

Variabilidad del ENSO durante el Holoceno: evidencias paleoclimáticas

El Niño-Oscilación Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es el fenómeno océano - atmosférico de mayor importancia en escala global. Se caracteriza por variaciones interanuales en la temperatura superficial del mar (TSM) en el océano Pacífico Ecuatorial y en la circulación atmosférica a escala global, lo cual produce cambios en el clima mundial con importantes repercusiones sociales y económicas. Recientemente la comunidad científica se está enfocando en entender la diversidad en estos eventos y sus impactos, la cual se puede caracterizar según dónde se produce el mayor calentamiento en el océano, especialmente en el Pacífico Central o el Pacífico Oriental (Takahashi, 2014). En particular, El Niño costero o de calentamiento de TSM en el Pacífico Oriental puede incrementar las lluvias en la costa mientras que El Niño en el Pacífico Central tiende a reducirlas en los Andes peruanos (Lavado y Espinoza, 2014). En general, es importante reconocer esta diversidad para la correcta interpretación de registros paleoclimáticos, ya que estos típicamente reflejan cambios locales que pueden estar asociados a diferentes aspectos de ENSO. En un artículo previo se presentaron las evidencias y perspectivas de la ocurrencia de los diferentes tipos de eventos ENSO durante el último milenio a partir de registros históricos



James Apaéstegui, Dr.
Investigador Científico del
Instituto Geofísico del Perú

Doctor en Geociencias de la Universidad Federal Fluminense, Brasil, con área de actuación en Geoquímica Ambiental aplicada a la Paleoclimatología. Actualmente es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú donde desarrolla trabajos en Paleoclimatología de los Andes orientales a través del análisis de indicadores geoquímicos e isotópicos de espeleotemas y el uso de trazadores isotópicos para estudios hidrológicos. Además es miembro del Laboratorio Mixto Internacional Paleotracas y del grupo de trabajo PAGES 2K.

y reconstrucciones paleoclimáticas (Apaéstegui et al., 2015). Ahora nos remontamos más hacia el pasado y resumimos nuestro conocimiento sobre la ocurrencia del ENSO y sus trazos paleoambientales durante el periodo conocido como Holoceno.

El Holoceno, que corresponde a aproximadamente los últimos 10000 años de la historia de la Tierra, es el periodo geológico más reciente donde se observan condiciones bastante estables en el clima global después de la ocurrencia del Último Periodo

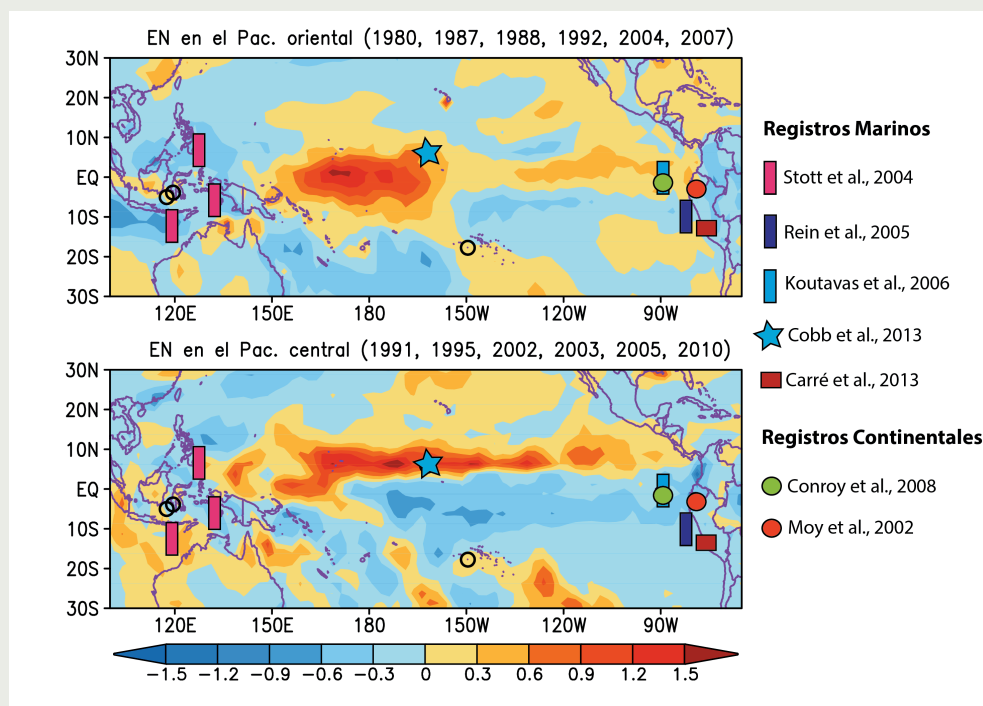


Figura 1. Anomalías de precipitación (mm/día) de febrero a abril promediadas para: El Niño del Pacífico Oriental y El Niño del Pacífico Central. Los datos provienen de GPCP y la clasificación se basa en Yeh et al. (2009) y Takahashi et al. (2011). Las marcas en rectángulos (sedimentos marinos), estrellas (corales) y círculos (sedimentos continentales) refieren la posición de diferentes registros paleoclimáticos discutidos en el texto.

Variabilidad del ENSO durante el Holoceno: evidencias paleoclimáticas

Apaéstegui J. y Takahashi K.

Ken Takahashi Guevara, Ph. D.

Investigador Científico del
Instituto Geofísico del Perú



Ph. D. en Ciencias Atmosféricas de la University of Washington, Seattle, EE.UU. y Físico de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Actualmente es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú, donde está a cargo de la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrosfera, y representa al IGP en el Comité Técnico del ENFEN. Recientemente su investigación está enfocada en entender las condiciones que favorecen la ocurrencia de eventos El Niño extremos, los procesos de interacción entre el océano y atmósfera, identificar la variabilidad a escala decadal en el Pacífico sureste.

Glacial. Es en este periodo geológico donde se conforman las condiciones globales actuales, en relación a las forzantes naturales de insolación debidas al movimiento de precesión solar, las cuales afectan los parámetros de distribución de calor en la Tierra, así como la estacionalidad e intensidad de las precipitaciones en ambos hemisferios. Sobre estas escalas, el clima promedio con respecto al cual se presentan las variaciones asociadas a ENSO puede variar lentamente y esto, a su vez, puede afectar las características espaciales y temporales

de este fenómeno (Takahashi, 2014). En los registros paleoclimáticos, que presentan diversidad en la resolución temporal, es importante distinguir entre los cambios en el estado promedio y en la varianza interanual.

Cambios en el estado climático promedio

A lo largo del Pacífico Ecuatorial, la salinidad superficial de las aguas es más baja y la temperatura mayor en la región occidental que la oriental. El análisis de isótopos de oxígeno y razones de Mg/Ca en foraminíferos de sedimentos marinos colectados en el Pacífico Occidental, cerca de Indonesia, nos indica que durante los últimos 10000 años la TSM y salinidad promedio presentaron una tendencia decreciente, de manera que la TSM era mayor en aproximadamente 0.5°C en relación al presente (Stott et al., 2004; Figura 2a).

Mientras tanto, en el Pacífico Oriental, la reconstrucción de TSM con foraminíferos en sedimentos próximos a las islas Galápagos en Ecuador (Koutavas et al., 2006) nos muestra que entre 9000 y 5000 años B. P., las condiciones eran más frías que las actuales en aproximadamente $\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ (Figura 2b). Esto sugiere que en el Holoceno Medio el gradiente zonal (oeste-este) de temperatura fue mayor que en el presente (Figura 2a, b).

Además, el registro de sedimentos en la cuenca Cariaco, frente a la costa de Venezuela, indica que la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la principal banda de lluvia en el Pacífico y Atlántico, estaba en promedio más al norte en el Holoceno Temprano y Medio que en el presente (Haug et al., 2001; Figura 3a), lo cual sugiere que los vientos a lo largo de la costa de Perú y el afloramiento costero podrían haber sido más fuertes.

El gradiente zonal intensificado de las temperaturas ecuatoriales podría implicar menor variabilidad asociada a ENSO a gran escala, aunque esta relación no es sencilla (Takahashi, 2014). Sin embargo, condiciones frías frente al Perú con la ZCIT desplazada al norte implican menor probabilidad de eventos de lluvias intensas en la costa (Woodman y Takahashi, 2014), mientras que los vientos más fuertes podrían afectar la propagación de ondas Kelvin y reducir la señal de ENSO en la TSM de la costa (Mosquera-Vásquez et al., 2013; 2014). Pero, ¿qué evidencias tenemos de cambios en ENSO mismo?

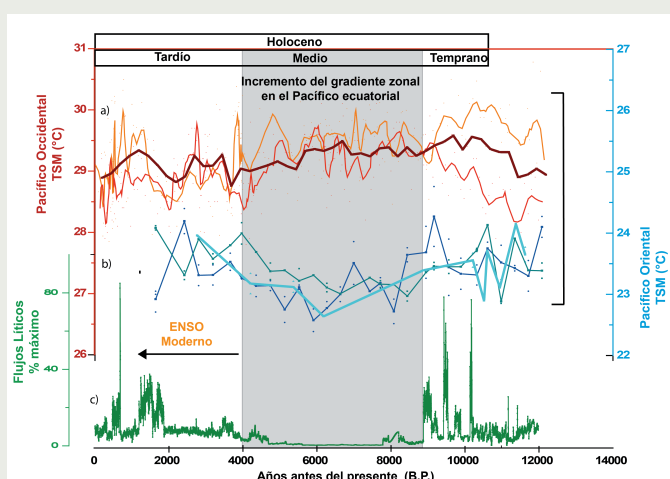


Figura 2. a) Reconstrucciones de TSM en el Pacífico Occidental (líneas rojas; tomadas a partir de Stott et al., 2004) y b) el Pacífico Oriental (líneas azules; tomadas a partir de Koutavas et al., 2006). En c) se observa el registro de aportes líticos en los sedimentos marinos frente a la costa de Perú (Rein et al., 2005). La barra gris indica el Holoceno Medio y el incremento en el gradiente zonal del Pacífico relacionado a la ausencia de eventos ENSO durante dicho periodo de tiempo. (Nótese que el tiempo avanza de derecha a izquierda).

¹Años B. P. (before present) se refiere al número de años antes de 1950.

Cambios en la variabilidad climática

En el Pacífico Central, el análisis isotópico de corales fósiles nos proporciona registros de las variaciones mensuales de la TSM en la región Niño 3.4 (Cobb et al., 2013), los cuales sugieren una gran variabilidad durante los últimos 7000 años pero no indican que la varianza de la TSM asociada a ENSO haya sido sustancialmente distinta en el Holoceno Medio respecto al presente. Es decir que, según estos registros, El Niño en el Pacífico Central de ese entonces no habría sido muy diferente al de ahora.

Por otro lado, la TSM estimada con foraminíferos en las islas Galápagos en el Pacífico Oriental indica una varianza que era 50% entre 9000 y 4000 años B. P. en relación al presente, lo cual sugiere dramáticamente menor amplitud de ENSO en el Holoceno Medio (Koutavas et al., 2006; Figura 2b). Más recientemente, el análisis isotópico en conchas fósiles de la “macha” (*Donacium mesodesma*) en la costa centro y sur de Perú indica que la asimetría (skewness) de la distribución de las anomalías de la TSM mensuales fue menor en 7500-6700 años B. P. que en el presente, lo cual indica menor ocurrencia de eventos de calentamiento debido a El Niño costero durante el Holoceno Medio (Carré et al., 2014). Se debe notar que estos moluscos

mueren durante eventos El Niño extremos, por lo que solo registran eventos hasta magnitud moderada.

En cuanto a las lluvias asociadas a El Niño costero, la mayoría de registros coinciden en que hubo menos eventos El Niño intensos en el Pacífico Oriental. Para empezar, en las islas Galápagos, donde llueve intensamente solo durante El Niño extraordinarios en el Pacífico Oriental, los sedimentos encontrados en un cráter laguna (Conroy et al., 2008) nos indican poca frecuencia e intensidad de estos eventos antes de los 4200 años B. P. (Figura 3d). Asimismo, los sedimentos de la laguna Pallcacocha (4200 msnm), en Ecuador, registran las lluvias típicamente asociadas a eventos El Niño costero moderados y fuertes (Moy et al., 2002) e indican que el Holoceno es caracterizado por un incremento gradual de la frecuencia de eventos de lluvias intensas y, posiblemente El Niño (Figura 3d). Sin embargo, los registros de la laguna Pallcacocha han sido puestos en discusión debido a que, por su posición en los Andes, podrían reflejar la intensificación del Monzón Sudamericano (Kanner et al., 2012).

Además, el análisis de cordones litorales al norte y sur del río Chira (secuencias Chira y Colán) y norte del río Piura (secuencia Sechura) indica que estos

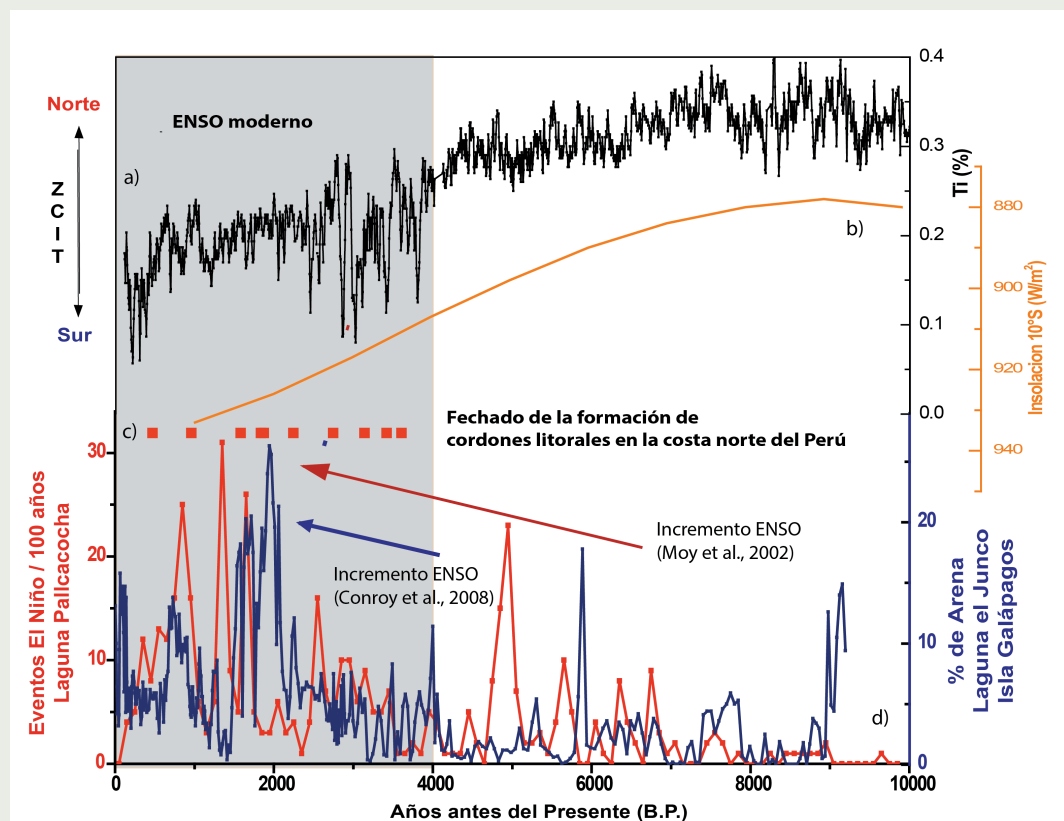


Figura 3. a) Registro de Titanio de Cariaco (%Ti) indicando la migración de la posición media de la Zona de Convergencia Intertropical durante el Holoceno (Haug et al., 2001); b) Registro de Insolución 10° S; c) Dataciones de la posible formación de los cordones litorales en la costa norte del Perú, asociada con eventos ENSO de magnitud extraordinaria durante el Holoceno Tardío (Ortlieb et al., 1995); d) Reconstrucciones de la ocurrencia de ENSO a partir de registros lacustres en la laguna de Pallcacocha (línea roja; Moy et al., 2002) y la laguna El Junco en las islas Galápagos (línea azul; Conroy et al., 2008).

Variabilidad del ENSO durante el Holoceno: evidencias paleoclimáticas

Apaéstegui J. y Takahashi K.

son formados durante eventos El Niño extraordinarios de magnitud mayor a la registrada en el de 1982-1983 (Ortlieb et al., 1995), y que estos se habrían formado después de los 5000 años B. P.. También, su estudio revela que su formación precurre periodos que pueden variar de 100 a 600 años (Figura 3b).

Más al sur, los proxies líticos en sedimentos marinos 80 km al oeste de Lima también nos muestran que en el Holoceno Medio hubo menor frecuencia de eventos intensos de inundaciones y crecidas fluviales en la costa (Rein et al., 2004, 2005; Figura 2c), los cuales se asocian a eventos El Niño costero extraordinario (Morera, 2014). Así mismo, la menor frecuencia de eventos El Niño costero fuerte o extraordinario en el Holoceno Medio también se sugiere por otros registros geológicos (Keefer et al., 1998) y arqueológicos (Núñez et al., 2002).

Discusión

Un paradigma central para la interpretación de las variaciones en ENSO es que la distribución de radiación solar cambia según las variaciones cíclicas en la geometría orbital de la Tierra, lo cual ejerce un fuerte control sobre el clima promedio y, por lo tanto, ENSO. En tal sentido, durante el Holoceno Medio la mayor insolación en el hemisferio norte habría inhibido el desplazamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical, como es puesto en evidencia por el registro de Cariaco (Figura 3a). Esta configuración podría explicar la menor ocurrencia de El Niño costero durante el Holoceno Medio indicada por varios registros. Sin embargo, la ausencia de cambios en la varianza de ENSO en los corales en el Pacífico Central sugiere variaciones en el patrón espacial del fenómeno.

Emile-Geay et al. (2015) usaron recientemente una red de registros de corales y moluscos y la salida de nueve modelos climáticos para evaluar la relación entre la variabilidad estacional e interanual en el Pacífico Ecuatorial y las variaciones orbitales del Holoceno. Los resultados de este trabajo indican que el clima tropical del Pacífico es muy variable y no se puede simular adecuadamente a través de la actual generación de modelos, ya que estos no captan la variabilidad de ENSO ni el aumento en estacionalidad registrado por los proxies en el Holoceno Medio.

Por otro lado, en Karamperidou et al. (2015), los autores usaron el modelo climático global NCAR CCSM4 para mostrar cómo el forzante orbital podría cambiar el ciclo estacional promedio y reducir la frecuencia de eventos El Niño extraordinario en el Pacífico Oriental sin afectar la frecuencia de El Niño en el Pacífico Central, consistente con los proxies. En este estudio, los vientos en la primavera boreal en el Pacífico Occidental habrían sido más débiles en el Holoceno Medio, lo cual habría generado una mayor profundidad climatológica de la termoclina en el Pacífico Oriental en los meses en que normalmente se desarrolla El Niño. Esto habría reducido la posibilidad de que El Niño produjera anomalías cálidas.

Existe una gran diversidad de registros, no solo por el tipo de proxy, ubicación, periodo, resolución temporal, y procesos climáticos a los cuales responden. La interpretación de estos es complicada porque además las características e impactos de ENSO varían de evento en evento. Esto puede explicar en parte las aparentes discrepancias que puedan existir entre los registros. Para lograr esto es importante la colaboración entre los expertos en teoría y modelado de ENSO y los especialistas en registros paleoclimáticos, como ilustrado por el estudio de Karamperidou et al. (2015). Sin embargo, es crítico contar primero con una alta densidad de reconstrucciones paleoambientales relacionadas a diferentes aspectos de la ocurrencia y variabilidad de ENSO y sus impactos. Esta información se podrá usar para discriminar entre los modelos y las teorías, los cuales luego podrán ser utilizados para la interpretación y evaluación de los mecanismos. Ante la diversidad conocida, se debe tener mucho cuidado en generalizar la interpretación de los resultados tanto de teorías y modelos como de registros paleoclimáticos. Incluso, para el periodo reciente, donde se cuenta con gran cantidad de información, la comunidad científica internacional se da con sorpresas, como en los casos de los fallidos pronósticos en el año 2014 (Dewitte et al., 2016) o para El Niño 2015-2016. Este último ya se ha presentado como uno de los más intensos registrados en el Pacífico Central, similar a los eventos extraordinarios de 1982-1983 y 1997-1998, sin embargo en el Pacífico Oriental ha sido bastante más débil que esos años, tanto en el calentamiento del mar como en las lluvias y caudales en la costa peruana. No se puede descartar que en el pasado remoto los eventos ENSO hayan tenido un comportamiento distinto a lo que hemos visto en los siglos recientes.

Referencias

- Apaéstegui, J., K. Takahashi, L. Ortlieb, A. Sifeddine, y J. Macharé, 2015: El Fenómeno El Niño durante el último milenio, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 2, 2, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.
- Carré, M., J. P. Sachs, S. Purca, J. Andrew, P. Braconnot, and R. A. Falcón, 2014: Holocene history of ENSO variance and asymmetry in the eastern tropical Pacific, *Scienceexpress*, doi: 10.1126/science.1252220.
- Clement, A. C., R. Seager, and M. A. Cane, 2000: Suppression of El Niño during the mid-Holocene by changes in the Earth's orbit, *Paleoceanography*, 15, 731–737, doi:10.1029/1999PA000466.
- Cobb, K. M., N. Westphal, H. R. Sayani, J. T. Watson, E. Di Lorenzo, H. Cheng, L. R. Edwards, C. D. Charles, 2013: Highly Variable El Niño–Southern Oscillation Throughout the Holocene, *Science*, 339, 67, doi: 10.1126/science.1228246.
- Conroy, J. L., J. T. Overpeck, J. E. Cole, T. M. Shanahan, and M. Steinitz-Kannan, 2008: Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record, *Quaternary Science Reviews*, 27, 1166–1180, doi:10.1016/j.quascirev.2008.02.015.
- Dewitte, B., K. Mosquera, K. Takahashi, 2016: ¿Por qué El Niño no creció en el Pacífico central? *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 1, 3, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.
- Emile-Geay, J., K. M. Cobb, M. Carré, P. Braconnot, J. Leloup, Y. Zhou, T. Corrège, H. V. McGregor, M. Collins, R. Driscoll, M. Elliot, S. P. Harrison, B. Schneider, and A. Tudhope., 2015: Links between tropical Pacific seasonal, interannual and orbital variability during the Holocene, *Nature Geoscience*, 9, 168–173.
- Haug, G. H., K. A. Hughen, D. M. Sigman, L. C. Peterson, and U. Röhl, 2001: Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene, *Science*, 293, 1304–1308, doi:10.1126/science.1059725.
- Kanner, L. C., S. J. Burns, H. Cheng, R. L. Edwards, and M. Vuille, 2012: High-resolution variability of the South American summer monsoon over the last seven millennia: insights from a speleothem record from the central Peruvian Andes, *Quaternary Science Reviews*, 75, 1–10, doi: 10.1016/j.quascirev.2013.05.008, 2013.
- Karamperidou, C., P. N. Di Nezio, A. Timmermann, K. M. Cobb, 2015: The response of ENSO flavors to mid-Holocene climate: Implications for proxy interpretation, *Paleoceanography*, doi:10.1002/2014PA002742.
- Keefer, D. K., S. D. de France, M. E. Moseley, J. B. Richardson III, D. R. Satterlee, and A. Day-Lewis, 1998: Early maritime economy and El Niño events at Quebrada Tacahuay, Peru, *Science*, 281, 1833–1835.
- Koutavas, A., P. B. deMenocal, G. C. Olive, and J. Lynch-Stieglitz, 2006: Mid-Holocene El Niño–Southern Oscillation (ENSO) attenuation revealed by individual foraminifera in eastern tropical Pacific sediments, *Geology*, 34, 993–996.
- Koutavas, A., P. B. De Menocal, J. Lynch-Stieglitz, 2006: Holocene trends in tropical Pacific sea surface temperatures and the El Niño–Southern Oscillation, *Pages News*, 14(3), 22–23, 2006.
- Koutavas, A., and S. Joanides, 2012: El Niño–Southern Oscillation extrema in the Holocene and Last Glacial Maximum, *Paleoceanography*, 27,(4),doi:10.1029/2012PA002378.
- Lavado, W., J. C. Espinoza, 2014: Entendiendo los impactos de diferentes tipos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 1, 3, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.
- Morera, S., 2014: Erosión y transporte de sedimentos durante eventos El Niño a lo largo de los Andes occidentales, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 1, 7, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.
- Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, S. Illig, K. Takahashi, and G. Garric, 2013: The 2002-03 El Niño: Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2012JC008551.
- Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, and S. Illig, 2014: The Central Pacific El Niño Intraseasonal Kelvin wave, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1002/2014JC010044.
- Moy, C. M., G. O. Seltzer, D. T. Rodbell, and D. M. Anderson, 2002: Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial time-scales during the Holocene epoch, *Nature*, 420, 162–165, doi:10.1038/nature01194.
- Núñez, L., M. Grosjean, and I. Cartajena, 2002: Human occupations and climate change in the Puna de Atacama, Chile, *Science*, 298, 821–824.
- Ortlieb, L., M. Fournier, J. Macharé, 1995: Beach Ridges and Major Late Holocene El Niño events in Northern Peru, *Journal of Coastal Research, Special Issue N°17: Holocene Cycles: Climate, Sea Levels, and Sedimentation*, 109–117.
- Quinn, W. H., V. T. Neal, S. E. Antunez de Mayolo, 1987: El Niño Occurrences over the past four and half centuries, *Journal of Geophysical Research*, 92(C13):14449–61.
- Rein, B., A. Luckge, and F. Sirocko, 2004: A major Holocene ENSO anomaly during the Medieval period, *Geophysical Research Letters*, 31, L17211, doi:10.1029/2004GL020161.
- Rein, B., A. Luckge, L. Reinhardt, F. Sirocko, A. Wolf, W. C. Dullo, W.C., 2005: El Niño variability off Peru during the last 20,000 years, *Paleoceanography*, 20 (4), 2004PA001099.
- Sandweiss, D. H., J. B. Richardson, E. J. Reitz, H. B. Rollins, and K. A. Maasch, 1996: Geoarchaeological evidence from Peru for a 5000 years B. P. onset of El Niño, *Science*, 273, 1531– 1533.
- Stott, L., K. Cannariato, R. Thunell, G. H. Haug, A. Koutavas, S. Lund, 2004: Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch, *Nature*, 431, 56–59, <http://dx.doi.org/10.1038/Nature02903>.
- Takahashi, K., 2014: Variedades de El Niño, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 1, 2, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.
- Takahashi, K., B. Dewitte, 2015: Influencia de la variabilidad decadal en El Niño–Oscilación Sur, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 2, 5, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.
- Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova, B. Dewitte, 2011: ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2011GL047364.
- Woodman, R., y K. Takahashi, 2014: ¿Por qué no llueve en la costa del Perú (salvo durante El Niño)?, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 1, 6, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.
- Yeh, S.-W., J.-S. Kug, B. Dewitte, M.-H. Kwon, B. P. Kirtman, F.-F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate, *Nature*, 461, 511–515.