Artículo de Divulgación Científica

Influencia de la variabilidad de los océanos Atlántico y Pacífico en la hidrología de la cuenca amazónica peruana*

Ph. D. Jhan Carlo Espinoza
Investigador Científico del Instituto Geofísico del Perú

Ph.D. en Ciencias del Medio Ambiente de la Université Pierre et Marie Curie, París, Francia e Ingiero Agrícola y M.Sc. en Ingeniería de Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), donde se desempeña como especialista en clima e hidrología de la cuenca amazónica. Es autor de numerosos artículos científicos y revisor de revistas internacionales. Desde 2004 forma parte del Observatorio de Investigación en medio ambiente ORE-HYBAM. Su investigación está enfocada en la dinámica del clima y sus impactos en los eventos hidrológicos extremos en la región tropical y en la cuenca del río Amazonas.

Influencia de las condiciones oceánicas en la variabilidad hidroclimática en la cuenca amazónica

Diferentes investigaciones científicas han mostrado la relación entre el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y la variabilidad hidroclimática en la cuenca amazónica brasileña (e.g. Marengo et al., 1998; Uvo et al., 1998; Ronchail et al., 2002; Williams et al., 2005). En general, los autores muestran que en esta región las lluvias y caudales tienden a ser superiores (inferiores) a lo normal durante eventos La Niña (El Niño). Por otro lado, diferentes estudios han puesto en evidencia la influencia de las variaciones de la temperatura superficial del océano Atlántico Tropical en las precipitaciones de la cuenca amazónica (e.g. Marengo, 1992; Uvo et al., 2000, Zeng et al., 2008; Espinoza et al., 2009a; 2009b; Yoon y Zeng, 2010). Estos estudios muestran que condiciones más cálidas (frías) de lo normal en el Atlántico Tropical Norte generalmente producen una reducción (incremento) de lluvias y caudales en la cuenca amazónica.

Recientemente, diferentes investigaciones se han enfocado en mejorar la comprensión de la influencia de ambos océanos en la hidrología de la cuenca amazónica. Si bien usando índices oceánicos para el Pacífico y Atlántico se puede explicar en proporciones similares la variabilidad de las lluvias promediada sobre la cuenca amazónica completa (Zeng et al., 2008), recientes trabajos concuerdan en que las variaciones en el Atlántico Tropical serían el factor más importante para la región oeste de dicha cuenca (incluyendo la Amazonía peruana) (Espinoza et al., 2009a; 2009b; Yoon y Zeng, 2010; Fernandes et al., 2011; Lavado et al., 2012). En efecto, temperaturas más elevadas en el Atlántico Tropical producen un desplazamiento anormal hacia el norte de la banda lluviosa conocida como "zona de convergencia intertropical" (ITCZ en inglés) y una disminución del ingreso de aire húmedo del Atlántico que es la principal fuente de agua para la cuenca amazónica (e.g. Yoon y Zeng, 2010; Marengo, et al., 2011; Espinoza et al., 2011). Por lo contrario, cuando el Atlántico Tropical Norte está más frío de lo normal, la ITCZ sufre un desplazamiento hacia el sur, lo cual favorece el ingreso de humedad hacia el continente sudamericano y mayores precipitaciones son observadas en la cuenca amazónica (Marengo et al., 2011b).

Evolución reciente de los eventos hidrológicos extremos

Analizando información de trece estaciones hidrométricas de las principales sub-cuencas del Amazonas entre los años 1974 y 2004, Espinoza et al. (2009b) muestran que la poca tendencia observada en el caudal medio en el curso principal del Amazonas en Brasil (Callède et al., 2004) se debe a la compensación entre las tendencias regionales opuestas, que involucran principalmente a ríos de los países andinos. Este estudio confirma un incremento del caudal durante aguas altas en las regiones del noroeste (Colombia, Ecuador y norte de la Amazonía peruana) y una significativa disminución de caudales en el período de estiaje, particularmente importante en las regiones del suroeste de la cuenca amazónica (Perú y Bolivia). La Figura 1 resume la evolución regional en los caudales durante los últimos 40 años. Asimismo, recientes estudios han confirmado una intensificación del ciclo hidrológico (estiajes más secos y crecientes mayores) en la cuenca amazónica durante las últimas décadas (Gloor et al., 2013).

En continuidad con estas tendencias, en los últimos años se han registrado eventos hidrológicos extremos en la cuenca del Amazonas, los cuales han dado lugar a severas inundaciones, como en 1999, 2009 y 2012 (Ronchail et al., 2006; Chen et al., 2010; Marengo et al., 2011b; Espinoza et al., 2013), y periodos de fuertes sequías, como en 1998, 2005 y 2010 (Marengo et al., 2008; Espinoza et al., 2011). Estos eventos resultaron muy perjudiciales para los pobladores de esta región, así como para la agricultura y los ecosistemas amazónicos (e.g. Asner y Alencar, 2010; Xu et al., 2011; Fernandes et al., 2011).

**Las investigaciones realizadas por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) sobre la hidrología amazónica se enmarcan en las actividades del observatorio HYBAM (www.ore-hybam.org) y en el proyecto de investigación "Extremos hidrometeorológicos, procesos geodinámicos superficiales y sus impactos en el Perú" que conducen desde 2011 el IGP y el Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Francia.*

Influencia de la variabilidad de los océanos Atlántico y Pacífico en la hidrología de la cuenca amazónica peruana

Espinoza J.C.

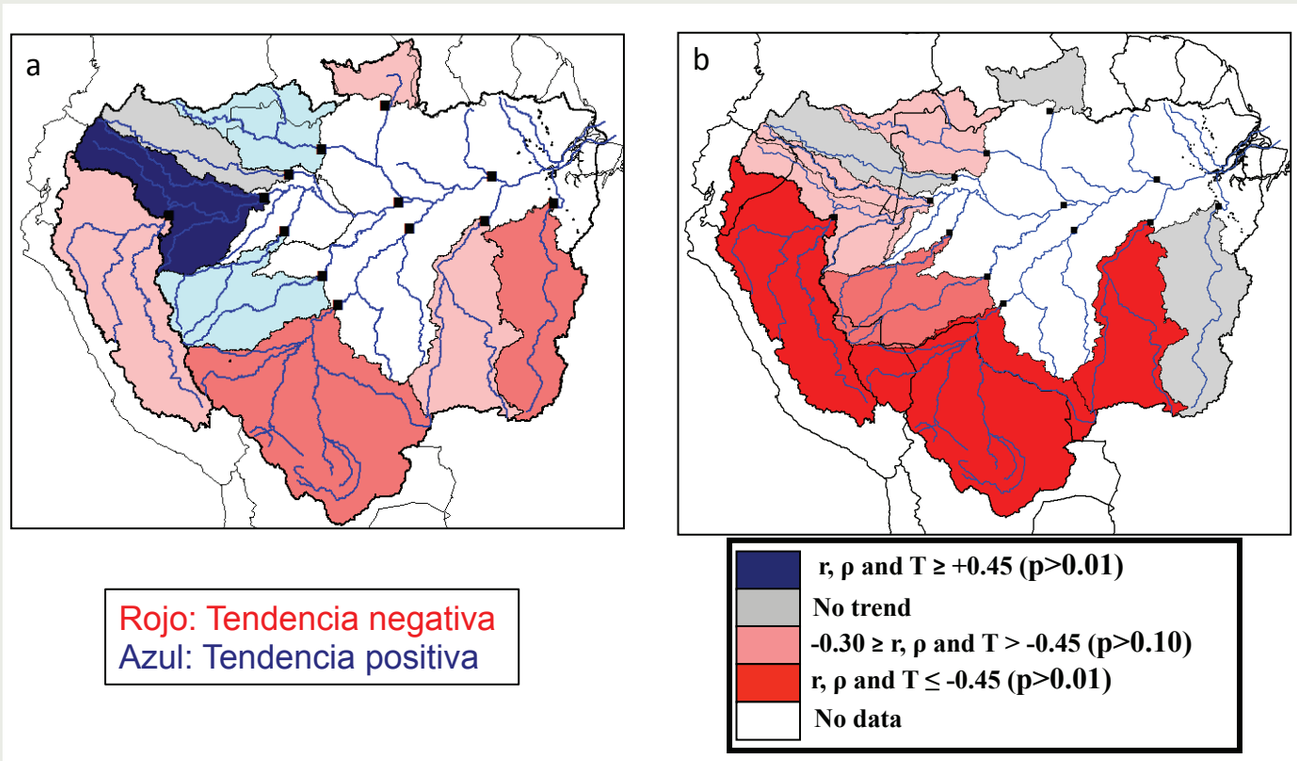

Figura 1. Coeficientes de correlación de Pearson (r), Spearman (p) y Kendall (T) entre la escorrentía y el tiempo (1974-2004) en las subcuencas amazónicas para (a) los valores máximos anuales y (b) los valores mínimos. Los valores por encima de 0.30 son significativos al nivel de 90%, aquellos por encima de 0.45 son significativos al nivel de 99%. Los colores indican la señal y la fuerza de la tendencia: rojo (tendencia negativa) y azul (tendencia positiva). Adaptado de Espinoza et al., 2009b.

Sequías en la cuenca amazónica peruana

La estación hidrométrica de Tamshiyacu sobre el río Amazonas cerca de Iquitos, en Perú, tiene un área de drenaje de 750000 km^2 (Figura 2a) y un caudal medio de 32000 m^3/s, aproximadamente el 16% del caudal en la desembocadura del Amazonas en el Atlántico (Espinoza et al., 2006; 2009b). La precipitación media anual en la cuenca que drena por esta estación ha registrado una tendencia negativa que es consistente con la tendencia en el caudal de estiaje sobre el período 1970-2010 (Figura 1b; 2b). Un calentamiento de la temperatura superficial del Atlántico Tropical Norte desde finales de los años ochenta sería el responsable de la disminución de lluvias y caudales durante la época de estiaje (Marengo et al., 2008; Cox et al., 2008; Espinoza et al., 2009b; Yoon y Zeng, 2010; Marengo et al., 2011a; Espinoza et al., 2011; Lavado et al., 2012). En consecuencia, fuertes sequías han sido observadas durante las últimas dos décadas (Figura 2b), entre ellas, la sequía del 2010 fue particularmente severa y llevó a las autoridades a declarar estado de emergencia público en la Amazonía peruana, debido a problemas en el transporte fluvial y el abastecimiento de alimentos a la población (SENAMHI Perú comunicado de prensa N° 076-2010).

Espinoza et al., (2011) han realizado una tipología de las sequías extremas registradas en la Amazonía peruana (1995, 1998, 2005 y 2010). En dicha zona, las sequías han sido asociadas con anomalías positivas de la temperatura superficial en el Atlántico Tropical Norte y vientos alisios débiles, así como con un débil transporte de vapor de agua hacia la cuenca amazónica peruana que, en asociación con el aumento del movimiento descendente ("subsidencia") atmosférico sobre el centro y sur de la Amazonía, explican la escasez de lluvias y los bajos caudales. Sin embargo, hacia el final del evento El Niño 1997-1998, la sequía estuvo más relacionada con una fuerte divergencia del transporte atmosférico de humedad en el oeste de la cuenca amazónica, característico de un evento El Niño. Durante la primavera e invierno austral del 2010, se registró la sequía más severa en la cuenca amazónica desde los años 1970 (Figura 2b y 3). Su mayor intensidad y duración en comparación con la sequía del 2005 puede ser explicada por la adición del fenómeno El Niño en el Pacífico Ecuatorial Central durante el verano (Figura 2c) seguido por un episodio muy cálido en el océano Atlántico Tropical Norte (Figura 2d). Este evento confirma el rol combinado de ambos océanos sobre la hidrología del Amazonas. Para mayores detalles sobre la sequía excepcional del 2010 ver Lewis et al., 2011; Marengo et al., 2011a; y Espinoza et al., 2011.

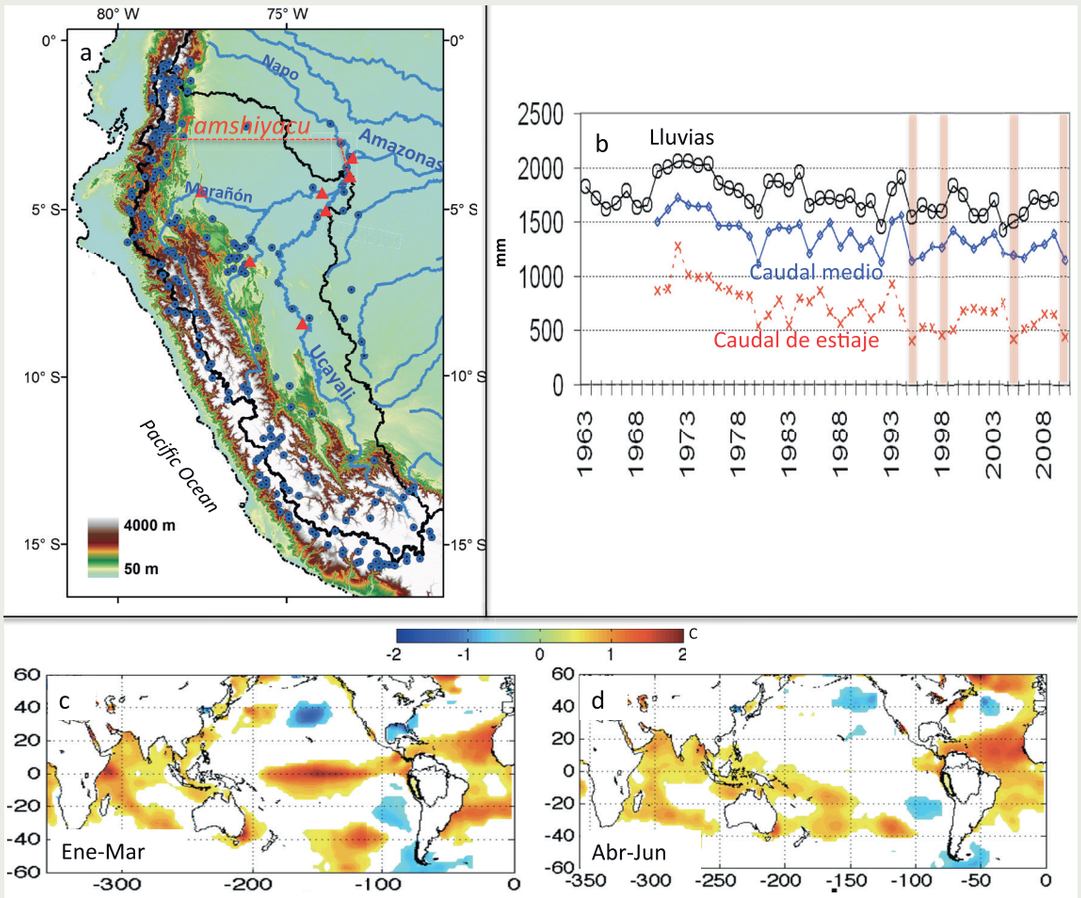

Figura 2. a) Estaciones hidrológicas (triángulos rojos) y pluviométricas (círculos azules) en la cuenca de Tamshiyacu. Los nombres de los ríos (azul) y de la estación hidrométrica de Tamshiyacu (rojo) son indicados. b) Variabilidad interanual (1963-2010) de la lluvia anual (línea negra), de la escorrentía media (línea azul) y de la escorrentía de estiaje (línea roja) en la estación de Tamshiyacu. Las barras verticales indican las cuatro principales sequías registradas. En c) y d) se muestran anomalías de la temperatura superficial del mar durante c) enero – marzo y d) abril-junio de 2010 (expresado en ˚C). Solamente los valores más altos que dos veces la Desviación Standard son graficados. Adaptado de Espinoza et al., 2011.

Recientes inundaciones severas

Durante el año hidrológico 2010-2011, se observó en la estación de Tamshiyacu una fuerte diferencia entre los caudales de estiaje (8300 m^3/s en septiembre 2010) y los caudales de crecida (49500 m^3/s en mayo de 2011). En general, los caudales de crecida son tres veces más elevados que los caudales durante las aguas bajas. No obstante, durante el año hidrológico 2010-2011, el caudal medio de crecida fue seis veces más alto que el caudal de estiaje (Espinoza et al., 2012). Esta transición sin precedentes originó además un record en la cantidad de material sedimentario transportado por el río Amazonas, medido en la estación Tamshiyacu en Perú (Espinoza et al., 2012).

Un año más tarde, en abril de 2012, durante el siguiente periodo de aguas altas, el río Amazonas experimentó el caudal más elevado (registrándose 55400 m^3/s), sólo 20 meses después de la sequía de septiembre de 2010 y ejemplificando la intensificación de los eventos hidrológicos extremos en la cuenca amazónica (Figura 3a). Recientemente, Espinoza et al. (2013) han mostrado que los años de fuertes crecidas están caracterizados por anomalías negativas de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Ecuatorial Central (La Niña; Figura 3b). Esto origina un tren de ondas atmosféricas sobre el Pacífico Subtropical y Sureste de Sudamérica, con anomalías negativas de presión sobre el sur de la cuenca amazónica y el sureste de la zona de convergencia del Atlántico Sur (ZCAS). Como consecuencia de ello, el flujo de humedad es retenido y una fuerte convergencia de dicho transporte ocurre en el oeste de la cuenca amazónica, favoreciendo fuertes lluvias y caudales. Estas características climáticas también fueron observadas durante el verano de 2012, con un mayor ingreso de humedad atmosférica desde el mar Caribe sobre el noroeste de la cuenca amazónica (Figura 3c), produciendo abundantes lluvias y un temprano desborde del río Marañón.

Influencia de la variabilidad de los océanos Atlántico y Pacífico en la hidrología de la cuenca amazónica peruana

Espinoza J.C.

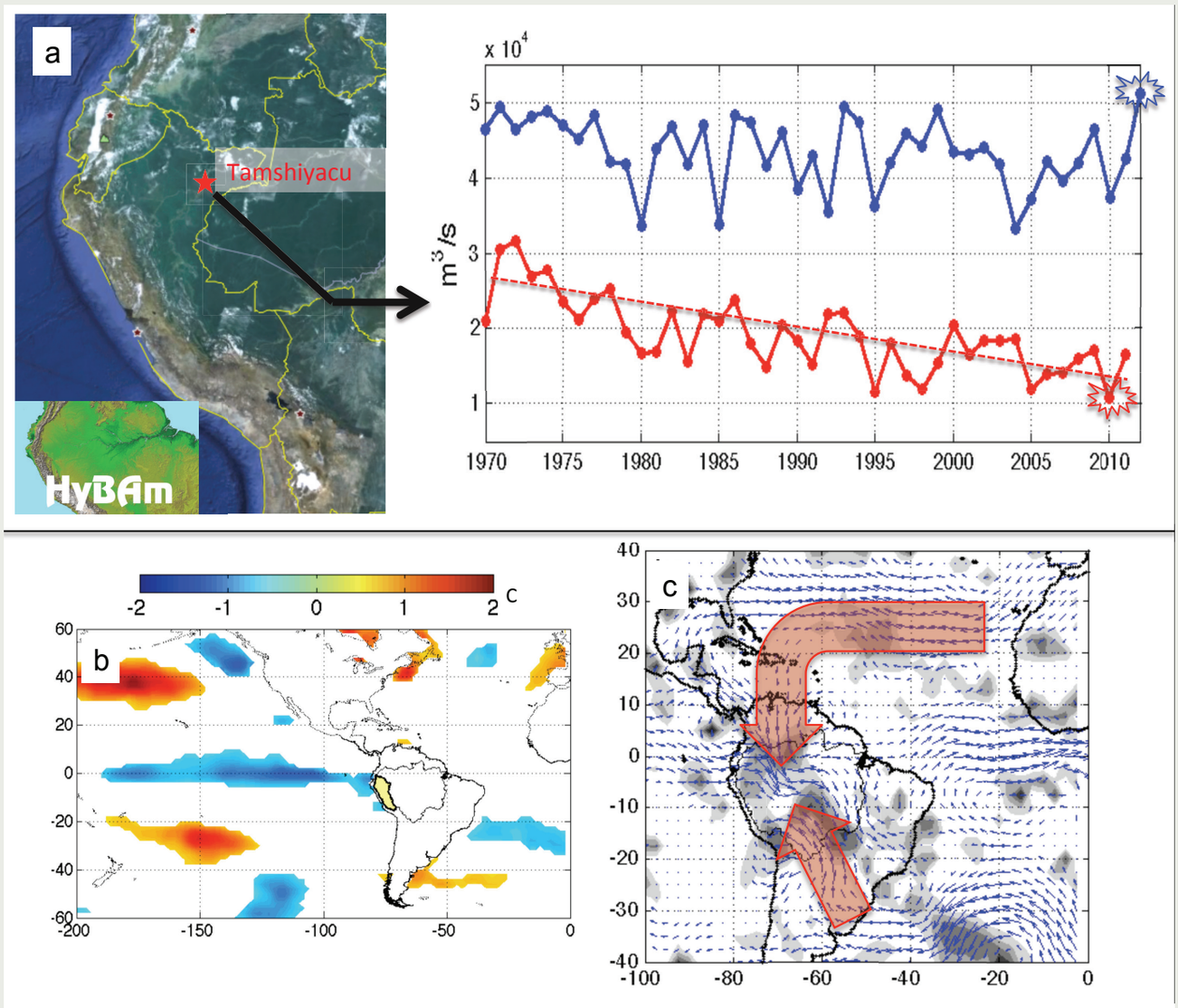

Figura 3. a) Evolución de los caudales en el río Amazonas en la estación hidrométrica de Tamshiyacu (40 km aguas arriba de Iquitos) durante el periodo 1970-2012. Línea azul: caudales durante el periodo de aguas altas (marzo-mayo). Línea roja, caudales durante el periodo de estiaje (agosto-octubre). Nótese que en el eje Y los valores se expresan en decenas de miles de m^3/s. Se muestran los valores extremos históricos: el más bajo ocurrido en septiembre 2010 y el más alto en abril 2012. b) Anomalías de la temperatura superficial del mar durante noviembre 2011 – febrero 2012 (expresado en ˚C). Solamente los valores más altos que dos veces la Desviación Standard son graficados. c) Anomalías del transporte de humedad (vectores) integrado verticalmente (de 1000 a 300 hPa) y su convergencia (sombreado). (Fuente: Espinoza et al., 2013).

El rol combinado del Pacífico y Atlántico

De acuerdo a las recientes publicaciones científicas, la temperatura de los océanos Pacífico y Atlántico tendría un rol diferenciado sobre los eventos hidrológicos extremos en la Amazonía peruana (Figura 4). Las sequías extremas están principalmente asociadas a condiciones anómalamente cálidas en el océano Atlántico Tropical Norte durante el otoño e invierno, mientras que los eventos El Niño en el Pacífico Central tienden a reducir las precipitaciones sobre la Amazonía peruana (Espinoza et al., 2011; Marengo et al., 2011a; Lavado et al., 2012). De hecho, la mayor sequía que se haya registrado (septiembre 2010) fue producida por la influencia combinada de ambos océanos: El Niño durante el verano y anomalías cálidas en el Atlántico Tropical Norte durante el otoño e invierno (Espinoza et al., 2011; Marengo et al., 2011a). Por otro lado, las fuertes inundaciones son asociadas a eventos La Niña y a condiciones más frías de lo normal en el océano Atlántico Tropical Norte durante los meses de verano (Espinoza et al., 2012; 2013; Marengo et al., 2011b; Lavado y Espinoza, 2014). El esquema propuesto en la Figura 4 ejemplifica el rol combinado de ambos océanos en los eventos hidrológicos extremos en la Amazonía peruana.

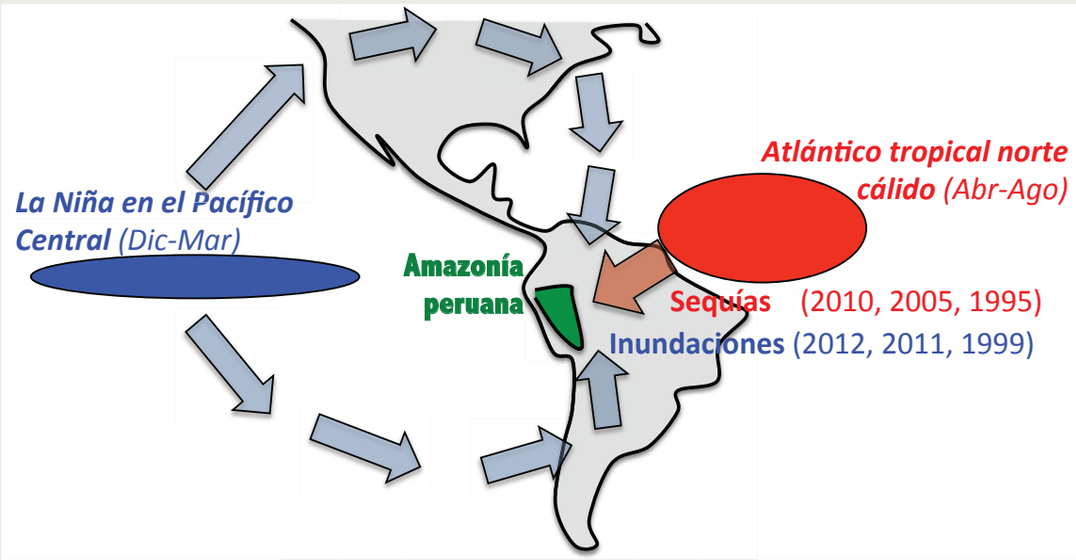

Figura 4. Esquema ejemplificativo del rol de la temperatura superficial del mar de los océanos Atlántico y Pacífico sobre los eventos hidrológicos extremos en la cuenca amazónica peruana.

Referencias

Asner, G. P., N. Alencar, 2010: "Drought impacts on the Amazon forest: The remote sensing perspective", New Phytologist, 187, 569–578, doi:10.1111/j.1469-8137.2010.03310.x.

Callède, J., J.-L. Guyot, J. Ronchail, Y. L. Hote, H. Niel, E. de Oliveira, 2004: "Evolution du débit de l'Amazone à Obidos de 1903 à 1999", Hydrological Sciences Journal, 49, 85–98, 11177.

Chen, J. L., C. R. Wilson, D. B. Tapley, 2010: "The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE", Water Resources, 46, 1-10, doi:10.1029/2010WR009383.

Cox P. M., P. P. Harris, C. Huntingford, R. A. Betts, M. Collins, et al., 2008: "Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution", Nature 453, U212–U217.

Espinoza, J. C., P. Fraizy, J.-L. Guyot, J. Ordoñez, R. Pombosa, J. Ronchail, 2006: "La variabilité des débits du rio Amazonas au Pérou. Climate Variability and Change-Hydrological impacts", IAHS Publ, 308, 424–429.

Espinoza, J. C., J. Ronchail, J.-L. Guyot, G. Cocheneau, N. Filizola, et al., 2009a: "Spatio-Temporal rainfall variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador)", International Journal of Climatology 29, 1574–1594.

Espinoza, J. C., J.-L. Guyot, J. Ronchail, G. Cochonneau, N. Filizola, et al., 2009b: "Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974-2004)", Journal of Hydrology, 375, 297–311.

Espinoza, J. C., J. Ronchail, J.-L. Guyot, C. Junquas, P. Vauchel, et al., 2011: "Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought", Geophysical Research Letters, 38(13), 1-6, doi:10.1029/2011GL047862.

Espinoza J. C., J. Ronchail, F. Frappart, W. Lavado, W. Santini, J.-L. Guyot, 2013: "The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970 – 2012 period: A focus on the 2012 flood", Journal of Hydrometeorology, doi: 10.1175/JHM-D-12-0100.1.

Fernandes, K., W. Baethgen, S. Bernardes, R. DeFries, D. G. Hewitt, et al., 2011: "North Tropical Atlantic influence on western Amazon fire season variability", Geophysical Research Letters, 38(12), 1-5, doi:10.1029/2011GL047392.

Gloor M., R. J. W. Brienen, D. Galbraith, T. R. Feldpausch, J. Schöngart, J.-L. Guyot, J. C. Espinoza, J. Lloyd, and O. L. Phillips, 2013: "Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades", Geophysical Research Letters, 40, 1-5, doi: 10.1002/grl.50377.

Lavado, W., J. Ronchail, D. Labat, J. C. Espinoza, J.-L. Guyot, 2012: "Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969-2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages", Hydrological Sciences Journal, doi: 10.1080/02626667.2012.672985.

Lavado, W., and Espinoza J. C., 2014: Impact of El Niño and La Niña events on Rainfall in Peru, Revista Brasileira de Meteorologia, 29, 171 – 182.

Lewis, S. L., P. M. Brando, O. L. Phillips, G. M. F. van der Heijden, and D. Nepstad 2011: "The 2010 Amazon drought", Science, 331(6017), 554, doi:10.1126/science.1200807.

Marengo, J., 1992: "Interannual variability of surface climate in the Amazon basin", International Journal of Climatology, 12:853–863.

Marengo, J., J. Tomasella, C. Uvo, 1998: "Long–term stream flow and rainfall fluctuation in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwest Peru", Journal of Geophysical Research, 103, 1775–1783.

Marengo, J., C. Nobre, J. Tomasella, M. Oyama, G. de Oliveira, et al., 2008: "The drought in Amazonia in 2005", Journal of Climate, 21, 495–516.

Marengo, J. A., J. Tomasella, L. M. Alves, W. R. Soares, D. A. Rodriguez, 2011a: "The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region", Geophysical Research Letters, 38(13), doi:10.1029/2011GL047436.

Marengo, J. A., J. Tomasella, W.R. Soares, L. M. Alves, C. Nobre, 2011b: "Extreme climatic events in the Amazon basin", Theoretical and Applied Climatology, doi:10.1007/s00704-011-0465-1.

Ronchail, J., G. Cochonneau, M. Molinier, J.-L. Guyot, A. Goretti de Miranda Chaves, et al., 2002: "Rainfall variability in the Amazon Basin and SSTs in the tropical Pacific and Atlantic oceans", International Journal of Climatology, 22, 1663-1686.

Ronchail, J., J.-L. Guyot, J. C. Espinoza, P. Fraizy, G. Cochonneau, et al., 2006: "Impact of the Amazon tributaries on major floods at Óbidos. 5th FRIEND World Conference - Climate variability and change, Hydrological impacts", IAHS, 11/2006, 220-225.

Uvo, C., C. Repelli, S. Zebiak, Y. Kushnir, 1998: "The relationship between tropical pacific and atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation", Journal of Climate, 11, 551–562.

Uvo, C., U. Tolle, R. Berndtsson, 2000: "Forecasting discharge in Amazon using artificial neural networks", International Journal of Climatology, 20, 1495–1507.

Williams, E., A. Dall'Antonia, V. Dall'Antonia, J. de Almeida, F. Suarez, et al., 2005: "The drought of the century in the Amazon basin: An analysis of the regional variation of rainfall in South America in 1926", Acta Amazonica, 35 (2), 231–238.

Xu, L., A. Samanta, M. Costa, S. Ganguly, R. Nemani, R. Myneni, 2011: "Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought", Geophysical Research Letters, 38, L07402, doi:10.1029/2011GL046824.

Yoon, J. H., H. Zeng, 2010: "An Atlantic influence on Amazon rainfall", Climate Dynamics, 34, 249-264.

Zeng, N., J. Yoon, J. Marengo, A. Subramaniam, C. Nobre, A. Mariotti, A., and J. Neelin, 2008: "Causes and impact of the 2005 Amazon drought", Environmental Research Letters, 3, 99.