

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**INVESTIGACIÓN EN LOS TIPOS DEL FENÓMENO EL NIÑO, SUS
IMPACTOS EN EL PERÚ Y EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**Trabajo de suficiencia profesional para obtener el título profesional de
Licenciado en Física**

AUTOR

Ken Takahashi Guevara

ASESOR

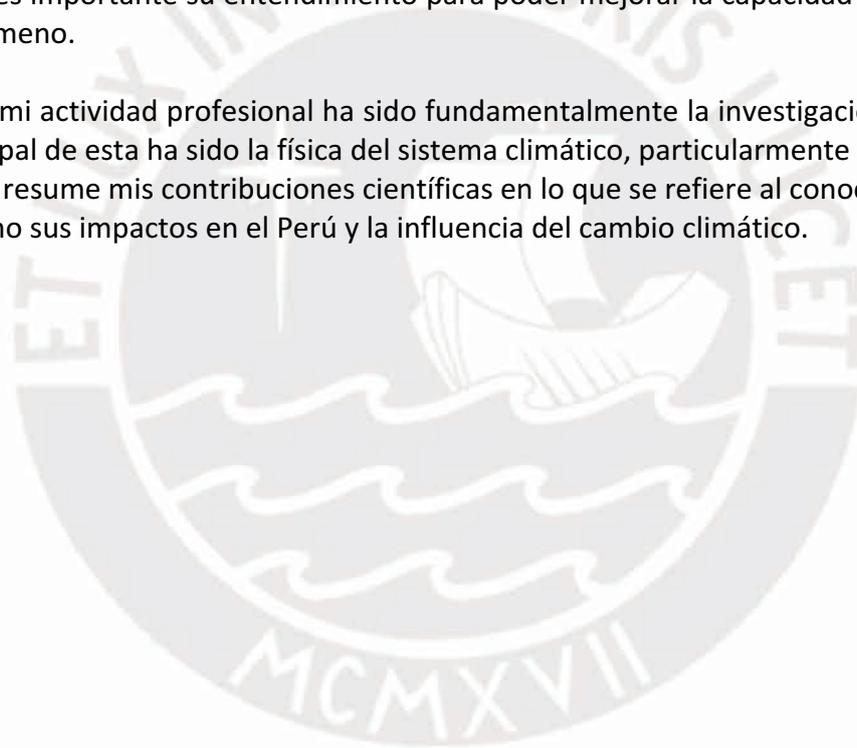
Desiderio Augusto Vasquez Rodriguez

Lima, Febrero, 2020

Resumen

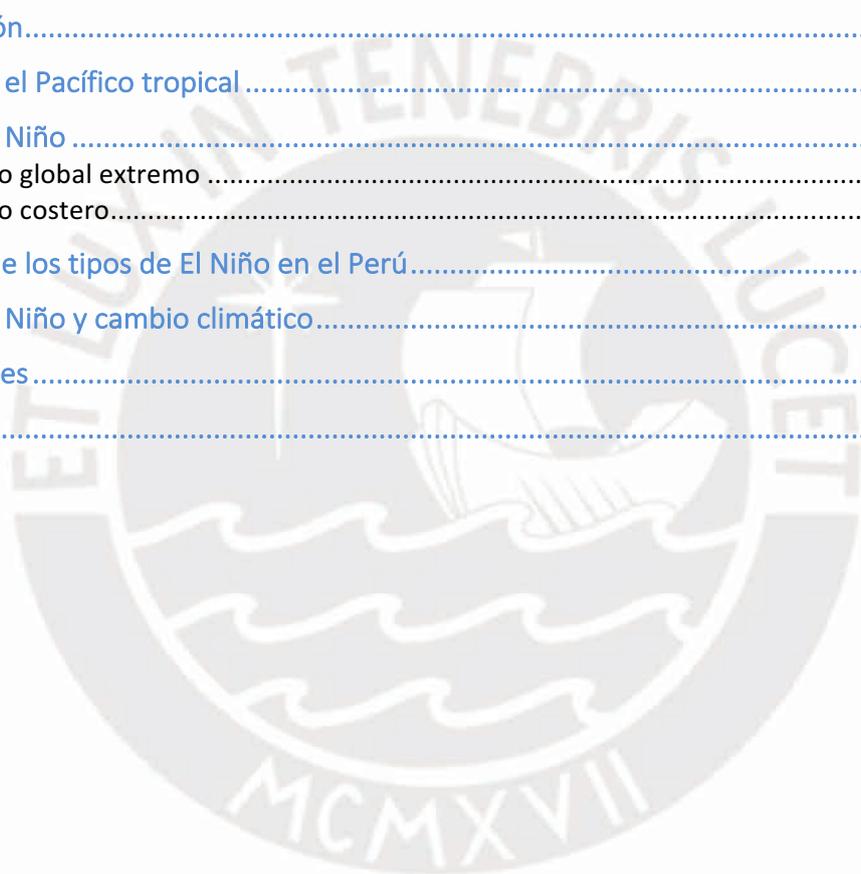
El Niño (EN) es un evento climático que se presenta en forma irregular como un calentamiento anómalo del mar peruano y cuyas manifestaciones en ocasiones pueden ser catastróficas en el Perú. La esencia de la dinámica de El Niño es la interacción física entre el océano y la atmósfera y es importante su entendimiento para poder mejorar la capacidad de predicción de este fenómeno.

Como físico, mi actividad profesional ha sido fundamentalmente la investigación científica y el foco principal de esta ha sido la física del sistema climático, particularmente sobre El Niño. Este informe resume mis contribuciones científicas en lo que se refiere al conocimiento de El Niño, así como sus impactos en el Perú y la influencia del cambio climático.



Contenido

Contenido	1
1. Introducción.....	2
2. El clima en el Pacífico tropical	2
3. Tipos de El Niño	3
3.1 El Niño global extremo	3
3.2 El Niño costero.....	5
4. Impactos de los tipos de El Niño en el Perú.....	6
5. Tipos de El Niño y cambio climático.....	6
6. Conclusiones.....	7
Referencias	7



1. Introducción

La Física, como ciencia, busca la comprensión del universo a través de la identificación de leyes o teorías sustentadas en la observación empírica. En mi caso, a lo largo de mi carrera profesional me he concentrado en entender el funcionamiento del sistema climático desde una perspectiva física. Si bien las leyes físicas fundamentales que subyacen dicho funcionamiento pueden ser conocidas, estas son sumamente complejas y típicamente no-lineales (ej. las ecuaciones de Navier-Stokes), por lo que el objeto de la investigación tiende a la búsqueda de leyes simplificadas que describan el comportamiento emergente del sistema y permitan la comprensión del subsistema identificado, lo cual a su vez puede apoyar a la predicción de su comportamiento.

En este informe me enfocaré en el cuerpo de investigación que desarrollé o en el que colaboré para entender los mecanismos físicos del fenómeno conocido como El Niño, lo cual se basa principalmente en la dinámica de la atmósfera y el océano, lo cual es importante para poder incrementar la exactitud de las predicciones, no solo de la ocurrencia de un evento sino del patrón de alteraciones climáticas asociado en el territorio peruano, con un tiempo de anticipación suficiente para las acciones que reduzcan el potencial impacto en la sociedad, sus actividades e infraestructura. Asimismo, también resumiré mis colaboraciones en investigación de cómo el cambio climático pueden afectar las propiedades de El Niño, lo cual es importante proyectar para una adecuada planificación que reduzca riesgos futuros.

El trabajo sobre El Niño reportado en este informe lo desarrollé principalmente como investigador científico principal en el Instituto Geofísico del Perú - IGP, así como en el marco de mi investigación doctoral en la University of Washington, Seattle, y como presidente ejecutivo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI. Solo referencio artículos en revistas arbitradas internacionales en los que fui autor principal o tuve una participación sustancial. Debo notar que no referencio varios de mis artículos sobre las características y física del clima que no son directamente relacionados con este tema y tampoco describo mi labor en gestión de la ciencia o docencia.

2. El clima en el Pacífico tropical

Una de las características curiosas del clima del Perú es la frialdad de su mar y la sequedad de la costa. En términos meteorológicos, esto se manifiesta con un confinamiento de la banda de lluvias, conocida como "zona de convergencia intertropical" (ZCIT), al norte de la línea ecuatorial. Esto a pesar de que la intensidad de la radiación solar incidente en el tope de la atmósfera es aproximadamente simétrica con respecto a dicha línea. En mi investigación doctoral (Takahashi & Battisti, 2006ab) evalué la hipótesis de que la presencia de los Andes es responsable de la asimetría observada. Para esto, realicé simulaciones con un modelo de circulación atmosférico global basado en las ecuaciones de Navier-Stokes, así como aproximaciones de los procesos convectivos (seca y húmeda) y de la transferencia radiativa en onda corta (solar) y larga (infrarroja), acoplada a una versión muy sencilla del océano,

representado como una capa homogénea. Como resultado, determiné que los Andes bloquean la circulación del oeste en latitudes subtropicales y fuerzan un descenso adiabático hacia el norte, trayendo aire seco hacia la superficie del mar que lo enfría por evaporación y suprime la posibilidad de lluvia. Este mecanismo complementa al del afloramiento costero para explicar nuestro clima promedio.

Por otro lado, debido a la variación anual de la radiación solar, en los meses de verano y otoño la superficie del mar frente al Perú es más caliente, como se puede esperar. Sin embargo, a través de un análisis del balance energético en la capa superior del océano, determiné que la amplitud de dicha variación es amplificada por un proceso de retroalimentación positivo asociado al aumento/reducción de la nubosidad baja a menores/mayores temperaturas, lo cual reduce/aumenta la radiación solar en superficie (Takahashi, 2005).

En los meses en los cuales la temperatura superficial del mar (TSM) es mayor frente a Perú (febrero-abril), es suficientemente caliente para que se pueda formar una segunda banda de lluvias (ZCIT) a la latitud de Piura, aunque típicamente es débil y alejada de la costa. Con una estudiante de pregrado en el Instituto Geofísico del Perú (IGP) analizamos la estructura vertical de la(s) ZCIT usando datos del radar TRMM y mediciones in situ para generar información para la validación de los modelos de simulación que típicamente yerran en la representación de las ZCITs (Huaman y Takahashi, 2016).

3. Tipos de El Niño

Durante El Niño, el mar frente al Perú se calienta anómalamente y, en los meses de verano y otoño, la TSM puede ser suficientemente alta como para que la ZCIT se intensifique y penetre hacia el continente, lo cual puede producir lluvias extremas e inundaciones en nuestra costa norte. Sin embargo, esta concepción clásica de El Niño establecida a fines del siglo XIX ha ido mutando a lo largo de los años en la comunidad científica internacional y en la actualidad también se llama "El Niño" al calentamiento en la parte central del océano Pacífico ecuatorial. Actualmente, la comunidad se está enfocando en los diferentes tipos de eventos El Niño, principalmente desde la perspectiva de sus patrones de calentamiento de la superficie del mar. Recientemente participé en un artículo de balance del conocimiento sobre la "complejidad" de El Niño (Timmermann et al., 2018).

3.1 El Niño global extremo

Utilizando la técnica de las componentes principales, con unos colegas hicimos un análisis de los patrones de anomalías (desviaciones con respecto a la media) de la TSM en el Pacífico tropical (Takahashi et al. 2011) y encontramos que, en el espacio de las dos primeras componentes principales (PC1 y PC2), los eventos El Niño de los años 1983 y 1998 se encontraban muy distantes de los demás, no solo en la magnitud del calentamiento, sino en el patrón con calentamiento más pronunciado en el Pacífico oriental, si bien el calentamiento se extiende hasta el Pacífico central. Dicha separación, sugerimos, correspondería a un proceso no-lineal por identificar que llevaría al sistema climático a otro régimen distinto al de los otros eventos El Niño. Este trabajo también demostró que la variabilidad de la TSM asociada a El Niño se puede describir en forma casi completa con las dos primeras

componentes principales o con los índices derivados E y C, correspondientes a la variabilidad en el Pacífico este y central, respectivamente. Esto dio sustento científico al procedimiento operativo oficial de la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), que actualmente monitorea El Niño considerando la TSM en las dos regiones.

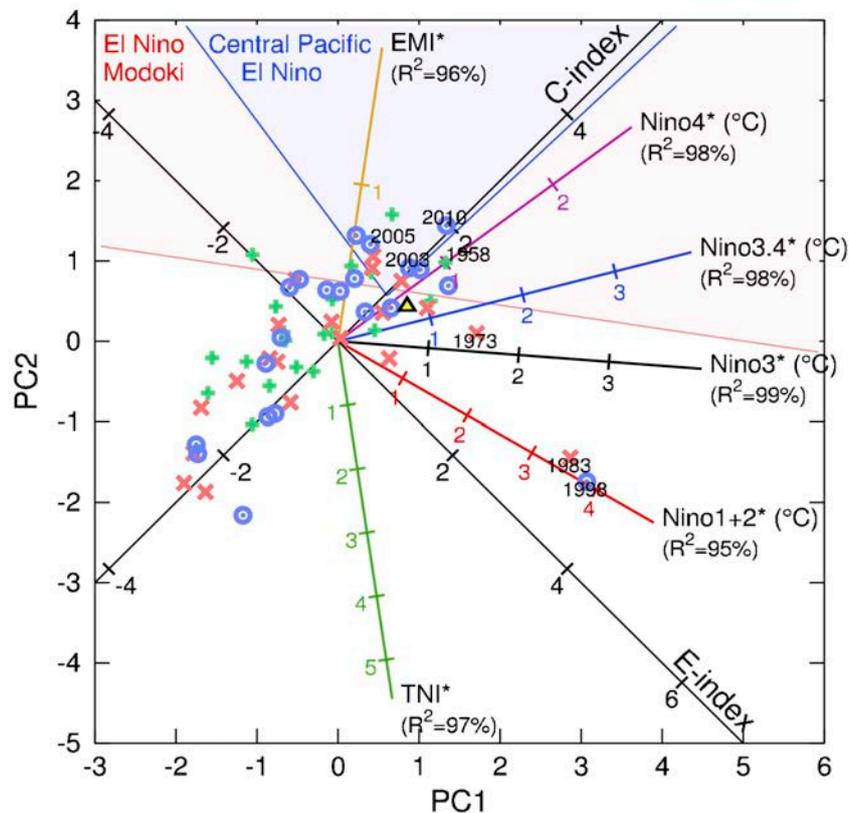


Figura 1. Componente principal PC1 vs PC2 de la anomalía de TSM del Pacífico tropical para diciembre-febrero. Los ejes E y C indican calentamiento en el Pacífico este y centro, respectivamente. Fuente: Takahashi et al., 2011

Dado que desde un punto de vista estadístico no es posible llegar a conclusiones sólidas con una muestra de solo dos eventos, con un colega analizamos los datos observacionales junto con una simulación larga con el modelo climático global CM2.1 de NOAA GFDL que representaba eventos extremos muy similares a los dos observados (Takahashi & Dewitte, 2016). El análisis de componentes principales permitió verificar que el modelo CM2.1 produce una distribución bimodal de la TSM máxima de El Niño en el espacio PC1-PC2, con las dos modas separadas aproximadamente para $E=1.8$ ($E=(PC1-PC2)/\sqrt{2}$). Tanto en el modelo y las observaciones se encontró que, para valores mayores de E, la retroalimentación positiva entre el aumento del viento del oeste con el calentamiento es varias veces mayor y esto podría producir la bimodalidad.

Posteriormente, con unos colegas (Takahashi et al., 2018b) exploramos la viabilidad de la hipótesis anterior con una versión modificada del modelo teórico simple denominado "oscilador carga-descarga", que matemáticamente corresponde a un oscilador amortiguado forzado estocásticamente descrito en el espacio de fase 2D, con las dos variables correspondiendo a la TSM (T) y al contenido de calor del Pacífico ecuatorial (h). En este

estudio, el coeficiente correspondiente a la retroalimentación de T hacia sí misma se modificó de manera que a_{NL} tome el valor de cero cuando $T > T_c$ y que tome un valor negativo a en los otros casos, donde T_c es un valor umbral que aproximadamente corresponde a la temperatura de 27.5°C sobre el cual aproximadamente se produce la activación de convección profunda húmeda (tormentas) (Ecuación 1).

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{NL} & b \\ c & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ h \end{pmatrix} + F_0 \begin{pmatrix} \varepsilon(t) \\ \zeta(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$a_{NL} = \begin{cases} a, & T \leq T_c \\ 0, & T > T_c \end{cases}$$

Este modelo modificado reproduce la bimodalidad en los picos de TSM, asociada a la divergencia de las trayectorias en el espacio de fase T - h alrededor de T_c . Analizamos esta divergencia usando la ecuación Fokker-Planck y encontramos que una condición suficiente para que esta divergencia pueda ocurrir es que a_{NL} aumente con T . Por otro lado, este modelo es globalmente estable y en general es necesaria la contribución de la componente de baja frecuencia del forzante estocástico para que las trayectorias puedan exceder T_c . Si bien el caso adicional de El Niño 2016 concuerda con la distribución bimodal, aún la evidencia empírica no es conclusiva. Sin embargo, este modelo proporciona una explicación parsimoniosa de las observaciones y aporta heurísticos relevantes para el pronóstico de los eventos El Niño global extremo.

3.2 El Niño costero

Las evidencias de los eventos El Niño más intensos en el último siglo en cuanto a sus impactos en el Perú señalan, además de los años 1983 y 1998, al año 1925. Este evento fue relativamente bien documentado en su momento, luego pasó a ser olvidado. Con una colega, hicimos una reconstrucción detallada de las características físicas de dicho evento, recolectando la información de una gran diversidad de fuentes (Takahashi & Martínez, 2017). Los resultados indicaron que este evento fue muy distinto a los de 1983 y 1998 en que el calentamiento fue limitado a la costa peruana y solo en los meses de febrero-abril, que estuvo asociado a vientos ecuatoriales del norte y a que en lugar de la doble banda ZCIT, la banda de la ZCIT al sur del ecuador se intensificó fuertemente y penetró al continente. Este evento fue similar al de 1891 y, por lo tanto, tendrían que ser considerados los arquetipos de El Niño. Sin embargo desde entonces no volvió a presentarse con tal intensidad y el concepto de El Niño se orientó a la versión más global, por lo que a este tipo de evento se le empezó a conocer como "El Niño costero" en el Perú.

Sin embargo, justo cuando este estudio se publicaba, en el año 2017 se desarrolló rápidamente y sin aviso un nuevo evento El Niño de características muy similares al de 1925. El ENFEN pudo reconocer la similitud y prever la posibilidad de que se desarrolle un evento como en el 1925, aún cuando el resto del mundo no reconocía este tipo de evento. Este evento posteriormente se documentó en el balance del clima anual de 2017 a cargo de la American Meteorological Society y se propusieron algunos precursores de este evento (Takahashi et al., 2018a). En la actualidad, "El Niño costero" se ha convertido en un tema legítimo de investigación científica a nivel internacional.

4. Impactos de los tipos de El Niño en el Perú

Una razón importante por la que el ENFEN monitorea El Niño tanto en el Pacífico este como en el central es que ambas regiones tienen impacto sobre el Perú y este impacto tiene características muy distintas según dónde en el Pacífico es el calentamiento (o enfriamiento). Recientemente participé en un artículo balance sobre los efectos de El Niño en Sudamérica, el cual está aceptado para publicación (Cai et al., 2020).

El efecto más directo en las lluvias en el Perú es a través del calentamiento del mar peruano que, cuando su temperatura excede unos 26°C, permite la activación de convección húmeda (tormentas) en la costa árida peruana, particularmente cuando los vientos del oeste ayudan a que el aire húmedo ascienda los Andes occidentales (Takahashi, 2004).

Usando mis índices E y C , orienté una investigación sobre la relación de estos sobre las lluvias en el Perú y Sudamérica, así como con otros índices asociados a anomalías de precipitación en el Pacífico tropical, ya que estas son una representación más directa de los forzantes de los cambios en la circulación atmosféricas responsables de las "teleconexiones" hacia el Perú (Sulca et al., 2018). En este estudio se verificó que El Niño (calentamiento del mar) en el Pacífico central produce condiciones secas en los Andes, mientras que El Niño en el Pacífico Este las incrementa en la costa.

Durante El Niño en 2016, si bien la costa de Perú se calentó, no fue tanto como en 1998. Por otro lado, el calentamiento en el Pacífico central fue particularmente pronunciado. El efecto neto fue condiciones predominantemente secas, con prácticamente nada de las lluvias intensas en la costa que se observaron en 1998 (L'Heureux et al., 2016). La variabilidad de los vientos cerca de Sudamérica probablemente fueron responsables del menor calentamiento del Pacífico Este (Dewitte & Takahashi, 2018). Por otro lado, las altas temperaturas y condiciones secas durante ese año resultaron en sequías en la Amazonia (Jimenez et al., 2016, 2019).

Un mecanismo físico responsable del efecto secador de El Niño en el Pacífico central es la influencia sobre la estabilidad estática de la tropósfera baja, la cual durante estos eventos aumenta por el calentamiento de la tropósfera por encima de la capa límite planetaria producido por la respuesta de la convección húmeda al calentamiento del mar (Takahashi & Martínez, 2017; Jauregui & Takahashi, 2017).

5. Tipos de El Niño y cambio climático

Las propiedades de El Niño, como su patrón, intensidad, frecuencia, dependen del estado climático base, que se puede aproximar como el clima promedio. Una forma de entender esto es que el estado base determina los parámetros de modelos de El Niño (ej. ecuación 1). Con el cambio climático, este estado base cambiará progresivamente, por lo que las propiedades de El Niño también cambiarían. En años recientes, equipos liderados por el Dr. Wenju Cai en los que participé analizaron los eventos El Niño más extremos, así como la contraparte fría conocida como La Niña, en simulaciones con varios modelos de cambio

climático para determinar cómo estos podrían cambiar en el futuro. Una síntesis de los principales hallazgos se publicaron en Cai et al. (2015a). En uno de los estudios encontramos que la frecuencia de los eventos La Niña más extremos, que se presentan como enfriamiento en el Pacífico central, aumentarían con el cambio climático (Cai et al., 2015b). De particular interés para Perú, los eventos El Niño más extremos en el Pacífico Este como los ocurridos en 1983 y 1998 también incrementarían su frecuencia, principalmente debido al aumento del acoplamiento entre los vientos del oeste y la dinámica oceánica al aumentar la estratificación termal del océano (Cai et al., 2018; Carréric et al. 2019). Dado el fuerte impacto que estos eventos tienen en el Perú, estos resultados son de gran importancia para el planeamiento a largo plazo y el diseño de grandes infraestructuras.

6. Conclusiones

Como físico, mi carrera se ha centrado principalmente en la investigación científica sobre la física del sistema climático, en la cual he aplicado una combinación de análisis empírico, teoría, y simulaciones numéricas. Este trabajo se ha plasmado en numerosos artículos científicos en revistas internacionales de alto nivel, en muchos de los cuales fui autor principal. Mi investigación ha apuntado principalmente al entendimiento de los fenómenos, particularmente El Niño, con el objetivo de desarrollar modelos conceptuales que orienten la evaluación de la gran diversidad de información disponible en el sistema climático para poder mejorar la capacidad de predicción de estos fenómenos. Asimismo, a través de mi participación en la comunidad científica internacional he podido posicionar temas directamente relevantes al Perú de manera que estos sean materia de investigación a nivel mundial. Los resultados de mi investigación no han quedado solo como académicos, sino que se han visto incorporados en los procesos operativos de la Comisión ENFEN, contribuyendo a la mejora del servicio que brinda el Estado en cuanto a información de monitoreo y pronóstico de El Niño.

Referencias

- Cai, W., Dewitte, B., Wu, L., Santoso, A., **Takahashi, K.**, Yang, Y., Carréric, A., McPhaden, M. J., 2018: Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming, *Nature*, doi:10.1038/s41586-018-0776-9.
- Cai, W., McPhaden, M., Grimm, A., Rodrigues, R., Taschetto, A., Garreaud, R., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.-G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.-S., Marengo, J., Alves, L., Osman, M., Li, S., Wu, L., Karamperidou, C., **Takahashi, K.**, Vera, C., 2020: Impact of El Niño-Southern Oscillation on South America in a changing climate. Aceptado por *Nature Reviews Earth & Environment*.
- 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, and L. Wu, 2015a: ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change* 5, 849-859, doi:10.1038/nclimate2743.
- Cai, W., G. Wang, A. Santoso, M. J. McPhaden, L. Wu, F.-F. Jin, A. Timmermann, M. Collins, G. Vecchi, M. Lengaigne, M. H. England, D. Dommenges, **K. Takahashi**, and E.

- Guilyardi, 2015b: Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming, *Nature Climate Change*, doi:10.1038/nclimate2492.
- Carréric, A., Dewitte, B., Cai, W., Capotondi, A. **Takahashi, K.**, Yeh, S.-W., Wang, G., Guémas, V., 2019: Change in strong Eastern Pacific El Niño events dynamics in the warming climate. *Climate Dynamics*, <http://doi.org/10.1007/s00382-019-05036-0>.
 - Dewitte, B. and **Takahashi, K.**, 2018: Diversity of moderate El Niño events evolution: role of air-sea interactions in the eastern tropical Pacific. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-017-4051-9.
 - Huaman, L., and **Takahashi, K.**, 2016: The vertical structure of the Eastern Pacific ITCZs and associated circulation using the TRMM Precipitation Radar and in situ data. *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/2016GL068835
 - **Takahashi, K.**, 2005: The annual cycle of heat content in the Peru Current region. *Journal of Climate* 18, 23, 4937-4954.
 - Jauregui, Y.R. and **Takahashi, K.**, 2017: Simple physical-empirical model of the precipitation distribution based on a tropical sea surface temperature threshold and the effects of climate change. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-017-3745-3
 - Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Alves, L. M., Sulca, J. C., **Takahashi, K.**, Ferrett, S., Collins, M., 2019: The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region, *International Journal of Climatology*, <http://doi.org/10.1002/joc.6453>
 - Jiménez, J. C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., **Takahashi, K.**, Malhi, Y., Sobrino, J. A., van der Schrier, G., 2016: Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016. *Scientific Reports*, doi:10.1038/srep33130.
 - L’Heureux, M., **Takahashi, K.**, Watkins, A. B., Barnston, A. G., Becker, E. J., Di Liberto, T. E., Gamble, F., Gottschalck, J., Halpert, M. S., Huang, B., Mosquera-Vásquez, K., Wittenberg, A. T., 2016: Observing and predicting the 2015-16 El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, doi:10.1175/BAMS-D-16-0009.1.
 - Sulca, J., **Takahashi, K.**, Espinoza, J. C., Vuille, M., 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*, doi:10.1002/joc.5185.
 - **Takahashi, K.**, 2004: The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997-98 and 2002 El Niño events. *Annales Geophysicae* 22, 3917-26.
 - **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, 2018a: The 2017 coastal El Niño [in “State of the Climate in 2017”]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99 (8), S210-S211, doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1.
 - **Takahashi, K.** & Battisti, D. S., 2007a: Processes controlling the mean tropical Pacific precipitation pattern: I. The Andes and the eastern Pacific ITCZ. *Journal of Climate* 20, 14, 3434-3451.
 - **Takahashi, K.** & Battisti, D. S., 2007b: Processes controlling the mean tropical Pacific precipitation pattern: II. The SPCZ and southeast Pacific dry zone. *Journal of Climate* 20, 23, 5696-5706.

- **Takahashi, K.** & Dewitte, B., 2016: Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Climate Dynamics* doi:10.1007/s00382-015-2665-3.
- **Takahashi, K.**, Karamperidou, C., Dewitte, B., 2018b: A theoretical model of strong and moderate El Niño regimes. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-018-4100-z.
- **Takahashi, K.** & Martínez, A. G., 2017: The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-017-3702-1.
- **Takahashi, K.**, Montecinos, A., Goubanova, K., Dewitte, B., 2011: ENSO regimes: Reinterpreting the canonical ENSO and El Niño Modoki. *Geophysical Research Letters*, 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364
- Timmermann, A., An, S. I., Kug, J. S., Jin, F. F., Cai, W., Capotondi, A., Cobb, K., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Stuecker, M. F., Stein, K., Wittenberg, A. T., Yun, K. S., Bayr, T., Chen, H. C., Chikamoto, Y., Dewitte, B., Dommenges, D., Grothe, P., Guilyardi, E., Ham, Y. G., Hayashi, M., Ineson, S., Kang, D., Kim, S., Kim, W., Lee, J. Y., Li, T., Luo, J. J., McGregor, S., Planton, Y., Power, S., Rashid, H., Ren, H. L., Santoso, A., **Takahashi, K.**, Todd, A., Wang, G., Wang, G., Xie, R., Yang, W. H., Yeh, S. W., Yoon, J., Zeller, E., Zhang, X., 2018: El Niño-Southern Oscillation complexity, *Nature*, 559, 535-545, doi:10.1038/s41586-018-0252-6.

