

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN DIFERENTES TIPOS DE SEQUÍAS EN LA CUENCA DEL LAGO TITICACA

Ricardo Zubieta¹, Jorge Molina-Carpio², Wilber Laqui³, Juan Sulca⁴ y Mercy Ilbay⁵

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el impacto del cambio climático en la ocurrencia de sequías para las cuencas del Lago Titicaca, Río Desaguadero y Lago Poopo (Sistema TDPS). Para tal objetivo, se comparan los resultados de los modelos climáticos para el periodo 1984-2014 con los datos observados y se evalúan las proyecciones en el periodo 2034-2064. El estudio utilizó proyecciones climáticas mensuales provenientes del proyecto CMIP5 bajo el escenario de emisión RCP8.5. Se corrigió el sesgo y se analizaron las sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas a partir de los índices estandarizados de precipitación, humedad del suelo y escorrentía, respectivamente. La humedad del suelo y escorrentía fueron estimados a partir del modelo hidrológico GR2M. Ante el aumento de la temperatura regional media de hasta 3 °C y los cambios de intensidad, cantidad y patrón espacial de la precipitación, nuestros resultados indican que las sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas serían más intensas, frecuentes y prolongadas en el sistema TDPS. También se proyecta un aumento en la frecuencia de sequías agrícolas e hidrológicas (duración de 1 a 2 meses). La disminución esperada en la precipitación anual y el mayor aumento de la evapotranspiración en la región sur (Bolivia) de la cuenca producirían aumentos proyectados más grandes que en la región norte (Perú).

Palabras clave: *Sequías, Clima, Altiplano, TDPS, CMIP5, Andes.*

AFILIACIÓN:

1. Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú
2. Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú
3. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia
4. Universidad Nacional del Altiplano, Perú
5. Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú
6. Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador

Citar como: Zubieta, R., Molina-Carpio, J, Laqui, W., Sulca, J., Ilbay, M. (2021). Impactos del cambio climático en diferentes tipos de sequías en la cuenca del lago Titicaca. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 8 n.º 07, págs. 5-14.

INTRODUCCIÓN

La sequía es una anomalía climática transitoria que se caracteriza por precipitaciones por debajo del promedio (sequía meteorológica). Esto provoca una disminución prolongada de la humedad en el suelo que puede impactar severamente los cultivos (sequía agrícola). De prolongarse en el tiempo, la sequía puede causar disminución de los caudales de los ríos o la menor recarga de acuíferos (sequía hidrológica) (Mishra and Singh, 2010). Cada tipo de sequía puede presentar diferente intensidad, duración y frecuencia; y perjudicar una o varias actividades productivas de la población (p. ej. agricultura de secano, ganadería, almacenamiento en lagos o embalses, etc.), lo que provoca escasez y aumento de la demanda hídrica (Satge et al., 2017).

El Perú es frecuentemente afectado por diferentes fenómenos hidroclimáticos extremos tal como las sequías (Espinoza et al., 2009). Las sequías en Perú (2000-2010) causaron pérdidas de cultivos, mortalidad del ganado, plagas y enfermedades, afectando a pequeños productores agrícolas, poblaciones urbanas y la producción eléctrica (ANA, 2010). Una de las regiones más afectadas por las sequías en el Perú es el Altiplano (Fig. 1). Por ejemplo, la sequía de 1982-83, la cual coincidió con el fenómeno El Niño de magnitud extraordinaria, afectó severamente el rendimiento de la agricultura local (Rocha, 2017). Estas pérdidas económicas en Perú y Bolivia se estimaron en 128 millones de dólares (PNUD, 1996). Asimismo, la desviación de las aguas del río Desaguadero (principal afluente del lago Poopó) para el riego y la creciente evaporación están detrás de la reciente desaparición del lago Poopó en 2015-2016 (Satge et al., 2017).

Se proyecta que la tendencia positiva de la temperatura máxima diaria sea mayor que la tendencia positiva de la temperatura mínima diaria en el Altiplano (López-Moreno et al., 2015). Las proyecciones de los modelos de circulación global (MCG) indican que los cambios en la precipitación y temperatura al 2050 conducirían a un déficit hídrico en Bolivia (Escriba et al., 2014). Por lo tanto, el cambio climático y sus impactos sobre la precipitación y la evapotranspiración sobre el Altiplano requieren particular atención. Principalmente, se deben abordar las sequías, ya que los cambios en la intensidad, duración y frecuencia son muy relevantes para las principales actividades económicas como la agricultura y la ganadería (Vicente-Serrano et al., 2014).

El objetivo de este estudio es investigar los impactos del cambio climático sobre las características climatológicas de las sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas para las cuencas del lago Titicaca, río Desaguadero y lago Poopó (sistema hídrico llamado TDPS) ubicadas en Perú y Bolivia (145 000 km²) (3600-6550 m s. n. m.).

El lago Titicaca (8500 km²) es el lago navegable más alto (3809 m s. n. m.) del mundo (Figura 1b) y el sistema TDPS está ubicado entre los desiertos costeros de Perú-Chile y la Amazonía boliviana. El sistema TDPS se caracteriza por un clima semiárido, con precipitaciones medias anuales entre los 1000 mm en el norte y los 200 mm en el sur (Zubieta et al., 2018). A escala interanual, se observan deficiencia y exceso de lluvia durante El Niño y La Niña en el Altiplano, respectivamente (Lagos et al., 2008). A escala interdecadal, Segura et al. (2016) encontraron que durante las décadas cálidas del océano Pacífico central-oeste, los vientos del oeste a 200 hPa se han intensificado por encima de los Andes, conduciendo a déficits hidrológicos en el norte del Altiplano.

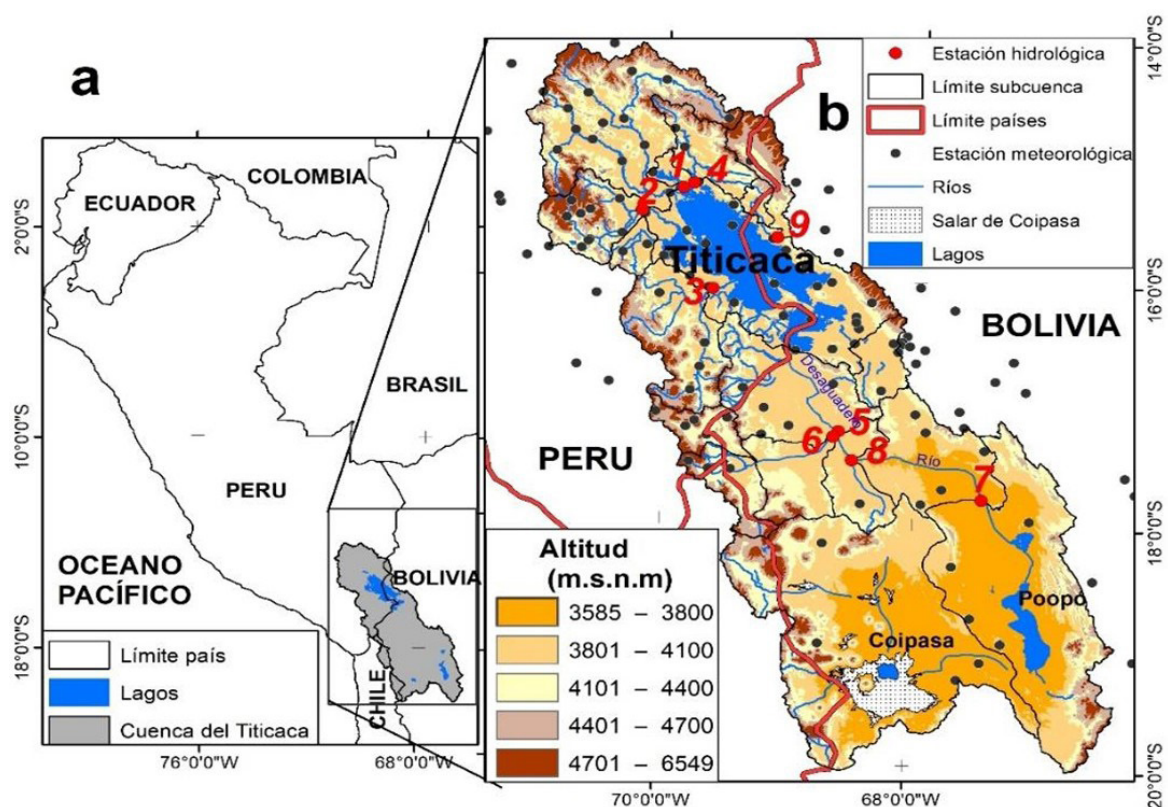


Figura 1. a) Ubicación del sistema hídrico TDPS y b) Modelo de elevación digital y ubicación de estaciones hidrológicas y meteorológicas en el sistema TDPS.

DATOS

Se recopilaron de datos observados, a paso de tiempo mensual, de precipitación, temperaturas máxima y mínima de 121 estaciones (periodo 1964-2014), provenientes de los Servicios Nacionales de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Perú y Bolivia (Figura 1b). Para la mayor representatividad de datos mensuales, se seleccionó un período común (1984-2014) y se sometieron al método de vector regional (MVR). Este método asume que la precipitación anual en una misma zona climática es proporcional entre todas las estaciones del lugar como resultado de la distribución de lluvia (Brunet-Moret, 1979).

Se recopilaron también datos de caudales medios mensuales de nueve estaciones hidrológicas (Figura 1b). La gestión de los datos del caudal se realizó mediante el software HYDRACCESS. Finalmente, se recopilaron datos de 31 MCG de la fase 5 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>) bajo el escenario de emisión RCP8.5. Se seleccionó RCP 8.5 ya que proyecta el escenario más extremo causado por el cambio climático (Riahi et al., 2011).

METODOLOGÍA

Inicialmente, se estimaron datos mensuales de evapotranspiración de referencia (ET_0) usando el método Hargreaves-Samani (Hargreaves and Samani, 1985), similar a lo que sería obtenido por el método FAO Penman-Monteith (Garcia et al., 2004).

Los datos de lluvia y ET_0 fueron interpolados para estimar su distribución espacial. Los datos grillados observados (lluvia y ET_0) y también los estimados a partir de MCG (lluvia y ET_0) se interpolaron usando el método *Nearest neighborhood* ($0.20^\circ \times 0.20^\circ$). Este es un algoritmo que almacena datos y clasifica los nuevos en base a una medición de similitud (Parker et al., 1983). Finalmente, se obtuvo una distribución espacial suavizada para la lluvia y la ET_0 .

Se evaluó la incertidumbre de los MCG con respecto a los datos observados mensuales y, posteriormente, se sometieron a un método de corrección de sesgo. Esta corrección se basó en la distribución y conservación de los cambios relativos (Piani et al., 2010). Así, los datos normalizados se utilizaron paramétricamente para ajustar la variabilidad mensual de los datos de los MCG de modo que coincida con la variabilidad de los datos observados (1984-2014). Después se evaluó el rendimiento de cada MCG mediante el método de diagramas de Taylor (Taylor., 2001).

Esto permitió la selección final de cinco MCG: EC-EARTH, HadGEM2-ES, IPSL-C.M5A-LR, MIROC5 y MPI-ESM-LR. Para evaluar la distribución espacial de los cambios en la temperatura, precipitación y ET_0 del periodo observado 1984-2014 con respecto al periodo proyectado 2034-2064 (Figura 2), se calculó previamente una media de los MCG seleccionados. Datos de lluvia observada (P) y ET_0 estimada, tanto para el periodo observado y proyectado, fueron utilizados para realizar el balance hídrico (Niel et al., 2003) con el modelo hidrológico GR2M. Datos de humedad del suelo (S) y escorrentía (Q) fueron estimados mediante esta modelización hidrológica.

Las sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas se evaluaron mediante los índices de precipitación estandarizado (SPI) (McKee, 1993), humedad del suelo estandarizado (SSMI) (Wang et al., 2011) y escorrentía estandarizada (SRI) (Shukla and Wood., 2008). La estimación de SPI, SSMI y SRI fue mediante la utilización de los conjuntos de datos de P, S y Q, respectivamente. Finalmente, los impactos del cambio climático se evaluaron para el período 2034-2064, en comparación al periodo 1984-2014.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2a se observa que el mayor aumento en la temperatura media ocurriría en el sureste (1.5-3.5 °C) y un menor aumento en el noroeste del TDPS (0.5-1.5 °C). La parte central y norte del TDPS experimentarían un ligero aumento de 3 a 6 % de la precipitación anual (Figura 2b), mientras que al sur de TDPS se proyecta una disminución de hasta -3 % (Figura 2b). La distribución espacial de los cambios de ET_0 es similar al de la temperatura, mostrando un aumento de 5 a 8 % en el norte y de 8 a 10 % en el sur (Figura 2c).

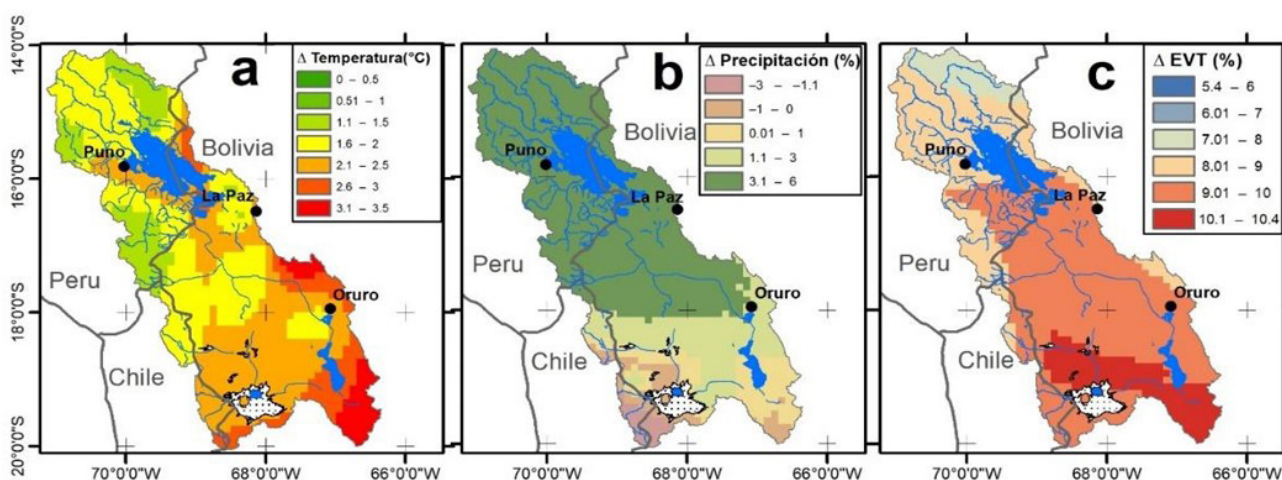


Figura 2. Cambios en (a) temperatura media (°C), (b) precipitación media anual (%) y (c) evapotranspiración media anual (%) para el período 2034-2064, en relación con el período 1984-2014.

El rendimiento del modelo obtenido fue alto para el Altiplano Perú-Bolivia (índice Nash Sutcliffe $\sim 0.60-0.84$). Basado en ello, se estimaron los cambios de SPI, SSMI y SRI para el período 2034-2064, en comparación al período 1984-2014. Nuestros resultados proyectan ligeros cambios (-5 a 5 %) en la intensidad de las sequías meteorológicas en las regiones norte y centro del sistema TDPS (Figura 3a). Así también, una disminución de la frecuencia (de 0 a -20 %) en la región norte (Figura 3b). En contraste, se proyecta el aumento en la intensidad (5 a 10 %) y la frecuencia (10 a 40 %) de las sequías en el sur del sistema TDPS (Figuras 3a-b).

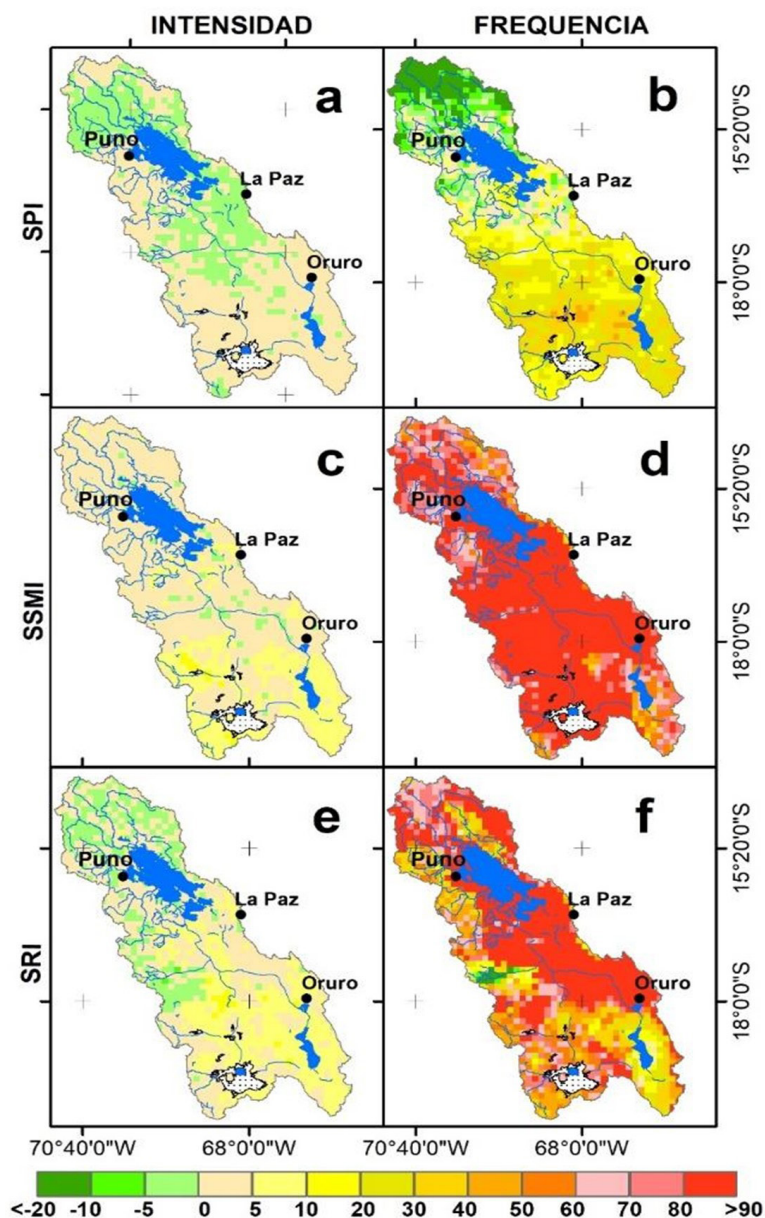


Figura 3. Cambios porcentuales (%) en los promedios de la intensidad y frecuencia de las sequías meteorológicas (SPI) (a-b), sequías agrícolas (SSMI) (c-d) y sequías hidrológicas (SRI) (e-f) para el período 2034-2064, en relación con 1984-2014.

A escala anual, la precipitación no muestra claramente una reducción en el norte del sistema TDPS. En contraste, algunas regiones del suroeste proyectan una disminución predominante (Fig. 2b). El contraste, negativo (descenso) en el norte y positivo (aumento) en el sur, y la magnitud (moderada) de los cambios en la intensidad y frecuencia de las sequías meteorológicas se asocian principalmente a cambios moderados previstos en las precipitaciones, ya que las sequías meteorológicas se definen a través de las anomalías de precipitación usando SPI (Figura 2b).

Se proyecta un aumento en la intensidad (0 a 20 %) y frecuencia (hasta el 90 %) de las sequías agrícolas (Figura 3c-d) para casi todo el sistema TDPS, siendo mayor en el sur (Figuras 3c-d). Esto es de esperar, ya que el índice SSMI es estimado usando datos S, obtenidos a partir del balance hídrico con GR2M. Los mayores cambios en el sur del sistema TDPS están relacionados tanto con la reducción de la precipitación (~3 %) y el aumento de la evapotranspiración (~10 %) proyectados en esta región (Figuras 2b-c). Un mayor aumento de la frecuencia, en comparación a la intensidad, sugiere que la interacción entre el aumento de ET_0 y la variabilidad de la lluvia interanual tienen un rol más sensible en el modelado hidrológico cuando se estima S y Q.

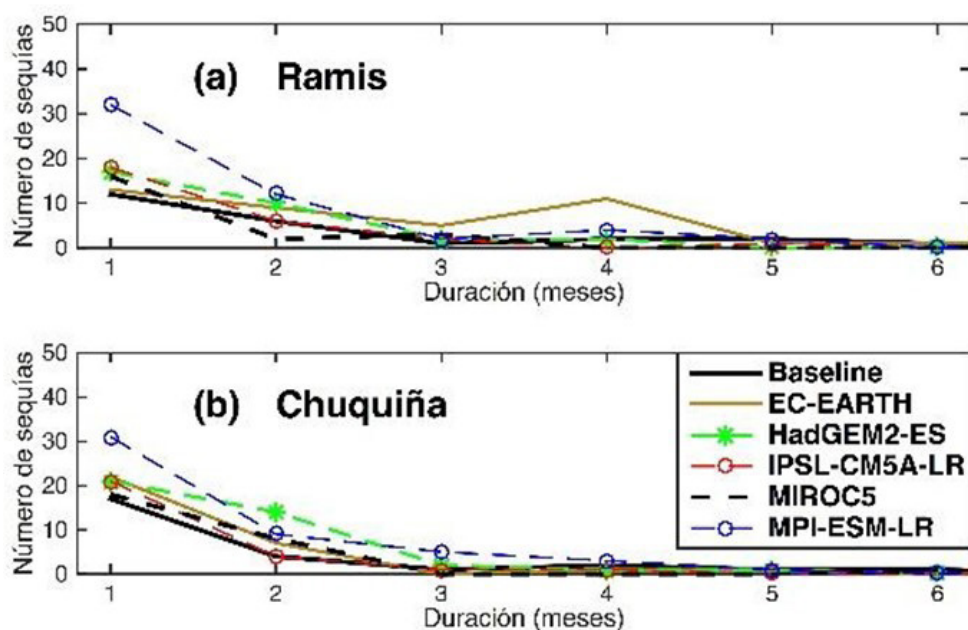


Figura 4. Frecuencia de sequías hidrológicas según su duración para subcuencas monitoreadas en la estación a) Ramis-Perú (1), b) Chuquiña-Bolivia (7). 1 y 7 indican los puntos de control rojo en la Figura 1b.

Para el periodo 2034-2064, la frecuencia de sequías hidrológicas de corta duración (1-2 meses) aumentaría alrededor del 61 % (Figura 4); mientras que la frecuencia de sequías que duran entre 3 y 4 meses aumentaría en un 11 % (Figura 4). Estos resultados son consistentes con los patrones espaciales identificados en la frecuencia de sequías meteorológicas y agrícolas (Figuras 3b-d). De hecho, estos se caracterizarían con menor precipitación y mayor evapotranspiración durante el inicio de la temporada de lluvia (Tabla 1).

Tabla 1. Cambios porcentuales (%) de la precipitación y la evapotranspiración (setiembre-abril) para el periodo 2034-2064, comparado a 1984-2014, para cuencas monitoreadas en la estación Ramis (Perú) y Chuquiña (Bolivia).

Cambios de precipitación (%)	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Ramis	-2.4	-1.8	3.3	8.1	7.3	6.4	6.2	5.4
Chuquiña	-7.4	-7.8	-3.7	3.7	6.0	2.0	1.6	-0.2

Cambios evapotranspiración (%)	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Ramis	8.7	7.9	7.9	7.3	6.8	6.8	7.7	7.7
Chuquiña	10.1	9.6	10.2	9.5	7.7	8.6	8.8	9.2

CONCLUSIONES

Para el periodo de evaluación de las salidas de los modelos (2034-2064), se esperan incrementos de la temperatura y la evapotranspiración, así como la reducción de la lluvia en la región sur en comparación al norte del TDPS. Las proyecciones indican que habrá cambios en la intensidad y duración de las sequías en el TDPS, las que se volverían más intensas y frecuentes en el centro y sur en comparación a la región norte. Se proyecta un aumento de la frecuencia de las sequías meteorológicas de corta duración (1-2 meses) en el Altiplano que se desarrollaría principalmente durante la temporada de inicio de lluvias. Las sequías meteorológicas implicarían que la frecuencia de las sequías agrícolas e hidrológicas se amplifiquen.

REFERENCIAS

ANA (2010). *Las condiciones de sequía y estrategias de gestión en el Perú. Informe Nacional del Perú. Autoridad Nacional del Agua.*

Brunet-Moret, Y (1979). *Homogénéisation des précipitations. Cah. ORSTOM Ser. Hydrology. 16, 3–4.*

Builes-Jaramillo, A., & Poveda, G. (2018). *Conjoint analysis of surface and atmospheric water balances in the Andes-Amazon system. Water Resources Research, 54, 3472–3489. <https://doi.org/10.1029/2017WR021338>*

Escurra, J.; Vázquez, V.; Cestti, R.; De Nys, E. (2014). *Climate change impact on countrywide water balance in Bolivia. Regional Environmental Change 14, 727–742.*

Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E. (2009). *Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). International Journal Climatology. 29:1574–1594.*

García, M.; Raes, D.; Allen, R.G.; Herbas, C. (2004). *Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). Agricultural Water Management, 125, 67–82.*

Hargreaves and Samani. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature. Trans. ASAE, 2, 96–99.*

Lagos, P.; Silva, Y.; Nickl, E.; Mosquera, K. (2008). *El Niño, Climate Variability and Precipitation Extremes in Perú. Advances in Geosciences, 14, 231–237.*

López-Moreno et al. (2015). *Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia. International Journal of Climatology. 36: 1773–1796.*

McKee, T.B.; Doesken, N.J.; Kliest, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, Anaheim, CA, USA.*

Mishra, A. K.; Singh, V.P. (2010). *A review of drought concepts. Journal of Hydrology. 391, 202–216.*

Niel, H.; Paturel, J.E.; Servat, E. (2003). *Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. Journal of Hydrology, 278, 213–230.*

Piani, C.; Weedon, G.P.; Best, M.; Gomes, S.M.; Viterbo, P.; Hagemann, S.; Haerter, J.O. (2010). *Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. Journal of Hydrology, 395, 199–215.*

Parker, J.A.; Kenyon, R.V.; Troxel, D.E. (1983). *Comparison of interpolating methods for image resampling. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2, 31–39.*

PNUD (1996). *Diagnostico Ambiental del Sistema Titicaca- Desaguadero- Poopo- Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia-Perú. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2, 12-13.*

Riahi, K.; Krey, V.; Rao, S.; Chirkov, V.; Fischer, G.; Kolp, P.; Kindermann, G.; Nakicenovic, N.; Rafai, P. (2011). *RCP-8.5: exploring the consequence of high emission trajectories. Climatic Change. 109:33–57.*

Rocha, A. (2007). *El Mega-Niño 1982-83, “La Madre de todos los niños”. Presentation at the Second International Congress on “Obras de Saneamiento, Hidráulica, Hidrología y Medio Ambiente.” HIDRO 2007- ICG. Lima, June 2007.*

Satgé, F., et al. (2017). *Role of Climate Variability and Human Activity on Poopó Lake Droughts between 1990 and 2015 Assessed Using Remote Sensing Data*, *Remote Sensing*, 9(3), 218.

Segura, H.; Espinoza, J.C.; Junquas, C. (2016). *Evidencing decadal and interdecadal hydroclimatic variability over the Central Andes*. *Environmental Research Letters*, 11(9).

Shukla, S.; Wood, A.W. (2008). *Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought*. *Geophysical Research Letters*, 35, 2.

Taylor, K.E. (2001). *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram*. *Journal of Geophysical Research* 106, 7183–7192.

Vicente-Serrano, S.; Chura, O.; López-Moreno, J.; Azorin-Molina, C.; Sanchez-Lorenzo, A.; Aguilar, E.; Moran-Tejeda, E.; Trujillo, F.; Martínez, R.; Nieto, J. (2016). *Spatio-temporal variability of droughts in Bolivia: 1955–2012*. *International Journal of Climatology*, 35, 3024–3040.

Wang, A.; Lettenmaier, D.P.; Sheffield, J. (2011). *Soil moisture drought in China, 1950–2006*. *Journal of Climate*, 24, 3257–3271.

Zubieta, R., Laqui, W., y Lavado, W. (2018). *Modelación hidrológica de la cuenca del río Llave a partir de datos de precipitación observada y de satélite, periodo 2011-2015, Puno, Perú*. *Tecnología y ciencias del agua*, 9 (5), 85-105.