



La disponibilidad hídrica futura en los ecosistemas de zonas áridas en el Sur de Perú y Norte de Chile

Future water availability in dryland ecosystems in southern Peru and northern Chile

Edwin Pino-Vargas*; Isaac Montalvan-Díaz; César Avendaño-Jihuallanga

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Av. Miraflores s/n - Ciudad Universitaria, Tacna, Perú.

RESUMEN

Las regiones áridas como la cabecera del Desierto de Atacama sur de Perú y norte de Chile, son las áreas más sensibles al cambio climático. Se busca establecer la disponibilidad hídrica futura en los ecosistemas de esta región, en función del cambio climático y alteraciones geológicas. Metodológicamente se recurre a la revisión exhaustiva de reportes de investigación en la región de estudio. El desierto de Atacama es considerado una de las regiones más áridas del mundo. El cambio climático supera los aspectos económicos, comerciales y las decisiones políticas, presenta incidencia en muchos aspectos de las actividades humanas y es un factor determinante en las actividades económicas, asignándole un valor económico. Las precipitaciones pluviales en esta región han evolucionado favorablemente, se tienen registros de acumulaciones de agua en forma de pequeñas lagunas, lo que representa un cambio significativo en la disponibilidad hídrica de esta árida región. A futuro, según la tendencia de este comportamiento, es de esperar que la disponibilidad hídrica sea favorable, es probable que se activen zonas de lomas con pastizales y arbustos, evidencias que normalmente se presentan en la región sur de Perú, en algunos años húmedos, lo proporciona condiciones favorables para la actividad ganadera en la región.

Palabras clave: disponibilidad hídrica; Atacama; ecosistemas; zonas áridas.

ABSTRACT

Arid regions, such as the headwaters of the Atacama Desert in southern Peru and northern Chile, are the most sensitive areas to climate change. It seeks to establish future water availability in the ecosystems of this region, based on climate change and geological alterations. Methodologically, an exhaustive review of research reports in the study region is used. The Atacama Desert is considered one of the driest regions in the world. Climate change overcomes economic, commercial and political decisions, has an impact on many aspects of human activities and is a determining factor in economic activities, assigning it an economic value. Rainfall in this region has evolved favorably, there are records of water accumulations in the form of small lagoons, which represents a significant change in the water availability of this arid region. In the future, according to the trend of this behavior, it is expected that the water availability is favorable, it is likely that areas of hills with pastures and shrubs are activated, evidences that normally occur in the southern region of Peru, in some wet years, it is provided by favorable conditions for livestock activity in the region.

Keywords: water availability; Atacama; ecosystems; arid zones.

1. Introducción

Las zonas áridas albergan a más del 38% de la población mundial y son una de las áreas más sensibles al cambio climático y las actividades humanas (Huang *et al.*, 2017). se definen comúnmente como regiones en las que la evapotranspiración potencial anual (ETP) excede en gran medida la precipitación anual (P); es decir, la relación P/ETP es inferior a 0,65 (Hulme, 1996); (Hassan *et al.*, 2005; Feng y Fu, 2013). En la actualidad el clima de la Tierra está cambiando en

respuesta a una serie de perturbaciones antropogénicas (Zalasiewicz y Williams, 2009; Cullen *et al.*, 2000). En el siglo XXI, enfrentamos escasez de recursos hídricos, degradación de los servicios del ecosistema y la erosión de la capacidad del planeta para absorber nuestros desechos (Steffen *et al.*, 2011). La época actual los humanos y nuestras sociedades se han convertido en una fuerza geofísica global, la aceleración en el crecimiento demográfico ha generado consecuencias significativas para el funcionamiento del Sistema Terrestre (Steffen *et al.*, 2007). A su

vez la crisis de gobernabilidad y gobernanza en el uso del agua subterránea de los acuíferos costeros como el caso de La Yarada (Tacna, Perú), es un elemento que contribuye al agotamiento y al deterioro de la calidad del agua subterránea, por procesos de intrusión marina (Pino et al., 2018).

En los últimos años se están llevando a cabo intensos estudios de los cambios actuales e históricos en los factores climáticos percibidos como en la respuesta del sistema Tierra. Tales estudios generalmente conducen a modelos climáticos que, al vincular las causas y los efectos propuestos, tienen como objetivo permitir la predicción de la evolución climática en una escala anual a centenaria (Zalasiewicz y Williams, 2009). Los ecosistemas están expuestos a cambios graduales de clima, carga de nutrientes, fragmentación del hábitat o la explotación biótica. Sin embargo, estudios en lagos, arrecifes de coral, océanos, bosques y tierras áridas han demostrado que el cambio suave puede ser interrumpido por cambios drásticos repentinos a un estado de contraste (Ruddiman, 2003; Scheffer et al., 2001). A escala global la desaparición de grandes masas de hielo continental, sobre todo en el cono sur americano, la Antártida y las grandes cordilleras asiáticas y americanas, producirá una descompensación litostática (Steffen et al., 2011).

Según Zeng et al. (2018), las deformaciones de las montañas impiden el flujo de genes de las poblaciones, y la restricción de la distribución debido a las oscilaciones climáticas acelera aún más la divergencia de las poblaciones. El clima es el principal factor geográfico que influye en las partes principales de la superficie de la Tierra, determina los procesos de formación del paisaje y sus elementos específicos, afecta todos los procesos geológicos exógenos, la vida orgánica acuática y terrestre y las condiciones sociales de las comunidades humanas, así como el desarrollo económico (Bukantis et al., 2001).

El aumento de la población continuará afectando el medio ambiente: el cambio de la cobertura del suelo, la deforestación, la agricultura y el aumento del número de represas se asociarán con una reducción de las descargas de agua y sedimentos al mar, y grandes impactos en los ecosistemas aguas abajo y las zonas costeras (Mahe et al., 2013). A nivel global, el uso agrícola del agua representa alrededor del 70% del agua total que se extrae de las aguas superficiales y subterráneas (Wisser et al., 2008). Los cambios en la disponibilidad hídrica los desiertos debido a los humanos tienen implicaciones importantes desde un nivel local, regional a global (Mahowald, 2007). Las regiones áridas tienen un clima y un entorno ecológico frágil y sensible; los recursos hídricos son extremadamente necesarios para mantener un

equilibrio ecológico (Zhang, 2000; Wang y Qin, 2017). Los ecosistemas terrestres áridos desempeñan un papel importante en los procesos biofísicos mundiales al reflejar y absorber la radiación solar y mantener el equilibrio de los componentes atmosféricos (Gaur y Squires, 2018). La escasez de agua es la característica predominante de las tierras áridas. En las regiones hiperáridas, áridas y semiáridas, el agua es escasa la mayor parte del tiempo, y los asentamientos humanos pueden agruparse alrededor de fuentes de agua, como ríos, manantiales, pozos y oasis. Estas tierras áridas también se caracterizan por la persistente escasez de agua, sequías frecuentes, alta variabilidad climática y diversas formas de degradación de la tierra, incluida la desertificación y la pérdida de biodiversidad.

La región sur de Perú, específicamente la región Tacna y el norte de Chile se ubican en la cabecera del desierto de Atacama (Figura 1), donde se presenta un clima desértico; por esta razón, las precipitaciones anuales son escasas y hasta nulas (Pino et al., 2017; Pino et al., 2019). Los climas del norte de Chile son áridos debido al desierto de Atacama (Sarricolea et al., 2017). El desierto de Atacama es hiperárido, y las áreas donde existe la humedad adecuada para la evaporación están espacialmente altamente restringidas. El desierto de Atacama, en el norte de Chile, es uno de los lugares más secos de la Tierra (Ritter et al., 2019). Sin embargo, los recursos hídricos existen y su evaluación requiere el conocimiento de este componente evasivo pero importante del ciclo hidrológico (Houston, 2006a).

El avance económico de las actividades humanas en la región, ejerce una gran presión sobre el uso de los recursos naturales, un ejemplo de esto es el empleo del agua de los desiertos para su uso en centros urbanos y actividades industriales (Garrido et al., 2016). Según estudios realizados en el desierto de Atacama, se destaca la importancia de ciertos recursos clave como el agua, como un factor esencial en la trayectoria a largo plazo del cambio ecohistórico; sin agua, la supervivencia de las sociedades humanas se vuelve peligroso (Santoro et al., 2017).

En este trabajo se busca establecer la disponibilidad hídrica futura en los ecosistemas de zonas áridas en el Sur de Perú y Norte de Chile, en función del cambio climático y alteraciones geológicas. Metodológicamente se recurre a la revisión exhaustiva de reportes de investigación en la región de estudio.

2. Material y métodos

En función a las características del caso en estudio, metodológicamente establecimos interrelaciones,

donde se consultan estudios y material oficial de dominio público de instituciones académicas, tecnológicas y científicas. De esta manera, buscamos explicar la disponibilidad hídrica en función a la climatología, paleoclimatología y alteraciones geológicas. Existe documentación que fue analizada y se esquematizó para ser reportada en este trabajo y a la vez sirvió para establecer la discusión y conclusiones.

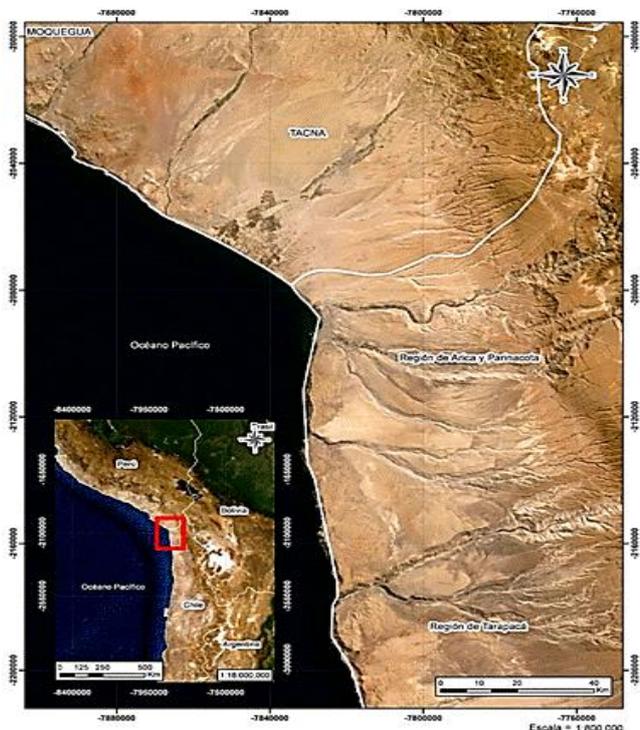


Figura 1. Ubicación de la cabecera del desierto de Atacama, región sur de Perú y Norte de Chile.

3. Resultados y discusión

3.1. Los ecosistemas y el clima en el desierto de Atacama

El desierto de Atacama forma parte de una unidad geomorfológica mayor, el desierto costero peruano-chileno (sur de Perú y norte de Chile). Este desierto se extiende bordeando el Océano Pacífico por más de 3500 km entre las latitudes 5° y 26° S (Barnard y Dooley, 2017). Su existencia es el resultado del establecimiento de la corriente fría de Humboldt, el efecto sombra de lluvia producido por la cordillera de los Andes, y su posición latitudinal.

Para predecir mejor las respuestas de los ecosistemas al cambio climático, especialmente en las regiones áridas o hiperáridas, es esencial una mejor comprensión y cuantificación de las contribuciones de agua sin lluvia (Wang et al., 2017). Algunas situaciones excepcionales ocurren como por ejemplo durante el evento extremo "El Niño", ocurrido en agosto de 2015 en la costa de la región de Tarapacá, Desierto de Atacama, se

registraron precipitaciones de 50 mm en el Oasis de Niebla de Alto Patache (promedio anual de 1 mm), activando la germinación de muchas de las especies presentes en el lugar (Pliscoff et al., 2017). Una comparación de datos arqueológicos en el desierto de Atacama y la zona árida de Australia muestra el impacto de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en los últimos 5000 años, después de la intensificación de ENOS, y habiendo correlacionado los ciclos de ocupación de 'auge y caída' se registra el colapso de la economía y el sistema cultural costero del desierto de Atacama (Latorre, 2008).

Los registros paleoclimáticos del desierto de Atacama son raros y en su mayoría discontinuos, principalmente registran la escorrentía desde la Precorillera hacia el este, en lugar de la precipitación local. Hasta ahora, los registros paleoclimáticos no se han informado desde el núcleo hiperárido del desierto de Atacama (<2 mm/año) (Ritter et al., 2019). Las áreas donde existe la humedad adecuada para la evaporación están espacialmente altamente restringidas (Houston, 2006a). El desierto de Atacama presenta un clima extremadamente seco en marcado contraste con condiciones relativamente húmedas sobre los Andes. La hiperaridez de Atacama se ha atribuido a su ubicación subtropical, las aguas frías sobre el adyacente Océano Pacífico sudoriental y la presencia de la Cordillera de los Andes (Garreaud et al., 2010).

El cambio climático es uno de los temas más relevantes en la agenda ambiental internacional actual. En América del Sur, los países de la región andina serán los más afectados por las consecuencias del cambio climático (Herzog et al., 2011). Por otro lado, no se registra tendencia ni cambio medio en la precipitación durante el período 1965–2007. Sin embargo, las precipitaciones anuales, de verano y otoño en el sur de los Andes presentan una variabilidad interanual importante que está asociada con la temperatura de la superficie del mar en el océano Atlántico tropical, mientras que hay relaciones limitadas entre la lluvia y los eventos de El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) (Lavado et al., 2013). Por el contrario, la variabilidad interanual de la temperatura está relacionada principalmente con los eventos ENOS.

3.2. Geología y disponibilidad hídrica en el desierto de Atacama

En el desierto de Atacama, se reconocen cuatro episodios de evolución del paisaje, cada uno de los cuales ha llevado al desarrollo de una superficie de erosión regional. La primera fase comenzó con la elevación del norte de Chile sobre el nivel del mar a finales del Mesozoico, y cada fase posterior

comenzó con una incisión importante de drenaje en el paisaje precedente (Mortimer, 1973), alberga una serie de características geológicas y geoquímicas únicas que lo hacen diferente a cualquier otro entorno del planeta (Tapia et al., 2018).

La estabilidad de las características de accidentes geográficos en esta área es posible gracias al logro de condiciones hiperáridas en el desierto Atacama como resultado del enfriamiento climático global hace aproximadamente 15 Ma combinado con el efecto de sombra de lluvia causado por levantamiento de los Andes centrales (Nishiizumi et al., 2005). Los accidentes geográficos más antiguos encontrados, son extensos abanicos aluviales denominados "gravas de Atacama". La evidencia geológica revela condiciones menos secas en el pasado remoto, el momento de la transición de árido a hiperárido es motivo de controversia. Dicha podría haber ocurrido entre 19 y 13 Ma fomentada por la elevación simultánea de los Andes durante el Mioceno medio-bajo, o tal vez (un tiempo mucho más temprano, ~ 25 Ma, o más tarde, 2 Ma, una transición asociada con el enfriamiento oceánico global o regional (Garreaud et al., 2010).

La evidencia actual muestra condiciones menos secas en recientes años que en el pasado, lo que denota cambios sustanciales en las condiciones de humedad del sistema, aumento en la magnitud y frecuencia de las precipitaciones, alteración de las estaciones a lo largo del año, lluvias desplazadas en el espacio y el tiempo, que denotan cambios en la cabecera del desierto Atacama.

3.3. Las precipitaciones en el desierto de Atacama

Estudios sobre la climatología tropical de América del Sur y especialmente el Altiplano (Figura 2), han contribuido en gran medida a una comprensión más profunda de la variabilidad de la precipitación y sus causas en el desierto de Atacama (Houston, 2006b). Se registra variación de precipitación en el espacio y el tiempo conduciendo a un complejo sistema hidroclimatológico con varias implicaciones, inundaciones de aguas superficiales en verano asociadas con La Niña e inundaciones de aguas superficiales que ocurren en invierno a lo largo del desierto asociado con El Niño. En julio, las regiones grandes a lo largo de la costa peruana y en los Andes centrales son muy secas (<10 mm) (Manz et al., 2016). Según los datos recopilados en la estación meteorológica Jorge Basadre, ubicada en la ciudad de Tacna, en el año 2017, se registraron precipitaciones de 5,1 mm en 24 horas; siendo uno de los valores más altos registrados históricamente para el mes de noviembre. Este registro es el más

alto en los últimos 10 años. De igual modo, la estación Calana registró un acumulado de 2 mm; en Sama Grande, 1,7 mm; La Yarada, 0,6 mm; y la estación Ite, un valor de 2,2 mm. Las precipitaciones, que se iniciaron la noche del 14 de noviembre, presentaron intensidades variables y abarcaron gran parte de la zona costera de la región.

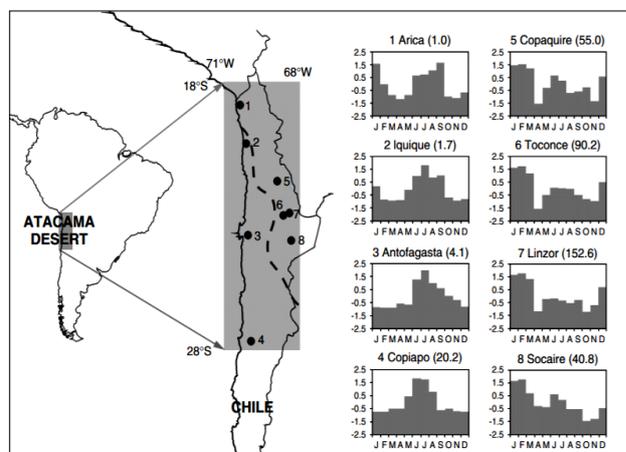


Figura 2. Mapa de ubicación del norte de Chile con histogramas de frecuencia mensual de lluvias para cuatro estaciones costeras.

El núcleo hiperárido del desierto de Atacama, el desierto más seco y antiguo de la Tierra, ha experimentado una serie de eventos de lluvia muy inusuales en los últimos tres años (Figura 3), lo que ha resultado en la formación de lagunas hipersalinas no registradas anteriormente, que han durado varios meses (Azua-Bustos et al., 2018).

Este cambio en la magnitud de las precipitaciones históricas, marca precedente de la huella del cambio climático, masas de agua que no se registraron históricamente, es un indicio, que la magnitud e intensidad de la precipitación en este desierto están cambiando. A pesar, que la región es catalogada como una de la más árida de la tierra, en las últimas décadas estamos viendo evidencias de cambio climático, por tanto, es imprescindible analizar aspectos paleoclimáticos, que nos puedan mostrar evidencias para concluir sobre el futuro de las disponibilidades hídricas.

En la región en estudio, una variabilidad a largo plazo caracteriza la evolución de las lluvias de junio a noviembre (Espinoza et al., 2010), en condiciones históricas normales, las lluvias en la región se daban entre junio y agosto, en los últimos años se vienen registrando lluvias en periodos más largos y a su vez de mayor intensidad. Especialmente en la región Tacna (sur de Perú) y Arica (norte de Chile), siendo regiones fronterizas y que son incluidas en la región denominada cabecera del desierto de

Atacama. El efecto cambio climático en las condiciones de esta región considerada como una de las secas del mundo, según las evidencias científicas encontradas y registradas en la actualidad puede darse como favorables o desfavorables para la disponibilidad hídrica.

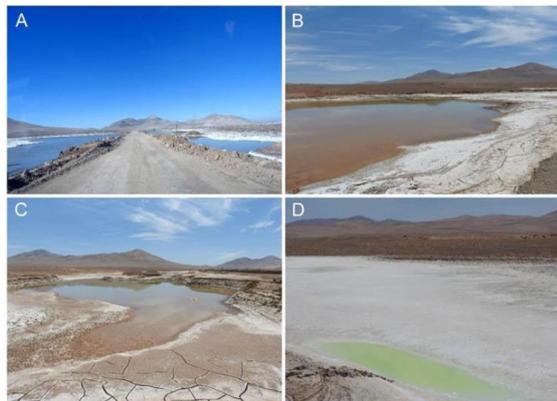


Figura 3. Lagunas formadas después del evento de lluvia del 7 de junio de 2017 en la región de Yungay. (A) Lagunas vistas el 8 de julio de 2017. (B, C y D) Lagunas grandes, medianas y pequeñas, imágenes tomadas el 11 de noviembre 2017.

3.4. Paleoclimas en el desierto Atacama

El aporte etnohistórico es fundamental para conocer el comportamiento del medio ambiente desértico en los últimos siglos (Rivera-Díaz, 2018). El estudio de formaciones boscosas, recuperadas por medio de documentación histórica, permite obtener herramientas para conseguir secuencias climáticas ampliadas del paleoambiente en el desierto de Atacama. Antes del evento de precipitación extrema del 24 al 26 de marzo de 2015 que impactó en el norte de Chile, los escenarios para el Pleistoceno y el Holoceno en intervalos paleoclimáticos más húmedos en el núcleo hiperárido del desierto de Atacama se habían atribuido a las fuentes de humedad del este o suroeste (Jordan et al., 2018). El sistema de finales de marzo de 2015 fue un escenario imprevisto incluso para las condiciones del océano Pacífico en El Niño. El desierto de Atacama experimentó varios episodios intercalados de condiciones húmedas y áridas, las evidencias actuales y pasadas nos dan una visión clara sobre dichos procesos. Los registros paleoclimáticos pueden proporcionar información importante sobre la dinámica de la circulación atmosférica a gran escala en los Andes centrales en el pasado. Así, esta región proporciona un laboratorio natural ideal para paleoclimatólogos (Grosjean y Veit, 2005).

4. Conclusiones

Históricamente, el desierto de Atacama ha sido considerado como una de las regiones más áridas

del mundo, se estableció que en este desierto hay lugares en los que nunca se han registrado precipitaciones. En la actualidad, el cambio climático es un tema trascendente, supera los aspectos económicos, comerciales y las decisiones políticas, presenta incidencia en muchos aspectos de las actividades humanas, por tanto, es considerado como un factor determinante en las actividades económicas, asignándole un valor económico.

Según los últimos reportes del comportamiento climático en la región norte del desierto, sur de Perú y norte de Chile, las precipitaciones pluviales han evolucionado favorablemente, se tienen registros de acumulaciones de agua en forma de pequeñas lagunas, lo que significa un cambio significativo en la disponibilidad hídrica de esta árida región. La estabilidad de las características de accidentes geográficos en esta área es posible gracias al logro de condiciones hiperáridas en el desierto Atacama como resultado del enfriamiento climático global combinado con el efecto de sombra de lluvia causado por levantamiento de los Andes centrales.

A futuro, según la tendencia de este comportamiento, es de esperar que la disponibilidad hídrica sea favorable, es probable que se activen zonas de lomas con pastizales y arbustos, evidencias que normalmente se presentan en la región sur de Perú, en algunos años húmedos, lo proporciona condiciones favorables para la actividad ganadera en la región.

Agradecimiento

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto de investigación "Integración de métodos hidrodinámicos, hidroquímicos e isotópicos para precisar el funcionamiento y manejo sostenible del acuífero La Yarada, Tacna, Perú", financiado con fondos de canon, sobre canon y regalías mineras de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú.

Referencias bibliográficas

- Azua-Bustos, A.; Fairén, A.G.; González-Silva, C.; Ascaso, C.; Carrizo, D.; Fernández-Martínez, M.Á.; ... Parro, V. 2018. Unprecedented rains decimate surface microbial communities in the hyperarid core of the Atacama Desert. *Scientific Reports* 8(1): 1-10.
- Barnard, H.; Dooley, A.N. 2017. An Ancient Irrigation Canal in the Pampa Tamarugal (Chile). *Journal of Field Archaeology* 42(4): 259-268.
- Bukantis, A.; Gulbinas, Z.; Kazakevičius, S.; Kilkus, K.; Mikeliniskiene, A.; Morkūnaitė, R.; ... Žaromskis, R. 2001. Impact of Climate Change for Physical Geographical Processes in Lithuania. Instituto de Geografía y Universidad de Vilna. 280 pp.
- Cullen, H.M.; deMenocal, P.B.; Hemming, S.; Hemming, G.; Brown, F. H.; Guilderson, T.; Sirocko, F. 2000. Climate change and the collapse of the Akkadian empire: Evidence from the deep sea. *Geology* 28(4): 379-382.
- Espinoza, J.; Ronchail, J.; Lavado, W.; Carranza, J.; Cochonneau, G.; De Oliveira, E.; Pombosa, R.; Vauchel, P.; Guyot, J. 2010. Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional.

- Un enfoque particular sobre la región andina. *Revista Peruana Geo-Atmosférica* 2: 99-130.
- Feng, S.; Fu, Q. 2013. Expansion of global drylands under a warming climate. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13(19): 10081-10094.
- Garreaud, R.D.; Molina, A.; Fariás, M. 2010. Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. *Earth and Planetary Science Letters* 292(1-2): 39-50.
- Garrido, M.; Silva, P.; Acevedo, E. 2016. Water Relations and Foliar Isotopic Composition of *Prosopis tamarugo* Phil., an Endemic Tree of the Atacama Desert Growing at Three Levels of Water Table Depth. *Frontiers in Plant Science* 7: 375.
- Gaur, M.K.; Squires, V.R. 2018. Geographic Extent and Characteristics of the World's Arid Zones and Their Peoples. En Gaur, M.K.; Squires, V.R. (Eds.). *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands*. Pp. 3-20.
- Grosjean, M.; Veit, H. 2005. Water Resources in the Arid Mountains of the Atacama Desert (Northern Chile): Past Climate Changes and Modern Conflicts. En Huber, U.M.; Bugmann, H.K.; Reasoner, M.A. (Eds.). *Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge*. Pp. 93-104.
- Hassan, R.; Scholes, R.; Ash, N. 2005. Ecosystems and human well-being: Current state and trends. Disponible en: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015043162>
- Herzog, S.; Martínez, R.; Jørgensen, P.; Tiessen, H. 2011. Climate change and biodiversity in the tropical Andes. *Institute for Global Change Research*. 360 pp.
- Houston, J. 2006a. Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. *Journal of Hydrology* 330(3): 402-412.
- Houston, J. 2006b. Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology* 26(15): 2181-2198.
- Huang, J.; Li, Y.; Fu, C.; Chen, F.; Fu, Q.; Dai, A.; ... Wang, G. 2017. Dryland climate change: Recent progress and challenges: *Dryland Climate Change. Reviews of Geophysics* 55(3): 719-778.
- Hulme, M. 1996. Recent Climatic Change in the World's Drylands. *Geophysical Research Letters* 23(1), 61-64.
- Jordan, T.; Herrera, L.C.; Godfrey, L.; Colucci, S.; Gamboa, P.C.; Urrutia, M.J.; González, L.G.; Paul, J. 2018. Isotopic characteristics and paleoclimate implications of the extreme precipitation event of March 2015 in northern Chile. *Andean Geology* 46(1): 1-31.
- Latorre, C. 2008. The impact of ENSO in the Atacama Desert and Australian arid zone: exploratory time-series analysis of archaeological records. *Chungará* 40: 245-259.
- Lavado, W.S.; Labat, D.; Ronchail, J.; Espinoza, J.C.; Guyot, J.L. 2013. Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007): trends in climate over the Amazonas Andes Peru. *Hydrological Processes* 27(20): 2944-2957.
- Mahe, G.; Lienou, G.; Descroix, L.; Bamba, F.; Paturel, J. E.; Laraque, A.; Khomsi, K. 2013. The rivers of Africa: Witness of climate change and human impact on the environment. *Hydrological Processes* 27(15): 2105-2114.
- Mahowald, N.M. 2007. Anthropocene changes in desert area: Sensitivity to climate model predictions. *Geophysical Research Letters* 34: L18817.
- Manz, B.; Buytaert, W.; Zulkafli, Z.; Lavado, W.; Willems, B.; Robles, L. A.; Rodríguez-Sánchez, J.P. 2016. High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the Tropical Andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121(3): 1190-1207.
- Mortimer, C. 1973. The Cenozoic history of the southern Atacama Desert, Chile. *Journal of the Geological Society* 129(5): 505-526.
- Nishiizumi, K.; Caffee, M.W.; Finkel, R.C.; Brimhall, G.; Mote, T. 2005. Remnants of a fossil alluvial fan landscape of Miocene age in the Atacama Desert of northern Chile using cosmogenic nuclide exposure age dating. *Earth and Planetary Science Letters* 237(3-4): 499-507.
- Pino, E.; Ramos, L.; Avalos, O.; Tacora, P.; Chávarri, E.; Angulo, O.; Mejía, J. 2019. Factors affecting depletion and pollution by marine intrusion in the La Yarada's coastal aquifer, Tacna, Peru. *Tecnología y Ciencias del Agua* 10(5): 177-213.
- Pino E.; Chávarri, E.; Ramos, L. 2018. Governability and governance crisis its implications in the inadequate use of groundwater, case coastal aquifer of la yarada. *Idesia.Tacna, Perú*. 36 pp.
- Pino, E.; Tacora, P.; Steenken, A.; Alfaro, L.; Valle, A.; Chávarri, E.; Mejía, J. 2017. Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8(6): 77-99.
- Pliscoff, P.; Zanetta, N.; Hepp, J.; Machuca, J. 2017. Efectos sobre la flora y vegetación del evento de precipitación extremo de agosto 2015 en Alto Patache, Desierto de Atacama, Chile. *Revista de geografía Norte Grande* (68): 91-103.
- Ritter, B.; Wennrich, V.; Medialdea, A.; Brill, D.; King, G.; Schneiderwind, S.; Dunai, T.J. 2019. Climatic fluctuations in the hyperarid core of the Atacama Desert during the past 215 ka. *Scientific Reports* 9: 5270.
- Rivera-Díaz, M.A. 2018. Bosques de Tamarugos, un acercamiento etnohistórico para el estudio del paleoclima en el desierto de Atacama. *Diálogo Andino* (56): 119-139.
- Ruddiman, W.F. 2003. The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago. *Climatic Change* 61(3): 261-293.
- Santoro, C.M.; Capriles, J.M.; Gayo, E.M.; de Porras, M.E.; Maldonado, A.; Standen, V.G.; ... Marquet, P.A. 2017. Continuities and discontinuities in the socio-environmental systems of the Atacama Desert during the last 13,000 years. *Journal of Anthropological Archaeology* 46: 28-39.
- Sarricolea, P.; Herrera-Ossandon, M.; Meseguer-Ruiz, Ó. 2017. Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2): 66-73.
- Scheffer, M.; Carpenter, S.; Foley, J.A.; Folke, C.; Walker, B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413(6856): 591-596.
- Steffen, W.; Crutzen, P.J.; McNeill, J.R. 2007. The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36(8): 614-621.
- Steffen, W.; Persson, Å.; Deutsch, L.; Zalasiewicz, J.; Williams, M.; Richardson, K.; Svedin, U. 2011. The Anthropocene: From Global Change to Planetary Stewardship. *AMBIO* 40(7): 739-761.
- Tapia, J.; González, R.; Townley, B.; Oliveros, V.; Álvarez, F.J.; Aguilar, G.; ... Calderon, M. 2018. Geology and geochemistry of the Atacama Desert. *Antonie van Leeuwenhoek* 111: 1273-1291.
- Wang, L.; Kaseke, K.F.; Seely, M.K. 2017. Effects of non-rainfall water inputs on ecosystem functions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 4(1): e1179.
- Wang, Y.J.; Qin, D.H. 2017. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview. *Advances in Climate Change Research* 8(4): 268-278.
- Wisser, D.; Frolking, S.; Douglas, E.M.; Fekete, B.M.; Vörösmarty, C.J.; Schumann, A.H. 2008. Global irrigation water demand: Variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets. *Geophysical Research Letters* 35(24).
- Zalasiewicz, J.; Williams, M. 2009. Chapter 6-A Geological History of Climate Change. En Letcher, T.M. (Ed.). *Climate Change*. Pp 127-142.
- Zeng, Y.F.; Zhang, J.G.; Abuduhamiti, B.; Wang, W.T.; Jia, Z.Q. 2018. Phylogeographic patterns of the desert poplar in Northwest China shaped by both geology and climatic oscillations. *BMC Evolutionary Biology* 18(1): 75.
- Zhang, B.G. 2000. Asymptotic behavior of solutions of certain difference equations. *Applied Mathematics Letters* 13(1): 13-18.