

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

Marzo 2020

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

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

1. Resumen

Usando datos hasta marzo 2020, se calcularon medias móviles centradas en Febrero (trimestre EFM) de los indicadores de impactos de ENOS: el Índice del Anticiclón del Pacífico Sur (IAPS) presentó una condición intensa y estuvo ubicado alrededor de su posición habitual, el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) presentó una condición neutra, el Índice del Área de Afloramiento (IAA) presentó una condición baja y el índice de clorofila superficial presentó una condición alta.

Según el modelo oceánico se identificó la propagación de una onda Kelvin cálida debilitada (modo 2) y llegarán frente a las costas de Sudamérica un abril. Por otro lado, dos ondas Kelvin fría (modo 1) fueron generados en febrero y marzo respectivamente en el Pacífico Ecuatorial Occidental y llegaron una en abril y la otra en mayo 2020, cabe señalar que una nueva onda Kelvin cálida (modo 2) podría generarse en el Pacífico Ecuatorial Occidental.

Se usaron 3 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, por otro lado, el modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia basado en forzantes del Pacífico Ecuatorial Tropical ambos pronostican condiciones neutras entre abril y julio 2020 para el ITCP; finalmente el modelo probabilístico espacial muestra que para el trimestre AMJ 2020 la condición más probable frente a la costa peruana en la región norte-centro será neutra (probabilidad: 57%), y en la región sur será neutra (probabilidad: 53.6%).

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 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 EFM 2020 el IAPS (+2.19) presentó una condición intensa.

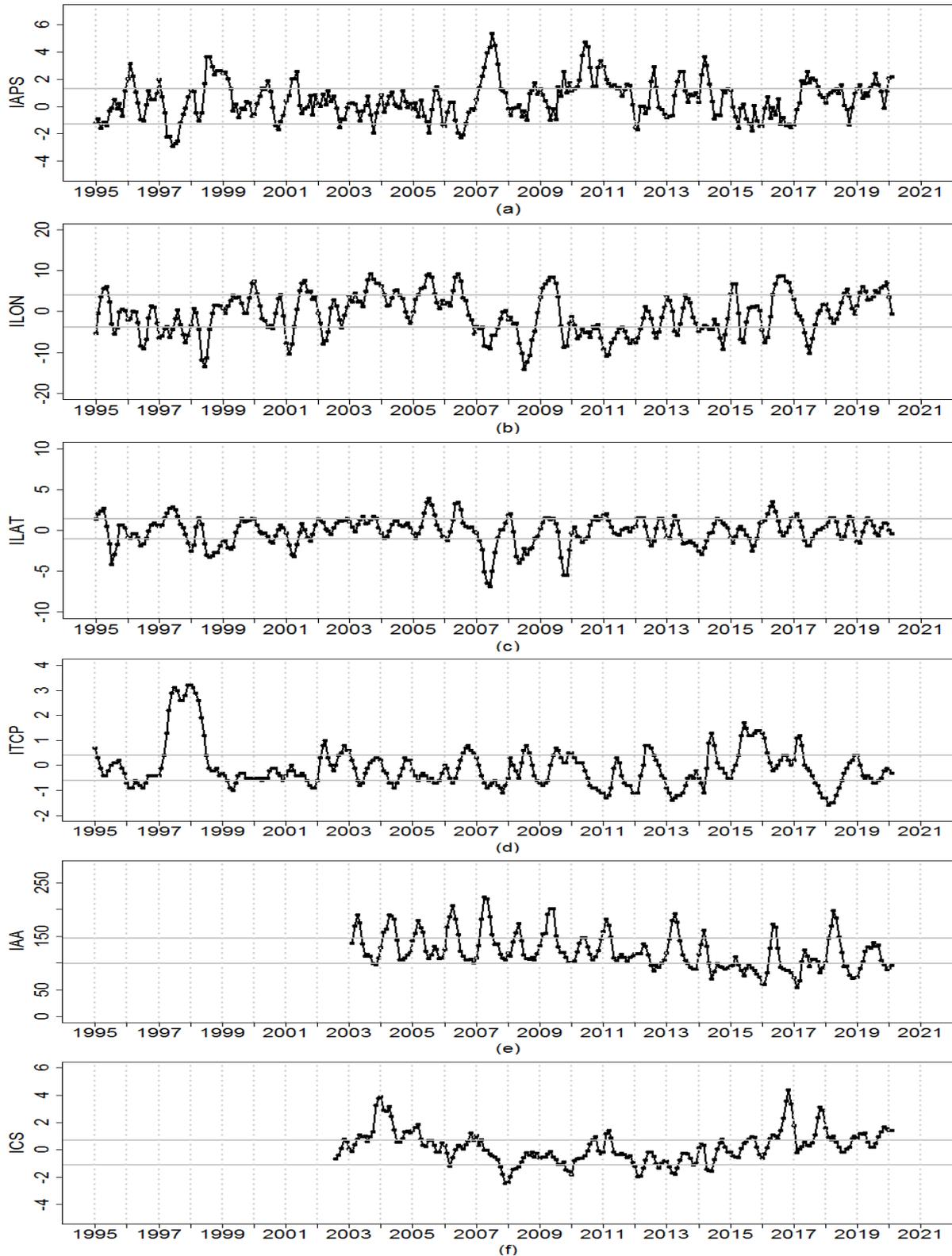


Figura 1. Variación interanual con datos actualizados hasta el mes de marzo del 2020 de: (a) Índice del APS (IAPS), (b) Índice de desplazamiento longitudinal del APS (ILON), (c) Índice de desplazamiento latitudinal del APS (ILAT), (d) Índice Térmico Costero Peruano (ITCP), (e) Índice del área de afloramiento (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 EFM 2020 los índices ILON e ILAT presentaron valores de -0.6 y -0.44 respectivamente, indicando que el núcleo del APS, en promedio, estuvo alrededor de su posición habitual, hacia la costa de Sudamérica (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 EFM 2020, el valor del ITCP (-0.3) presentó una condición neutra. Cabe señalar que el ITCP ha registrado 3 trimestres consecutivos (OND 2019, NDE 2019-20 y DEF 2019-20) con valores negativos pero dentro del rango neutro en el Ecosistema de Afloramiento Peruano. Por otro lado, el Índice Oceánico de El Niño (ONI) presentó por cuarta vez un valor consecutivo de +0.5°C en el trimestre EFM 2020, que es el umbral (+0.5°C) hacia las condiciones cálidas, sin embargo la tendencia de los valores de las anomalías en la región 3.4 son a disminuir, lo cual según criterio de la NOAA indica condiciones neutras del ENOS en el Océano Pacífico Tropical.

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 EFM 2020, el IAA presentó un valor asociado a la condición baja (95.26 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 DEF 2020, el ICS presentó una condición alta (+1.43) (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) y Dewitte et al. (2002), usando como forzante vientos NCEP actualizados hasta el 10 abril 2020 (Kalnay et al. 1996). El pronóstico de las OKE hasta el 10 de junio 2020 se realizó con anomalías del esfuerzo del viento igual cero, y para el cálculo de las anomalías se usó el periodo 2000-2008. 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.

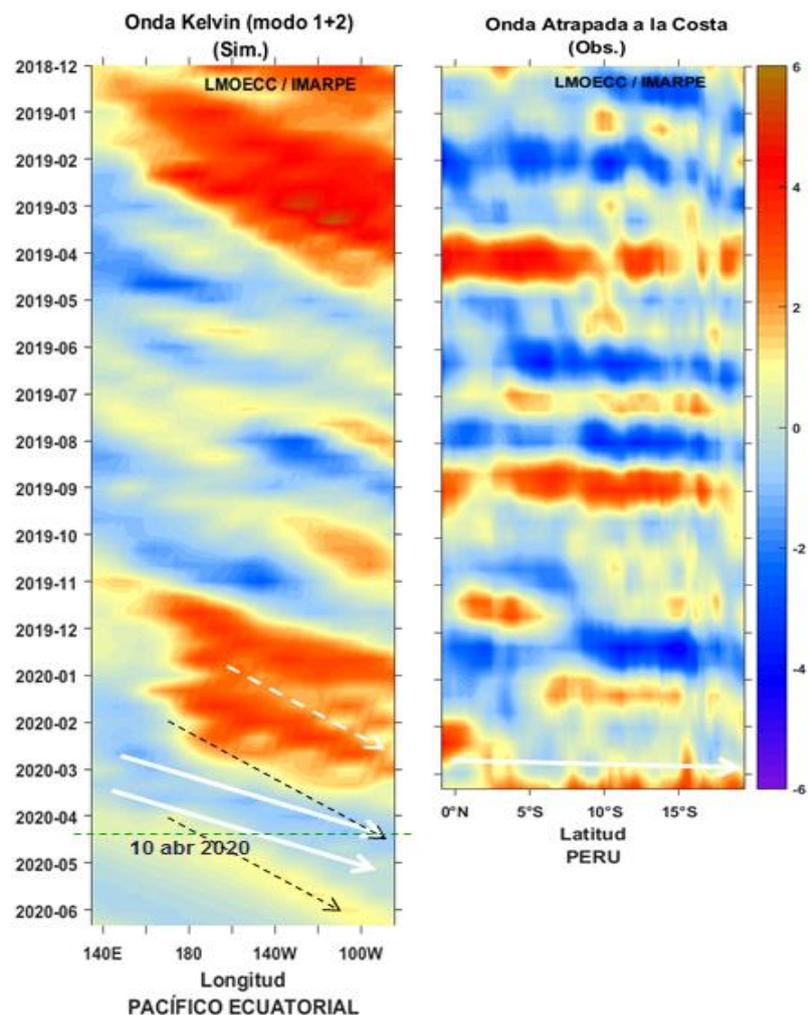


Figura 3. Diagrama Hovmöller longitud-tiempo de Ondas Rossby simuladas (3° - 5° S) y de Ondas Kelvin Ecuatoriales simuladas de modo baroclínico 1 (líneas continuas) en el Pacífico Ecuatorial (0° N), anomalías positivas (contornos rojos) y negativas (contornos azules) del esfuerzo del viento zonal. La 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).

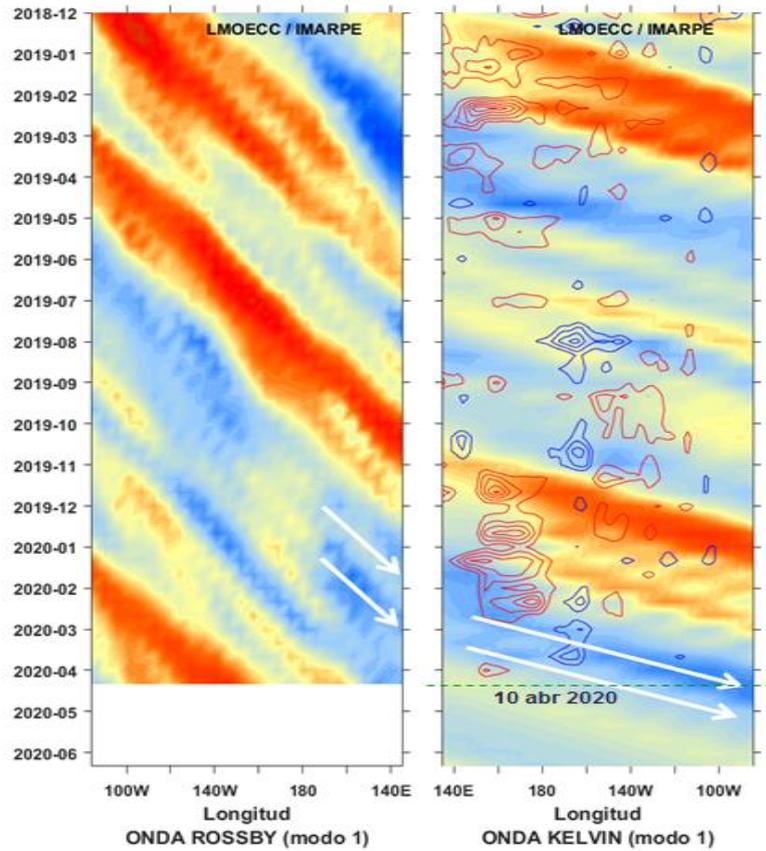
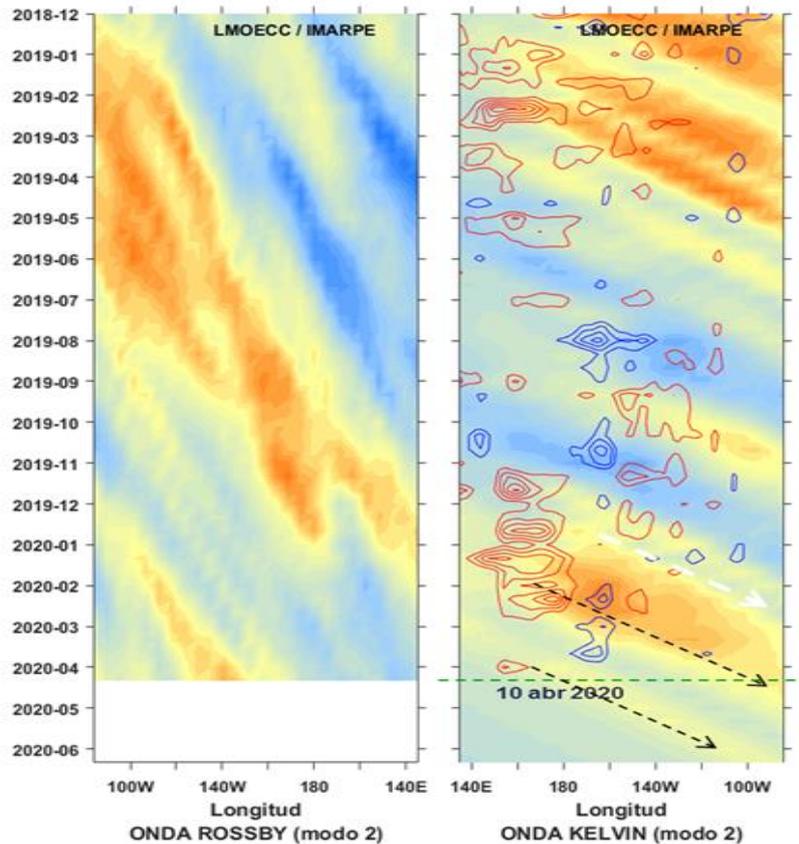


Figura 4. Diagrama Hovmöller longitud-tiempo de Ondas Rossby simuladas (3° - 5° S) y de Ondas Kelvin Ecuatoriales simuladas de modo baroclínico 2 (líneas punteadas), en el Pacífico Ecuatorial (0° N), anomalías positivas (contornos rojos) y negativas (contornos azules) del esfuerzo del viento zonal. La 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) alcanzó al extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental en febrero 2020. Por otro lado, en febrero 2020 una OKE cálida (modo 2) se generó debido a pulsos de vientos del oeste en el Pacífico Ecuatorial Occidental, sin embargo esta OKE cálida llegaría debilitada a Sudamérica en abril 2020 debido a las anomalías de vientos del este en el Pacífico Ecuatorial Central y Oriental durante marzo. Una OKE fría (modo 1) fue generada debido a la reflexión de una onda Rossby fría en el extremo del Pacífico Ecuatorial Occidental en febrero y llegará a Sudamérica en abril 2020 (Fig. 3). Otra OKE fría (modo 1) se habría generado también como una reflexión de otra onda Rossby fría en el extremo del Pacífico Ecuatorial Occidental en marzo y llegará a Sudamérica en mayo 2020. Por otro lado, una posible nueva OKE cálida (modo 2) podría generarse en el Pacífico Ecuatorial Occidental debido a las anomalías de vientos del oeste entre fines de marzo e inicios de abril. Según el análisis frente a las costas del Perú, la OKE fría se propagó a lo largo de la costa del litoral peruano como una OAC fría entre febrero y marzo 2020 (Fig. 2).

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
Variabes 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 2019) 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 valores dentro del rango de las condiciones neutras entre abril y julio 2020 (Tab. 2, Fig. 5). En este horizonte, el valor del ITCP simulado sería mínimo entre junio y julio 2020 (Tab. 2).

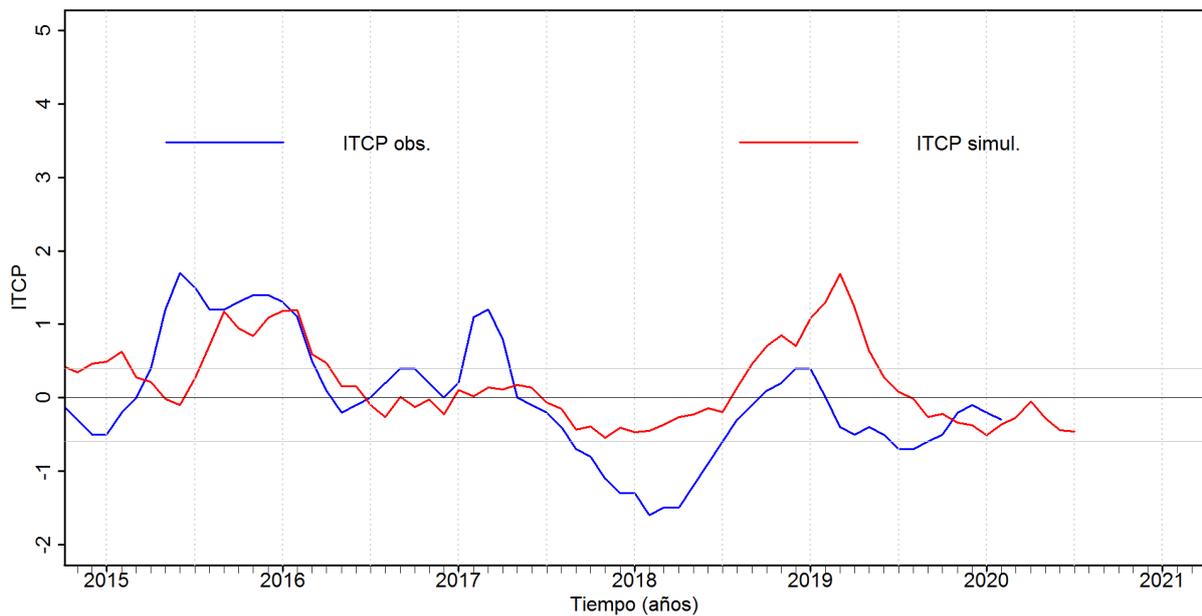


Figura 5. Pronóstico del ITCP mediante un modelo empírico, con datos actualizados hasta el mes de marzo del 2020.

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

Mes / Año	ITCP simulada	Condición mensual
abr-20	-0.05	Neutra
may-20	-0.28	Neutra
jun-20	-0.44	Neutra
jul-20	-0.44	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 valores dentro del rango de una condición neutra entre abril y julio 2020 (Tab. 3, Fig. 6). En este horizonte, el valor del ITCP simulado sería mínimo en julio 2020 (Tab. 3). Cabe señalar que los pronósticos están basados en la variación temporal de las condiciones del Pacífico Ecuatorial.

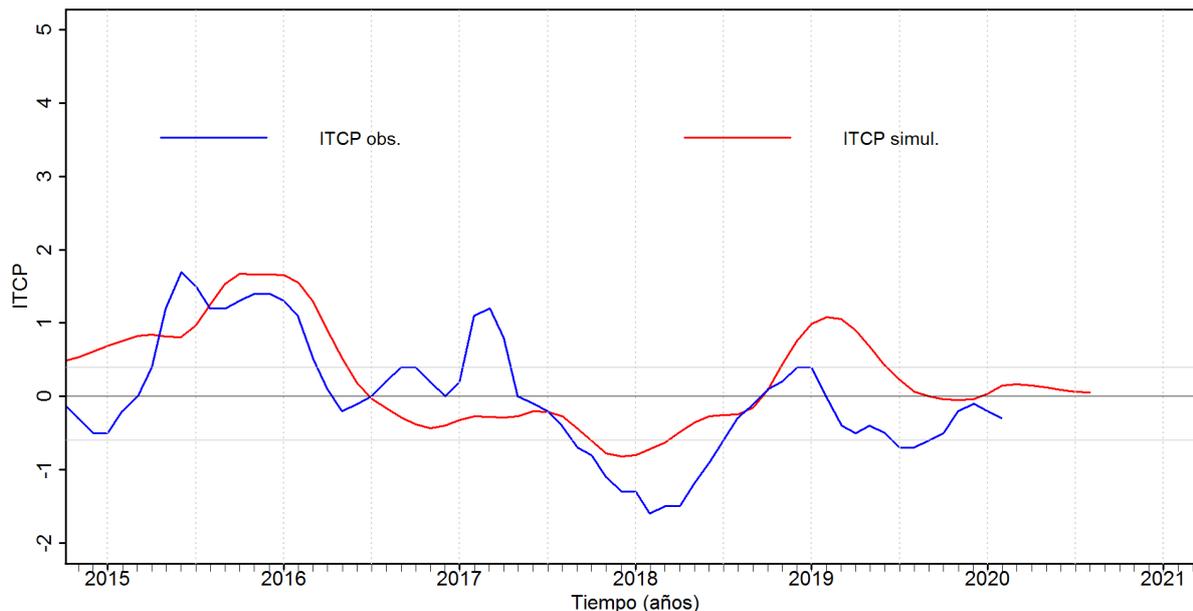


Figura 6. Pronóstico del ITCP mediante el modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia con datos actualizados hasta el mes de marzo del 2020.

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

Mes / Año	ITCP simulada	Condición mensual
abr-20	+0.15	Neutra
may-20	+0.12	Neutra
jun-20	+0.09	Neutra
jul-20	+0.06	Neutra

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 2018) 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 marzo 2020, indicó que las condiciones más probables en la región norte-centro serán neutras (con una probabilidad en promedio de 57%) frente a la costa peruana, mientras que en la región sur de la costa peruana serán neutras (con una probabilidad del 53.6% en promedio) para el trimestre Abril-Mayo-Junio (AMJ) 2020 (Fig. 7).

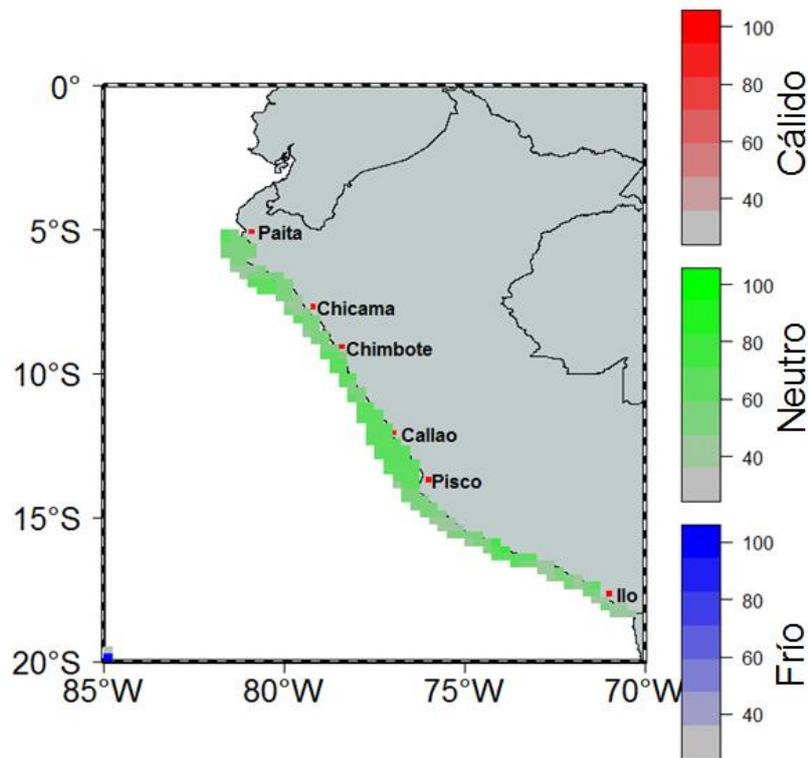


Figura 7. Pronóstico probabilístico espacial para el trimestre AMJ 2020 usando un modelo basado en tablas de contingencia.

5. Conclusiones

Respecto a los indicadores oceanográficos y atmosféricos del Pacífico Sudeste calculados con datos hasta marzo 2020, se observó que en promedio durante el trimestre EFM 2020, el Índice del Anticiclón del Pacífico Sur (IAPS) presentó una condición intensa y ubicado alrededor de su posición habitual, el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) presentó una condición neutra, el índice del Área de Afloramiento (IAA) presentó una condición baja, y el índice de clorofila superficial presentó una condición alta.

La simulación de la propagación de las Ondas Kelvin Ecuatoriales (OKE) indicó que en abril una OKE cálida (modo 2) llegará debilitada frente a las costas de Sudamérica. Así mismo, en abril una OKE fría (modo 1) llegará a Sudamérica. Otra OKE fría (modo 1) llegará a Sudamérica en mayo 2020. Cabe señalar, que otra OKE fría (modo 1) fue generada en febrero como resultado de una reflexión de una onda Rossby fría en el extremo del Pacífico Ecuatorial Occidental en febrero y llegará a Sudamérica en abril 2020. El análisis de Ondas Atrapadas a la Costa (OAC) identificó la propagación de una OAC cálida frente a la costa norte de Sudamérica en febrero 2020.

Los pronósticos del Índice Térmico Costero Peruano (ITCP) usando dos modelos: el modelo acoplado océano-atmósfera de complejidad intermedia, basado en forzantes del Pacífico Ecuatorial, pronostican valores del ITCP dentro en el rango de condiciones neutras entre abril y julio 2020; el modelo empírico, basado en el volumen de agua cálida ecuatorial y el anticiclón del Pacífico Sur pronostican valores negativos del ITCP, pero dentro del rango de las condiciones neutras entre abril y julio 2020; el modelo probabilístico espacial basado en tablas de contingencia (TC) pronostica que las condiciones más probables en la región

norte-centro frente a la costa peruana serán neutras (con una probabilidad de 57%) mientras que en la región sur de la costa peruana serán neutras (con una probabilidad del 53.6%) para el trimestre AMJ 2020.

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:

<http://enfen.gob.pe/download/comunicado-oficial-enfen-n-04-2020/?wpdmdl=1509&refresh=5e9a6b2d073161587178285>

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., 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