

Relación de la corriente de Cromwell e índices ENOS en el Pacífico Ecuatorial entre 1993 y 2017

Relationship of the Cromwell current and ENSO indices in the Equatorial Pacific between 1993 and 2017

Recibido: 2020-07-09 / Aceptado: 2020-10-06

Byron Terán Hurtado¹; Sonia Recalde Mosquera²; Jesús Gabriel Navarro Hernández³; Arturo Rozo Celemin⁴; José Córdova Aguilar⁵

CITAR COMO:

Terán, B.; Recalde, S.; Navarro, J.; Rozo, A.; Córdova, J. (2020). Relación de la corriente de Cromwell e índices Enos en el Pacífico Ecuatorial entre 1993 y 2017. Bol. Cient. CIOH, 39 (2): 51-64. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI 10.26640/22159045.2020.526

RESUMEN

La corriente de Cromwell fluye hacia el este a lo largo de la zona ecuatorial. En el Pacífico Central sus características son bien conocidas, no así en el Pacífico Oriental, en especial durante eventos ENOS (El Niño Oscilación del Sur), siendo esta la principal motivación para este estudio. Se utilizó información de la base de datos de multiobservaciones globales de Copernicus para el período de 1993 a 2017. La velocidad máxima de la corriente de Cromwell en los meridianos 170° O, 140° O, 110° O y 86° O sirvió para determinar cambios en su evolución durante eventos ENOS. A través de correlaciones con el Índice Niño Oceánico (ONI, por sus siglas en inglés) e Índice Costero El Niño (ICEN) se observó que no se presentaron correlaciones altas con Cromwell durante eventos ENOS extremos. Se identificó un patrón de pulsos ascendentes en la intensidad de la corriente previa a los ENOS extremos de 1997-1998 y 2015-2016; y durante la fase pico de los eventos, un descenso considerable de las anomalías de la corriente de Cromwell.

PALABRAS CLAVES: Cromwell, subcorriente, correlaciones, ENOS, índices, ONI, ICEN.

ABSTRACT

The Cromwell Current flows eastward along the equator, and its characteristics are well understood in the Central Pacific. On the other hand, in the Eastern Pacific, especially during an ENSO (El Niño Southern Oscillation) event, further research is necessary, being the primary motivation for this study. The information provided by the Copernicus database was analyzed during the period between 1993 to 2017. The maximum speed of the current for each of the meridians 170 ° W, 140 ° W, 110 ° W and 86 ° W served to determine changes in its evolution during ENSO events. We observed that there were no optimal correlations with the Cromwell Current through cross-correlation with the Oceanic Niño Index (ONI) and the El Niño-ICEN Coastal Index. However, we found a pattern of ascending pulses before extreme ENSOs from 1997-1998 and 2015-2016. A considerable decrease in the anomalies of the Cromwell Current was observed during the maximum peaks.

KEYWORDS: Cromwell, undercurrent, correlations, ENSO, indices, ONI, ICEN.

¹ Instituto Oceanográfico de la Armada de Ecuador. Correo electrónico: Bteran@armada.mil.ec

² Instituto Oceanográfico de la Armada de Ecuador. Correo electrónico: Sonia.recalde@inocar.mil.ec

³ Universidad del Magdalena, Grupo de Investigación en Suelo, Ambiente y Sociedad (Gisas). Correo electrónico: jesusnavarrogh@unimagdalena.edu.co

⁴ Universidad del Magdalena, Grupo de Investigación en Suelo, Ambiente y Sociedad (Gisas). Correo electrónico: arturorozoc@unimagdalena.edu.co

⁵ Texas A&M University, College Station. Correo electrónico: jgca182@tamu.edu

INTRODUCCIÓN

La corriente de Cromwell, conocida también como Subcorriente Ecuatorial (o EUC, Equatorial Undercurrent), fue descubierta en el año 1952 por Townsend Cromwell, un investigador que lideró una partida de investigación para observar cómo las corrientes del océano variaban en función de la profundidad; descubriendo la deriva en la región ecuatorial del océano Pacífico con una corriente que fluía rápidamente hacia el este en las capas subsuperficiales (Fig. 1), contraria a la corriente Ecuatorial Sur del Pacífico que fluye hacia el oeste en la superficie (Wyrтки y Kilonsky, 1984; Goodman *et al.*, 2005). Knauss y Pepin (1959); Pickard y Emery (1990) señalan que el origen de la corriente de Cromwell se ubica en el Pacífico Sureste, muy cerca de Australia, con un núcleo profundo a más de 200 m y velocidad promedio del núcleo de 0.34 ms^{-1} , velocidad que

se incrementa en su trayecto hacia Sudamérica, haciéndose más superficial cerca de las Islas Galápagos, llegando su núcleo a una profundidad de 80 m y una velocidad promedio de 0.95 ms^{-1} .

Cochrane y Zuta (1967) mencionan que al este de las Islas Galápagos la corriente de Cromwell se bifurca, mientras que Montgomery *et al.* (1962) concluye que usualmente se debilita o es inexistente. Houvenaghel (1978) examinó parámetros físicos, químicos y biológicos para determinar los patrones de afloramiento en las Islas Galápagos, constatando que los afloramientos locales se deben a la geomorfología submarina del Archipiélago y a la divergencia producida por los vientos. La corriente de Cromwell en su traslado de oeste a este se desvía hacia el norte y sur al encontrarse con las Islas Galápagos, pero también se acumula y aflora a sotavento de los vientos Alisios.

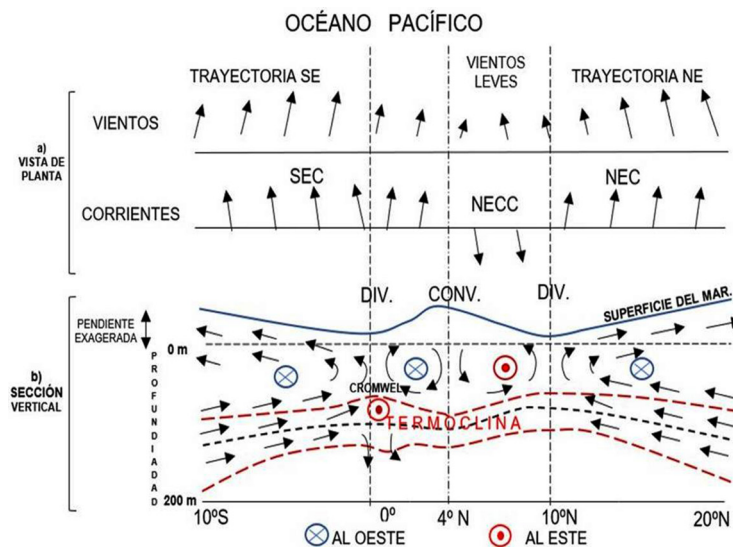


Figura 1. Diagrama esquemático de la sección norte-sur en la Línea Ecuador (latitud 0°) en el océano Pacífico. (a) Vista de planta las direcciones predominantes de vientos y de la corriente Ecuatorial Sur (SEC), corriente Ecuatorial Norte (NEC) y la contracorriente Ecuatorial Norte (NECC). (b) Sección vertical norte-sur, donde se identifica la corriente de Cromwell (EUC), que va en sentido hacia el este. [Modificado de: Pickard y Emery, 1990].

En el Pacífico Central las características de la EUC son bien conocidas. Knauss y Pepin (1959) y Montgomery *et al.* (1962) reportan un núcleo de 200 m de espesor y 400 km de ancho, con una velocidad pico de 1.25 ms^{-1} a una profundidad entre 75 y 100 m, con un transporte de alrededor de 30 Sv. Wyrтки y Kilonsky (1984) proporcionaron también una descripción de la circulación ecuatorial en el Pacífico Central (150° O a 153° O). Las características incluyeron:

- (i) una corriente subsuperficial ecuatorial (EUC o Cromwell) que fluye hacia el este, que se extiende desde 2° S a 2° N , entre 50 m a 275 m de profundidad, con un transporte de 23 Sv, y
- (ii) una velocidad máxima de aproximadamente 1 ms^{-1} que ocurre en la línea ecuatorial a 125 m de profundidad.

La EUC perturba el sistema marino subsuperficial del Pacífico Central y Oriental

alterando en gran medida el patrón de recursos pesqueros, influyendo en su distribución y abundancia (Bistrain, 2008; Rosales, 2017; Rueda *et al.*, 2014). Icochea (2015) y Rosales (2017) mencionan la disminución que tiene Cromwell durante un evento El Niño y la influencia que se presenta en las pesquerías, pero se limita su análisis a la latitud 0°.

Trabajos realizados en el Pacífico Central (170° O) muestran una estructura del sistema de corrientes ecuatoriales compuesta por corrientes superficiales y subsuperficiales por debajo de la termoclina (Pickard y Emery 1990). A nivel subsuperficial, en el Pacífico Ecuatorial Central se reconocen tres corrientes con características termohalinas diferentes y que en el trayecto hacia el este en algún momento se unen y son más difícil de diferenciar (Delcroix, Eldin, y Hénin, 1987). La Figura 2 muestra el resultado modelado de la corriente de Cromwell en el 150° O, correspondiente al promedio de 25 años de la base de datos de multiobservaciones globales de Copernicus, visualizando las contracorrientes subsuperficiales norte y sur que tienen similar dirección (Terán, 2020).

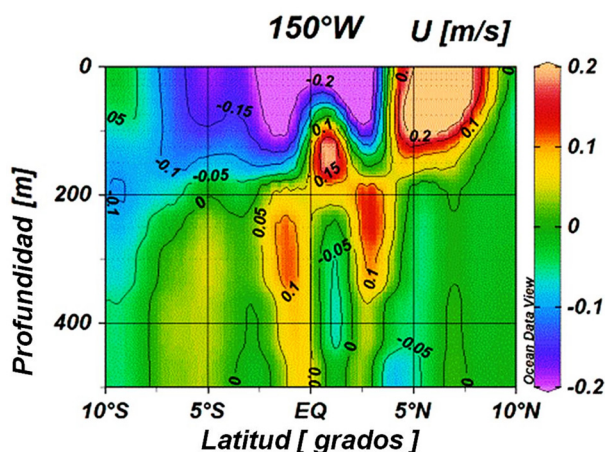


Figura 2. Promedio de 25 años de la corriente zonal en el meridiano 150° O, obtenido de la base de datos Copernicus, los valores positivos (amarillo y rojo) representan corriente hacia el este y los negativos (azules y morados) hacia el oeste.

La corriente de Cromwell no es ajena a eventos de variabilidad climática, tal es el caso que su velocidad es una de las variables que puede ser afectada por el comportamiento del ENOS en el Pacífico (Icochea y Rojas, 2001). Firing, Lukas y Wyrтки (1983) indican que durante el ENOS 1982-1983 se encontró que la velocidad de la corriente se hizo más débil en el Pacífico Central, pasando

a tan solo 0.7 ms^{-1} , cuando su comportamiento normal es de 1.5 ms^{-1} (Icochea 2015; Lucero y Cornejo 1990). Diversos investigadores han analizado secciones de velocidad de la corriente para explicar los cambios bruscos de temperatura y salinidad, tanto en el paralelo 0° entre los 2° N y 2° S, como frente a Sudamérica, en especial en la costa norte del Perú (Cromwell, Montgomery y Stroup, 1954; Knauss y Pepin, 1959; Lukas, 1986; Khanaichenko, NOAA, A. D. (ed) y Dobrovolskii, 1980; Icochea, Chipollini, Niquen y CPPS, 1989).

Para determinar un evento ENOS se han desarrollado índices que pueden ser univariados o multivariados, así como regional o local. Estos consisten en una escala numérica en la que se incluyen factores individuales necesarios para describir un fenómeno y trazar su comportamiento en el tiempo (NOAA, 2019). El ONI y el ICEN se basan en las anomalías de TSM promediadas en las regiones 3.4 y 1+2, respectivamente. El ONI es el índice más utilizado para definir los eventos de El Niño y La Niña en el Pacífico Ecuatorial Central (Trenberth, 2016). Para definir un evento ENOS en el Pacífico Ecuatorial Oriental se utiliza el ICEN (Takahashi, Mosquera y Reupo, 2014).

Debido a que la investigación reciente sobre la EUC es limitada, se consideró el análisis de la velocidad zonal de las corrientes existentes durante el período entre 1993 a 2017, obtenidos de la base datos abierta de Copernicus (ftp://my.cmems-du.eu/Core/MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002), para determinar su variabilidad interanual y espacial. Finalmente, se compararon los datos obtenidos con el ONI e ICEN, y las anomalías de la corriente de Cromwell, a fin de conocer su comportamiento durante ENOS extremos de 1997-1998 y 2015-2016.

En este trabajo se determina una relación de esta corriente con los índices ONI e ICEN. Se detalla la metodología para la obtención de datos, sus análisis, resultados y discusión para finalmente describir las conclusiones.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está comprendida entre la longitud 180° O hasta el borde costero de Sudamérica, y en latitud de 2° N a 2° S hasta 300 m de profundidad, donde tienen injerencia las corrientes marinas relacionadas con Cromwell (Fig. 3).

En la zona ecuatorial, las porciones orientales de los océanos Pacífico y Atlántico tienen temperaturas superficiales de hasta 10° C más frías que la parte occidental, particularmente en los meses de verano (Stewart, 2008). Los vientos predominantes del este sobre la mayoría

de los océanos tropicales del Pacífico y Atlántico señalan corrientes superficiales que en mayor número fluyen hacia el oeste; sin embargo, las corrientes subsuperficiales hacia el este superan a las que fluyen hacia el oeste (Pickard y Emery 1990).

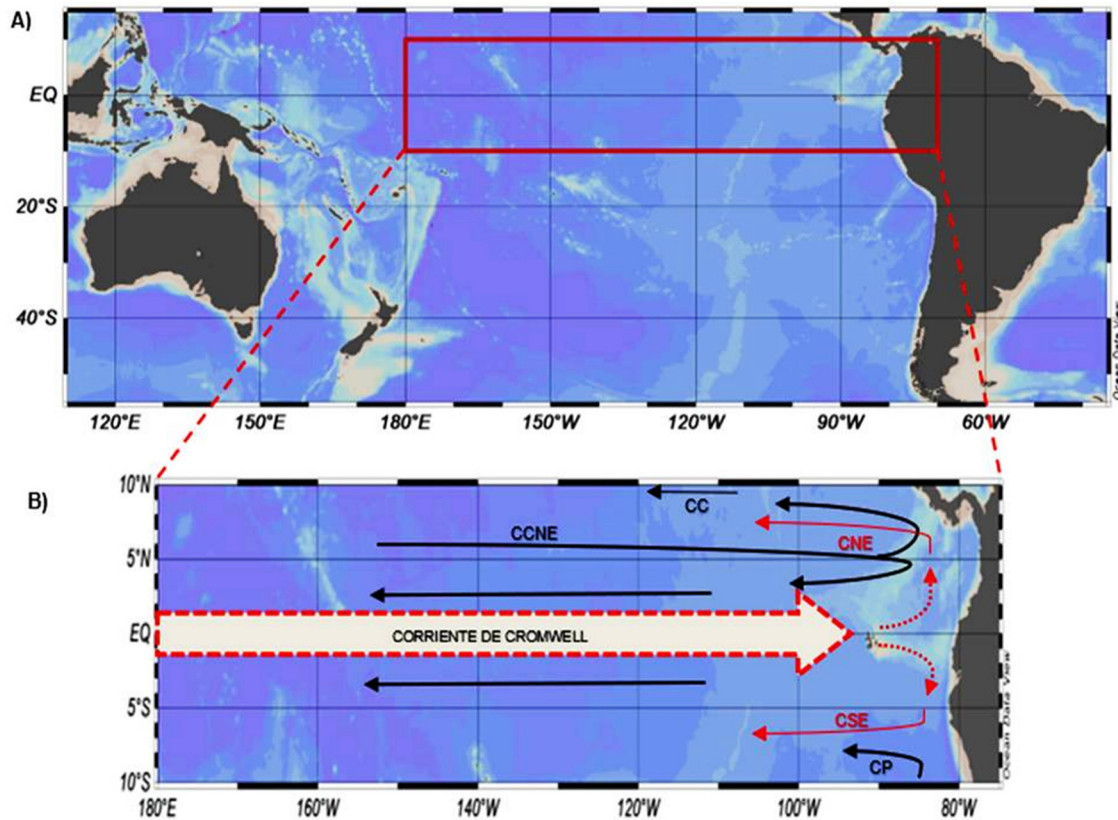


Figura 3. A) Ubicación del área de estudio en el Pacífico Ecuatorial, que se encuentra marcada con recuadro rojo. B) Área de estudio a considerar de acuerdo con la influencia de la corriente de Cromwell, con las demás corrientes involucradas como corriente de California (CC), corriente Ecuatorial Norte (CNE), corriente Ecuatorial Sur (CSE), contracorriente Ecuatorial Norte (CCNE), corriente de Humboldt o del Perú (CP).

Las líneas sólidas son superficiales y las líneas punteadas son subsuperficiales.

METODOLOGÍA

Esta investigación se desarrolló con la base de datos *MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002*⁶, facilitada por Copernicus Marine Service. La base de datos está conformada por el conjunto de datos reprocesados Global ARMOR3D L4 que consta de temperatura, salinidad, alturas y corrientes geostroficas, disponible en una cuadrícula regular de 0.25° y en 33 niveles de profundidad, y por el conjunto de datos reprocesado Global SSS /

SSD L4, que consiste en datos de salinidad de la superficie marina (SSS) y datos relacionados de densidad de superficie marina (SSD) L4, disponibles en una cuadrícula regular de 0.25°. Estos modelos a su vez utilizan datos de la red de monitoreo *in situ* con boyas oceánicas Argo⁷.

Se utilizaron los máximos valores de los promedios mensuales de la componente zonal de la corriente geostrofica, en el periodo entre 1993 al 2017 para la capa superficial de 300 m en cada

⁶ Obtenido de la web ftp://my.cmems-du.eu/Core/MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002/.

⁷ Es un sistema de observación de los océanos de la Tierra que proporciona datos en tiempo real para su uso en el clima, investigación oceanográfica y pesca.

sección entre 2ª N y 2ª S sobre los meridianos 170° O, 140° O, 110° O y 86° O. Estos meridianos fueron considerando los estudios publicados por Khanaichenko et al. (1980) y Wyrski (1967).

La serie de tiempo de los datos ONI se obtuvo del sitio web oficial de la NOAA⁸, y corresponden al periodo comprendido desde 1950 a 2020; y la serie del ICEN se obtuvo del sitio web del Instituto Geofísico del Perú⁹, cuyos datos va desde febrero de 1950 hasta julio 2020.

La validez estadística de los datos de los índices ONI e ICEN y la corriente de Cromwell se determinó mediante el coeficiente de correlación de Spearman, que es un coeficiente no paramétrico alternativo. La significancia del coeficiente se determina con una prueba de hipótesis. Para aceptar o rechazar H_0 se tuvo en cuenta el p_{valor} considerando la siguiente escala: muy alta significancia ($p_{\text{valor}} < 0.001$), alta significancia ($0.001 < p_{\text{valor}} < 0.01$) y significativa ($0.01 < p_{\text{valor}} < 0.05$). Este p_{valor} depende del valor del estadístico calculado con la información muestral evaluada a través de una aproximación a la distribución t-student (Restrepo y González, 2007). Por su parte, la correlación cruzada permitió encontrar la relación temporal (respuesta temporal) entre la velocidad de la corriente de Cromwell y los índices ONI e ICEN, teniendo en cuenta rezagos positivos y negativos.

Para la determinación de la correlación entre las series de las máximas corrientes zonales y los índices de estudio se aplicó a la corriente el mismo tratamiento de los índices ONI e ICEN. Se relacionaron todas las secciones meridionales de estudio con ONI e ICEN para definir en qué sección la corriente se encuentra mejor identificada y definida con los eventos ENOS extremos principalmente. Para la correlación cruzada se utilizaron como forzantes estadísticos los índices oceánicos y como respuesta la corriente de Cromwell.

El análisis Wavelet permitió descomponer las series de datos en el dominio de tiempo-frecuencia, para determinar los modos dominantes de variabilidad y cómo estos variaron en el tiempo. Para el análisis de la covarianza de los índices ONI e ICEN y la corriente de Cromwell se siguió el espectro Crosswavelet de Torrence

y Compo (1998). Por su parte, el ángulo de fase describió la relación entre los índices y la corriente de Cromwell.

Se calculó la coherencia Wavelet como una medida de la intensidad de la covarianza de las series analizadas en el dominio tiempo-frecuencia (Torrence y Webster 1999). Además, se utilizó el método de Montecarlo con ruido rojo para determinar el nivel de significancia estadística del 5 % de la coherencia, y para proporcionar la fase media y su error estándar al nivel de confianza del 95 % (cono de influencia); adicionalmente, se utilizaron los métodos de regresión y correlación de ejecución (Jevrejeva, Moore y Grinsted et al., 2003).

En el Wavelet cruzado de coherencia y fase se identificaron vectores que indican posibles desfases en el tiempo entre las series analizadas de índices oceánicos ONI e ICEN con la anomalía de la corriente máxima de Cromwell, donde una flecha horizontal con dirección a la derecha indicará que las señales se encuentran en fase, y a la izquierda en antifase; para el resto de los casos indican relaciones desfasadas en el tiempo.

RESULTADOS

Sección meridional 170° O

En la sección 170° O se presentan pulsos de alta intensidad de la corriente de Cromwell previos a los Niños extremos de 1997-1998 y 2015-2016 (Fig. 4A), siendo una situación contraria durante los picos máximos de ONI en este mismo período, ya que en ese momento la corriente se invierte con un descenso abrupto. También se observó una tendencia decreciente de Cromwell en el período de estudio, mientras el ONI se mantiene constante. Durante el periodo de 1997 al 2007 se presentaron los picos más altos en la intensidad de la corriente, mientras que disminuye entre 2008 y 2013, antes del inicio del otro evento Niño extremo de esta serie de tiempo.

Para el ICEN se presentan pulsos de alta intensidad de Cromwell previos a los Niños extremos de 1997-1998 y 2015-2016 (Figura 4B), siendo una situación contraria durante los picos máximos de El Niño en este mismo período, ya que en ese momento la corriente disminuye.

⁸ Tomado de: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/oni.ascii.txt>

⁹ Tomado de: <http://www.met.igp.gob.pe/datos/icen.txt>

En los demás períodos no se mostró una relación de la misma naturaleza entre la intensidad de la corriente de Cromwell y eventos ENOS. También se observó una tendencia decreciente de Cromwell en el período de estudio, mientras el ICEN desciende mínimamente.

Las correlaciones cruzadas entre los índices oceánicos (ONI-ICEN) y la velocidad de la corriente de Cromwell en la sección 170° O, donde se utilizaron como forzantes estadísticos los índices oceánicos y como respuesta a la corriente, mostrando que las máximas correlaciones para los índices ONI e ICEN se

dieron con un nivel de significancia del 90 % y coeficientes de correlación (r) de 0.267 y 0.290, respectivamente. Es decir, que un mes antes de la manifestación de un ENOS representativo la corriente zonal de Cromwell llegó a esta sección meridional; en este sentido el ONI es una respuesta a las condiciones de la corriente del mes anterior. De la misma manera, dos meses antes de presentarse un máximo en el ICEN la corriente zonal de Cromwell reporta un máximo en su intensidad; en este sentido el ICEN es una respuesta a las condiciones de la corriente dos meses antes.

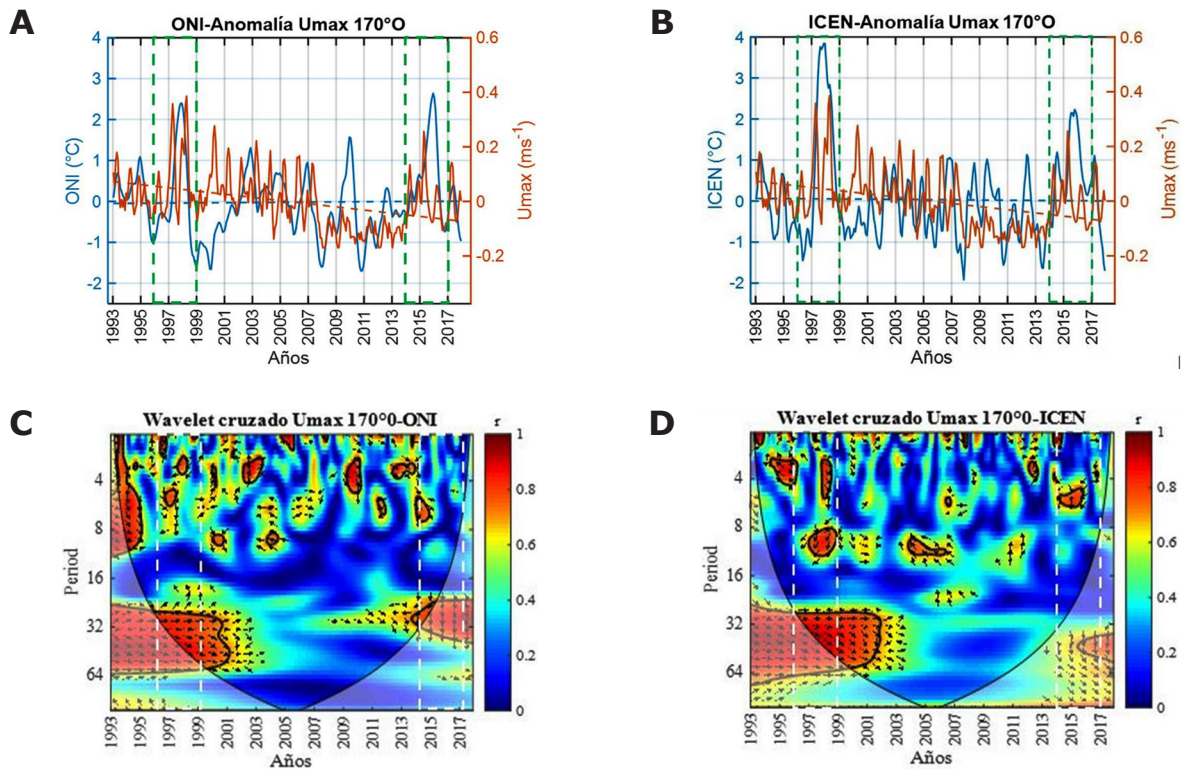


Figura 4. En el panel superior se muestran las series temporales de los índices ONI (línea azul – A) e ICEN (línea azul – B) con referencia a los pulsos de las anomalías de velocidad de la corriente de Cromwell (línea naranja) que corresponden al período de 1993 al 2017 en la sección meridional 170° O; los eventos ENOS extremos entre 1996 a 1998 y 2014 a 2016 se encuentran marcados en recuadro verde. Las líneas rectas representan las tendencias de los datos correspondientes. En el panel inferior se presentan los Wavelets cruzados de coherencia y fase entre la corriente zonal de Cromwell en la sección meridional 170° O y los índices ONI (C) e ICEN (D) para el período comprendido desde 1993 hasta 2017, donde los recuadros blancos indican los eventos ENOS extremos, la escala de colores representa el nivel de correlación y las flechas indican la fase entre las variables.

El análisis de Wavelets cruzados evidenció la alta correlación de la corriente de Cromwell y ONI (Fig. 4C) para el período de 32 meses, que es cuando se encuentran en fase, siendo la más significativa de la serie de tiempo referente al ENOS extremo de 1997-1998. En el evento

ENOS 2014-2016 existió una alta correlación entre periodos de 5 y 7 meses, a pesar de no encontrarse en fase. La Figura 4D evidencia la alta correlación de la corriente de Cromwell y el ICEN para el período entre 26 a 32 meses, que es cuando se encuentran en fase, siendo

la más significativa de la serie de tiempo, que corresponde al ENOS extremo de 1997-1998. En el evento ENOS 2014-2016 existió una correlación significativa entre periodos de 5 y 6 meses, pese a no encontrarse en fase.

Sección meridional 140° O

Con relación a los índices ONI (Fig. 5A) e ICEN (Fig. 5B) se presentan pulsos de mayor

intensidad de Cromwell previo a El Niño extremo de 1997-1998, mientras que El Niño 2015-2016 no fue acompañado por altas velocidades de esta corriente, aunque sí presenta pulsos. De la misma manera en ambos índices, durante la presencia de los picos máximos de El Niños extremo se presentó una disminución pronunciada de Cromwell. Únicamente en esta sección en los dos índices se observó una tendencia creciente de la corriente de Cromwell.

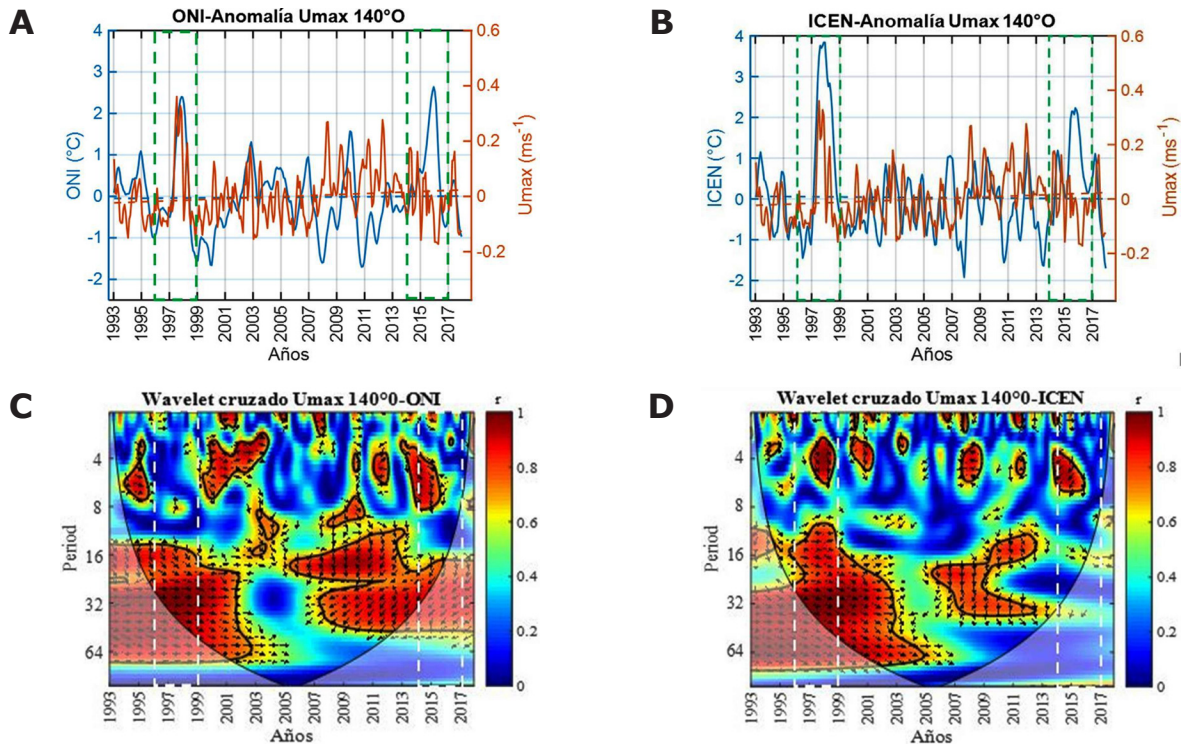


Figura 5. En el panel superior se muestran las series temporales de los índices ONI (línea azul – A) e ICEN (línea azul – B) con referencia a los pulsos de las anomalías de velocidad de la corriente de Cromwell (línea naranja) que corresponden al período de 1993 al 2017 en la sección meridional 140° O; los eventos ENOS extremos entre 1996 a 1998 y 2014 a 2016 se encuentran marcados en recuadro verde. Las líneas rectas representan las tendencias de los datos correspondientes. En el panel inferior se presentan los Wavelets cruzados de coherencia y fase entre la corriente zonal de Cromwell en la sección meridional 140° O y los índices ONI (C) e ICEN (D) para el período comprendido desde 1993 hasta 2017, donde los recuadros blancos indican los eventos ENOS extremos, la escala de colores representa el nivel de correlación y las flechas indican la fase entre las variables.

La correlación cruzada entre el ONI y la corriente de Cromwell en la sección 140° O (Fig. 5A) mostró que la máxima correlación (r) se dio para un valor de -4 de rezago, con coeficiente de correlación de 0.261; sin embargo, no se encontró una relación significativa en esta sección que permitiera analizar la relación del ONI y la corriente de Cromwell. Para el caso de la relación de Cromwell con el ICEN en esta

misma sección, en la Figura 5B se visualizó que la máxima correlación con nivel de significancia del 95 % existe a -2 rezagos con coeficiente de correlación (r) de 0.394; es decir, dos meses antes de presentarse un máximo en el ICEN la corriente zonal de Cromwell reportó un máximo en su intensidad; en este sentido el ICEN es una respuesta a las condiciones de la corriente dos meses antes.

Para la sección 140° O se observó la alta correlación de la corriente de Cromwell y el índice ONI entre 24 y 34 meses (Fig. 5C), que corresponde al ENOS extremo de 1997-1998; en el evento ENOS 2015-2016 existió una correlación significativa entre periodos de 4 y 8 meses, a pesar de no encontrarse en fase, de igual manera entre 18 y 26 meses. Así mismo, en la Figura 5D se observó la alta correlación de la corriente de Cromwell y el ICEN entre 10 y 32 meses, siendo la más significativa de la serie de tiempo que corresponde al ENOS extremo de 1997-1998 y que se encuentran en fase; en periodos entre 3 y 5 meses se mostró una alta correlación, sin embargo, las variables no están en fase; únicamente para el evento ENOS 2014-

2016 se evidenció una correlación significativa entre periodos de 3 y 5 meses, pero no están en fase.

Sección meridional 110° O

Para el ONI (Fig. 6A) e ICEN (Fig. 6B) se observa un pulso de alta intensidad de la corriente de Cromwell previo a El Niño extremo de 1997-1998 y un pico previo de menor intensidad en el evento 2015-2016, con posterior descenso brusco. En ambos Niños extremos se observó durante sus máximos una inversión de intensidad de la corriente de Cromwell, llegando a debilitarse. En el año 2006 se observó el pulso más fuerte de la corriente en toda la serie de tiempo. Se observó también una tendencia decreciente de Cromwell más marcada.

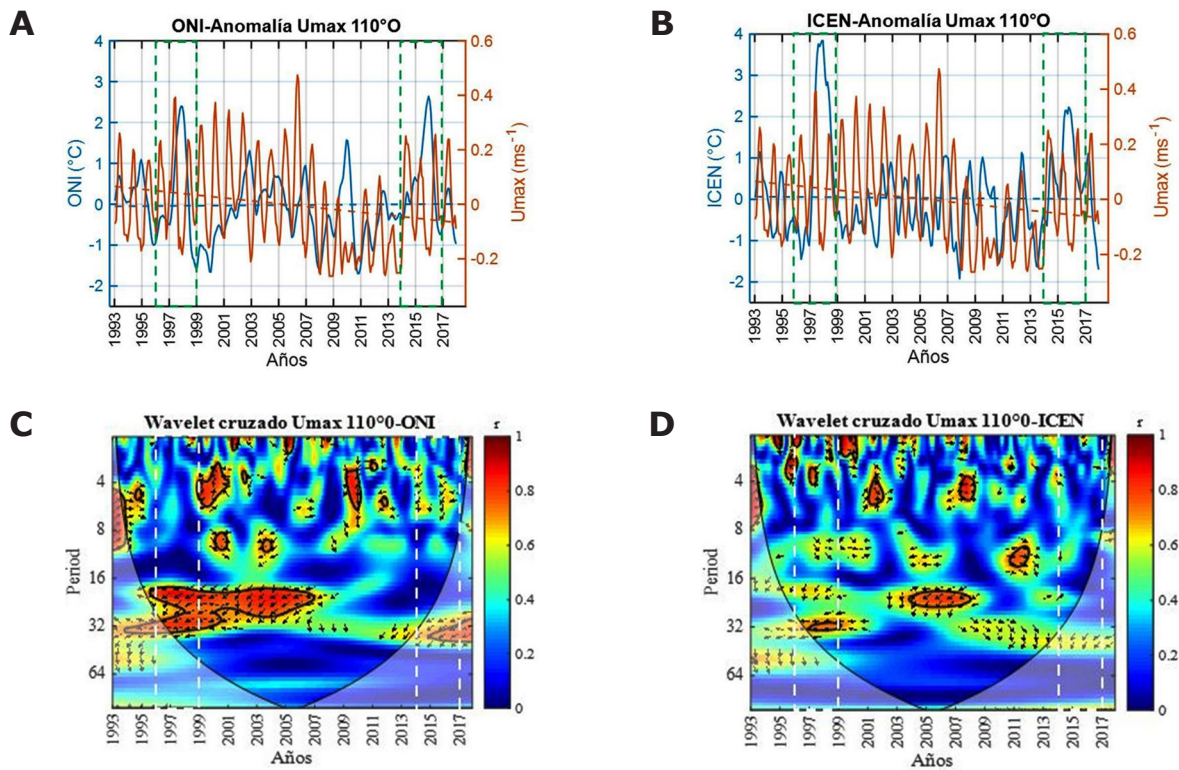


Figura 6. En el panel superior se muestran las series temporales de los índices ONI (línea azul - A) e ICEN (línea azul - B) con referencia a los pulsos de las anomalías de velocidad de la corriente de Cromwell (línea naranja) que corresponden al período de 1993 al 2017 en la sección meridional 86° O; los eventos ENOS extremos entre 1996 a 1998 y 2014 a 2016 se encuentran marcados en recuadro verde. Las líneas rectas representan las tendencias de los datos correspondientes. En el panel inferior se presentan los Wavelets cruzados de coherencia y fase entre la corriente zonal de Cromwell en la sección meridional 086° O y los índices ONI (C) e ICEN (D) para el período comprendido desde 1993 hasta 2017, donde los recuadros blancos indican los eventos ENOS extremos, la escala de colores representa el nivel de correlación y las flechas indican la fase entre las variables.

La correlación cruzada entre el ONI y la corriente de Cromwell en la sección 110° O muestra que la máxima correlación se dio para un rezago de -11, con coeficiente de correlación (r) de 0.149; sin embargo, no se encontró una relación temporal significativa en la sección 110° W que permitiera analizar la relación del ONI y la anomalía de la corriente de Cromwell. Para el caso con el ICEN, se observó que la máxima correlación se dio a los 100 rezagos con coeficiente de correlación (r) de 0.182.

El análisis de Wavelets cruzados muestra una alta correlación de la corriente de Cromwell y el ONI en 32 meses (Fig. 6C), pero en antifase, que corresponde al ENOS extremo de 1997-1998; en el evento ENOS 2014-2016 no se observaron correlaciones significativas. De igual manera, en la Figura 6D se evidencia la alta correlación de la corriente de Cromwell y el ICEN en 4 meses, que corresponde al ENOS extremo de 1997-

1998, donde no hubo fase; en periodos entre 28 y 32 meses se mostró una alta correlación, sin embargo, las variables están en antifase; en el evento ENOS 2014-2016 no se observaron correlaciones significativas.

Sección meridional 86° O

En la sección 86° O para el ONI (Fig. 7A) e ICEN (Fig. 7B) se observa el pulso de mayor intensidad de la corriente de Cromwell previo a El Niño extremo de 1997-1998 y un pico previo menor en el 2015-2016, seguido por un descenso de la corriente; es decir, los momentos en que ocurrieron los valores de los índices máximos se produjo un debilitamiento considerable de la corriente. Se observó también una tendencia decreciente de Cromwell en el período de estudio, mientras los valores de los índices se mantienen constantes.

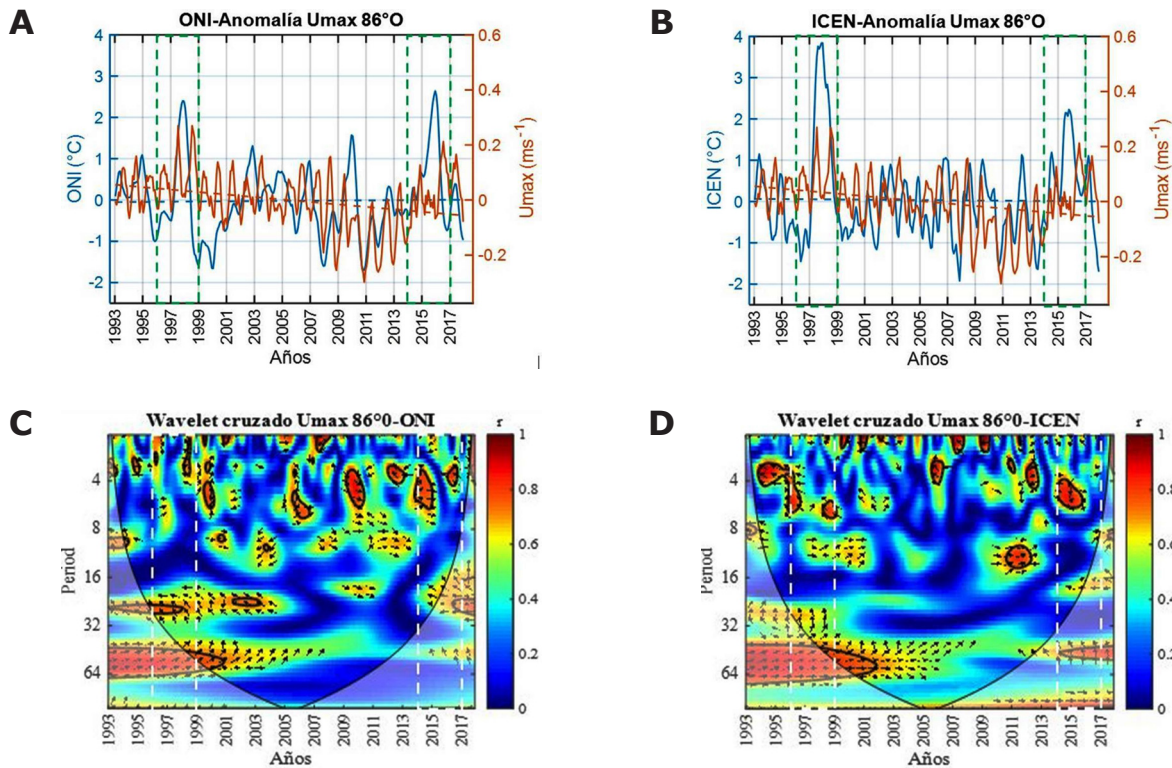


Figura 7. En el panel superior se muestran las series temporales de los índices ONI (línea azul – A) e ICEN (línea azul – B) con referencia a los pulsos de las anomalías de velocidad de la corriente de Cromwell (línea naranja) que corresponden al período de 1993 al 2017 en la sección meridional 86° O; los eventos ENOS extremos entre 1996 a 1998 y 2014 a 2016 se encuentran marcados en recuadro verde. Las líneas rectas representan las tendencias de los datos correspondientes. En el panel inferior se presentan los Wavelets cruzados de coherencia y fase entre la corriente zonal de Cromwell en la sección meridional 086° O y los índices ONI (C) e ICEN (D) para el período comprendido desde 1993 hasta 2017, donde los recuadros blancos indican los eventos ENOS extremos, la escala de colores representa el nivel de correlación y las flechas indican la fase entre las variables.

Para la correlación cruzada entre el ONI y la corriente de Cromwell en la sección 86° O mostró que la máxima correlación con nivel de significancia del 95 % existe a 11 rezagos con coeficiente de correlación (r) de 0.299; es decir, que 11 meses después de la manifestación del ENOS la corriente zonal de Cromwell alcanza un máximo. De la misma forma, para el caso del ICEN y la corriente de Cromwell se observó que la máxima correlación con nivel de significancia del 95 % existe a 11 rezagos con coeficiente de correlación(r) de 0.280; es decir, 11 meses después de presentarse un máximo en el ONI la corriente zonal de Cromwell reporta un máximo en su intensidad.

La Figura 7C muestra el Wavelet cruzado con una alta correlación de la corriente de Cromwell y el ONI en 24 meses, que corresponde al ENOS extremo de 1997-1998; sin embargo, estas

no se encuentran en fase; en el evento ENOS 2015-2016 existió una correlación significativa entre periodos de 4 y 6 meses encontrándose en fase. En el caso de la Figura 7D se evidenció la alta correlación de la corriente de Cromwell y el ICEN entre 3 y 6 meses, que corresponde al ENOS extremo de 1997-1998, encontrándose en fase a 4 meses; así mismo, se observó una fase de correlación de 0.6 entre 9 y 11 meses; en el evento ENOS 2015-2016 existió una correlación significativa entre periodos de 3 y 5 meses, pero no están en fase.

En resumen, en la Tabla 1 se observa los datos de las correlaciones referidas a las secciones meridionales donde se presentan tres escenarios. El primero corresponde a toda la serie de tiempo y los dos siguientes a los eventos ENOS extraordinarios registrados en los períodos analizados.

Tabla 1. Correlación de índices oceánicos con las anomalías de velocidades máximas de la corriente de Cromwell en las secciones meridionales de estudio. En amarillo los valores más elevados de correlación.

| Periodo | Índices | 170° O | | 140° O | | 110° O | | 86° O | |
|-----------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | | r | p_valor | r | p_valor | r | p_valor | r | p_valor |
| 1993-2017 | ONI | 0.267 | 0.000 | 0.261 | 0.091 | 0.149 | 0.997 | 0.299 | 0.001 |
| | ICEN | 0.290 | 0.000 | 0.394 | 0.000 | 0.182 | 0.731 | 0.280 | 0.000 |
| 1996-1998 | ONI | 0.374 | 0.025 | 0.773 | 0.000 | -0.159 | 0.355 | -0.038 | 0.827 |
| | ICEN | 0.416 | 0.012 | 0.770 | 0.000 | -0.070 | 0.685 | 0.258 | 0.129 |
| 2014-2016 | ONI | 0.144 | 0.403 | -0.284 | 0.098 | -0.440 | 0.007 | -0.347 | 0.038 |
| | ICEN | -0.057 | 0.740 | -0.252 | 0.138 | -0.288 | 0.088 | -0.141 | 0.413 |

DISCUSIÓN

Como se observa, los datos examinados en el presente estudio mostraron que no hay una relación unívoca entre la corriente de Cromwell y los eventos El Niño, ya que en 170° O fue evidente que los Niños extremos correspondieron a importantes intensidades de la corriente; mientras que en el 140° O el comportamiento fue similar al de El ENOS 1997-1998, pero no fue así en el ENOS 2015-2016, debido a que este último se debilitó en su tránsito hacia

Sudamérica (Garreaud, 2018; Paek, Jin-Yi, Fey y Mong.Ming, 2019). Más cerca de Galápagos, en 110° O se observó que el máximo valor del índice correspondió con la disminución de la corriente; se mostró una tendencia decreciente en general debido a la presencia nula o débil de la vorriente de Cromwell previo a El Niño 2015-2016. Pasando en tránsito por Galápagos, en la sección meridional 86° O se observó de la misma manera una disminución abrupta de la corriente de Cromwell, que coincide con los picos máximos de los índices ONI (Seidel y Giese, 1999).

La diferencia de la corriente en la sección 86° O comparada con las otras secciones obedecería a la pérdida de profundidad y a la bifurcación al pasar por Galápagos, así como también entrar en contacto con corrientes que le hacen cambiar su comportamiento como la corriente de Humboldt o Perú-Chile (Collins, Mascarenhas y Martínez, 2013; Lukas 1986). La intensidad de corriente de Humboldt puede afectar el patrón de profundización de la corriente de Cromwell, como lo menciona Icochea et al. (1989) al describir el comportamiento de la corriente de Cromwell.

Es importante considerar también la divergencia ecuatorial a lo largo de todo el Pacífico Oriental. Una investigación sobre los campos de velocidad tridimensional en un modelo de circulación general del océano (GCM), dirigido por Blanke y Raynaud (1997) para definir el balance de masa de la corriente de Cromwell, reveló asimetrías a lo largo de la línea ecuatorial en cuanto a la distribución de flujos de masas de agua. Estas asimetrías se atribuyen principalmente a la divergencia de Ekman producto de los vientos Alisios presente en toda la región, incluso al este y sureste de las Islas Galápagos. Los resultados de este estudio muestran una pronunciada variabilidad estacional del transporte de la corriente de Cromwell a 170° E, pasando de 75 Sv en junio a 24 Sv en enero.

En concordancia con lo mencionado por Garreaud (2018) los Niños extremos del 1997-1998 y 2015-2016 se encuentran bien definidos; según el ONI los valores son similares, pero según el ICEN en 1997-1998 fue más intenso que El Niño extremo del 2015-2016, donde el Índice de Pendiente Media (TSI) marcó de igual manera diferencias, ya que su pendiente fue mayor durante El ENOS 1997-1998, pero su relación con la corriente no fue analizada en este estudio (NOAA, 2019; Philander, 1990; Takahashi et al. 2014).

La influenciada de eventos océano-atmosféricos en la sección 86° O hace que el comportamiento de Cromwell sea muy irregular e indeterminado hasta cierto punto, que a escala mensual pierde calidad de observación, requiriendo monitoreo permanente para obtener mayores variables de análisis, debido a que modelos climáticos de baja resolución comúnmente utilizados tergiversan las características de las principales corrientes oceánicas como en este caso (Busecke, Resplandy y Dunne, 2019; Collins et al., 2013; Icochea 2015).

Concordante con lo que concluyeron Busecke et al. (2019) acerca de los resultados presentados en la Tabla 2, se determinó que se requiere contar con datos de mayor resolución temporal y espacial, los cuales podrían arrojar mejores correlaciones entre las variables de estudio.

En el evento ENOS 1997-1998 las secciones analizadas para ONI versus anomalía de la velocidad zonal máxima presentaron mayor correlación a 32 meses, a excepción de la sección 86° O que marca en 24 meses, donde se presenta primero un máximo en la corriente de Cromwell antes que un ENOS moderado, fuerte o extremo. Por el contrario, en la sección 110° O se presenta primero el ENOS extremo antes que la velocidad máxima de la corriente de Cromwell. Para este mismo período, en las secciones 170° O y 140° O se presenta una alta correlación a 1 mes. En el evento ENOS 2015-2016 las secciones 170° O y 140° O indicaron alta correlación en periodos de 32 meses, mientras que en el resto de las secciones meridionales se presentaron altas correlaciones para los periodos entre 4 y 8 meses, siendo de menor significancia en la sección 110° O.

Por su parte el análisis de correlación entre índice ICEN y la anomalía de la velocidad zonal máxima es similar al presentado previamente con el ONI, evidenciando mayor correlación a 32 meses, a excepción de la sección 86° O, donde se presenta primero un máximo en Cromwell antes que un ENOS moderado, fuerte o extremo. En 110° O se reporta primero el ENOS extremo antes que la velocidad máxima de la corriente de Cromwell.

Durante el evento ENOS 1997-1998 en la sección 170° O se marca una alta correlación entre 24 y 32 meses con el ICEN, registrando un máximo en la corriente de Cromwell antes que un ENOS; en la sección 140° O se presenta el mismo efecto para el periodo entre 10 y 32 meses; mientras que en el 110° O se manifiesta entre 28 y 32 meses, reportando primero el ENOS seguido del máximo en Cromwell (antifase), de la misma manera ocurre en la sección 86° O, pero en el periodo entre 3 y 6 meses. En el evento ENOS 2015-2016 las secciones 170° O y 140° O indican alta correlación en el periodo de 2 meses con el ICEN, es decir llega 2 meses antes Cromwell que el ENOS.

En las secciones analizadas, a excepción de 140° O, la corriente de Cromwell tiende a disminuir su intensidad, lo cual podría afectar el

transporte de calor entre el Ecuador y los polos, con consecuencias climáticas a largo plazo, dado que las corrientes son la primera máquina termodinámica de la Tierra que regula el clima; por lo tanto, la variabilidad en el transporte de calor y masa desde las regiones tropicales a latitudes depende de estas (Bryden, Longworth y Cunningham 2005; Gamou, 1999).

CONCLUSIONES

Se encontró en general una disminución del flujo subsuperficial de la corriente de Cromwell durante los últimos 25 años (excepto en la sección 140° O). Si se considera que las corrientes oceánicas son la primera máquina termodinámica del planeta y generan variaciones climatológicas considerables a mesoescala y macroescala, estas variaciones pueden estar en concordancia con cambios en el equilibrio de la temperatura global y merecen ser estudiadas con más detalle. La tendencia decreciente de la corriente de Cromwell durante el período de estudio puede ocasionar consecuencias en la interacción océano-atmósfera que resultan interesantes para posteriores estudios relacionados con afloramientos.

Se observó un comportamiento unívoco en todas las secciones meridionales de estudio, referido a la diferencia en el momento en que se ocasionan los máximos valores de los índices ONI e ICEN se produce un debilitamiento pronunciado de las anomalías de la corriente de Cromwell, pudiendo ser un marcador oceánico digno de ser considerado para futuras investigaciones.

Los promedios mensuales no mostraron alta correlación con los índices ONI e ICEN, tanto para la serie completa como para el período comprendido a los ENOS extremos (1997-1998 y 2015-2016), dificultando obtener una conclusión consistente sobre la influencia de un evento ENOS en el comportamiento de la corriente de Cromwell.

Se encontró mayor correlación entre la intensidad de Cromwell con el ENOS extremo de 1997-1998 que con el 2015-2016, permitiendo constatar que ningún ENOS tiene comportamiento similar o interactúa de la misma manera con las corrientes oceánicas; este comportamiento dificulta la predicción de este tipo de eventos, como lo ocurrido para la Región 1+2 durante el evento 2015-2016, donde se esperaba un evento de mayor intensidad.

Es importante indicar que pese a que en muchos casos la correlación es baja, hay valores de muy alta significancia ($p_{\text{valor}} < 0.001$), dando a entender que son datos estadísticamente válidos y que sirven de referencia bibliográfica para estudios relacionados.

LISTA DE REFERENCIAS

- Bistrain, E. (2008). *Variación espacio-temporal de los lances de atún asociados a delfines y su relación con la temperatura del mar*. Thesis.
- Blanke, B.; Raynaud, S. (1997). Kinematics of the Pacific Equatorial Undercurrent: An Eulerian and Lagrangian Approach from GCM Results. *Journal of Physical Oceanography* 27(6):1038-53. DOI: 10.1175/1520-0485(1997)027<1038:KOTPEU>2.0.CO;2.
- Bryden, H.; Longworth, H.; Cunningham, S. (2005). Slowing of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 25° N. *Nature* 438(7068):655-57. DOI: 10.1038/nature04385.
- Busecke, J.; Resplandy, J.; Dunne, J. (2019). The Equatorial Undercurrent and the Oxygen Minimum Zone in the Pacific. *Geophysical Research Letters* 46(12):6716-25. DOI: 10.1029/2019GL082692.
- Cochrane, J.; Zuta, S. (1967). *Equatorial currents east of the Galapagos Islands in February- March*. Texas A & IA University.
- Collins, C.; Mascarenhas, A.; Martínez, R. (2013). Structure of Ocean Circulation between the Galápagos Islands and Ecuador. *Advances in Geosciences* 33:3-12. DOI: 10.5194/adgeo-33-3-2013.
- Cromwell, T.; Montgomery, R.; Stroup, E. (1954). Equatorial Undercurrent in Pacific Ocean Revealed by New Methods. *Science (New York, N.Y.)* 119:648-49. DOI: 10.1126/science.119.3097.648.
- Delcroix, T.; Eldin, G.; Hénin, C. (1987). Upper Ocean Water Masses and Transports in the Western Tropical Pacific (165° E). *Journal of Physical Oceanography* 17(12):2248-62. DOI: 10.1175/1520-0485(1987)017<2248:UOWMAT>2.0.CO;2.

- Firing, E.; Lukas, R.; Wyrski, K. (1983). *Equatorial Undercurrent Disappears During 1982-1983 El Niño* | Science.
- Gamo, T. (1999). Global Warming May Have Slowed down the Deep Conveyor Belt of a Marginal Sea of the Northwestern Pacific: Japan Sea. *Geophysical Research Letters* 26(20):3137-40. DOI: 10.1029/1999GL002341.
- Garreaud, R. (2018). Tres Niños sorprendentes. *Revista de Investigación Científica-Atmósferas (AGU)*, 5-9.
- Goodman, P.; Wilco, H.; De Vries, P.; Cane, M. (2005). Pathways into the Pacific Equatorial Undercurrent: A Trajectory Analysis. *Journal of Physical Oceanography*, 35(11):2134-51. DOI: 10.1175/JPO2825.1.
- Houvenaghel, G. (1978). *Oceanographic Conditions in the Galapagos Archipelago and Their Relationships with Life on the Islands*. Springer, Berlin, Heidelberg: Boje R., Tomczak M. (eds).
- Icochea, L. (2015). *La Corriente Cromwell y su influencia en la pesquería de la merluza peruana (Merluccius gayi peruanus)*. Machala.
- Icochea, L.; Chipollini, A.; Ñiquen, M.; Comisión Permanente del Pacífico Sur. (1989). Análisis de pesquería de arrastre pelágica en la costa peruana durante 1983-1987 y su relación con el medio ambiente. Pp. 455-65. En: *Memorias del Simposio Internacional sobre Recursos Vivos y Pesquerías en el Pacífico Sudeste; número especial, 1989*. CPPS.
- Icochea L.; Rojas E. (2001). La Corriente de Cromwell y sus variaciones en los 00N y 110oW. Recuperado el 30 de abril de 2019. <https://es.scribd.com/doc/96958023/La-Corriente-de-Cromwell>.
- Jevrejeva, S., Moore, J.; Grinsted, A. (2003). Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on Ice Conditions in the Baltic Sea: The Wavelet Approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D21). DOI: 10.1029/2003JD003417.
- Khanaichenko, N. K.; Washington National Oceanic and Atmospheric Administration; A. D. (ed.); Dobrovolskii. (1980). The system of Equatorial countercurrents in the Ocean.
- Knauss, J.; Pepin, R. (1959). Measurements of the Cromwell current. *Deep Sea Research* (1953) 6:265-86. DOI: 10.1016/0146-6313(59)90086-3.
- Lucero, M.; Cornejo, M. (1990). Evidencia de la corriente de Cromwell entre 92o W y 84o W, observada en períodos normales y durante El Niño 82-83. *Acta Oceanográfica de Pacífico*, Inocar, 18-27.
- Lukas, R. (1986). The termination of the Equatorial Undercurrent in the eastern Pacific. *Progress in Oceanography* 16:63-90. DOI: 10.1016/0079-6611(86)90007-8.
- Montgomery, et al. (1962). Equatorial waters and currents at 150oW in July-August 1952. *Johns Hopkins Oceanography*, 66.
- NOAA. (2019). Recuperado el 18 de mayo de 2020: <https://www.noaa.gov/>.
- Paek, H.; Jin-Yi, Y.; Fei, Z.; Mong-Ming, L. (2019). Impacts of ENSO Diversity on the Western Pacific and North Pacific Subtropical Highs during Boreal Summer. *Climate Dynamics* 52(12):7153-72. DOI: 10.1007/s00382-016-3288-z.
- Philander, G. (1990). El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press 46:293. DOI: 10.1126/science.248.4957.904.
- Pickard, G.; Emery, J. (1990). Descriptive Physical Oceanography. An: *Introduction*. 5a ed. London, England.
- Restrepo, L.; González, J. (2007). From Pearson to Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 20(2):183-92.
- Rosales, G. (2017). *Variaciones de la Corriente Cromwell y su influencia en la abundancia relativa de la merluza (Merluccius gayi peruanus) durante el período 2003-2013*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Rueda, L.; Moranta, J.; Abelló, P.; Balbín, R.; Barberá, C.; Fernández de Puellas, M. L.; Olivar, M. L.; Ordines, F.; Ramón, M.; Torres, A. P.; Valls, M.; Massutí, E. (2014). Body Condition of the Deep Water Demersal Resources at Two Adjacent Oligotrophic Areas of the Western Mediterranean and the Influence of the Environmental Features. *Journal of Marine Systems* 138:194-

202. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2013.11.018.
- Seidel, H.; Giese, B. (1999). Equatorial Currents in the Pacific Ocean 1992–1997. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104(C4):7849–63. DOI: 10.1029/1999JC900036.
- Stewart, R. (2008). *Introduction To Physical Oceanography*. 353.
- Takahashi, K.; Mosquera, A.; Reupo, J. (2014). *El Índice Costero El Niño (ICEN): historia y actualización*. Repositorio institucional - IGP.
- Terán, B. (2020). *Variabilidad de la corriente subsuperficial de Cromwell asociada a eventos Enos en el Pacífico Ecuatorial entre 1993 a 2017*. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena.
- Torrence, C.; Compo, G. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(1):61–78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APG-TWA>2.0.CO;2.
- Torrence, C.; Webster, P. (1999). Interdecadal Changes in the ENSO–Monsoon System. *Journal of Climate* 12(8):2679–90. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2679:ICI-TEM>2.0.CO;2.
- Trenberth, K. (2016). *The climate data guide: Nino SST indices (Nino 1+ 2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)*. National Center for Atmospheric Research: Boulder.
- Wyrtki, K. (1967). Circulation and Water Masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean. En: *Int. J. Oceanol. & Limnol.*
- Wyrtki, K.; Kilonsky. (1984). Mean Water and Current Structure during the Hawaii-to-Tahiti Shuttle Experiment. *Journal of Physical Oceanography* 14(2):242–54. DOI: 10.1175/1520-0485(1984)014<0242: MWACSD>2.0.CO;2.