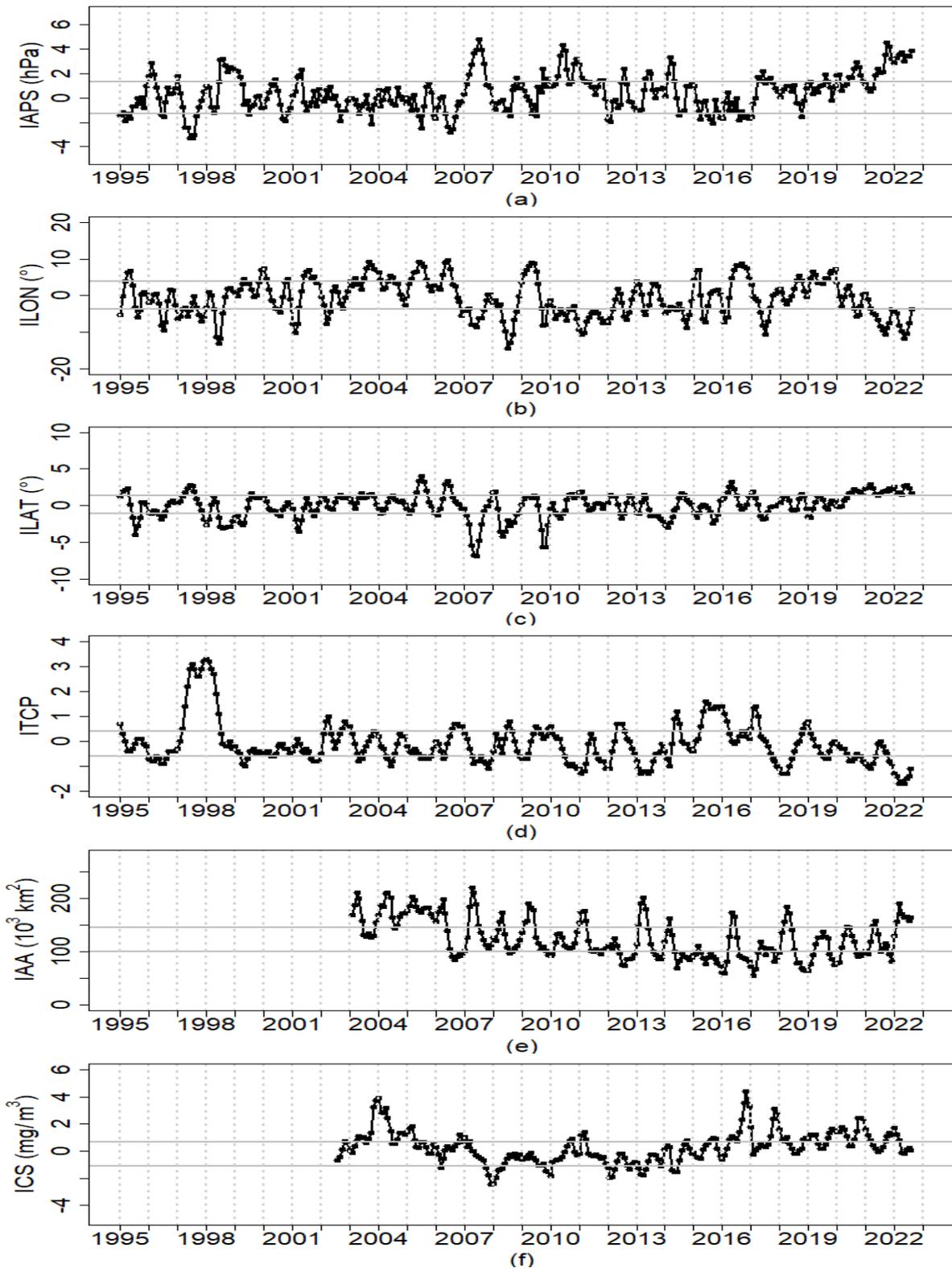


Figura 1. Variación interanual con datos actualizados hasta el mes de setiembre del 2022 de: (a) Índice del APS (IAPS), (b) Índice de desplazamiento longitudinal del APS (ILON), (c) Índice de desplazamiento latitudinal del APS (ILAT), (d) Índice Térmico Costero Peruano (ITCP), (e) Índice del área de afloramiento (IAA) y (f) Índice de Clorofila a Superficial (ICS).

Índices de la posición del APS (ILON e ILAT)

Se usaron los índices de posición longitudinal (ILON) y latitudinal (ILAT) del APS para caracterizar la posición del núcleo del APS, los cuales se calcularon mediante la media móvil trimestral de las anomalías de la posición longitudinal y latitudinal de la presión atmosférica mensual máxima en el núcleo del APS con datos del Reanálisis NCEP/NOAA (Kalnay et al. 1996). Valores positivos (negativos) de los índices ILON (°) e ILAT (°) representan un desplazamiento al este y al norte (al oeste y al sur) del núcleo del APS, respectivamente. Durante el trimestre JAS 2022 los índices ILON e ILAT presentaron valores de -3.68 y +1.64 respectivamente, indicando que el núcleo del APS, en promedio, se mantuvo desplazado al noroeste de su posición habitual (Fig. 1c y 1b).

Índice Térmico Costero Peruano (ITCP)

Se usó el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) (Quispe-CCalluari, et al. 2018) para caracterizar la variabilidad interanual oceánica frente a la costa peruana, el cual se calculó mediante la media móvil trimestral de la primera componente principal de las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) de las aguas costeras a partir de la base de datos de Reynolds (2007), que explicó el 87.7 % de la varianza. El ITCP fue clasificado en 3 condiciones: frío, neutro y cálido (Fig.1d). El ITCP tiene que persistir al menos 3 trimestres consecutivos por arriba (abajo) del umbral para ser categorizado como un Periodo Cálido (Frío).

Durante el trimestre JAS 2022, el valor del ITCP (-1.4) presentó una condición fría. En los últimos 9 trimestres consecutivos (OND 2021, NDE, DEF 2021-22, EFM, FMA, MAM, AMJ, MJJ, JJA y JAS 2022) se mantuvo con valores negativos por debajo del umbral, lo cual indica el desarrollo de la ocurrencia de un Periodo Frío en el Ecosistema de Afloramiento Peruano. Por otro lado, el valor del Índice Oceánico de El Niño (ONI) fue -0.9 en el trimestre JAS 2022, lo cual según criterio de la NOAA indica la ocurrencia de un “Episodio La Niña” en el Océano Pacífico Tropical desde el trimestre JAS 2021, debido a que el ONI ha presentado en los últimos trece trimestres consecutivos (desde JAS 2021 hasta JAS 2022) valores negativos por debajo de su umbral (-0.5°).

Índice del área de afloramiento (IAA)

Se calculó el Índice del Área de Afloramiento (IAA) para caracterizar el área costera limitada por el frente térmico (en 10^3 km^2) entre los 05°S y 14°S en la franja de 300 km frente al litoral, y puede ser empleado como un indicador del avance o repliegue de las aguas del afloramiento costero. Este indicador ha sido desarrollado en base al frente térmico (Romero et al. 2014) construido a partir de datos de TSM satelital de nivel 4 (Multiscale UltraHigh Resolution MUR, JPL-NASA) a 1 km de resolución. El IAA fue clasificado en 3 condiciones: baja, media y alta. Durante el trimestre JAS 2022, el IAA presentó un valor asociado a la condición alta (164.33 km^2) (Fig. 1e).

Índice de Clorofila a Superficial (ICS)

Para el análisis de la clorofila-a superficial se utilizó información proveniente del satélite SeaWiFS (1997-2010) y del satélite MODIS corregido siguiendo la metodología de Demarcq y Benazzouz (2015) con una resolución espacial de 4 km dentro de los 100 km a la costa y los 4°S - 16°S . Se construyó una climatología tomando en cuenta información del 1998 al 2015 y se obtuvieron las anomalías promedio de la clorofila-a superficial ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). El ICS se calculó como la media móvil trimestral de las anomalías promedio de la concentración de clorofila-a superficial ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) mensualmente (Espinoza et al. en prep.). El ICS fue

clasificado en 3 condiciones: baja, media y alta. Durante el trimestre JAS 2022, el ICS presentó una condición media (+0.09) (Fig. 1f).

3. Pronóstico de ondas Kelvin ecuatoriales y propagación de Ondas Atrapadas a la Costa

Con el fin de pronosticar la propagación de las Ondas Kelvin Ecuatoriales (OKE) hacia el Pacífico Oriental Ecuatorial y las Ondas Rossby (OR) hacia el Pacífico Occidental Ecuatorial, se simularon las ondas Kelvin y ondas Rossby en el Pacífico Tropical, siguiendo la metodología de Illig et al. (2004), Dewitte et al. (2002) y Quispe-Ccalluari et al (2021), usando como forzante vientos NCEP actualizados hasta el 10 de octubre 2022 (Kalnay et al. 1996). El pronóstico de las OKE hasta el 10 de diciembre 2022 se realizó con anomalías del esfuerzo del viento igual cero, y para el cálculo de las anomalías se usó el periodo 1991-2020. La correlación entre los valores de nivel del mar observado y pronosticado en el Pacífico Sudeste fue significativa ($r = 0.69$, $p < 0.05$) para el periodo 1993-2008 (Quispe et al. 2014). Se graficó la contribución de los modos baroclínicos 1 (flechas continuas) (Fig. 3) y modo 2 (flechas discontinuas) (Fig. 4) de las OR en 3°-5°S y OKE a las anomalías del nivel del mar (cm) en el Pacífico Ecuatorial y la contribución conjunta de los modos baroclínicos 1+2 de las OKE (Fig. 2). Los valores positivos corresponden a OKEs de hundimiento “cálidas” (flechas negras), y los valores negativos corresponden a OKEs de afloramiento “frías” (flechas blancas). Con el fin de mostrar al paso de Ondas Atrapadas a la Costa (OAC) de hundimiento “cálidas” (flechas negras) y afloramiento “frías” (flechas blancas) frente a la costa peruana asociadas a la llegada de las OKEs, se empleó las anomalías del nivel del mar satelital, filtradas frente a la costa peruana, obtenidas de la base de datos de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS).

Figura 2. Diagrama Hovmöller longitud-tiempo (izq.) de Ondas Kelvin Ecuatoriales simuladas (contribución conjunta de los modos baroclínicos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm) en el Pacífico Ecuatorial (0°N). Se presentan las OKEs de hundimiento “cálidas” (flechas negras), las OKEs de afloramiento “frías” (flechas blancas), el inicio del pronóstico (línea horizontal discontinua). Diagrama Hovmöller (der.) de Ondas Atrapadas a la Costa observadas (Perú) en cm con el paso de OACs de hundimiento “cálidas” (flechas negras) y OACs de afloramiento “frías” (flechas blancas). La longitud de ambos diagramas no están a la misma escala.

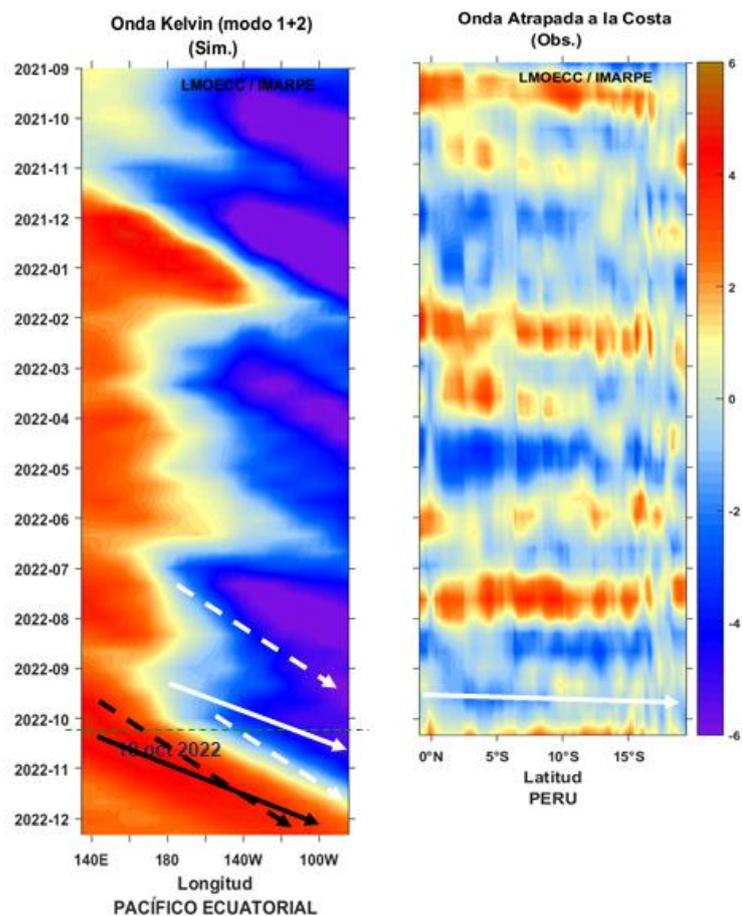


Figura 3. Diagrama Hovmöller longitud-tiempo de Ondas Rossby simuladas (3° - 5° S) y de Ondas Kelvin Ecuatoriales simuladas de modo baroclínico 1 (líneas continuas) en el Pacífico Ecuatorial (0° N), anomalías positivas (contornos rojos) y negativas (contornos azules) del esfuerzo del viento zonal. La línea discontinua horizontal indica el inicio del pronóstico. Se presentan las ondas de hundimiento “cálidas” (flechas negras), y las ondas de afloramiento “frías” (flechas blancas).

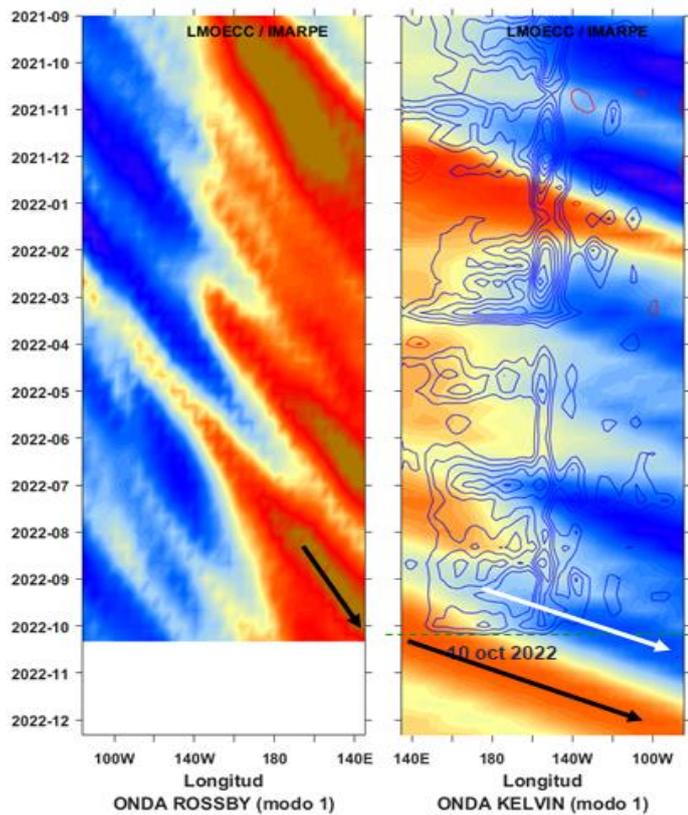
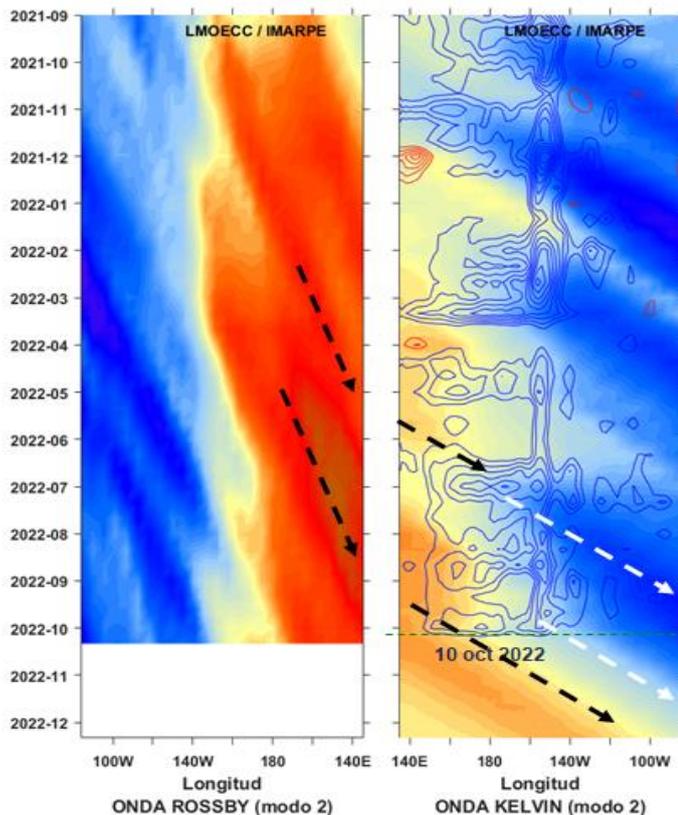


Figura 4. Diagrama Hovmöller longitud-tiempo de Ondas Rossby simuladas (3° - 5° S) y de Ondas Kelvin Ecuatoriales simuladas de modo baroclínico 2 (líneas punteadas), en el Pacífico Ecuatorial (0° N), anomalías positivas (contornos rojos) y negativas (contornos azules) del esfuerzo del viento zonal. La línea discontinua horizontal indica el inicio del pronóstico. Se presentan las ondas de hundimiento “cálidas” (flechas negras), y las ondas de afloramiento “frías” (flechas blancas).



Según la simulación, una OKE fría (modo 2) arribó a Sudamérica en setiembre, y según el análisis frente a la costa de Perú, esta OKE fría se propagó a lo largo de la costa del litoral peruano como una OAC fría (Fig. 2).

Debido a la intensificación de los vientos alisios en el Pacífico ecuatorial occidental y central se generó la OKE fría (modo 1) en setiembre, y llegará a Sudamérica en octubre (Fig. 3). La persistencia de las anomalías de vientos del este en el Pacífico ecuatorial central generó otra OKE fría (modo 2) que llegará a Sudamérica en noviembre (Fig. 4). Por otro lado, una OKE cálida (modo 2) se generó en setiembre como reflexión de una onda Rossby cálida (modo 2) en el Pacífico ecuatorial occidental, y llegaría debilitada a Sudamérica en enero 2023, debido también a la persistencia de los vientos alisios mencionada anteriormente (Fig. 4). Cabe señalar, que una nueva OKE cálida (modo 1) se generó debido a la reflexión de una onda Rossby cálida (modo 1) en el Pacífico ecuatorial occidental (Fig. 3) y llegará a Sudamérica en diciembre.

4. Pronóstico de efectos térmicos de ENOS sobre la costa peruana.

Con el fin de pronosticar los efectos del ENOS sobre la temperatura superficial del mar (TSM) frente a la costa peruana, representada por el índice ITCP, se utilizaron 2 modelos de simulación, basados en diferentes métodos matemáticos y estadísticos. En la Tab. 1 se comparan las características de cada modelo.

Tabla 1. Características de los modelos de pronóstico de efectos de ENOS frente a la costa peruana.

Modelo	EMPIRICO	OCEANO-ATMOSFERA	PROBABILISTICO ESPACIAL
Variable pronosticada	ITCP	ITCP	ITCP
Variables Predictoras	VAC e IAPS	Vientos NCEP	ONI
Método	Modelo empírico basado en el volumen de agua cálida ecuatorial	Modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia	Modelo basado en tablas de contingencia
Relación funcional	Lineal	Lineal	Lineal
Horizonte de pronóstico	4 meses	4 meses	3 meses
Ventajas	Depende principalmente del comportamiento del volumen de agua cálida ecuatorial y de la intensidad del APS.	Depende de la interacción océano-atmósfera en el Pacífico Tropical.	Estima probabilidades espaciales
Desventajas	Alta variabilidad de las previsiones. Desfase funcional fijo.	Sensible a vientos del oeste.	Depende de la dinámica ecuatorial

Pronóstico del ITCP usando un modelo empírico

Se usó un modelo empírico basado en el volumen de agua cálida ecuatorial (VAC) (Matellini et al. 2007) con datos de las boyas TAO (TAO 2021) y en el Índice del Anticiclón del Pacífico Sur (IAPS) (Chamorro et al., en prep.) para realizar el pronóstico del ITCP para un horizonte de 4 meses.

La correlación entre los valores del ITCP simulados y observados fue significativa ($r = 0.6$, $p < 0.05$) para el período 1982-2011, y la mediana absoluta de los errores entre los datos simulados y observados fue de 0.41 (6.59% del rango de valores ITCP).

Los pronósticos del ITCP con el modelo empírico indican una tendencia a debilitar esta condición fría hacia una condición neutra durante octubre con una tendencia que alcanzaría el umbral de las condiciones cálidas entre octubre y noviembre, y luego permanecería en condiciones neutras entre diciembre 2022 y enero 2023 (Tab. 2, Fig. 5). En este horizonte, el valor del ITCP simulado sería mínimo en enero 2023 (Tab. 2).

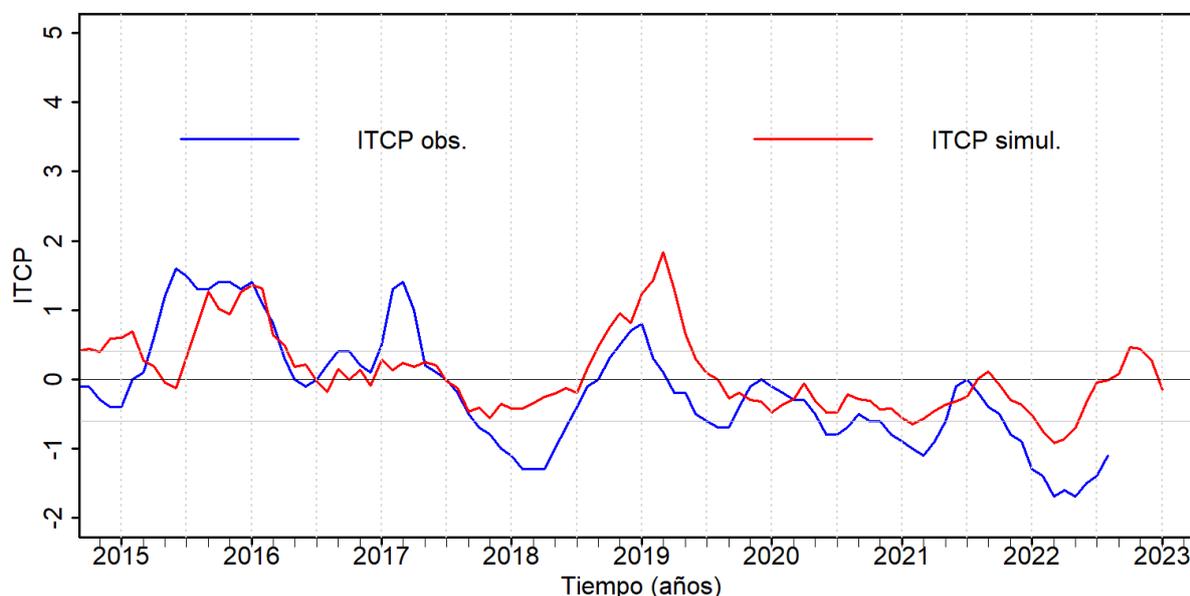


Figura 5. Pronóstico del ITCP mediante un modelo empírico, con datos actualizados hasta el mes de setiembre del 2022.

Tabla 2. Condición mensual de los pronósticos del ITCP mediante un modelo empírico.

Mes / Año	ITCP simulada	Condición mensual
Oct-22	0.46	Cálida
Nov-22	0.43	Cálida
Dic-22	0.28	Neutra
Ene-23	-0.15	Neutra

Pronóstico del ITCP usando un modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia.

Se usó un modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia del Pacífico Tropical (Dewitte et al. 2002, Gushchina et al. 2000), usando un modelo atmosférico estadístico y una relación empírica entre la AN3.4 simulada y el ITCP, para realizar el pronóstico del ITCP para un horizonte de 4 meses.

Los pronósticos del ITCP indican una persistencia de valores negativos dentro del rango de las condiciones frías entre octubre 2022 y enero 2023 (Tab. 3, Fig. 6). En este horizonte, el valor del ITCP simulado sería mínimo en octubre 2022 (Tab. 3). Cabe señalar que los pronósticos están basados en la variación temporal de las condiciones del Pacífico Ecuatorial.

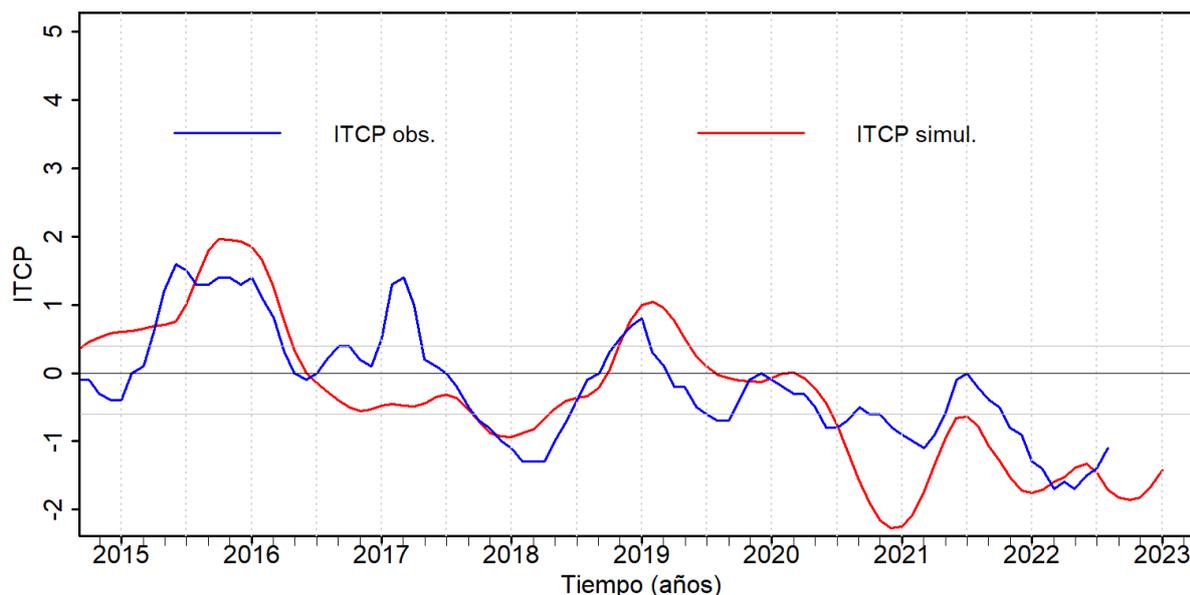


Figura 6. Pronóstico del ITCP mediante el modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia con datos actualizados hasta el mes de setiembre del 2022.

Tabla 3. Condición mensual de los pronósticos del ITCP mediante el modelo océano-atmósfera acoplado.

Mes / Año	ITCP simulada	Condición mensual
Oct-22	-1.9	Fría
Nov-22	-1.8	Fría
Dic-22	-1.6	Fría
Ene-23	-1.4	Fría

Pronóstico probabilístico espacial basado en tablas de contingencia (TC).

Se realizó un pronóstico probabilístico espacial de las condiciones térmicas (fría, neutra, cálida) en el área de afloramiento peruano (hasta las 45 mn aproximadamente), usando un modelo basado en tablas de contingencia (Alfaro et al. 2003), usando como variable independiente el índice Niño 3.4 (NOAA 2020) y como dependiente las anomalías de temperatura superficial del mar en el área de afloramiento peruano (Reynolds et al. 2007). Las probabilidades de las condiciones mensuales se definieron usando quintiles de las anomalías de las temperaturas superficiales del mar.

El modelo probabilístico basado en tablas de contingencia (TC) actualizado hasta el mes de setiembre 2022, indicó que la condición más probable en la región norte y centro es neutra con una probabilidad del 62.6%, mientras que en la región sur serán también neutras con una probabilidad del 60.3% en promedio para el trimestre Octubre-Noviembre-Diciembre (OND) 2022 (Fig. 7).

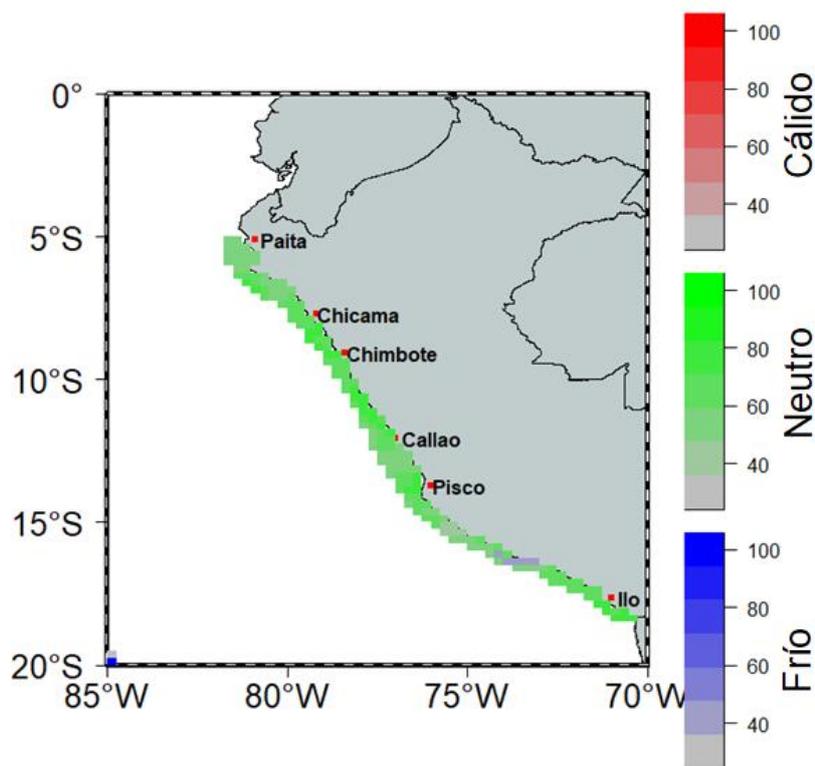


Figura 7. Pronóstico probabilístico espacial para el trimestre OND 2022 usando un modelo basado en tablas de contingencia.

5. Conclusiones

Respecto a los indicadores oceanográficos y atmosféricos del Pacífico Sudeste calculados con datos hasta setiembre 2022, se observó que en promedio durante el trimestre JAS 2022, el Índice del Anticiclón del Pacífico Sur (IAPS) presentó una condición intensa y se mantuvo desplazado al noroeste de su posición habitual, el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) presentó una condición fría, el Índice del Área de Afloramiento (IAA) presentó una condición alta, y el Índice de Clorofila Superficial (ICS) presentó también una condición media.

El análisis frente a las costas del Perú en septiembre 2022, identificó la propagación de una Onda Atrapada a la Costa (OAC) fría, debido a la llegada de una Onda Kelvin Ecuatorial (OKE) fría (modo 2). Por otro lado, la simulación de la propagación de las OKE indicó la llegada de una OKE fría (modo 1) a Sudamérica en octubre, y otra OKE fría (modo 2) llegaría a Sudamérica en noviembre. Una OKE cálida (modo 1) llegaría en diciembre y otra OKE cálida (modo 2) llegaría en enero 2023.

El pronóstico del Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) usando el modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia, basado en forzantes del Pacífico Ecuatorial, pronostican la continuación de las condiciones frías del ITCP entre octubre 2022 y enero 2023; por otro lado, el modelo empírico, basado en el volumen de agua cálida ecuatorial y el anticiclón del Pacífico Sur pronostica una tendencia al debilitamiento de las actuales condiciones frías hacia una condición neutra en octubre y que podría alcanzar el umbral

hacia las condiciones cálidas en noviembre, y posteriormente indicar condiciones neutras entre diciembre 2022 y enero 2023.

El presente informe se elabora con fines de investigación, por lo que es de carácter referencial, sin garantías sobre su uso posterior. El Comunicado Oficial de la Comisión multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) puede encontrarse en el siguiente enlace: <https://bit.ly/3DgCvwJ>

6. Referencias bibliográficas

- Chen, D., Cane, M. A., Kaplan, A., Zebiak, S. E. & Huang, D. (2004). Predictability of El Niño over the past 148 years. *Nature*, 428: 733–736.
- Demarcq, H. and A. Benazzouz (2015), Trends in phytoplankton and primary productivity off Northwest Africa. In: Oceanographic and biological features in the Canary Current Large Marine Ecosystem. Valdés, L. and Déniz-González, I. (eds). *IOC-UNESCO, Paris. IOC Technical Series*, No. 115, pp. 331-341.
- Dewitte B., D. Gushchina, Y. duPenhoat and S. Lakeev, 2002: On the importance of subsurface variability for ENSO simulation and prediction with intermediate coupled models of the Tropical Pacific: A case study for the 1997-1998 El Niño. *Geoph. Res. Lett.*, vol. 29, no. 14, 1666, 10.1029/2001GL014452.
- Gushchina D. Yu, B. Dewitte and M. A. Petrossiants, 2000: A coupled ocean-atmosphere model of tropical Pacific: The forecast of the 1997-1998 El Niño Southern Oscillation. *Izvestiya atmospheric and oceanic physics*. 36(5): 533-554.
- Illig, S., B. Dewitte, N. Ayoub, Y. du Penhoat, G. Reverdin, P. De Mey, F. Bonjean and G.S.E. Lagerloef. 2004. Interannual long equatorial waves in the Tropical Atlantic from a high resolution OGCM experiment in 1981–2000, *J. Geophys. Res.* 109 (C2): C02022.
- Kalnay et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470.
- NOAA. 2003. NOAA gets U.S. consensus for El Niño/La Niña index, definitions. On-line: <http://www.noaanews.noaa.gov/stories/s2095.htm>.
- NOAA. 2004. NOAA's new global climate forecast system increases confidence that weak El Niño conditions are developing. On-line: <http://www.noaanews.noaa.gov/stories2004/s2302.htm>.
- Quispe C, Tam J, Chamorro A. 2014. Modelado y Pronóstico de ondas Kelvin ecuatoriales. p.97. En: *UPCH (Ed.). Libro de resúmenes del IV Congreso de Ciencias del Mar (IV CONCIMAR)*. 366 p
- Quispe-Ccalluari, C., A. Chamorro, C. Arellano, y J. Tam. 2021. Propagación de ondas de Kelvin ecuatoriales y ondas atrapadas a la costa durante El Niño 2015-16 y El Niño costero 2017 frente a Perú: Simulaciones y Observaciones. *Boletín Instituto del Mar del Perú*, 36(2), 349–361. <https://doi.org/10.53554/boletin.v36i2.342>
- Quispe-Ccalluari, C., J. Tam, H. Demarcq, A. Chamorro, D. Espinoza-Morriberón, C. Romero, N. Dominguez, J. Ramos y R. Oliveros-Ramos. 2018: An index of coastal thermal effects of El Niño Southern Oscillation on the Peruvian Upwelling Ecosystem. *Int. J. Climatol.*:1-11. <https://doi.org/10.1002/joc.5493>.
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007: Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, 20, 5473-5496.
- Romero C, Chamorro A, Espinoza-Morriberon D, Tam J. 2014. Variación estacional e interanual de Indicadores de afloramiento frente a la costa central del Perú. p.191. En: *UPCH (Ed.). Libro de resúmenes del IV Congreso de Ciencias del Mar (IV CONCIMAR)*. 366 p.
- TAO (Tropical Atmosphere Ocean Project). 2018. Data Display. NOAA. Pacific Marine Environmental Laboratory. En línea: www.pmel.noaa.gov/tao/jsdisplay.
- Webster, P. J. & Yang, S, (1992). Monsoon and ENSO: Selectively Interactive Systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 118(507): 877-926