

Pronóstico de sequías estacionales en la cuenca amazónica durante eventos ENOS

Carlos Enciso, Juan Sulca, Jhan Carlo Espinoza y Yamina Silva
Investigador científico del Instituto Geofísico del Perú (IGP)

INTRODUCCIÓN

La cuenca Amazónica (CA), se extiende entre los 5°N y 20°S, y desde los Andes al océano Atlántico; cubriendo siete países en su extensión: Brasil (63%), Perú (16%), Bolivia (12%), Colombia (6%), Ecuador (2%), Venezuela y Guyana (1%) (Espinoza et al., 2009). La CA posee distintos regímenes de precipitación a lo largo de su territorio, con picos en el verano (diciembre-febrero) para el sur de la cuenca, y en el otoño (abril-junio) para la parte central (Figueroa y Nobre 1990; Nagy et al., 2016; Jiménez-Muñoz et al., 2019). Al oeste, la región ecuatorial del Amazonas presenta un régimen de precipitaciones más homogéneo a lo largo del año, mientras que en la parte ecuatorial de la región de transición entre la Amazonía y los Andes se observan regímenes bimodales (con picos de precipitación en marzo y octubre, durante los equinoccios), así como regímenes unimodales con picos de precipitación durante el invierno austral (Laraque et al., 2007; Espinoza et al., 2009; Segura et al., 2019).

Estos diferentes regímenes están asociados al alternado calentamiento existente en los dos hemisferios, y el ciclo anual del sistema monzónico de Sudamérica (Marengo et al., 2011; Vera et al., 2006); este último asociado a la migración estacional meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

Además de su variabilidad estacional, diferentes estudios han documentado una intensificación de la frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones en las últimas décadas (Barichivich et al., 2018), incluyendo un incremento en la duración del periodo seco en el sur de la cuenca amazónica (Fu et al., 2013; Espinoza et al., 2019). Las sequías han producido impactos en el sistema socioeconómico y en la ecología del bosque tropical más grande del planeta (Coelho et al., 2016, 2012; García et al., 2017; Jiménez-Muñoz et al., 2016, 19; Marengo et al., 2018). Esto ha llevado a que hoy en día la cuenca amazónica

sea considerada como un sistema biofísico en transición (Davidson et al., 2012; Marengo et al., 2019).

En particular, las sequías han sido una respuesta a las anomalías de circulación en niveles bajos y altos de la troposfera, como consecuencia de cambios de la temperatura superficial del mar (TSM) en el océano Pacífico tropical (i.e., El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)), en el Atlántico Tropical (AT), o como resultado de la interacción de ambos (Marengo et al., 2011; Espinoza et al., 2011; Sulca et al., 2018; Zeng et al., 2008; Jiménez-Muñoz et al., 2019). Estas teleconexiones atmosféricas son decisivas para la habilidad de predicción de sequías estacionales por medio de los modelos de circulación global.

En resumen, mecanismos climáticos asociados a las sequías en la Amazonía han sido identificados, no obstante, la previsibilidad estacional de las sequías es un tema que está aún en discusión. Bajo este contexto, en el presente trabajo, se intenta contestar la siguiente interrogante: ¿Es posible tener una previsibilidad de las sequías estacionales de verano en la cuenca Amazónica durante eventos ENOS usando las salidas de los modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés)?

DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Se analizaron 29 años (1982-2010) de datos mensuales grillados, pudiendo ser agrupados en dos categorías:

a. Los datos modelados - El proyecto de ensamblaje de multi modelos de América del Norte (NMME)

El NMME (North American Multi-Model Ensemble) es un sistema de pronóstico que se basa en un conjunto

de modelos acoplados provenientes de los centros de modelamiento de Estados Unidos y Canadá (Kirtman et al., 2014). Los datos de predicción retrospectiva, tienen una resolución horizontal de $1^\circ \times 1^\circ$ (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Models/.NMME/>). Ellos también cuentan con diferentes miembros para cada modelo y diferentes periodos de inicialización (Becker et al., 2014). En el presente trabajo se utilizaron los nueve (09) modelos del NMME, considerando el lead 1.5 (pronóstico realizado con condiciones iniciales del mes anterior), para las variables de precipitación total mensual (PP), temperatura superficial del mar (TSM) a nivel mensual, espesor de (200-500 hPa) altura geopotencial (HGT).

b. Los datos grillados - GPCP - ERSSTv5 - NCEP/NCAR

Los datos grillados mensuales de la GPCP v.7.0 proveen información de precipitación global en una grilla regular de $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ (Schneider et al., 2016). Así mismo, se utilizó la información de TSM mensual de ERSSTv5 (Huang et al., 2017), el cual tiene una resolución de $2.0^\circ \times 2.0^\circ$. Por último, la información de HGT a 200-500 hPa del reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996), con resolución espacial de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Se utilizó una interpolación bilineal tanto para los datos de TSM como HGT, hacia una grilla de $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ para que estén acorde a los datos modelados del NMME.

METODOLOGÍA

Para definir una sequía meteorológica, nosotros utilizamos una variante del índice de precipitación estandarizada (SPI, siglas en inglés), el cual es sugerido por la Organización Mundial de Meteorología (WMO, 2012). Una sequía ocurre cuando el SPI promedio de tres meses consecutivos (SPI3) es igual o menor que 0.8 (Erfanian et al., 2017), denominado desde ahora SP3-sequía.

Para determinar el grado de habilidad o *skill* que poseen los modelos, nosotros calculamos la Correlación de Anomalías (AC, siglas en inglés) (Wilks, 2011).

Para determinar la influencia de ENOS sobre la habilidad de pronóstico de las sequías de verano en la CA, los 29 años de datos modelados y de validación se dividieron en tres categorías: El Niño, La Niña y Neutros. Las categorías están basadas en la intensidad del índice Niño 3.4 (Smith et al., 2008), donde las anomalías positivas ($+0.5^\circ\text{C}$) representan los eventos El Niño, negativas (-0.5°C) La Niña, y entre dicho intervalo los Neutros, calculados todos en base a una media móvil de 3 meses de anomalías de TSM en la región Niño 3.4 ($5^\circ\text{N}-5^\circ\text{S}$, $120^\circ\text{W}-170^\circ\text{W}$).

En este trabajo se utiliza uno de los enfoques más directos para investigar las teleconexiones entre el índice de El Niño 3.4 y las sequías en la CA, calculando correlaciones espaciales entre el espesor de altura geopotencial de la atmósfera alta y media (200-500 hPa) HGT y las anomalías de TSM de la región El Niño 3.4 y las sequías (SPI-sequías) en la cuenca amazónica, esto con el objetivo de evaluar la capacidad de los modelos atmosféricos en la simulación de las teleconexiones atmosféricas asociadas a las sequías en el periodo 1982-2010.

Por último, se utilizó el t-test Student para evaluar la significancia estadística (grado de significancia de 0.05) de los campos de correlación (Wilks, 2011).

RESULTADOS

Las sequías más resaltantes para el periodo 1982-2010 en la CA coinciden con los eventos El Niño (Figura 1a). La estacionalidad de la SPI3 es simulada por los modelos del NMME y su ensamble (Figura 1b). La correlación es más alta (>0.70 en el percentil 90 de toda la cuenca amazónica) para el ensamble de los modelos durante El Niño. Con respecto a la anomalía de la TSM, la Figura 1c muestra una correlación alta (>0.8), de los modelos (más su ensamble) con los datos del ERSSTv5, sobre la región Niño 3.4, para los eventos El Niño mientras que los años neutrales y La Niña presentan correlaciones menores a 0.6.

Las Figuras 2a y 2b muestran la alta correlación negativa (< -0.9) entre los eventos de anomalías de precipitación

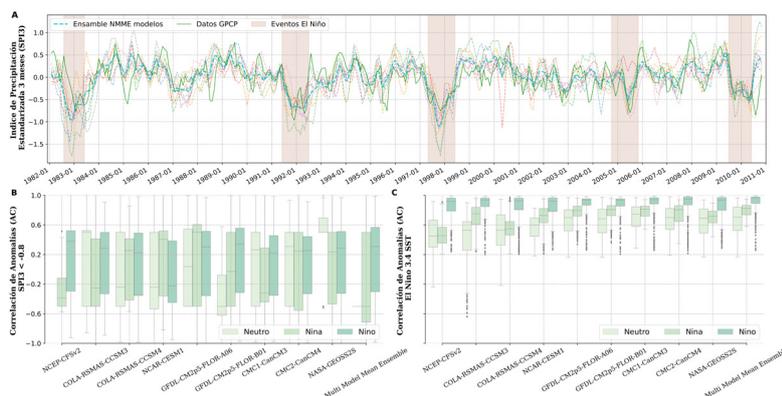


Figura 1. (A) Series temporales del Índice de Precipitación Estandarizado de tres meses (SPI3) usando los nueve modelos del NMME (líneas de colores). El ensamble de los modelos del NMME es mostrado con líneas discontinuas y los valores calculados con GPCP en línea sólida. Los meses El Niño se muestran con rectángulos sombreados y rojos. (B) Coeficientes de correlación entre las anomalías de los datos simulados y del GPCP para sequías, SPI-sequías ($SPI3 < -0.8$). (C) Coeficiente de correlación entre las anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 3.4 ($5^\circ\text{N}-5^\circ\text{S}$, $120^\circ-170^\circ\text{W}$) y las sequías (SPI-sequías). (B) y (C) se analizaron en tres condiciones del ENOS (Niño, Niña y Neutral), utilizando un nivel de significancia del 95% en las correlaciones.

estandarizada (SPI-3), promediados en toda la CA, y las anomalías de TSM de verano ($30^\circ\text{S}-30^\circ\text{N}$, $160^\circ\text{E}-40^\circ\text{W}$), tanto para los datos observados y del ensamble de los modelos, respectivamente. Estos resultados confirman que el Pacífico central y parte este del Pacífico (región Niño 3.4) están fuertemente relacionados con los eventos de anomalías de precipitación existentes sobre la CA, siendo concordante con previos estudios (Ronchail et al., 2002; Jiménez et al., 2019). Ellos resaltan que una de las señales

predominantes sobre las sequías en la Amazonía están dadas por las anomalías positivas de TSM en la región Niño 3.4 (Pacífico central), las cuales producen una alteración en las celdas de Walker y Hadley local. La Figura 2c muestra una correlación alta (>0.9) entre los datos observados del GPCP y los del ensamble de los modelos NMME para las sequías (SPI3-sequías) al noreste de CA, lo cual sugiere que el ensamble de los modelos del NMME tiene una mayor habilidad de pronóstico al noreste de la CA.

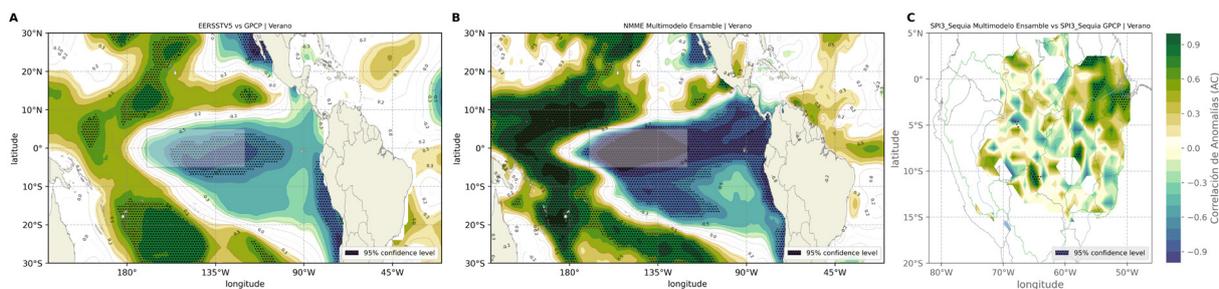


Figura 2. (A) Mapa de correlación entre las anomalías de precipitación estandarizada de tres meses (SPI3, GPCP) y las anomalías de temperatura superficial del mar (TSM, ERSSTv5) para la región (30°S-30°N, 160°E-40°W), durante los veranos de periodos El Niño. El rectángulo sombreado representa la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W). (B) es igual que (A), pero utilizando los datos modelados del ensemble de los modelos del NMME, tanto para anomalía de la TSM como para SPI3. (C) Correlación entre las anomalías de eventos de sequías (SPI3<-0.8) utilizando GPCP y los pronosticados por modelos del NMME. Nivel de significancia estadística al 95% (áreas sombreadas punteadas).

Las Figuras 3a y 3b, muestra altas correlaciones positivas (>0.9) entre las anomalías de la TSM en la región Niño 3.4 y las anomalías de espesor de altura geopotencial (500-200 hPa). Esto sería la respuesta de una onda Kelvin ecuatorial atmosférica al forzamiento convectivo generado en el Pacífico ecuatorial (Sulca et al. 2018), el cual se extiende hacia el este sobre la parte ecuatorial de Sudamérica. Las Figuras 3c y 3d reflejan la teleconexión atmosférica entre las

sequías (SPI3 < -0.8) en la CA y las anomalías en el espesor de la altura geopotencial de la atmósfera media y alta (500-200 hPa). La Figura 3d también muestra que el ensemble de los modelos de NMME simula el patrón observado de la onda Kelvin ecuatorial atmosférica; sin embargo esta incluso cubre toda la CA, sobreestimando los valores de correlación encontrados utilizando datos observados (Figura 3c).

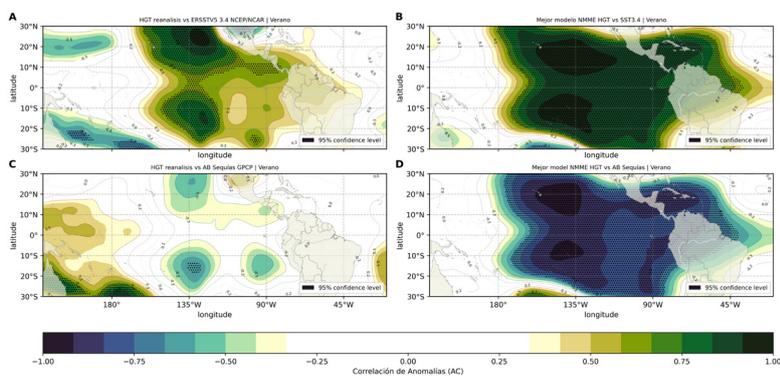


Figura 3. Correlación de anomalías (AC) para el verano, entre los datos de anomalías de sequías (SPI-sequías), temperatura superficial del mar (TSM) y del espesor de la altura geopotencial (HGT), tanto para los datos observados (GPCP, ERSSTv5 y NCEP/NCAR), como para los modelados (NMME). Para los datos modelados se escogió a NASA-GEOSS2S, por tener un mejor skill del grupo NMME, referidos como "mejor NMME". (A y B) Correlación de anomalías entre HGT y anomalías de TSM en la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W), calculado para los datos observados, como también para los modelados. (C y D) es igual que (A y B) pero correlacionando las anomalías de HGT y las anomalías de sequías estacionales (SPI3<-0.8) de la cuenca Amazónica. Las áreas sombreadas punteadas muestran correlaciones significativas estadísticamente al 95% de nivel de confianza, según la prueba t-Student.

CONCLUSIONES

Tres (COLA-RSMAS-CCSM3, GFDL-CM2p5-FLOR-B01 y NASA-GEOSS2S) de los nueve modelos analizados, tienen la habilidad significativa para el pronóstico de las sequías de verano en la parte noreste de la cuenca Amazónica (CA); así mismo, el ensemble de todos los modelos NMME presenta una correlación mayor a 0.85 (percentil 90) para el periodo de 1982-2010. Además, la mayor habilidad de pronóstico de sequías en la CA se presenta para las condiciones El Niño, pudiendo obtenerse esta habilidad en el pronóstico utilizando el lead 1.5 (un mes de anticipación). Cabe mencionar que varias de las sequías más recientes en la Amazonía han sido atribuidas a una combinación de El Niño central (verano) y condiciones cálidas en el Atlántico tropical norte (otoño, invierno), por lo cual aún cuando el presente trabajo se enfocó en el El Niño central como principal manejador de dichos eventos extremos, para esfuerzos futuros, se recomienda un análisis combinado de la predictibilidad de los modelos en temperatura superficial del mar (TSM) sobre ambas regiones.

La habilidad de pronóstico de las sequías (SPI3<-0.8) sobre la CA de cada modelo, depende en gran medida de la capacidad de simular las anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico central. Así mismo, su habilidad depende enormemente de la capacidad de simular las teleconexiones atmosféricas (propagación de ondas ecuatoriales). Los modelos que simulan una débil

teleconexión, no capturan el impacto de la circulación atmosférica a gran escala en la lluvia local sobre la cuenca amazónica y, por lo tanto, no tienen o tienen poca habilidad de predecir las sequías en dicha región.

Los datos observados y el ensemble de los modelos NMME (excepto: COLA-RSMAS-CCSM4, CMC1-CanCM3, CMC2-CanCM4, GFDL-CM2p5-FLOR-A06, NCAR-CESM1, NCEP-CFSv2), presentan correlaciones positivas entre el espesor de la altura geopotencial (HGT) y los periodos de sequías (SPI3-sequías) sobre la Amazonía ecuatorial (onda Kelvin atmosférica sobre la parte ecuatorial de América del Sur); pero el ensemble sobrestima la intensidad negativa observada, pudiendo esto estar ligado a un mayor calentamiento de la TSM sobre la parte del Pacífico oriental; llevando una deficiencia de los modelos del NMME en simular correctamente las teleconexiones atmosféricas existentes.

Finalmente, aun cuando la habilidad de los modelos NMME son limitadas para el pronóstico de sequías de verano, algunos de ellos (CMC2-CanCM4, NASA-GEOSS2S, CMC1-CanCM3) presentan mediana habilidad (correlaciones > 0.75) para el noreste de la CA, pudiendo reproducir las teleconexiones con la TSM del Pacífico central. Diferentes investigaciones requieren ser realizadas para mejorar esta predicción, y por ahora se está evaluando los esquemas convectivos de estos modelos y estudiando otros forzantes locales y regionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Barichivich, J., Gloor, E., Peylin, P., Brienen, R. J. W., Schönegart, J., Espinoza, J.C., Pattayak, K.C. 2018. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation, *Science Advances*, 4, doi:10.1126/sciadv.aat8785
- Becker, E., Dool, H.V. den, Zhang, Q., 2014. Predictability and forecast skill in NMME. *J. Clim.* 27, 5891–5906. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00597.1>
- Coelho, C.A.S., Cavalcanti, I.A.F., Costa, S.M.S., Freitas, S.R., Ito, E.R., Luz, G., Santos, A.F., Nobre, C.A., Marengo, J.A., Pezza, A.B., 2012. Climate diagnostics of three major drought events in the Amazon and illustrations of their seasonal precipitation predictions. *Meteorol. Appl.* 19, 237–255. <https://doi.org/10.1002/met.1324>
- Coelho, C.A.S., de Oliveira, C.P., Ambrizzi, T., Reboita, M.S., Carpenedo, C.B., Campos, J.L.P.S., Tomaziello, A.C.N., Pampuch, L.A., Custódio, M. de S., Dutra, L.M.M., Da Rocha, R.P., Rehbein, A., 2016. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Clim. Dyn.* 46, 3737–3752. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>
- Davidson EA, de Araújo AC, Artaxo P, Balch JK, Brown IF, Busta- mante MMC, Coe MT, DeFries RS, Keller M, Longo M, Munger JW, Schroeder W, Soares-Filho BS, Souza CM Jr, Wofsy SC. 2012. The Amazon basin in transition. *Nature* 481: 321–328, doi: 10.1038/nature10717.
- Erfanian, A., Wang, G., Fomenko, L., 2017. Unprecedented drought over tropical South America in 2016: Significantly under-predicted by tropical SST. *Sci. Rep.* 7, 22–24. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05373-2>
- Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., Oliveira, E.D., Pombosa, R., Vauchel, P., 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *Int. J. Climatol.* 29, 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>
- Espinoza JC., Ronchail J., Marengo JA., Segura H. 2019. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-018-4462-2
- Figueroa SN, Nobre CA. 1990. Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanálise* 6: 36–40
- Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P.A., Dickinson, R.E., Huang, L., Fernandes, K., Liebmann, B., Fisher, R., Myneni, R.B., 2013. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 18110–18115.
- Garcia, B.N., Libonati, R., Nunes, A., 2017. Extreme drought events over the Amazon basin : The perspective from the reconstruction of South American hydroclimate 1, 12–16.
- Huang, B., Peter W. Thorne, et. al, 2017: Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1
- Jiménez-Muñoz, J.C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., Sobrino, J.A., Schrier, G.V.D., 2016. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016. *Sci. Rep.* 6, 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep33130>
- Jimenez JC, Marengo JA, Alves LM, Sulca JC, Takahashi K., 2019. The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. *Int J Climatol*; 1–20. <https://doi.org/10.1002/joc.6453>
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, March, 1996
- Kirtman, Ben P., and Coauthors, 2014: The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; Phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, 585–601. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00050.1>
- Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R. & Rodriguez, D. A., 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.* 38, L12703
- Marengo JA Jr, Souza C, Thonicke K, Burton C, Halladay K, Betts RA, Alves LM and Soares WR., 2018. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Front. Earth Sci.* 6:228. doi: 10.3389/feart.2018.0022
- Nagy, L., Artaxo, P., Forsberg, B.R., 2016. Interactions Between Biosphere, Atmosphere, and Human Land Use in the Amazon Basin: An Introduction. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3_1.
- Laraque A, Ronchail J, Cochonneau G, Pombosa R, Guyot JL., 2007. Heterogeneous distribution of rainfall and discharge regimes in the Ecuadorian Amazon basin. *Journal of Hydrometeorology* 8: 1364 – 1381
- Ronchail J, Cochonneau G, Molinier M, Guyot JL, de Miranda Chaves AG, Guimarães V, de Oliveira E., 2002. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea-surface temperatures in the equatorial Pacific and tropical Atlantic Oceans. *Int. J. Climatol.* 22: 1663–1686, doi: 10.1002/joc.815.
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Ziese, M., 2016. GPCC Full Data Reanalysis Version 7.0: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain Gauges built on GTS based and Historic Data. <https://doi.org/10.5065/D6000072>
- Segura H., Junquas C., Espinoza JC., Vuille M., Jauregui YR., Rabatel A., Condom T., Lebel T., 2019. New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales. *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-018-4590-8.
- Smith, T.M., Reynolds, R.W., Peterson, T.C., Lawrimore, J., 2008. Improvements to NOAA’s Historical Merged Land–Ocean Surface Temperature Analysis (1880–2006). *J. Clim.* 21, 2283–2296. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI2100.1>
- Sulca, J., Takahashi, K., Espinoza, J.-C., Vuille, M., Lavado Casimiro, W., 2018. Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *Int. J. Climatol.* 38, 420–435. <https://doi.org/10.1002/joc.5185>
- Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C.R., Noguez-Paele, J., Dias, P.L.S., Zhang, C., 2006. Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *J. Clim.* 19, 4977–5000. <https://doi.org/10.1175/JCLI3896.1>
- Wilks, D.S., 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.
- World Meteorological Organization, 2012. Standardized precipitation index user guide.