

## ANÁLISIS DE TENDENCIAS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN CON RELACIÓN A LA OCURRENCIA DE SEQUÍAS EN COCHABAMBA-BOLIVIA

### ANALYSIS OF TRENDS AND EVALUATION OF PRECIPITATION BEHAVIOR IN RELATION TO THE OCCURRENCE OF DROUGHTS IN COCHABAMBA-BOLIVIA

**Edgar Montenegro, Mauricio Villazón, Daniel Avilés**

*Laboratorio de Hidráulica*

*Universidad Mayor de San Simón*

edgarmontenegro@fcyt.umss.edu.bo

(Recibido el 23 de octubre 2024, aceptado para publicación el 28 de octubre 2024)

#### RESUMEN

Durante el año hidrológico comprendido entre agosto de 2022 y julio de 2023, se evidenció una notable escasez de agua en el departamento de Cochabamba y en varias regiones del país, lo que motivó la necesidad de evaluar el comportamiento de la precipitación y su tendencia. Para este propósito, se utilizaron series anuales de totales de precipitación con la mayor cantidad de datos posibles, provenientes de puntos de medición en el departamento de Cochabamba. El análisis realizado mostró que la precipitación está disminuyendo, principalmente en el sur del departamento, en las provincias de Mizque, Campero y el sur de Carrasco. Este fenómeno no fue detectado en la vertiente norte de la cordillera del Tunari, donde, por el contrario, se presentó un incremento en la cantidad de lluvia precipitada. A su vez, se detectó que la precipitación del año hidrológico 2022-2023 presenta un déficit de entre el 31% y el 56% de la precipitación anual de largo período. Con el propósito de incorporar en el estudio los efectos del El Niño y La Niña, el análisis de la variabilidad, la oscilación y la tendencia en los ciclos de estos fenómenos, y su teleconexión con la precipitación, revela que los eventos de El Niño podrían acentuarse en el futuro, lo cual incide negativamente en la disponibilidad de agua proveniente de la lluvia en nuestra región. Además, nos encontramos en la meseta de un ciclo de sequía que podría durar algunos años más. Por lo tanto, es indispensable continuar con el análisis de los datos meteorológicos para apoyar la toma de decisiones anticipadas, con el fin de reducir los impactos del déficit de precipitación que pueda suscitarse en el futuro.

**Palabras Clave:** Sequías Cochabamba, Variabilidad y Oscilación Climática, Tendencia y Comportamiento de la Precipitación, Déficit Precipitación, Teleconexión Climática.

#### ABSTRACT

During the hydrological year from August 2022 to July 2023, a notable water shortage was observed in the department of Cochabamba and in several regions of the country, which prompted the need to assess the behavior of precipitation and its trend. For this purpose, annual series of total precipitation with the most data possible were used, sourced from measurement points in the department of Cochabamba. The analysis revealed that precipitation is decreasing, primarily in the southern part of the department, in the provinces of Mizque, Campero, and the southern part of Carrasco. This phenomenon was not observed in the northern slope of the Tunari mountain range, where, on the contrary, an increase in the amount of rainfall was recorded. Additionally, it was found that the precipitation for the 2022-2023 hydrological year presents a deficit ranging from 31% to 56% of the long-term annual precipitation. To incorporate the effects of El Niño and La Niña into the study, the analysis of variability, oscillation, and trends in these cycles and their teleconnection with precipitation reveals that El Niño events may become more pronounced in the future, which negatively impacts the availability of rainwater in our region. Furthermore, we are currently in the midst of a drought cycle that could last for several more years. Therefore, it is essential to continue analyzing meteorological data to support decision-making in advance, in order to reduce the impacts of potential precipitation deficits in the future.

**Keywords:** Droughts in Cochabamba, Climate Variability and Oscillation, Precipitation Trend and Behavior, Precipitation Deficit, Climate Teleconnection.

#### 1. INTRODUCCIÓN

En noviembre de 2023, la preocupación y las declaraciones de la población en varias zonas de Bolivia reflejan la vivencia de un período de sequía, con graves consecuencias asociadas a la falta de agua. Esta situación impulsa la necesidad de realizar un análisis de las series de precipitación para prever la disponibilidad futura de agua, con el fin de apoyar la gestión del recurso hídrico en situaciones de escasez.

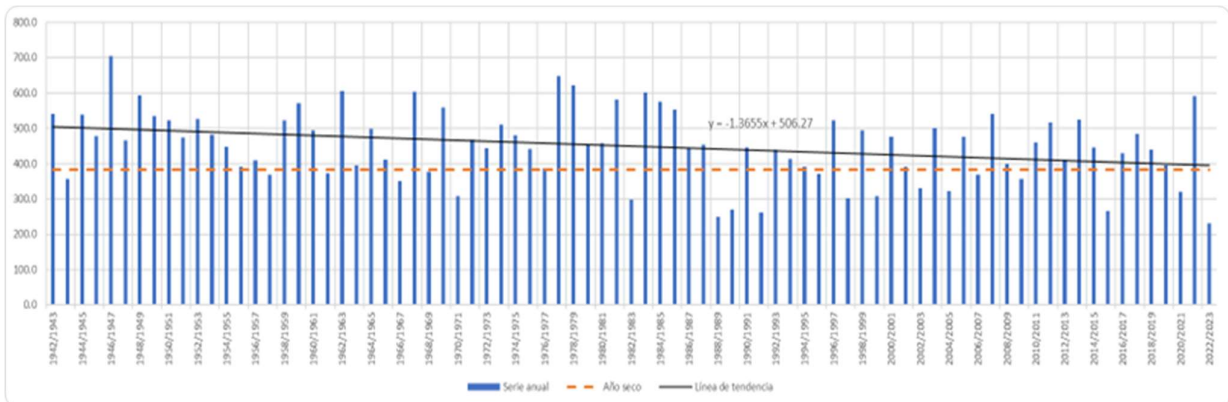
Por este motivo, se llevó a cabo un análisis temporal y espacial de la precipitación a nivel departamental. Se examinaron 40 años de datos de precipitación en grilla (GMET) [6] para calcular las tendencias temporales y espaciales en las zonas más afectadas.

Con las series de mayor duración, se realizó un análisis de la variabilidad, oscilación y tendencia climática para identificar los ciclos de períodos húmedos y secos. Finalmente, se investigaron las teleconexiones con fenómenos planetarios como el Índice de Oscilación del Sur (Fenómenos El Niño y La Niña) ([7]; [8]; [1]; [4]; [2]) para ajustar estos ciclos de variabilidad climática global a las oscilaciones locales.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Análisis de tendencia de la precipitación anual y déficit del año hidrológico 2022 a 2023

Como punto de partida, se utilizaron los datos de precipitación del Aeropuerto de AASANA-Cbb, considerados los más confiables y con una extensión temporal significativa. En la Figura 1 se presentan los registros de precipitación anual de los últimos 81 años, comprendidos entre 1941 y 2023. Se observa una ligera tendencia decreciente, manifestada por la pendiente de la línea de regresión, que indica un descenso global de 13.6 mm por cada 10 años.



**Figura 1:** Totales de precipitación anual medidos en AASANA-Cbba, años 1942 a 2023.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 1 también muestra la línea del valor esperado de precipitación en un año seco, con una probabilidad de excedencia del 75%. Se verifica que los años en que no se alcanza esta magnitud son considerados años secos. Destaca que la precipitación registrada en el último año hidrológico, comprendido entre agosto de 2022 y julio de 2023, fue de tan solo 231.6 mm.

Considerando que el promedio anual a largo plazo en esta estación es de 450.3 mm, se concluye que en el último año hidrológico se registró un déficit del 49% con respecto al promedio anual. La repercusión de este déficit se acentúa debido a que el agua almacenada y disponible para ser usada en los meses de estiaje del presente año fue insuficiente y las lluvias del presente año hidrológico están muy atrasadas.

La metodología empleada para el análisis de los datos de precipitación en AASANA-Cbb se replicó en otras zonas del departamento de Cochabamba. Un resumen de las evidencias se presenta en la sección de resultados.

### 2.2. Análisis especializado de la tendencia de la precipitación anual en el departamento de Cochabamba

Con el propósito de ampliar el análisis de la tendencia de la precipitación en todo el departamento de Cochabamba, se utilizó la grilla GMET de precipitación, elaborada por el SEI (Stockholm Environment Institute) para el estudio denominado "Balance Hídrico de Bolivia 1980-2020", encargado por el Ministerio de Aguas. El GMET es una representación en grilla de la precipitación diaria y mensual para todo el territorio de Bolivia, con una resolución espacial de 10 km, abarcando un período de 40 años comprendido entre 1980 y 2020.

La metodología empleada para detectar un patrón de tendencia consiste en comparar el promedio de precipitación anual en los últimos 20 años del GMET con el promedio de precipitación de los primeros 20 años, es decir, de 1980 a 2000. La comparación se realiza en términos de fracción: si se obtiene un valor inferior a 1, significa que hay una tendencia decreciente; si el valor es mayor que 1, la tendencia es creciente. Los resultados de este análisis se presentan en el subcapítulo 3.2.

### 2.3. Variabilidad y tendencias climáticas

Para el estudio de las tendencias en las precipitaciones, es necesario entender las variaciones históricas de estas series. Sobre la base de estas variaciones (oscilaciones), que reflejan la variabilidad temporal natural, se puede evaluar si las tendencias recientes son estadísticamente significativas. Se utilizaron series en años hidrológicos, tanto de las precipitaciones acumuladas como del promedio del IOS (Índice de Oscilación del Sur) [8].

En este estudio, se emplea el método de perturbación de cuantiles para el análisis. Las perturbaciones se refieren a los cambios relativos entre dos series. La metodología propuesta por Ntegka y Willem [3] para el análisis de tendencias y anomalías en extremos hidroclimáticos está basada en las perturbaciones en los cuantiles. Una de las series se toma como referencia, mientras que la otra serie es la subserie de interés. En este estudio, los cálculos se aplicaron a la serie mensual del IOS desde 1876. La serie de referencia es la serie histórica completa disponible, mientras que la subserie es un bloque de 12 años. Se realizaron pruebas con otras longitudes de bloque, pero la de 12 años es la que muestra mejor identificación de ciclos. El enfoque de la perturbación de cuantiles también se aplica a las series de precipitación acumulada en años hidrológicos.

Los intervalos de confianza se calculan mediante una técnica no paramétrica de “bootstrapping”. Los valores de la serie completa se vuelven a generar aleatoriamente un gran número de veces (1000 ejecuciones); cada ejecución contiene el mismo número de valores que la serie completa sin sustitución. Para cada ejecución, los factores de perturbación se recalculan, y luego se calculan los intervalos de confianza para cada paso de tiempo, basados en los 1000 factores de perturbación ordenados, con niveles de confianza del 95% y 5%.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Análisis de tendencia de la precipitación anual y déficit del año hidrológico 2022 a 2023

En la Tabla 1 se presenta la tasa de decaimiento de la precipitación anual. Se observa que en la mayoría de las estaciones el término de tendencia de la línea de regresión es negativo, con valores que oscilan entre -0.7 para la estación de San Benito y -3.06 para la estación de Anzaldo. Este patrón no se detecta en Colomi y Embalse Corani, estaciones de medición situadas en la vertiente norte de la cordillera del Tunari, donde el comportamiento pluvial parece ser distinto.

En la última columna de la Tabla 1 se presenta también el déficit de precipitación del año hidrológico 2022-2023 con respecto al promedio de la precipitación anual de largo periodo. La única estación que no presenta déficit es Embalse Corani, ubicada en una cota más baja en la vertiente norte de la cordillera del Tunari.

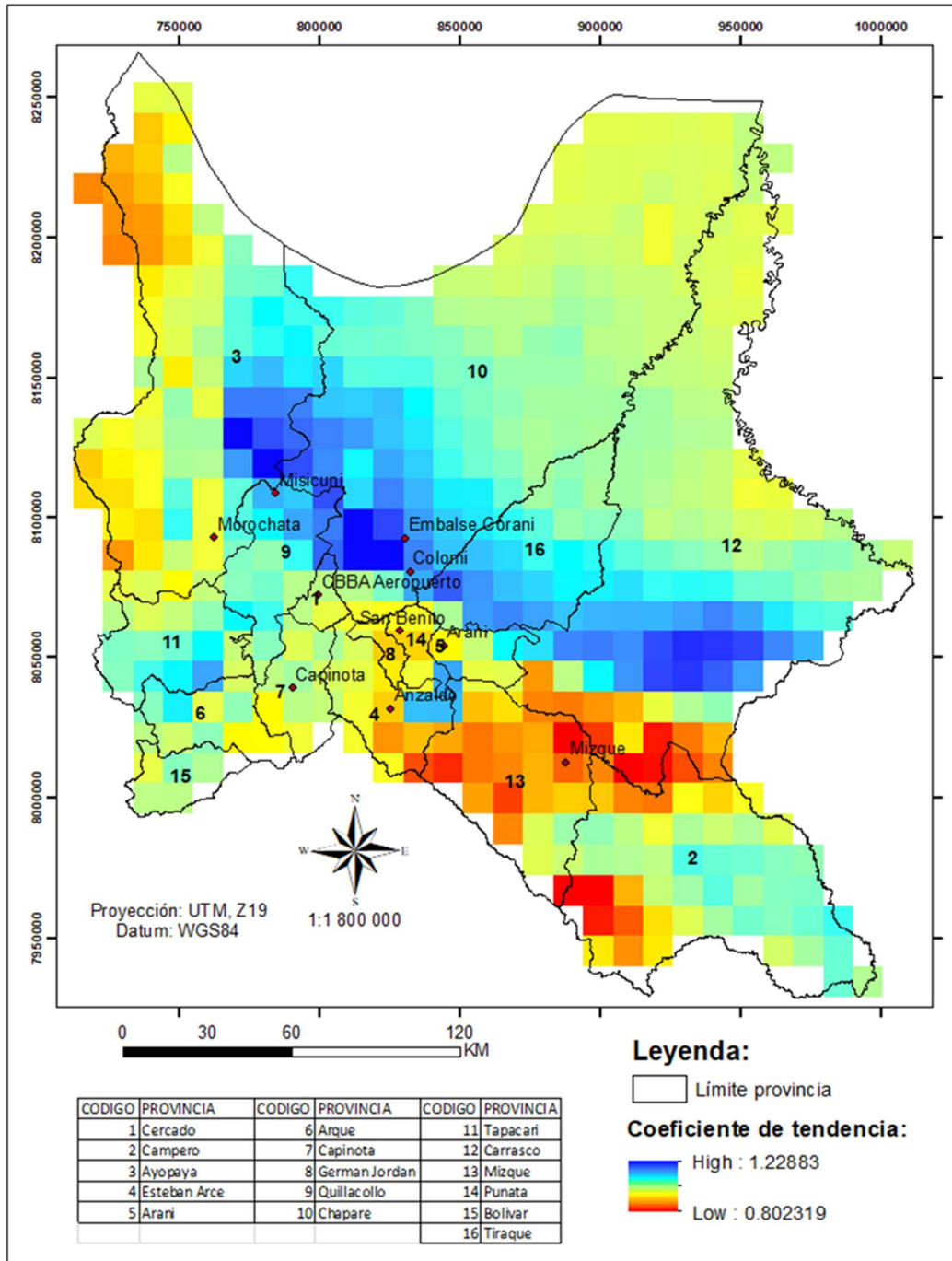
**TABLA 1 – TENDENCIA DE LA PRECIPITACIÓN ANUAL Y DÉFICIT DE PRECIPITACIÓN EN EL AÑO HIDROLÓGICO 2022 A 2023, EN ESTACIONES INDICADAS DEL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA**

Estacion	Periodo de registro		Años hidrológicos	Coefficiente de pendiente línea de tendencia	Tasa decaimiento lluvia en 10 años (mm)	Promedio anual precipitación (mm)	Precipitación acumulada ago2022 a julio 2023 (mm)	Deficit año hidrológico 2022-2023 (%)
AASANA-Cbb	Agosto 1942	Julio 2023	81	-1.36	13.6	450.3	231.6	-49
Mizque	Agosto 1979	Julio 2021	42	-0.99	9.8	427.9	Sin registros	Sin registros
Arani	Agosto 1955	Julio 2023	68	-1.34	13.4	345.2	237.9	-31
Anzaldo	Agosto 1978	Julio 2023	45	-3.06	30.6	492.1	275.1	-44
Colomi	Agosto 1969	Julio 2023	54	1.20		607.8	405.9	-33
Misicuni	Agosto 1969	Julio 2023	54	-2.23	22.3	627.7	317.9	-49
San Benito	Agosto 1965	julio 2023	58	-0.70	7.0	378.6	166.9	-56
Capinota	Agosto 1950	julio 2023	73	1.07		513.3	350.9	-32
Embalse Corani	Agosto 1953	julio 2023	70	0.08		2591.1	2784.7	7

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Análisis especializado de la tendencia de la precipitación anual en el departamento de Cochabamba

Los resultados de la tendencia de la precipitación anual, en términos de la comparación del promedio temporal de la precipitación anual, presentados como la fracción entre el promedio de precipitación en los últimos 20 años con relación a los primeros 20 años, se muestran en la Figura 2. Se reitera que valores menores a uno expresan una disminución del promedio de precipitación en los últimos 20 años en comparación con los primeros 20 años de la serie. Se observa que en la provincia de Mizque se detectan las mayores tendencias decrecientes, las cuales también están presentes al suroeste y norte de la provincia de Campero y al sur de la provincia de Carrasco. Las coloraciones más azuladas indican tendencias positivas de incremento de la precipitación a lo largo del tiempo.



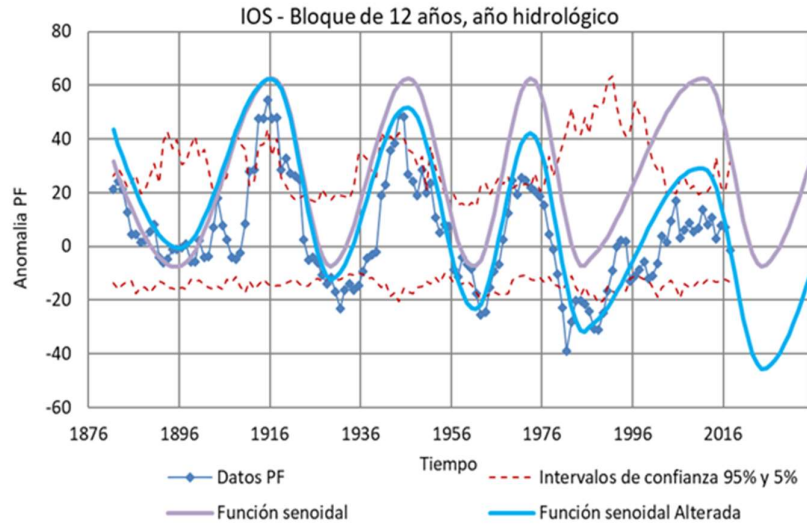
**Figura 2:** Fracción calculada como la relación de la precipitación promedio anual en los últimos 20 años, con relación a la precipitación promedio de los 20 años anteriores.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Análisis de la variabilidad la oscilación y la tendencia del clima

En la búsqueda de los posibles ciclos naturales de la oscilación de los fenómenos El Niño y La Niña, se encontraron los factores de perturbación del IOS para una ventana móvil de 12 años, identificando ocho ciclos marcados de periodos de El Niño y La Niña (Figura 3). Cuando la Anomalia PF tiene valores negativos, hablamos de fenómenos El Niño, y cuando son positivos, de fenómenos La Niña. Estos ciclos pueden ajustarse a una función senoidal dinámica, representada por una línea continua violeta en la Figura 3. De este ajuste se observa que, a partir de los años 50, hay una desviación hacia valores negativos de los factores de perturbación, lo que indica que los fenómenos El Niño serían cada vez más fuertes. La función senoidal dinámica ajustada se alteró por un factor lineal, resultando en la línea continua

celeste de la Figura 3. Esta última tiene un ajuste con un coeficiente de correlación de 0.78 con los factores de perturbación [8].

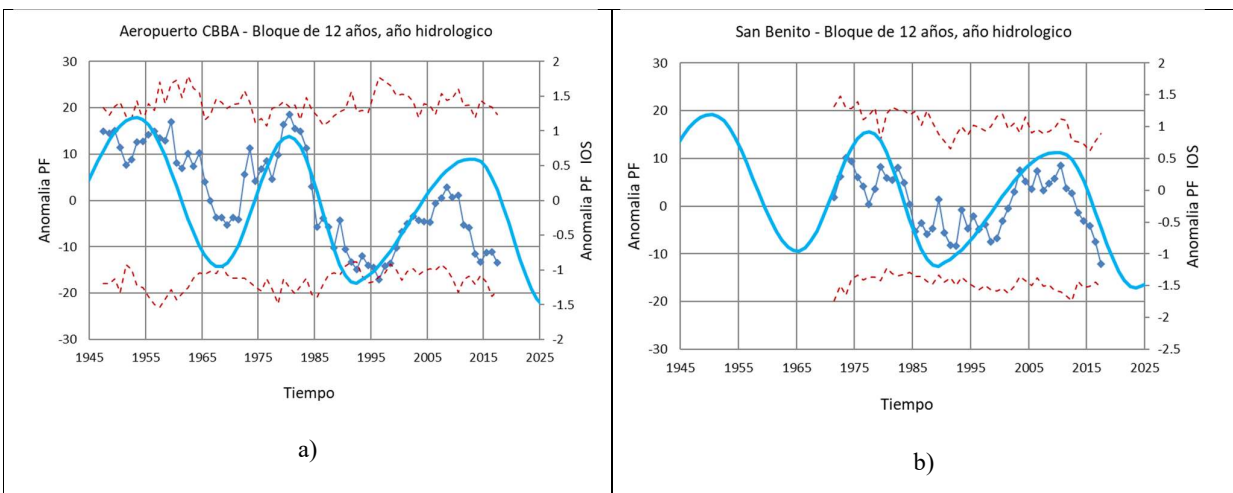


**Figura 3:** Factores de perturbación de la serie histórica del IOS y ajuste de función senoidal y senoidal alterada.  
Fuente: Elaboración propia

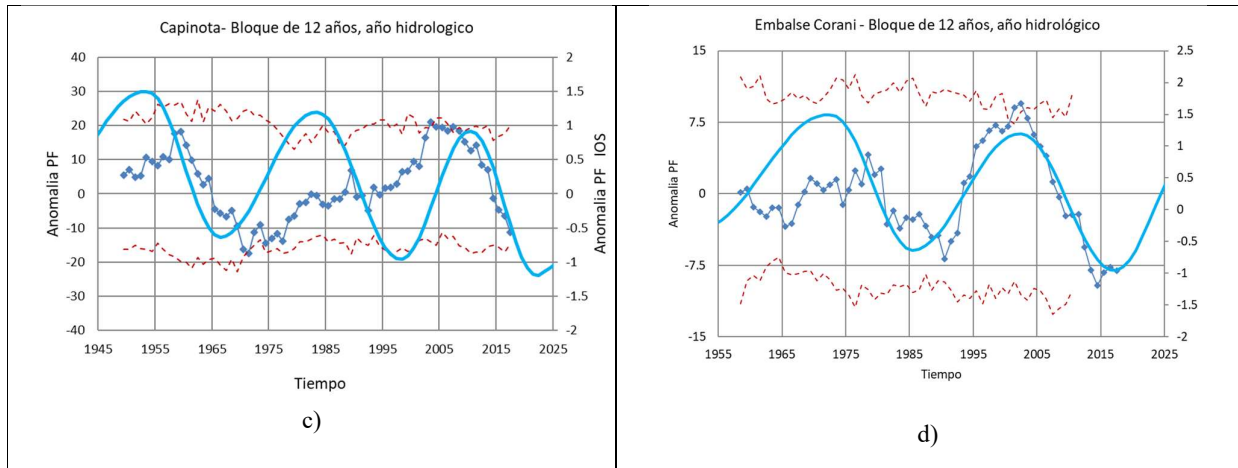
Siguiendo estadísticamente esta tendencia, se observa que estamos entrando en un nuevo ciclo de fenómenos El Niño, similar a los de finales de los 50-principios de los 60 y de los 80-principios de los 90. La diferencia es que, si la tendencia se mantiene, los fenómenos El Niño serían aún más fuertes que los ocurridos en los años 80. Este periodo de fenómenos El Niño se extendería entre finales de esta década y principios de la próxima.

El mismo ejercicio se realizó para las series históricas de precipitación de cada estación a nivel mensual, considerando el año hidrológico en bloques de 12 años (Figura 3). Partimos de la hipótesis de que existe una teleconexión entre los ciclos de los fenómenos El Niño y La Niña y el régimen hidrológico en las estaciones pluviométricas de Cochabamba ([7]; [1]; [5]). Con la función senoidal alterada, se buscan indicios de teleconexión en los ciclos identificados en las estaciones.

Se observan dos ajustes marcados en los valles y el altiplano, donde los ciclos se ajustan a la función senoidal dinámica decreciente, mostrando ciclos similares en duración y frecuencia (Figura 4a y 4b) para las estaciones AASANA y San Benito, respectivamente. En las estaciones de Capinota y el embalse Corani, el ajuste a la función senoidal es evidente en el último ciclo (Figura 4c y 4d), donde aparentemente los ciclos secos tienden a ser más acentuados. Se observa un ciclo lluvioso importante a finales de los años 70, seguido de un ciclo seco a finales de los años 80 y principios de los 90.







**Figura 4:** Factores de perturbación acumulada en año hidrológico.

Fuente: Elaboración propia

#### 4. CONCLUSIONES

En el año hidrológico, entre agosto del año 2022 y julio del 2023, se detecta un déficit de precipitación que se halla entre el 31 % y el 49 % del promedio de largo periodo, que también puede ser interpretado en sentido de que solo llovió entre el 51 % y el 69 % de la lluvia promedio. Por la cantidad de lluvia registrada en el año hidrológico 2022-2023, este periodo se considera como un año seco, ya que no superó el valor esperado de lluvia con 75 % de probabilidad de excedencia.

Respecto al análisis espacializado de la tendencia de la precipitación anual en el departamento de Cochabamba, se detecta que en las provincias del sur en los últimos 20 años llovió en promedio el 80 % de lo que en promedio precipitó los anteriores 20 años considerados.

La hipótesis planteada de la oscilación climática se ve sustentada por el ajuste que presentan las 4 estaciones en estudio. En todas las estaciones se ve que se está en pleno ciclo seco donde se prevé estar en este ciclo por unos años más, esto concuerda con los ciclos del IOS donde se está entrando a un ciclo de Niños y, por las probabilidades de ocurrencia, se sabe que en años Niño en nuestra región se producen eventos de sequía.

El término, cambio climático, no fue utilizado en la presente investigación, pero se observa que tanto en los ciclos de la variabilidad del IOS como en los del régimen hidrológico hay una tendencia marcada desde los años 50s. Se infiere estadísticamente que los eventos Niño serán más fuertes en el futuro.

#### REFERENCIAS

- [1] A. Gonzales, M. F. Villazon, and P. Willems, "Assessment of Rainfall Variability and Its Relationship to ENSO in a Sub-Andean Watershed in Central Bolivia," *Water*, vol. 10, no. 6, p. 701, May 2018, doi: 10.3390/w10060701.
- [2] J. L. Geirinhas, A. C. Russo, R. Libonati, D. G. Miralles, A. M. Ramos, L. Gimeno, and R. M. Trigo, "Combined large-scale tropical and subtropical forcing on the severe 2019–2022 drought in South America," *npj Climate and Atmospheric Science*, vol. 6, no. 1, p. 185, 2023.
- [3] V. Ntegeka and P. Willems, "Trends and multidecadal oscillation in extremes, based on a more than 100-year time series of 10 min rainfall intensities at Uccle, Belgium," *Water Resources Research*, vol. 44, no. 7, pp. 1–15, 2008.
- [4] L. Ren and X. Dong, "Spatio-Temporal Characteristics of Drought and Its Relationship with El Niño-Southern Oscillation in the Songhua River Basin from 1960 to 2019," *Water*, vol. 14, no. 6, p. 866, 2022.
- [5] C. A. G. Santos, D. C. dos Santos, R. M. B. Neto, G. de Oliveira, C. A. C. dos Santos, and R. M. da Silva, "Analyzing the impact of ocean-atmosphere teleconnections on rainfall variability in the Brazilian Legal Amazon via the Rainfall Anomaly Index (RAI)," *Atmospheric Research*, vol. 307, p. 107483, 2024.
- [6] Stockholm Environment Institute (SEI), Balance hídrico de Bolivia 1980-2020, 2023.
- [7] M. F. Villazon, "Oscillations, trends and anomalies in rainfall and air temperature in the principal cities in Bolivia," presented at the AGU Spring Meeting Abstracts, vol. 2013, pp. H52A-07, 2013.
- [8] M. F. Villazón, "Hydrodynamic Simulation Considering an Ongoing Morphological Conceptual Model for Proper Estimate of Water Levels On The River Pirai, Bolivia - Simulación Hidrodinámica Continúa Considerando Un Modelo Morfológico Conceptual Para La Correcta Estimación De Los Niveles De Agua En El Río Pirai -Bolivia," in IAHR AIIH XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú, Sep. 2016.