



Quinto  
Congreso Nacional  
de Riego y Drenaje  
**COMEII-AURPAES 2019**

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



AURPAES, S.C.  
Asociación Mexicana de Riego y Drenaje

**Artículo: COMEII-19041**

*Mazatlán, Sin., del 18 al 20*

*de septiembre de 2019*

## **ANÁLISIS HISTÓRICO DE LAS PRECIPITACIONES EN LA REGIÓN ANDINA DE BOLIVIA**

**Ronald Ernesto Ontiveros-Capurata<sup>1\*</sup>; Osías Ruíz-Álvarez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Cátedra CONACYT – Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, CP 62550 Jiutepec, Morelos, México.

reontiverosca@conacyt.mx -Tel.: 01 777 393600 ext. 119 (\*Autor de correspondencia)

<sup>2</sup>Water Management and Hydrological Science. Texas A&M University, College Station, Tx. 77843, USA. oruizalvarez454483@tamu.edu, ruiz.osias@inifap.gob.mx. Tel.: +1 979 676 43 46)

### **Resumen**

Las actividades productivas y en particular la agricultura en zonas áridas y semiáridas dependen de la precipitación, por tanto, conocer su comportamiento histórico y variabilidad en el tiempo y espacio es fundamental para la planificación de actividades agrícolas. Este trabajo analizó la variabilidad histórica de la precipitación en la región andina de Bolivia con miras a identificar las zonas de mayor variabilidad u homogéneas. Para el análisis se utilizaron datos climáticos de 186 estaciones climáticas convencionales para el periodo 1971-2010; posteriormente, se realizó un análisis de tendencias mediante la prueba de Mann-Kendall. Los resultados mostraron que las precipitaciones se incrementan de sur a norte siguiendo el flanco oriental de la cordillera de los Andes y de este a oeste principalmente en la región altiplánica, esto se debe a las masas de aire húmedo que llegan de la amazonia y las que se generan alrededor del Lago Titicaca. Las tendencias de precipitación anual durante el periodo 1971-2010 fueron negativas en la región oeste y algunas regiones aisladas del altiplano norte; mientras que gran parte del altiplano presentó un incremento de la precipitación en especial en los años noventa. Este análisis resulta de utilidad para definir zonas de vulnerabilidad y riesgo para la agricultura en la región andina de Bolivia.

**Palabras claves:** Variabilidad climática, series temporales, aridez



## Introducción

Las actividades productivas y en particular la agricultura en zonas áridas y semiáridas dependen en gran parte de la precipitación estacional caída a lo largo del año. En estas zonas, el clima es el factor más determinante porque define condiciones extremas de precipitación que se han intensificado en los últimos años por efecto del cambio climático (WMO, 2013). La variabilidad climática, sea de origen natural y/o antrópico, tiene grandes repercusiones sobre el medio en todas sus dimensiones: físico-natural, socio-económico y político-institucional; por ello, como señalan Mesa et al. (1997), todas las decisiones que se tomen en tareas de planificación económica, social y ambiental deben contener un análisis de esta variabilidad como componente importante. En ese contexto, el análisis de la variabilidad en espacio y tiempo de los parámetros climáticos y en particular de la precipitación en la región andina permite entender el comportamiento histórico, predecir los cambios futuros en el clima y planificar mejor el uso de los recursos hídricos existentes.

La región andina de Bolivia abarca 317,900 km<sup>2</sup> (34.4%) según la delimitación sugerida por CISTEL (2013) y concentra a más del 70% de la población nacional (INE- Instituto Nacional de Estadística, 2015) y los estudios sobre variabilidad climática indican que las precipitaciones se agrupan en dos estaciones, un periodo lluvioso en el verano de diciembre a marzo y otro periodo seco en invierno de junio a septiembre que se hace más intenso hacia el interior de la cordillera de Los Andes (Johnson, 1976; Roche et al. 1990 y Guyot, 1993), así mismo Espinoza et al. (2009) indican que durante el periodo de 1975-2003 la zona andina presenta una tendencia negativa en la cantidad de la precipitación y que los puntos de quiebre con mayores cambios son 1982 y 1989. Si bien estos estudios permitieron conocer el comportamiento de las precipitaciones este conocimiento todavía es incipiente.

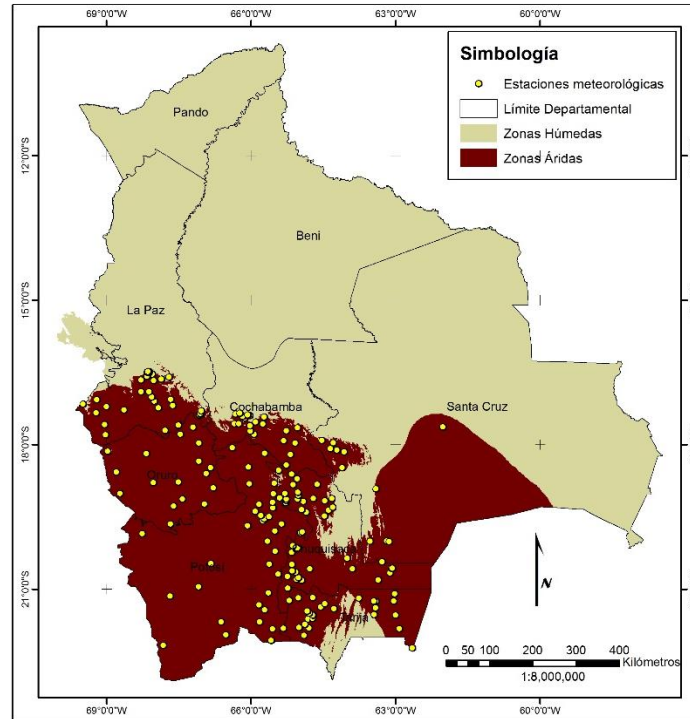
Por tanto, este trabajo pretende analizar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la región andina de Bolivia con miras a identificar las zonas de mayor variabilidad u homogéneas.

## Materiales y Métodos

### Ubicación de la zona de estudio y datos climáticos

El presente estudio se realizó para la región andina de los andes centrales de Bolivia y abarca las zonas hiperáridas, áridas y semiáridas (CISTEL, 2013) ubicadas en los Departamentos de Oruro y Potosí y parte de La Paz, Cochabamba, Chuquisaca, Tarija y Santa Cruz.

Los datos climáticos de precipitación total acumulada fueron obtenidos de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI, 2010) a nivel mensual para un periodo de 40 años desde 1971 a 2010 para un total de 186 estaciones que se ubican en la zona de estudio (Figura 1).



**Figura 1.** Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

Antes de utilizar los datos se depuraron las estaciones con registros escasos (más de 2 años consecutivos sin datos) o inconsistentes, en las estaciones seleccionadas se rellenaron los datos faltantes mediante el método de la distancia inversa ponderada (IDW). Posteriormente los datos puntuales de cada estación se compararon con la base de datos WORLDCLIM de Hijmans et al. (2005) para el periodo 1950-2000, para obtener un modelo de regresión que permitió generar superficies climáticas para el periodo de estudio (1971-2010) a una resolución espacial de 1 km y que fueron utilizadas para el análisis de variabilidad espacial.

### Análisis de la variabilidad histórica

El análisis de la variabilidad histórica se realizó mediante la obtención de tendencias con la prueba de Mann-Kendall, en la cual cada registro de la serie de tiempo de precipitación es comparado con su valor subsecuente, el resultado neto de sumar todos los incrementos y disminuciones representa el valor final de  $S$  (Shahid, 2010). Si expresamos lo anterior matemáticamente se tiene que si  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_j$  representa un conjunto de  $n$  puntos con datos climáticos en el tiempo  $j$ , entonces  $S$  viene dado por:

$$s = \sum_{j=1}^{j=n-1} \sum_{i=j+1}^{i=n} \text{Sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

Donde  $S$  es denominada la suma neta de Mann-Kendall,  $x$  es la serie de datos que van desde  $i$  hasta  $n$  en el tiempo  $j$ , la función  $\text{Sign}$  es una función que asigna un valor de -1 si el valor de la diferencia entre datos evaluado y su inmediato posterior es negativa, un



valor de +1 si esta suma es positiva y cero si ambos datos son iguales (0). Las siguientes expresiones permiten calcular los valores de tendencia, donde un valor positivo de  $S$  o de  $\tau$  indica una tendencia positiva y un valor negativo una tendencia negativa.

$$s_{\max} = \frac{1}{2}n(n-1), \quad \tau = \frac{s}{s_{\max}} \quad (2)$$

Posteriormente se calcula la probabilidad asociada con el estadístico  $S$  y la muestra  $n$  para estimar la significancia de la tendencia, así el valor de  $Z$  es calculado mediante las siguientes expresiones.

$$Z = \begin{cases} \frac{1}{\sigma}(s-1) & \rightarrow s > 0 \\ 0 & \rightarrow s = 0 \\ \frac{1}{\sigma}(s+1) & \rightarrow s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Donde  $S$  es la suma neta de Kendall y  $\sigma$  es la varianza de la serie de datos; finalmente, la hipótesis de que no existe tendencia es rechazada en cualquiera de los siguiente casos: si  $|Z| > 2.575$  para un  $\alpha = 1\%$ , si  $|Z| > 1.96$  para un  $\alpha = 5\%$  y si  $|Z| > 1.645$  para un  $\alpha = 10\%$ . Finalmente, según Sen (1968) para estimar la tendencia de una serie se debe calcular la pendiente de cambio en el tiempo denominada comúnmente estimador o pendiente de Sen, que se obtiene a partir de la siguiente relación:

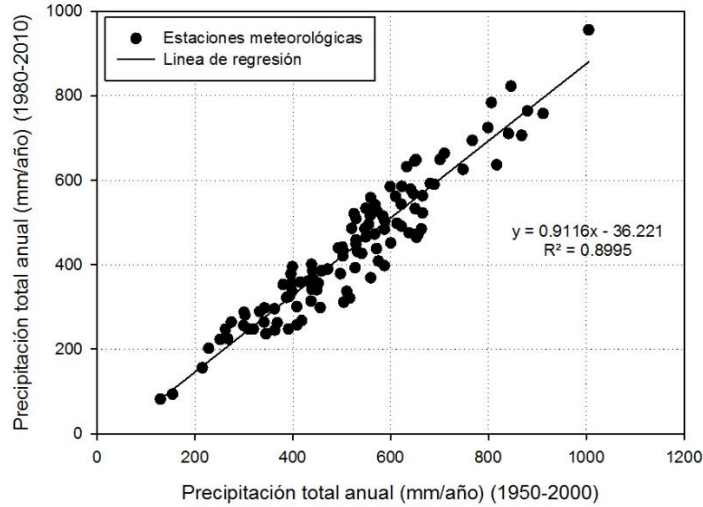
$$Q = \text{Mediana} \left\{ \left[ \left[ \frac{x_i - x_j}{i - j} \right]_{j=1}^{j=n-1} \right]_{i=j+1}^{i=n} \right\} \quad (4)$$

El signo de  $Q$  indica el sentido de la tendencia y su valor, la magnitud del cambio.

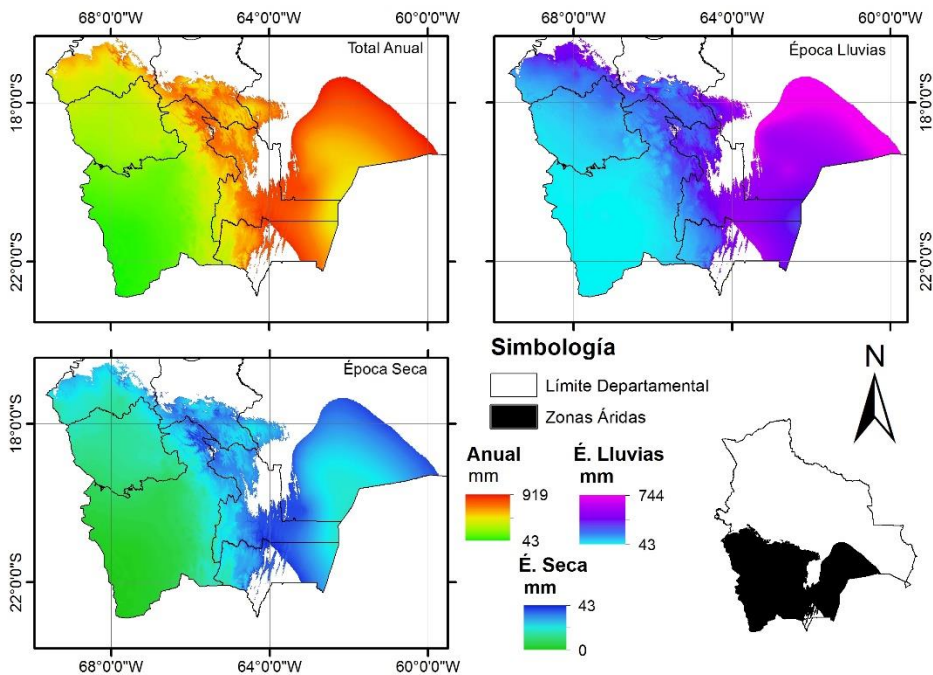
A su vez se realizó una descripción espacial de los resultados obtenidos, para lo cual se generaron mapas de interpolación espacial de los valores de tendencia de precipitación para los diferentes periodos analizados, destacando las relaciones existentes entre ellos y las zonas espacialmente homogéneas.

## Resultados y Discusión

La figura 2 muestra los resultados obtenidos de la regresión lineal entre los datos del SENAMHI (periodo 1971-2010) y Hijmans et al. (2005) (periodo 1950-2000) a partir del cual se construyeron las superficies de precipitación actualizada que se muestran en la figura 3. El análisis mostró un coeficiente de determinación aceptable ( $R^2=0.9$ ).



**Figura 2.** Regresión lineal entre valores de precipitación total anual para el periodo 1950-2000 y 1980-2010.



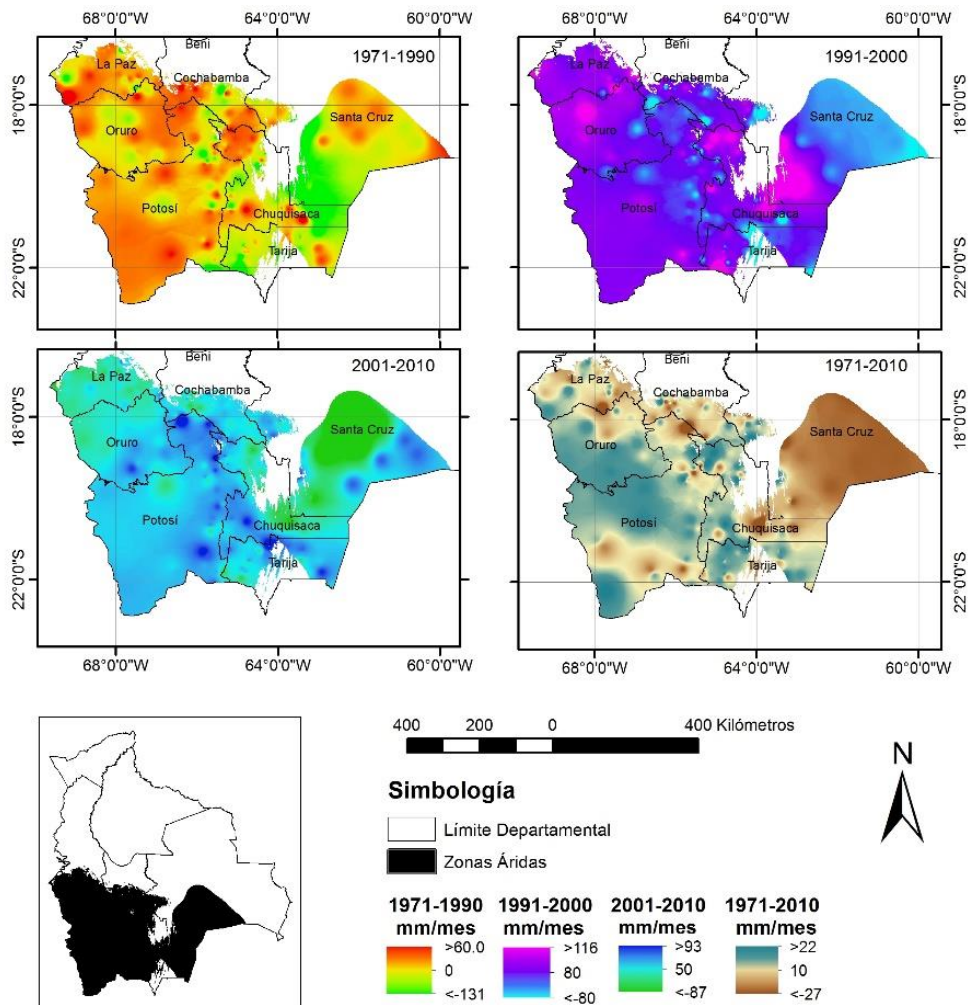
**Figura 3.** Superficies de precipitación actualizada para el periodo 1971-2010 en la región andina de Bolivia para tres estacionalidades (anual, época seca y época de lluvias)

En la región andina, las mayores precipitaciones se producen en la región oriental y alcanzan valores de 919 mm anuales, 744 mm en época de lluvias y 43 mm en época seca; mientras que en la región occidental las precipitaciones son menores y llegan a 43 mm al año, llegando incluso a no tener precipitación en época seca. Esto coincide con lo encontrado por Johnson (1976) y Espinoza et al. (2010). La variabilidad de la precipitación se incrementa de sur a norte siguiendo la dirección de la cordillera andina, lo que se debe a diferentes razones: en la región del altiplano, influye el efecto que ejerce la zona de convergencia que se forma en el lago Titicaca (Gálvez y Douglas, 2006), mientras que hacia la parte oriental y en el interior de la cordillera este incremento está influenciado

por las corrientes de aire húmedo que vienen de la amazonia y el efecto del flujo horizontal de aire húmedo, que es forzado a ascender por la topografía (Viale, 2010).

### Variabilidad histórica anual

La distribución espacial de las tendencias de precipitación total anual de la región andina de Bolivia se muestra en la figura 4. En los años 70 y 80, la zona norte de Santa Cruz y algunas zonas aisladas en el altiplano central presentaron una reducción de hasta 135 mm/mes, mientras que en gran parte del altiplano y los valles interandinos se incrementó hasta en 60 mm/mes.



**Figura 4.** Variabilidad espacial y temporal de la tendencia de la precipitación anual en la región andina de Bolivia.

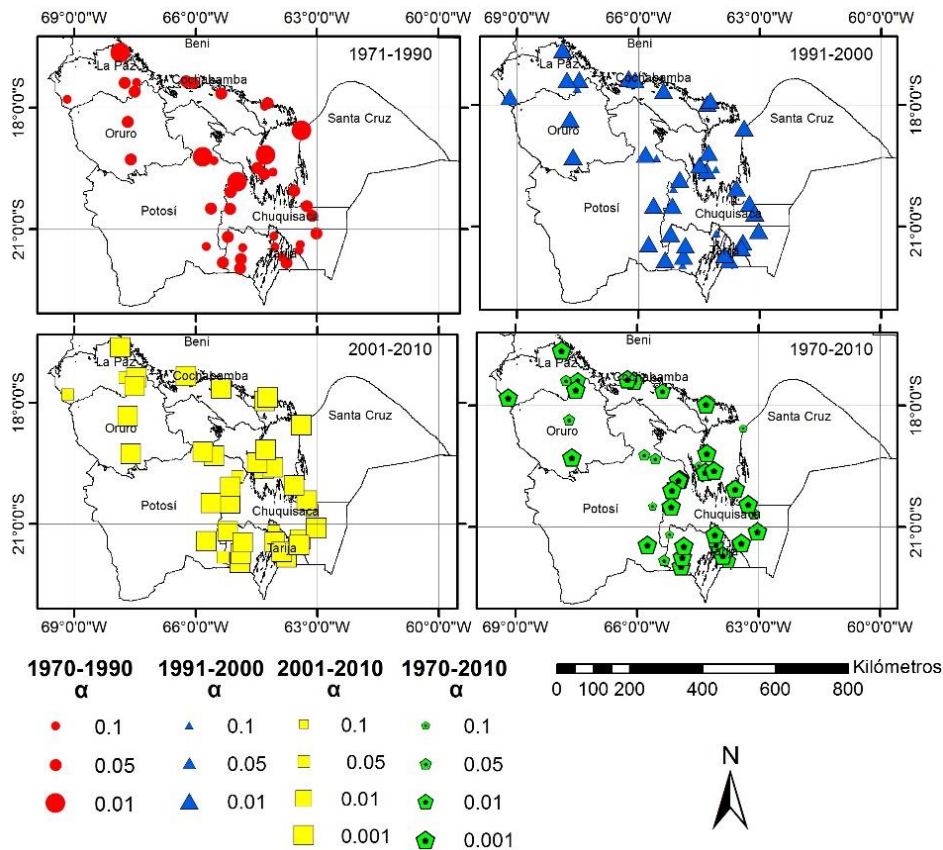
Durante los noventa, en la región sur de Santa Cruz disminuyó la precipitación anual hasta en 80 mm/mes, gran parte de la región de estudio no sufrió cambios significativos, por otro lado, en el altiplano norte se observó un incremento de hasta 116 mm/mes. La década de 2001-2010 estuvo dominada por incrementos en la precipitación en los valles interandinos de Potosí, sur de Chuquisaca y Tarija de hasta 93 mm/mes; gran parte de

la zona de estudio no sufrió cambios significativos y la reducción de la precipitación (de hasta 87 mm/mes) solo sucedió en la parte norte Santa Cruz.

Las tendencias durante las cuatro décadas analizadas (1971-2010) reflejan predominancia de la reducción de la precipitación de hasta 27 mm/mes en la región de Santa Cruz, el altiplano norte y sur, a su vez en gran parte del altiplano central y los valles interandinos se observa un incremento de las precipitaciones de hasta 22 mm/mes.

### Variabilidad puntual por estaciones meteorológicas

En la mayoría de las estaciones estudiadas se presentó una reducción de la precipitación (prueba de Mann Kendall). La figura 5 muestra el nivel de significancia y las estaciones en las que las diferencias de precipitación son estadísticamente significativas en cada periodo analizado y para cada estacionalidad, las estaciones meteorológicas que presentan mayores diferencias significativas se ubican en su mayoría en Chuquisaca, Tarija y Oruro ( $\alpha = 0.01$ , para los periodos 1971-1990, 1991-2000 y  $\alpha = 0.001$  para los periodos 2001-2010 y 1971-2010).



**Figura 5.** Niveles de significancia para las estaciones meteorológicas analizadas en la región andina de Bolivia con diferencia estadísticamente significativa en la precipitación anual

Respecto al análisis por periodos se observa que las máximas diferencias entre los valores de precipitación se dan durante los 40 años analizados, seguido por el periodo



2001-2010 y los años noventa, esto muestra que es más probable que los mayores cambios (positivos o negativos) se hayan producido en los últimos veinte años.

## Conclusiones

Las precipitaciones en las zonas áridas de Bolivia se incrementan en dos direcciones, de sur a norte siguiendo el flanco oriental de la cordillera de los Andes y de este a oeste principalmente en la región altiplánica esta distribución se debe principalmente a las masas de aire húmedo que llegan de la amazonia y las que se generan alrededor del Lago Titicaca.

Las tendencias de precipitación anual durante el periodo (1971-2010) en la región andina de Bolivia fueron mayormente negativas en la región oeste (Santa Cruz) y algunas regiones aisladas del altiplano norte. Por el contrario, gran parte del altiplano presentó un incremento de la precipitación en especial en la década del noventa cuando se presentó mayor tendencia.

Las diferencias encontradas solo son estadísticamente significativas a niveles de significancia más altas ( $\alpha \geq 0.05$ ) si se considera el análisis por décadas, pero alcanzan mayor significancia cuando se considera el periodo de 40 años, estas diferencias se ubican generalmente en los valles interandinos de Potosí, Chuquisaca y Tarija y parte del altiplano central en Oruro.

El análisis histórico de las precipitaciones representa una herramienta útil para la planificación de las actividades agrícolas pues permite identificar que los periodos de mayores cambios se dan en los últimos 20 años y que se presenta principalmente en la zona sur de la región andina que coincide con las zonas más áridas que se harán cada vez más húmedas. Estos hallazgos pueden servir como insumo para definir zonas de vulnerabilidad y riesgo para la agricultura en la región andina de Bolivia y la planificación de calendarios agrícolas y de riego.

## Referencias Bibliográficas

- CISTEL - Centro de Investigación y de Servicios en Teledetección. 2013. Mapa de tierras secas de Bolivia y memoria técnica (Características hídricas y climáticas). Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. 17 p.
- Espinoza Villar, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., Vauchel, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29(11), 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>
- Gálvez, J.M. y Douglas, M.W. 2006. Modulation of rainfall by lake Titicaca using the WRF model. Foz do Iguaçu, Brasil. *Proceedings of 8 ICSHMO*. 745-752.
- Guyot, J. 1993. *Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne*. Editions de l'ORSTOM. Paris. 261 p.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L, Jones, P.G., y Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Reino Unido. International Journal of Climatology*. 25(15):1965-1978





- INE- Instituto Nacional de Estadística. (2015). Censo Nacional de Población y Vivienda 2012. Retrieved from <http://censosbolivia.ine.gob.bo>
- Johnson, A. 1976. The climate of Peru, Bolivia and Ecuador. In: *Climates of Central and South America, World Survey of Climatology*. Landsberg, H.E.(ed.). Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, Holanda. 147-218 pp.
- Mesa, O. J., Poveda, G. y Carvajal, L. 1997. *Introducción al clima de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín, Colombia. 390 p.
- Roche, M., Aliaga, A., Campos, J., Pena, J., Cortes, J. y Rocha, N. 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la cordillère des Andes boliviennes. In: Lang, H. y Musy. A.(eds.). *Hydrology in Mountainous Regions. I - Hydrological Measurements; the Water Cycle*, IAHS Publication 193. IAHS Press. Wallingford, Connecticut, USA. 381-388.
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. Estados Unidos. *Journal of the American Statistical Association*. 63(324):1379-1389
- SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. 2013. Bases de datos de precipitaciones mensuales. La Paz, Bolivia.
- Shahid, S. 2010. Spatio-temporal variation of aridity and dry period in term of irrigation demand in Bangladesh. Emiratos Árabes. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*. 7(4):386-396.
- Viale, M. 2010. Características de las precipitaciones orográficas de invierno sobre los andes subtropicales centrales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 154 p.
- WMO. (2013). *The global climate 2001-2010. A decade of climate extremes*.