

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

VARIABILIDAD DE LOS FLUJOS DE CO₂ DURANTE EPISODIOS EL NIÑO Y LA NIÑA COSTEROS

Rodrigo Mogollón¹

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en evaluar la influencia de los episodios El Niño y La Niña costeros en las tasas de emisión de CO₂ en la región más productiva del sistema norte de la corriente del Humboldt. Se encontró que el mar peruano se comporta como un emisor, relativamente débil, de CO₂ durante un episodio promedio de El Niño costero y se estimó que 24.7 toneladas métricas de carbono podrían estar dejando de ser emitidas hacia la atmósfera durante estas condiciones como consecuencia de la intensificación de los vientos costeros que inducen un intercambio gaseoso más intenso que compensa el debilitamiento del gradiente de presiones parciales de CO₂ entre el océano y la atmósfera. En contraste, durante un episodio promedio de La Niña costera, la costa peruana se comporta como un fuerte emisor de CO₂ atmosférico, que contribuye con 3.3 millones de toneladas métricas de carbono adicionales a las que se emiten en condiciones neutrales (53.1 Tg C año⁻¹, periodo 1998-2015). Este comportamiento de fuente de CO₂ durante un episodio promedio de La Niña costera es consecuencia de un afloramiento costero más intenso que trae aguas con mayores concentraciones de carbono inorgánico disuelto hacia la superficie.

El artículo científico original se encuentra en: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103240>

Palabras clave: El Niño Oscilación Sur, Flujos de CO₂ en la interfase aire-mar, Sistema de corriente de Humboldt, CO₂ del Sistema carbonato, variabilidad interanual.

AFILIACIÓN:

1. Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Callao

Citar como: Mogollón, R. (2021). Variabilidad de los flujos de CO₂ durante episodios El Niño y La Niña costeros. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, Vol. 8 n.º 02. págs. 5-11.

INTRODUCCIÓN

El sistema norte de la corriente del Humboldt (SNCH) depende particularmente de las condiciones asociadas al modo de variabilidad de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), el cual impacta fuertemente la circulación atmosférica y oceánica. Debido a la cercanía del SNCH con el ecuador y las directas conexiones subsuperficiales con el sistema de corrientes ecuatoriales (Montes et al., 2010), las fases de ENOS afectan la posición e intensidad de las principales corrientes en el mar peruano, como es el caso de la corriente subsuperficial Perú-Chile, que provee de nutrientes a lo largo de la costa peruana. En consecuencia, cualquier perturbación asociada a ENOS tiene implicancias desde una perspectiva física y biogeoquímica (Colas et al., 2008; Montes et al., 2010; Espinoza-Morriberón et al., 2017; Mogollón & Calil, 2017). Por tal motivo, es importante cuantificar potenciales efectos derivados de ENOS, no sólo desde una perspectiva global, sino también desde una perspectiva local y, además, dentro de un contexto climático, considerando la fragilidad del sistema carbonato oceánico y el intercambio de flujos de dióxido de carbono (CO_2) con la atmósfera en las regiones costeras que son altamente productivas.

Comúnmente, se asocia la fase cálida de ENOS o El Niño con condiciones desfavorables para la pesca, es decir, menores tasas de producción primaria, menor suministro de nutrientes, entre otros (Ñiquen & Bouchon, 2004). Sin embargo, El Niño podría ser considerado como un evento favorable en otros aspectos, dado que se consumen grandes cantidades de energía térmica a través de la evaporación en el Pacífico este, lo cual en promedio tiende a enfriar los océanos globales (Trenberth et al., 2002). También, Bakun & Weeks (2008) sugirieron que El Niño reinicia el ecosistema marino peruano desde un estado base, que es intrínsecamente muy productivo, al interrumpir cualquier *feedback* negativo de largo plazo que potencialmente pueda afectar la productividad. En relación a los gases, El Niño también jugaría un papel positivo, ya que al demostrarse que es una fase de alta oxigenación (Montes et al., 2014; Espinoza Morriberón et al., 2018), se suprime fuertemente la emisión de óxido nitroso (un gas de efecto invernadero 300 veces más dañino que el propio CO_2), el cual es principalmente generado cuando el océano está bajo condiciones subóxicas (Mogollón & Calil, 2017). Muchos trabajos han indicado que el intercambio de CO_2 en la interfase aire-mar es altamente influenciado por el ENOS; sin embargo, su impacto neto sobre el mar peruano no ha sido cuantificado, puesto que la mayoría de las investigaciones se abordan desde una perspectiva de gran escala con un enfoque en la región oceánica del Pacífico ecuatorial y tropical. Por ejemplo, Feely et al. (1999) mostraron una reducción en la emisión de los flujos de CO_2 durante El Niño 1991-1994. Chavez et al. (1999) también encontraron que el océano Pacífico retuvo cerca de 0.7 Pg de carbono durante El Niño 1997-1998. Estudios realizados en otras regiones, como el sistema de corrientes de California en el Pacífico norte (Chavez et al., 1999; Friederich et al., 2002), sugieren que existiría un cambio en la naturaleza de los flujos de CO_2 , es decir, de emisor a sumidero, a causa de ENOS. En el caso del SNCH, las observaciones y simulaciones muestran que no cambia su naturaleza de emisor bajo casi ninguna circunstancia (Friederich et al., 2008; Mogollón & Calil, 2018).

En el presente estudio se abordan básicamente tres preguntas:

¿Cuál es la variabilidad espacial de los factores que controlan el flujo de CO_2 durante un episodio promedio de El Niño/La Niña y en condiciones normales? ¿Cómo contribuyen la velocidad del viento, el contenido de CO_2 en el agua de mar, y la variabilidad conjunta de ambos en la magnitud del flujo resultante de CO_2 durante episodios El Niño/La Niña? ¿Cuánto carbono desde la parte costera más productiva y la adyacente franja ecuatorial del SNCH se retiene o libera durante un episodio promedio de El Niño/La Niña?

Para este estudio se usaron resultados de simulaciones globales validadas, las cuales son producidas en MERCATOR-Ocean, proporcionadas por el servidor de disseminación del Copernicus (CMEMS) (<https://marine.copernicus.eu/>). El experimento consiste en una simulación hidrodinámica en retrospectiva que inicia en el año 1993, llamada GLORYS2V4, la cual también alimentó un experimento numérico regional que contiene la biogeoquímica. Estas simulaciones son a 25 km de resolución horizontal y en promedios mensuales. El periodo de análisis fue entre 1998 y 2015.

COMPOSICIÓN DE EL NIÑO/LA NIÑA COSTEROS

Se utilizó el Índice Costero El Niño (ICEN) (<http://met.igp.gob.pe/variabclim/indices.html>) para considerar sólo periodos El Niño costero (de aquí en adelante El Niño) que son categorizados como “fuerte/extraordinario”, y periodos La Niña costera (de aquí en adelante La Niña) que son consideradas como “fuerte”. De esta forma, se podrá inferir un estado promedio que represente las anomalías inducidas por un episodio genérico El Niño o La Niña para cada variable de interés. Se hicieron composiciones para 3 variables diferentes: la primera que represente la física del océano; la segunda, la física de la atmósfera; y la tercera, el sistema de carbonatos en el agua de mar. Estas variables fueron la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés), la velocidad del viento, y el carbono inorgánico disuelto (DIC, por sus siglas en inglés), respectivamente. Los resultados indicaron que durante un episodio El Niño, la SST se encuentra anómalamente más caliente que en condiciones normales, lo cual es bien conocido, dada la advección de aguas cálidas proveniente del sistema ecuatorial y la influencia de las ondas Kelvin y subsecuentes ondas atrapadas en la costa (CTW, por sus siglas en inglés) (Echevin et al., 2014). Contraintuitivamente, durante un episodio El Niño existe un moderado incremento en la velocidad del viento con dirección favorable para el afloramiento costero, a pesar de la observada disminución del viento en el Pacífico ecuatorial. Este incremento de la velocidad del viento costero (~ 1 m/s) podría deberse a gradientes térmicos meridionales, conocido como “el efecto Chamorro” (Chamorro et al., 2018). En contraste, durante La Niña, la tensión del viento disminuye (~ 0.5 m/s) pero aún mantiene su dirección favorable para el afloramiento costero. En relación al DIC, se inducen anomalías positivas y negativas durante un episodio El Niño y La Niña, respectivamente. Esto era de esperarse dada la relación lineal inversa entre DIC y SST. Sin embargo, la explicación podría ser más compleja debido a la depresión de la termoclina durante los episodios El Niño, que hace que las aguas que afloran contengan una menor concentración de DIC. En contraste, durante un episodio La Niña, el afloramiento resulta más eficiente dado que la corriente subsuperficial, que suele ser abundante en nutrientes y DIC, se encuentra en una posición más estratégica (Colas et al., 2008; Montes et al., 2010, 2011; Espinoza-Morriberón et al., 2017). Esto hace que las aguas-fuente, que son transportadas a la superficie, lleven mayores concentraciones de DIC que lo habitual. Es importante resaltar que, aunque el mar peruano esté anómalamente más frío que en condiciones neutrales, el efecto que tiene la disminución de la SST en disminuir la $p\text{CO}_2$ oceánica (a través de la solubilidad termal) es mucho menor que la influencia del afloramiento de aguas ricas en DIC en aumentar la $p\text{CO}_2$ oceánica (Mogollón & Calil, 2018), y, como consecuencia, el mar peruano emitiría CO_2 a la atmósfera a una mayor tasa durante los periodos de La Niña. Si bien estas consideraciones son un tanto especulativas, proveen, al menos, una explicación plausible a las anomalías antes descritas.

En la Figura 1 se muestran las composiciones resultantes para todos los factores involucrados en el cálculo del flujo de CO_2 . Se considera la diferencia de las presiones parciales de CO_2 entre el océano y la atmósfera ($\Delta p\text{CO}_2$), la velocidad de transferencia del CO_2 (K_w) y la solubilidad del CO_2 (K_0). Cuantitativamente, durante un episodio El Niño promedio, $\Delta p\text{CO}_2$ y K_0 disminuyen en aproximadamente $35 \mu\text{atm}$ y $1.5 \text{ mol m}^{-3} \text{ atm}^{-1}$, respectivamente; mientras que K_w aumenta en 1 cm h^{-1} . Sin embargo, estos valores varían dependiendo del lugar de interés. Durante un episodio de La Niña promedio, los patrones son opuestos, aunque en menor magnitud, por lo que se podría decir que existe una respuesta asimétrica.

En promedio, el SNCH es un fuerte emisor de CO_2 (del océano hacia la atmósfera), tal como se aprecia en la Figura 1a donde el flujo es positivo en casi toda la región. Sin embargo, existe una fuerte disminución de su naturaleza fuente durante un episodio El Niño promedio (Figura 1b) y un relativo incremento durante un episodio La Niña promedio (Figura 1c). Considerando que su estado promedio está por arriba de los $4 \text{ mol C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, las anomalías ($\pm 2 \text{ mol C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) que se inducen durante las episodios El Niño/La Niña no llevarían al SNCH a un estado de sumidero de CO_2 .

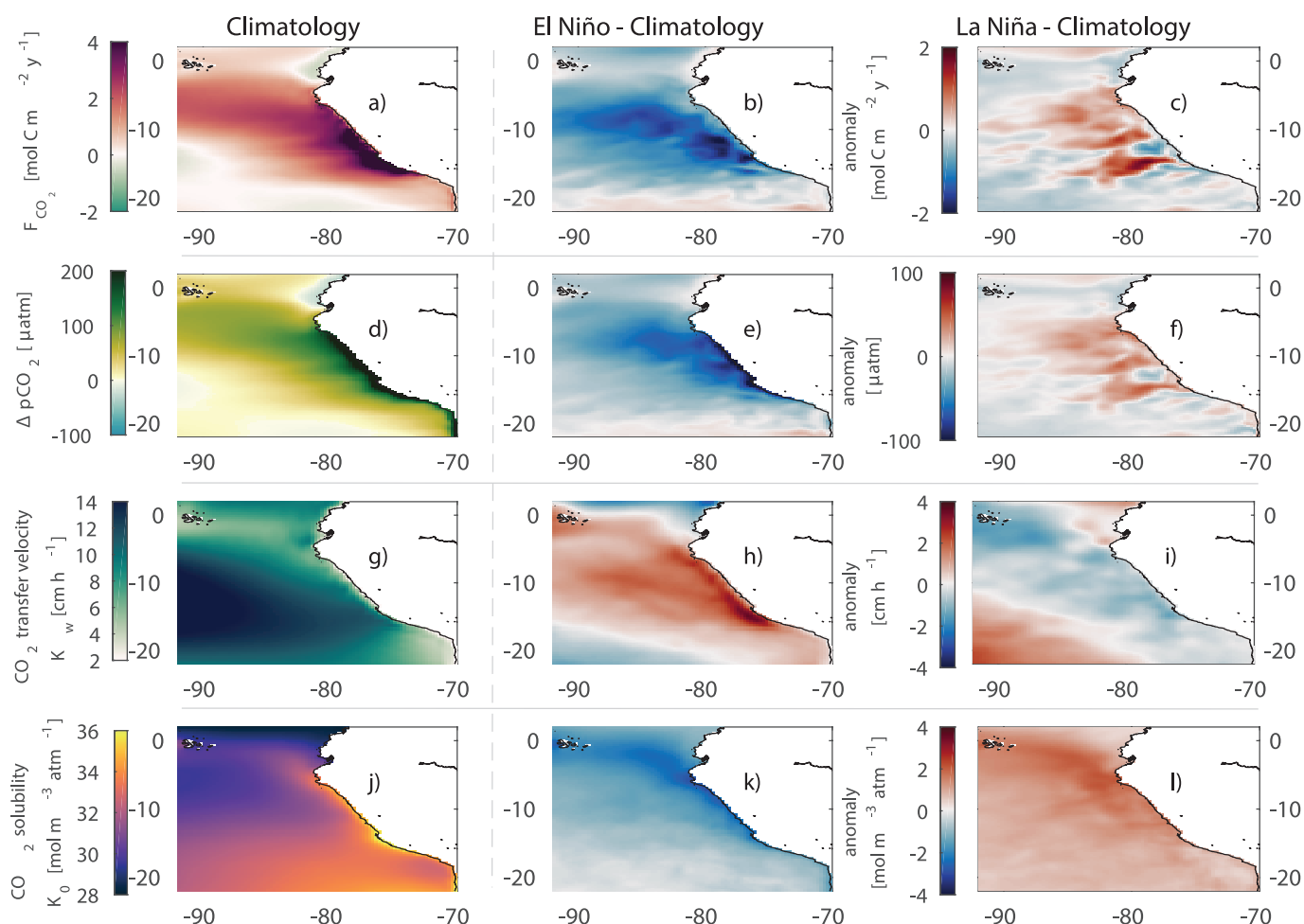


Figura 1. a) Promedio anual de los flujos de CO_2 (F_{CO_2}). Sus respectivas anomalías inducidas durante un episodio El Niño y La Niña promedio se muestran en las columnas del medio y de la derecha, paneles b y c, respectivamente. Análogamente, paneles d, e y f corresponden a la diferencia de las presiones parciales de CO_2 entre el océano y la atmósfera como variable $\Delta p\text{CO}_2$, g, h e i muestran velocidad de transferencia del CO_2 como variable K_w y j, k y l corresponden a la variable K_0 que representa la solubilidad del CO_2 .

SENSIBILIDAD DE LOS FLUJOS DE CO_2

Para cuantificar estadísticamente las contribuciones relativas de cada factor de la ecuación del flujo de CO_2 a su propia variabilidad interanual, se siguió la metodología propuesta en Doney et al. (2009), la cual consiste en hacer una descomposición de Reynolds a cada factor para poder separar estadísticamente las anomalías y la media del campo instantáneo. Los factores son: $\Delta p\text{CO}_2$ y $K_w \cdot K_0$. El primero está directamente relacionado con el contenido de CO_2 en el agua de mar, ya que una mayor concentración de DIC aumentaría la $p\text{CO}_2$ en el agua de mar y consecuentemente la $\Delta p\text{CO}_2$, debido a que la $p\text{CO}_2$

atmosférica no varía mucho estacionalmente (Mogollón, R. 2020). El segundo factor está relacionado, en conjunto, con la SST y la velocidad del viento, debido a la propia parametrización de K_w y K_0 (con una conocida menor influencia de la salinidad). Sin embargo, para facilitar el análisis, se asumió que la variabilidad asociada al factor $(K_w K_0)$ refleja únicamente los cambios en la velocidad del viento. Esto es aceptable dada la opuesta influencia de la SST en K_w y K_0 , los cuales tienden a compensarse.

Los términos involucrados en la variabilidad interanual de los flujos de CO_2 (Figura 2a) corresponden a las variaciones en el viento (Figura 2b), contenido de CO_2 (Figura 2c) y la contribución del viento y del contenido de CO_2 , en conjunto (Figura 2d). Dicho en otras palabras, y a modo de ejemplo, la Figura 2c muestra cómo serían las anomalías espaciales del flujo de CO_2 si se induce una variación en $\Delta p\text{CO}_2$ y se mantiene constante el resto de los factores.}

Como se aprecia, la variabilidad del flujo de CO_2 es más sensible a las variaciones de la $\Delta p\text{CO}_2$ (Figura 2c) que a la asociada a los cambios en la velocidad del viento (Figura 2b), mientras que la contribución asociada a cambios en el contenido de CO_2 y en el viento en conjunto es de menor proporción (Figura 2d). La Figura 2e muestra la variación temporal de estos términos y se nota más claramente que las variaciones del viento (en azul) tienden a compensar parcialmente las variaciones en el contenido de CO_2 (en rojo).

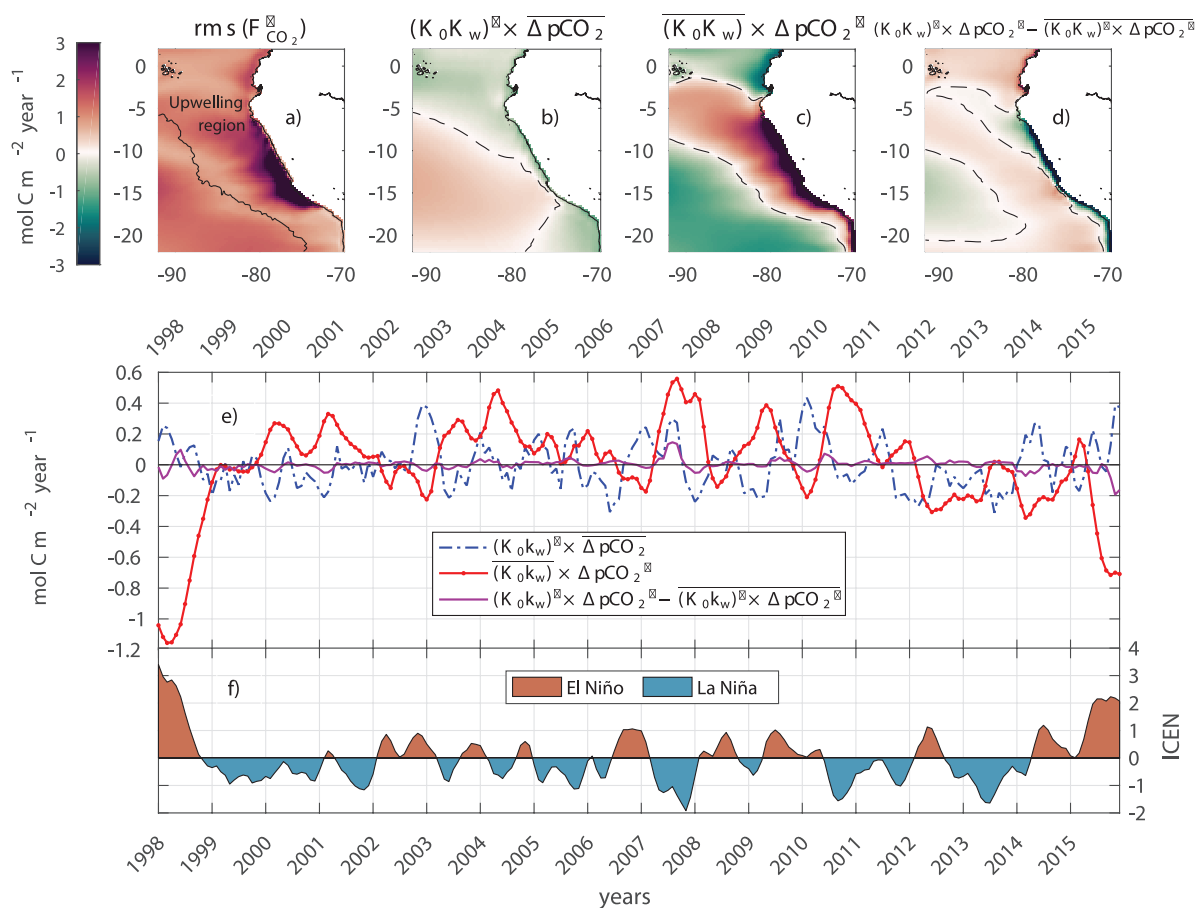


Figura 2. a) Sensibilidad de los factores involucrados en el cálculo del flujo de CO_2 . b) Contribución de la velocidad del viento. c) Contribución del contenido de CO_2 en el agua de mar. d) Contribución del viento y del contenido de CO_2 en conjunto. e) Serie temporal de los términos. f) ICEN.

FLUJOS DE CARBONO INTEGRADO

Al integrar espacialmente los flujos de CO_2 a lo largo de la región de afloramiento costero y ecuatorial adyacente del SNCH (representado una área total de $2.86 \times 10^6 \text{ km}^2$), se estima una tasa de stock de carbono de 28.4 y 56.4 Tg C año^{-1} durante un episodio promedio El Niño y La Niña, respectivamente. Si se considera que un episodio promedio El Niño/La Niña dura aproximadamente un año, y dado que el promedio climatológico se calculó en 53.1 Tg C año^{-1} (periodo 1998-2015), se puede inferir que se deja de emitir, aproximadamente, 24.7 Tg C durante un episodio El Niño. Similarmente, se infiere que 3.3 Tg C son emitidos adicionalmente hacia la atmósfera durante un episodio de La Niña promedio. En otras palabras, El Niño representaría un periodo donde la región más productiva del SNCH retiene cerca de 24.7 millones de toneladas métricas de carbono que normalmente se hubieran perdido hacia la atmósfera.

CONCLUSIONES

En conclusión, durante eventos El Niño, se aprecia que la contribución del aumento de la velocidad del viento tiende a aumentar el flujo de CO_2 , del océano a la atmósfera, al estimular el intercambio gaseoso en la interfase aire-mar. Contrariamente, la contribución de las variaciones en la $\Delta p\text{CO}_2$ induce a una disminución en la magnitud de los flujos de CO_2 , lo cual es concordante con la observada disminución de DIC durante la fase El Niño. Por otro lado, durante eventos La Niña, el comportamiento es opuesto.

Se demostró también otro efecto positivo asociado a un episodio El Niño, pues una gran cantidad de carbono se deja de emitir hacia la atmósfera, lo que indica que las costas altamente productivas, como el mar peruano, son regiones clave para un cómputo más realista del balance de carbono a nivel global. Estas generalizaciones deben ser tomadas con cautela porque cada episodio El Niño/La Niña tiene características únicas y lo que aquí se muestra corresponde a un comportamiento promedio relacionado al índice costero considerado.

REFERENCIAS

- Bakun, A., & Weeks, S. J. (2008). The marine ecosystem off Peru: what are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold?. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 290-299.
- Chamorro, A., Echevin, V., Colas, F., Oerder, V., Tam, J., & Quispe-Ccalluari, C. (2018). Mechanisms of the intensification of the upwelling-favorable winds during El Niño 1997–1998 in the Peruvian upwelling system. *Climate Dynamics*, 51(9), 3717-3733.
- Chavez, F. P., Strutton, P. G., Friederich, G. E., Feely, R. A., Feldman, G. C., Foley, D. G., & McPhaden, M. J. (1999). Biological and chemical response of the equatorial Pacific Ocean to the 1997-98 El Niño. *Science*, 286(5447), 2126-2131.

Colas, F., Capet, X., McWilliams, J. C., & Shchepetkin, A. (2008). 1997–1998 El Niño off Peru: A numerical study. *Progress in Oceanography*, 79(2-4), 138-155.

Doney, S. C., Lima, I., Feely, R. A., Glover, D. M., Lindsay, K., Mahowald, N., ... & Wanninkhof, R. (2009). Mechanisms governing interannual variability in upper-ocean inorganic carbon system and air–sea CO₂ fluxes: Physical climate and atmospheric dust. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(8-10), 640-655.

Echevin, V., Albert, A., Lévy, M., Graco, M., Aumont, O., Piétri, A., & Garric, G. (2014). Intraseasonal variability of nearshore productivity in the Northern Humboldt Current System: The role of coastal trapped waves. *Continental Shelf Research*, 73, 14-30.

Espinoza & Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Ledesma, J., Vásquez, L., & Graco, M. (2017). Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(7), 5423-5444.

Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Gutierrez, D., Graco, M., ... & Quispe-Ccalluari, C. (2018). Oxygen variability during ENSO in the tropical South Eastern Pacific. *Frontiers in Marine Science*, 5, 526.

Feely, R. A., Wanninkhof, R., Takahashi, T., & Tans, P. (1999). Influence of El Niño on the equatorial Pacific contribution to atmospheric CO₂ accumulation. *Nature*, 398(6728), 597-601.

Friederich, G. E., Walz, P. M., Burczynski, M. G., & Chavez, F. P. (2002). Inorganic carbon in the central California upwelling system during the 1997–1999 El Niño–La Niña event. *Progress in Oceanography*, 54(1-4), 185-203.

Friederich, G. E., Ledesma, J., Ulloa, O., & Chavez, F. P. (2008). Air–sea carbon dioxide fluxes in the coastal southeastern tropical Pacific. *Progress in Oceanography*, 79 (2-4), 156-166.

Mogollón, R., & Calil, P. H. (2017). On the effects of ENSO on ocean biogeochemistry in the Northern Humboldt Current System (NHCS): A modeling study. *Journal of Marine Systems*, 172, 137-159.

Mogollón, R., & Calil, P. H. (2018). Modelling the mechanisms and drivers of the spatiotemporal variability of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the Northern Humboldt Current System. *Ocean Modelling*, 132, 61-72.

Mogollón, R. (2020). ENSO-driven CO₂ efflux variability and the role of the upwelling region on the carbon exchange in the Northern Humboldt Current System. *Journal of Marine Systems*, 201, 103240.

Montes, I., Colas, F., Capet, X., & Schneider, W. (2010). On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru & Chile Undercurrent. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115, C09003, doi:10.1029/2009JC005710.

Montes, I., Schneider, W., Colas, F., Blanke, B., & Echevin, V. (2011). Subsurface connections in the eastern tropical Pacific during La Niña 1999–2001 and El Niño 2002–2003. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116, C12022, doi:10.1029/2011JC007624.

Montes, I., Dewitte, B., Gutknecht, E., Paulmier, A., Dadou, I., Oschlies, A., & Garçon, V. (2014). High resolution modeling of the Eastern Tropical Pacific oxygen minimum zone: Sensitivity to the tropical oceanic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8), 5515-5532.

Ñiquen, M., & Bouchon, M. (2004). Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep sea research part II: topical studies in oceanography*, 51(6-9), 563-574.

Trenberth, K. E., Stepaniak, D. P., & Caron, J. M. (2002). Interannual variations in the atmospheric heat budget. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D8), doi:10.1029/2000JD000297