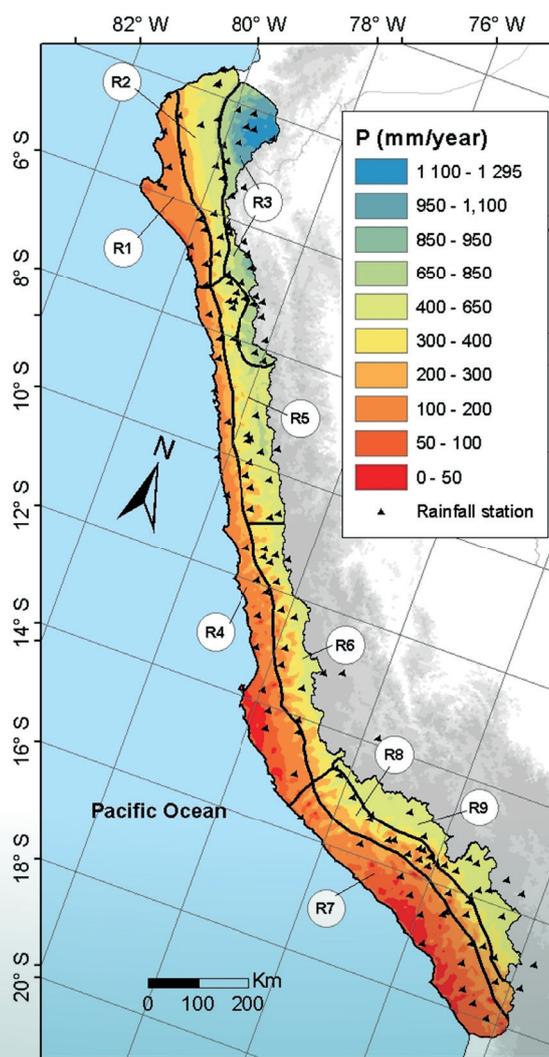


Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”

## “Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”

Boletín Técnico

### Sobre la distribución de las lluvias en la vertiente del Pacífico peruano y su relación con El Niño



## La distribución de las lluvias en la vertiente del Pacífico peruano y su relación con El Niño

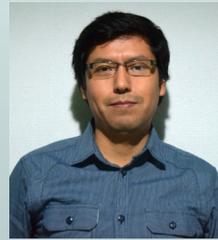
### Introducción

En 1892, se difundió la primera observación documentada de la corriente costera “El Niño”, denominada por aquel entonces: “Contracorriente marítima en Paita y Pacasmayo” (Carranza, 1892) y donde se intentaba explicar las lluvias torrenciales acaecidas en 1891. Un siglo y cuarto después, aun continúa el reto de poder comprender el efecto de este fenómeno sobre las lluvias a diferentes escalas de espacio y tiempo, especialmente en regiones del planeta como la Vertiente del Pacífico Peruano (VPP), donde sus efectos son experimentados frecuentemente. En el presente artículo se responde a preguntas comunes sobre la distribución de las lluvias en la VPP y el impacto del Fenómeno El Niño o ENSO (El Niño Oscilación del Sur en inglés), basándose en una revisión del estado del arte en la temática, las metodologías y los nuevos aportes.

### ¿Cómo se distribuyen las lluvias en la VPP?

El estudio del régimen de la precipitación siempre ha estado ligado a los registros de medición *in-situ*, efectuados en el Perú por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). La medición *in-situ* se considera como una fuente confiable bajo condiciones geográficas óptimas y/o con una densa red de estaciones. Aunque las estaciones de medición generalmente no se ubican en las zonas más representativas de un valle interandino, es válido el empleo de técnicas de regionalización para la identificación de zonas aproximadamente homogéneas que engloben variables en zonas sin medición y cuyas series de tiempo asociadas, ofrecen una señal más limpia para el estudio del ENSO (sin influencia de patrones de circulación a nivel de estación).

A nivel interanual, un primer trabajo de regionalización en la VPP (Rau et al., 2017) para el periodo 1964-2011 consistió en un procedimiento iterativo a dos etapas, empleando dos métodos clásicos: la clusterización particional k-means (Hartigan y Wong, 1979) con su evaluación por perfiles; y el vector regional (Brunet-Moret, 1979) con su evaluación por índices estadísticos. Esta



**Pedro Rau, M.Sc**  
Laboratorio Géosciences Environnement  
Toulouse (GET, Francia)

Candidato a doctor en Hidrología de la Université Toulouse III Paul Sabatier (Francia). Magister en ciencias en Hidrología y Medio Ambiente del Institut National Polytechnique de Toulouse (Francia), en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Perú) e Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (Perú). Es autor de artículos publicados en revistas arbitradas y su principal interés de investigación es la hidroclimatología de la vertiente del Pacífico peruano y la hidrología de zonas áridas y semi-áridas.

#### Luc Bourrel, Ph.D.

Investigador del Institut de Recherche pour le Développement  
Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse

#### Boris Dewitte, Ph.D.

Investigador del Institut de Recherche pour le Développement  
Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie  
Spatiales

#### David Labat, Ph.D.

Professor de la Université Toulouse III Paul Sabatier  
Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse

combinación hizo posible asimilar el comportamiento no-estacionario y no-Gausiano de las series de precipitación en las 145 estaciones analizadas. La Figura 1 muestra esta distribución en 9 regiones marcadas por un gradiente latitudinal y altitudinal, así como sus series interanuales. Estas regiones también representan a 9 zonas climáticamente homogéneas. Cabe señalar, que se aprecia una tendencia temporal ascendente para las zonas altas del norte (R3 y R5), siendo significativa para R5 con un incremento anual de ~30 mm/década.

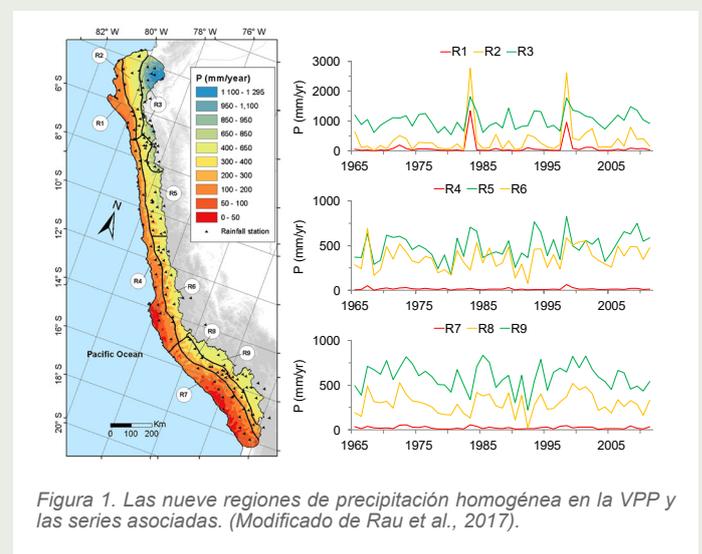


Figura 1. Las nueve regiones de precipitación homogénea en la VPP y las series asociadas. (Modificado de Rau et al., 2017).

# La distribución de las lluvias en la vertiente del Pacífico peruano y su relación con El Niño

Pedro R., Luc B., Boris D., David L.

## El niño y las lluvias ¿hacia un efecto oscilante y cambiante?

El efecto del ENSO sobre las lluvias en la VPP generalmente ha estado asociado a fuertes eventos que modifican las condiciones áridas, semi-áridas de la región (Woodman y Takahashi, 2014) y en especial asociado a los dos eventos extremos de 1982/1983 y 1997/1998 de consecuencias desastrosas debido a las inundaciones y sequías. Actualmente, se tiene documentado dos tipos de eventos El Niño: El Niño del Pacífico Este que corresponde a fuertes anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico ecuatorial Oriental (El Niño EP, interpretado por el índice E) y El Niño del Pacífico Central (Niño Modoki) que corresponde a anomalías cálidas de la TSM en el Pacífico ecuatorial Central (El Niño CP, interpretado por el índice C como la variabilidad de eventos moderados o La Niña) (ver Ashok et al., 2007; Takahashi et al., 2011). Los índices E y C presentan similitudes a los índices clásicos NIÑO 1+2 (90°-80°W, 10°S-0°) y NIÑO 4 (160°E-150°W, 5°S-5°N) respectivamente en su relación con las lluvias (Bourrel et al., 2015).

Los estudios que intentan explicar la relación ENSO/lluvia en la VPP se listan a continuación: Horel y Cornejo-Garrido (1986), Goldberg et al. (1987), Tapley y Waylen (1990), Takahashi (2004), Lagos et al. (2008), Lavado et al. (2012), Lavado y Espinoza (2014), Bourrel et al. (2015), Segura et al. (2016), Rau et al. (2017), los cuales podrían clasificarse en dos enfoques: el enfoque físico, orientado a revelar el proceso océano-atmosfera-continente de la relación ENSO/lluvia; y el enfoque de impactos, orientado a revelar la evolución de la relación ENSO/lluvia. Un enfoque mixto va entrando en escena (Sanabria et al., 2015; Segura et al., 2016), el cual permite complementar la temática de pronóstico, así como se desarrolla en países de la región como Ecuador (Recalde-Coronel et al., 2014; Pineda y Willems, 2016; Vicente-Serrano et al., 2016; de Guenni et al., 2016).

Los estudios con el enfoque de impactos revelan dos aportes principales: a) la periodicidad decenal de las lluvias y de la relación ENSO/lluvia, b) el grado de influencia de la variabilidad del océano Pacífico y la inversión de la relación ENSO/lluvia en las últimas décadas.

La periodicidad puede ser estudiada con el método de las ondeletas (ver Labat, 2005 para una explicación completa, ver Bourrel et al., 2015 para su aplicabilidad en la relación ENSO/lluvia, ver Sivakumar, 2017 para un repaso de métodos modernos aplicables a series de tiempo no lineales), la cual reveló que las regiones de lluvia en la VPP presentan una frecuencia cuasi-decenal (entre 8 y 16 años de frecuencia), así como su relación con los índices E y C, corroborando la variación de baja frecuencia del ENSO y lluvias (Rau et al., 2016).

Sobre el grado de influencia de la variabilidad del océano Pacífico, la VPP presenta una mayor significancia en el superávit de lluvia en las regiones bajas del norte y su relación con El Niño EP (con un 66% de covarianza y un coeficiente de correlación de 0.6); y de déficit de lluvia en las regiones altas con El Niño CP (con una covarianza del 23% y un coeficiente de correlación de 0.5), asimismo sin encontrar una relación directa con la TSM del Atlántico (Rau et al., 2017). Sin embargo, si durante las últimas décadas El Niño CP se presenta cada vez más frecuente con respecto a El Niño EP (Lee y McPhaden, 2010) ¿Cómo explicar la tendencia ascendente de lluvia en algunas regiones de la VPP mostrado en la Figura 1?

Remitiéndose al estudio de Bourrel et al. (2015) que abarcó una parte de la VPP (de Tumbes a Ica), mostraron un cambio notorio de la relación ENSO/lluvia a partir de la década del 2000. Este cambio se observa en la Figura 2, considerando las regiones de la Figura 1. La relación directa entre el índice E (para el periodo Septiembre a Febrero) y las lluvias anuales (Figura 2a) es significativa (correlaciones móviles en coloración rojo) debido a los Niños extremos de 1982/1983 y 1997/1998. También, se aprecia una relación inversa (correlaciones móviles en coloración azul) para las regiones del sur durante el evento de 1982/1983 y que resulta interesante notar su influencia para las regiones del norte en las últimas décadas. A partir del 2000, este cambio se aprecia mejor sin incluir los eventos extremos para ambos índices E y C (Figura 2b y 2c). Las correlaciones E/lluvia y C/lluvia siguen una tendencia negativa más acentuada en las regiones del norte y sur respectivamente.

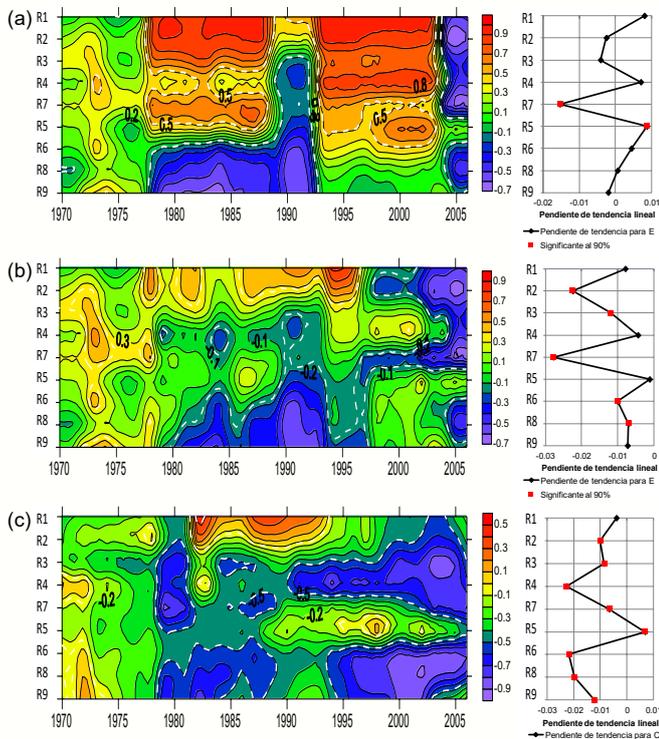


Figura 2. Coeficientes de correlación móvil para 11 años (izquierda) entre índices ENSO y la precipitación anual en cada región (áreas significativas al 90% mediante una prueba-t, encerradas entre líneas blancas discontinuas). Pendiente de la tendencia lineal (derecha) de la correlación móvil (puntos rojos significativos al 90% mediante una prueba-t. a) con el índice E, b) con el índice E (sin incluir los eventos extremos de 1982/1983 y 1997/1998) c) con el índice C (sin incluir los eventos extremos de 1982/1983 y 1997/1998). (Rau et al., 2016).

esta relación inversa entre el índice NIÑO 1+2 y las lluvias. No obstante, esto se complementa con la pregunta 2, es decir esta relación inversa también se asocia con el Pacífico Central. Lo anterior verificaría la influencia de los periodos comprendidos entre los dos saltos climáticos documentados: de 1976 (Miller et al., 1994) y la del 2000 (Tsonis et al., 2007), los cuales modularían el comportamiento del ENSO a escala global (Trenberth y Stepaniak, 2001). Las covarianzas asociadas a los dos modos del Pacífico, no responden al 100% de la variabilidad de las lluvias en la VPP, con lo cual las tendencias de R3 y R5 mencionado al principio, se debería a una combinación de efectos asociado a componentes regionales como por ejemplo procesos atmosféricos regionales (influencia de la oscilación Madden y Julian en las zonas altas del norte, Bourrel et al., 2015) y el transporte de humedad desde la cuenca Amazónica no estudiado hasta la fecha.

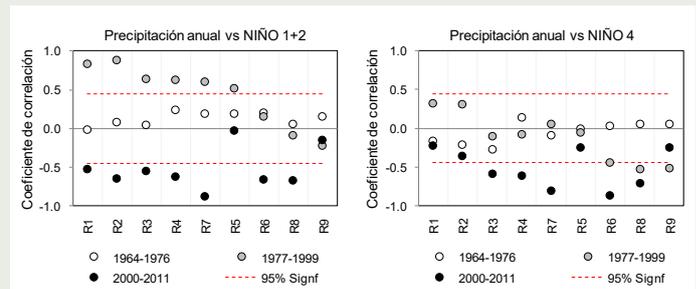


Figura 3. Coeficientes de correlación entre el índice NIÑO 1+2 y NIÑO 4 (periodo Sep-Feb) y la precipitación anual durante los 3 periodos comprendidos entre los saltos climáticos de 1976 y 2000. Significancia máxima del 95% obtenida con el periodo 2000-2011 en líneas rojas discontinuas.

Esto conlleva a las siguientes preguntas sobre lo que viene sucediendo en las últimas décadas 1) ¿Frente a un calentamiento/enfriamiento cerca a las costas, hay una menor/mayor precipitación anual? 2) ¿Frente a un calentamiento/enfriamiento del Pacífico Central, hay una menor/mayor precipitación anual? La Figura 3 muestra esta relación entre el calentamiento en el Pacífico Tropical y las lluvias en las regiones, a través de los índices NIÑO 1+2 ubicado cerca de nuestra costa norte y NIÑO 4 en el Pacífico Central, corroborando esta inversión en las correlaciones durante 2000-2011.

Conociendo que hay límites del calentamiento de la TSM alrededor de los  $\sim 26^{\circ}\text{C}$  que si es superado, se espera que llueva más (Takahashi, 2004; Woodman y Takahashi, 2014) con repercusión a nivel anual, es válido afirmar que a partir del 2000, El Niño está asociado a anomalías débiles de la TSM a lo largo de la costa peruana sin alcanzar los  $26^{\circ}\text{C}$ , observándose

Hasta este nivel es válido afirmar que desde los años 2000, se viene experimentando un periodo de cambio en la relación ENSO/lluvia en la VPP, quedando mucho trabajo de investigación en perspectiva, como la identificación y documentación de estas oscilaciones decenales ligadas a la teleconexión climática y el estudio de los mecanismos atmosféricos y oceánicos asociados. Actualmente estos mecanismos representan un reto en su comprensión debido a que los modelos climáticos muestran un gran sesgo en esta región asociado a un calentamiento (Takahashi, 2015). También, los mecanismos asociados a los eventos extremos de lluvia dependen de los tipos de El Niño, lo cuales son simulados de forma disímil por los modelos climáticos, proyectando finalmente una gran incertidumbre sobre la futura evolución de las lluvias en países como el Perú.

# La distribución de las lluvias en la vertiente del Pacífico peruano y su relación con El Niño

Pedro R., Luc B., Boris D., David L.

## REFERENCIAS

- Ashok, K., S. K. Behera., S. A. Rao (2007): *El Niño Modoki and its possible teleconnection*, *Journal of Geophysical Research*, 112, C11007.
- Bourrel, L., P. Rau., B. Dewitte (2015): *Low-frequency modulation and trend of the relationship between ENSO and precipitation along the northern to centre Peruvian Pacific coast*, *Hydrological Processes*, 29(6), 1252–1266.
- Brunet-Moret, Y. (1979): *Homogénéisation des précipitations*. Cahiers ORSTOM. Serie Hydrologie, 16, 3-4.
- Carranza, L. (1892): *Contra-corriente marítima en Paita y Pacasmayo*. Boletín Sociedad Geográfica de Lima, 1, 9, 344-345, Peru.
- de Guenni, L. B., M. García., Á. G. Muñoz (2016): *Predicting monthly precipitation along coastal Ecuador: ENSO and transfer function models*, *Theoretical and Applied Climatology*, 1-15, doi:10.1007/s00704-016-1828-4
- Goldberg, R. A., G. Tisnado., R. A. Scofield (1987): *Characteristics of extreme rainfall events in north-western Peru during the 1982–1983 El Niño period*, *Journal of Geophysical Research*, 92, C14 225–241.
- Hartigan, J. A., M. A. Wong (1979): *Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm*, *Journal of the Royal Statistical Society, Series C* 28(1), 100-108.
- Horel, J. D., A. G. Cornejo-Garrido (1986): *Convection along the coast of northern Peru during 1983: Spatial and temporal variation of clouds and rainfall*, *Monthly Weather Review*, 114, 2091–2105.
- Labat, D. (2005): *Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts*, *Journal of Hydrology*, 314-1, 275-288.
- Lagos, P., Y. Silva., E. Nickl., K. Mosquera (2008): *El Niño – related precipitation variability in Peru*, *Advances in Geosciences*, 14, 231–237, 2008.
- Lavado, W. S., J. Ronchail., D. Labat (2012): *Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages*, *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 1–18.
- Lavado, W., J. C. Espinoza (2014): *Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Peru*, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 171 – 182.
- Lee, T., M. McPhaden (2010): *Increasing intensity of El Niño in the central equatorial Pacific*, *Geophysical Research Letters*, 37, L14603, <http://doi.org/10.1029/2010GL044007>.
- Miller, A., D. Cayan., T. Barnett (1994): *The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean*, *Oceanography*, 7, 21–26.
- Pineda, L. E., P. Willems (2016): *Multisite Downscaling of Seasonal Predictions to Daily Rainfall Characteristics over Pacific – Andean River Basins in Ecuador and Peru Using a Nonhomogeneous Hidden Markov Model*, *Journal of Hydrometeorology*, <http://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0040.1>.
- Rau, P., L. Bourrel., D. Labat (2016): *Variación de baja frecuencia y tendencias en la relación entre el Fenómeno El Niño y las precipitaciones en la Vertiente del Pacífico Peruano*, XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Perú.
- Rau, P., L. Bourrel., D. Labat (2017): *Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast*, *International Journal of Climatology*, 37(1), 143-158.
- Recalde-Coronel, G. C., A. G. Barnston., Á. G. Muñoz (2014): *Predictability of December-April rainfall in coastal and Andean Ecuador*, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(6), 1471-1493.
- Sanabria, J., L. Bourrel., B. Dewitte (2015): *On the evolution of precipitation during extreme El Niño events along the coast of Peru*, 11th ISCHMO International Conference on Southern hemisphere Meteorology and Oceanography, Chile.
- Segura, H., J. C. Espinoza., K. Takahashi (2016): *Evidencing decadal and interdecadal hydroclimatic variability over the Central Andes*, *Environmental Research Letters*, 11(9), 1–8. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094016>.
- Sivakumar, B. (2017): *Modern Nonlinear Time Series Methods. Chaos in Hydrology*, Springer Netherlands, 111-145 pp.
- 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, 3917-3926.
- Takahashi, K., A. Montecinos., K. Goubanova., B. Dewitte (2011): *ENSO regimes: reinterpreting the canonical and Modoki Niño*, *Geophysical Research Letters*, 38, L10704.
- Takahashi, K. (2015): *Modelos climáticos y sus errores promedio en el Pacífico*. Boletín Técnico “Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño”, 2, 6, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.
- Tapley, T., P. Waylen (1990): *Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru*, *Hydrological Sciences Journal*, 35, 4, 429-446.
- Trenberth, K., D. Stepaniak (2001): *Indices of El Niño Evolution*. *J. Climate*, 14, 1697–1701.
- Tsonis, A., K. Swanson., S. Kravtsov (2007): *A new dynamical mechanism for major climate shifts*, *Geophysical Research Letters*, 34, L13705.
- Vicente-Serrano, S., E. Aguilar., R. Martínez (2016): *The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador*, *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-016-3082-y
- Woodman, R., 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.