

Procesos hidro-geomorfológicos en Perú y su relación con la circulación atmosférica y las diferentes fases del ENSO



Clara Rodríguez Morata, Ph.D. (c)

ESTUDIANTE DE DOCTORADO Y ASISTENTE DE INVESTIGACIÓN EN LA UNIVERSIDAD DE GINEBRA (SUIZA)

Máster en Riesgos Geológicos y Licenciada en Geología, con especialización en Geodinámica Externa por la Universidad Complutense de Madrid (España). Actualmente, es estudiante de doctorado en Impactos y Riesgos Asociados al Clima de la Universidad de Ginebra (Suiza). Autora de varios artículos en revistas internacionales, cuyas principales líneas de investigación son la dendrocronología, la hidroclimatología y los procesos geomorfológicos asociados principalmente en zonas de montaña.



Dr. Jhan Carlo Espinoza
INVESTIGADOR CIENTÍFICO DEL INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ (IGP)



Dr. Juan Antonio Ballesteros Canovas
COLABORADOR CIENTÍFICO DE LA UNIVERSIDAD DE GINEBRA (SUIZA)



Dr. Mario Rohrer
INVESTIGADOR SENIOR DE LA UNIVERSIDAD DE GINEBRA (SUIZA)



Dr. Martin Beniston
PROFESOR HONORARIO DE LA UNIVERSIDAD DE GINEBRA (SUIZA)



Prof. Dr. Markus Stoffel
PROFESOR E INVESTIGADOR PRINCIPAL DE LA UNIVERSIDAD DE GINEBRA (SUIZA)

INTRODUCCIÓN

Los procesos de origen hidro-geomorfológico (POHG), como deslizamientos, huaicos e inundaciones han generado cuantiosas pérdidas socioeconómicas en Perú. Entre los años 1970 y 2006, más de 12.000 POHG han tenido lugar en el país causando la pérdida de 5.146 vidas y afectando a más de 100.000 propiedades (Tabla 6 en: Comunidad Andina, 2008). El origen de estos procesos está asociado con las características fisiográficas y geológicas del Perú y a la ocurrencia de intensas lluvias durante la estación húmeda,

principalmente en los meses de verano. Tradicionalmente, el fenómeno El Niño ha sido considerado como uno de los principales responsable de los POHG en Perú (Lavado-Casimiro et al., 2013; Rau et al., 2017; Takahashi, 2004; Waylen & Caviedes, 1986). Los impactos reportados a lo largo del país durante los últimos eventos de El Niño avalan esta afirmación (Takahashi y Martínez, 2017; Garreaud, 2018).

En los últimos años, una enorme cantidad de información sobre estos procesos e impactos asociados en Perú ha sido generada gracias al esfuerzo de documentación, desde diversos puntos de vista (climático, geodinámico,

social y económico), de instituciones peruanas como INDECI, INGEMMET, SENHAMI e IGP; así como a una mayor cobertura del periódico nacional *El Comercio*. La base de datos DeslInventar (DeslInventar, 2015) recopila mucha de esta información, ofreciendo una nueva oportunidad para reflejar una realidad actualizada en la ocurrencia de POHG en ausencia de El Niño. De hecho, tanto las evidencias históricas como los eventos recientes sugieren que muchos POHG han ocurrido en ausencia de eventos extraordinarios de El Niño. Dos factores podrían ser determinantes en el origen de estos eventos; por un lado, la complejidad de las diversas facetas de los fenómenos El Niño y La Niña (Takahashi et al., 2011); y por otro, la variabilidad de baja frecuencia de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico (Segura et al., 2016). Ambos factores modulan la variabilidad e intensidad de las lluvias en el Perú (Lavado-Casimiro y Espinoza, 2014; Segura et al., 2016; Sulca et al., 2018). No obstante, en la actualidad existe poca información sobre las situaciones sinópticas de la circulación atmosférica que origina POHG, en particular durante eventos La Niña y bajo condiciones neutrales de la TSM en el Océano Pacífico tropical.

En este artículo presentamos un breve resumen de Rodríguez-Morata et al. (2018), en el que se analizan y definen patrones atmosféricos de gran escala mediante la técnica denominada Mapas auto-organizados o 'Self-Organizing Maps' (SOM; Kohonen, 2001). Luego, estos patrones son asociados a POHG específicos, permitiendo determinar las condiciones climáticas asociadas a su ocurrencia y que describen a los diferentes tipos de El Niño y La Niña (incluyendo los de tipo costero y central) y las condiciones neutrales en el Pacífico. Las diversas facetas de los eventos El Niño/La Niña son definidas mediante los índices E y C (Takahashi et al., 2011) que sintetizan la variabilidad de la TSM en el Océano Pacífico Este y Central, respectivamente. Estos índices han mostrado ser bastante útiles para discriminar los impactos de los diferentes tipos de El Niño en las lluvias en el Perú (e.g. Lavado-Casimiro y Espinoza, 2014; Rau et al., 2017; Sulca et al., 2018). Finalmente, se evalúa la frecuencia de ocurrencia de los POHG durante el período de 1970-2013 en las diferentes regiones naturales del Perú.

PATRONES DE GRAN ESCALA ASOCIADOS A DESASTRES DE ORIGEN HIDRO-GEOMORFOLÓGICOS EN PERÚ

Mediante la técnica de SOM se han identificado patrones atmosféricos empleando un algoritmo iterativo de agrupamiento o 'clustering' (Hewitson and Crane, 2002). El resultado se presenta en un grupo de nodos (o neuronas) que representan estados sinópticos de la circulación atmosférica, los cuales están ordenados topológicamente dentro

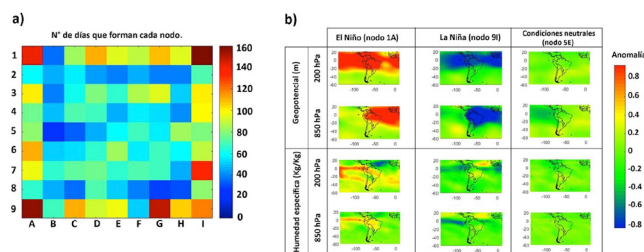


Figura 1. a) Proyección de los días del periodo diciembre a abril de 1979-2017 en el mapa de Kohonen construido a partir de anomalías de altura de geopotencial y humedad específica a 200 y 850 hPa en la región mostrada en b. b) anomalías de altura de geopotencial y humedad específica a 200 y 850 hPa en los nodos A1 (caracterizado por condiciones El Niño, ver Figura 2), I9 (caracterizado por condiciones La Niña) y E5 (caracterizado por condiciones neutrales).

del mapa de Kohonen (Fig. 1a). Esto permite que estados atmosféricos similares se encuentren en nodos próximos, mientras que estados opuestos se encuentren en los extremos del mapa de Kohonen. Para más detalles relacionados a SOM y su aplicación en América del Sur, puede verse Rodríguez-Morata et al. (2018); Espinoza et al. (2013) y Paccini et al. (2017).

En el presente estudio, los patrones de circulación son definidos mediante datos diarios de anomalías de geopotencial y humedad específica del aire a 200 y 850 hPa provenientes del reanálisis ERA-Interim (Dee et al., 2011) sobre la región 60°S-20°N y 140°W-10°E, y considerando los meses de diciembre a abril del período 1979-2017. El mapa de Kohonen resultante muestra 81 nodos (9x9) que definen situaciones atmosféricas bien

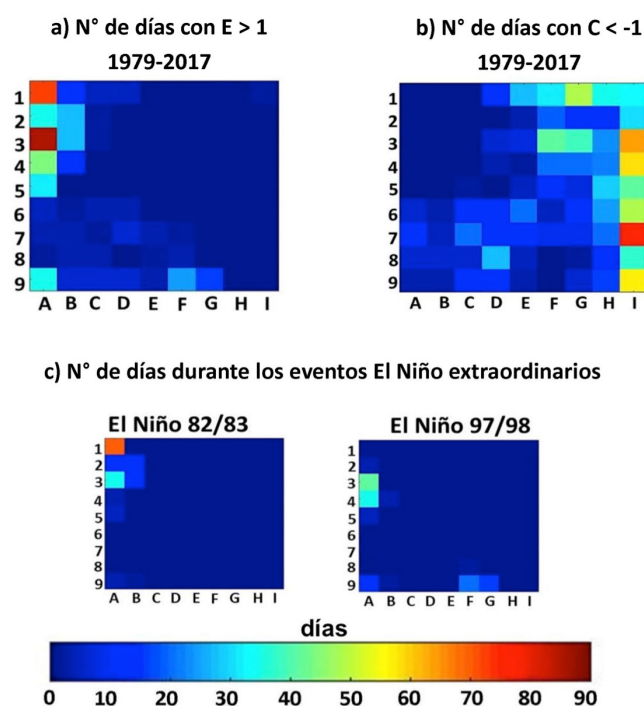


Figura 2. Mapa de Kohonen definido con valores diarios de altura de geopotencial y humedad específica a 850 y 200 hPa en la región 20°N-60°S y 140°W-10°E, considerando los meses de diciembre a abril, en el periodo 1979-2017. a) Proyección de los días donde se observaron valores del índice $E > 1$. b) proyección de los días donde se observaron del índice $C < -1$. c) Proyección de los días durante los eventos extremos de 1982-83 y 1997-97 en el mapa de Kohonen.

diferenciadas en los extremos del mapa topológico (Fig. 1b y 2). Por ejemplo, la Figura 2a, muestra la proyección en el mapa de Kohonen de los días registrados durante los eventos El Niño, caracterizados por valores del índice E superiores a 1 (los que incluyen los años 1982-83 y 1997-98, Figura 2c). Estos eventos se ubican en la esquina superior izquierda (nodos A1, A2, A3, A4 y A5) del mapa de Kohonen y la Figura 1b muestra las situaciones atmosféricas registradas en el nodo A1. Por otro lado, la Figura 2b muestra que los eventos ocurridos durante condiciones La Niña centrales, caracterizados por valores del índice C inferiores a -1, se proyectan en el lado inferior derecho del mapa de Kohonen (nodos I3, I4, I7 e I9). Las características de la circulación atmosférica asociados a al nodo I9 se observa en la Figura 1b.

La Figura 3a ilustra anomalías de radiación saliente de onda larga (OLR) promedio de los nodos A1, A2, A3 y A4, mientras que la Figura 3b muestra las respectivas anomalías para el promedio de los nodos I3, I4, I7 e I9. Anomalías negativas de OLR son frecuentemente interpretadas como presencia de convección y ocurrencia de lluvias. Los valores de anomalías negativas de OLR mostrados en la Figura 3a sugieren la ocurrencia de eventos convectivos y presencia de precipitación desde la costa de Perú y Ecuador hasta el Pacífico central (hasta 180°W aproximadamente), mientras que menos nubosidad y menor precipitación se observa en la región Amazónica y el Nordeste de Brasil. En la Figura 3b observamos que los nodos "I" se caracterizan por anomalías positivas de OLR, que se interpretan como ausencia de precipitaciones en el Pacífico ecuatorial oeste (entre 150°W y 150°E), mientras que anomalías negativas predominan en la región Amazónica y en los Andes peruanos.

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS POHG

Con la finalidad de sintetizar los POHG ocurridos en Perú, se definieron 5 grandes dominios que incluyen 3 zonas en la vertiente del Pacífico: Pacífico Norte (PN), Pacífico Central (PC) y Pacífico Sur (PS) y 2 zonas

en la región Andino-Amazónica de la vertiente del Amazonas: Andes-Amazónica Norte (AN) y Andes-Amazónica Sur (AS). La definición de estas regiones se detalla en la Figura 4a. Los días en los que se reportaron POHG en cada una de estas zonas durante 1970-2013 son proyectados en el mapa de Kohonen (Figura 4b), lo que nos permite identificar qué tipo de situación atmosférica está asociada a los POHG reportados en cada una de las regiones en Perú.

La Figura 4b muestra que durante eventos con valores de los índices C y E superiores a 0.5, los POHG son principalmente reportados en el norte y centro de la vertiente del Pacífico. En particular, en la región norte el 58% de los POHG se reportaron durante eventos del índice E>0.5. En las zonas de Pacífico Central y Sur (PC y PS) los reportes de POHG durante eventos con E>0.5 son menos frecuentes que en el norte (35% y 22%, respectivamente), pero son más frecuentes durante eventos con C>0.5 y C<-0.5. En efecto, en las zonas PC y PS se reportaron 22% y 24%, respectivamente de POHG durante eventos caracterizados por C<-0.5, lo cual estaría asociado a más precipitación en la parte alta de las cuencas en estas regiones durante eventos La Niña centrales (Lavado-Casimiro y Espinoza, 2014; Sulca et al., 2018). Las dos regiones ubicadas en los Andes-Amazónica son las que reportan más POHG durante eventos con C<-0.5 (alrededor de 30% durante eventos con C ó E <-0.5); sin embargo, estas regiones también registran frecuentes POHG durante eventos con C>0.5 (alrededor de 40%).

A escala de país, los resultados muestran que 36% de los POHG reportados durante los meses de diciembre a abril en el período de 1970-2013 no han sido atribuidos a eventos El Niño, 25% de ellos ocurrieron durante condiciones La Niña (principalmente en la región Andino Amazónica) y 11% durante condiciones neutrales en el Pacífico (principalmente en la costa sur).

Estos resultados son coherentes con previos estudios en la región Andino-Amazónica, donde se documenta que las precipitaciones no solo dependen de la variabilidad de la TSM en el Océano Pacífico, sino también en

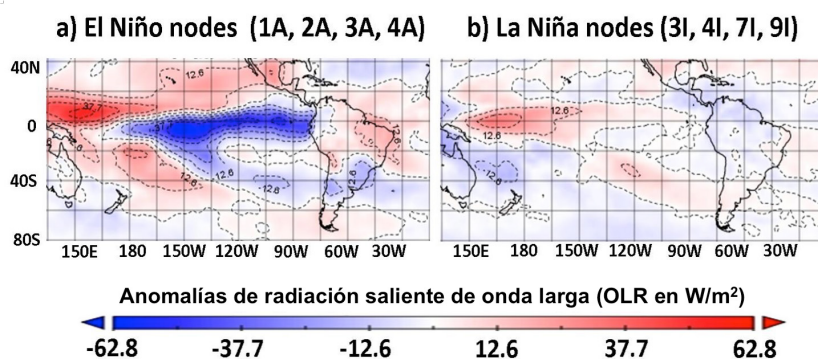


Figura 3. Promedio de anomalías de radiación saliente de onda larga (OLR) en los nodos del mapa de Kohonen caracterizados por: a) valores del índice E>1 y b) valores del índice C<-1. El periodo de análisis comprende los meses de diciembre a abril entre 1979-2017.

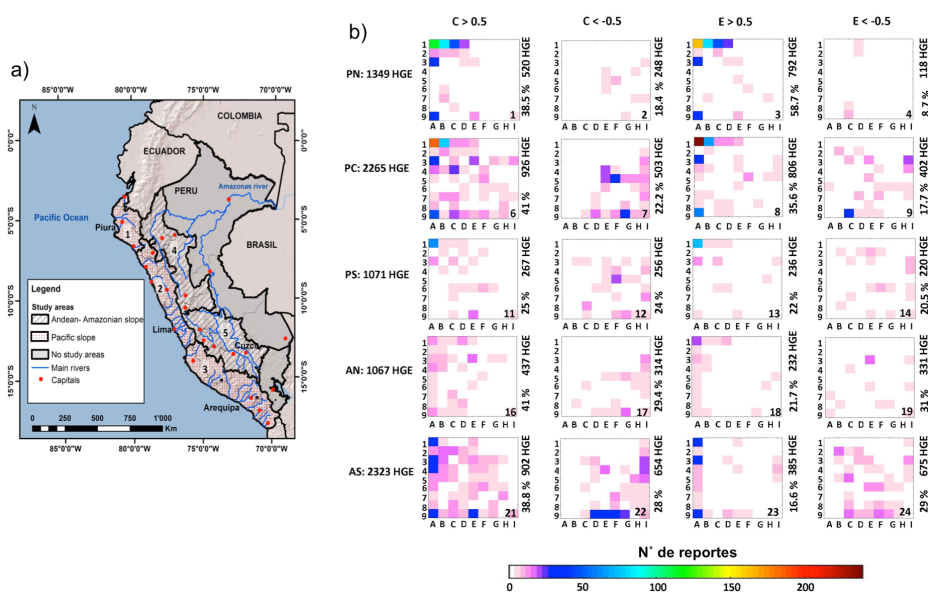


Figura 4. a) Mapa del Perú identificándose las 5 zonas de estudio: 1-Pacífico norte (PN, Tumbes, Piura y Lambayeque), 2-Pacífico centro (PC, La Libertad, Ancash y Lima), 3- Pacífico sur (PS, Ica, Arequipa, Moquegua, Tacna, Huancavelica y Ayacucho), Andes-Amazonía norte (AN, Amazonas, Cajamarca, San Martín, Huánuco y Pasco) y Andes-Amazonía Sur (AS, Apurímac, Cusco, Huancavelica y Junín). b) Mapa de frecuencias de desastres de origen hidro-geomorfológicos (DOHG) relacionados a valores específicos de los índices de El Niño E y C para cada región de estudio en Perú proyectados en el mapa de Kohonen. Se indica el número total de DOHG reportados por DesInventar durante diciembre y abril en el periodo 1979-2013.

el Océano Atlántico tropical (Espinoza et al., 2009; Lavado-Casimiro et al., 2012). En relación a ello, sequías extremas e inundaciones en esta región también están asociadas a cambios en la TSM en el Atlántico Tropical (Espinoza et al., 2011; Marengo y Espinoza, 2016). En coherencia con ello, Rodríguez-Morata et al. (2018) reportan POHG durante anomalías de la TSM en el Atlántico Tropical.

COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIÓN

En este artículo se presenta un breve resumen de los resultados reportados en Rodríguez-Morata et al. (2018), en el que se brindan nuevos alcances sobre la relación entre condiciones climáticas de gran escala de verano y la ocurrencia de procesos de origen hidrogeomorfológicos (POHG) que han tenido impactos negativos en Perú reportados en la base de datos DesInventar. Para ese propósito se utiliza una innovadora técnica basada en mapas autoorganizados (SOM) que permite identificar patrones atmosféricos de gran escala y relacionarlos con los POHG ocurridos en Perú. Los resultados permiten asociar la ocurrencia de POHG con los diferentes tipos de El Niño y con La Niña, revelándose que a nivel nacional más del 60% (25%) de los POHG ocurrieron durante condiciones El Niño (La Niña). En total, 21% de los POHG ocurrieron durante los eventos El Niño de 1972-73, 1982-83 y 1997-98 (principalmente concentrados en la costa norte del Perú, en las regiones de Tumbes, Piura y Lambayeque), mientras que 25% de los POHG han sido reportados durante condiciones La Niña, principalmente en la región Andino-Amazonica. Estos resultados revelan

que los POHG reportados durante eventos La Niña y condiciones neutrales del océano Pacífico (40 %) impactan también de manera severa en el territorio peruano, con pérdidas económicas estimadas en US\$ 40 millones y más de 2000 pérdidas humanas registradas entre 1970 y 2013 (DesInventar, 2015).

Concluimos que este estudio da una nueva perspectiva a nivel regional sobre la ocurrencia de POHG en Perú, indicando su independencia de la fase del ENSO activa en cada momento (El Niño, La Niña o condiciones neutrales). Sin embargo creemos que futuras investigaciones deberían enfocarse, a un nivel más local, en estimar umbrales de precipitación capaces de generar POHG teniendo en cuenta las características sociales, climáticas, orográficas, geológicas y de usos del suelo concretas de cada lugar.

REFERENCIAS

- Comunidad Andina. 2008. Pérdidas por desastres en Perú entre 1970–2006. <http://www.comunidadandina.org/predecan/doc/r2/osso/Cons025-2006-CorporacionOSSO-Articulo-Peru.pdf>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553–597.
- DesInventar. 2015. DesInventar – Inventory system of the effects of disasters, Corporación OSSA, Cali, Colombia. <http://desinventar.org>. Accessed 12 December 2015

- Espinoza JC., J. Ronchail, J.L. Guyot, Cocheneau G., N Filizola, W. Lavado, E. de Oliveira, R. Pombosa and P. Vauchel. 2009. Spatio – Temporal rainfall variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29, 1574-1594
- Espinoza, JC., Ronchail J., Guyot J.L., Junquas C., Vauchel P., Lavado W.S., Drapeau G., Pombosa R. 2011. Climate variability and extremes drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13406, doi:10.1029/2011GL047862.
- Espinoza, JC., Ronchail J., Lengaigne M., Quispe, N., Silva Y., Bettolli, ML., Avalos G., Llacza A. 2013. Revisiting wintertime cold air intrusions at the East of the Andes: Propagating features from subtropical Argentina to Peruvian Amazon and relationship with large-scale circulation patterns. *Climate Dynamics* 41, 1983-2002. doi: 10.1007/s00382-012-1639-y.
- Garreaud, R. 2018. A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal El Niño. *International Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.5426
- Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Bangalore, M., Rozenberg, J. 2017. Unbreakable: Building the resilience of the poor in the face of natural disasters Climate change and development series. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1003-9>
- Hewitson, B., & Crane, R. 2002. Self-organizing maps: Applications to synoptic climatology. *Climate Research*, 22, 13–26.
- Huggel, C., Raissig, A., Rohrer, M., Romero, G., Diaz, A., & Salzmänn, N. 2015. How useful and reliable are disaster databases in the context of climate and global change? A comparative case study analysis in Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 475–485.
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). 2016. Informe técnico: Evolución de la Pobreza Monetaria, 2009–2015. Lima, Peru.
- Kohonen, T. 2001. Self-organizing maps. New York, NY: Springer.
- Lavado-Casimiro, W., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J., & Guyot, J. 2012. Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 625–642. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672985>
- Lavado-Casimiro WS, Felipe O, Silvestre E, Bourrel L. 2013. ENSO impact on hydrology in Peru. *Adv. Geosci.* 33: 33-39.
- Lavado-Casimiro, W., & Espinoza, J. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965–2007). *Revista Brasileira de Meteorología*, 29, 171–182.
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- Paccini, L., Espinoza, J. C., Ronchail, J., & Segura, H. (2018). Intra-seasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: a focus on western Amazon–Andes transition region. *International Journal of Climatology*, 38, 2386–2399. <https://doi.org/10.1002/joc.5341>
- Rau P, Bourrel L, Labat D et al., 2017. Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *Int. J. Climatol.* doi: 10.1002/joc.4693
- Rodriguez-Morata, C., Ballesteros-Canovas JA., Rohrer M., Espinoza JC., Beniston M., Stoffel M. 2018. Linking atmospheric circulation patterns with hydro geomorphic disasters in Peru. *Int. Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.5507
- Segura, H., Espinoza, J., Junquas, C., & Takahashi, K. 2016. Evidencing decadal and interdecadal hydroclimatic variability over the central Andes. *Environmental Research Letters*, 11(9), 094016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094016>
- Sulca, J., Takahashi, K., Espinoza, J., Vuille, M., & Lavado-Casimiro, W. 2017. 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, 420–435. <https://doi.org/10.1002/joc.5185>
- Takahashi, K. 2004. The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997–1998 and 2002 El Niño events. *Annales Geophysicae* 22(11): 3917-3926. DOI: 10.5194/angeo-22-3917-2004.
- Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., & Dewitte, B. 2011. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 38, L10704. <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>
- Takahashi, K., & Martínez, A. G. 2017. The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3702-1>
- Waylen PR, Caviedes CN. 1986. El Niño and annual floods on the north Peruvian littoral. *J. Hydrol.* 89: 141-156.