

ANÁLISIS DE CAMBIOS EN LOS AFLORAMIENTOS EN EL PACÍFICO ECUATORIAL ESTE, DURANTE EVENTOS EL NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR*

Carlos Perugachi-Salamea¹

RESUMEN

El re-análisis del océano Simple Ocean Data Assimilation SODA 2.2.4 es empleado para explorar cambios en los afloramientos en condiciones normales a condiciones de El Niño o La Niña. Las variables físicas y termodinámicas del re-análisis son usadas para investigar la estructura y comportamiento de eventos El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Los resultados de este análisis muestran que la temperatura superficial del mar, velocidad de arrastre, estrés de viento, profundidad de la capa de mezcla, curl de estrés de viento, y anomalías de contenido calórico se comportan generalmente de acuerdo a la teoría de eventos ENOS. La distribución de los afloramientos evaluados en base a la velocidad de arrastre es bastante irregular, por lo que fue necesario explorar el comportamiento zonal y meridional de la velocidad vertical. Tres métodos han sido empleados para computar los cambios en los afloramientos durante eventos ENOS. El primer método computa los cambios en afloramientos circunscritos en las áreas en donde se sitúan las anomalías de temperatura superficial del mar durante eventos ENOS. Durante eventos El Niño los afloramientos presentan una prominente variabilidad decenal, mientras que durante eventos La Niña, la variabilidad decenal es menos significativa. Un nuevo índice de afloramientos es empleado para el segundo método de análisis, y los afloramientos son computados en las áreas donde se presentan las mayores anomalías de los afloramientos. La variabilidad de los afloramientos es mayor en periodos de afloramientos fuertes, que en los de afloramientos débiles. A pesar de que el nuevo índice es calculado independientemente, este se ajusta bastante bien al comportamiento en el tiempo del índice empleado para definir eventos ENOS usado para ésta investigación. Los primeros dos métodos empleados muestran que la amplitud de las anomalías de temperatura superficial del mar y las anomalías de afloramientos no tienen una relación directa, lo que sugiere que los afloramientos no explican en su totalidad el comportamiento de la temperatura superficial del mar. El tercer método de cómputo empleado, computa los cambios en afloramientos en la región Niño 1+2 durante eventos ENOS. En el Pacífico Este casi no existe una correlación entre los afloramientos y las anomalías de TSM, pero esto podría ser atribuido al hecho de que la región Niño 1+2 es relativamente pequeña en comparación a la región Niño 3.4 con la cual se definen eventos ENOS. En general el comportamiento de la TSM en el tiempo y los afloramientos se ajustan bastante bien únicamente en los casos cuando se presentan eventos ENOS prominentemente en el Pacífico Este.

¹ Instituto Oceanográfico de la Armada, INOCAR. Avda. 25 de julio Base Naval Sur, casilla 5949 Guayaquil-Ecuador. Fax 59342 485166 (*) Síntesis de la Tesis de Maestría en Ciencias en Oceanografía, realizado en Texas A&M University.

ABSTRACT

The ocean reanalysis Simple Ocean Data Assimilation (SODA) 2.2.4 is used to explore the changes in upwelling from normal conditions to either El Niño or La Niña conditions. Physical and thermodynamic variables from the reanalysis are used to explore the structure and behaviour of El Niño Southern Oscillation (ENSO) events. The results of this analysis show that sea surface temperature (SST), entrainment velocity, wind stress, mixed layer depth, wind stress curl, and heat content anomalies are in general agreement with ENSO theory. Interestingly, the distribution of upwelling based on the entrainment velocity is very patchy, which led us to explore zonal and meridional sections of vertical velocity. We used three methods to compute changes in upwelling during ENSO events. The first method computes upwelling within the áreas of SST anomalies during ENSO events. During El Niño events upwelling shows prominent decadal variability, while during La Niña the decadal variability is weaker. A new upwelling index is used for the second method, and upwelling is computed in the áreas of strong upwelling anomalies. The variability of upwelling is higher in periods of reduced upwelling than in periods of strong upwelling. Despite the fact that the new index is computed independently, it agrees in the timing of the index used to define ENSO events for this research. The first and second methods show that the amplitude of SST anomalies and upwelling anomalies do not have a direct relationship, suggesting that upwelling does not explain all of the variance in SST. The last method used is to compute changes in upwelling in the Niño 1+2 region during ENSO events. In the east Pacific there is almost no correlation between upwelling and SST anomalies during ENSO, but this might be attributed to the fact that the Niño 1+2 region is a relatively small region compared to the Niño 3.4 region that is used to define ENSO events. In general, the time series of SST and upwelling anomalies agree well just in the cases when ENSO events are prominently in the eastern Pacific.

INTRODUCCIÓN

El Niño oscilación del sur ENOS, es un fenómeno océano-atmosférico, y es considerado parte de las más importantes anomalías globales de energía en el clima de la Tierra. Fue denominado como El Niño por pescadores peruanos en el siglo XIX, quienes describieron el Niño como la corriente cálida que fluye a lo largo de la costa oeste de Sudamérica durante la época navideña. Debido a la fecha de ocurrencia se denominó a este fenómeno como El Niño. [Cane, 2005; Philander, 1990].

Sir Gilbert Walker inició el estudio de este fenómeno encontrando que la diferencia en presión atmosférica entre el océano Pacífico este y oeste estaba asociado al calentamiento y enfriamiento del océano. La diferencia de presión a nivel del mar fue denominada como la oscilación del Sur (SO) [Walker, 1923, 1924; Walker and Bliss, 1932]. En 1969 el meteorólogo Jacob Bjerkness sugirió que El Niño y la oscilación del sur son parte del mismo fenómeno, y más tarde fueron denominados como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) [Wang and Picaut, 2004]. Por otra parte estableció que el calentamiento observado en el Pacífico central es derivado de un proceso de retroalimentación entre el océano y la atmósfera [Wang and Picaut, 2004; Wang and Fiedler, 2006], sin embargo este proceso positivo de retroalimentación causaría un calentamiento permanente del océano, y por lo tanto el cambio que detenía este calentamiento en algún punto, no era claro.

Más tarde se establecieron programas como el *Tropical Ocean-Global Atmosphere (TOGA)*, para tener un mejor entendimiento y predicción de los eventos ENOS. Después de 1980, fueron propuestos cuatro procesos de retroalimentación negativa para explicar el cambio de estado caliente a frío de este

fenómeno que fue denominado como La Niña [Philander, 1990].

Es esperado que más de uno de estos osciladores o mecanismos de retroalimentación negativa operen al mismo tiempo. Ha sido sugerido un oscilador unificado o multimecanismo [Wang 2001; Wang and Picaut, 2004].

DATOS Y METODOLOGÍA

Para este análisis se empleó datos obtenidos de *Simple Ocean Data Assimilation (SODA)*, versión 2.2.4 [Carton and Giese, 2008], para explorar los cambios en los afloramientos durante eventos ENOS. El re-análisis usa el modelo *ParallelOceanProgram (POP)* [Smith et al., 1992], el mismo que tiene una resolución de $0.25^\circ \times 0.4^\circ$ con 40 niveles verticales, y el software SODA para realizar el proceso de asimilación de datos. Para computar los procesos de mezcla vertical el modelo del océano emplea parameterización *K-Profile (KPP)*, mientras que para los procesos laterales de mezcla emplea un proceso bi-harmónico [Carton and Giese, 2008].

El modelo de circulación del océano es forzado usando el set de datos atmosféricos *20th Century Reanalysis version 2 (20CRv2)* [Whitaker et al., 2004; Compo et al., 2006; Compo et al., 2008]. El modelo de circulación oceánica usa el estrés de viento del re-análisis atmosférico para computar los flujos de momento superficiales. Para el cómputo de flujos de calor y agua dulce el modelo del océano emplea datos del re-análisis atmosférico 20CRv2. El re-análisis de la atmósfera emplea observaciones superficiales y un filtro *Kalman Ensemble* para la metodología de asimilación de datos [Whitaker and Hamill, 2002, Whitaker et al., 2004; Anderson et al., 2005; Compo et al., 2006]. La asimilación de las observaciones de temperatura y salinidad es realizada

cíclicamente cada 10 días. Las correcciones son introducidas en cada paso, y son calculadas siguiendo la metodología presentada por Bloom *et al.* [1996]. Los campos promedio de las salidas de temperatura, salinidad y velocidad son guardados cada 5 días, y luego son re-mapeados en una grilla horizontal de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ [Jones, 1999].

Los datos de la *WorldOceanDatabase 2009* (WOD09) son empleados para obtener los perfiles de temperatura y salinidad [Boyer *et al.*, 2009], y la temperatura superficial del mar es obtenida de la serie de datos *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* (ICOADS 2.5). La corrección por rata de caída ha sido aplicada a los datos obtenidos por batitermógrafo expandible (XBT), y batitermógrafo mecánico (MBT), para corregir

los errores de tendencia introducidos por estos instrumentos en las observaciones usadas en SODA [Levitus *et al.*, 2009].

ANÁLISIS Y RESULTADOS

El re-análisis del océano SODA 2.2.4 es empleado para explorar los cambios en los afloramientos en condiciones normales, y durante eventos ENOS. Se han explorado variables físicas y termodinámicas en el set de datos SODA 2.2.4.

Para este análisis se emplearon los eventos fuertes El Niño ($CHI \geq 1.0$), y La Niña ($CHI \leq -1.0$), definidos de acuerdo al índice centro de calor (CHI) propuesto por Giese and Ray [2011]. (Figura 1).

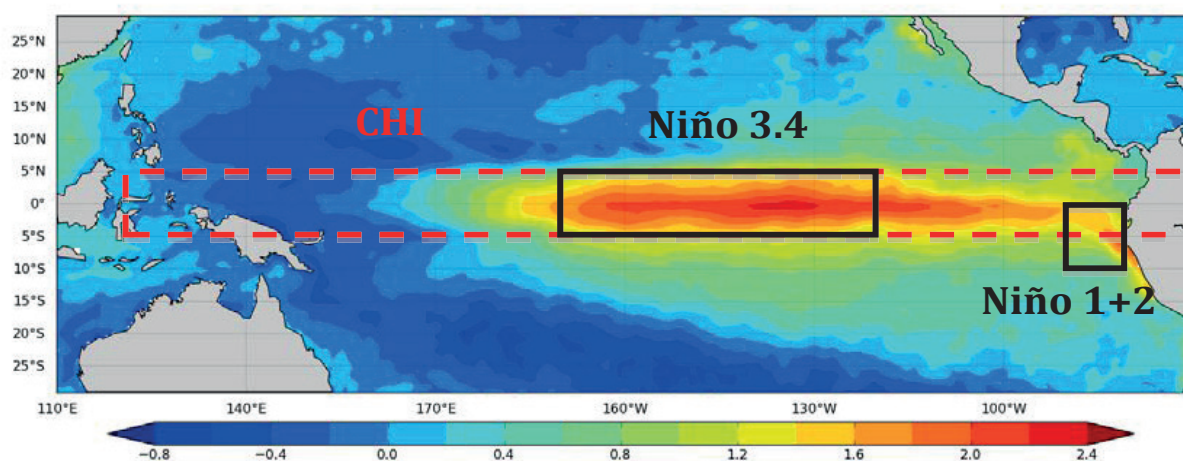


Figura 1. Figura compuesta de las anomalías de TSM para eventos El Niño. El recuadro en línea roja abarca el área en la que se analiza el índice CHI.

La región establecida para explorar el comportamiento de cada una de las variables comprende entre 170°O y 70°O en longitud, y entre 15°S y 15°N de latitud.

Los resultados de este análisis muestran que la temperatura superficial del mar, velocidad de arrastre, estrés de viento, profundidad de la capa de mezcla, curl de estrés de viento, y anomalías de contenido calórico se comportan generalmente de acuerdo a la

teoría de eventos ENOS. (Figuras 2 y 3).

Los resultados obtenidos explorando las anomalías de velocidad de arrastre definida como la velocidad vertical en la base de la capa de mezcla presentan una distribución bastante irregular, permitiendo confirmar además que durante años El Niño la velocidad de arrastre asociada con afloramientos decrece, mientras que durante los años La Niña esta variable incrementa.

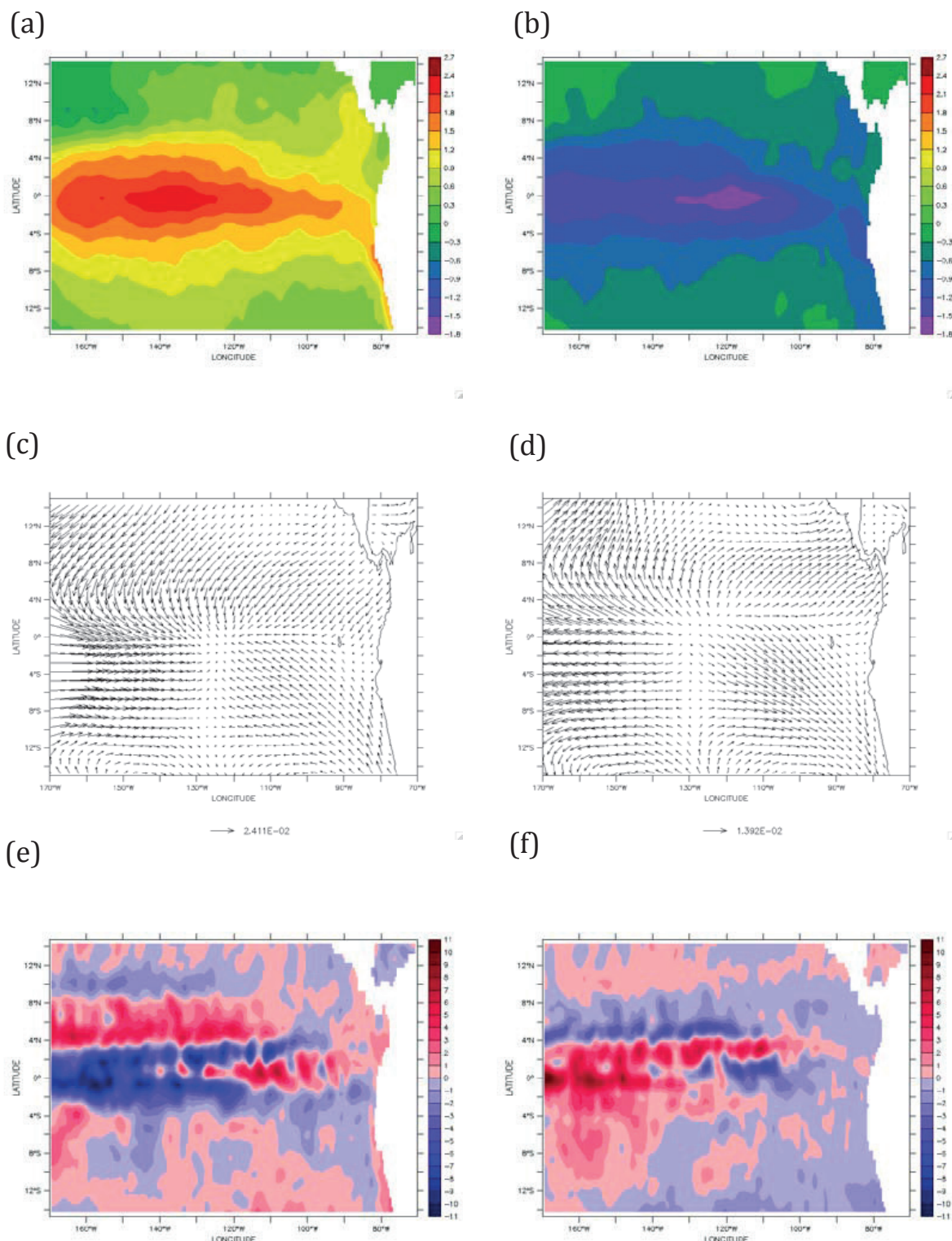


Figura 2. Figuras compuestas de las anomalías de El Niño ($CHI \geq 1$) de TSM (a), Estrés de viento (c), y velocidad de arrastre (e), y para La Niña ($CHI \leq -1$) de TSM (b), Estrés de viento (d), y velocidad de arrastre (f) en SODA 2.2.4.

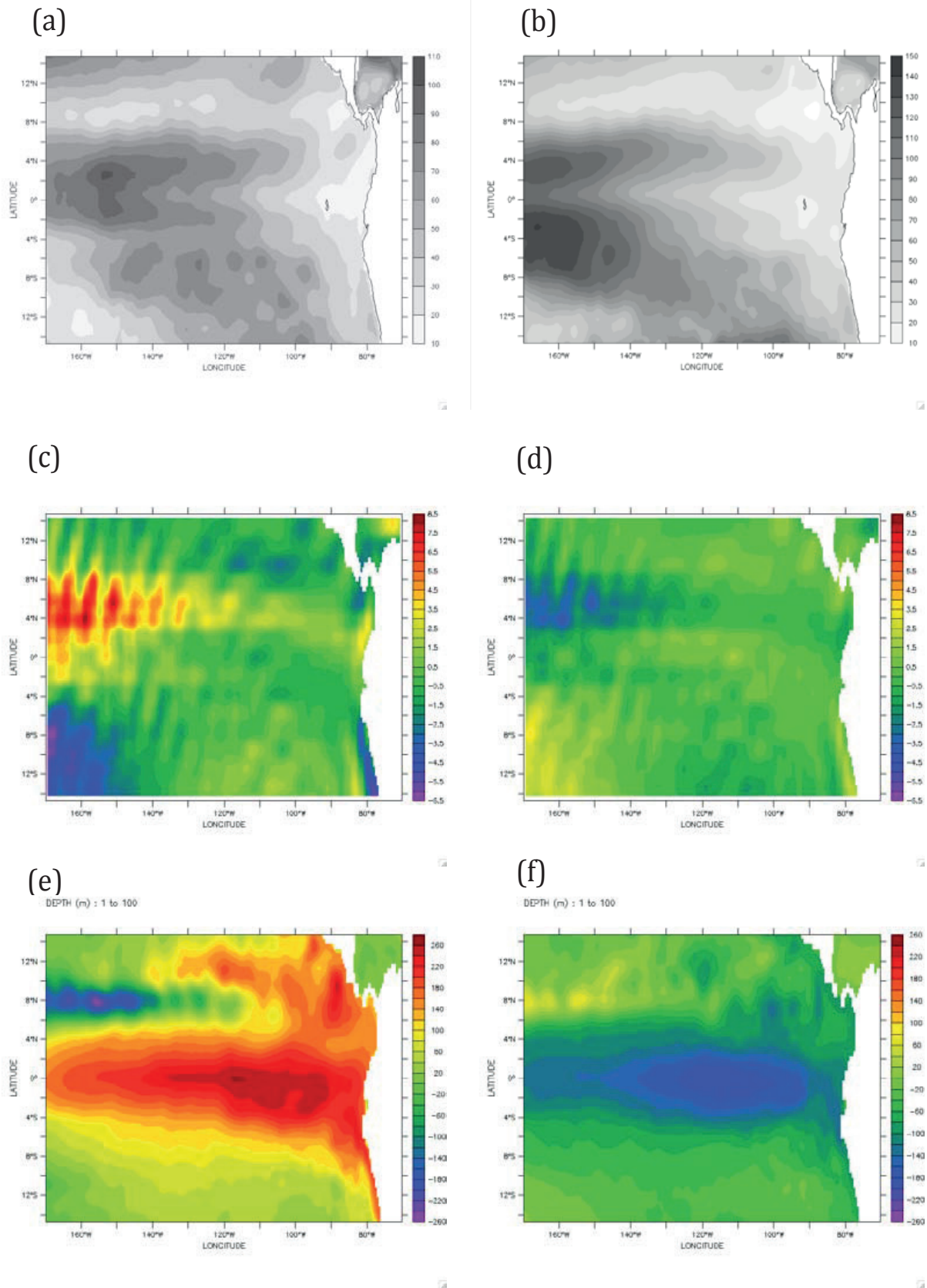


Figura 3. Figuras compuestas de El Niño ($CHI \geq 1$) de la profundidad de la capa de mezcla (a), anomalía del curl de estrés de viento (c), y anomalía de contenido calórico (e), y para La Niña ($CHI \leq -1$) profundidad de la capa de mezcla (b), anomalía del curl de estrés de viento (d), y anomalía del contenido calórico (f) en SODA 2.2.4.

El análisis de las anomalías del estrés de viento durante eventos El Niño presenta anomalías de viento del oeste que son mayores durante eventos fuertes El Niño; durante La Niña los vientos del este son mayores debido a un alto gradiente de presión, en concordancia con la teoría de eventos ENOS.

El gráfico compuesto de anomalías de temperatura superficial del mar presenta un calentamiento de 2.7°C centrados en 140° O, consistente con previas descripciones de El Niño.

Debido al comportamiento irregular de la velocidad de arrastre se exploraron también secciones zonales y meridionales de velocidad vertical, mostrando la compleja distribución de los cambios en afloramientos en el Pacífico tropical durante eventos ENOS.

Los resultados del análisis de la profundidad de capa de mezcla presentaron durante eventos El Niño en el Océano Pacífico Este profundidades de 12 m, y en el Pacífico Oeste profundidades de alrededor de 104m. Durante La Niña la profundidad de la capa de mezcla en el Pacífico Ecuatorial del Este se sitúa cerca de los 5 metros de profundidad mientras que en el Pacífico Oeste se profundiza alcanzando los 145m. Para verificar el comportamiento de los afloramientos durante eventos ENOS, se aplicaron tres métodos de análisis. En el primer método se computaron los afloramientos circunscritos en las áreas de anomalías de TSM de acuerdo al índice de centro de calor (CHI), el segundo método calcula el índice de centro de afloramientos (CUI), y en el tercer método se calculan los afloramientos en la región Niño 1+2 durante eventos ENOS. La metodología aplicada en los tres métodos es similar, sin embargo las áreas y condiciones empleadas para calcular los parámetros en cada caso, son diferentes.

Empleando el primer método se calcularon las tasas de afloramiento en las áreas CHI. Los cambios de las tasas de afloramientos

se calcularon empleando las anomalías de velocidad de arrastre. La amplitud de las anomalías de la velocidad de arrastre durante los años El Niño presenta prominente variabilidad decadal durante todo el registro que cubre el set de datos (1871-2008).

Los mayores picos de amplitud se presentan en la primera y última parte del registro, mientras que la parte media la variabilidad es menor. Este resultado es concordante con el presentado por Giese and Ray [2011], quienes mostraron un comportamiento similar para la temperatura superficial del mar. En el caso de La Niña se muestra también variabilidad decadal, sin embargo es inferior a la presentada durante eventos El Niño. Empleando este método también se determinó que durante eventos El Niño, las mayores anomalías negativas de velocidad de arrastre se sitúan entre 160°O y 140°O, mientras que durante eventos La Niña las anomalías ocurren sobre un rango más amplio de longitudes que abarcan entre 180°O y 110°O. Los resultados muestran que las amplitudes de las anomalías de TSM computadas para el cálculo del CHI, y las anomalías de amplitud de velocidad de arrastre no presentan una fuerte correlación, con valores de 0.13 durante eventos El Niño, y 0.19 durante eventos La Niña, sugiriendo que los afloramientos no explican de una forma significativa los cambios observados en temperatura superficial del mar. En una comparación de las series de datos de amplitud del índice CHI, y la amplitud de las anomalías de la velocidad de arrastre se observa que durante eventos El Niño no presentan una relación directa con los cambios en las tasas de afloramiento. Durante eventos La Niña no existe una relación clara entre los picos de amplitud de los afloramientos y los picos de las anomalías de TSM, sin embargo cuatro picos mayores de afloramientos coinciden con los eventos La Niña más significativos. (Figura 4).

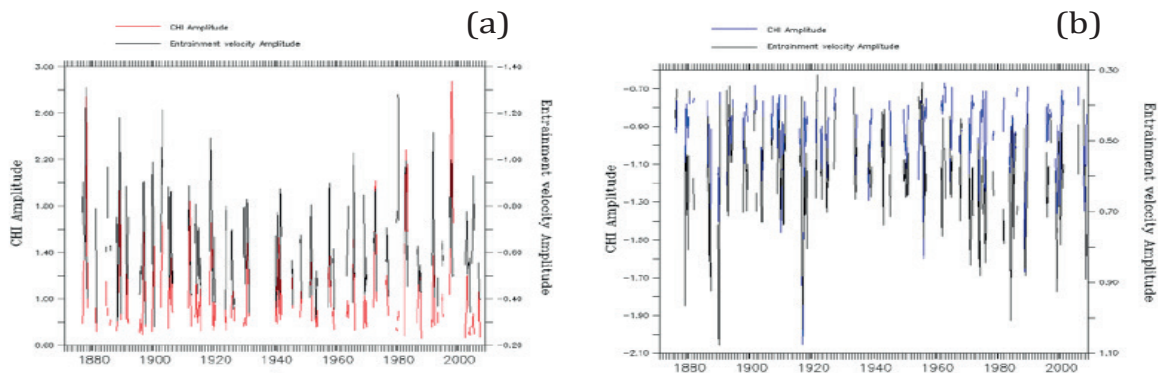


Figura 4. Series de tiempo de la amplitud de las anomalías de la velocidad de arrastre (negro), y amplitud CHI para eventos El Niño (a), y La Niña (b).

También se puede determinar que las anomalías de TSM están desplazadas al este de los centros de afloramiento durante eventos ENOS.

El segundo método emplea un nuevo Índice Centro de afloramientos (CUI) por sus siglas en inglés para computar los cambios en afloramientos circunscritos en las áreas de mayor anomalías de velocidad de arrastre o áreas CUI. Los resultados muestran que la amplitud de las anomalías durante periodos de reducido afloramiento presentan una variabilidad alta con valores picos en la primera y última parte del récord, mientras que durante periodos de afloramientos más fuertes la variabilidad es menor.

Los centros de los afloramientos se ubican entre 180°O y 150°O para ambos estados (calientes y fríos). También se verifica que las anomalías negativas de velocidad de arrastre para la primera y última parte del récord se sitúan al este de las anomalías de la parte media del récord. El análisis de las anomalías positivas de velocidad de arrastre muestra que existe una alta ocurrencia del nuevo índice CUI en la última parte del récord. Los resultados obtenidos empleando este método muestran una débil correlación entre la amplitud de los índices CHI y CUI de 0.09 para los casos de eventos El Niño, y una correlación de 0.23 para eventos La Niña. Se enfatiza que a pesar del hecho que ambos índices son calculados independientemente, los tiempos de ocurrencia en los que se producen las mayores amplitudes concuerdan bastante bien, y es claro que el cambio en la rata de los afloramientos contribuye a la generación de anomalías de TSM para eventos El Niño y La Niña. Sin embargo, en eventos fuertes El Niño y La Niña, las anomalías de TSM no tienen una relación

directa con los cambios en los afloramientos. Otros procesos como advección zonal, o flujos de calor deben ser considerados para explicar la magnitud de eventos calientes, y fríos. La distribución de las posiciones en longitud de la ocurrencia del índice CUI, es más compacta que para los casos de CHI, expandiéndose en el Pacífico Central desde 180°E a 155°O , y los centros de los afloramientos están generalmente al oeste de los centros de anomalías de TSM.

Adicionalmente, con este método se ha podido determinar que las áreas sobre las cuales se ubican las anomalías de TSM o CHI áreas son mucho mayores a las áreas de CUI para eventos ENOS. (Figura 5).

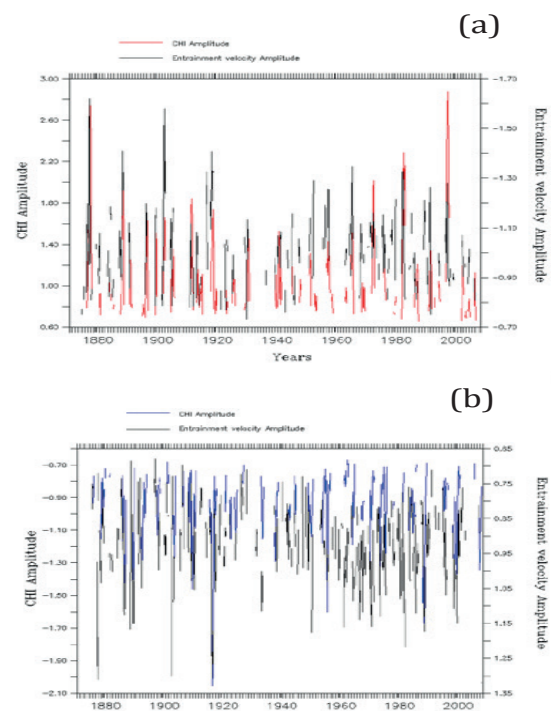


Figura 5. Series de tiempo de amplitud de CUI (negro), y amplitud CHI para eventos El Niño (a), y La Niña (b).

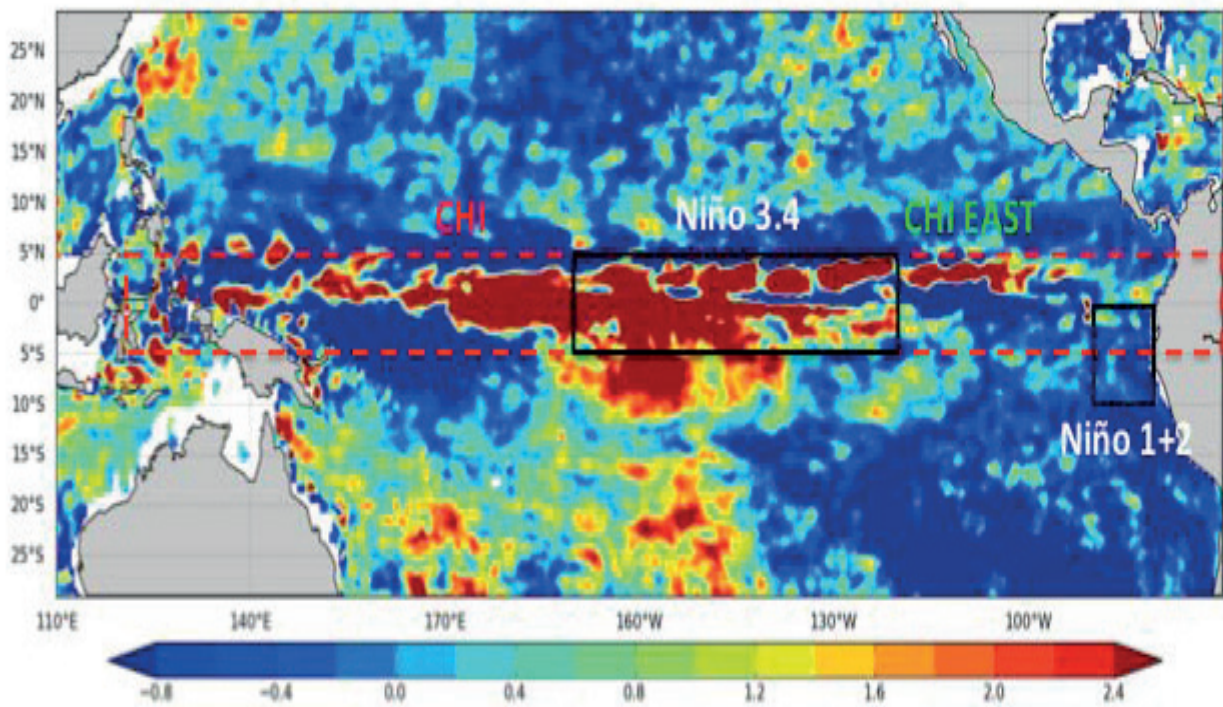


Figura 6.Figura compuesta de las anomalías de velocidad de arrastre durante eventos La Niña. Los recuadros de las regiones CHI y Niño 1+2 abarcan las regiones que se comparan para el análisis del comportamiento de los afloramientos.

Para el tercer método de cálculo se computaron los cambios en los afloramientos en la región Niño 1+2 durante eventos ENOS usando dos técnicas. (Figura 6). Para la primera técnica la ocurrencia del índice CHI es empleada, es decir que para cada ocurrencia de un evento CHI que define eventos ENOS, el cómputo de los afloramientos es realizado. La segunda técnica considera únicamente la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña ubicados en el Océano Pacífico Este para identificar los cambios en los afloramientos. Aplicando la primera técnica de análisis en este tercer método se determinó que durante eventos El Niño la amplitud de las anomalías negativas de velocidad de arrastre muestra poca variabilidad durante la mayor parte del récord, mientras que para eventos La Niña la variabilidad de amplitud es mayor. Adicionalmente, existe una ligera tendencia de ocurrencia de eventos con fuertes afloramientos en el periodo desde

1960 hasta el 2000. Los resultados de los análisis de correlación entre en índice centro de calor CHI, y la amplitud de las anomalías de la velocidad de arrastre en la región Niño 1+2 presentan un valor de 0.23 para eventos El Niño, y de 0.0053 para eventos La Niña. Las bajas correlaciones podrían ser debido al hecho de que esta metodología compara eventos ENOS que ocurren sobre todo el rango de latitudes del océano Pacífico tropical, con cambios en afloramientos que ocurren en una región relativamente pequeña en el Pacífico Este.

Los resultados obtenidos las series de datos de amplitud del CHI y la amplitud de los afloramientos en la región Niño 1+2, muestran que únicamente para eventos ENOS en el periodo de 1960 a 1980 las series de tiempo se ajustan bastante bien, mientras que para los demás periodos del récord casi no existe una correlación. (Figura 7).

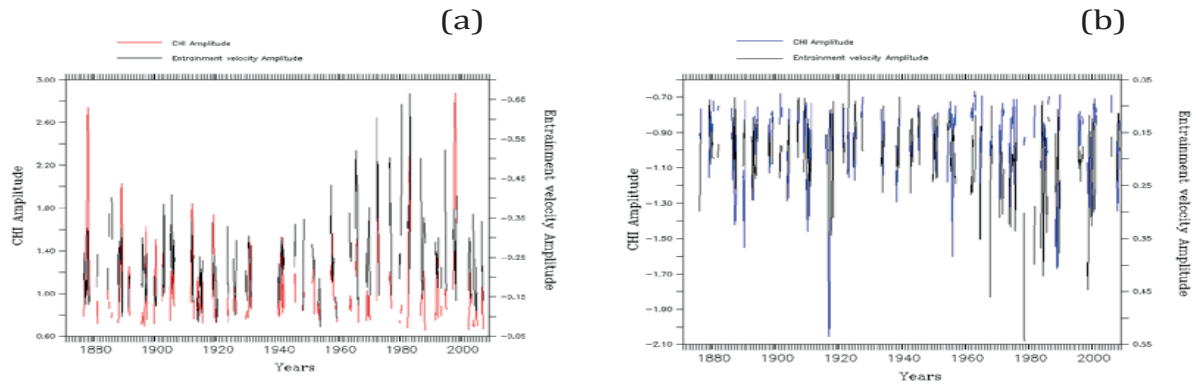


Figura 7. Serie de tiempo de amplitud de anomalías de velocidad de arrastre (negro) en la región Niño 1+2, y amplitud CHI para El Niño (a), y para La Niña (b) eventos

A través de la segunda técnica para determinar los cambios de los afloramientos en la región Niño 1+2 para eventos ENOS localizados en el Océano Pacífico Este, se determinó que durante eventos El Niño la distribución de la amplitud presenta una variabilidad moderada, mientras que para el caso de La Niña la variabilidad es poco significativa. Se esperaba una fuerte correlación entre eventos ENOS localizados únicamente en el Pacífico Este evaluados bajo una modificación del índice CHI este, y la velocidad de arrastre en la región Niño 1+2, sin embargo para eventos El Niño es de 0.024, y para La Niña casi no existe correlación. Analizando la amplitud de las series de datos del índice CHI Este, y los afloramientos en la región Niño 1+2, se pudo verificar que las amplitudes se ajustan

únicamente en los años desde 1958 a 1982. Desde 1958 hacia delante se presentan eventos que prominentemente ocurren en el Pacífico Este (1957-1958, 1969-1970, 1972-1973, 1982-1983, y 1997-1998). El evento El Niño de 1969 presenta un comportamiento inusual en el que a pesar de existir fuertes anomalías de velocidad de arrastre existe relativamente poco calentamiento de la TSM.

Las amplitudes de eventos La Niña localizados en el este y evaluados con el índice CHI Este, y las amplitudes de los afloramientos se ajustan bastante bien durante tres específicos periodos entre (1889-1890, 1917-1918, y 1988-1989), que corresponden a tres eventos fuertes. (Figura 8).

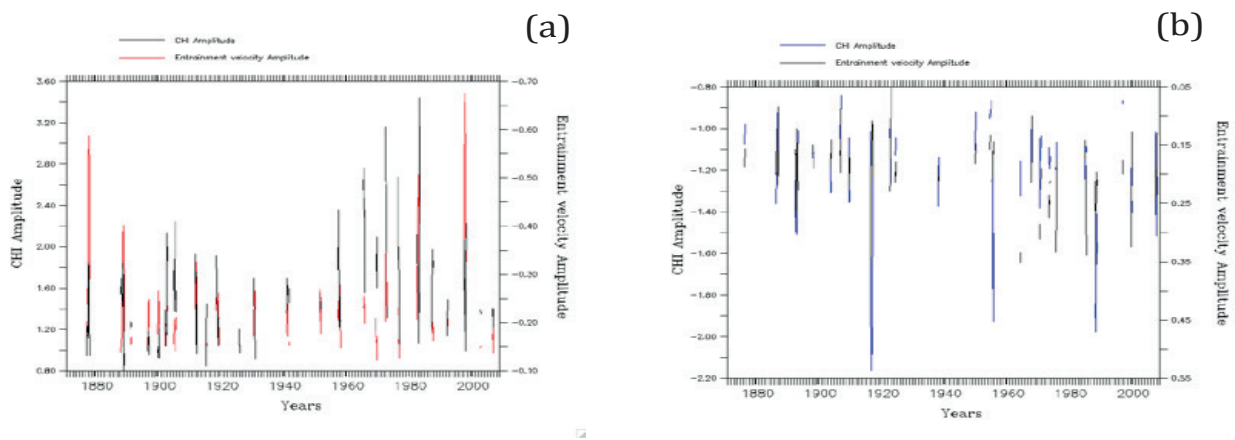


Figura 8. Serie de tiempo de amplitud de anomalías de velocidad de arrastre (negro) en la región Niño 1+2, y amplitud CHI Este, para El Niño (a), y para La Niña (b) eventos.

CONCLUSIONES

El re-análisis del océano SODA 2.2.4 que cubre un periodo de 140 años ha sido empleado para explorar los cambios en los afloramientos en condiciones normales, y durante eventos ENOS en el Océano Pacífico central y este. Para el análisis se verificó el comportamiento de variables físicas y termodinámicas del set de datos entre las que se encuentran: temperatura superficial del mar, velocidad de arrastre, estrés de viento, profundidad de la capa de mezcla, curl de estrés de viento, y anomalías de contenido calórico que se comportan generalmente de acuerdo a la teoría de eventos ENOS. Para la segunda parte de la investigación se analiza el comportamiento de los afloramientos representados para esta investigación con la velocidad vertical en la base de la capa de mezcla o velocidad de arrastre, y las anomalías de TSM calculadas para eventos ENOS definidos bajo el índice centro de calor CHI. En los tres métodos de análisis se verifica que no existe una directa correlación entre las anomalías de la velocidad de arrastre y las anomalías de TSM, lo que implica que el comportamiento y distribución de la TSM no responde directamente a los afloramientos, y se sugiere investigar procesos como advección zonal, y flujos de calor para entender mejor como contribuyen estos procesos al calentamiento o enfriamiento respectivamente. La investigación permite concluir además que los centros en los que se presentan los mayores afloramientos se ubican al oeste de los centros de anomalías de TSM durante eventos ENOS. Así mismo las áreas en las que se presentan las mayores anomalías de afloramientos son de menor tamaño que las áreas en las que se presentan las anomalías de TSM que definen los eventos ENOS bajo el índice CHI.

REFERENCIAS

Anderson, J. L., B. Wyman, S. Zhang, and T. Hoar (2005), Assimilation of surface pressure observations using an ensemble filter in an idealized global atmospheric prediction system, *J. Atmos. Sci.*, 62, 2925–2938.

Bloom, S. C., L. L. Takacs, A. M. da Silva, and D. Ledvina (1996), Data assimilation using incremental analysis updates, *Mon. Weather Rev.*, 124, 1256-1271, doi:10.1175/1520-0493(1996)124<1256:DAUIAU>2.0.CO;2.

Boyer, T. P., J. I. Antonov, O. K. Baranova, H. E. Garcia, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T. D. O'Brien, D. Seidov, I. V. Smolyar, and M. M. Zweng (2009), *World Ocean Database 2009, NOAA Atlas NESDIS*, vol. 66, edited by S. Levitus, 216 pp., DVDs, U.S. Govt. Print. Off., Washington, D. C.

Carton, J. A., and B. S. Giese (2008), A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA), *Mon. Weather Rev.*, 136, 2999-3017, doi:10.1175/2007MWR1978.1.

Compo, G. P., J. S., Whitaker, and P. D. Sardeshmukh (2006), Feasibility of a 100-year reanalysis using only surface pressure data, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 87, 175-190, doi:10.1175/BAMS-87-2-175.

Compo, G. P., J. S., Whitaker, and P. D. Sardeshmukh (2008), The 20th century reanalysis project, paper presented at Third WCRP International Conference on Reanalysis, Univ. of Tokyo, Tokyo, 28 Jan. to 1 Feb. (Available at http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/Workshops/Reanalysis2008/Documents/V5-511_ea.pdf).

Giese, B.S., and S. Ray (2011), El Niño variability in simple ocean data assimilation (SODA), 1871-2008, *J. Geophys. Res.*, 116, C02024, doi:10.1029/2010JC006695.

Jones, P. W. (1999), First and second order conservative remapping schemes for grids in spherical coordinates, *Mon. Weather Rev.*, 127, 2204-2210, doi:10.1175/1520-0493(1999)127<2204:FASOCR>2.0.CO;2.

Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, T. A. Locarnini, H. E. Garcia, and A. V. Mishonov (2009), Global ocean heat content 1955-2008 in light of recently revealed instrumentation problems, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07608, doi:10.1029/2008GL037155.

Perugachi Salamea, Carlos (2011). Analysis of Upwelling Changes in the Eastern Equatorial Pacific during El Niño Southern Oscillation. Master's thesis, Texas A&M University. Available electronically from <http://hdl.handle.net/1969.1/ETD-TAMU-2011-12-10374>.

Philander, S. G. (1990), *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*, 289pp., Academic Press, London.

Smith, R. D., J. K. Dukowicz, and R. C. Malone (1992), Parallel ocean general circulation modeling, *Physica D*, 60, 38-61, doi:10.1016/0167-2789(92)90225-C.

Walker, G. T. (1923), Correlation in seasonal variations of weather. VIII. A preliminary study of world weather, *Mem. Indian Meteorol. Dep.*, 24, 75-131.

Walker, G. T. (1924), Correlation in seasonal variations of weather. IX. A further study of world weather, *Mem. Indian Meteorol. Dep.*, 24, 275-332.

Walker, G. T., and E. W. Bliss (1932), World weather, V. *Mem. R. Meteorol. Soc.*, 4, 53-84.

Wang, C. (2001), A unified oscillator model for the El Niño-Southern Oscillation, *J. Clim.*, 14, 98-115.

Wang, C. and P. Fiedler (2006), ENSO variability and the Eastern Tropical Pacific: A review, *Prog. in Oceanog.*, 69, 239-266, doi:10.1016/j.pocean.2006.03.004.

Wang, C. and J. Picaut (2004), Understanding ENSO Physics-A review, In: Wang, C., Xie, S. P., Carton, J. (Eds), *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction, Geophysical Monograph Series*, 147, 21-48, doi:10.1029/147GM02.

Whitacker, J. S., and T. M. Hamill (2002), Ensemble data assimilation without perturbed observations, *Mon. Weather Rev.*, 130, 1913-1924, doi:10.1175/1520-0493(2002)130<1913:EDAWPO>2.0.CO;2.

Whitacker, J. S., G. P. Compo, X. Wei, and T. M. Hamill (2004), Reanalysis without radiosondes using ensemble data assimilation, *Mon. Weather Rev.*, 132, 1190-1200, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1190:RWRUED>2.0.CO;2.