

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

AVANCES EN EL CONOCIMIENTO Y LA PREDICCIÓN DE EL NIÑO Y SU DIVERSIDAD EN EL PERÚ*

Ken Takahashi Guevara¹

RESUMEN

1. Los eventos El Niño con mayor impacto en el Perú, particularmente asociados a lluvias intensas, inundaciones y huaicos, son de dos tipos: global y costero, y se prevé que el cambio climático exacerbará dichos impactos.

2. El Niño extremo de escala global (p. ej., 1878, 1983, 1998) se debe a una amplificación de los mecanismos océano-atmósfera típicos de ENOS. La capacidad internacional para su predicción ha avanzado sustancialmente, aunque se subestiman los impactos en nuestra costa.

3. El Niño costero (p. ej., 1891, 1925, 2017) está asociado a mecanismos océano-atmósfera locales y se conoce relativamente poco. La capacidad de predicción es limitada aún, por lo que el IGP está desarrollando un modelo océano-atmósfera de alta resolución y modelos de inteligencia artificial para la predicción de El Niño costero con mayor tiempo de anticipación y exactitud.

Palabras clave: *El Niño-Oscilación Sur, El Niño, eventos climáticos extremos, cambio climático*

AFILIACIÓN:

1. Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

* El presente trabajo se presentó en el evento "Ciencia y Tecnología Ambiental 2022"

Citar como Takahashi K. (2022). Avances en el conocimiento y la predicción de El Niño y su diversidad en el Perú. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 9 n.º 07, págs. 5-13.

INTRODUCCIÓN

LA CORRIENTE DEL NIÑO

El fenómeno conocido como El Niño está documentado como tal en el Perú desde finales del siglo XXI e inicios del siglo XX. En 1891, el evento de ese año fue reportado en el Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima (Carranza, 1891) como una corriente marina cálida del norte que produjo un fuerte aumento en la temperatura y humedad del aire, lo cual a su vez habría generado las fuertes lluvias e inundaciones en la costa norte del Perú. Dicha cadena de eventos es lo que posteriormente en el Perú se ha asociado a los eventos El Niño, aunque recién en 1893 otro autor en la misma publicación (Carrillo, 1893) introdujo el término al indicar lo siguiente:

Los marinos paiteños que navegan frecuentemente cerca de la costa y en embarcaciones pequeñas, ya al norte ó al sur de Paita, conocen esta corriente y la denominan corriente del Niño, sin duda porque ella se hace más visible después de la Pascua de Navidad.

Similarmente, en el año 1925 ocurrió otro intenso evento, el cual fue documentado en detalle por Murphy (1926) en cuanto a su efectos en la costa y el ecosistema marino, mientras que Schott (1931) documentó las características oceanográficas. Este último autor propuso que los vientos del norte a lo largo de la costa habrían tenido un rol importante en la ocurrencia de este evento El Niño. Sin embargo, esta propuesta fue luego desfavorecida por la comunidad científica, como se describe más abajo. Cabe resaltar el trabajo de Eguiguren (1894), quien hizo una cronología de eventos de lluvia en Piura desde el año 1791 basado en evidencia documental, es decir que generó la primera serie de tiempo de El Niño, dada la cercana correlación entre ambos.

EL PARADIGMA ENOS

Según relata el historiador Cushman (2004), un investigador holandés, Berlage, en 1929 reportó una fuerte correlación estadística entre la serie de Eguiguren y el ciclo de 6-7 años en el monzón en India oriental, estableciendo la conexión con el patrón de variabilidad atmosférica conocida como Oscilación Sur, que representa un desplazamiento a gran escala de las masas de aire entre el este y el oeste en la región tropical. Esta relación estadística luego encontró su fundamento físico muchos años después gracias a Bjerknes (1969), quien identificó el mecanismo de interacción entre el océano y la atmósfera en el océano Pacífico ecuatorial que ahora lleva su nombre. Dicho mecanismo consiste en que un calentamiento en el lado oriental causa un debilitamiento de los vientos alisios del este, lo cual, a su vez, produce un mayor



Foto: IGP

calentamiento del mar, y así, en un proceso de retroalimentación positiva que puede resultar en un evento El Niño. Nótese que con esto se refutó, aparentemente, la hipótesis de Schott de que los vientos del norte o sur son relevantes para El Niño.

Lo anterior llevó a la consolidación del paradigma de El Niño-Oscilación Sur (ENOS), como el fenómeno océano-atmósfera de gran escala que afecta al clima a nivel global. Se introdujo también el concepto de La Niña como la fase fría de ENOS. El trabajo de Rasmusson y Carpenter (1982) estableció estadísticamente un patrón «típico» de la evolución de un evento El Niño, el cual iniciaba con el calentamiento del mar peruano para luego extenderse hacia el oeste. Sin embargo, ese mismo año (1982) se desarrolló el evento más intenso documentado a la fecha, pero este no se inició con un calentamiento frente a Perú sino en el Pacífico ecuatorial central, cuestionando la importancia de la región costera para el desarrollo de El Niño en marco del paradigma ENOS (Cane, 1983). Más aún, con el reconocimiento de que el efecto global de ENOS se relaciona más con la temperatura del mar en el Pacífico central, muchos países en el mundo empezaron a utilizar la región denominada Niño 3.4 (Barnston et al., 1997), muy lejana de la costa, para determinar la presencia de El Niño. Es así como se fue desconectando el concepto de El Niño entre lo históricamente reconocido en el Perú y los criterios internacionales.

FÍSICA Y PRONÓSTICO DE ENOS

El proceso de retroalimentación de Bjerknes en amplificar un evento ENOS y la identificación del rol de las ondas oceánicas que, al desplazarse lentamente a lo largo del Pacífico ecuatorial, crean un efecto retardado que es responsable de la transición entre las fases cálidas y frías del ENOS, permitió la formulación de un modelo océano-atmósfera conceptual y matemático (Zebiak y Cane, 1987) con el que se realizó el primer pronóstico numérico de ENOS (Cane et al. 1986). En los siguientes años se realizaron importantes avances en la capacidad de predicción, particularmente con el desarrollo de los modelos acoplados océano-atmósfera globales, más sofisticados, complejos y generales, no específicamente diseñados para ENOS, pero que representan los principales mecanismos de gran escala de este fenómeno. Los pronósticos numéricos del evento El Niño extremo en 1997-1998 fueron moderadamente exitosos, aunque no pronosticaron la gran intensificación de este (Barnston et al., 1999). Eventualmente, los pronósticos con los modelos físicos («dinámicos») superaron en exactitud a los realizados con modelos estadísticos (Barnston et al., 2012), pero el problema de predecir la intensidad de los eventos más extremos persiste hasta la fecha.

LA DIVERSIDAD DE ENOS

La gran fortaleza del paradigma ENOS de poder explicar el funcionamiento de dicho fenómeno llevó al supuesto implícito de que un solo índice como el de Niño 3.4 podría ser suficiente para describir el estado del fenómeno con buena aproximación. Sin embargo, a partir de los años 2000 empezaron a surgir investigaciones enfocadas en las diferencias entre eventos, por ejemplo, según si el calentamiento durante el evento es mayor en el Pacífico central o en el oriental, o si la intensidad es extrema o moderada. Es en este periodo en que empiezan a surgir nuevos términos referidos a los tipos de eventos, como El Niño de la línea de cambio de fecha, El Niño Modoki, El Niño del Pacífico Central, entre otros (ver las síntesis de Capotondi et al., 2015, 2020). Por otro lado, la capacidad de los modelos en predecir el tipo del evento es mucho más pobre que en predecir simplemente la ocurrencia del evento (p. ej. Ren et al., 2019). La diversidad de El Niño es particularmente importante para el Perú, ya que según el tipo de evento los impactos pueden ser distintos en el territorio, pero la capacidad de predicción de dicho tipo es actualmente limitada.

RESULTADOS

Los eventos El Niño más desastrosos de los últimos 100 años por las intensas lluvias producidas en la costa norte y centro del Perú corresponden a los años 1925, 1983, 1998, y 2017. De estos, los eventos de 1983 y 1998 son bien conocidos porque también son considerados como los eventos ENOS más intensos registrados, mientras que los de 1925 y 2017 corresponden a una variedad olvidada, redescubierta y rebautizada ahora a nivel internacional como El Niño costero (Capotondi et al., 2020).

EL NIÑO EXTREMO

En un estudio estadístico de la diversidad de ENSO enfocado en la variabilidad de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico ecuatorial (Takahashi et al., 2011), demostramos que dos nuevos índices, que denominamos C y E, correspondientes a patrones de calentamiento en el Pacífico Centro y Este, respectivamente (ver Figura 1a y b), son suficientes para reconstruir los valores de los principales índices usados para ENOS. Adicionalmente, mostramos que durante los eventos El Niño extremos, el índice E indica un calentamiento en el Pacífico oriental mucho más intenso que en el resto de eventos El Niño, sugiriendo que quizás podrían involucrar una física de ENOS algo distinta.

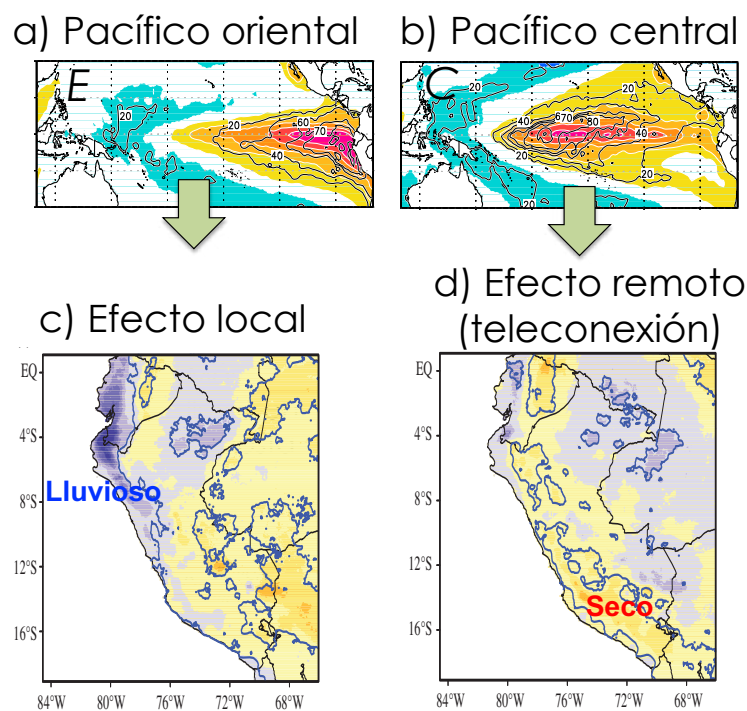


Figura 1. Patrones de anomalía de temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical asociados a los índices a) E y b) C (Takahashi et al., 2011). Patrones de precipitación en el Perú de diciembre-febrero asociados a los índices a) E y b) C (Sulca et al., 2018).

Un problema con evaluar la hipótesis anterior es que los eventos extremos son escasos por su misma naturaleza, por lo que un simple análisis estadístico sería insuficiente. Por esto, en una investigación posterior (Takahashi y Dewitte, 2016) complementamos los datos observacionales con simulaciones largas de un modelo acoplado global que representa estos eventos extremos cualitativamente bien. De esta manera, encontramos que los eventos El Niño extremos se desarrollan cuando el índice E logra sobrepasar un valor crítico, que corresponde a un calentamiento suficientemente alto para que el Pacífico oriental, normalmente frío y sin lluvias, tenga una temperatura que pueda mantener la ocurrencia de tormentas intensas, lo cual amplifica el mecanismo de retroalimentación de Bjerknes, permitiendo en que el evento crezca mucho más. Además, encontramos que el desvanecimiento de los vientos alisios ecuatoriales en el Pacífico central observado en agosto sería un buen predictor de la posibilidad de que El Niño extremo se desarrolle en el verano siguiente.

Para demostrar que el mecanismo de amplificación propuesto es suficiente para generar eventos El Niño extremos, en otra investigación (Takahashi et al., 2018) propusimos un modelo matemático mínimo, una versión del modelo carga-descarga (Jin et al., 1997), el cual modificamos para que la retroalimentación se amplifique cuando el calentamiento exceda un valor crítico. Con este modelo, además, mostramos la importancia de otros procesos climáticos externos a ENOS, «forzantes estocásticos» en la jerga técnica, en la misma escala temporal que ENOS, que pueden ayudar al sistema océano-atmósfera a alcanzar dicho calentamiento crítico y desarrollar un evento El Niño extremo. Esto implica que si podemos predecir estos procesos externos, mejoraríamos nuestra capacidad de predecir El Niño extremo.

Un caso interesante fue el evento El Niño de 2015-2016. Como documentamos en L'Heureux et al. (2016), los pronósticos numéricos para este evento sugerían que podría ser comparable al de 1983 y 1998, pero aún cuando ocurrió el calentamiento del mar frente al Perú, no ocurrieron las temidas lluvias que se observaron en esos años, aparentemente porque la persistencia de fuertes vientos del sur frente a la costa mitigaron el calentamiento necesario para estas. Por otro lado, como explicaremos a continuación, la influencia del calentamiento en el Pacífico central habría tenido un fuerte efecto supresor de lluvias.

Por otro lado, los modelos climáticos que mejor simulan cualitativamente los eventos El Niño extremos proyectan que la frecuencia de El Niño extremo y las lluvias asociadas aumentarán con el cambio climático (Cai et al., 2015, 2018).

LA DIVERSIDAD DE ENOS Y LAS LLUVIAS EN EL PERÚ

Si bien la asociación entre El Niño y las lluvias en la costa norte es largamente conocida, los eventos El Niño también están frecuentemente asociados a condiciones secas en la sierra sur (p. ej. Aceituno, 1988). La correlación entre las lluvias en nuestra sierra es mayor con la temperatura del mar en el Pacífico central que con la del oriental (Lagos et al., 2008); sin embargo, este patrón es más claro cuando se utilizan los índices E y C de Takahashi et al. (2011), ya que estos índices separan limpiamente la variabilidad estadísticamente independiente del Pacífico oriental y central. De esta manera, se evidencia que el calentamiento en el Pacífico oriental se asocia al incremento de lluvias en la costa norte y centro del Perú, mientras que el calentamiento en el Pacífico central se asocia a la reducción de lluvias en toda la región andina, no solo en el sur (Lavado-Casimiro y Espinoza, 2014, Sulca et al., 2017; ver Fig. 1c y d). Ahora bien, cada evento El Niño se puede describir según la combinación de sus valores de E y C, por lo que los efectos en las lluvias también es aproximadamente la suma de los patrones de precipitación ponderados por los valores de E y C correspondientes. Esto nos da una explicación para la falta de lluvias extremas durante El Niño en 2016, ya que el efecto supresor de C habría sido mucho mayor que el efecto promotor de E (L'Heureux et al., 2016).

Sin embargo, esto no sería toda la historia, ya que las lluvias en la costa no dependen en forma tan sencilla (linealmente) de las temperaturas sino que las lluvias ocurren solo cuando el calentamiento en el Pacífico oriental excede al del central en un valor crítico (Takahashi y Martínez, 2019). En términos físicos, este valor crítico estaría asociado a la transición entre una atmósfera estable a una inestable (Jáuregui y Takahashi, 2018), ya que el

calentamiento en el Pacífico central se traduce en un calentamiento estabilizador en niveles bajos de la atmósfera, lo cual debe ser superado por el calentamiento en la superficie para romper la estabilidad y generar tormentas.

Es debido a este efecto diferenciado en el territorio peruano que la Comisión ENFEN, responsable en el Perú de la evaluación de El Niño, monitorea explícitamente tanto El Niño en la costa como en el Pacífico central y realiza pronósticos para ambas regiones.

EL NIÑO COSTERO

A finales del año 2016, el estado de ENOS era neutral y no se anticiparon mayores cambios. Sin embargo, en enero de 2017, la temperatura del mar aumentó abruptamente en la costa del Perú, acompañado de fuertes lluvias. La Comisión ENFEN¹ en el Perú activó la alerta de El Niño para la región costera, aún cuando a nivel internacional ninguna otra entidad tomó nota. Ante esta discrepancia y dada la evidente presencia de El Niño en la costa peruana, la opinión pública en el Perú acogió la evaluación del ENFEN y se empezó a llamar *El Niño costero* a este fenómeno. Un importante sustento que permitió al ENFEN hacer esta evaluación es que recientemente se había concluido el estudio de El Niño de 1925 (Takahashi y Martínez, 2019, publicado en 2017), el cual fue muy similar al del 2017 pero muy distinto a los eventos ENOS. Tal como Schott (1931) había reportado, tanto en 1925 como en el evento El Niño original de 1891, el calentamiento de la costa estuvo asociado con fuertes vientos del norte y lo mismo se observó en 2017 (ENFEN 2017; Takahashi et al., 2018). La física de estos eventos, a diferencia de la de ENOS, está asociada a una interacción océano-atmósfera local mucho más rápida y menos predecible (Echevin et al., 2018; Takahashi y Martínez, 2019; Peng et al., 2019).

Es importante reconocer que El Niño costero no es un nuevo tipo de evento, sino que hemos redescubierto El Niño original, el cual fue luego olvidado debido al éxito del paradigma de ENOS. Más aún, el estudio de Kiefer y Karamperidou (2019) propone que el registro paleoclimático del lago Pallacocha en Ecuador, un indicador considerado emblemático de El Niño asociado a ENOS durante el Holoceno, en realidad refleja más los efectos de los eventos El Niño costero y La Niña (ENOS) que de los eventos El Niño (ENOS).

DISCUSIÓN

El entendimiento científico y la capacidad de predicción de El Niño a nivel internacional se ha desarrollado exitosamente desde finales del siglo XIX, particularmente gracias a la identificación del modo de variabilidad climática acoplada conocido como El Niño-Oscilación Sur (ENOS). En los años recientes se ha reconocido que la diversidad de los eventos El Niño es particularmente importante para poder evaluar adecuadamente los impactos en el territorio peruano. Algunos puntos de particular relevancia para nuestro país son los siguientes:

¹ Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno «El Niño».

1. Los eventos El Niño con mayor impacto en el Perú, particularmente asociado a lluvias intensas, inundaciones y huacos, son de dos tipos: global (ENOS) y costero, y se prevé que el cambio climático exacerbará dichos impactos.
2. El Niño extremo global (p. ej., 1983, 1998) se debe a una amplificación de los mecanismos océano-atmósfera típicos de ENOS. La capacidad internacional para su predicción ha avanzado sustancialmente, aunque los modelos climáticos tienen problemas para nuestra región.
3. El Niño costero (p. ej., 1925, 2017) está asociado a mecanismos océano-atmósfera locales y se conoce relativamente poco. La capacidad de predicción de estos eventos es limitada aún.
4. Es necesario que la comunidad científica peruana lidere las investigaciones para mejorar la predicción y proyecciones del cambio climático de El Niño en nuestra región. El Instituto Geofísico del Perú está desarrollando un modelo océano-atmósfera regional de alta resolución y modelos de inteligencia artificial para la predicción de El Niño costero con mayor tiempo de anticipación y exactitud.

REFERENCIAS

Aceituno, P. (1988). On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Monthly Weather Review*, 116(3), 505-524.

Barnston, A.G., Chelliah, M. y Goldenberg, S. B. (1997). Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific: Research note, *Atmosphere-Ocean*, 35:3, 367-383, DOI: 10.1080/07055900.1997.9649597

Barnston, A. G., Tippet, M. K., L'Heureux, M. L., Li, S., y DeWitt, D. G. (2012). Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002–11: Is our capability increasing? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(5), 631-651. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00111.2>

Barnston, A. G., Glantz, M. H., y He, Y. (1999). Predictive skill of statistical and dynamical climate models in SST forecasts during the 1997–98 El Niño episode and the 1998 La Niña onset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(2), 217-244. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0217:PSOSAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0217:PSOSAD>2.0.CO;2)

Bjerknes J. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.*, 97(3), 163–172. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2)

Cai, W., A. Santoso, G. Wang, S.-W. Yeh, S.-I. An, K. Cobb, M. Collins, E. Guilyardi, F.-F. Jin, J.-S. Kug, M. Lengaigne, M. J. McPhaden, K. Takahashi, A. Timmermann, G. Vecchi, M. Watanabe, y L. Wu, 2015: ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0776-9>

Cai, W., Wang, G. Dewitte, B., Wu, L., Santoso, A., Takahashi, K., Yang, Y., Carréric, A., y McPhaden, M. J. (2018). Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming, *Nature*, 564, 201–206. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0776-9> doi:10.1038/s41586-018-0776-9.

Cane, M. (1983). Oceanographic events during El Niño, *Science*, 222(4629), 1189-1195. DOI: 10.1126/science.222.4629.1189

Cane, M. A., Zebiak, S. E. y Dolan, S. C. (1986). Experimental forecasts of El Niño, *Nature*, 321, 827–832. <https://doi.org/10.1038/321827a0>

Capotondi, A., Wittenberg, A. T., Newman, M., Di Lorenzo, E., Yu, J. Y., Braconnot, P., ... y Yeh, S. W. (2015). Understanding ENSO diversity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(6), 921-938. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00117.1>

Capotondi, A., Wittenberg, A. T., Kug, J. S., Takahashi, K., y McPhaden, M. J. (2020). ENSO diversity. En M. J. McPhaden (Ed.), A. Santoso (Ed.) y W. Cai (Ed.), *El Niño Southern Oscillation in a changing climate* (pp. 65-86).

- Carranza L. (1891). Contra-corriente marítima observada en Paita y Pacasmayo. *Bol. Soc. Geogr. Lima*, 1(9), 344–345
- Carrillo, C. N. (1893). Hidrografía oceánica. *Bol Soc Geogr Lima*, 72-110.
- Cushman, G. T. (2004). Enclave vision: foreign networks in Peru and the internationalization of El Niño research during the 1920s. *Hist Meteorol*, 1, 65-74
- Echevin, V. et al. (2018). Forcings and evolution of the 2017 coastal El Niño off northern Peru and Ecuador. *Frontiers in Marine Science*, 5:367. DOI: 10.3389/fmars.2018.00367
- Eguiguren, V. (1894). Las lluvias en Piura. *Bol Soc Geogr Lima*, 4, 241–258
- ENFEN (2017) El Niño Costero 2017. Informe Técnico Extraordinario N°001-2017/ENFEN.
- Jauregui, Y. R., y Takahashi, K. (2018). Simple physical-empirical model of the precipitation distribution based on a tropical sea surface temperature threshold and the effects of climate change. *Climate dynamics*, 50(5), 2217-2237.
- Jin F. F. (1997). An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *J Atmos Sci.*, 54 (7), 811–829. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<0811:AEORPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<0811:AEORPF>2.0.CO;2)
- Kiefer, J., y Karamperidou, C. (2019). High-resolution modeling of ENSO-induced precipitation in the tropical Andes: Implications for proxy interpretation. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34(2), 217-236.
- Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E., y Mosquera, K. (2008). El Niño-related precipitation variability in Perú. *Advances in Geosciences*, 14, 231-237.
- Lavado-Casimiro W, Espinoza JC. (2014). Impact of El Niño and La Niña on rainfall in Peru. *Rev. Bras. Meteorol.* 29: 171–182.
- L'Heureux, M. L., Takahashi, K., Watkins, A. B., Barnston, A. G., Becker, E. J., Di Liberto, T. E., ... y Wittenberg, A. T. (2017). Observing and predicting the 2015/16 El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(7), 1363-1382.
- Murphy RC (1926) Oceanic and climatic phenomena along the west coast of South America during 1925. *Geogr. Rev.*, 16:26–54
- Peng, Q. et al. (2019). Coupled ocean-atmosphere dynamics of the 2017 extreme coastal El Niño. *Nature Communications*, Volume 10, p. 298.
- Rasmusson EM, Carpenter TH (1982) Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Weather Rev.* 110:354–384
- Ren, H. L., Scaife, A. A., Dunstone, N., Tian, B., Liu, Y., Ineson, S., ... y MacLachlan, C. (2019). Seasonal predictability of winter ENSO types in operational dynamical model predictions. *Climate Dynamics*, 52(7), 3869-3890.
- Schott, G. (1931). Der Peru-Strom und seine nördlichen Nachbargebiete in normaler und anormaler Ausbildung. *Ann Hydrogr Mar Meteor* 59, 161–169, 200–213, 240–257. Translated to Spanish in *Bol Cia Admin Guano*, IX, 3–4, 65–110 (1933)
- Sulca, J., Takahashi, K., Espinoza, J. C., Vuille, M., y Lavado-Casimiro, W. (2018). Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *International Journal of Climatology*, 38(1), 420-435.
- Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., y Dewitte, B. (2011). ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical research letters*, 38(10). <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>
- Takahashi, K., y Dewitte, B. (2016). Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 46(5), 1627-1645. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2665-3>

Takahashi, K., Karamperidou, C., y Dewitte, B. (2019). A theoretical model of strong and moderate El Niño regimes. *Climate Dynamics*, 52(12), 7477-7493. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4100-z>

Takahashi, K., y Martínez, A. G. (2019). The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. *Climate Dynamics*, 52(12), 7389-7415. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3702-1>

Takahashi, K., Aliaga-Nestares, V., Avalos, G., Bouchon, M., Castro, A., Cruzado, L., Dewitte, B., Gutiérrez, D., Lavado-Casimiro, W., Marengo, J., Martínez, A. G., Mosquera-Vásquez, K., and N. Quispe (2018). The 2017 coastal El Niño [in "State of the Climate in 2017"]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99(8), S210-S211, doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1.

Zebiak, S. E. and Cane, M. A. (1987). A Model El Niño-Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 97(3), 163-172. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<2262:AMENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<2262:AMENO>2.0.CO;2)