



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú - IGP



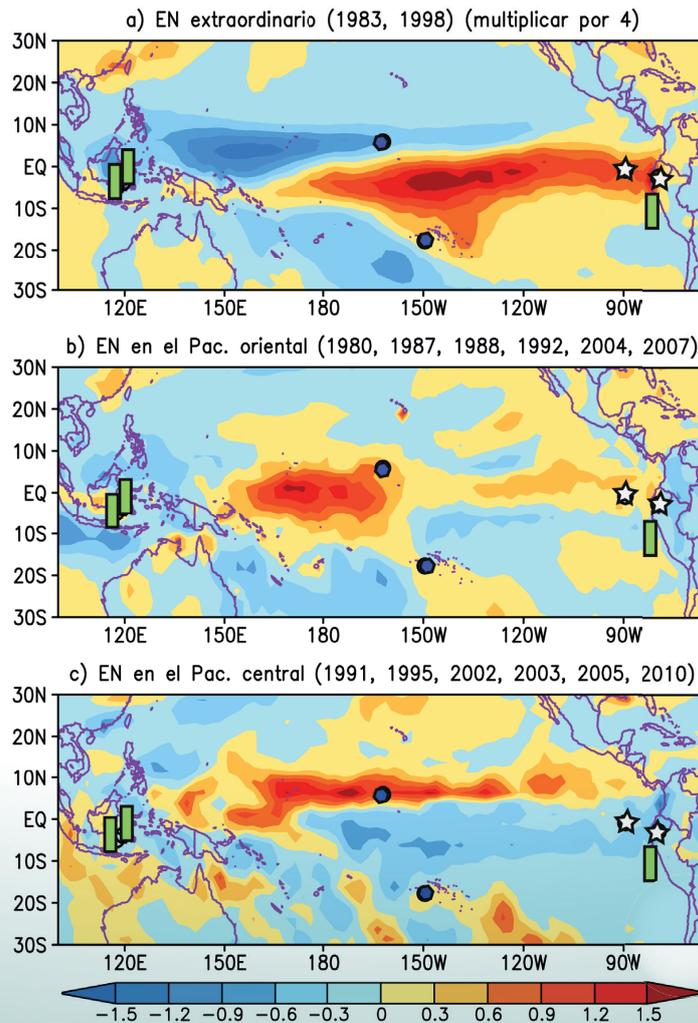
Programa Presupuestal por Resultados N° 068: "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres" Producto: "Entidades informadas en forma permanente y con pronósticos frente al Fenómeno El Niño"

# "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"

## Boletín Técnico

### Anomalías de precipitación promediadas de febrero a abril (mm/día) para los diferentes patrones de El Niño.

Las marcas de posición referencian algunos registros paleoclimáticos utilizados para el estudio de ENSO durante el último milenio.



# Artículo de Divulgación Científica

## El Fenómeno El Niño durante el último milenio

El Fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENSO por sus siglas en inglés) representa la mayor perturbación natural en el sistema climático global. En escala de tiempo interanual, este fenómeno está asociado a procesos de reorganización del sistema océano – atmosférico en el Pacífico Tropical que, a su vez, induce a anomalías climáticas remotas (teleconexiones), tanto en áreas tropicales como extra-tropicales del planeta. Debido a su naturaleza y sus impactos en los ecosistemas y economías globales, este fenómeno ha despertado el interés de varios estudios que se proponen entender los procesos que explican su ocurrencia, intensidad e impactos en base a mediciones instrumentales periódicas en el sistema océano-atmósfera.

Las informaciones generadas en base a registros instrumentales que abarcan aproximadamente los últimos cien años han generado progresos en la comprensión de algunos procesos e interacciones que se han observado durante la ocurrencia del fenómeno. Inicialmente la concepción del evento se basaba en anomalías de temperatura superficial del mar en el Pacífico Oriental que se propagaban hacia la región central durante la fase madura del evento (El Niño Canónico o del Pacífico Oriental, EP). Sin embargo, se observaron patrones diferentes durante la ocurrencia de los últimos eventos de intensidad extraordinaria (1982-83 y 1997-98). Particularmente, trabajos recientes han propuesto la existencia de un nuevo tipo de “El Niño” conocido como “El Niño del Pacífico Central” o “El Niño Modoki”, entre otros nombres (Larkin y Harrison, 2005; Ashok et al., 2007; Kug et al., 2009; Yeh et al., 2009), que se caracteriza por un calentamiento del mar principalmente en el Pacífico Central Ecuatorial mas no tanto en la costa de Sudamérica. Más recientemente, el análisis de Takahashi et al., 2011 (también ver Takahashi, 2014) indica que los eventos El Niño extraordinario corresponden a un tipo inusual de El Niño con muy intenso calentamiento en el este, distinto a los demás eventos observados. Para esto, definieron índices relacionados con las temperaturas en las regiones del centro (índice C) y del este (índice E) del océano Pacífico. Estos índices fueron utilizados posteriormente por Lavado y Espinoza (2014) para mostrar que el calentamiento en el Pacífico Oriental (índice E) produce mayores precipitaciones en la costa norte del Perú, mientras que el calentamiento en el Pacífico Central (índice C) se asocia con menores precipitaciones en las regiones andina y amazónica peruanas.

Recientemente y debido al incremento de la información recopilada, se propone que las anomalías de temperatura en el Pacífico Ecuatorial también varían en escala decenal. Por otro lado, esfuerzos relacionados a la comprensión de este fenómeno en escalas de tiempo



Dr. James Apaéstegui

*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 IGP donde desarrolla investigaciones en Paleoclimatología de los Andes orientales basada en indicadores geoquímicos e isotópicos de espeleotemas y el uso de trazadores isotópicos para estudios hidrológicos. Además es miembro del laboratorio mixto internacional Paleotracés y del grupo de trabajo PAGES 2k.*

Dr. José Macharé  
Director Científico  
Instituto Geofísico del Perú

Ph.D. Ken Takahashi  
Investigador Científico  
Instituto Geofísico del Perú

Dr. Abdelfettah Sifeddine  
Director de Investigación  
Laboratoire d'Océanographie et du Climat:  
Expérimentations et Analyses Numériques

Dr. Luc Ortlieb  
Director de Investigación Emérito IRD  
Laboratoire d'Océanographie et du Climat:  
Expérimentations et Analyses Numériques

mayores a las comprendidas por los registros instrumentales están representados por las reconstrucciones paleoclimáticas (Figura 1). Dichas reconstrucciones representan condiciones ambientales pasadas en base a diferentes tipos de indicadores, o proxies, que pueden encontrarse en ambientes marinos o continentales otorgando evidencias sobre la ocurrencia y magnitud de los eventos ENSO en el pasado. En tal sentido, estos estudios sugieren que ENSO además de poseer la variabilidad interanual intrínseca exhibe considerable variabilidad natural en escalas interdecenal y secular (Li et al., 2011) que empiezan a ser exploradas y corroboradas por los registros instrumentales y modelos.

Si bien el término ENSO es comúnmente utilizado para el fenómeno a escala global con centro de acción en el Pacífico Central, el término “El Niño” históricamente se ha referido a las manifestaciones regionales del fenómeno océano - climático localizadas en el este del Pacífico y el oeste de Sudamérica (por ej.: Macharé y Ortlieb, 1993). Las implicancias sociales durante la ocurrencia de estos fenómenos han despertado el interés por describir y documentar, en algunos casos, impactos catastróficos. Al respecto existen varios registros documentarios históricos y arqueológicos que evidencian la ocurrencia de estos eventos en el pasado. A su vez, una serie de registros paleoclimáticos de origen biológico (por ej.: anillos de árboles, foraminíferos marinos, entre otros) y geológico (por ej.: sedimentos marinos y lacustres, cordones litorales, coladas de lodo, entre otros) muestran evidencias de la ocurrencia y evolución de estos eventos en el pasado. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar algunas de estas evidencias para el último milenio y cómo son utilizadas por la comunidad paleoclimática en vista de incrementar el conocimiento de la evolución del clima y el fenómeno en sí mismo.



El Niño de gran magnitud. Es de notar que, por lo menos en el caso del evento Miraflores, excesos de precipitaciones no son característicos de los eventos modernos de El Niño. La relación entre El Niño y la ocurrencia de aluviones y demás huaycos en la costa sur ha sido el tema de debates que no han concluido aún (Keefer et al., 1998; 2003; Ortlieb y Vargas, 2000; Vargas et al., 2006).

## Estado Medio del Pacífico Ecuatorial y El Niño

Desde el punto de vista paleoclimático existe mucho interés en determinar las variaciones pasadas en la frecuencia o intensidad de los eventos El Niño, su evolución durante

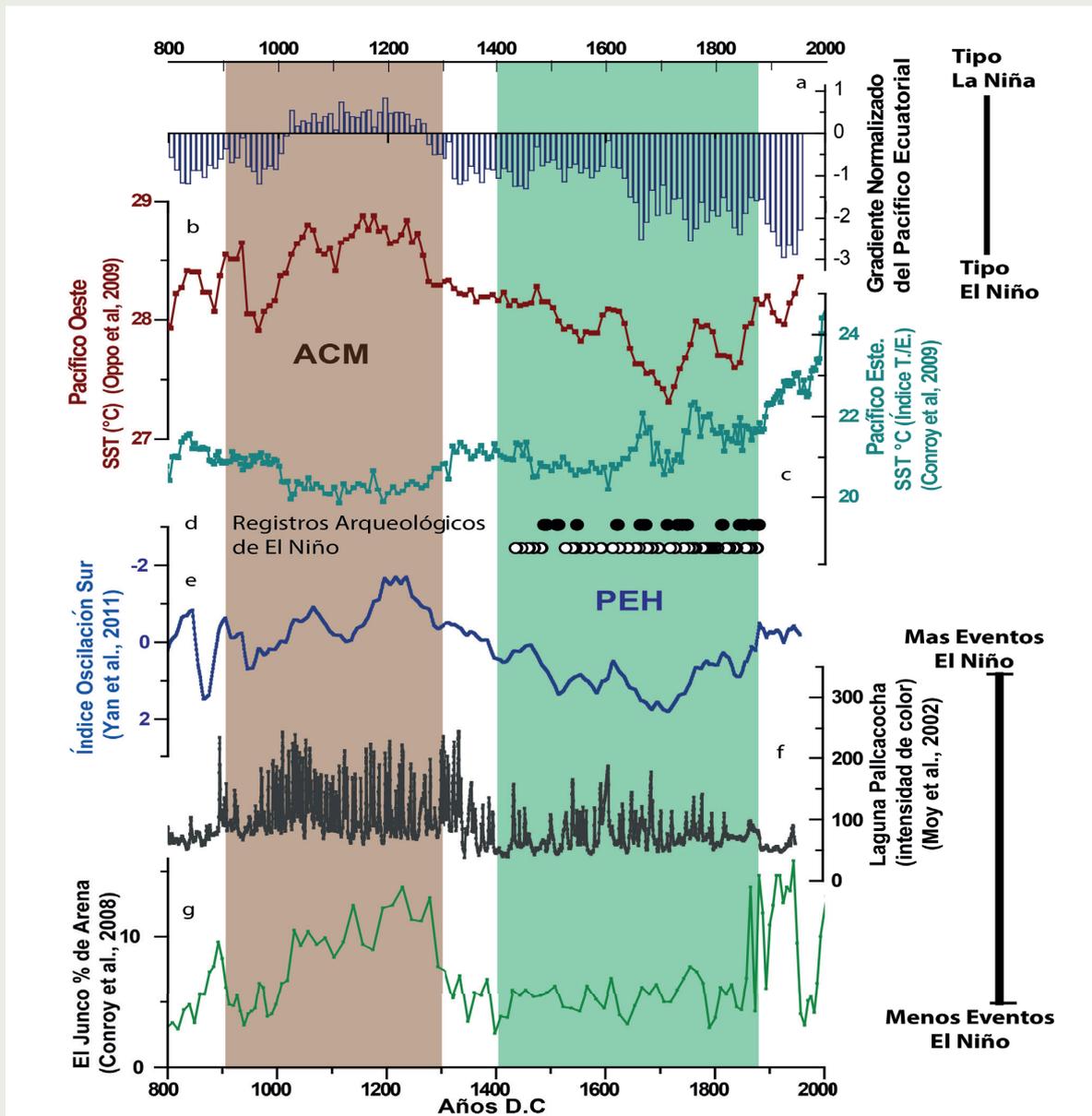


Figura 2: a) Reconstrucción del gradiente de temperaturas en el Pacífico Ecuatorial para el último milenio (Conroy et al., 2010) estimado a partir de la diferencia de temperaturas en b) Indo - Pacífico (Oppo et al., 2009) y c) este del Pacífico Ecuatorial (Índice T/E; Conroy et al., 2009); d) Los puntos representan los eventos El Niño de la Tabla N°1 obtenidos a partir de registros históricos; los puntos blancos representan los eventos de intensidad débil, moderada y fuerte, mientras que los puntos oscuros representan los eventos de mayor magnitud (Ortlieb et al., 2000; García-Herrera, 2007); e) Reconstrucción del Índice de Oscilación Sur a partir de registros de precipitación (Yan et al., 2011); f y g) Registro de intensidad de color en la laguna Pallcacocha y porcentaje de arena en sedimentos de la laguna El Junco - Ecuador evidenciando precipitaciones asociadas a eventos El Niño.

# El Fenómeno El Niño durante el último milenio

Apaéstegui J., Takahashi K., Ortlieb L., Sifeddine A., Macharé J.

largos periodos temporales (por ej.: el Holoceno y el último milenio) y también durante fases climáticas globales como la Pequeña Edad de Hielo (PEH, 1350 – 1850 A.D.) o la Anomalía Climática Medieval (ACM, 900 – 1200 A.D.). Para lograr este objetivo, se aborda la concepción de la ocurrencia del evento desde dos principales perspectivas. El primer criterio infiere la ocurrencia de los eventos en base a teleconexiones típicas observadas como, por ejemplo, el incremento y/o disminución de las precipitaciones en ciertas regiones del planeta, que pueden ser determinadas en diferentes registros tales como sedimentos lacustres, anillos de árboles, espeleotemas y glaciares, entre otros (Figura 2e, f, g). El segundo criterio se basa en caracterizar a los periodos largos de tiempo mediante el gradiente de temperatura promedio a lo largo de la banda ecuatorial del Pacífico (T°C Oeste – Este), lo cual define situaciones cuasi-permanentes “tipo El Niño” o “tipo La Niña”, según el gradiente sea disminuido o intensificado, respectivamente (Figura 2a). Para esto es necesario reflejar las condiciones oceánicas a partir de reconstrucciones de temperatura y salinidad obtenidas mediante análisis geoquímicos (por ej.: foraminíferos, alquenonas, corales, entre otros) (Figura 2b, c).

En tal sentido, un reciente trabajo que analiza temperaturas oceánicas a partir de registros de corales en el centro del Pacífico con indicadores de incremento/disminución de precipitación en anillos de árboles de varias regiones adyacentes al Pacífico nos brinda información sobre la variabilidad del fenómeno e indica que la actividad del ENSO durante el final del siglo XX fue anómalamente más elevada que durante los últimos siete siglos, sugiriendo el efecto de un continuo calentamiento global (Li et al., 2013). Sin embargo, son aún necesarias más reconstrucciones que concilien las diferentes perspectivas sobre la ocurrencia, magnitud y duración de los eventos.

En general, las reconstrucciones de las temperaturas oceánicas para el último milenio identifican que durante la Anomalía Climática Medieval (ACM) el gradiente en el Pacífico Tropical fue intensificado mostrando condiciones que algunos autores han reconocido como del tipo La Niña (Figura 2a, b, c). Sin embargo, estas definiciones guardan controversias con respecto a los registros continentales, los cuales refieren condiciones opuestas, o de tipo El Niño, durante este mismo periodo climático en base a los incrementos de precipitaciones que son observados en los registros lacustres de Ecuador (Conroy et al., 2008; Figura 3g), los sedimentos marinos (Rein et al., 2004) o las inferencias realizadas a través del análisis isotópico del hielo en el nevado de Quelccaya en Cusco (Thompson et al., 2013). Si bien existen aún escasos registros para definir correctamente las condiciones océano-atmosféricas durante este periodo, un estudio, usando múltiples proxies y simulaciones con modelos, sugiere que durante la ACM las teleconexiones observadas serían más consistentes con condiciones tipo La Niña. Al mismo tiempo refiere que el calentamiento anómalo de los océanos Pacífico Occidental e Índico habría sido necesario para explicar la reorganización de la circulación atmosférica durante este periodo de tiempo (Graham et al., 2010). Esto, a su vez, es consistente con lo hallado en la zona de resurgencia costera frente al Perú, que presentó una intensa zona mínima de oxígeno y gran productividad marina (Salvatecci et al., 2014).

Durante la Pequeña Edad de Hielo (PEH), las reconstrucciones de temperatura oceánica correspondientes al Pacífico Ecuatorial representan un gradiente reducido y han sido interpretadas como condiciones tipo El Niño (Figura 2a). Además, los registros de sedimentos marinos en la región de Pisco estudiados por Salvatecci et al. (2014) sugieren que durante los periodos fríos en el hemisferio norte (como durante la Pequeña Edad de Hielo) las regiones de surgencia costera frente al Perú exhibieron condiciones medias del tipo El Niño, caracterizadas por una débil zona mínima de oxígeno y una baja productividad marina. Estas condiciones estarían asociadas a disminución de las precipitaciones en la región andino-amazónica. Sin embargo, esto es contrario al incremento de precipitaciones encontrado para estas regiones en otros estudios desarrollados (Vuille et al., 2012; Apaéstegui et al., 2014). Es posible que los detalles de los cambios en el Pacífico sean importantes para explicar los impactos en el continente (Lavado y Espinoza, 2014), pero al mismo tiempo es importante notar que las condiciones en el océano Atlántico así como un posicionamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical en la región ecuatorial durante este periodo de tiempo (Haug et al., 2001) serían factores que afectarían la señal de El Niño en las regiones al este de la cordillera de los Andes.

## Observaciones Finales

Los registros de eventos el Niño en el pasado son interpretados a partir de documentos históricos que proveen informaciones sobre la ocurrencia y la magnitud de los impactos de estos eventos. Complementariamente, reconstrucciones paleoclimáticas de diversos orígenes brindan informaciones que permiten extender los registros de la ocurrencia de estos eventos en el pasado y evidenciar las condiciones oceánicas y continentales durante el fenómeno.

Las perspectivas para reconocer el ENSO en diferentes escalas temporales se han expuesto en este trabajo. Para periodos largos de tiempo se definen situaciones de tipo El Niño/La Niña en base a gradientes de temperatura en el Pacífico Ecuatorial. Por otra parte, teleconexiones como lluvias o inundaciones indican la ocurrencia del evento de manera más episódica con algunos indicios en la intensidad de los impactos. Estas diferentes perspectivas deben ser complementadas por el nuevo conocimiento que viene siendo desarrollado en relación a los modos de ENSO (Canónico, Extraordinario, Modoki) y sus teleconexiones a manera de mejorar nuestra comprensión del evento y su evolución en un pasado reciente.

Finalmente, para el último milenio, el gradiente reconstruido del Pacífico Tropical en base a trazadores paleoambientales nos indica que las condiciones oceánicas pueden cambiar a través de largos periodos temporales, como durante la Anomalía Climática Medieval o la Pequeña Edad de Hielo. Estas evidencias nos llevan a tomar en cuenta modos de variabilidad que deben ir más allá de la escala interanual e investigar a través de otras escalas temporales, tal como la escala decenal o hasta secular. Sin embargo, y dado a que los registros instrumentales son recientes y generalmente solo corresponden a los últimos decenios, la exploración de registros paleoclimáticos de alta resolución podría brindar información valiosa que nos ayudaría a entender la evolución de las diferentes variedades de El Niño y a disminuir las incertidumbres de los modelos océano – atmosféricos que intentan reproducir la física de estos eventos.

## Referencias

- Apaéstegui, J., F. W. Cruz, A. Sifeddine, M. Vuille, J. C. Espinoza, J. L. Guyot, M. Khodri, N. Strikis, R. V. Santos, H. Cheng, L. Edwards, E. Carvalho, W. Santini, 2014: Hydroclimate variability of the northwestern Amazon Basin near the Andean foothills of Peru related to the South American Monsoon System during the last 1600 years, *Climate of the Past*, 10, 1967-1981, doi:10.5194/cp-10-1967-2014.
- Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, T. Yamagata, 2007: *El Niño Modoki and its possible teleconnection*, *Journal of Geophysical Research*, 112, C11007, doi:10.1029/2006JC003798.
- Conroy, J. L., J. T. Overpeck, J. E. Cole, T. M. Shanahan, M. Steinitz-Kannan, 2008: Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record, *Quaternary Science Review*, 27, 1166-1180.
- Conroy, J. L., T. Overpeck, J. E. Cole, 2010: *El Niño/Southern Oscillation and changes in the zonal gradient of tropical Pacific sea surface temperature over the last 1.2ka*, *Pages News*, 18 (1): 32 - 34.
- García-Herrera, R., H.F. Díaz, R.R. García, M.R. Prieto, D. Barriopedro, R. Moyano, E. Hernandez, 2008: A Chronology of El Niño Events from Primary Documentary Sources in Northern Peru, *Journal of Climate*, 21, 9, 1948 - 1962, doi: 10.1175/2007JCLI1830.1.
- Graham, N. E., C. M. Ammann, D. Fleitmann, K. M. Cobb, J. Luterbacher, 2010: Support for global climate reorganization during the "Medieval Climate Anomaly", *Climate Dynamics*, 37, 1217-1245, doi:10.1007/s00382-010-0914-z.
- Hamilton, K., R. Garcia, 1986: *El Niño-Southern Oscillation events and their associated midlatitude teleconnections 1531-1841*, *Bulletin of the AMS*, 67(11):1354-61.
- Haug, G. H., K. Hughen, D. M. Sigman, L. C. Peterson, U. Röhl, 2001: Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene, *Science*, 293, 1304-1308.
- Hocquenghem, A-M. y Ortlieb, L., 1992: *Eventos El Niño y lluvias anormales en la costa del Perú: Siglos XVI-XIX*, *Bulletin de l'Institut français d'Etudes Andines*, 21 (1): 197-278.
- Keefer, D. K., S. D. deFrance, M. E. Moseley, J. B. Richardson, D. R. Satterlee, A. Day-Lewis, 1998: *Early maritime economy and El Niño events at Quebrada Tacahuay, Peru*, *Science*, 281, 1833-1835.
- Keefer, D.K., M. E. Moseley, S. D. deFrance, 2003: A 38,000-year record of floods and debris flows in the Ilo region of southern Peru and its relation to El Niño events and great earthquakes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194, 41-77.
- Kug, J. S., F. F. Jin, S. I. An, 2009: Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño, *Journal of Climate*, 22 (6), 1499-1515, doi: 10.1175/2008JCLI2624.1.
- Lavado, W., J. C. Espinoza, 2014: *Impact of El Niño and La Niña events on Rainfall in Peru*, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 171 - 182.
- Larkin, N. K., D. E. Harrison, 2005: *Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter*, *Geophysical Research Letters*, 32, L16705, doi: 10.1029/2005GL022860.
- Machare, J., L. Ortlieb, editors, 1993: *Registros del fenómeno El Niño y de Eventos ENSO en América del Sur*, *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines (IFEA)*, 22(1), 412.
- Li, J., S.-P. Xie, E. R. Cook, G. Huang, R. D'Arrigo, F. Liu, J. Ma, X.-T. Zheng, 2011: *Interdecadal modulation of El Niño amplitude during the past millennium*, *Nature Climate Change*, 1(2), 114-118, doi:10.1038/nclimate1086.
- Li, J., S.-P. Xie, E. R. Cook, M. S. Morales, D. A. Christie, N. C. Johnson, F. Chen, R. D'Arrigo, A. M. Fowler, X. Gou, K. Fang, 2013: *El Niño modulations over the past seven centuries*, *Nature Climate Change*, 3(9), 822-826, doi:10.1038/nclimate1936.
- Oppo, D. W., Y. Rosenthal, and B. K. Linsley, 2009: *2,000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool*, *Nature*, 460, 1113-1116.
- Ortlieb, L., 2002: *Manifestations Historiques du phénomène El Niño en Amérique du Sud depuis le XVIe siècle*, *La Houille Blanche*, 6/7.
- Ortlieb, L., 2000: *The documentary historical record of El Niño events in Peru: An update of the Quinn record (sixteenth through nineteenth centuries)*, in *El Niño and the Southern Oscillation: Variability, Global and Regional Impacts*, H. Diaz & V. Markgraf (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 207-295.
- Ortlieb, L., G. Vargas, 2000: *Depósitos aluviales y huaycos del Pleistoceno tardío y Holoceno temprano en la costa sur del Perú: ¿Qué significado tienen para la reconstrucción de manifestaciones antiguas de eventos El Niño?*, *X Congreso Peruano de Geología (Lima, Julio 2000)*, Abstr. vol.: 144.
- 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. Lückge, F. Sirocko, 2004: *A major Holocene ENSO anomaly during the Medieval period*, *Geophysical Research Letters*, 31, L17211, doi:10.1029/2004GL020161.
- Rodriguez, R., A. Mabres, G. Luckman, M. Evans, M. Masiokas, T. M. Ektvedt, 2005: *El Niño events recorded in dry-forests species of the lowlands of northwest Peru*, *Dendrochronologia*, 22, 181-186.
- Salvatelli, R., D. Gutiérrez, D. Field, A. Sifeddine, L. Ortlieb, I. Bouloubassi, M. Boussafir, H. Boucher, F. Cetin, 2014: *The response of the Peruvian Upwelling Ecosystem to centennial-scale global change during the last two millennia*, *Climate of the Past*, 10, 715-731, doi:10.5194/cp-10-715-2014.
- Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova, K. & B. Dewitte, 2011: *ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño*, *Geophysical Research Letters* 38, L10704.
- Takahashi, K., 2014: *Variaciones de El Niño*, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, Instituto Geofísico del Perú, 1, 2, Febrero.
- Thompson, L. G., E. Mosley-Thompson, M. E. Davis, V. S. Zagorodnov, I. M. Howat, V. N. Mikhalenko, P.-N. Lin, 2013: *Annually resolved ice core records of tropical climate variability over the past ~1800 years*, *Science*, 340(6135), 945-50, doi:10.1126/science.1234210.
- Vargas, G., J. Rutllant, L. Ortlieb, 2006: *ENSO tropical-extratropical climate teleconnections and mechanisms for Holocene debris flows along the hyperarid coast of western South America (17°-24°S)*, *Earth and Planetary Science Letters*, 249, 467-483.
- Vuille, M., S. J. Burns, B. L. Taylor, F. W. Cruz, B. W. Bird, M. B. Abbott, L. C. Kanner, H. Cheng, F. Novello, 2012: *A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia*, *Climate of the Past*, 8, 1309-1321, doi:10.5194/cp-8-1309-2012.
- 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.