© Ministerio del Ambiente. Dirección General de Investigación e Información Ambiental
Memoria del Primer Encuentro de Investigadores Ambientales
12-13 de diciembre de 2012 (Iquitos, Perú)

RECIENTES EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS EN LA CUENCA AMAZÓNICA PERUANA Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

RECENT EXTREME WEATHER EVENTS IN THE PERUVIAN AMAZON BASIN AND THEIR RELATION TO CLIMATE VARIABILITY

ESPINOZA J. C., RONCHAIL J., GUYOT J. L., LAVADO W. & SANTINI W.

Resumen

Recientemente, han ocurrido severos eventos hidrológicos extremos en el río Amazonas, como intensas sequías e inundaciones, las cuales han perjudicado a las principales ciudades amazónicas. Mientras que en septiembre de 2010, en la estación hidrométrica de Tamshiyacu se observó el caudal más bajo (8 300 m^3/s), en abril 2011 se observó una rápida transición hacia uno de los caudales más altos (45,000 m^3/s). Finalmente, en abril de 2012, durante el siguiente periodo de aguas altas, el río Amazonas experimentó su caudal histórico más elevado (55,400 m^3/s). Las sequías son generalmente asociadas a anomalías positivas de la temperatura superficial del mar en el Atlántico tropical norte y a un debilitamiento de los vientos alisios y del transporte de vapor de agua, lo cual, en asociación con un incremento de la subsidencia en la región central y sur de la cuenca amazónica, explica un déficit de lluvias y caudales. Sin embargo, en 1998, hacia el final del episodio de El Niño de 1997-1998, la sequía se relacionó con una divergencia anómala de flujo de vapor de agua en el oeste de la cuenca amazónica, lo cual es característico de los episodios cálidos en el Pacífico ecuatorial.

En 2010, durante la primavera e invierno austral, el amazonas peruano ha registrado la más importante sequía registrada desde inicio de los años setenta. Su magnitud e intensidad fue aún superior a la registrada en el 2005, y esto se explica por una adición de las consecuencias del fenómeno de El Niño en el verano y por un episodio muy cálido en el Atlántico tropical norte durante el otoño e invierno. Al igual que en 2005, la sequía en el 2010 fue más importante en el río Ucayali que en el Marañón. Los años con una rápida transición de aguas bajas a crecidas muy altas (por ejemplo: de septiembre 2010 a abril 2011) y aquellos de crecidas excepcionales, están caracterizados por anomalías negativas de la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial central, correspondiendo a La Niña. Esto origina un tren de ondas de altura geopotencial sobre el Pacífico subtropical y sureste de Sudamérica, con anomalías negativas 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 ocurre una fuerte convergencia de la humedad sobre el oeste de la cuenca amazónica, favoreciendo fuertes lluvias y caudales. Estas características climáticas también han sido observadas durante el verano de 2012, con una mayor advección de humedad desde el Mar Caribe sobre el noroeste de la cuenca amazónica, que produce abundantes lluvias y un desborde prematuro del río Marañón, explicando así la ocurrencia del caudal más alto del río Amazonas desde 1970.

Palabras claves: hidrología, río Amazonas, eventos extremos, variabilidad climática.

Abstract

Recently, severe extremes hydrological events have occurred in the Amazon River, including intense droughts and floods, and have threatened major Amazonian cities. While in September 2010 we observed the lowest recorded flow at the Tamshiyacu hydrometric station (8300 m^3/s), by April 2011 there was a rapid transition one of the highest recorded values (45,000 m3/s). In April 2012, during the following high-water period, the Amazon experienced its highest historical rate (55,400 m^3/s). Droughts are generally associated with positive anomalies of sea surface temperature in the tropical North Atlantic and a weakening of the trade winds and the transport of water vapor, which, in association with increased subsidence in the central and south regions of the Amazon basin, explain a lack of rainfall and flow. In 1998, however, towards the end of the 1997-1998 El Niño episode, the drought was associated with an anomalous divergence of water vapor flux in the western Amazon basin, which is characteristic of warm episodes in the equatorial Pacific.

In 2010, during the austral winter and spring, the Peruvian Amazon registered the most significant drought since the early seventies. Its magnitude and intensity was even higher than that recorded in 2005, and is explained by the additional consequences of El Niño in the summer and a warm episode in the northern tropical Atlantic during the autumn and winter. As in 2005, the drought in 2010 was more important in the Ucayali River than in the Maranon. The years of rapid transition from low to very high flood waters (e.g. from September 2010 to April 2011) and those of water levels are characterized by negative sea surface temperatures anomalies in the central equatorial Pacific, corresponding to La Niña. This causes a wave train of geopotential magnitude over the subtropical southeast Pacific and South America, with negative anomalies over the southern Amazon basin and the southeastern area of the South Atlantic Convergence Zone (sacz). As a result, moisture is retained and a strong convergence of moisture over the western Amazon basin occurs, favoring heavy rains and flowrates. These climatic features have also been observed during the summer of 2012, with increased moisture advection from the Caribbean Sea to the north of the Amazon basin, producing heavy rains and early flooding of the Maranon river, thus explaining the occurrence of the highest flow in the Amazon River since 1970.

Keywords: hydrology, Amazon River, extreme events, climatic variability.

Introducción

La cuenca hidrográfica del Amazonas es la más grande del mundo. Su vertiente cubre alrededor de 6,000,000 km^2 y su caudal medio es el mayor del mundo, estimado en 200,000 m^3/s (Callède *et al.*, 2010). Debido a su extensión geográfica, la cuenca del Amazonas se caracteriza por una fuerte variabilidad espacial de las lluvias y de los regímenes hidrológicos (Espinoza *et al.*, 2009a y 2009b). Recientemente, se han registrado eventos hidrológicos extremos en el río Amazonas, los cuales han llamado la atención de la comunidad científica mundial. Estos eventos extremos 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), que han resultado muy perjudiciales para las comunidades ubicadas cerca del curso de agua, así como para la agricultura y los ecosistemas amazónicos (por ejemplo: Asner y Alencar, 2010; Xu *et al.*, 2011; Fernandes *et al.*, 2011).

En este trabajo se realiza una breve descripción de la variabilidad hidrológica actual en la cuenca amazónica y se resumen los resultados más relevantes sobre los eventos hidrológicos extremos ocurridos recientemente. Este estudio se ha hecho posible gracias a nuevos datos obtenidos del observatorio ore-hybam (Hidrología y Geodinámica de la cuenca amazónica).[1]

La variabilidad hidrológica en la cuenca amazónica

Diferentes trabajos han mostrado la relación entre el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la variabilidad hidrológica y pluviométrica en el noroeste de la cuenca amazónica (por ejemplo: 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 son superiores (o inferiores) a lo normal durante la ocurrencia de La Niña (o El Niño). Al oeste de la cuenca amazónica, las lluvias y los caudales muestran una mayor relación con la variabilidad de la temperatura superficial del mar (tsm) en el Atlántico tropical norte. Mientras que la tsm es más elevada de lo normal en esta región oceánica, un déficit de lluvias y caudales es observado en el oeste de la cuenca (Yoon y Zeng, 2010), en especial en las cuencas de los ríos Solimões y Madeira (Espinoza *et al.*, 2009b; Lavado *et al.*, 2012). Desde finales de los años ochenta la tsm del Atlántico tropical norte es más cálida de lo normal (Yoon y Zeng, 2010; Espinoza *et al.*, 2011), lo cual coincide con un cambio de fase de la oma (Oscilación Multidecadal del Atlántico). Recientes estudios sugieren que este incremento de la tsm en el Atlántico tropical norte ha originado fuertes sequías en la cuenca amazónica en los últimos veinte años (Marengo *et al.*, 2008; Cox *et al.*, 2008; Espinoza *et al.*, 2011).

La evolución reciente de los caudales en la cuenca amazónica ha sido analizada utilizando información de trece estaciones hidrométricas de las principales subcuencas para el periodo 1974-2004 (Espinoza *et al.*, 2009b). Este análisis muestra que la estabilidad del caudal medio en el curso principal del Amazonas, donde ninguna tendencia ha sido registrada (Callède *et al.*, 2004), se explica por cambios regionales opuestos que involucran principalmente a ríos andinos: un incremento de la escorrentía durante aguas altas en las regiones del noroeste (de color azul en la Figura 1a) y una disminución de la escorrentía en el período de estiaje, particularmente importante en las regiones del suroeste (de color rojo en la Figura 1b).

1. Véase <http://www.ore-hybam.org>.

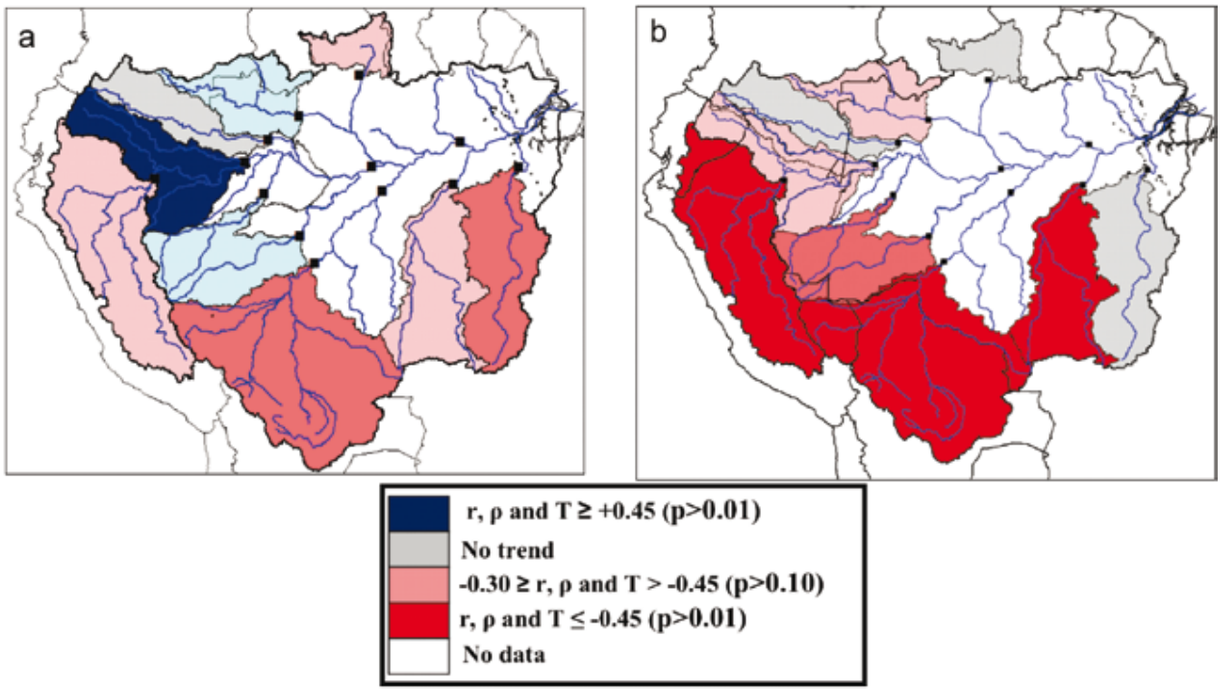

Figura 1. Coeficientes de correlación de Pearson (r), Spearman (p) y Kendall (T) entre la escorrentía y el tiempo (1974-2004) en las subcuencas amazónicas para (a) los valores máximos anuales y (b) los valores mínimos. Los valores por encima de 0,30 son significativos al nivel del 90%, aquellos por encima de 0,45 son significativos al nivel del 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).

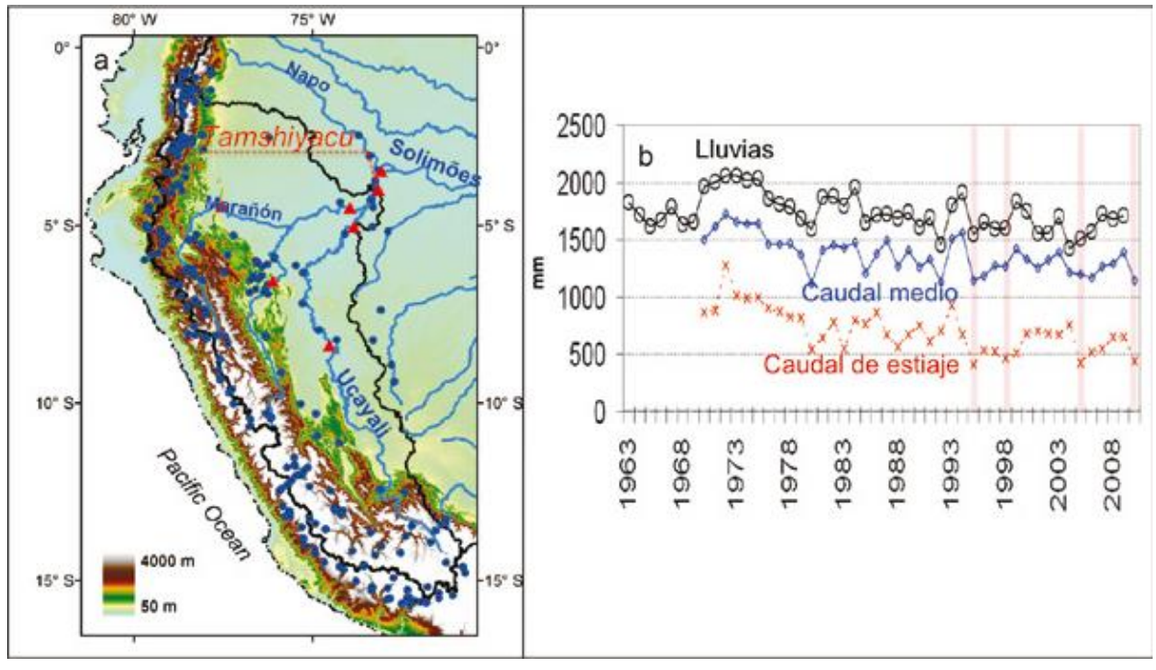

Figura 2. a) Estaciones hidrológicas (triángulos rojos) y pluviométricas (círculos azules) en la cuenca de Tamshiyacu. El nombre de los ríos (azul) y de la estación hidrométrica de Tamshiyacu (rojo) son indicados en Azul. **b)** Variabilidad interanual (1963-2010) de la lluvia anual (línea negra), de 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. Adaptado de Espinoza *et al.* (2011).

Desde finales de los años ochenta severas sequías han ocurrido en la cuenca amazónica, las cuales han sido asociadas al calentamiento de la tsm en el Atlántico tropical norte, lo cual produce una anormal posición de la itcz hacia el norte y una disminución del aporte de humedad hacia la cuenca amazónica (por ejemplo: Marengo, 1992; Uvo *et al.*, 2000, Yoon y Zeng, 2010). Por ejemplo, el origen de la dramática sequía del 2005, especialmente intensa en el suroeste de la Amazonía, se atribuye a elevados valores de tsm en el Atlántico tropical norte (Zeng *et al.*, 2008; Marengo *et al.*, 2008; Cox *et al.*, 2008).

Eventos hidrológicos extremos en la amazonía peruana

El oeste de la cuenca amazónica, el Amazonas peruano también ha sufrido de manera intensa episodios secos en los últimos años. La estación hidrométrica de Tamshiyacu sobre el río Amazonas en Perú, tiene un drenaje de 750,000 km^2 (Figura 2a) y un caudal medio de 32,000 m^3/s, aproximadamente el 16% del caudal en la desembocadura del Amazonas (Espinoza *et al.*, 2006, 2009b). En esta estación se ha registrado una tendencia negativa en la precipitación media anual y el caudal para el período 1970-2004 (Figura 1b y Figura 2b). Así también las frecuentes sequías han sido observadas desde finales de los años ochenta (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) siendo la más intensa la registrada en septiembre de 2010. En la Amazonía peruana, las sequías han sido igualmente asociadas con anomalías positivas de la TSM en el Atlántico tropical norte y vientos alisios débiles, así como con un débil transporte de vapor de agua hacia la Amazonía peruana, que junto con el aumento de la subsidencia sobre el centro y sur de la Amazonía, explican la falta de lluvias y las bajos caudales. Sin embargo, en 1998, hacia el final del evento de El Niño 1997-1998, la sequía estuvo más relacionada con una fuerte divergencia de vapor de agua en el oeste de la Amazonía, característica de un evento cálido en el Pacífico. 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 3c). Su mayor intensidad y duración en comparación con la sequía del 2005 puede ser explicada por la adición del fenómeno de El Niño durante el verano austral

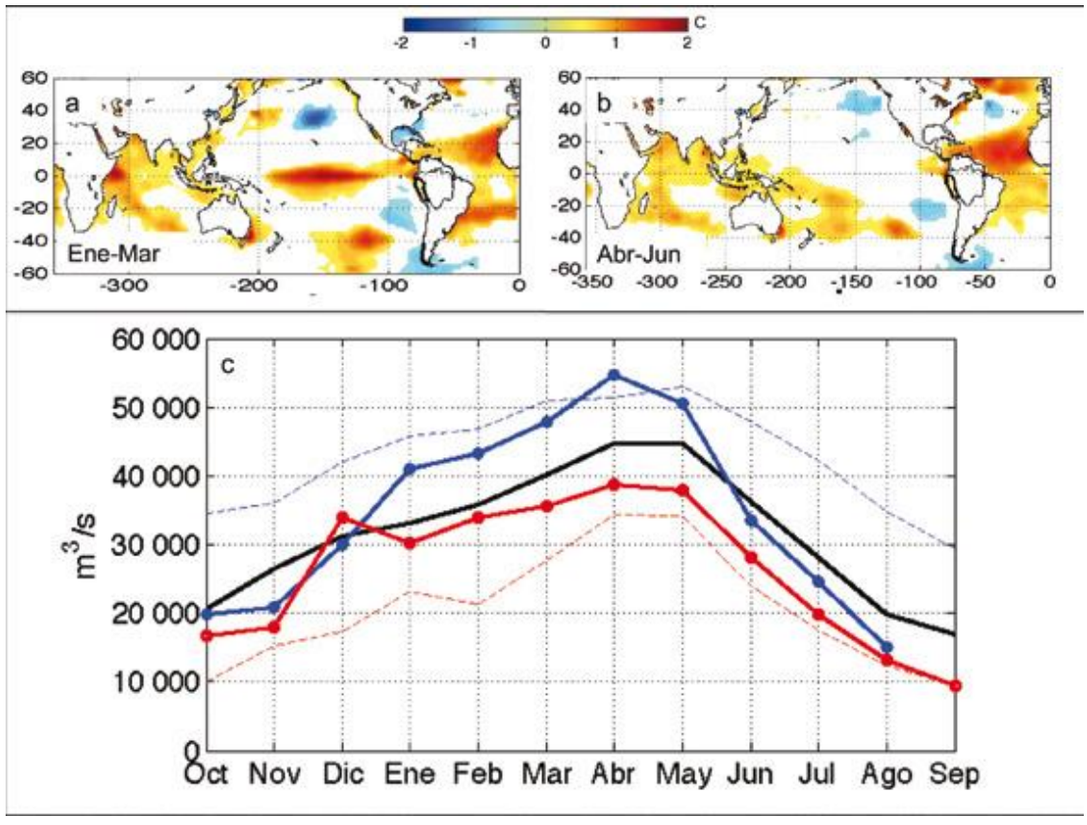

Figura 3. a. Anomalías de la temperatura superficial del mar (tsm) durante a) enero-marzo y b) abril-junio de 2010 (expresado en ˚C). Solamente segrafican los valores más grandes que 2x, la Desviación Standard. Adaptado de Espinoza *et al.* (2011). c) Caudales mensuales en la estación hidrométrica Tamshiyacu. Caudal promedio (línea negra), caudal máximo (línea azul punteada) y mínimo (línea roja punteada) histórico. Línea roja: Caudal durante 2009-10. Línea azul: caudal durante 2011-2012.

(Figura 3a) seguido por un episodio muy cálido en el océano Atlántico tropical norte (Figura 3b). Para mayores detalles sobre la sequía excepcional del 2010 véase Lewis *et al.* (2011); Marengo *et al.* (2011a) y Espinoza *et al.* (2011).

Sin embargo, durante el año hidrológico 2010-2011 se ha observado en la estación de Tamshiyacu una gran diferencia entre los caudales de estiaje, durante septiembre 2010 (8300 m^3/s) y los caudales de crecida, durante el mes de mayo de 2011 (49 500 m^3/s). Los caudales de crecida son en general tres veces más elevados que los caudales durante las aguas bajas. Sin embargo, durante el año hidrológico 2010-2011, los caudales de crecida fueron cinco veces más importantes que durante el estiaje (Espinoza *et al.*, 2012). Esta transición sin precedentes originó además un récord 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 su caudal histórico más elevado (55 400 m^3/s). El cual ocurrió solo veinte meses después de la sequía de septiembre de 2010, lo cual pone en evidencia la intensificación de los eventos hidrológicos extremos en la cuenca amazónica (Figura 3c). Recientemente, Espinoza *et al.* (2013) ha 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). Esto origina un tren de ondas de la altura de geopotencial sobre el Pacífico subtropical y sureste de Sudamérica, con anomalías negativas 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 ocurre una fuerte convergencia de la humedad sobre el oeste de la cuenca amazónica, favoreciendo fuertes lluvias y caudales.

Estas características climáticas también fueron observadas durante el verano de 2012, con una mayor advección de humedad desde el Mar Caribe sobre el noroeste de la cuenca amazónica, produciendo abundantes lluvias y un temprano desborde del río Marañón que presentó su pico anual durante abril de 2013 (un mes antes de lo normal). Este fenómeno hizo que los picos de los ríos Marañón y Ucayali ocurran de manera casi simultánea, explicando así el caudal más alto del río Amazonas desde 1970 (Figura 3c).

Conclusiones y comentarios finales

Los eventos hidrológicos extremos en la cuenca del río Amazonas son más frecuentes desde finales de los años ochenta: se ha observado un incremento de los caudales durante aguas altas en el noroeste de la cuenca, mientras que una disminución de los caudales de la época de estiaje caracteriza las cuencas del sur oeste de la cuenca amazónica. En la parte oeste (Amazonas peruano), se ha observado una significativa disminución de lluvias y de caudales de estiaje, trayendo como consecuencia la aparición de severas sequías, entre las más importantes las de 1995, 1998, 2005 y 2010. La mayor frecuencia de las sequías en los últimos años está relacionada con la tendencia al calentamiento del Atlántico tropical norte desde los años setenta.

Luego de los bajos caudales registrados en 2010 en el Amazonas peruano, el caudal más elevado desde 1970 fue observado durante abril de 2012, el cual a sido relacionado con el evento La Niña 2011-2012. La mayor frecuencia de los eventos hidrológicos extremos documentados en este trabajo, puede traer importantes impactos sociales, como en la salud, transporte de mercaderías, incendios forestales, y en los recursos naturales en general. Dado este panorama, resulta importante cuantificar dichos impactos y establecer políticas para la previsión de los eventos hidrológicos extremos.

Referencias

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

Callède, J., Guyot, J., Ronchail, J., L Hote, y., Niel, H., de Oliveira, E. (2004) Evolution du débit de l'Amazone à Obidos de 1903 à 1999, Hydrol. Sci. J., 49, 85-98, 11177.

Callède, J., Cochonneau, G., Ronchail, J., Alves, V., Guyot,J., *et al.* (2010) Les apports en eau de l'Amazone a l'Ocean Atlantique, Rev. Sci. l'Eau, 23, 247-273, 11174, 11189, 11191, 11192, 11209, 11212.

Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, D. B. (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 pm, Harris p. p., Huntingford C., Betts R. A., Collins M., *et al.* (2008) Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. Nature 453:U212-U217.

ESPINOZA, J.-C., FRAIZY, P., GUYOT, J.-L., ORDOÑEZ, J., POMBOSA, R., RONCHAIL, J. (2006). La variabilité des débits du rio Amazonas au Pérou. Climate Variability and Change-Hydrological impacts. *iahs Publ*, 308:424-429.

ESPINOZA, J. C., RONCHAIL, J., GUYOT, J.-L., COCHENEAU, G., FILIZOLA, N., *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., GUYOT, J.-L., RONCHAIL, J. COCHONNEAU, G., FILIZOLA, N., *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, W., *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., RONCHAIL J., FRAPPART F., LAVADO W., SANTINI W., GUYOT J.L. (2013). The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970-2012 period: A focus on the 2012 flood. *J. Hydromet.* doi: 10.1175/JHM-D-12-0100.1.

FERNANDES, K., BAETHGEN, W., BERNARDES S., DEFRIES, R., HEWITT, D. G., *et al.* (2011). North Tropical Atlantic influence on western Amazon fire season variability, Geoph. *Res. Lett.*, 38(12), 1-5, doi:10.1029/2011GL047392.

FIGUEROA, S. N., NOBRE, C. A. (1990) Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanálise*, 5: 36-45.

LAVADO, W., RONCHAIL, J., LABAT, D., ESPINOZA J. C., GUY- OT J. L. (2012). A basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969-2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydr. Sc. J.* doi: 10.1080/02626667.2012.672985.

LEWIS, S. L., P.M. BRANDO, O. L. PHILLIPS, G. M. F.VAN DER HEIJDEN, Y D. NEPSTAD (2011). The 2010 Ama- zon drought., *Science*, 331(6017): 554, doi:10.1126/science.1200807.

MARENGO, J. (1992). Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International J. Clim.* 12: 853-863.

MARENGO, J., TOMASELLA, J., UVO, C. (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., NOBRE, C., TOMASELLA, J., OYAMA, M., DE OLIVEIRA, G., *et al.* (2008). The drought in Amazonia in 2005. *J. of Clim.*, 21:495-516.

MARENGO, J. A., TOMASELLA, J., ALVES, LM., SOARES, W. R., RODRIGUEZ, D. A. (2011a).The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geoph. Res. Lett.*, 38(13), doi:10.1029/2011GL047436.

MARENGO, J. A., TOMASELLA, J., SOARES, W. R., ALVES, L. M., NOBRE C. (2011b). Extreme climatic events in the Amazon basin, Theoretical and Applied Climatology, doi:10.1007/s00704-011-0465-1.

RONCHAIL, J., COCHONNEAU, G., MOLINIER, M., GUYOT, J. L., GORETTI DE MIRANDA CHAVES, A., *et al.* (2002). Rainfall variability in the Amazon Basin and SSTs in the tropical Pacific and Atlantic oceans. *Int. J. of Clim.* 22: 1663-1686.

RONCHAIL, J., GUYOT, J. L., ESPINOZA, J. C., FRAIZY, P., COCHONNEAU, G., *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: 220-225. La Havane (Cuba),

UVO, C., REPELLI, C., ZEBIAK, S., KUSHNIR, Y. (1998). The relationship between tropical pacific and atlantic sst and northeast Brazil monthly precipitation. *J. of Clim.*, 11: 551-562.

UVO, C., TOLLE, U., BERNDTSSON, R. (2000). Forecasting discharge in Amazon using artificial neural networks. *Int. J. of Clim.*, 20: 1495-1507.

VERA, C., HIGGINS, W., AMADOR, J., AMBRIZZI, T., GARRE- AUD, R., *et al.* (2006). Towards a unified view of the American Monsoon System. *J. Clim.* 19: 4977-5000.

WILLIAMS, E., A. DALL'ANTONIA, V. DALL'ANTONIA, J. DE ALMEIDA, F. SUAREZ, B., *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., SAMANTA, A., COSTA, M., GANGULY, S., NEMANI, R., MYNENI, R. (2011). Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought, *Geoph. Res. Lett.*, 38, L07402, doi:10.1029/ 2011GL046824.

YOON, J. H., ZENG, H. (2010). An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Clim. Dyn.*, 34: 249-264.

ZENG, N., YOON, J., MARENGO, J., SUBRAMANIAM, A., NO- BRE, C., MARIOTTI, A., Y NEELIN, J. (2008). Causes and impact of the 2005 Amazon drought. *Env. Res. Lett.*, 3: 99 pp.