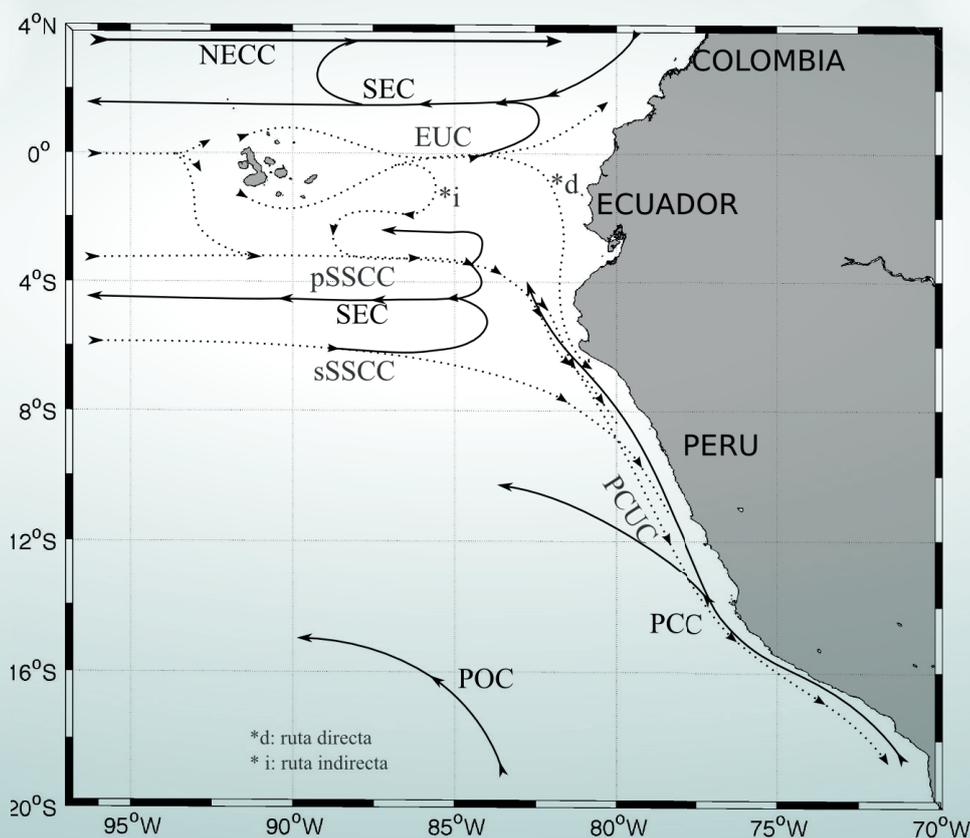




Programa Presupuestal por Resultados N° 068: "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres" Producto: "Entidades informadas en forma permanente y con pronósticos frente al Fenómeno El Niño"

# "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"

## Boletín Técnico



### Esquema de la circulación oceánica del Pacífico tropical este.

Las líneas sólidas indican corrientes superficiales y las líneas punteadas muestran las corrientes subsuperficiales.

## La circulación del Pacífico tropical este y su conexión con el Perú

El Pacífico tropical este, delimitado por el meridiano de 120°W y la costa oeste de América del Sur, presenta una circulación muy interesante y compleja que abarca dos importantes sistemas de corrientes: el Sistema de Corrientes Ecuatorial y el Sistema de Corrientes de Perú (Fig.1). Ambos sistemas son de gran importancia, ya que el primero interviene en el clima del planeta y el segundo representa uno de los sistemas más productivos del mundo<sup>1</sup>.



Ph. D. Ivonne Montes Torres  
Investigadora Científica del  
Instituto Geofísico del Perú

PhD en Oceanografía de la Universidad de Concepción, Chile y Física de la Universidad Nacional del Callao. Actualmente es investigadora científica en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), donde se desempeña como especialista en Oceanografía Física para el área de Investigación en Variabilidad y Cambio Climático. Es autora de varios artículos científicos y recientemente sus estudios están enfocados en entender el rol de la variabilidad global sobre la circulación oceánica frente a Perú, analizar el rol de la interacción océano - atmósfera a escala regional sobre el clima y prever la evolución de eventos extremos climáticos (El Niño, lluvias, friajes) que impactan el país.

## Sistema de Corrientes Ecuatorial

Las corrientes que forman parte del Sistema de Corrientes Ecuatorial y que son de mayor relevancia para el Perú, debido a que se encuentran al lado y en conexión directa con el Sistema de Corrientes de Perú, son cuatro: la Corriente Ecuatorial Sur, la Corriente Ecuatorial Subsuperficial y las Contracorrientes Subsuperficiales Sur primaria y secundaria.

La Corriente Ecuatorial Sur fluye superficialmente hacia el oeste a lo largo del Ecuador con una velocidad (transporte) promedio de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  ( $\sim 30 \text{ Sv}$ )<sup>2</sup> y tiene un comportamiento estacional que alcanza su mayor intensidad en invierno, cuando los vientos alisios son más fuertes. Estos vientos causan el apilamiento de agua en el borde oeste de la cuenca del Pacífico, manteniendo un gradiente zonal (oeste a este) en el nivel del mar. El desequilibrio del nivel del mar es rectificado por un flujo de retorno subsuperficial hacia el este conocido como Corriente Ecuatorial Subsuperficial (EUC)<sup>3</sup>, Fig. 2.

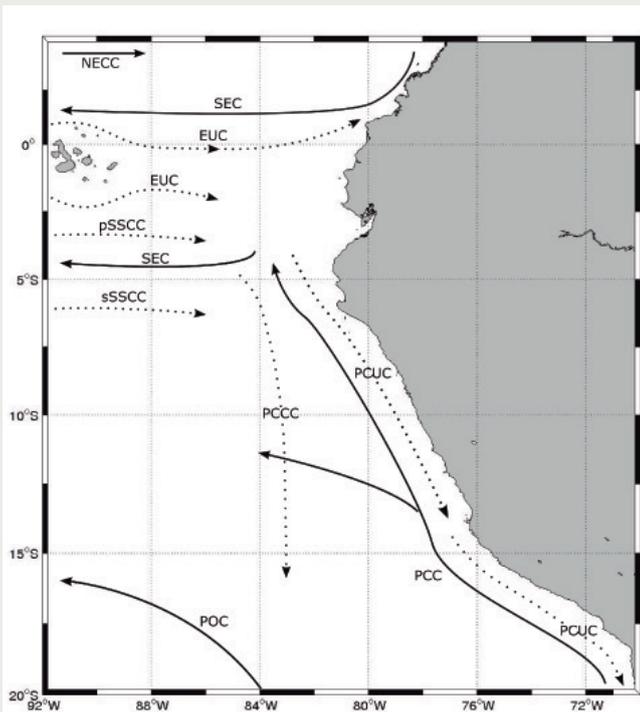


Figura 1. Esquema general de la circulación oceánica para el Pacífico tropical este<sup>5,20,21,27</sup>. Las líneas sólidas indican corrientes superficiales y las líneas punteadas muestran las corrientes subsuperficiales. NECC: Contracorriente Ecuatorial Norte; SEC: Corriente Ecuatorial Sur; EUC: Corriente Ecuatorial Subsuperficial; pSSCC: Contracorriente Subsuperficial Sur primaria; sSSCC: Contracorriente Subsuperficial Sur secundaria; PCC: Corriente Costera de Perú; POC: Corriente Oceánica de Perú; PCUC: Corriente Subsuperficial de Perú-Chile; PCCC: Contracorriente de Perú-Chile.

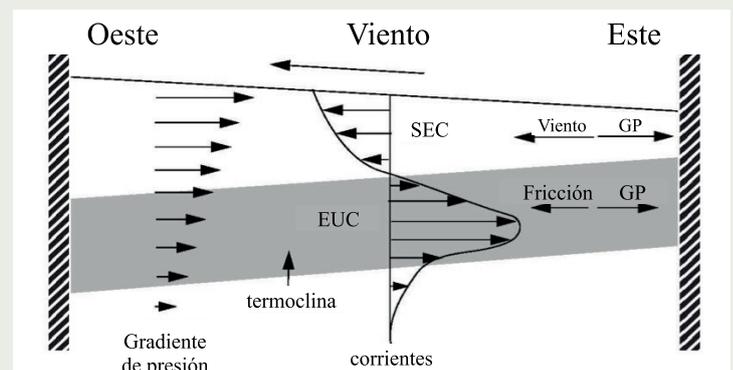


Figura 2. Diagrama esquemático de la termoclina y la topografía de la superficie del mar a lo largo del Ecuador. Extraído de Stewart (2002)<sup>28</sup>.

# La circulación del Pacífico tropical este y su conexión con el Perú

Montes I.

La EUC, o Corriente de Cromwell, es una de las últimas corrientes en haber sido descubiertas<sup>4</sup>. Su flujo zonal subsuperficial dirigido hacia el este se localiza a lo largo del Ecuador, entre los 400m de profundidad en el Pacífico oeste y los 50m de profundidad en el Pacífico este, y tiene velocidades entre 0.5 y 1.5 ms<sup>-1</sup>, siendo más fuerte entre febrero–julio y más débil entre agosto–noviembre<sup>5</sup>. Al este de las islas Galápagos, la EUC se separa en varias ramas (Fig.3) debido al bloqueo de las islas<sup>5,6</sup> y a la acción de ondas de inestabilidad tropical<sup>7</sup>. Investigaciones recientes indican que la llamada ‘Extensión Sur de la Corriente de Cromwell’<sup>8</sup>, es en realidad más compleja que lo que se creía. El concepto tradicional de un flujo de la EUC bifurcado hacia el sur que alcanza la costa y continua fluyendo con la Corriente Subsuperficial de Perú-Chile, ha sido reemplazado por un flujo reunificado de la EUC al sur del Ecuador que sigue dos rutas: una directa y una indirecta (Fig. 3)<sup>9</sup>. La directa es un flujo hacia el este a lo largo del Ecuador o hacia el sudeste que alcanza la costa peruana. La indirecta es un flujo que torna hacia el sudoeste, donde converge con la Contracorriente Subsuperficial Sur primaria, continúa al este y, después haber alcanzado la costa peruana, sigue fluyendo hacia el sudoeste a lo largo del litoral. Ambas rutas son caracterizadas por una alta concentración de oxígeno, nutrientes y salinidad.

Las Contracorrientes Subsuperficiales Sur primaria y secundaria (pSSCC y sSSCC, respectivamente), o Jets de Tsuchiya Sur, son flujos persistentes hacia el este encontrados a pocos grados del Ecuador (entre los 4° y 8°S<sup>10</sup>, Fig.1). Sus núcleos de velocidad bordean entre 0.18 y 0.22 ms<sup>-1</sup> y son localizados a 2.5°S en 300m y 6°S en 400m de profundidad<sup>11</sup>, respectivamente, elevándose y separándose del Ecuador a medida que fluyen de oeste a este. Además, dichos núcleos son asociados con aguas ricas en oxígeno y pobres en nutrientes, debido a sus orígenes que se presumen entre 142° y 165°E.

## Sistema de Corrientes de Perú

El Sistema de Corrientes de Perú, localizado entre ~3° y 18°S<sup>12</sup>, soporta cerca del 10% de la captura mundial de peces gracias a los vientos alisios del sudeste que soplan hacia el norte casi constantemente (Fig.3), favoreciendo de esa manera al afloramiento costero (incluso durante eventos El Niño, cuando dichos vientos pueden ser más intensos)<sup>13</sup>.

En la superficie del Sistema de Corrientes de Perú se localizan la Corriente Oceánica de Perú y la Corriente Costera de Perú (PCC). La PCC está asociada con el afloramiento costero de agua salada y fría y tiene un ciclo estacional poco conocido, aunque se señala un máximo de velocidad durante el invierno<sup>14</sup>. En la capa subsuperficial del mismo Sistema, se encuentran la Corriente Subsuperficial de Perú-Chile (PCUC) y la Contracorriente de Perú-Chile (PCCC). Sobre la capa más profunda, se encuentra la recientemente nombrada Corriente Costera Profunda de Perú-Chile que fluye muy lentamente hacia el Ecuador por debajo de la PCUC (bajo 300-400m), transportando agua fresca y fría proveniente del agua intermedia antártica<sup>9,15</sup>.

La PCUC, principal componente del Sistema de Corrientes de Perú debido a que interviene directamente en el afloramiento costero, debe su existencia a los vientos favorables para el afloramiento que manejan un gradiente de presión a lo largo de la costa hacia el sur cuyo ancho es proporcional al radio de deformación de Rossby baroclino (proporcional a 1/seno(latitud))<sup>16</sup>. Su origen se traza desde los 5°S hasta los 48°S, fluyendo continuamente a lo largo de la costa bajo la capa superficial sobre la plataforma continental y el talud<sup>17</sup>. Su máxima velocidad ocurre sobre la plataforma continental y la pendiente superior, en profundidades de 50 a 100m y temperaturas de 13 a 16°C<sup>18</sup>. Su velocidad (0.10 ms<sup>-1</sup>) y transporte (~2 Sv) decrecen de norte a sur, sugiriendo que mucha del agua puede ser llevada a la superficie en el proceso de afloramiento, además de la pérdida por transporte zonal.

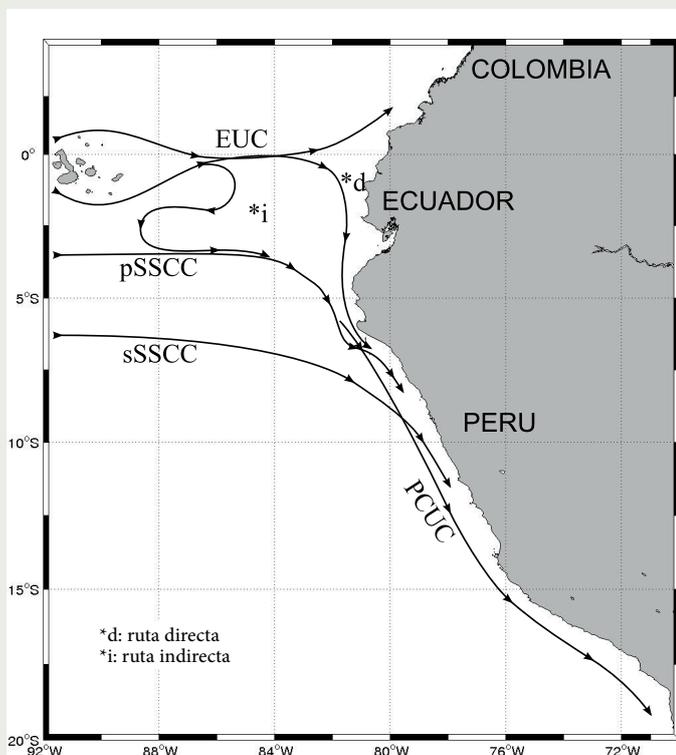


Figura 3. Esquema de la circulación subsuperficial del Pacífico tropical este mostrando las diferentes rutas ecuatoriales y la conexión con el Sistema de Corrientes de Perú. Las rutas directa e indirecta se indican con d\* e i\*, respectivamente.

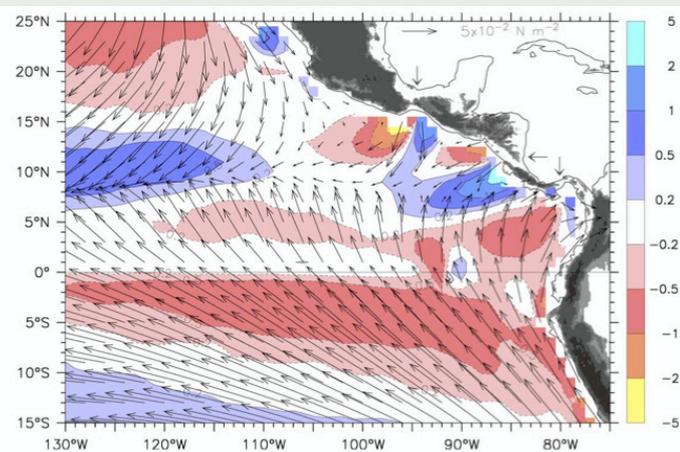


Figura 4. Esfuerzo del viento promedio (vectores) y rotor del esfuerzo del viento promedio (colores) obtenidos entre agosto 1999 y julio 2002. Tomado de Kessler (2006).

Poco es conocido sobre la PCCC, sin embargo las estimaciones de flujos geostroficados sugieren que fluye hacia el Polo con una velocidad máxima  $>0.1 \text{ ms}^{-1}$  en 50m de profundidad<sup>19</sup>, siendo forzada directamente por el rotor (tendencia al giro) del esfuerzo del viento en sentido ciclónico (horario)<sup>20</sup>, y que, si bien es una corriente subsuperficial, ocasionalmente puede alcanzar la superficie<sup>21</sup>.

## El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) y la circulación oceánica del Pacífico tropical

El Sistema de Corrientes de Perú se encuentra en conexión directa con el Sistema de Corrientes Ecuatorial. La alimentación de la PCUC por parte de las corrientes ecuatoriales subsuperficiales (EUC, pSSCC, sSSCC) bajo condiciones oceánicas y atmosféricas normales evidencia dicha interacción (Fig.5)<sup>9,22</sup>, por lo que está sujeta a la dramática variabilidad interanual del ENSO (especialmente estudiado por su impacto sobre la productividad biológica marina y el clima de las Américas)<sup>23</sup>.

Bajo condiciones normales, los vientos alisios acumulan agua superficial cálida en el Pacífico occidental y dejan agua más fría de surgencia a lo largo de la línea ecuatorial en el Pacífico oriental. Consecuentemente, la temperatura superficial es mayor y la termoclina es más profunda en el oeste que en el este<sup>24</sup>. Variaciones en la intensidad de estos vientos alisios generan disturbios oceánicos atrapados alrededor de la línea ecuatorial en varias escalas de tiempo en el Pacífico occidental. Parte de

estos disturbios se propagan hacia el este en la forma de ondas de Kelvin ecuatoriales que son responsables de la transmisión de la variabilidad ecuatorial hacia la costa de Sudamérica<sup>25</sup>.

En escala interanual, cambios en estos vientos pueden debilitar/reforzar el contraste este–oeste de la temperatura superficial y somerizar/profundizar la termoclina ecuatorial a través de la propagación de ondas, así como los patrones de circulación superficial y subsuperficial previamente descritos<sup>23</sup>. Un efecto notable es el debilitamiento e, incluso, la desaparición de la EUC durante la fase cálida del ENSO (eventos El Niño), en contraste a su intensificación durante la fase fría (eventos La Niña)<sup>26</sup>. Lo cierto es que la estructura vertical de la velocidad, densidad y transporte del Sistema de Corrientes Ecuatorial y el Sistema de Corrientes de Perú son muy distintas entre sí durante la fase cálida y fría del ENSO (e.g., las corrientes ecuatoriales subsuperficiales transportan significativamente más agua en el Pacífico tropical este durante La Niña que durante El Niño, mientras que la PCUC exporta más durante El Niño

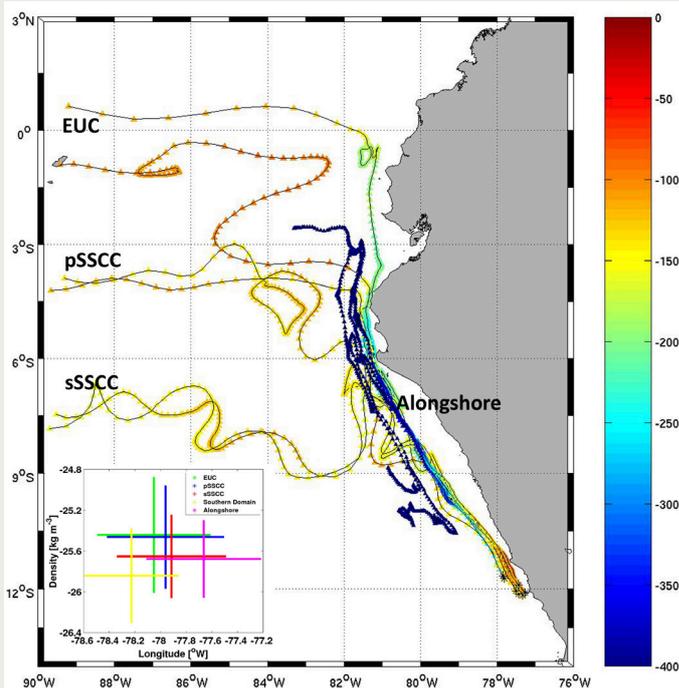


Figura 5. Caminos típicos de las fuentes de alimentación de la PCUC revelados por experimentos lagrangianos<sup>9</sup>. Los colores indican la profundidad de cada fuente. La PCUC es alimentada por cerca del 60% de los principales flujos subsuperficiales ecuatoriales (EUC, pSSCC, sSSCC) y por la recirculación a lo largo de la costa identificada como la Corriente Costera Profunda de Perú-Chile. Un diagrama presentando la distribución de densidad a lo largo de una sección de la PCUC, 11.5°S–12.5°S, es insertado en la esquina inferior izquierda (el centro de la cruz representa el promedio y las barras las desviaciones estándar).

que durante La Niña)<sup>22</sup>.

Por lo que, la capacidad de almacenar y transportar calor y agua del océano se ve alterada al mismo tiempo que se afectan los procesos acoplados océano-atmósfera, pudiendo repercutir en el clima de Perú. Por lo tanto, evaluar las variaciones locales y remotas de la circulación oceánica a diferentes escalas espacio-temporales y sus efectos sobre la columna de agua, es de crucial importancia y serán temas de futuras investigaciones.

## Referencias

1. Bakun, A. and S. J. Weeks, 2008: *The marine ecosystem of Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold?*, *Prog. Oceanogr.*, 79, 290–299.
2. Johnson, G. C., and M. J. McPhaden, 1999: *Interior Pycnocline Flow from the Subtropical to the Equatorial Pacific Ocean\**, *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 3073–3089.
3. Blanke, B., and S. Raynaud, 1997: *Kinematics of the Pacific Equatorial Undercurrent: An Eulerian and Lagrangian Approach from GCM Results*, *J. Phys. Oceanogr.*, 27, 1038–1053.
4. Cromwell, T. et al., 1954: *Equatorial Undercurrent in Pacific Ocean Revealed by New Methods*, *Science*, 119, 648–649.
5. Lukas, R., 1986: *The Termination of the Equatorial Undercurrent in the Eastern Pacific*, *Prog. Oceanogr.*, 16, 63–90.
6. Karnauskas, K. B. et al., 2007: *The Effect of the Galápagos Islands on the Equatorial Pacific Cold Tongue*, *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 1266–1281.
7. Ishida, A., 2005: *Equatorial Pacific subsurface countercurrents in a high-resolution global ocean circulation model*, *J. Geophys. Res.*, 110, C07014.
8. Flores, R. et al., 2009: *Variaciones de la extensión sur de la Corriente Cromwell frente al Perú entre los 3 y 14oS*, *Bol Inst Mar Perú*, XXIV (1-2), 39–52.
9. Montes, I. et al., 2010: *On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru-Chile Undercurrent*, *J. Geophys. Res.*, 115.
10. Donohue, K. A. et al., 2002: *Equatorial Pacific Subsurface Countercurrents: A Model–Data Comparison in Stream Coordinates*, *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 1252–1264.
11. Furue, R., et al., 2009: *Dynamics of the Northern Tsuchiya Jet\**, *J. Phys. Oceanogr.*, 39, 2024–2051.
12. Chavez, F. P. et al., 2008: *The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future*, *Prog. Oceanogr.*, 79, 95–105.
13. Colas, F., et al., 2008: *1997–1998 El Niño off Peru: A numerical study*, *Prog. Oceanogr.*, 79, 138–155.
14. Fiedler, P. C., 1994: *Seasonal and interannual variability of coastal zone color scanner phytoplankton pigments and winds in the eastern Pacific*, *J. Geophys. Res.*, 99, 18371–18384.
15. Chaigneau, A. et al., 2013: *Near-coastal circulation in the Northern Humboldt Current System from shipboard ADCP data*, *J. Geophys. Res. Ocean.*, 118, 5251–5266.
16. McCreary, J. P. et al., 1987: *On the dynamics of the California Current System*, *J. Mar. Res.*, 45(1), 1–32.
17. Huyer, A. et al., 1987: *Coastal upwelling off Peru during normal and El Niño times*, *J. Geophys. Res.*, 92, 14297–14307.
18. Brink, K. H. et al., 1983: *The physical environment of the Peruvian upwelling system*, *Prog. Oceanogr.*, 12(3), 285–305.
19. Huyer, A. et al., 1991: *The Peru Undercurrent: a study in variability*, *Deep - Sea Res.*, 38 (Suppl.1), 247–279.
20. Penven, P. et al., 2005: *Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach*, *J. Geophys. Res.*, 110, C10021.
21. Wyrtki, K., 1963: *Oceanography of the Eastern Equatorial Pacific Ocean*, *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 33–68.
22. Montes, I. et al., 2011: *Subsurface connections in the eastern tropical Pacific during La Niña 1999–2001 and El Niño 2002–2003*, *J. Geophys. Res.*, 116.
23. Wang, C., and P. C. Fiedler, 2006: *ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review*, *Prog. Oceanogr.*, 69, 239–266.
24. McPhaden, M. J. et al., 2006: *ENSO as an integrating concept in earth science*, *Science*, 314, 1740–1745.
25. Brainard, R. E., and D. R. McLain, 1987: *Seasonal and interannual subsurface temperature variability off Peru, 1952–1984*, in *The Peruvian Anchoveta and Its Upwelling Ecosystem: Three Decades of Change*, *ICLARM Stud. Rev. Ser.*, 15, edited by D. Pauly and I. Tsukayama, 14–45, IMARPE.
26. Izumo, T., 2005: *The equatorial undercurrent, meridional overturning circulation, and their roles in mass and heat exchanges during El Niño events in the tropical Pacific Ocean*, *Ocean Dyn.*, 55, 110–123.
27. Kessler, W. S., 2006: *The circulation of the eastern tropical Pacific: A review*, *Prog. Oceanogr.*, 69, 181–217.
28. Stewart, R. H., 2002: *Introduction to physical oceanography*, Department of Oceanography, Texas A & M University, Spring 2002 Edition, pp. 350, [http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng\\_textbook/PDF\\_files/book\\_pdf\\_files.html](http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/PDF_files/book_pdf_files.html).