

EL AFLORAMIENTO COSTERO FRENTE A LA COSTA PERUANA

Ivonne Montes¹

¹ Instituto Geofísico del Perú,
Lima, Perú



Ivonne Montes es doctora en Oceanografía de la Universidad de Concepción (Chile) y licenciada en Física de la Universidad Nacional del Callao (Perú). Desde el 2014 es investigadora científica del IGP. Es autora de varios artículos científicos y sus estudios están enfocados en entender el rol del océano sobre el clima y los procesos asociados al cambio climático (tal como la desoxigenación).

Palabras clave: afloramiento costero, vientos, dinámica de Ekman

Citar como Montes, I. (2023), El afloramiento costero frente a la costa peruana. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 10 n.º 01, págs. 4-7.

Resumen

El afloramiento costero es el mecanismo físico manejado por el viento con el que afloran aguas oceánicas frías, ricas en nutrientes y con bajo contenido de oxígeno, aspecto que sustenta la gran abundancia de plantas microscópicas oceánicas (productividad primaria) que, a nivel global, producen casi la mitad del oxígeno atmosférico que respiramos, absorben una gran cantidad de dióxido de carbono y suministran alimento a los peces. La presente revisión trata de ilustrar el conocimiento relacionado a la variabilidad y el cambio climático del afloramiento costero en el mar peruano, además de hacer un especial énfasis en la variabilidad observada durante los eventos El Niño.

Un poco de historia

El primero en medir la temperatura de la corriente localizada frente a la costa de nuestro país fue Alexander von Humboldt durante su visita al Perú en 1802. Esta corriente fría, que fluye a lo largo de la costa sudamericana hacia el ecuador, se conoce hoy como la corriente de Humboldt. Lejos de atribuirse su descubrimiento, se recoge en la biografía de von Humboldt una cita en la que él expresa su descontento por el mérito atribuido: “La existencia de esta corriente

ha sido conocida desde el siglo XVI por cada marinero joven acostumbrado a navegar desde Chile a Paita”. No obstante, la realidad es que Alexander fue el primero en aplicar el método científico para caracterizar la corriente.

Alexander von Humboldt, al igual que otros investigadores de la época, creía que el agua localizada frente a la costa peruana, y que fluye con la corriente de Humboldt, provenía, por transporte horizontal, principalmente del océano Austral, es decir, de la región Antártica, y era responsable de darle las características frías de la región. Sin embargo, en 1931, durante el crucero de investigación realizado a lo largo de la costa oeste de Sudamérica a bordo del barco de investigación británico William Scoresby, Eustache Rolfe Gunther logró dar a conocer que las características frías de la franja costera eran resultado del proceso de afloramiento, evidenciado, principalmente, a través de la estructura vertical de la temperatura del mar (Gunther, 1936). Durante el crucero se hicieron mediciones en secciones verticales que cubrían las primeras 100 o 200 millas de la costa, iniciando frente a Chile y terminando frente al Perú. Su hallazgo reveló, además, la importancia del factor meteorológico relacionado a la intensidad de viento (Cox et al., 1936). Cabe señalar que el hallazgo de Gunther fue catalogado como un subproducto de

las investigaciones del Comité de Descubrimiento, cuya mayoría de sus operaciones se centraron en la Antártida. En palabras del director de investigación del Comité de Descubrimiento, el Dr. Stanley Kemp, “el crucero se hizo durante el invierno antártico, cuando nuestro trabajo en el sur es mínimo”.

Los avances científicos han permitido conocer que esta corriente es parte de un sistema más complejo que, localmente, se mantiene por la acción del viento. En esta región, los vientos alisios del sudeste soplan constantemente hacia el ecuador a lo largo de la costa provocando un desplazamiento de las aguas costeras hacia el mar abierto. Esto dejaría un vacío en la costa que sería compensado por el ascenso de aguas más profundas que son frías y ricas en nutrientes. Este proceso, conocido como afloramiento costero, es responsable de mantener la riqueza y productividad pesquera en nuestro país, ya que, junto con las condiciones favorables de luz, sostiene el crecimiento del fitoplancton (plantas microscópicas) y determina el clima de la región.

Este mismo proceso también está activo en otras regiones del mundo, las cuales se conocen como Sistemas de Afloramiento de Borde Oriental (EBUS, por sus siglas en inglés). Geográficamente, estos abarcan los Sistemas de Corrientes de Canarias y Benguela en el océano Atlántico y los Sistemas de Corrientes de California y Humboldt en el océano Pacífico. Los EBUS brindan valiosos servicios ecosistémicos para la biosfera y la humanidad, siendo ampliamente conocidos por tener más peces por unidad de área que cualquier otra parte del océano global, lo que contribuye a las estrategias de seguridad de subsistencia y alimentación en muchos países.

Dinámica del afloramiento costero y procesos asociados

El afloramiento costero es generado por el esfuerzo del viento (τ) sobre la superficie del mar y el efecto de la rotación de la Tierra (Figura 1). La acción del viento se ejerce a través del (a) esfuerzo del viento a lo largo de la costa, en dirección hacia el ecuador (τ_y) y (b) el grado de giro del esfuerzo del viento (siendo el rotor del vector $= \partial\tau_y / \partial x - \partial\tau_x / \partial y$, expresado matemáticamente), los cuales generan dos procesos físicos para explicar la dinámica del afloramiento

costero. En las zonas costeras, el movimiento ascendente de agua más profunda (denominado afloramiento o surgencia) es generado para compensar el desplazamiento de las capas superficiales del mar hacia fuera de la costa que se produce por la acción del viento y la rotación de la Tierra (proceso denominado como transporte de Ekman). La rotación de la Tierra genera una fuerza aparente (fuerza de Coriolis) que produce que los cuerpos en movimiento se desvíen hacia la izquierda (derecha) en el hemisferio sur (hemisferio norte). Así, cuando el viento sopla de sur a norte a lo largo de la costa peruana, este se balancea con la fuerza de Coriolis generando que el agua en superficie se desplace hacia fuera de la costa. Esto provoca un vacío en la costa que es compensado con agua que aflora del fondo (entre los 50 y 150 m de profundidad). Con el rotor del esfuerzo del viento y la rotación de la Tierra se genera el ascenso (divergencia o afloramiento) o descenso (convergencia o hundimiento) del agua en la capa superficial, proceso conocido como el bombeo de Ekman. Estos dos procesos forman parte de la teoría propuesta por Van Walfrid Ekman en 1905, la cual es fundamental para estimar la medida o intensidad del afloramiento a través de los denominados índices (Bakun, 1973; 1975; Halpern, 2002; Jacox et al., 2018).

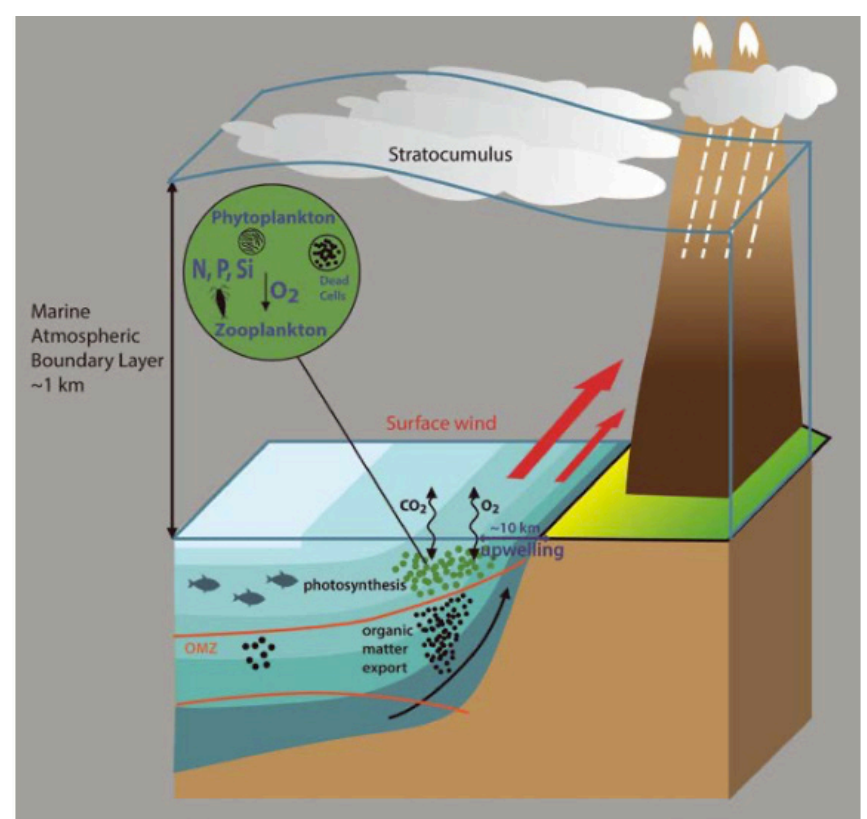


Figura 1. Esquema del sistema acoplado aire-mar-tierra en regiones de afloramiento costero extraído de Garçon et al. (2019). Se muestran los procesos químicos y biológicos que se desarrollan durante el proceso de afloramiento costero.

El proceso de afloramiento costero es muy importante para el clima y el ecosistema debido a que refleja la fuerte interacción (es decir, comunicación) entre el océano y la atmósfera, y conecta regiones profundas (por sobre los 200 metros de profundidad) del océano abierto con zonas costeras (Figura 1). Al ascender agua de zonas profundas, afloran aguas frías y ricas en nutrientes que constituyen las condiciones necesarias para sustentar la gran abundancia de fitoplancton. Básicamente, durante el proceso de afloramiento, el fitoplancton localizado en las capas superficiales del océano, donde hay suficiente disponibilidad de luz, obtiene los nutrientes necesarios para que se desarrolle la fotosíntesis. Durante el proceso de fotosíntesis, el fitoplancton remueve el carbono inorgánico disuelto (CO_2) en la atmósfera, generando materia orgánica rica en carbono —que constituye la base de la cadena trófica (es decir, la fuente de alimentación para organismos no-fotosintéticos)— y oxígeno.

Se estima que durante la fotosíntesis se produce casi la mitad del oxígeno que respiramos y se absorbe una gran cantidad de CO_2 , además de que se suministra alimento a los peces. Este proceso ocurre en un escala temporal que va de pocos días a varias semanas en la zona eufótica (es decir, en las capas superficiales del océano que dispone de luz, nutrientes y se encuentra en constante comunicación con la atmósfera). Cabe señalar que se le denomina ecosistema de afloramiento a aquel que involucra al proceso físico gatillado por la acción del viento, así como a los procesos químicos y biológicos que capturan CO_2 y generan materia orgánica para sostener la vida en el océano.

Los cambios a lo largo del tiempo de la intensidad del afloramiento costero son importantes en la fenología de los procesos fundamentales de los ecosistemas marinos, tales como el reclutamiento, la productividad y la estructura comunitaria (Wang et al., 2019). Por tanto, cualquier cambio en la intensidad y momento del afloramiento, así como en el flujo de nutrientes asociados, tienen impactos diferentes en el crecimiento del tamaño del fitoplancton (por ejemplo, Rykaczewski et al., 2008), lo cual determina la diversidad y población de los peces pelágicos comercialmente valiosos.

Variabilidad y cambio climático

La información más utilizada para determinar la intensidad del afloramiento frente a la costa peruana son las mediciones satelitales del vector del esfuerzo del viento sobre el océano. Asimismo, para completar los vacíos en las observaciones se han usado las salidas numéricas de modelos regionales y globales (Echevin et al., 2018) y, para evaluar el comportamiento futuro, se han utilizado las proyecciones de viento extraídas de los modelos acoplados de circulación general océano-atmósfera (Rykaczewski et al., 2015) que forman parte de los modelos climáticos del proyecto CMIP (Coupled Intercomparison Project) fase 5 y 6 (Bograd et al., 2023). Cabe señalar que el tamaño del grano eólico encontrado en testigos de sedimentos laminados ha sido usado como proxy para reconstruir la fuerza relativa del viento en áreas con alta erosión eólica (Briceño-Zuluaga et al., 2023).

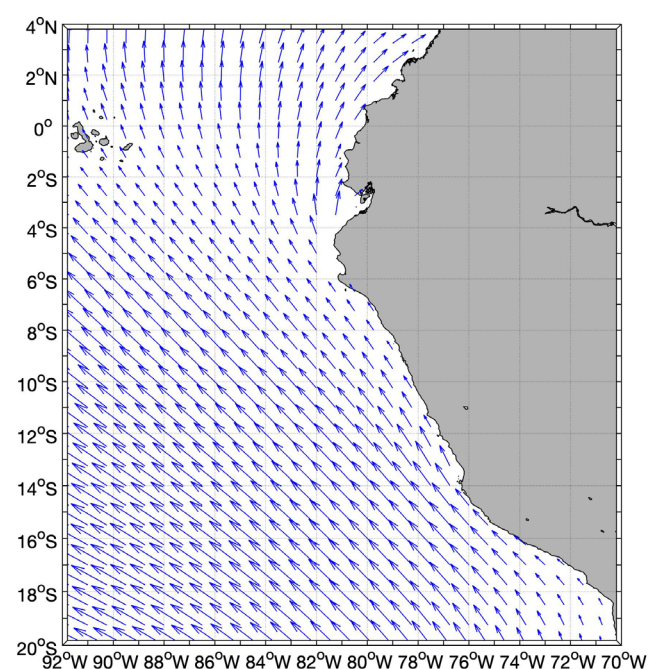


Figura 2. Distribución horizontal promedio del esfuerzo del viento durante el periodo 2000-2017 calculado con los datos del producto GEKCO (Geostrophic and Ekman Current Observatory, Sudre et al. [2013]).

En promedio, los vientos fluyen hacia el ecuador, es decir, de sur a norte (Figura 2), dando una situación favorable para que se desarrolle un afloramiento costero permanente (Gunther, 1936; Zuta y Guillén, 1970; Strub et al., 1998; Gutierrez et al., 2011). Un análisis climatológico del índice de afloramiento, calculado a partir de 26 años de datos de viento de

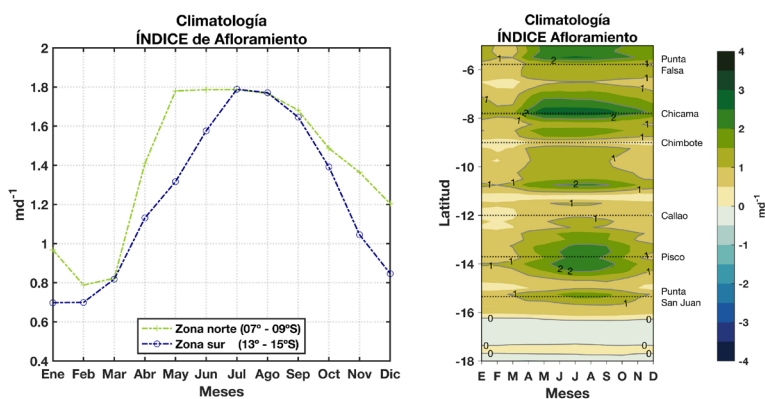


Figura 3. Promedio mensual del índice de afloramiento calculado en dos regiones representativas frente la costa peruana (norte y sur, panel izquierdo) y a lo largo de la costa (panel derecho) para el periodo 1992-2018. Se usaron los datos de viento superficial del producto blended generados a partir de ASCAT, QuikSCAT y WindSAT (Bentamy et al., 2017). Extraído de Manay et al. (2021).

un producto satelital en dos regiones diferentes frente al Perú y para toda la costa peruana, ha mostrado que, si bien es permanente e intenso, el afloramiento alcanza un máximo durante los meses de invierno y un mínimo en verano (Figura 3, Manay et al., 2021), denotando un marcado ciclo estacional.

A escala interanual, se ha observado que la variabilidad del afloramiento costero tiene un comportamiento diferenciado durante la fase cálida de El Niño-Oscilación Sur (ENSO), es decir, durante eventos tipo El Niño. Por ejemplo, durante el evento El Niño 97/98 se observó una intensificación significativa del viento superficial que estuvo acompañada de un incremento del afloramiento (Halpern et al., 2002; Carr et al., 2002; Croquette et al., 2004). En tanto, durante el Niño costero 2017, los vientos inicialmente se encontraban debilitados en la zona norte y luego se fueron incrementando a lo largo de costa y en la zona sur, lo cual estuvo acompañado de anomalías negativas en el bombeo de Ekman (Echevin et al., 2017).

Respecto a los cambios observados en décadas, el estudio realizado por Pardo et al. (2011) para el periodo 1948-2009 muestra un debilitamiento en la intensidad del afloramiento acompañado de una ligera tendencia al enfriamiento. Un estudio más reciente, donde se evalúa la frecuencia, intensidad y duración del afloramiento durante el periodo 1982-2019, muestra, por el contrario, una tendencia positiva,

es decir, una intensificación en el afloramiento sin mostrar cambios significativos en los vientos favorables al afloramiento. Por su parte, Briceño-Zuluaga et al. (2023), basados en la reconstrucción de la intensidad relativa del viento a partir de la variabilidad del diámetro medio geométrico de las partículas erosionadas por el viento encontradas en un testigo de sedimentos laminados extraído frente a Pisco, muestra un intensificación progresiva de los vientos favorables al afloramiento durante los últimos 150 años.

Bajo escenarios futuros, las proyecciones señalan un debilitamiento ligero de los vientos favorables para el afloramiento (Goubanova et al., 2010; Belmadani et al., 2013; Chamorro et al., 2021) acompañado de un decrecimiento en el transporte y bombeo de Ekman (Oerder et al., 2015). Asimismo, un ciclo estacional del viento ligeramente más marcado con aumento ligero de vientos en invierno y debilitamiento en verano.

Si bien las investigaciones previas han permitido caracterizar y entender la dinámica del afloramiento costero frente a la costa peruana, la complejidad del sistema requiere que se establezcan mediciones continuas de vientos y una metodología (por ej., establecer un índice estándar) que mida la intensidad del afloramiento de manera más integral (es decir, incluyendo las variaciones de la temperatura, los nutrientes, entre otros) a fin de caracterizar mejor la salud del sistema de corrientes de Humboldt.

Referencias

- Abrahams, A., Schlegel, R.W., & Smit, A.J. (2021). Variation and Change of Upwelling Dynamics Detected in the World's Eastern Boundary Upwelling Systems. *Front. Mar. Sci.*, 8:626411. doi: 10.3389/fmars.2021.626411
- Bakun, A. (1973). Coastal upwelling indices, West Coast of North America, 1946-71. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service.
- Bakun, A. (1975). Daily and weekly upwelling indices, West Coast of North America. *NOAA Tech. Rpt.*, 16.
- Belmadani, A., Echevin, V., Codron, F., Takahashi, K., & Junquas, C. (2014). What dynamics drive future wind scenarios for coastal upwelling off Peru and Chile?. *Clim. Dyn.*, 43, 1893-1914. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2015-2>

- Bentamy, A., Grodsky, S.A., Elyouncha, A., Chapron, B., & Desbiolles, F. (2017). Homogenization of scatterometer wind retrievals. *International Journal of Climatology*, 37(2), 870–889. <https://doi.org/10.1002/joc.4746>
- Bograd, S.J., Jacox, M.G., Hazen, E.L., Lovecchio, E., Montes, I., Pozo Buil, M., ... Rykaczewski, R. (2023). Climate change impacts on eastern boundary upwelling systems. *Annual Review of Marine Science*, 15(1). (PMID: 35850490). <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-021945>
- Briceño-Zuluaga, F., Flores-Aqueveque, V., Nogueira, J., Castillo, A., Cardich, J., Rutllant, J., ... Gutierrez, D. (2023). Surface wind strength and sea surface temperature connections along the south peruvian coast during the last 150 years. *Aeolian Research*, 61, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2023.100855>
- Carr, M.E., Strub, P.T., Thomas, C.T., & Blanco, J.L. (2002). Evolution of 1996-1999 La Niña and El Niño conditions off the western coast South America: A remote sensing perspective. *J. Geophys. Res.*, 107(C12), 3236. doi:10.1029/2001JC001183
- Chamorro, A., Echevin, V., Dutheil, C., Tam, J., Gutierrez, D., & Colas, F. (2021). Projection of upwelling-favorable winds in the Peruvian upwelling system under the RCP8.5 scenario using a high-resolution regional model. *Clim. Dyn.*, 57, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05689-w>
- Cox, P., Kemp, S., Mill, H.R., Matthews, H.A., Gunther, E.R., & Matthews, Dr. (1936). Variations in Behaviour of the Peru Coastal Current: With an Historical Introduction: Discussion. *The Geographical Journal*, 88(1), 61–65. <https://doi.org/10.2307/1786861>
- Croquette, M., Gérard, E., & Vincent, E. (2004). On the contributions of Ekman transport and pumping to the dynamics of coastal upwelling in the South-East Pacific. *Gayana (Concepción)*, 68(2, Supl. TIProc), 136-141. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382004000200025>
- Echevin, V., Colas, F., Espinoza-Morriberon, D., Vasquez, L., Anculle, T., & Gutierrez, D. (2018). Forcings and Evolution of the 2017 Coastal El Niño Off Northern Peru and Ecuador. *Front. Mar. Sci.*, 5:367. doi: 10.3389/fmars.2018.00367
- García-Reyes, M., Sydeman, W.J., Schoeman, D.S., Rykaczewski, RR, Black, B.A., Smit, A.J. & Bograd, S.J. (2015). Under Pressure: Climate Change, Upwelling, and Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Front. Mar. Sci.*, 2:109. doi: 10.3389/fmars.2015.00109
- Garcon, V., Dewitte, B., Montes, I., & Goubanova, K. (2019). Section 3.4 Land-sea-atmosphere interactions exacerbating ocean deoxygenation in Eastern Boundary Upwelling Systems (EBUS). In 'Laffoley, D. & Baxter, J.M. (eds.). *Ocean deoxygenation: Everyone's problem - Causes, impacts, consequences and solutions*. Gland, Switzerland: IUCN. xxii+562pp.
- Goubanova, K., Echevin, V., Dewitte, B., Codron, F., Takahashi, K., Terray, P., & Vrac, M. (2011) Statistical downscaling of sea surface wind over the Peru-Chile upwelling region: diagnosing the impact of climate change from the ipsl-cm4 model. *Clim Dyn* 36, 1365–1378. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0824-0>
- Gunther, E.R. (1936) A report on oceanographic investigations in the Peru Coastal Current. *Discovery Rep.*, 13, 107-276.
- Gutiérrez, D., Bouloubassi, I., Sifeddine, A., Purca, S., Goubanova, K., Graco, M., ... Ortlieb, L. (2011). Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, 38(7).
- Halpern, D. (2002). Offshore Ekman transport and Ekman pumping off Peru during the 1997–1998 El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 19.1–19.4.
- Jacox, M. G., Edwards, C. A., Hazen, E. L., & Bograd, S. J. (2018). Coastal upwelling revisited: Ekman, Bakun, and improved upwelling indices for the U.S. West Coast. *J. Geophys. Res. Oceans*, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JC014187>
- Manay, R., Montes, I., Campos, F., & Segura, B. (2021). El afloramiento costero en el sistema de corrientes de Humboldt frente a Perú. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 8 N.º 04, págs. 16-21.
- Oerder, V., Colas, F., Echevin, V., Codron, F., Tam, J., & Belmadani, A. (2015). Peru-Chile upwelling dynamics under climate change. *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 1152–1172, doi:10.1002/2014JC010299
- Pardo, P.C., Padín, X. A., Gilcoto, M., Farina-Busto, L., & Pérez, F.F. (2011). Evolution of upwelling systems coupled to the long-term variability in sea surface temperature and Ekman transport. *Clim. Res.*, 48, 231–246. <https://doi.org/10.3354/cr00989>
- Rykaczewski, R.R., David, M., & Checkley, J. (2008). Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(6), 1965–1970. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711777105>
- Silva, N., Rojas, N., & Fedele, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16), 1004–1020. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.013>
- Strub, P.T., Mesias, J.M., Montecino, V., Rutllant, J., & Salinas, S. (1998). Coastal ocean circulation off western South America, in *The Sea, The Global Coastal Ocean*, vol. 11, edited by A. R. Robinson and K. H. Brink, pp. 273-314, John Wiley, Hoboken, N. J.
- Sudre, J., Maes, C., & Garcon, V. (2013). On the global estimates of geostrophic and Ekman surface currents. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 3, <https://doi.org/10.1215/21573689-2071927>
- Zuta, S. y Guillén, O.G. (1970). Oceanografía de las aguas costeras del Perú. *Bol. Inst. Mar Perú*, 2: 157-324.