



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL PRODUCTO  
PERSIANN-CDR PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍA  
METEOROLÓGICA EN LA CUENCA DEL LAGO TITICACA**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. RAUL JULI CANDIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL PRODUCTO PERSIANN-CDR PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍA METEOROLÓGICA EN LA CUENCA DEL LAGO TITICACA**

AUTOR

**Raul Juli Candia**

RECuento DE PALABRAS

**20887 Words**

RECuento DE CARACTERES

**111223 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**118 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**8.6MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jan 9, 2024 3:15 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jan 9, 2024 3:17 PM GMT-5**

● **9% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)

  
WILBER FERMÍN LAQUI VILCA  
INGENIERO AGRICOLA  
REG. S.P. 88683



  
D.Sc. EDILBERTO VELARDE COADUÑA  
Director Unidad de Investigación  
Facultad de Ingeniería Agrícola - UNA - Puno

Resumen



## DEDICATORIA

*A nuestro Dios todo poderoso, porque el me dio sabiduría e inteligencia por cada proceso de mi vida, por estar siempre conmigo, por guiarme por el camino correcto y poder cumplir con mis sueños.*

*A mi querido padre Efraín Juli Candia y a mi adorada madre Juana Mercedes Candia Mayta, quienes me dieron fuerzas para cumplir mis sueños, por sus consejos, enseñanzas y amor, por brindarme todo el apoyo en mi vida, gracias a ellos soy una mejor persona, sé que estas palabras no son suficientes para expresar mi profundo agradecimiento.*

*A mis hermanos Luis Beltran, Lidio y Yuliza por su apoyo incondicional y por sus sabios consejos. Y en especial a MYQM por estar siempre a mi lado en el proceso de mi formación profesional.*

***Raul Juli Candia***



## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Nacional del Altiplano mi alma mater, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por haber contribuido en mi formación profesional durante mis años de estudio.*

*Al excelentísimo M.Sc. Wilber Fermín Laqui Vilca, director/asesor de la presente tesis, por su asesoría, dirección, apoyo constante e incondicional y disposición a escucharme durante el desarrollo de la presente tesis de investigación.*

*A los miembros de jurado: Presidente M.Sc. Hector Alfredo Huaman Gutierrez, primer miembro Dr. Victoriano Rolando Apaza Campos y segundo miembro D.Sc. Efrain Lujano Laura, por su orientación, apoyo y consejos para la culminación de la presente tesis de investigación.*

*Mis cordiales agradecimientos a toda la plana docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por compartir sus conocimientos, orientaciones y consejos en la formación profesional.*

***Raul Juli Candia***



# ÍNDICE GENERAL

|  | Pág.      |
|--|-----------|
| <b>DEDICATORIA</b>                             |           |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b>                         |           |
| <b>ÍNDICE GENERAL</b>                          |           |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>                        |           |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>                       |           |
| <b>ACRÓNIMOS</b>                               |           |
| <b>RESUMEN .....</b>                           | <b>14</b> |
| <b>ABSTRACT.....</b>                           | <b>15</b> |
| <b>CAPÍTULO I</b>                              |           |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                            |           |
| <b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>    | <b>16</b> |
| 1.1.1. Problema general.....                   | 17        |
| 1.1.2. Problemas específicos .....             | 17        |
| <b>1.2. HIPÓTESIS .....</b>                    | <b>18</b> |
| 1.2.1. Hipótesis general .....                 | 18        |
| 1.2.2. Hipótesis específicas .....             | 18        |
| <b>1.3. JUSTIFICACIÓN .....</b>                | <b>19</b> |
| <b>1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b> | <b>20</b> |
| 1.4.1. Objetivo general .....                  | 20        |
| 1.4.2. Objetivos específicos.....              | 20        |
| <b>CAPÍTULO II</b>                             |           |
| <b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>                  |           |
| <b>2.1. ANTECEDENTES .....</b>                 | <b>21</b> |



|                             |   |           |
|-----------------------------|---|-----------|
| 2.1.1.                      | Antecedentes a nivel internacional.....   | 21        |
| 2.1.2.                      | Antecedentes a nivel nacional.....  | 22        |
| 2.1.3.                      | Antecedentes a nivel local.....   | 22        |
| <b>2.2.</b>                 | <b>MARCO TEÓRICO .....</b>  | <b>23</b> |
| 2.2.1.                      | Precipitación.....  | 23        |
| 2.2.2.                      | Sequías .....   | 24        |
| 2.2.3.                      | Tipos de sequías .....  | 26        |
| 2.2.3.1.                    | Sequía meteorológica.....   | 26        |
| 2.2.3.2.                    | Sequía hidrológica.....   | 26        |
| 2.2.3.3.                    | Sequía agrícola.....  | 27        |
| 2.2.3.4.                    | Sequía socioeconómica.....  | 27        |
| 2.2.4.                      | Índices de sequías.....   | 28        |
| 2.2.4.1.                    | Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).....  | 28        |
| 2.2.4.2.                    | Índice Estandarizado de Evapotranspiración y Precipitación<br>(SPEI) Índice de Gravedad de la Sequía de Palmer (PDSI) ..... | 29        |
| 2.2.5.                      | Características de la sequía .....  | 29        |
| 2.2.5.1.                    | Duración (D) .....  | 30        |
| 2.2.5.2.                    | Intensidad (I).....   | 30        |
| 2.2.5.3.                    | Frecuencia (F) .....  | 30        |
| 2.2.6.                      | Cambio climático .....  | 31        |
| 2.2.6.1.                    | Cambio climático y sequías .....  | 31        |
| 2.2.6.2.                    | Fenómeno del cambio climático .....   | 31        |
| <b>CAPÍTULO III</b>         |   |           |
| <b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> |   |           |
| <b>3.1.</b>                 | <b>ZONA DE ESTUDIO.....</b>   | <b>33</b> |



|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| 3.1.1.      | Ubicación geográfica.....   | 33        |
| 3.1.2.      | Ubicación hidrográfica.....                                       | 33        |
| 3.1.3.      | Ubicación política .....  | 33        |
| 3.1.4.      | Características climatológicas .....                              | 34        |
| <b>3.2.</b> | <b>MATERIALES.....</b>  | <b>36</b> |
| 3.2.1.      | Equipos.....  | 36        |
| 3.2.2.      | Programas informáticos.....                                       | 36        |
| <b>3.3.</b> | <b>INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....</b>                             | <b>36</b> |
| 3.3.1.      | Información cartográfica .....                                    | 36        |
| 3.3.2.      | Información pluviométrica.....                                    | 37        |
| 3.3.3.      | Información de datos de precipitación satelital PERSIANN-CDR..... | 38        |
| <b>3.4.</b> | <b>METODOLOGÍA POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>                | <b>38</b> |
| 3.4.1.      | Evaluación del producto de precipitación PERSIANN-CDR.....        | 40        |
| 3.4.1.1.    | Análisis exploratorio de datos (AED).....                         | 40        |
| 3.4.1.2.    | Formación de regiones homogéneas .....                            | 41        |
| 3.4.1.3.    | Pruebas estadísticas en las series históricas anuales .....       | 43        |
| 3.4.1.4.    | Completación de datos faltantes .....                             | 45        |
| 3.4.1.5.    | Métricas estadísticas de desempeño.....                           | 46        |
| 3.4.2.      | Evaluación temporal de sequía basadas en SPI.....                 | 47        |
| 3.4.2.1.    | Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI .....          | 47        |
| 3.4.2.2.    | Caracterización de la sequía meteorológica.....                   | 50        |
| 3.4.3.      | Evaluación espacial y el comportamiento de la sequía.....         | 51        |

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN



|  |            |
|--|------------|
| <b>4.1. EVALUACIÓN DEL PRODUCTO DE PRECIPITACIÓN PERSIANN-<br/>CDR .....</b> | <b>52</b>  |
| 4.1.1. Análisis exploratorio de datos (AED) .....                            | 52         |
| 4.1.2. Formación de regiones homogéneas .....                                | 53         |
| 4.1.3. Pruebas estadísticas en las series históricas anuales .....           | 63         |
| 4.1.4. Métricas estadísticas de desempeño .....                              | 67         |
| <b>4.2. EVALUACIÓN TEMPORAL DE SEQUÍA BASADAS EN SPI.....</b>                | <b>69</b>  |
| 4.2.1. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 1 .....     | 69         |
| 4.2.2. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 2 .....     | 72         |
| 4.2.3. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 3 .....     | 75         |
| 4.2.4. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 4 .....     | 78         |
| 4.2.5. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 5 .....     | 81         |
| 4.2.6. Caracterización de la sequía meteorológica .....                      | 84         |
| <b>4.3. EVALUACIÓN ESPACIAL Y EL COMPORTAMIENTO DE LA SEQUÍA<br/>.....</b>   | <b>92</b>  |
| <b>4.4. DISCUSIÓN .....</b>  | <b>100</b> |
| <b>V. CONCLUSIONES.....</b>  | <b>101</b> |
| <b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>102</b> |
| <b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                  | <b>103</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>   | <b>111</b> |

**Área:** Recursos Hídricos

**Tema:** Aplicabilidad del producto PERSIANN-CDR

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 18 de enero de 2024



## ÍNDICE DE TABLAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1 Características de la ubicación de las estaciones meteorológicas y precipitación media anual (Prc) ..... | 37          |
| Tabla 2 Métricas estadísticas .....  | 47          |
| Tabla 3 Categorías de sequía según valores SPI.....  | 49          |
| Tabla 4 Parámetros de estimación del vector regional – R1.....   | 55          |
| Tabla 5 Parámetros de estimaciones del vector regional - R2 .....  | 57          |
| Tabla 6 Parámetros de estimaciones del vector regional – R3.....   | 58          |
| Tabla 7 Parámetros de estimación del vector regional – R4.....   | 60          |
| Tabla 8 Parámetro de estimación del vector regional – R5 .....   | 62          |
| Tabla 9 Pruebas estadísticas de series anuales – región 1.....   | 64          |
| Tabla 10 Pruebas estadísticas de series anuales - región 2 .....   | 64          |
| Tabla 11 Pruebas estadísticas de series anuales - región 3 .....   | 65          |
| Tabla 12 Pruebas estadísticas de series anuales - región 4 .....   | 66          |
| Tabla 13 Pruebas estadísticas de series anuales - región 5 .....   | 66          |
| Tabla 14 Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 1 .....                            | 85          |
| Tabla 15 Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 2 .....                            | 87          |
| Tabla 16 Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 3 .....                            | 88          |
| Tabla 17 Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 4 .....                            | 90          |
| Tabla 18 Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 5 .....                            | 91          |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1 Características de las sequias .....  | 30          |
| Figura 2 Ubicación del área de estudio con las estaciones meteorológicas .....   | 34          |
| Figura 3 Clasificación climática de la CLT.....  | 35          |
| Figura 4 Diagrama de flujo de la metodología.....  | 39          |
| Figura 5 Diagrama de caja de precipitación mensual (periodo 1983-2018) por cada estación pluviométrica .....   | 52          |
| Figura 6 Dendograma en base al método de Ward en Regiones Preliminar .....   | 53          |
| Figura 7 Delimitación de regiones homogéneas de precipitación.....   | 54          |
| Figura 8 Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret) .....   | 55          |
| Figura 9 Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones.....  | 56          |
| Figura 10 Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret) .....  | 57          |
| Figura 11 Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones.....   | 58          |
| Figura 12 Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret) .....  | 59          |
| Figura 13 Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones.....   | 60          |
| Figura 14 Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret) .....  | 61          |
| Figura 15 Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones.....   | 61          |
| Figura 16 Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret) .....  | 62          |
| Figura 17 Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones.....   | 63          |
| Figura 18 Distribución espacial del CC (a), MAE (b) y RMSE (c) entre PERSIANN-CDR y mediciones de pluviómetros por cada estación meteorológicas a escala mensual ..... | 68          |
| Figura 19 Diagrama de dispersión promedio de datos PERSIANN-CDR frente a mediciones de pluviómetros en la CLT a escala mensual .....                                   | 68          |



|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 20 | Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. .... | 70 |
| Figura 21 | Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediado de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. ....                | 71 |
| Figura 22 | Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. .... | 73 |
| Figura 23 | Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediado de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. ....                | 74 |
| Figura 24 | Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. .... | 76 |
| Figura 25 | Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediados de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. ....               | 77 |
| Figura 26 | Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. .... | 79 |
| Figura 27 | Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediado de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. ....                | 80 |
| Figura 28 | Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. .... | 82 |
| Figura 29 | Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediado de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR. ....                | 83 |



|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 30 | Distribución espacial mensual de los valores SPI-1 .....  | 93 |
| Figura 31 | Distribución espacial mensual de los valores SPI-3 .....  | 95 |
| Figura 32 | Distribución espacial mensual de los valores SPI-6 .....  | 97 |
| Figura 33 | Distribución espacial mensual de los valores SPI-12 ..... | 99 |



## ACRÓNIMOS

|               |   |
|---------------|---|
| SENAMHI:      | Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.  |
| ANA:          | Autoridad Nacional del Agua.  |
| SPI:          | Índice de Precipitación Estandarizado.  |
| MVR:          | Método Vector Regional.   |
| OMM:          | Organización Meteorológica Mundial.   |
| CHRS:         | Centro de Hidrometeorología y Detección Remota.   |
| NDMC:         | Centro Nacional de Mitigación de Sequía.  |
| IDW:          | Distancia Ponderada Inversa.  |
| PERSIANN-CDR: | Estimación de Precipitación a partir de Información de Sensores Remotos Utilizando Redes Neuronales Artificiales: Registro de Datos Climáticos. |



## RESUMEN

La cuenca del lago Titicaca (CLT) experimenta un fenómeno de sequía recurrente. Sin embargo, es necesario evaluar la estimación de la precipitación a partir de información de detección remota utilizando redes neuronales artificiales: registro de datos climáticos (PERSIANN-CDR), debido a la falta de datos de precipitación observada. El objetivo es evaluar la aplicabilidad del producto PERSIANN-CDR para la caracterización de sequía meteorológica en la CLT. Primero, se utilizaron tres métricas de desempeño, a saber, el coeficiente de correlación (CC), error absoluto medio (MAE) y error cuadrático medio (RMSE) para evaluar los datos de PERSIANN-CDR frente a los datos de precipitación observada durante 1983 - 2018. Luego, se utilizó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) en diferentes escalas de tiempo (1 a 12 meses) para identificar eventos de sequía y sus características. Finalmente, se comparó los valores de SPI para la caracterización espacio-temporal de PERSIANN-CDR. Los resultados mostraron lo siguiente: (1) los datos de PERSIANN-CDR muestran un alto grado de confiabilidad comparados con las mediciones pluviométricas a escala mensual. (2) se demostró que el SPI basado en PERSIANN-CDR puede cuantificar la temporalidad de las sequías y sus características de sequía, en las cinco regiones conformadas en la CLT. (3) PERSIANN-CDR representa adecuadamente la variabilidad espacial de la sequía meteorológica, principalmente en el extremo sur, centro y noreste de la CLT. Además, PERSIANN-CDR muestra los años históricos de sequías conocidos 1983, 1990, 1992, 2008 y 2016. El producto satelital PERSIANN-CDR es aplicable para caracterizar las sequias meteorológicas en sitios con poca información en la CLT.

**Palabras clave:** Cuenca del lago Titicaca, PERSIANN-CDR, sequía meteorológica, SPI.



## ABSTRACT

The Lake Titicaca basin (CLT) experiences a recurring drought phenomenon. However, precipitation estimation from remotely sensed information using Artificial Neural Networks – Climate Data Recording (PERSIANN-CDR) needs to be evaluated due to the lack of observed precipitation data. The objective is to evaluate the applicability of the PERSIANN-CDR product for the characterization of meteorological drought in the CLT. First, three performance metrics, namely correlation coefficient (CC), mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE), were used to evaluate the PERSIANN-CDR data against the observed precipitation data during 1983-2018. Then, the Standardized Precipitation Index (SPI) was used at different time scales (1 to 12 months) to identify drought events and their characteristics. Finally, the SPI values were compared for the spatiotemporal characterization of PERSIANN-CDR. The results showed the following: (1) PERSIANN-CDR data show a high degree of reliability compared to monthly-scale rainfall measurements. (2) it was demonstrated that the SPI based on PERSIANN-CDR can quantify the timing of droughts and their drought characteristics, in the five regions formed in the CLT. (3) PERSIANN-CDR adequately represents the spatial variability of meteorological drought, mainly in the extreme south, center and northeast of the CLT. In addition, PERSIANN-CDR displays the known historical drought years 1983, 1990, 1992, 2008 and 2016. The PERSIANN-CDR satellite product is applicable to characterize meteorological droughts at data-poor sites in the CLT.

**Keywords:** Lake Titicaca basin, PERSIANN-CDR, meteorological drought, SPI.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las sequías tienen impactos significativos tanto en los ecosistemas naturales como en la sociedad humana, debido a la mayor cobertura espacial y temporal (Z. Wang et al., 2018). La sequía sigue empeorando a nivel mundial y regional debido al calentamiento global y el cambio climático, causando pérdidas económicas y ecológicas en todo el mundo (Zhong et al., 2019). Las sequías se dividen en cuatro categorías: 1) meteorológica, 2) agrícola, 3) hidrológica y 4) socioeconómica, y son medidas en diferentes maneras (Das et al., 2022). La sequía meteorológica es uno de los principales tipos de sequía provocada por la escasez de precipitaciones a medio y largo plazo (Pathak & Dodamani, 2020; Sahoo et al., 2015).

El Altiplano peruano es la zona más propensa a la sequía, con una fuerte dependencia entre la gravedad y la duración de la sequía en la CLT (Endara et al., 2019). En tal sentido, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomendó el uso del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) como un índice de sequía de referencia (OMM, 2012). El SPI desarrollado por McKee et al. (1993), es el índice de sequía que es utilizado comúnmente para cuantificar la condición de sequía y sus impactos a escala mundial y regional (Guo et al., 2016; Rahman et al., 2021).

Por lo tanto, los registros de datos de precipitación son esenciales para calcular los índices de sequía. Es por ello, que se identifica como problema general la poca cantidad de estaciones y la escasez de datos observados de precipitación a largo plazo basadas en pluviómetros y que no están disponibles en la CLT, lo que limita la aplicación

de índices de sequía en diferentes regiones. Afortunadamente, existen productos de precipitación basados en satélites que son un recurso alternativo muy valioso para la caracterización de sequías debido a sus datos consistentes y homogéneos con cobertura casi global y estimaciones casi en tiempo real (Agutu et al., 2017; Thavorntam et al., 2015).

El conjunto de datos PERSIANN-CDR puede proporcionar entradas de precipitación continua espaciotemporal a largo plazo para el cálculo de índices de sequía, superando la deficiencia de observaciones insuficientes de precipitación en áreas no aforadas o escasamente aforadas (Ashouri et al., 2015; Li et al., 2022). Por lo tanto, esta investigación responde a las siguientes preguntas de investigación.

#### **1.1.1. Problema general**

¿Es posible aplicar el producto satelital PERSIANN-CDR para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del lago Titicaca?

#### **1.1.2. Problemas específicos**

¿Cuál es el grado de confiabilidad de los datos de precipitación satelital de PERSIANN-CDR comparado con datos observados en la caracterización de sequía meteorológica?

¿Cómo es el comportamiento temporal de las sequías meteorológicas en el ámbito de estudio utilizando datos de precipitación satelital PERSIANN-CDR?

¿Cómo es el comportamiento espacial de las sequías meteorológicas en la cuenca del lago Titicaca utilizando datos de precipitación satelital PERSIANN-CDR?



## **1.2. HIPÓTESIS**

### **1.2.1. Hipótesis general**

El producto satelital PERSIANN-CDR si es aplicable para caracterizar adecuadamente las sequias meteorológicas en la cuenca del lago Titicaca.

### **1.2.2. Hipótesis específicas**

Los datos PERSIANN-CDR muestran un alto grado de confiabilidad en la caracterización de sequias meteorológicas comparado con datos observados.

El producto satelital PERSIANN-CDR permite cuantificar la temporalidad de las sequias meteorológicas en el ámbito de estudio.

El producto satelital PERSIANN-CDR permite representar la variabilidad espacial significativa de la sequía meteorológica en el ámbito de estudio.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

La precipitación juega un papel fundamental en la gestión de los recursos hídricos (Lai et al., 2019). Su uso es esencial para diversas aplicaciones hidrometeorológicas, es decir, para el modelado hidrológico Rahman et al. (2020), seguimiento y caracterización de sequías (Bai et al., 2019). Tradicionalmente, los índices de sequía se calculan mediante las observaciones meteorológicas in situ. Sin embargo, las estaciones meteorológicas suelen estar distribuidas de forma escasa y desigual, incluso pueden no estar disponibles en algunas zonas remotas (Wu et al., 2019).

Con la llegada de la tecnología, se han publicado varios conjuntos de datos de precipitación obtenidos por satélite, se han convertido en mejores opciones y una buena alternativa para cerrar la brecha, en áreas donde faltan mediciones pluviométricas (Shalishe et al., 2022). Los productos de precipitación basados en satélite se han vuelto valiosos para una amplia gama para el seguimiento de sequias, caracterización de sequía, evaluación de recursos hídricos y gestión del agua (Dandridge et al., 2019).

En consecuencia, el producto satelital PERSIANN-CDR ha demostrado ser útiles para la caracterización y seguimiento de sequias a escala global y regional (Alijanian et al., 2019; Guo et al., 2016; Nguyen et al., 2019; Sobral et al., 2020; Yang et al., 2022).

En concreto, la disponibilidad del producto PERSIANN-CDR representa una alternativa esencial para obtener índices de sequía de forma rápida y sencilla y posteriormente determinar las características de la sequía.



## **1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar la aplicabilidad del producto PERSIANN-CDR para la caracterización de sequía meteorológica en la cuenca del lago Titicaca.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

Evaluar la confiabilidad de datos de precipitación satelital de PERSIANN-CDR comparado con datos observados en la caracterización de sequía meteorológica.

Evaluar temporalmente el comportamiento de las sequías meteorológicas mediante productos de precipitación del satélite PERSIANN-CDR en la cuenca del lago Titicaca.

Evaluar espacialmente el comportamiento de las sequías meteorológicas utilizando datos de precipitación satelital PERSIANN-CDR en la cuenca del lago Titicaca.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES

##### 2.1.1. Antecedentes a nivel internacional

Varios estudios a nivel mundial, han reportado el desempeño del conjunto de datos de PERSIANN-CDR, por ejemplo, en noreste de China Guo et al. (2022) evaluaron tres estimaciones de precipitación basadas en satélites a largo plazo frente a observaciones terrestres para la caracterización de sequías, entre ellos PERSIANN-CDR, CHIRPS y MSWEP. En China Guo et al. (2016) evaluaron el producto PERSIANN-CDR para el monitoreo meteorológico de sequías. Mientras en Etiopia Bayissa et al. (2017) evaluaron estimaciones de lluvia basadas en satélites y aplicación para monitorear la sequía meteorológica para la cuenca superior del Nilo Azul, entre ellos CHIRPS, TARGAT, ARC, PERSIANN y TRMM.

En China Yang et al. (2022) evaluaron la confiabilidad del producto PERSIANN-CDR en el monitoreo de sequías, en la cuenca del río Huaihe. Mientras en África Oriental Das et al. (2022) evaluaron la precisión de dos productos de estimación cuantitativa de precipitaciones basados en satélites y su aplicación para el seguimiento de sequías meteorológicas, entre ellos CHIRPS y PERSIANN-CDR. En Irán Alijanian et al. (2019) evaluaron las estimaciones de precipitación por detección remota utilizando PERSIANN-CDR y MSWEP para la evaluación espacio-temporal de la sequía. En el noreste de Brasil (Brito et al., 2021; Sobral et al., 2020) monitorearon la sequía meteorológica en una región



semiárida utilizando dos conjuntos de datos de precipitaciones estimados por satélite a largo plazo, entre ellos PERSIANN-CDR y CHIRPS en la cuenca del río Piranhas.

### **2.1.2. Antecedentes a nivel nacional**

En Perú, también se han informado estudios sobre la caracterización de sequías meteorológicas, por ejemplo, Endara et al. (2019) evaluaron la caracterización espacio-temporal de la sequía en los departamentos altoandinos del Perú, mediante el método de SPI entre los resultados, identificaron 10 episodios de sequías moderadas a extremas, siendo el año más crítico 1990 y 1992. De igual manera, (Vargas-Montes, 2019) evaluó la estimación del índice de sequía en la cuenca del río Ichu utilizando datos generados por teledetección, entre ellos el CMIP5 y datos PISCO.

En Huánuco, Jácome-Mariano (2022) evaluó el análisis de las precipitaciones para caracterizar sequías meteorológicas en la subcuenca del río Higueras, detectando valores extremos con mayor intensidad de 11 meses y 10 meses en las diferentes escalas. Mientras en la cuenca del río Mantaro Gálvez-Ayala (2017) evaluó la caracterización de las sequías; cuyo objetivo es conocer las características espacio-temporales de las sequías históricas y de las sequías proyectadas bajo los escenarios del cambio climático, utilizando (3 GCM y 2 RCP).

### **2.1.3. Antecedentes a nivel local**

En el Altiplano peruano, informaron estudios sobre el análisis comparativo de los impactos del cambio climático en las sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas en la cuenca del Lago Titicaca, aplicando el método del índice SPI y



utilizando proyecciones climáticas mensuales corregidas entre ellos, CMIPR y RCP8.5 los resultados indicaron que las sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas en los próximos años proyectadas 2034-2064 volverán ser más intensas, frecuentes y prolongadas en la cuenca (Zubieta et al., 2021). En la región de Puno Cruz-Chagua (2021) analizó la sequía meteorológica, utilizando el índice de precipitación estandarizado (SPI), en el periodo (1964 - 2018).

Correa et al. (2021) evaluó la caracterización de sequías meteorológicas en el departamento de Puno, empleando conjuntos de reanálisis; ERA20C, CERA20C, ERA20CM y el 2CRv3. Condori-Apaza et al. (2021) analizaron el impacto de las sequías meteorológicas en la agricultura de la región Puno, empleando el índice de sequía SPI-12, determinando eventos de sequías severas a extremas ocurridos en los años 1982/83, 1989/90 y 1991/92.

Lujano et al. (2023) evaluaron el desempeño de los productos de precipitación satelital GSMaP-G-NRT, PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR y PERSIANN sobre la cuenca del lago Titicaca; donde los resultados indicaron que PERSIANN-CDR y PERSIANN-CCS son los productos que muestran buen desempeño. Sin embargo, en la CLT no reportaron estudios sobre el uso del producto satelital PERSIANN-CDR para la caracterización de sequías, por lo que estos estudios son limitadas en el área de estudio.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Precipitación**

La precipitación es la cantidad de agua que cae procedente de la humedad atmosférica sobre la superficie terrestre ya sea en forma líquida (escorrentía y lluvia) o en forma sólida (escarcha, nieve, granizo), es decir, la precipitación es



uno de los procesos meteorológicos más importantes en hidrología y junto con la evaporación, forma en que la atmósfera y el agua superficial interactúan en el ciclo hidrológico (Aparicio-Mijares, 1989).

La precipitación se puede clasificar como nube fría y cálida interviniendo directamente la temperatura, es decir, las nubes cálidas la precipitación es siempre líquida, mientras que en las nubes frías las nubes pueden contener cristales de hielo más o menos hexagonales formados por la sublimación del vapor de agua, estos cristales de hielo forman núcleos de sublimación, y dependiendo de la temperatura la precipitación será siempre líquido o sólido (Chow et al., 1994).

La precipitación es cualquier tipo de humedad que llega al suelo procedente de las nubes; según esta definición, puede presentarse en forma de lluvia, granizo, aguanieve y nevadas desde una perspectiva de ingeniería hidrológica, las precipitaciones son una fuente importante de agua en la superficie de la Tierra, y su enfoque de medición y análisis es diferente de los estudios de uso y control del agua (Villón-Bejar, 2002).

### **2.2.2. Sequías**

La sequía es un fenómeno complejo que puede afectar significativamente a los sistemas agrícolas, sociales y ecológicos (Aziz et al., 2018). Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la sequía es la desviación acumulativa de las condiciones de precipitación normales o esperadas, el déficit de precipitaciones puede ocurrir durante un corto período de tiempo o puede tardar varios meses en manifestarse debido a una disminución en el caudal de los ríos, los niveles de los embalses o los niveles de las aguas subterráneas (OMM, 2012).



Correa et al. (2021) menciona que la sequía es un fenómeno lento y dañino causado por precipitaciones inferiores a lo normal y, si persiste durante una temporada o más, puede tener un impacto significativo en las necesidades sociales y ambientales. El Centro Nacional de Mitigación de Sequías (NDMC) de EE. UU. generalmente coincide en que las sequías son causadas por precipitaciones insuficientes durante un largo período de tiempo (generalmente una temporada o más), lo que resulta en escasez de agua para ciertas actividades, grupos o sectores del medio ambiente.

Fernández-Larrañaga (1997) menciona que la sequía es un fenómeno natural que se extiende de forma irregular en el tiempo y el espacio, las características de un desarrollo lento en el tiempo y una amplia cobertura espacial, su ocurrencia no causará el colapso de la infraestructura ni fallas catastróficas, pero puede regular el funcionamiento de los sistemas de recursos hídricos, a menudo se imponen condiciones más estrictas de lo calculado, con graves consecuencias económicas y sociales.

Dai (2011) menciona que las sequías son fenómenos meteorológicos extremos repetidos en países caracterizados por meses o años de precipitaciones inferiores a lo normal, es decir, una sequía es un período temporal de sequedad en contraposición a la sequedad permanente en las regiones áridas y ocurren en gran parte del mundo, incluso en regiones húmedas y muy húmedas, esto se debe a que una sequía se define como un período de sequía en comparación con las condiciones locales normales.

### **2.2.3. Tipos de sequías**

Wilhite et al. (1985) agruparon diversas definiciones de este tipo y las dividieron en cuatro grupos según la disciplina científica que analiza el fenómeno: sequía meteorológica, sequía hidrológica, sequía agrícola y sequía socioeconómica. Las sequías surgen del ciclo hidrológico y la precipitación insuficiente conduce directamente al agotamiento del agua en todos los estados del ciclo hidrológico (Bras, 1990).

#### **2.2.3.1. Sequía meteorológica**

La sequía meteorológica está asociada a una disminución de la precipitación y se evalúa comparando la precipitación durante el período de análisis con indicadores estadísticos de series temporales, que suelen ser valores promedio; en diferentes regiones tienen diferentes definiciones de sequía meteorológica (Curi-Tapahuasco, 2017). Por ejemplo, Palmer (1965) define la sequía meteorológica como un intervalo, que generalmente dura meses o años, durante el cual el suministro de humedad en un lugar determinado está persistentemente por debajo de la cantidad de humedad climáticamente esperada o climáticamente apropiada.

#### **2.2.3.2. Sequía hidrológica**

Valiente (2001) indica que la sequía hidrológica está asociada a un caudal o volumen insuficiente de agua superficial o subterránea (ríos, embalses, lagos, etc.), es decir, un desfase entre la falta de precipitaciones o nieve y una disminución del caudal de los ríos o del nivel del agua, en el caso de lagos y embalses, las mediciones hidrográficas no pueden utilizarse como indicador del inicio de una sequía, pero sí como indicador



de su intensidad. Por otra parte, también se puede definir que la sequía hidrológica es un período en el que los caudales son insuficientes para sustentar los usos definidos en un determinado sistema de gestión del agua.

#### **2.2.3.3. Sequía agrícola**

Se manifiesta como una falta de agua en el suelo disponible para las plantas y a menudo se evalúa en relación con los daños a la producción agrícola; este tipo de sequía depende no sólo de las condiciones meteorológicas, sino también de las características biológicas del cultivo y de las características del suelo entonces, no significa que haya una sequía meteorológica por ende, la sequía en la agricultura no ocurre cuando la humedad del suelo durante una sequía meteorológica es suficiente para sustentar el crecimiento de un cultivo en particular (Gálvez-Ayala, 2017).

#### **2.2.3.4. Sequía socioeconómica**

La sequía socioeconómica ocurre cuando la escasez de agua comienza a afectar a las personas individual y colectivamente; o, en términos más abstractos, lo relacionan con la oferta y demanda de bienes económicos, es decir. cuando se produce escasez de agua debido a déficits climáticos se producen cuando la demanda de bienes económicos supera la oferta (Valiente, 2001).

Vargas-Montes (2019) argumenta que la agricultura se ve especialmente afectada por la sequía, ya que es el primer sector económico afectado por la insuficiencia de precipitaciones por lo tanto, una sequía agrícola ocurre cuando no hay suficiente humedad en el suelo para sustentar el crecimiento de un cultivo en particular en cualquier etapa de

su crecimiento, debido a que el uso del agua varía según el cultivo e incluso dentro del proceso de crecimiento de la misma planta, no es posible establecer umbrales de sequía agrícola válidos ni siquiera para una sola área geográfica.

#### **2.2.4. Índices de sequías**

Los índices de sequía se utilizan frecuentemente para cuantificar la condición de sequía y sus impactos a nivel global y regional (Montaseri & Amirataee, 2017). En los últimos años se han desarrollado diversos índices de sequía para caracterizar las situaciones de sequía (Liu et al., 2016). Entre ellos, el SPI, el índice estandarizado de evapotranspiración y precipitación (SPEI) y el índice de gravedad de la sequía de Palmer (PDSI) son los tres índices de sequía más utilizados para la evaluación de la sequía meteorológica (Guo et al., 2022).

##### **2.2.4.1. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)**

El SPI es un índice de sequía estandarizado calculado a partir de los registros de precipitación a largo plazo y el cálculo del índice de sequía suele requerir al menos 30 años de registros de datos (McKee et al., 1993). Debido a su cálculo simple, que describen las anomalías de la sequía a corto, mediano y largo plazo en diferentes escalas de tiempo (es decir, 1, 3, 6 y 12 meses), es ampliamente utilizado y recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Svoboda et al., 2012).

El SPI como punto de referencia para la sequía y es el índice de sequía más utilizado en el mundo (Shalishe et al., 2022; Zeng et al., 2022). El SPI es capaz de caracterizar y comparar sequías meteorológicas en áreas con diferentes climas se calcula sobre la base de datos de precipitación a



largo plazo (no menor de 30 años) acumulados durante una escala de tiempo seleccionada (Guo et al., 2016; Wu et al., 2019).

#### **2.2.4.2. Índice Estandarizado de Evapotranspiración y Precipitación (SPEI) Índice de Gravedad de la Sequía de Palmer (PDSI)**

Si bien el SPEI y el Índice de Gravedad de la Sequía de Palmer toman en cuenta los efectos de la temperatura; sin embargo, variables como la radiación, la humedad relativa y la temperatura necesarias para calcular la evapotranspiración potencial basándose en los algoritmos de Penman-Monteith a menudo no están disponibles en estas regiones (Guo et al., 2022). Aunque se ha demostrado que las estimaciones de la evapotranspiración potencial dependientes de la temperatura (por ejemplo, el algoritmo de Thornthwaite) sobreestiman las condiciones de sequía en regiones áridas y semiáridas (Shi et al., 2020).

#### **2.2.5. Características de la sequía**

Se admite que un episodio de sequía comienza cuando el índice considerado cae por debajo de un determinado umbral y finaliza cuando vuelve a superar el valor umbral (Li et al., 2022). Por ejemplo, utilizaron SPI para detectar el inicio de una sequía. Se consideró que había ocurrido una sequía moderada si el SPI era  $<-1$ , mientras que el umbral correspondiente a la sequía extrema era  $-2$  (Guo et al., 2022).

### 2.2.5.1. Duración (D)

La duración depende en gran medida de los umbrales elegidos para señalar el comienzo y el final de un evento de sequía, es decir, se refiere al número de meses (o semanas) consecutivos en los que la precipitación está por debajo de un umbral seleccionado (Zubieta et al., 2021). Tal como se muestra en la Figura 1.

### 2.2.5.2. Intensidad (I)

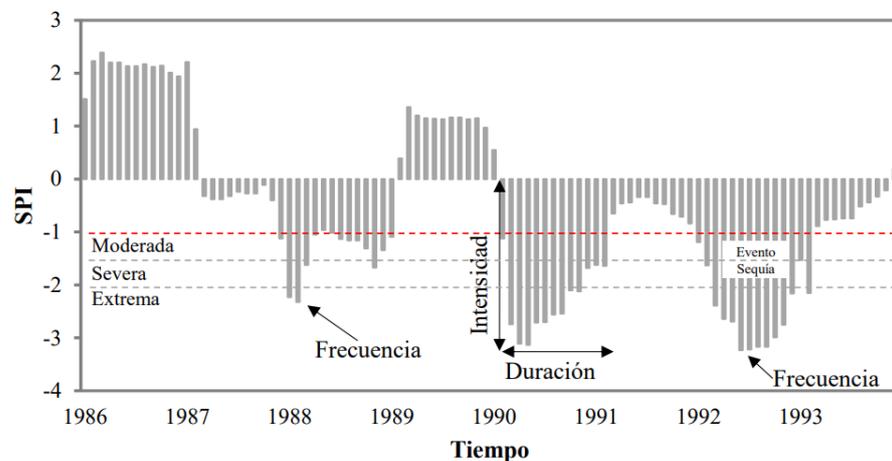
La intensidad de la sequía es la gravedad dividida por la duración, además, las sequías más cortas y severas serán de mayor intensidad (Gebrechorkos et al., 2019). Tal como se muestra en la Figura 1.

### 2.2.5.3. Frecuencia (F)

La probabilidad de que ocurra una sequía durante un período de tiempo determinado o con una intensidad determinada (moderada, severa o extrema). Tal como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1**

*Características de las sequías*





## **2.2.6. Cambio climático**

Desde la posición de Stocker (2013), el cambio climático es cualquier cambio significativo en los parámetros climáticos (como la temperatura, las precipitaciones o el viento) que dura treinta años o más. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el cambio climático se define como cambios en el valor medio de los estados climáticos y/o la variabilidad en sus características que persisten durante largos períodos de tiempo, típicamente décadas o más. El cambio climático puede ser causado por procesos internos naturales o influencias externas como la regulación del ciclo solar, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos en curso en la composición atmosférica o el uso de la tierra (IPCC, 2013).

### **2.2.6.1. Cambio climático y sequías**

Stocker (2013) indica que en los últimos 500 a 1000 años, América del Norte, África occidental y Asia oriental han experimentado sequías que han durado años o décadas, a nivel mundial, las áreas extremadamente secas disminuyeron un 7% entre 1950 y 1972, pero desde la década de 1970, especialmente a principios de la década de 1980, debido a una disminución de las precipitaciones causada por El Niño Oscilación del Sur (ENOS), estas áreas han aumentado alrededor de un 12% al 30% y el calentamiento global (Dai, 2011).

### **2.2.6.2. Fenómeno del cambio climático**

Muchos consideran que la sequía es el desastre natural más complejo, pero menos comprendido de todos y uno de los desastres naturales más costosos cada año, con consecuencias importantes y



generalizadas para las personas y diversos sectores de la economía (Endara et al., 2019). El impacto de la sequía varía según la intensidad, la duración, la extensión y las condiciones preexistentes percibidas, como el contexto socioeconómico en el que se produce la sequía y las vulnerabilidades específicas de las unidades afectadas (Correa et al., 2021).

#### **a) Fenómeno del niño y de la niña**

El Niño, la Oscilación del Sur (ENSO), corresponde a un evento climático natural que se desarrolla en el Pacífico ecuatorial central, la fase cálida de El Niño ENOS se caracteriza por un aumento de la temperatura de la superficie del mar y una reducción de los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico oriental. Como resultado de estas anomalías, los países a lo largo de la costa del Pacífico sudeste y otras partes del mundo experimentan fuertes lluvias y cambios significativos en el clima y la pesca. La fase inversa o fría de ENOS, conocida como La Niña, se caracteriza por temperaturas oceánicas más frías de lo normal, vientos alisios más fuertes del Pacífico oriental y períodos de sequía (Maturana et al., 2018).



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. ZONA DE ESTUDIO

##### 3.1.1. Ubicación geográfica

La cuenca del lago Titicaca (CLT), se encuentra en la parte sureste del Altiplano peruano, entre los 14°00' y 17°12' latitud sur y en los 71°12' y 68°48' longitud oeste del meridiano de Greenwich, ver Figura 2.

##### 3.1.2. Ubicación hidrográfica

La región hidrográfica del Titicaca, forma parte del sistema TDPS (Titicaca, Desaguadero, Poopo, Salar de Coipasa), se caracteriza como un sistema de cuenca endorreica, de forma algo elipsoidal y está constituida por principales ríos de la cuenca: Ilave, Huancané, Ramis, Coata, Suches y Desaguadero. La CLT limita por el norte con la cuenca Madre de Dios; por el sur, con la cuenca Caplina Ocoña; por el oeste, con la cuenca Pampa Apurímac y Urubamba Vilcanota; por el sureste, con la república de Bolivia. La CLT cubre un área 41434.52 km<sup>2</sup> y la elevación más alta según el modelo digital de elevación (DEM) es 5900 m.s.n.m., la elevación más baja es 3800 m.s.n.m. (promedio: 4850 m.s.n.m.) (Figura 2).

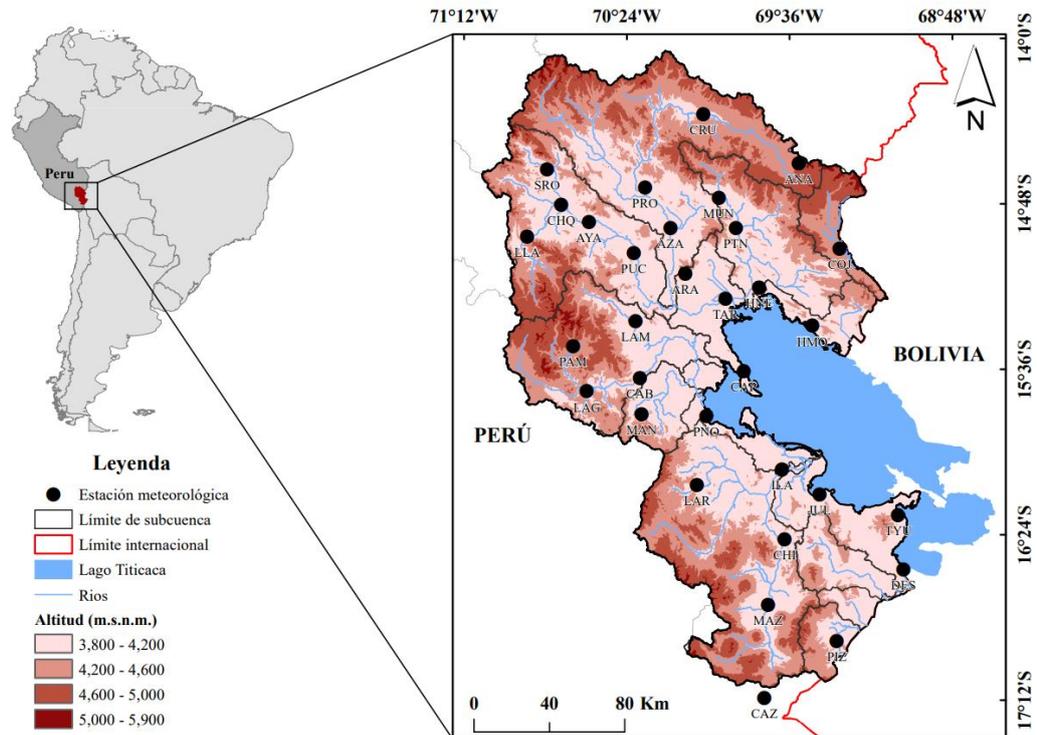
##### 3.1.3. Ubicación política

Políticamente, la CLT se encuentra en el departamento de Puno, está dividido en 13 provincias y 109 distritos. Las provincias de Puno y Azángaro, cuentan con mayor número de distritos (quince distritos c/u), y las provincias de

San Román y Moho con menor cantidad de distritos (cuatro distritos c/u) (Cruz-Chagua, 2021).

## Figura 2

*Ubicación del área de estudio con las estaciones meteorológicas*



### 3.1.4. Características climatológicas

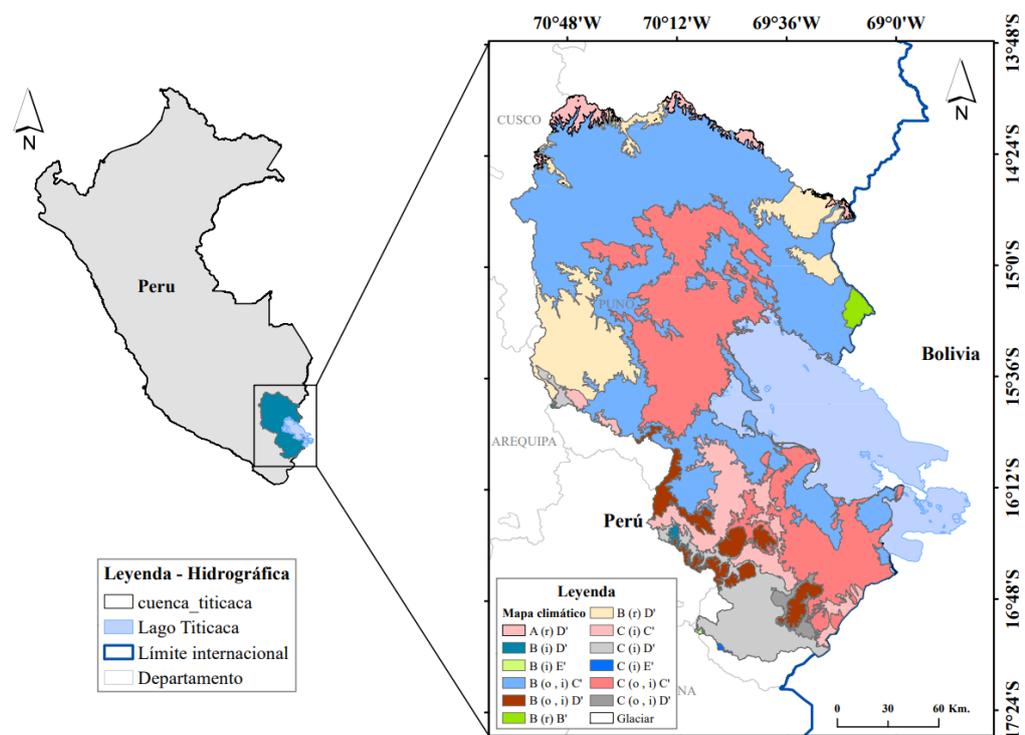
La precipitación media anual oscila entre los 500 mm/año a 1000 mm/año aproximadamente, por otro lado, el área de estudio presenta un clima frío y semiárido con una estación seca de abril a octubre y una estación lluviosa de noviembre a marzo (Roche et al., 1991). En la región andina, Puno tiene un clima frío y seco con una temperatura promedio de 10°C, máxima de 18°C y mínima de -2°C; en Mazo Cruz, Macusani y otros lugares, la temperatura puede bajar hasta -15°C (INEI, 2012).

En la Figura 3 se muestra las clasificación climáticas de la CLT: A (r) D': Muy lluvioso con humedad abundante todas las estaciones del año (Semifrígido),

B (i) D': Lluvioso con invierno seco (Semifrígido), B (i) E': Lluvioso con invierno seco (Frígido), B (o , i) C': Lluvioso con otoño e invierno secos (Frío), B (o , i) D': Lluvioso con otoño e invierno secos (Semifrígido), B (r) B': Lluvioso con humedad abundante todas las estaciones del año (Templado), B (r) D': Lluvioso con humedad abundante todas las estaciones del año (Semifrígido), C (i) C': Semiseco con invierno seco (Frío), C (i) D': Semiseco con invierno seco (Semifrígido), C (i) E': Semiseco con invierno seco (Frígido), C (o , i) C': Semiseco con otoño e invierno secos (Frío), C (o , i) D': Semiseco con otoño e invierno secos (Semifrígido) y Glaciar: Hielo perenne; esta clasificación está respaldada por aproximadamente treinta años de registro entre 1981 a 2010 (Castro et al., 2021).

### Figura 3

#### Clasificación climática de la CLT





## **3.2. MATERIALES**

### **3.2.1. Equipos**

- Laptop ASUS 15.6 pulgadas Core i5
- Monitor Teros de 24 pulgadas
- Impresora EPSON L3210
- Disco duro de 500 GB
- Materiales de escritorio

### **3.2.2. Programas informáticos**

- ArcGIS 10.4
- Hydraccess
- R y RStudio
- TREND
- Microsoft Office 2019
- Nitro
- SPI generador
- HEC4

## **3.3. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA**

### **3.3.1. Información cartográfica**

Se utilizó el Modelo de Elevación Digital Global ASTER (ASTER GDEM), generado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI), con una resolución espacial de 30 metros, obtenido de la plataforma ([https://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download\\_raster.aspx](https://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download_raster.aspx)).

### 3.3.2. Información pluviométrica

Los datos de precipitación mensual se recopilaron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), incorporado en la plataforma de la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA), disponible en (<https://snirh.ana.gob.pe/ANDREA/Login.aspx>); para 32 estaciones meteorológicas (Figura 2 y Tabla 1). El período de registro fue de enero de 1983 a diciembre de 2018 (36 años).

**Tabla 1**

*Características de la ubicación de las estaciones meteorológicas y precipitación media anual (Prc)*

| Nº | Estación              | Latitud (°) | Longitud (°) | Altitud (m.s.n.m.) | Prc (mm/año) |
|----|-----------------------|-------------|--------------|--------------------|--------------|
| 1  | Pizacoma (PIZ)        | -16.92      | -69.37       | 3930               | 575.0        |
| 2  | Mazo Cruz (MAZ)       | -16.74      | -69.72       | 3975               | 516.1        |
| 3  | Capazo (CAZ)          | -17.19      | -69.74       | 4530               | 574.9        |
| 4  | Desaguadero (DES)     | -16.57      | -69.04       | 3824               | 705.5        |
| 5  | Chilligua (CHI)       | -16.42      | -69.63       | 4164               | 679.5        |
| 6  | Ilave (ILA)           | -16.08      | -69.64       | 3861               | 716.4        |
| 7  | Laraqueri (LAR)       | -16.15      | -70.07       | 3900               | 760.2        |
| 8  | Puno (PNO)            | -15.82      | -70.02       | 3812               | 733.5        |
| 9  | Capachica (CAP)       | -15.61      | -69.83       | 3822               | 774.0        |
| 10 | Juli (JUL)            | -16.20      | -69.46       | 3830               | 952.8        |
| 11 | Tahuaco Yunguyo (TYU) | -16.31      | -69.07       | 3882               | 812.3        |
| 12 | Huaraya Moho (HMO)    | -15.39      | -69.49       | 3890               | 858.0        |
| 13 | Mañazo (MAN)          | -15.81      | -70.34       | 3924               | 669.2        |
| 14 | Cabanillas (CAB)      | -15.64      | -70.35       | 3885               | 699.4        |
| 15 | Lagunillas (LAG)      | -15.70      | -70.61       | 4177               | 685.6        |
| 16 | Lampa (LAM)           | -15.36      | -70.36       | 3892               | 736.7        |
| 17 | Pampahuta (PAM)       | -15.48      | -70.68       | 4400               | 811.3        |
| 18 | Ayaviri (AYA)         | -14.88      | -70.59       | 3928               | 699.5        |
| 19 | Chuquibambilla (CHQ)  | -14.80      | -70.73       | 3971               | 770.6        |
| 20 | Llally (LLA)          | -14.95      | -70.90       | 3980               | 840.9        |
| 21 | Pucara (PUC)          | -15.03      | -70.37       | 3900               | 733.9        |
| 22 | Santa Rosa (SRO)      | -14.63      | -70.80       | 3986               | 843.2        |
| 23 | Cojata (COJ)          | -15.02      | -69.36       | 4344               | 732.8        |



|    |                |        |        |      |       |
|----|----------------|--------|--------|------|-------|
| 24 | Ananea (ANA)   | -14.60 | -69.56 | 4660 | 645.6 |
| 25 | Crucero (CRU)  | -14.36 | -70.03 | 4183 | 569.9 |
| 26 | Arapa (ARA)    | -15.14 | -70.12 | 3830 | 683.1 |
| 27 | Taraco (TAR)   | -15.26 | -69.92 | 3849 | 565.1 |
| 28 | Huancané (HNE) | -15.20 | -69.75 | 3829 | 674.7 |
| 29 | Muñani (MUN)   | -14.77 | -69.95 | 3948 | 640.5 |
| 30 | Putina (PTN)   | -14.91 | -69.87 | 3878 | 674.6 |
| 31 | Azángaro (AZA) | -14.91 | -70.19 | 3863 | 633.4 |
| 32 | Progreso (PRO) | -14.72 | -70.31 | 3980 | 633.7 |

Nota: Prc: Precipitación.

### 3.3.3. Información de datos de precipitación satelital PERSIANN-CDR

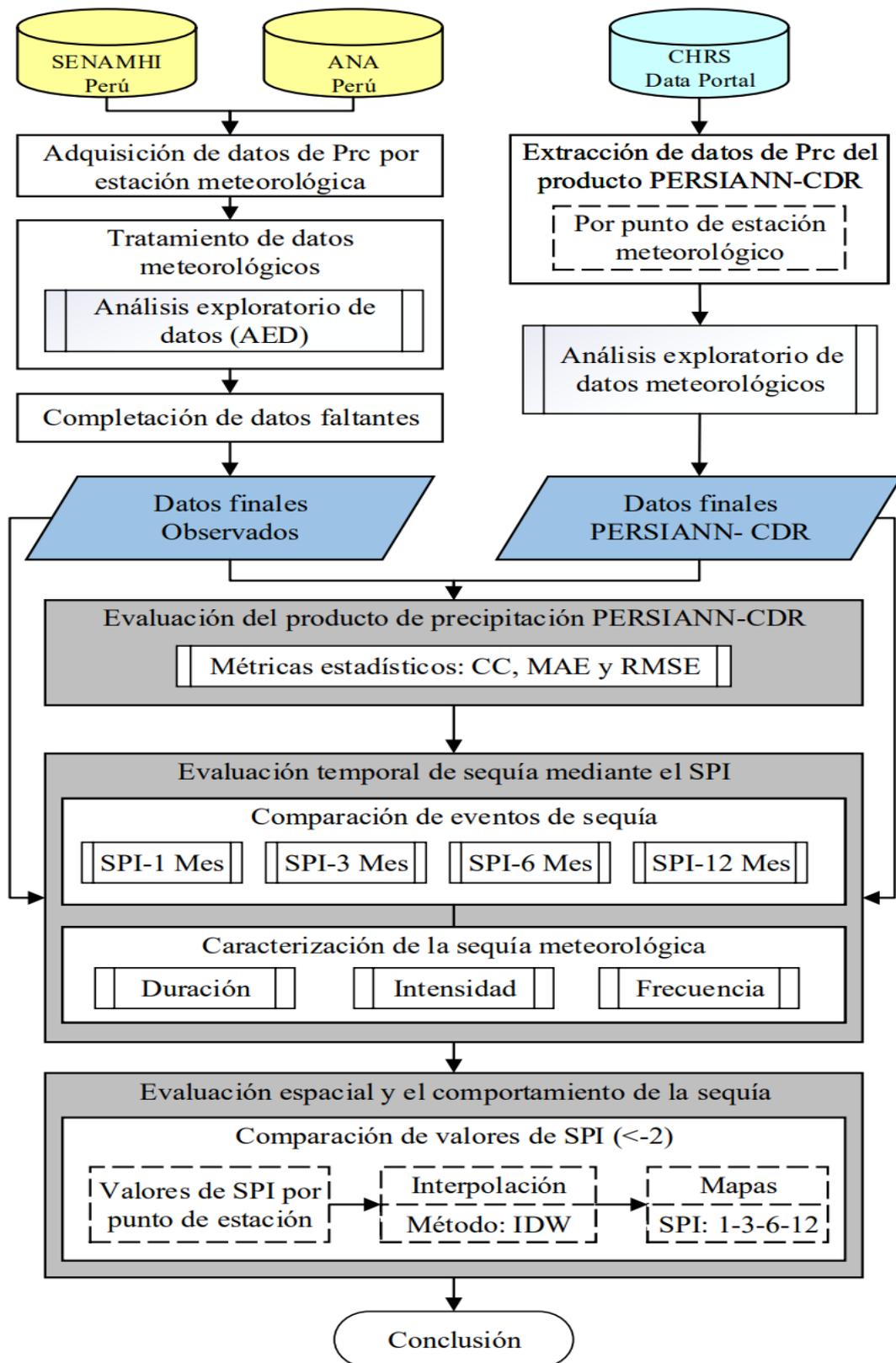
La estimación de precipitación a partir de información de detección remota utilizando redes neuronales artificiales: registro de datos climáticos (PERSIANN-CDR) proporciona productos de lluvia diaria con una resolución espacial de  $0.25^\circ$  y una cobertura global de  $60^\circ$  N a  $60^\circ$  S desde 1983 hasta el presente (Ashouri et al., 2015). En este estudio, los datos PERSIANN-CDR a escala mensual de enero de 1983 a diciembre de 2018 se descargaron del sitio web del Centro de Hidrometeorología y Detección Remota (CHRS) (<https://chrsdata.eng.uci.edu/>) (Brito et al., 2021).

## 3.4. METODOLOGÍA POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La Figura 4 ilustra el diagrama de flujo con los pasos seguidos para lograr los objetivos de la investigación de tesis.

**Figura 4**

*Diagrama de flujo de la metodología*



### 3.4.1. Evaluación del producto de precipitación PERSIANN-CDR

#### 3.4.1.1. Análisis exploratorio de datos (AED)

La información pluviométrica fue sometida a un análisis de datos exploratorio que consiste en la detección de posibles datos atípicos (outliers), mediante el diagrama de cajas (Boxplot); por ende, estos datos atípicos son identificados y analizados con el diagrama de cajas; por lo tanto, se puede evaluar si los datos atípicos detectados deben eliminarse o incluirse en la siguiente fase del análisis.

#### Diagrama de caja (Boxplot)

La regla del diagrama de caja es una prueba visual para identificar valores atípicos; los rangos intercuartílicos están rodeados por cuadros y los intervalos de confianza del 5% y 95% donde se indican mediante barras de error fuera de la caja si los valores que están fuera de rango de confianza son valores atípicos (Sim et al., 2005).

Límite para el intervalo de confianza al 95%:

$$\frac{x - Q_3}{Q_3 - Q_1} > L_S$$

Límite para el intervalo de confianza al 5%:

$$\frac{Q_1 - x}{Q_3 - Q_1} > L_I$$

$$L_I = Q_1 - (Q_3 - Q_1) * 1.5$$

$$L_S = Q_3 + (Q_3 - Q_1) * 1.5$$

Donde  $L_I, L_S$  es el valor crítico en la regla de diagrama de caja,  $x$  es el punto fuera del límite más alto o más bajo en la regla de diagrama de caja y  $Q_i$ = cuartil  $i$ -ésimo.

#### **3.4.1.2. Formación de regiones homogéneas**

La formación de regiones homogéneas se dividió en dos etapas: en la primera fase se realizó una agrupación preliminar de estaciones con el mismo comportamiento de precipitación media mensual empleado el método de Ward, utilizando las siguientes variables descriptivas tales como, la precipitación promedio mensual, altitud, longitud y latitud (Gálvez-Ayala, 2017). Por lo tanto, en este estudio, se utilizó una agrupación preliminar de 32 estaciones pluviométricos durante el período de 1983-2018 (Vargas-Montes, 2019).

En la segunda fase, se definió con una mejor representación mediante el Método del Vector Regional (MVR) utilizando el programa Hydraccess, que permitió formar regiones homogéneas con comportamientos similares en cuanto a variación anual de precipitaciones; el MVR ha sido ampliamente utilizado en Perú (Curi-Tapahuasco, 2017; Gálvez-Ayala, 2017; Rau et al., 2017).

##### **a) Método de Ward**

El método de Ward es un diagrama de árbol aglomerativo, que consiste en generar una serie de particiones de datos: la primera partición consta de  $n$  grupos (clusters), cada grupo contiene una estación y la última partición consta de un grupo que contiene todas las  $n$  estaciones (Lujano-Laura, 2013). Se utiliza una medida de proximidad para la agrupación de

grupos, y para el caso específico del método de Ward, la combinación de los dos grupos se basa en la medida del criterio de suma de cuadrados (Gálvez-Ayala, 2017).

$$E = \sum_{m=1}^g E_m$$

Donde:

$$E_m = \sum_{l=1}^{n_m} \sum_{k=1}^{P_k} (x_{ml,k} - \overline{x_{m,k}})^2$$

En la que  $\overline{x_{m,k}} = \left(\frac{1}{n_m}\right) \sum_{l=1}^{n_m} x_{ml,k}$  (la media del m-ésimo cluster para la k-ésima variable),  $x_{ml,k}$  siendo la puntuación de la k-ésima variable ( $k = 1, \dots, p$ ) para el l-ésimo objeto ( $l = 1, \dots, n_m$ ) en el m-ésimo cluster ( $m = 1, \dots, g$ ). Este aumento es proporcional a la distancia euclidiana cuadrada entre los centroides de los clústers unidos, pero el método difiere de otros métodos aglomerativos en que los centroides son ponderados por  $\frac{n_m n_q}{(n_m + n_q)}$  al calcular distancias entre centroides, donde  $n_m$  y  $n_q$  son los números de los objetos en los dos grupos  $m$  y  $q$ .

### **b) Método del Vector Regional (MVR)**

Un vector regional (VR) es una ubicación ficticia que se “promedia” sobre todas las estaciones de una región predefinida, con la cual se comparan cada una de las estaciones, descartando aquellas que no son consistentes con el VR (Cruz-Chagua, 2021). El VR se calcula utilizando el concepto de precipitación media extendida, evitando así el

problema de ponderar zonas con valores de precipitación muy bajos y muy altos (Gálvez-Ayala, 2017). Luego, utilizando el método de mínimos cuadrados, el índice de precipitación regional anual  $Z_i$  y la precipitación media extendida  $P_j$  se obtienen minimizando las siguientes ecuaciones:

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left( \frac{P_{ij}}{P_j} - Z_i \right)$$

Donde:  $i$ : índice del año;  $j$ : índice de la estación;  $N$ : Número de años;  $M$ : Número de estaciones;  $P_{ij}$ : Precipitación anual de la estación  $j$  para el año  $i$ ;  $P_j$ : Promedio de precipitaciones de  $N$  años y finalmente  $Z_i$ : Índice pluviométrico regional para el año  $i$ .

Una región homogénea se considera si la desviación estándar de la diferencia entre el índice de precipitación anual de las estaciones y el índice VR es inferior a 0.4 además, el coeficiente de correlación entre el VR y el valor de precipitación anual de las estaciones debe ser superior a 0.7 (Rau et al., 2017). Como resultado se obtuvieron regiones homogéneas con propiedades similares en relación a la variación de precipitación entre años, lo cual es importante en este estudio porque cada región homogénea permitirá conocer todas las estaciones que la componen (Cruz-Chagua, 2021).

#### **3.4.1.3. Pruebas estadísticas en las series históricas anuales**

Los datos meteorológicos, fueron sometidos a un análisis de homogeneidad y estacionariedad mediante el uso del programa TREND (<https://toolkit.ewater.org.au/Tools/TREND>), para ello, se utilizó la

prueba no paramétrica Mann-Kendall (MK) y Free CUSUM. Este análisis aumentará la confiabilidad de los datos y detectan anomalías resultantes de la actividad antrópica.

Se realizó una descripción detallada de las pruebas estadísticas de tendencia y cambio. El análisis se registró de manera anual, donde se comparó en diferentes niveles de significancia de (10%, 5% y 1%) y a un nivel de confianza de (90%, 95% y 99%) respectivamente; indicando No Significativo (NS) cuando no presentan tendencias ni cambios en la media, por otro lado, Significativo (S) indicando que existe tendencia y cambios en la media (Chiew & Siriwardena, 2005).

La prueba MK se utiliza ampliamente para determinar tendencias en variables meteorológicas e hidrológicas (Gocic & Trajkovic, 2013). Hay dos ventajas principales al utilizar la prueba MK, una es que, es una prueba no paramétrica, sólo requiere datos independientes que no necesitan estar distribuidos normalmente, y la otra es que es menos sensible a las rupturas repentinas debido a la falta de homogeneidad de las series de tiempo (Tabari et al., 2011). La prueba de tendencia se realiza a un nivel de significancia en 5% (ANA, 2015).

Obtención del estadístico (S) de MK, mediante la ecuación:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signo}(R_i - R_{i+1})$$

Si S es positivo, la conclusión subjetiva tiene una tendencia creciente; si S es negativo, la inferencia subjetiva tiene una tendencia decreciente.



Donde:

$S$  : índice del estadístico.

$R_i - R_{i+1}$ : Variables aleatorios.

$n$ : Numero de sujetos (años).

La prueba de CUSUM, es una prueba no paramétrica (sin distribución) que permite la detección de cambio en la media en las series de datos utilizados (mediante el promedio de dos partes de una serie de tiempo son diferentes) (ANA, 2015).

$$V_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(X_i - X_{\text{mediana}})$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n$$

Donde:

$$\text{sgn}(X) = 1 \text{ for } X > 0$$

$$\text{sgn}(X) = 0 \text{ for } X = 0$$

$$\text{sgn}(X) = -1 \text{ for } X < 0$$

$X_{\text{mediana}}$  es el valor de la mediana de  $X_i$  del conjunto de datos.

#### 3.4.1.4. Completación de datos faltantes

Los datos faltantes en las series de tiempo de precipitación mensual se han completado mediante el uso del programa HEC4, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (CEIWR-HEC, 1971). El programa en su aplicación se encuentra en una versión de



D.O.S. y aun no se tiene en una versión más amigable, el programa realiza una correlación cruzada entre todas las estaciones para cada mes, común en un grupo o área homogénea y utiliza la estación con la mejor correlación para completar los datos faltantes (Lujano-Laura, 2013). Una limitación del programa es que sólo puede analizar grupos de 10 sitios, por esta razón la imputación de datos se realizó por regiones homogéneas conformadas.

#### **3.4.1.5. Métricas estadísticas de desempeño**

Para evaluar la confiabilidad del producto de precipitación PERSIANN-CDR, se utilizaron tres de las métricas estadísticas (Tabla 2). Primero, el coeficiente de correlación (CC) cuantifica la correlación entre las observaciones satelitales y las observaciones in situ (Das et al., 2022). En segundo lugar, el error absoluto medio (MAE) para presentar la magnitud del error de los índices de sequía (Guo et al., 2022). Finalmente, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) mide el grado de dispersión entre las observaciones satelitales y las observaciones in situ (Moriasi et al., 2015). Este proceso se realizó utilizando el paquete HydroGOF disponible para el entorno de programación R (Lujano et al., 2023).

**Tabla 2**

*Métricas estadísticas*

| Métrica                                | Ecuación  | Unidad | Valor óptimo |
|--|---|--------|--------------|
| Coeficiente de Correlación (CC)        | $r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$ | -      | ±1           |
| Error Absoluto Medio (MAE)             | $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  O_i - S_i $  | mm     | 0            |
| Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) | $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}$  | mm     | 0            |

Nota:  $S$  son los valores simulados;  $O$  los valores observados;  $\bar{S}$  y  $\bar{O}$  denotan los valores medios de  $S$  y  $O$  respectivamente;  $n$  indica el número de pares de datos.

### 3.4.2. Evaluación temporal de sequía basadas en SPI

#### 3.4.2.1. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomendó utilizar el SPI como un índice de sequía de referencia, es decir, para cuantificar el déficit de precipitación en múltiples escalas de tiempo (para 1, 3, 6 y 12 meses).

El SPI se estimó en base a 32 estaciones conformadas en regiones dentro de la CLT para el periodo (1983–2018), utilizando el paquete SPI en el software libre, disponible en el sitio web del Centro Nacional de Mitigación de Sequía (CNMS) (<https://drought.unl.edu/monitoring/SPI/SPIProgram.aspx>). Los índices

de sequía se cuantificaron en base a la precipitación observada y PERSIANN-CDR.

Posterior a ello se promediaron los índices de sequía de cada región conformada realizando una comparación visual y gráfica de las diferentes escalas de tiempo (para 1, 3, 6 y 12 meses). Dentro de ello se verificó el comportamiento de los índices de sequía tanto para condiciones de humedad y condiciones secas.

Para la presente investigación se ha descifrado que la precipitación no tiene una distribución normal, por lo que estos datos de precipitación a largo plazo se ajustan primero a una distribución gamma y luego se transforman en una distribución gaussiana a través de una transformación de igual probabilidad (Guenang & Mkankam Kamga, 2014).

Matemáticamente, el SPI se calcula según la siguiente fórmula de distribución gamma (Shiau, 2020).

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad \text{para } x > 0$$

Donde:  $\alpha$  es un parámetro de forma ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  es un parámetro de escala ( $\beta > 0$ ),  $x$  es la cantidad de precipitación ( $x > 0$ ) y  $\Gamma(\alpha)$  es la función gamma (Guenang & Mkankam Kamga, 2014). Las estimaciones de máxima verosimilitud de  $\alpha$  y  $\beta$  son.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right); \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}, \text{ cuando } A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

La función gamma no está definida para  $x = 0$  y puede ser cero en la distribución de lluvia; la probabilidad acumulada estará determinada por:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Donde:  $q$  es la probabilidad de precipitación cero y  $G(x)$  es la probabilidad acumulada de una función gamma incompleta (Shalishe et al., 2022). Si  $m$  es el número de puntos cero en la serie temporal de precipitación, entonces  $q$  se estima en  $m/n$ , posteriormente luego convierte la probabilidad acumulada  $H(x)$  en la variable aleatoria normal estándar  $z$  con promedio 0 y varianza de 1, que es el valor del SPI (Tapoglou et al., 2019). Según Guenang & Mkankam Kamga (2014), los valores de SPI se reclasificaron en función de las clases de gravedad de la sequía en la Tabla 3. Los valores positivos del SPI indica humedad y los valores negativos indica seco (Shalishe et al., 2022).

**Tabla 3**

*Categorías de sequía según valores SPI*

| Valor SPI      | Categoría             |
|----------------|-----------------------|
| 2.0 y superior | Extremadamente húmedo |
| 1.5 a 1.99     | Severamente húmedo    |
| 1.0 a 1.49     | Moderadamente húmedo  |
| -0.99 a 0.99   | Casi normal           |
| -1.0 a 1.49    | Moderadamente seco    |
| -1.5 a -1.99   | Severamente seco      |
| -2.0 y menos   | Extremadamente seco   |

Nota: SPI: Índice de Precipitación Estandarizada



### 3.4.2.2. Caracterización de la sequía meteorológica

#### a) Observada

La caracterización de las sequías observadas se realizó en cada región homogénea conformada dentro de la CLT. Posteriormente se efectuó el promedio de precipitación mensual y se estimó la serie del SPI en escalas de tiempo (SPI-1, SPI-3, SPI-6 y SPI-12).

Los eventos de sequía se identificaron como períodos consecutivos con valores del SPI por debajo de un valor umbral ( $-1$ ), posteriormente se determinaron las características de la sequía (duración, intensidad y frecuencia) promediado de cada región homogénea.

#### b) PERSIANN-CDR

La caracterización de la sequía del producto satelital PERSIANN-CDR se realizó similar a la caracterización de la sequía observada en términos de estimaciones de la duración, intensidad y frecuencia, a partir del producto satelital. Cabe recalcar que la caracterización de las sequías del producto satelital se estimó para cada región conformada de 32 estaciones dentro de la CLT, en el periodo de (1983 - 2018). De manera que se estimó la serie del SPI promediado en diferentes escalas de tiempo (SPI-1, SPI-3, SPI-6 y SPI-12).



### 3.4.3. Evaluación espacial y el comportamiento de la sequía

Los eventos de sequía se relacionan por su duración, intensidad y su frecuencia, y nos ayuda a entender el inicio, desarrollo y el fin de los eventos de sequía. En base, a la escala temporal del SPI se comparó los valores de SPI por debajo de (-2) considerándose eventos extremadamente secos tanto para valores de SPI observada y PERSIANN-CDR, posterior a ello, se representa la distribución espacial mensual de eventos de sequía a corto, mediano y largo plazo (SPI-1, SPI-3, SPI-6 y SPI-12) durante 1983-2018. Para ello, se utilizó un enfoque de interpolación como la distancia ponderada inversa (IDW) mediante la comparación de punto por estación en las diferentes regiones conformadas en la CLT. La caracterización espacial nos permitirá conocer el comportamiento de la sequía.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

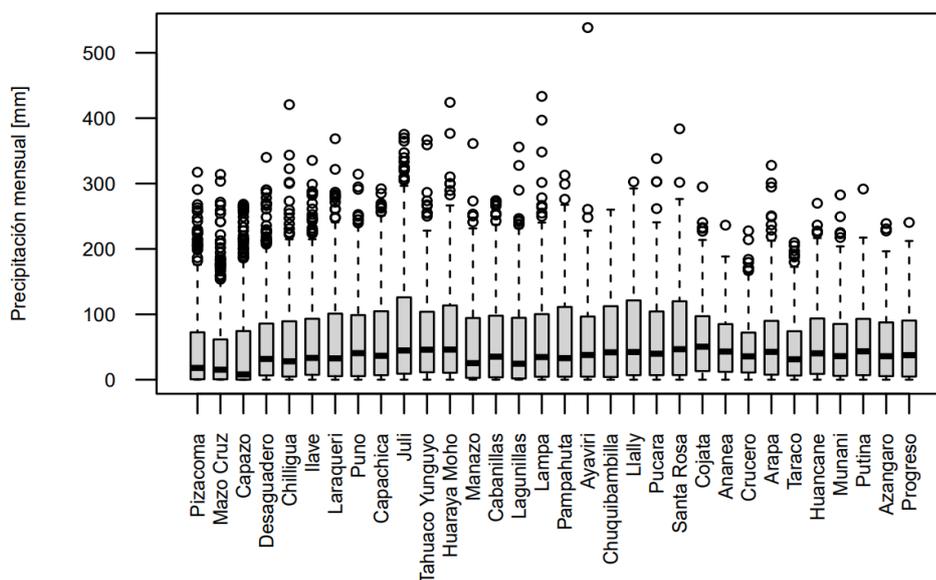
#### 4.1. EVALUACIÓN DEL PRODUCTO DE PRECIPITACIÓN PERSIANN- CDR

##### 4.1.1. Análisis exploratorio de datos (AED)

La Figura 5 muestra el diagrama de caja de datos de precipitación mensual del periodo enero de 1983 – diciembre de 2018, donde se observó de una forma clara la presencia de valores atípicos leves y extremos, representados por un círculo que están fuera del intervalo límite superior, los cuales fueron comparados con estaciones vecinas para su validez. Por ejemplo, la estación pluviométrica CRU, CHQ, PIZ, CAZ, DES, PNO, CAP, JUL y TAR presentaron datos dudosos e inconsistentes que fueron corregido.

**Figura 5**

*Diagrama de caja de precipitación mensual (periodo 1983-2018) por cada estación pluviométrica*

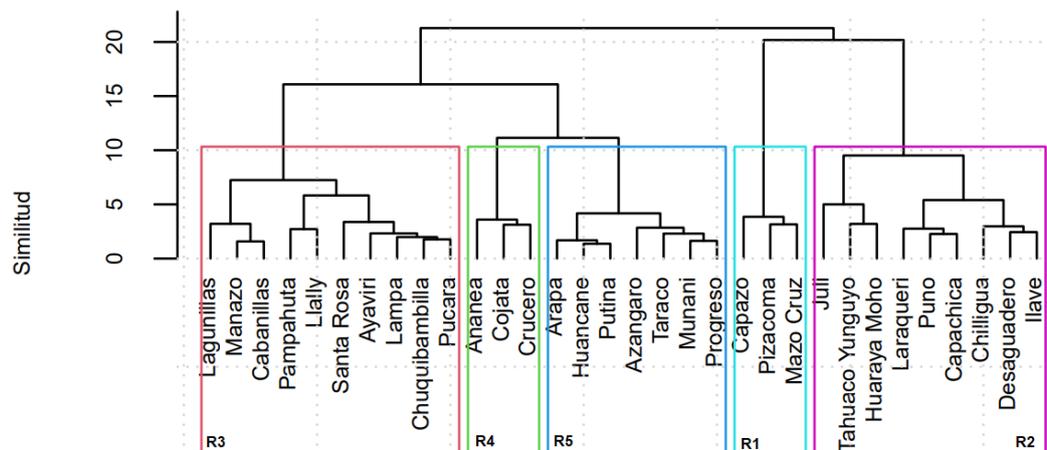


#### 4.1.2. Formación de regiones homogéneas

En la Figura 6, se muestra el dendograma agrupado por el método de Ward, donde se definió una partición final de cinco grupos o regiones preliminares a un nivel de similitud de 10. La región 1 (R1) corresponde a las estaciones (PIZ, MAZ y CAZ), la región 2 (R2) corresponde (DES, CHI, ILA, LAR, PNO, CAP, JUL, TYU y HMO), la región 3 (R3) corresponde (MAN, CAB, LAG, LAM, PAM, AYA, CHQ, LLA, PUC y SRO), la región 4 (R4) corresponde (ANA, CRU y COJ) y la región 5 (R5) corresponde (ARA, TAR, HNE, MUN, PTN, AZA y PRO).

**Figura 6**

*Dendograma en base al método de Ward en Regiones Preliminar*

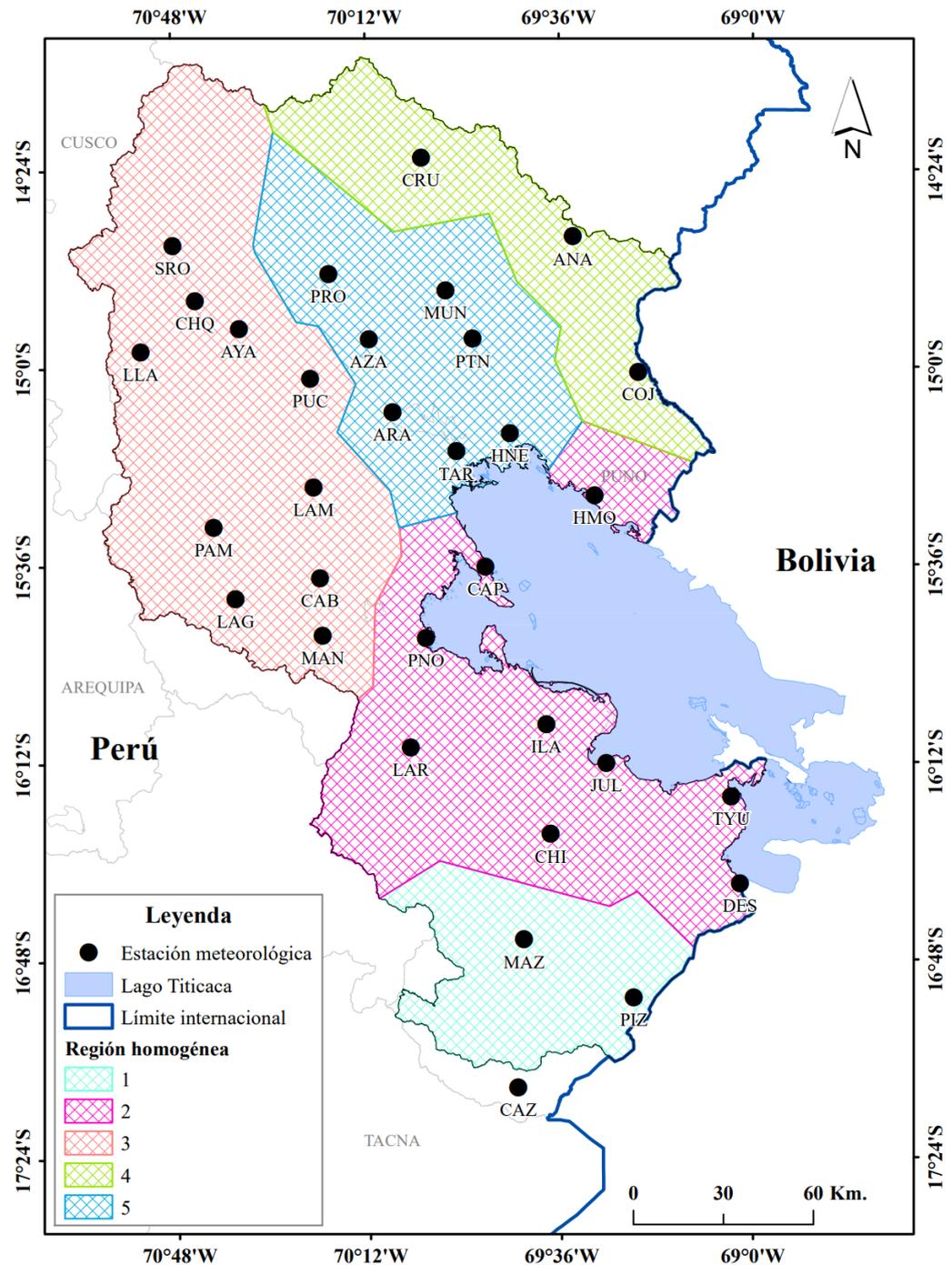


En la Figura 7, se muestra la distribución espacial del agrupamiento de las cinco regiones homogéneas, definidos mediante el MVR; la R1 corresponde a las estaciones situadas en la parte sur de la cuenca, las estaciones de la R2 se encuentran en la parte media de la cuenca al lado del lago Titicaca, las estaciones de la R3 se encuentran situadas en la parte media y al norte de la cuenca, las estaciones de la R4 se encuentran ubicadas en la parte norte en las cabeceras de la cuenca Madre de Dios; y finalmente las estaciones de la R5 están situadas en la

parte norte entre las regiones 3 y 4. Cabe señalar que la delimitación de las regiones homogéneas fue realizada mediante el método de Thiessen en función del área de influencia de cada estación.

**Figura 7**

*Delimitación de regiones homogéneas de precipitación*



### a) Vector regional región 1

En la Tabla 4, se muestran los parámetros de estimación para la R1, que proporciona el mejor VR de precipitación multianual en la región analizada, donde la correlación varía de 0.80 a 0.89 indicando una buena correlación entre todas las estaciones, la DED revelan valores menores a ( $<0.20$ ) indicando que las estaciones pertenecen a una misma región homogénea.

**Tabla 4**

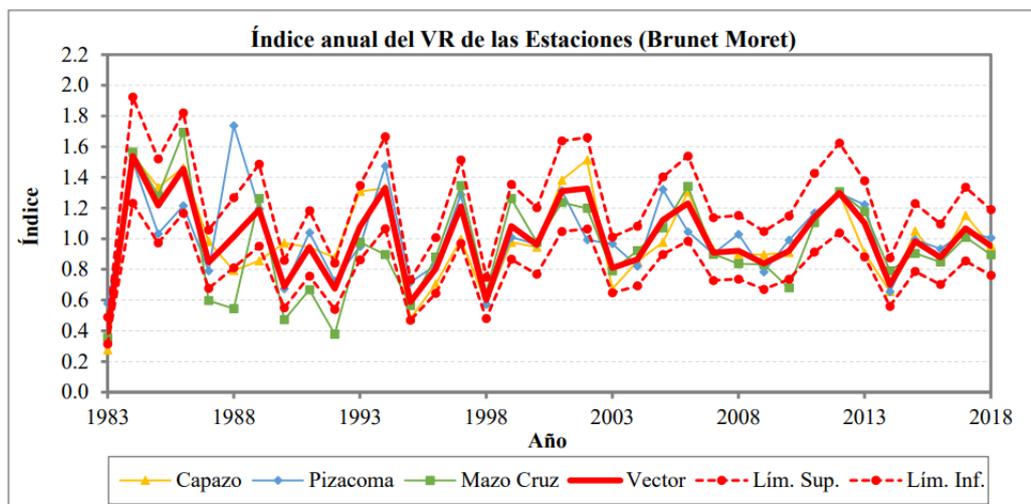
*Parámetros de estimación del vector regional – R1*

| Estación  | Nº Años | D.E. Desvíos | Homogeneidad B.M. | Correlación / Vector |
|-----------|---------|--------------|-------------------|----------------------|
| Capazo    | 36      | 0.13         | 0.90              | 0.89                 |
| Pizacoma  | 36      | 0.17         | 0.83              | 0.80                 |
| Mazo Cruz | 36      | 0.16         | 0.12              | 0.87                 |

En la Figura 8, se muestra los índices anuales de cada estación pluviométrica, donde se observó una estrecha relación entre las estaciones y el vector regional con sus respectivos límites de confianza.

**Figura 8**

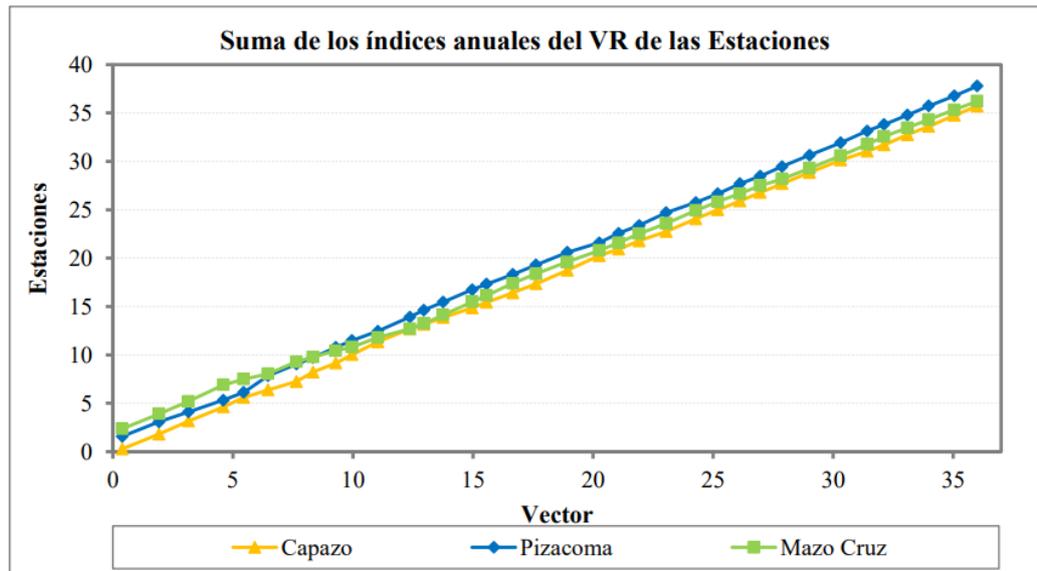
*Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret)*



La Figura 9, se muestra los índices anuales acumulados del MVR y las estaciones presentan una buena linealidad, existiendo algunos quiebres insignificantes, la cual da una confiabilidad de la información.

### Figura 9

*Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones*



#### b) Vector regional región 2

En la Tabla 5, se muestran los parámetros de estimaciones para la R2, que proporciona el mejor VR de precipitación multianual en la región analizada, donde la correlación varía de 0.75 a 0.93 indicando una buena correlación entre todas las estaciones, la DED revelan valores menores a ( $<0.20$ ) indicando que las estaciones pertenecen a una misma región homogénea.

**Tabla 5**

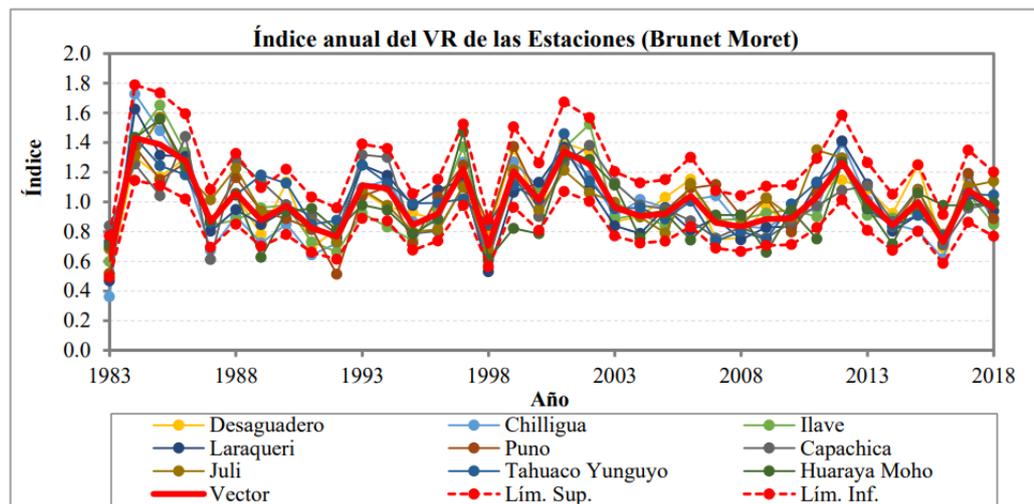
*Parámetros de estimaciones del vector regional - R2*

| Estación     | Nº Años | D.E. Desvíos | Homogeneidad B.M. | Correlación / Vector |
|--------------|---------|--------------|-------------------|----------------------|
| Desaguadero  | 36      | 0.10         | 0.44              | 0.88                 |
| Chilligua    | 36      | 0.12         | 0.18              | 0.93                 |
| Ilave        | 36      | 0.11         | 0.32              | 0.90                 |
| Laraqueri    | 36      | 0.11         | 0.39              | 0.91                 |
| Puno         | 36      | 0.10         | 0.03              | 0.88                 |
| Capachica    | 36      | 0.14         | 0.47              | 0.75                 |
| Juli         | 36      | 0.11         | 0.01              | 0.86                 |
| Tahuaco      | 36      | 0.11         | 0.13              | 0.85                 |
| Yunguyo      | 36      | 0.11         | 0.13              | 0.85                 |
| Huaraya Moho | 36      | 0.15         | 0.45              | 0.79                 |

En la Figura 10, se muestra los índices anuales de cada estación pluviométrica, donde se observó una estrecha relación entre las estaciones y el vector regional con sus respectivos límites de confianza.

**Figura 10**

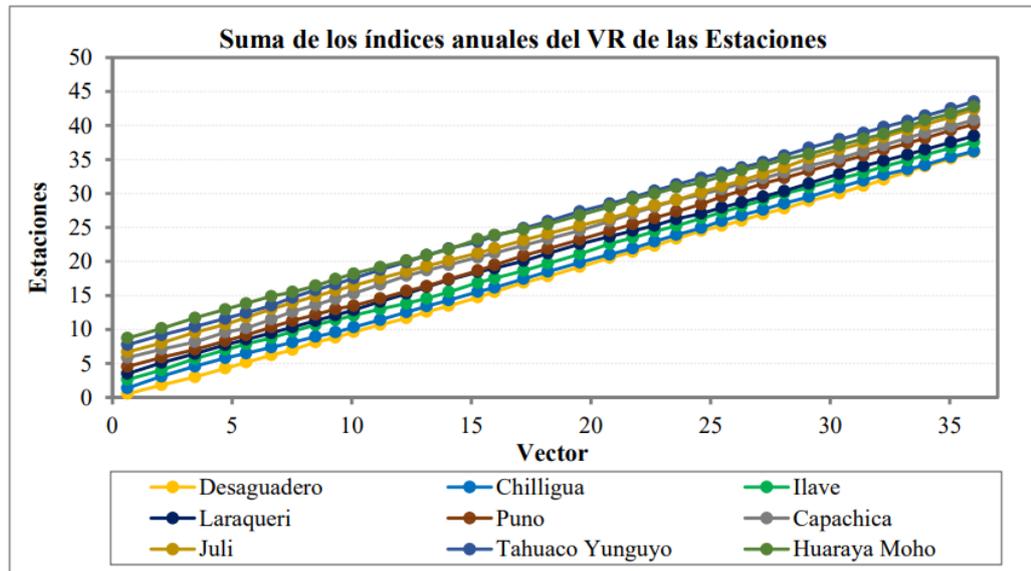
*Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret)*



La Figura 11, se muestra los índices anuales acumulados del MVR y las estaciones presentan una buena linealidad, existiendo algunos quiebres insignificantes, la cual da una confiabilidad de la información.

**Figura 11**

*Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones*



**c) Vector regional región 3**

En la Tabla 6, se muestran los parámetros de estimación para la R3, que proporciona el mejor VR de precipitación multianual en la región analizada, donde la correlación varía de 0.80 a 0.92 indicando una buena correlación entre todas las estaciones, la DED revelan valores menores a ( $<0.20$ ) indicando que las estaciones pertenecen a una misma región homogénea.

**Tabla 6**

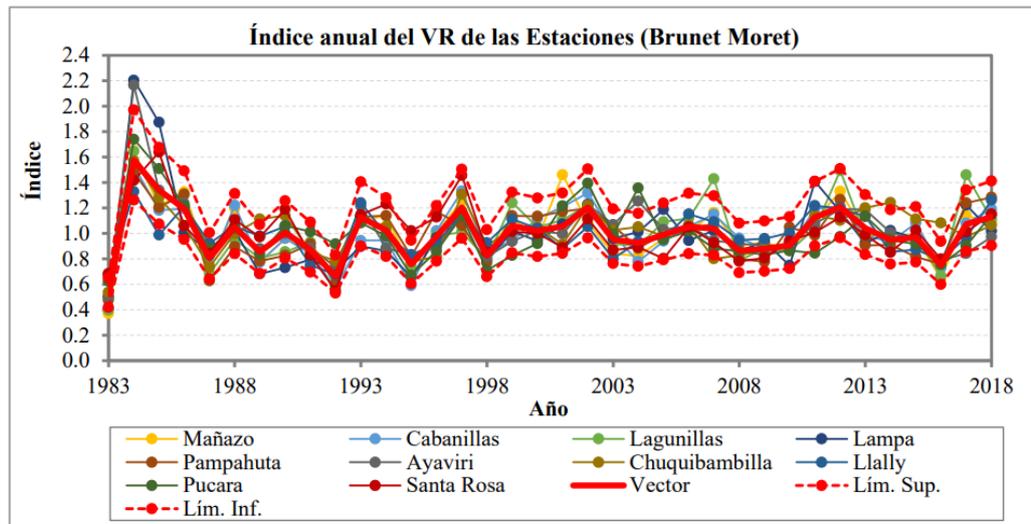
*Parámetros de estimaciones del vector regional – R3*

| Estación       | Nº Años | D.E. Desvíos | Homogeneidad B.M. | Correlación / Vector |
|----------------|---------|--------------|-------------------|----------------------|
| Mañazo         | 36      | 0.10         | 0.89              | 0.91                 |
| Cabanillas     | 36      | 0.09         | 0.14              | 0.92                 |
| Lagunillas     | 36      | 0.13         | 0.32              | 0.88                 |
| Lampa          | 36      | 0.18         | 0.15              | 0.85                 |
| Pampahuta      | 36      | 0.11         | 0.24              | 0.87                 |
| Ayaviri        | 36      | 0.14         | 0.82              | 0.86                 |
| Chuquibambilla | 36      | 0.12         | 0.51              | 0.80                 |
| Llally         | 36      | 0.12         | 0.63              | 0.80                 |
| Pucara         | 36      | 0.14         | 0.24              | 0.79                 |
| Santa Rosa     | 36      | 0.13         | 0.01              | 0.81                 |

En la Figura 12, se muestra los índices anuales de cada estación pluviométrica, donde se observó una estrecha relación entre las estaciones y el vector regional con sus respectivos límites de confianza.

**Figura 12**

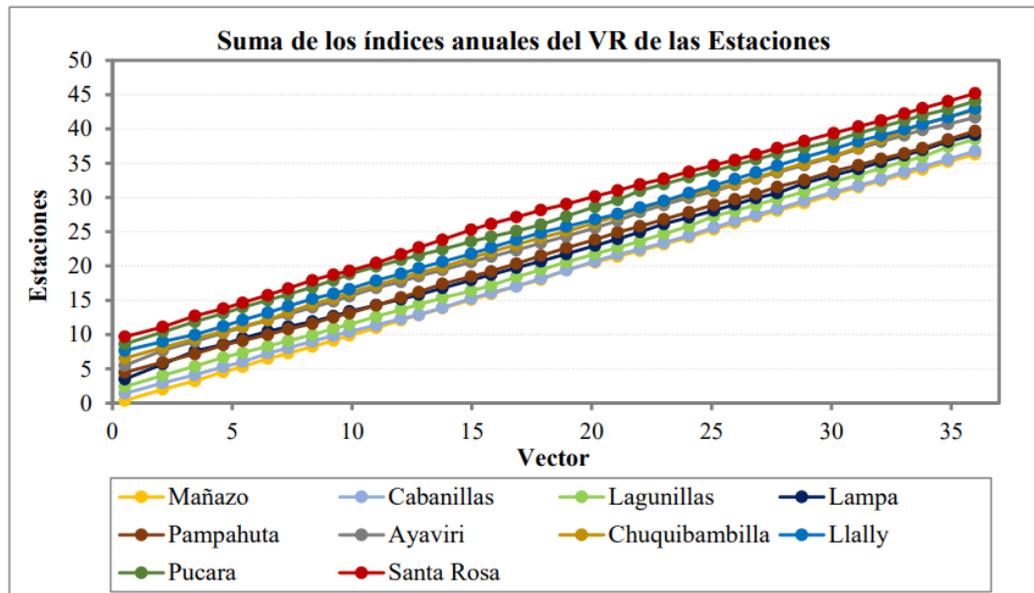
*Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret)*



La Figura 13, se muestra los índices anuales acumulados del MVR y las estaciones presentan una buena linealidad, existiendo algunos quiebres insignificantes, la cual da una confiabilidad de la información.

**Figura 13**

*Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones*



**d) Vector regional región 4**

En la Tabla 7, se muestran los parámetros de estimación para la R4, que proporciona el mejor VR de precipitación multianual en la región analizada, donde la correlación varía de 0.79 a 0.93 indicando una buena correlación entre todas las estaciones, la DED revelan valores menores a ( $<0.20$ ) indicando que las estaciones pertenecen a una misma región homogénea.

**Tabla 7**

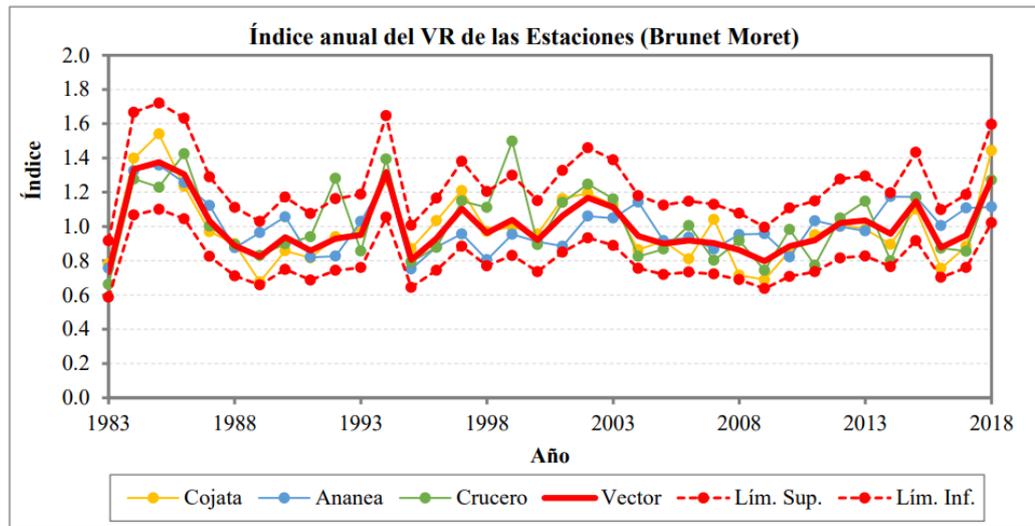
*Parámetros de estimación del vector regional – R4*

| Estación | Nº Años | D.E. Desvíos | Homogeneidad B.M. | Correlación / Vector |
|----------|---------|--------------|-------------------|----------------------|
| Cojata   | 36      | 0.08         | 0.35              | 0.93                 |
| Ananea   | 36      | 0.10         | 0.04              | 0.79                 |
| Crucero  | 36      | 0.13         | 0.11              | 0.81                 |

En la Figura 14, se muestra los índices anuales de cada estación pluviométrica, donde se observó una estrecha relación entre las estaciones y el vector regional con sus respectivos límites de confianza.

**Figura 14**

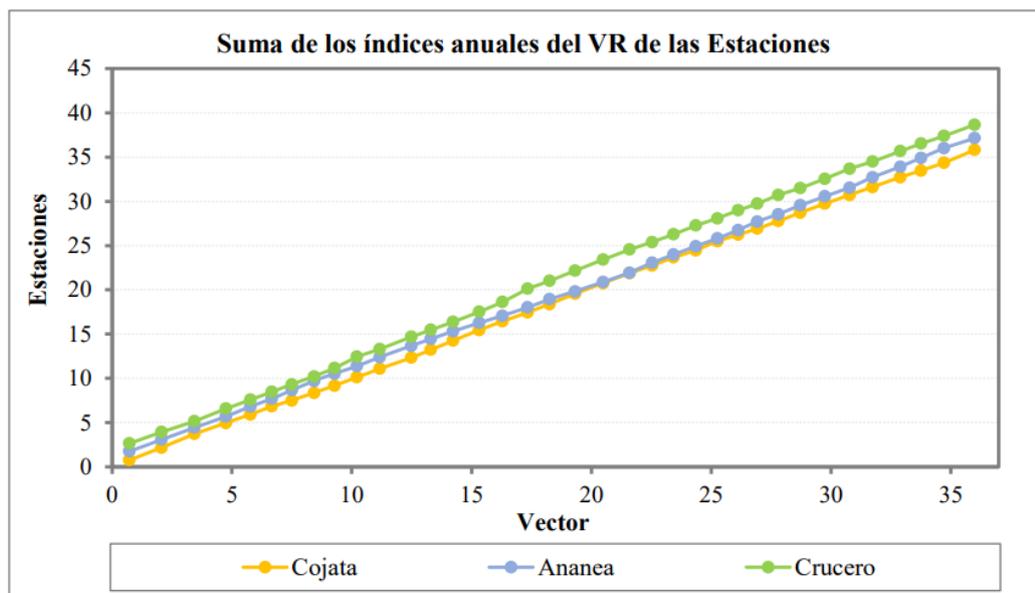
*Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret)*



La Figura 15, se muestra los índices anuales acumulados del MVR y las estaciones presentan una buena linealidad, existiendo algunos quiebres insignificantes, la cual da una confiabilidad de la información.

**Figura 15**

*Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones*



**e) Vector regional región 5**

En la Tabla 8, se muestran los parámetros de estimación para la R5, que proporciona el mejor VR de precipitación multianual en la región analizada, donde la correlación varía de 0.80 a 0.89 indicando una buena correlación entre todas las estaciones, la DED revelan valores menores a ( $<0.20$ ) indicando que las estaciones pertenecen a una misma región homogénea.

**Tabla 8**

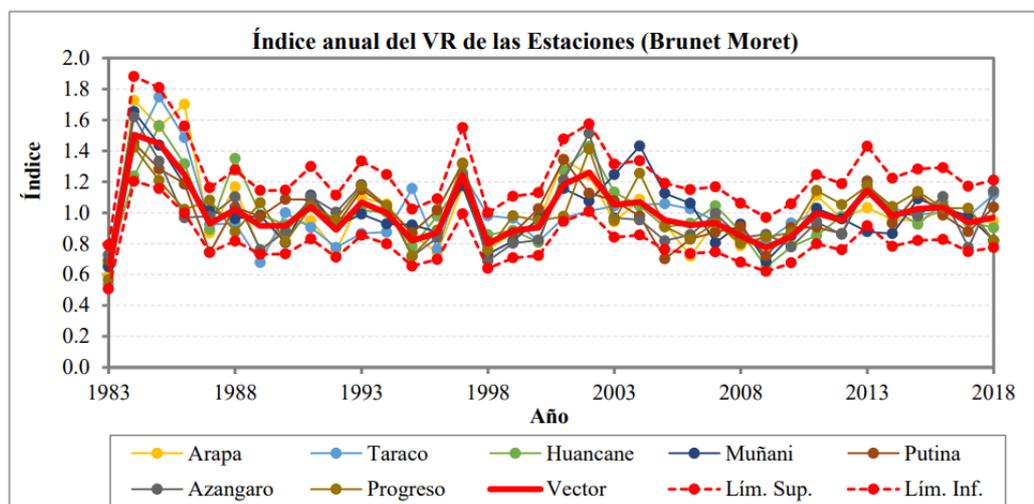
*Parámetro de estimación del vector regional – R5*

| Estación | Nº Años | D.E. Desvíos | Homogeneidad B.M. | Correlación / Vector |
|----------|---------|--------------|-------------------|----------------------|
| Arapa    | 36      | 0.12         | 0.29              | 0.91                 |
| Taraco   | 36      | 0.14         | 0.50              | 0.78                 |
| Huancané | 36      | 0.10         | 0.36              | 0.87                 |
| Muñani   | 36      | 0.12         | 0.44              | 0.82                 |
| Putina   | 36      | 0.10         | 0.06              | 0.85                 |
| Azángaro | 36      | 0.11         | 0.94              | 0.87                 |
| Progreso | 36      | 0.11         | 0.37              | 0.81                 |

En la Figura 16, se muestra los índices anuales de cada estación pluviométrica, donde se observó una estrecha relación entre las estaciones y el vector regional con sus respectivos límites de confianza.

**Figura 16**

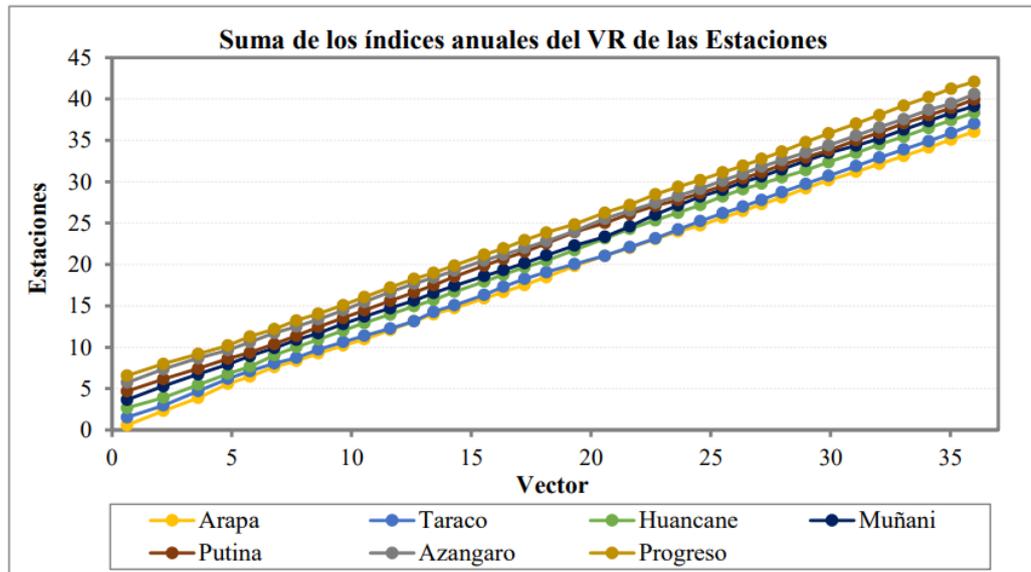
*Índices anuales del Vector y de las estaciones (Brunet Moret)*



La Figura 17, se muestra los índices anuales acumulados del MVR y las estaciones presentan una buena linealidad, existiendo algunos quiebres insignificantes, la cual da una confiabilidad de la información.

**Figura 17**

*Acumulación de los índices anuales del vector y de las estaciones*



#### 4.1.3. Pruebas estadísticas en las series históricas anuales

En la Tabla 9, se presentó los resultados del análisis de tendencia del registro anual, mostrando no significativo (NS) en todas las estaciones que conforma la región 1, es decir, los valores de test estadístico ( $Z$ ) y la desviación máxima son menores a los valores críticos de tabla en diferentes niveles de significancia (es decir 1%, 5% y 10%), tanto en la prueba de MK y Free CUSUM respectivamente, por ende, no presentó tendencias ni cambios en la media.

**Tabla 9***Pruebas estadísticas de series anuales – región 1*

| Estación  | Tendencia (Mann-Kendall) |                     | Cambios (Free CUSUM) |                     |
|-----------|--------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|           | Test. Estadístico (Z)    | Nivel Significancia | Año de cambio        | Nivel Significancia |
| Capazo    | -0.422                   | NS                  | 1987                 | NS                  |
| Pizacoma  | 0.014                    | NS                  | 1991                 | NS                  |
| Mazo Cruz | 0.422                    | NS                  | 1998                 | NS                  |

Nota: No Significativo (NS)

En la Tabla 10, se resume los resultados del análisis de tendencia del registro anual, mostrando no significativo (NS) en todas las estaciones que conforma la región 2, es decir, los valores de test estadístico (Z) y la desviación máxima son menores a los valores críticos de tabla en diferentes niveles de significancia (es decir 1%, 5% y 10%), tanto en la prueba de MK y Free CUSUM respectivamente, por ende, no presentó tendencias ni cambios en la media.

**Tabla 10***Pruebas estadísticas de series anuales - región 2*

| Estación    | Tendencia (Mann-Kendall) |                     | Cambios (Free CUSUM) |                     |
|-------------|--------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|             | Test. Estadístico (Z)    | Nivel Significancia | Año de cambio        | Nivel Significancia |
| Desaguadero | 0.041                    | NS                  | 2010                 | NS                  |
| Chilligua   | -0.259                   | NS                  | 1998                 | NS                  |
| Ilave       | -0.150                   | NS                  | 2002                 | NS                  |
| Laraqueri   | -0.940                   | NS                  | 2002                 | NS                  |
| Puno        | -0.449                   | NS                  | 2012                 | NS                  |
| Capachica   | -1.212                   | NS                  | 2004                 | NS                  |
| Juli        | -0.123                   | NS                  | 1998                 | NS                  |
| Tahuaco     | -1.675                   | NS                  | 2002                 | NS                  |
| Yunguyo     | -1.675                   | NS                  | 2002                 | NS                  |
| Huaraya     | -0.313                   | NS                  | 2011                 | NS                  |
| Moho        | -0.313                   | NS                  | 2011                 | NS                  |

Nota: No Significativo (NS)

En la Tabla 11, se presentó los resultados del análisis de tendencia del registro anual, mostrando no significativo (NS) en todas las estaciones que conforma la región 3, es decir, los valores de test estadístico (Z) y la desviación máxima son menores a los valores críticos de tabla en diferentes niveles de significancia (es decir 1%, 5% y 10%), tanto en la prueba de MK y Free CUSUM respectivamente, por ende, no presentó tendencias ni cambios en la media.

**Tabla 11**

*Pruebas estadísticas de series anuales - región 3*

| Estación       | Tendencia (Mann-Kendall) |                     | Cambios (Free CUSUM) |                     |
|----------------|--------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|                | Test. Estadístico (Z)    | Nivel Significancia | Año de cambio        | Nivel Significancia |
| Mañazo         | 0.136                    | NS                  | 2016                 | NS                  |
| Cabanillas     | 0.749                    | NS                  | 1999                 | NS                  |
| Lagunillas     | 0.831                    | NS                  | 1998                 | NS                  |
| Lampa          | 1.321                    | NS                  | 1995                 | NS                  |
| Pampahuta      | 0.150                    | NS                  | 1992                 | NS                  |
| Ayaviri        | 0.014                    | NS                  | 2014                 | NS                  |
| Chuquibambilla | 0.831                    | NS                  | 2010                 | NS                  |
| Llally         | 0.313                    | NS                  | 2013                 | NS                  |
| Pucara         | -1.022                   | NS                  | 2006                 | NS                  |
| Santa Rosa     | -1.076                   | NS                  | 1999                 | NS                  |

Nota: No Significativo (NS)

En la Tabla 12, se resume los resultados del análisis de tendencia del registro anual, mostrando no significativo (NS) en todas las estaciones que conforma la región 4, es decir, los valores de test estadístico (Z) y la desviación máxima son menores a los valores críticos de tabla en diferentes niveles de significancia (es decir 1%, 5% y 10%), tanto en la prueba de MK y Free CUSUM respectivamente, por ende, no presentó tendencias ni cambios en la media.

**Tabla 12***Pruebas estadísticas de series anuales - región 4*

| Estación | Tendencia (Mann-Kendall) |                     | Cambios (Free CUSUM) |                     |
|----------|--------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|          | Test. Estadístico (Z)    | Nivel Significancia | Año de cambio        | Nivel Significancia |
| Cojata   | -0.722                   | NS                  | 2003                 | NS                  |
| Ananea   | 0.749                    | NS                  | 2010                 | NS                  |
| Crucero  | -0.858                   | NS                  | 2003                 | NS                  |

Nota: No Significativo (NS)

En la Tabla 13, se resume los resultados del análisis de tendencia del registro anual, mostrando no significativo (NS) en todas las estaciones que conforma la región 5, es decir, los valores de test estadístico (Z) y la desviación máxima son menores a los valores críticos de tabla en diferentes niveles de significancia (es decir 1%, 5% y 10%), tanto en la prueba de MK y Free CUSUM respectivamente, por ende, no presentó tendencias ni cambios en la media.

**Tabla 13***Pruebas estadísticas de series anuales - región 5*

| Estación | Tendencia (Mann-Kendall) |                     | Cambios (Free CUSUM) |                     |
|----------|--------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|          | Test. Estadístico (Z)    | Nivel Significancia | Año de cambio        | Nivel Significancia |
| Arapa    | -0.150                   | NS                  | 2010                 | NS                  |
| Taraco   | 1.076                    | NS                  | 2001                 | NS                  |
| Huancané | -1.267                   | NS                  | 2004                 | NS                  |
| Muñani   | -1.158                   | NS                  | 2006                 | NS                  |
| Putina   | -1.185                   | NS                  | 2003                 | NS                  |
| Azángaro | -0.313                   | NS                  | 1994                 | NS                  |
| Progreso | -0.422                   | NS                  | 2010                 | NS                  |

Nota: No Significativo (NS)

#### 4.1.4. Métricas estadísticas de desempeño

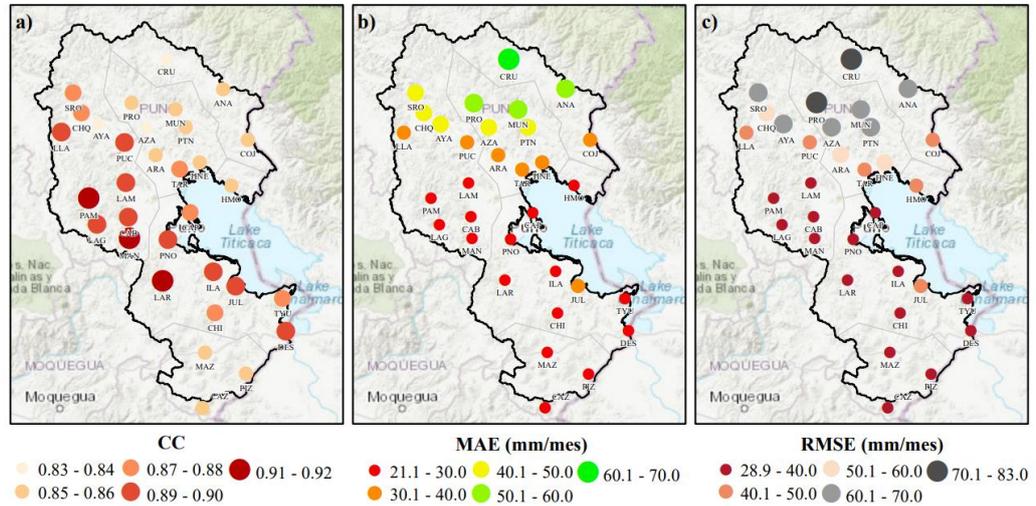
La Figura 18 presenta la distribución espacial del CC, MAE y RMSE a una escala mensual en la CLT desde enero de 1983 a diciembre de 2018. En la Figura 18 (a), el CC osciló entre 0.83 y 0.92 (media 0.87), presentando valores más altos en las estaciones PAM, MAN y LAR y valores más bajos en las estaciones CRU, AZA y AYA; lo que indica, que PERSIANN-CDR tiene una buena concordancia con la precipitación observada.

La Figura 18 (b), reveló los valores del MAE que oscilan entre 21.15 y 68.07 mm/mes (media 34.19 mm/mes), presentándose los valores bajos de MAE (<30 mm/mes) en las estaciones que se ubican en la parte media y sur de la CLT y los valores elevados de MAE (>50 mm/mes) en las estaciones que se ubican en la parte norte de la CLT. Asimismo, en la Figura 18 (c) los valores de RMSE varían entre 28.92 y 82.4 mm/mes (media 46.55 mm/mes), presentándose los valores bajos de RMSE (<40 mm/mes) en las estaciones que se ubican en la parte media y sur de la CLT y los valores elevados de RMSE (>60 mm/mes) en las estaciones que se ubican en la parte norte de la CLT.

La evaluación entre los datos de PERSIANN-CDR y los datos de precipitación observada se realizó a una escala punto de estación sin utilizar ninguna técnica de interpolación.

**Figura 18**

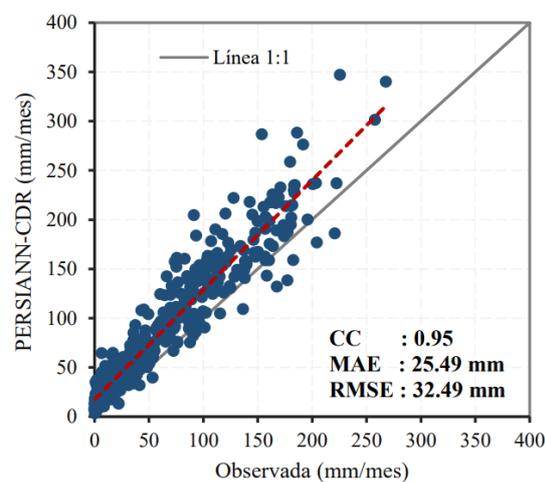
*Distribución espacial del CC (a), MAE (b) y RMSE (c) entre PERSIANN-CDR y mediciones de pluviómetros por cada estación meteorológicas a escala mensual*



La Figura 19 muestra una correlación alta de ( $CC = 0.95$ ), un error absoluto de ( $MAE = 25.49$  mm/mes) y un error cuadrático de ( $RMSE = 32.49$  mm/mes). En consecuencia, PERSIANN-CDR muestra un alto grado de concordancia con las mediciones de pluviómetros y estuvo ligeramente junto a la línea 1:1. Además, los datos de PERSIANN-CDR sobreestimó la precipitación observada.

**Figura 19**

*Diagrama de dispersión promedio de datos PERSIANN-CDR frente a mediciones de pluviómetros en la CLT a escala mensual*



## 4.2. EVALUACIÓN TEMPORAL DE SEQUÍA BASADAS EN SPI

### 4.2.1. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 1

En la Figura 20, se muestra la evolución temporal de los índices SPI-1, SPI-3, SPI-6 y SPI-12 promediado en base a la precipitación observada y PERSIANN-CDR. Los resultados muestran la ocurrencia en eventos de sequía de moderados a extremos, en el periodo 1983-2018.

Al evaluar el comportamiento de SPI-1 (Figura 20 (a)), se observa que PERSIANN-CDR capturó eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1983, 1984, 1987, 1991, 1992, 2009 y a mediados de 2010. Estos resultados indican que los valores SPI de PERSIANN-CDR subestimó a los valores de SPI observados.

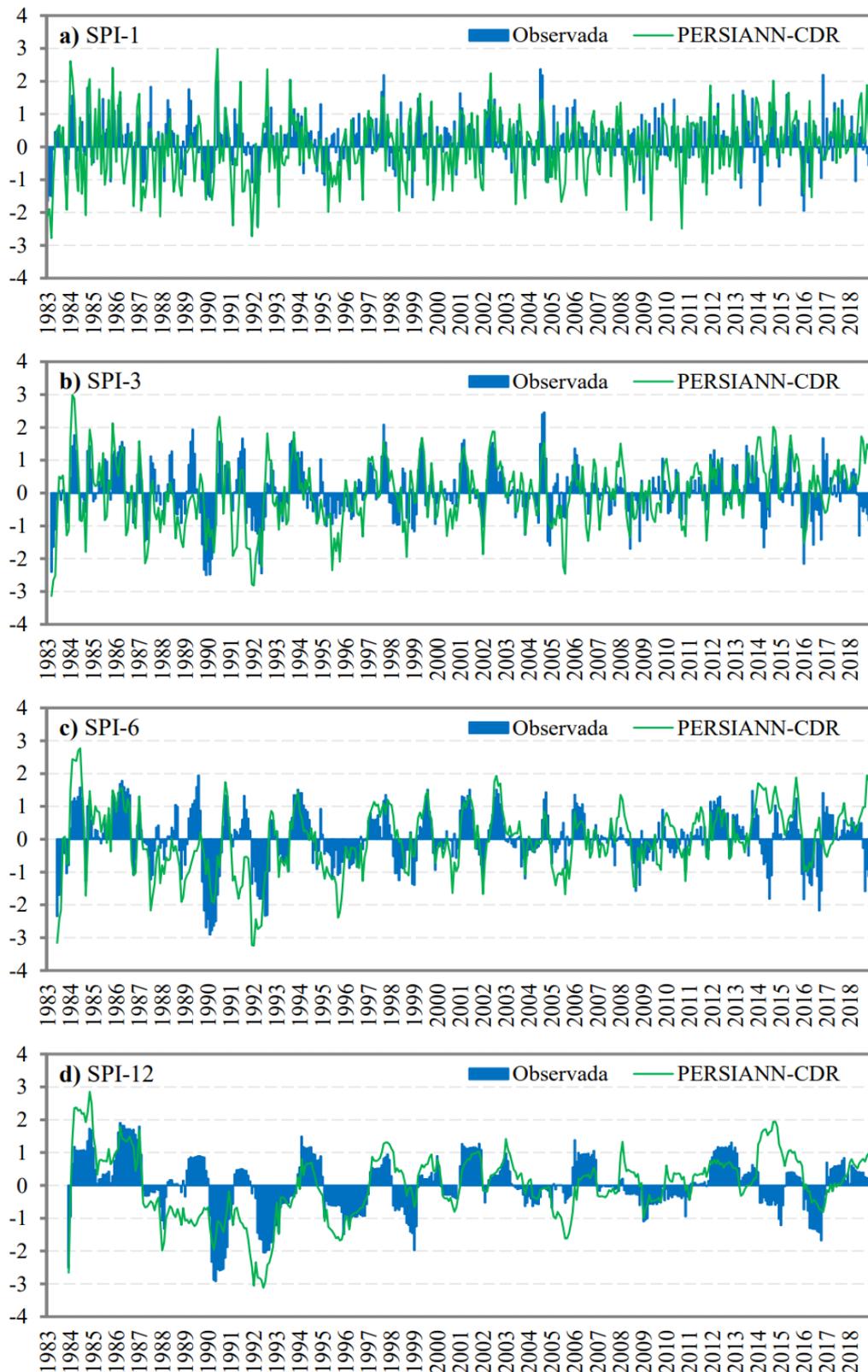
Para el SPI-3 (Figura 20 (b)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ) en los años 1983, 1987, 1992, 1995 y 2005 en comparación a los valores de SPI observados.

Para el SPI-6 (Figura 20 (c)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1983, 1987, 1992 y a mediados de 1995 y sobreestimando en los años 1990 y 2016 en comparación a los valores de SPI observados.

Al evaluar el comportamiento de SPI-12 (Figura 20 (d)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ) en los años 1983, 1992 y a inicios del 1993 y sobreestimando en el año 1990 en comparación a los valores de SPI observados.

**Figura 20**

*Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.*

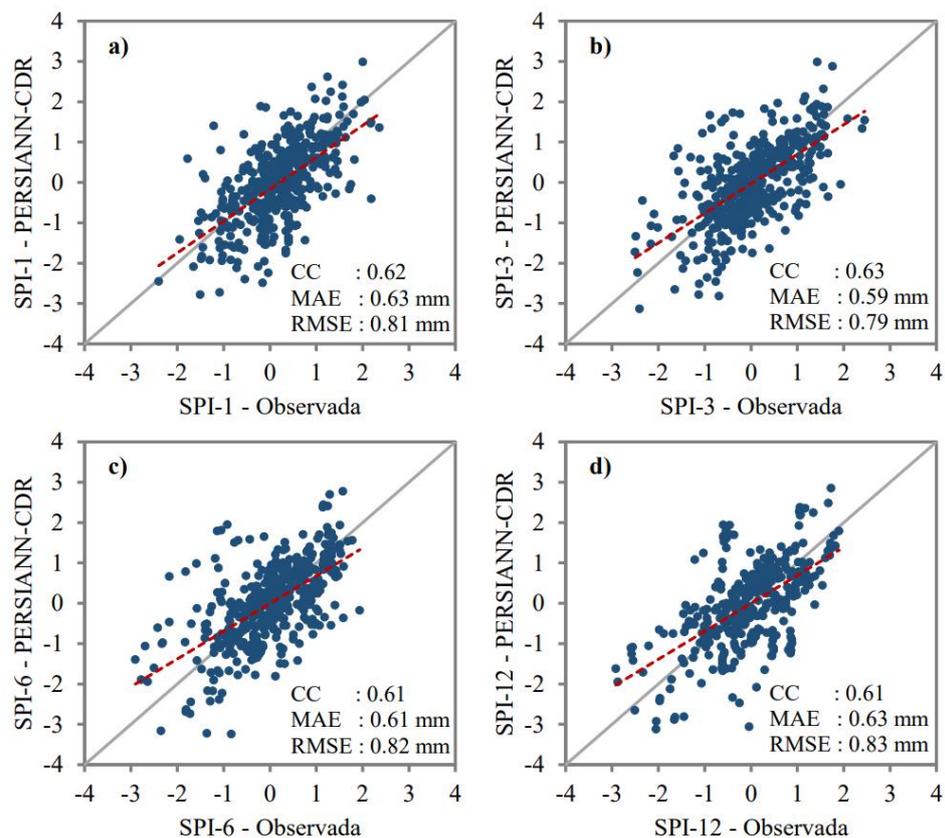


La Figura 21, se muestra los resultados de diagrama de dispersión de SPI promediado (para 1, 3, 6 y 12 meses). Los valores del CC oscilan entre 0.61 y 0.63, se presentaron valores bajos en SPI-6 y SPI-12 y valores más altos en SPI-3. Por otro lado, los valores de MAE varían entre 0.59 y 0.63 mm/mes, presentándose los valores más bajos en SPI-3 y valores elevados en SPI-1 y SPI-12. Asimismo, los valores de RMSE oscilan entre 0.79 y 0.83 mm/mes, presentándose valores bajos en SPI-3 y valores elevados en SPI-12.

En general, los resultados indican un CC satisfactoria ( $>0.60$ ), los valores de MAE y RMSE indican un error bajo y no superan 0.65 y 0.85 respectivamente, al evaluar los valores del SPI en múltiples escalas de tiempo.

### Figura 21

Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediado de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.



#### 4.2.2. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 2

En la Figura 22, se muestra la evolución temporal de los índices SPI-1, SPI-3, SPI-6 y SPI-12 promediado en base a la precipitación observada y PERSIANN-CDR. Los resultados muestran la ocurrencia en eventos de sequía de moderados a extremos, en el periodo de 1983-2018.

Al evaluar el comportamiento de SPI-1 (Figura 22 (a)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ) en los años 1988 y 1992 y sobreestimó en el año 1999 en comparación a los valores de SPI observados.

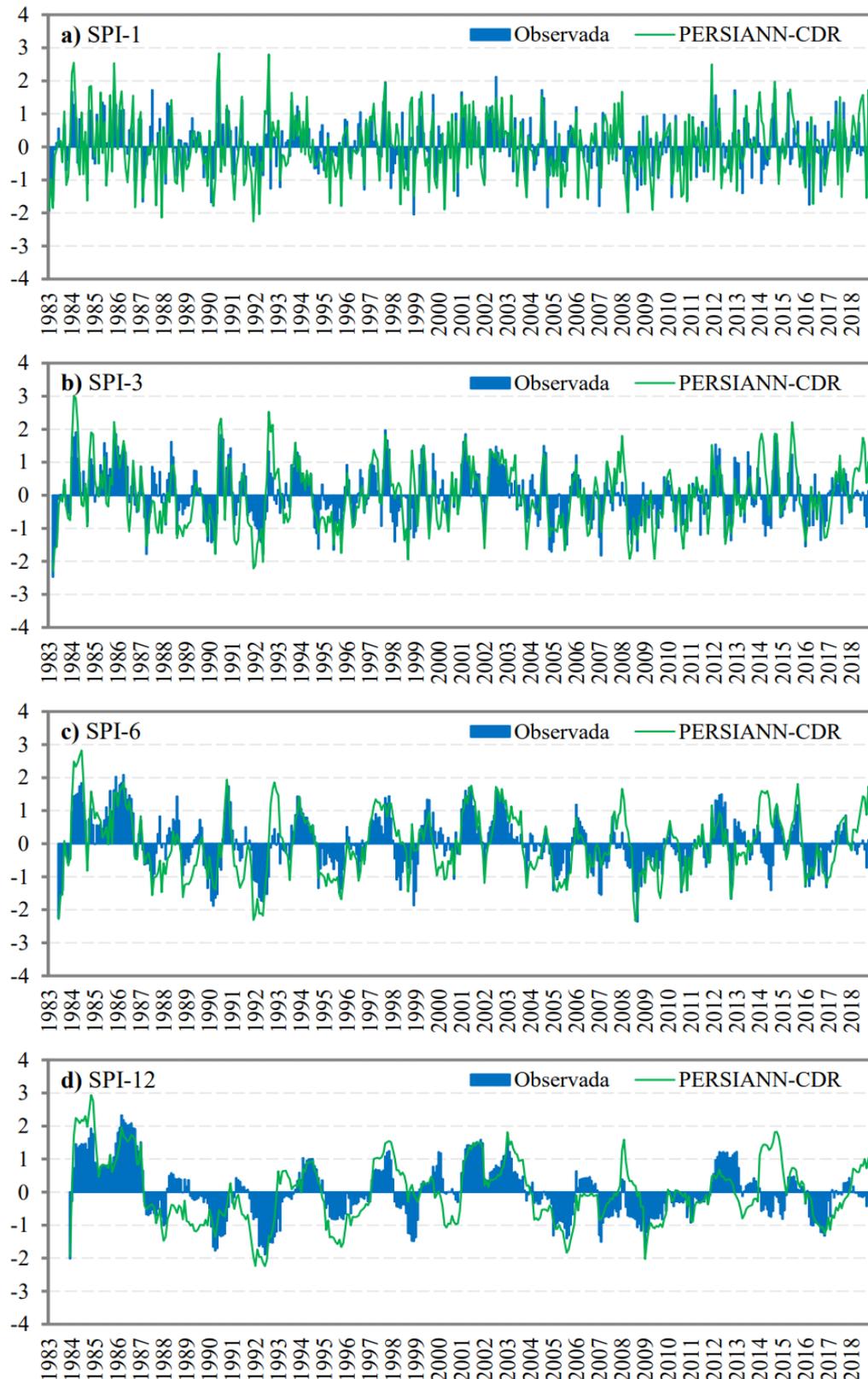
Para el SPI-3 (Figura 22 (b)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ) en el año 1992 y sobreestimó en el año 1983 en comparación a los valores de SPI observados.

Para el SPI-6 (Figura 22 (c)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ) en los años 1983 y 1992 y sobreestimó en el año 2008 en comparación a los valores de SPI observados.

Al evaluar el comportamiento de SPI-12 (Figura 22 (d)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ) en los años 1992 y 2009 y sobreestimó en el año 1983 en comparación a los valores de SPI observados.

**Figura 22**

*Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.*

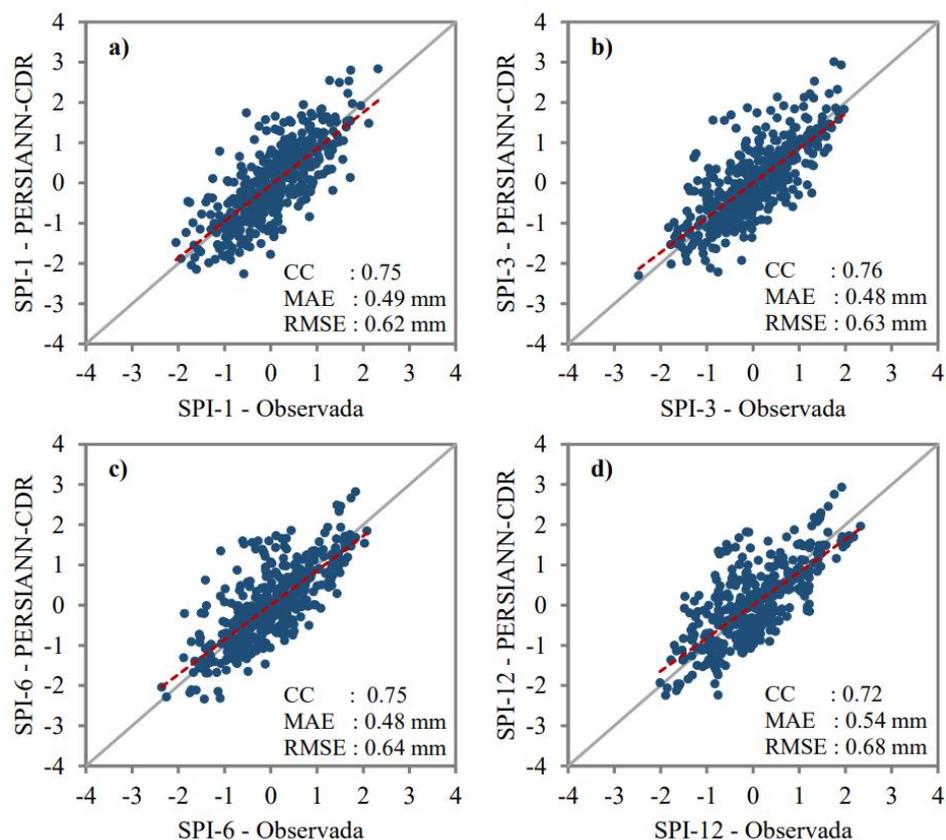


La Figura 23, se muestra los resultados de diagrama de dispersión de SPI promediado (para 1, 3, 6 y 12 meses). Los valores del CC varían entre 0.72 y 0.76, se presentaron valores bajos en SPI-12 y valores más altos en SPI-3. Por otro lado, los valores de MAE oscilan entre 0.48 y 0.54 mm/mes, presentándose los valores más bajos en SPI-3 y SPI-6 Y valores elevados en SPI-12. Asimismo, los valores de RMSE oscilan entre 0.62 y 0.68 mm/mes, presentándose valores bajos en SPI-1 y valores elevados en SPI-12.

En general, los resultados indican un CC fuerte ( $>0.70$ ), los valores de MAE y RMSE indican un error muy bajo y no superan 0.55 y 0.70 respectivamente, al evaluar los valores del SPI en múltiples escalas de tiempo.

### Figura 23

Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediado de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.



#### 4.2.3. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 3

En la Figura 24, se muestra la evolución temporal de los índices SPI-1, SPI-3, SPI-6 y SPI-12 promediado en base a la precipitación observada y PERSIANN-CDR. Los resultados muestran la ocurrencia en eventos de sequía de moderados a extremos, en el periodo de 1983-2018.

Al evaluar el comportamiento de SPI-1 (Figura 24 (a)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1986, 1992, 2008 y 2010 y sobrestimó en los años 1983, 1989 y 1998 en comparación a los valores de SPI observados.

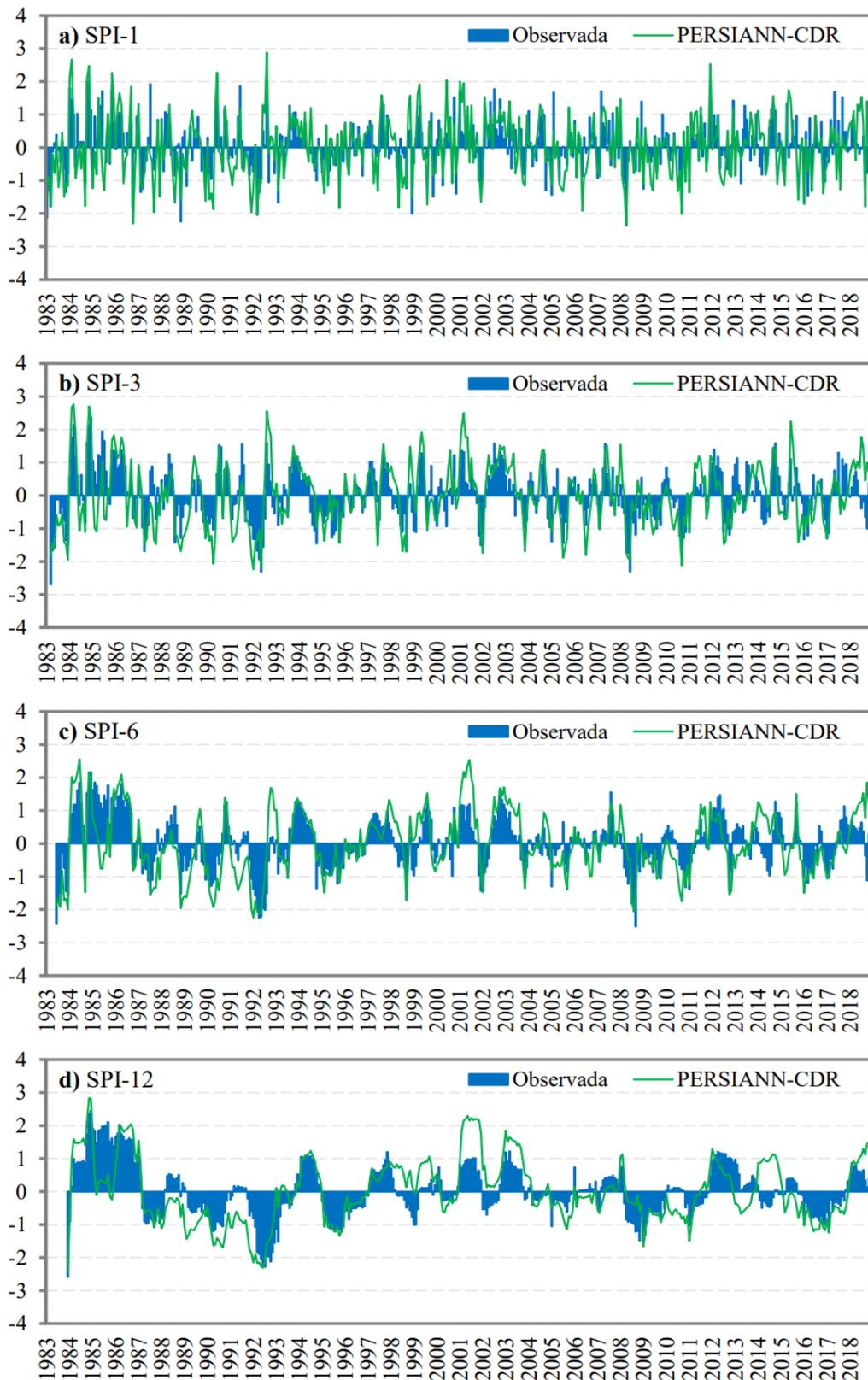
Para el SPI-3 (Figura 24 (b)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1990, 1992 y a mediados de 2010 y sobreestimó en los años 1983 y a mediados de 2008 en comparación a los valores de SPI observados.

Para el SPI-6 (Figura 24 (c)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores sobrestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1983, 1992 y a mediados de 2008 en comparación a los valores de SPI observados.

Al evaluar el comportamiento de SPI-12 (Figura 24 (d)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en el año 1992 y sobreestimó en el año 1983 en comparación a los valores de SPI observados.

**Figura 24**

*Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.*

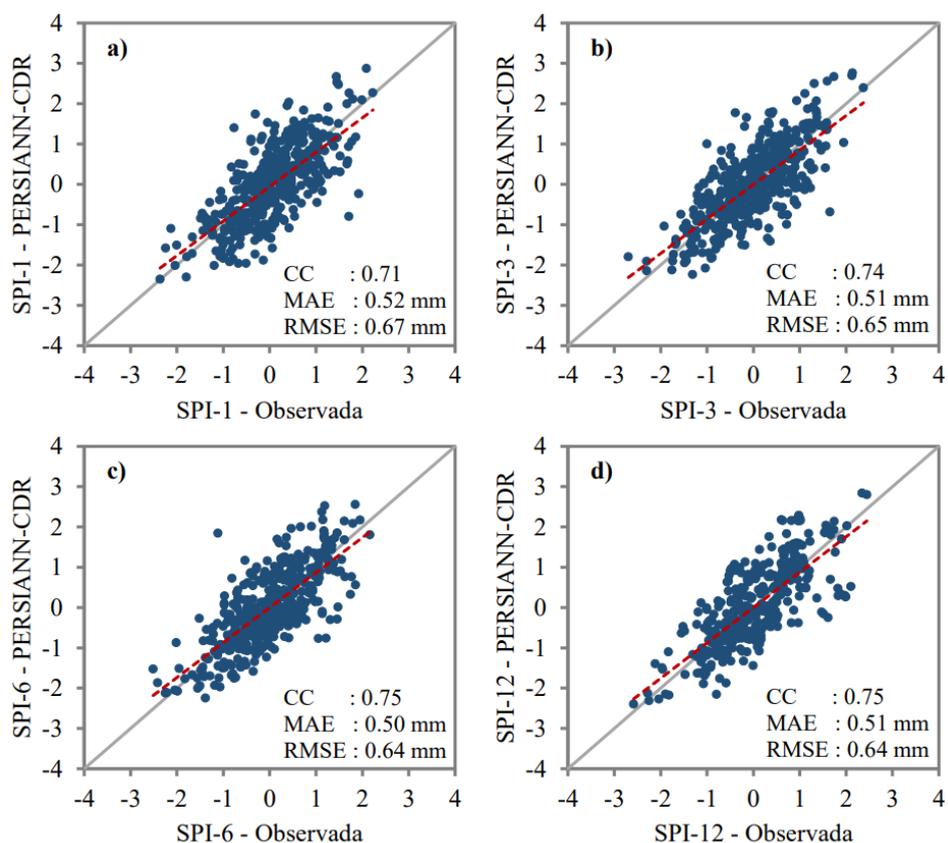


La Figura 25, se muestra los resultados de diagrama de dispersión de SPI promediado (para 1, 3, 6 y 12 meses). Los valores del CC varían entre 0.71 y 0.75, se presentaron valores bajos en SPI-1 y valores elevados en SPI-6 y SPI-12. Por otro lado, los valores de MAE oscilan entre 0.50 y 0.52 mm/mes, presentándose los valores más bajos en SPI-6 y valores elevados en SPI-1. Asimismo, los valores de RMSE varían entre 0.64 y 0.67 mm/mes, presentándose valores bajos en SPI-6 y SPI-12 y valores elevados en SPI-1.

En general, los resultados indican un CC fuerte ( $>0.70$ ), los valores de MAE y RMSE indican un error muy bajo y no superan 0.55 y 0.70 respectivamente, al evaluar los valores del SPI en múltiples escalas de tiempo.

### Figura 25

Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediados de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.



#### 4.2.4. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 4

En la Figura 26, se muestra la evolución temporal de los índices SPI-1, SPI-3, SPI-6 y SPI-12 promediado en base a la precipitación observada y PERSIANN-CDR. Los resultados muestran la ocurrencia en eventos de sequía de moderados a extremos, en el periodo de 1983-2018.

Al evaluar el comportamiento de SPI-1 (Figura 26 (a)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1987, 1988, 1997, 1998, 1999 y 2006 en comparación a los valores de SPI observados.

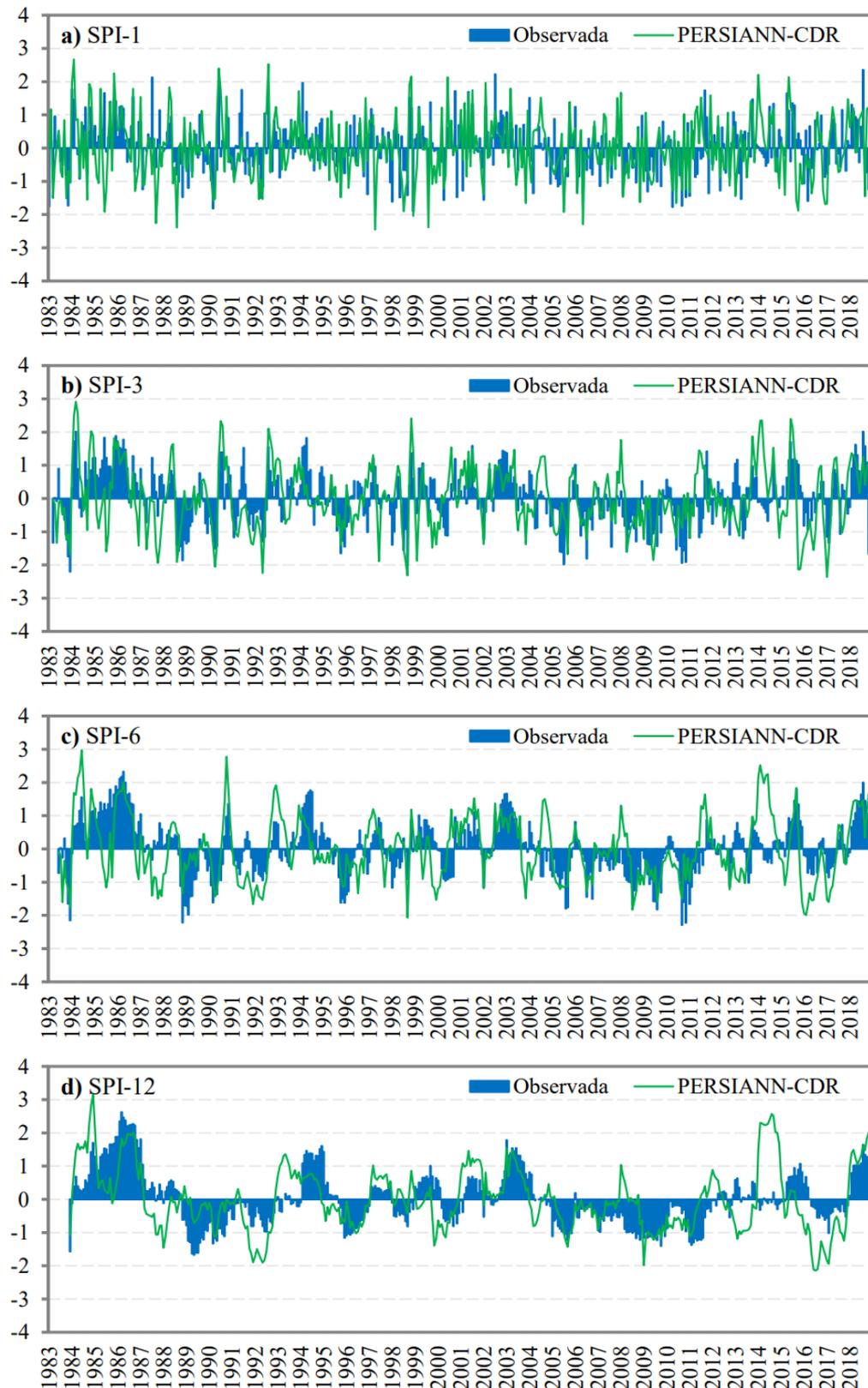
Para el SPI-3 (Figura 26 (b)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1990, 1992, 1998, 2015 y 2017 y sobreestimó en el año 1983 en comparación a los valores de SPI observados.

Para el SPI-6 (Figura 26 (c)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1998 y sobreestimó en los años 1983, 1988 y a mediados de 2010 en comparación a los valores de SPI observados.

Al evaluar el comportamiento de SPI-12 (Figura 26 (d)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 2016 en comparación a los valores de SPI observados.

**Figura 26**

*Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.*

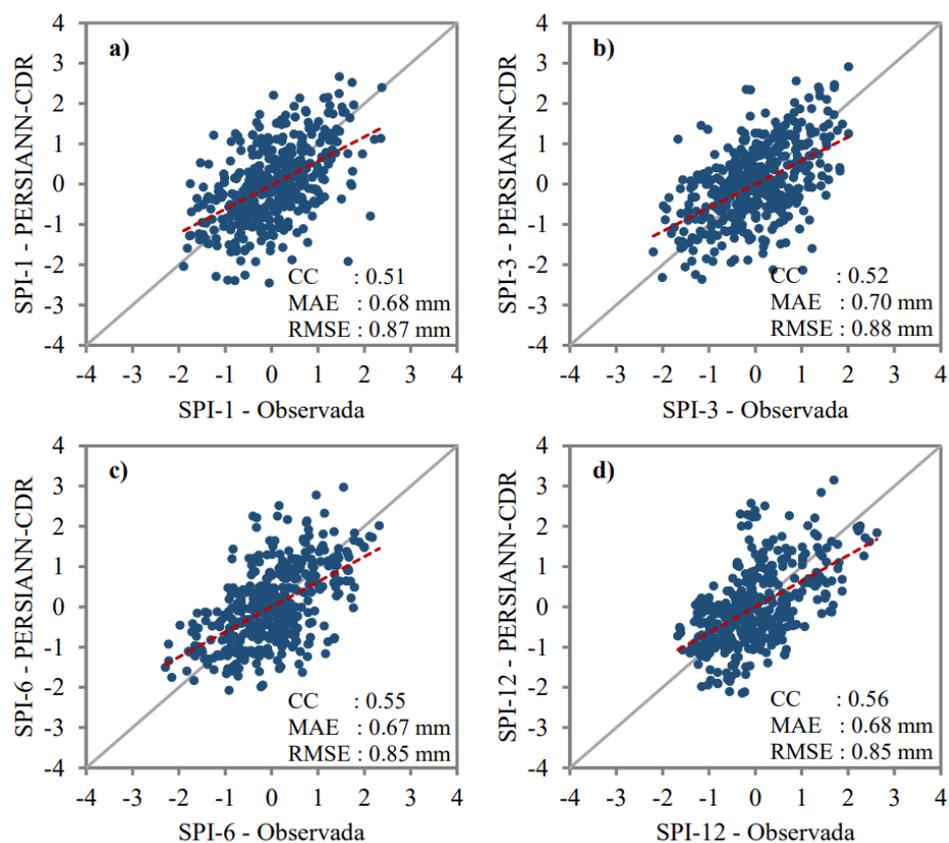


La Figura 27, se muestra los resultados de diagrama de dispersión de SPI promediado (para 1, 3, 6 y 12 meses). Los valores del CC oscilan entre 0.51 y 0.56, se presentaron valores bajos en SPI-1 y valores más altos en SPI-12. Por otro lado, los valores de MAE varían entre 0.67 y 0.70 mm/mes, presentándose los valores más bajos en SPI-6 y valores elevados en SPI-3. Asimismo, los valores de RMSE varían entre 0.85 y 0.88 mm/mes, presentándose valores bajos en SPI-6 y valores elevados en SPI-3.

En general, los resultados indican un CC satisfactorio ( $>0.50$ ), los valores de MAE y RMSE indican un error menor y no superan 0.70 y 0.90 respectivamente, al evaluar los valores del SPI en múltiples escalas de tiempo.

### Figura 27

Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediado de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.



#### 4.2.5. Comparación de eventos de sequía estimadas por SPI región 5

En la Figura 28, se muestra la evolución temporal de los índices SPI-1, SPI-3, SPI-6 y SPI-12 promediado en base a la precipitación observada y PERSIANN-CDR. Los resultados muestran la ocurrencia en eventos de sequía de moderados a extremos, en el periodo de 1983-2018.

Al evaluar el comportamiento de SPI-1 (Figura 28 (a)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1986, 1987 y 1999 y sobreestimó en los años 1988, 1998 y 2008 en comparación a los valores de SPI observados.

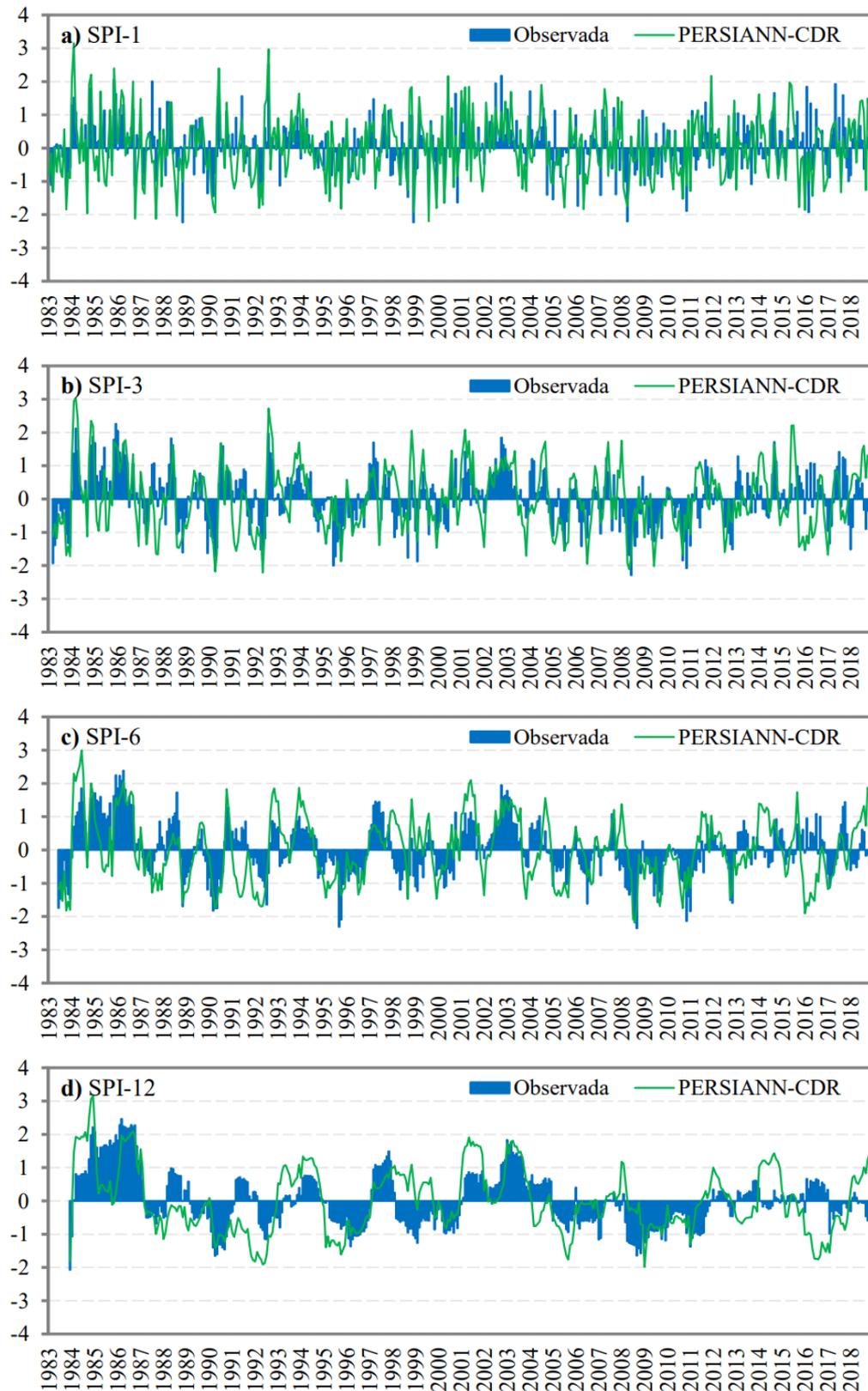
Para el SPI-3 (Figura 28 (b)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores subestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1990, 1992 y 2009 y sobreestimó en los años 2008 y 2010 en comparación a los valores de SPI observados.

Para el SPI-6 (Figura 28 (c)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores sobreestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1995, 2008 y 2010 en comparación a los valores de SPI observados.

Al evaluar el comportamiento de SPI-12 (Figura 28 (d)), se observa que PERSIANN-CDR capturó valores sobreestimados en eventos extremadamente secos ( $<-2$ ), en los años 1983 en comparación a los valores de SPI observados.

**Figura 28**

*Comparación de series de tiempo promedio de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 basados en datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR*

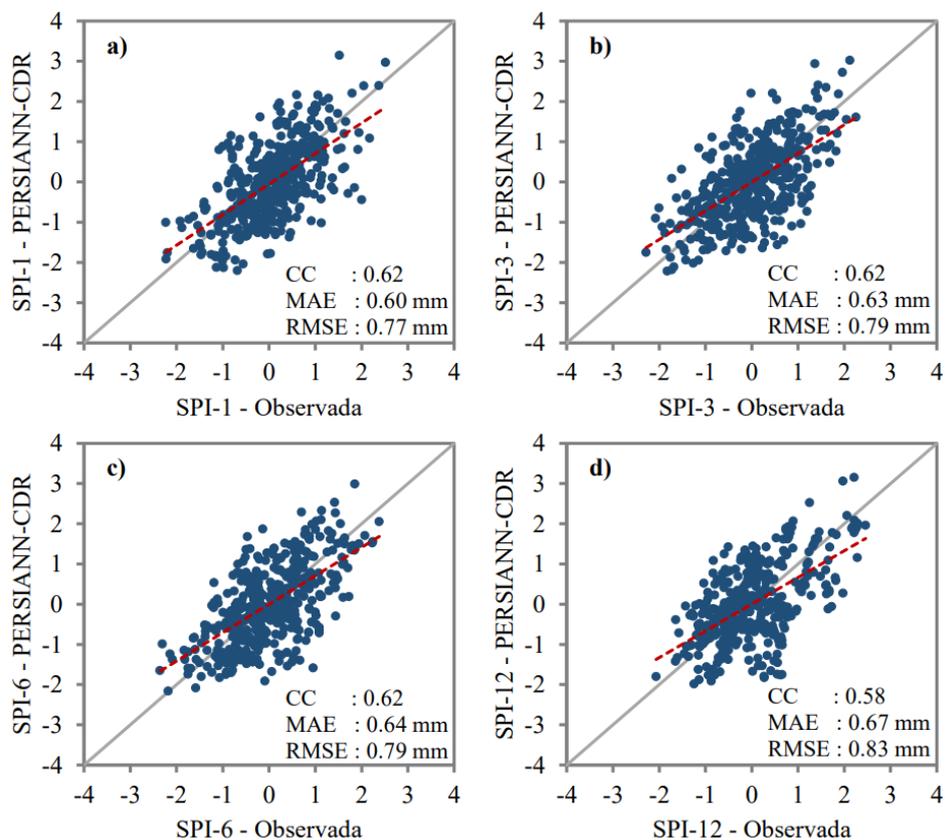


La Figura 29, se muestra los resultados de diagrama de dispersión de SPI promediado (para 1, 3, 6 y 12 meses). Los valores del CC oscilan entre 0.58 y 0.62, se presentaron valores bajos en SPI-12 y valores más altos en SPI-1, SPI-3 y SPI-6. Por otro lado, los valores de MAE varían entre 0.60 y 0.67 mm/mes, presentándose los valores más bajos en SPI-1 y valores elevados en SPI-12. Asimismo, los valores de RMSE oscilan entre 0.77 y 0.83 mm/mes, presentándose valores bajos en SPI-1 y valores elevados en SPI-12.

En general, los resultados indican un CC satisfactorio ( $\geq 0.58$ ), los valores de MAE y RMSE indican un error significativo menor y no superan 0.70 y 0.90 respectivamente, al evaluar los valores del SPI en múltiples escalas de tiempo.

### Figura 29

Diagrama de dispersión de (a) SPI-1, (b) SPI-3, (c) SPI-6 y (d) SPI-12 promediado de datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.



#### 4.2.6. Caracterización de la sequía meteorológica

En la Tabla 14, se resume los resultados de la caracterización de las sequías utilizando valores de SPI (1, 3, 6 y 12 meses) promediados en base a los datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.

Para el SPI-1 observada, registró 30 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en octubre de 1989 a junio de 1990 que duró 8 meses, la mayor intensidad fue en marzo de 1992 con un valor de -2.74 y con mayor frecuencia de 7(-1.2) de sequía moderada. El SPI-1 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos de sequía y frecuencia, sin embargo, capturó con precisión la duración de sequía y subestimó la intensidad.

Para el SPI-3 observada, registró 25 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en marzo de 1995 a junio de 1996 que duró 15 meses, la mayor intensidad fue en febrero de 1990 con un valor de -2.92 y con mayor frecuencia de 11(-1) de sequía moderada. El SPI-3 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos de sequía, subestimó la duración en 5 meses y la intensidad, sin embargo, capturó con precisión la frecuencia en sequía.

Para el SPI-6 observada, registró 21 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en junio de 1995 a setiembre de 1996 que duró 15 meses, la mayor intensidad ocurrió en febrero de 1990 con un valor de -3.40 y una mayor frecuencia de 12(-1.3) de sequía moderada. El SPI-6 de PERSIANN-CDR sobreestimó la duración, intensidad y la frecuencia de sequía, por otro lado, subestimó al número de eventos de sequía.

Para el SPI-12 observada, registró 9 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en enero de 2009 a setiembre de 2011 que duró 32 meses, la mayor

intensidad ocurrió en mayo de 1990 con un valor de -3.35 y con mayor frecuencia de 10(-1.2) de sequía moderada. El SPI-12 de PERSIANN-CDR sobreestimó la duración en 40 meses e intensidad de sequía, por otro lado, subestimó al número de eventos de sequía y capturó con precisión la frecuencia en sequía.

**Tabla 14**

*Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 1*

| SPI    | Precipitación | N° de eventos | Duración máxima | Intensidad máxima | Frecuencia máxima |
|--------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| SPI-1  | Observada     | 30            | 8               | -2.74             | 7 (-1.2)          |
|        | PERSIANN-CDR  | 47            | 8               | -2.80             | 9 (-1.1)          |
| SPI-3  | Observada     | 25            | 15              | -2.92             | 11 (-1)           |
|        | PERSIANN-CDR  | 26            | 10              | -3.12             | 11 (-1.1)         |
| SPI-6  | Observada     | 21            | 15              | -3.40             | 12 (-1.3)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 16            | 23              | -3.30             | 15 (-1.2)         |
| SPI-12 | Observada     | 9             | 32              | -3.35             | 10 (-1.2)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 4             | 72              | -3.10             | 10 (-1.0)         |

En la Tabla 15, se resume los resultados de la caracterización de las sequías utilizando valores de SPI (1, 3, 6 y 12 meses) promediados en base a los datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.

Para el SPI-1 observada, registró 51 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en octubre de 1989 a mayo de 1990 que duró 7 meses, la mayor intensidad fue en diciembre de 1998 con un valor de -2.53 y con mayor frecuencia de 13(-1.4) de sequía moderada. El SPI-1 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos de sequía y subestimó la frecuencia, sin embargo, capturó con precisión la duración y la intensidad de la sequía.



Para el SPI-3 observada, registró 28 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en febrero de 1998 a marzo de 1999 que duró 13 meses, la mayor intensidad fue en marzo de 1983 con un valor de -2.91 y con mayor frecuencia de 10(-1.2) de sequía moderada. El SPI-3 de PERSIANN-CDR sobreestimó de 2 meses la duración, la intensidad y la frecuencia de la sequía, por otro lado, subestimó al número de eventos de sequía.

Para el SPI-6 observada, registró 17 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en julio de 2008 a noviembre de 2009 que duró 16 meses, la mayor intensidad ocurrió en setiembre de 2008 con un valor de -2.89 y con mayor frecuencia 10(-1.1) de sequía moderada. El SPI-6 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos, la duración, la intensidad y la frecuencia de la sequía.

Para el SPI-12 observada, registró 9 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en febrero de 1992 a octubre de 1993 que duró 20 meses, la mayor intensidad ocurrió en diciembre de 1983 con un valor de -2.54 y con mayor frecuencia 9(-1.3) de sequía moderada. El SPI-12 de PERSIANN-CDR sobreestimó la duración en 16 meses, la intensidad y la frecuencia de la sequía, por otro lado, subestimó al número de eventos de sequía.

**Tabla 15***Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 2*

| SPI    | Precipitación | N° de eventos | Duración máxima | Intensidad máxima | Frecuencia máxima |
|--------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| SPI-1  | Observada     | 51            | 7               | -2.53             | 13 (-1.4)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 55            | 7               | -2.53             | 12 (-1.1)         |
| SPI-3  | Observada     | 28            | 13              | -2.91             | 10 (-1.2)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 24            | 15              | -2.47             | 14 (-1.1)         |
| SPI-6  | Observada     | 17            | 16              | -2.89             | 10 (-1.1)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 19            | 18              | -2.56             | 16 (-1)           |
| SPI-12 | Observada     | 9             | 20              | -2.54             | 9 (-1.3)          |
|        | PERSIANN-CDR  | 7             | 36              | -2.52             | 14 (-1)           |

En la Tabla 16, se resume los resultados de la caracterización de las sequías utilizando valores de SPI (1, 3, 6 y 12 meses) promediados en base a los datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.

Para el SPI-1 observada, registró 38 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en agosto de 1991 a junio de 1992 que duró 10 meses, la mayor intensidad fue en abril de 2008 con un valor de -2.90 y con mayor frecuencia de 17(-1) de sequía moderada. El SPI-1 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos e intensidad de la sequía, sin embargo, subestimó la duración en dos meses y la frecuencia de la sequía.

Para el SPI-3 observada, registró 28 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en agosto de 1994 a enero de 1996 que duró 17 meses, la mayor intensidad ocurrió en marzo de 1983 con un valor de -3.03 y con mayor frecuencia de 12(-1) de sequía moderada. El SPI-3 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos e intensidad de la sequía, por otro lado, subestimó la duración en tres meses y la frecuencia de la sequía.

Para el SPI-6 observada, registró 22 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en octubre de 1994 a enero de 1996 que duró 15 meses, la mayor intensidad ocurrió en setiembre de 2008 con un valor de -2.97 y con mayor frecuencia 13(-1.1) de sequía moderada. El SPI-6 de PERSIANN-CDR sobreestimó la duración en 2 meses e intensidad de la sequía, por otro lado, subestimó levemente al número de eventos de sequía y capturó con precisión la frecuencia.

Para el SPI-12 observada, registró 10 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en febrero de 1992 a noviembre de 1993 y abril de 2008 a enero de 2010 que duró 21 meses respectivamente, la mayor intensidad ocurrió en octubre de 1992 con un valor de -2.88 y con mayor frecuencia 15(-1) de sequía moderada. SPI-12 de PERSIANN-CDR sobreestimó significativamente la duración e intensidad de la sequía, por otro lado, subestimó al número de eventos y frecuencia de la sequía.

### Tabla 16

*Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 3*

| SPI    | Precipitación | N° de eventos | Duración máxima | Intensidad máxima | Frecuencia máxima |
|--------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| SPI-1  | Observada     | 38            | 10              | -2.90             | 17 (-1)           |
|        | PERSIANN-CDR  | 49            | 8               | -2.35             | 15 (-1)           |
| SPI-3  | Observada     | 28            | 17              | -3.03             | 12 (-1)           |
|        | PERSIANN-CDR  | 29            | 10              | -2.31             | 11 (-1.2)         |
| SPI-6  | Observada     | 22            | 15              | -2.97             | 13 (-1.1)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 21            | 17              | -2.35             | 13 (-1.0)         |
| SPI-12 | Observada     | 10            | 21              | -2.88             | 15 (-1)           |
|        | PERSIANN-CDR  | 6             | 64              | -2.53             | 14 (-1)           |



En la Tabla 17, se resumen los resultados de la caracterización de las sequías utilizando valores de SPI (1, 3, 6 y 12 meses) promediados en base a los datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.

Para el SPI-1 observada, registró 52 eventos de sequía, la mayor duración ocurrió en agosto de 1988 a marzo de 1989 y marzo a octubre de 2005 que duró 7 meses respectivamente, la mayor intensidad ocurrió en mayo de 1998 con un valor de -2.88 y con mayor frecuencia 13(-1.1) de sequía moderada. El SPI-1 de PERSIANN-CDR sobreestimó la duración en tres meses, la intensidad y frecuencia de la sequía, además, subestimó significativa al número de eventos de sequía.

Para el SPI-3 observada, registró 25 eventos de sequía, la mayor duración se suscitó en junio de 2010 a setiembre de 2011 que duró 15 meses, la mayor intensidad fue en diciembre de 1983 con un valor de -2.77 y con mayor frecuencia 9(-1.1) de sequía moderada. PERSIANN-CDR sobreestimó la duración en un mes, la intensidad, al número de eventos y la frecuencia de la sequía.

Para el SPI-6 observada, registró 17 eventos de sequía, la mayor duración se suscitó en marzo de 2008 a enero de 2010 que duró 22 meses, la mayor intensidad fue en setiembre de 2010 con un valor de -2.71 y con mayor frecuencia 19(-1) de sequía moderada. El SPI-6 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos, la duración y la intensidad de la sequía, por otro lado, subestimó la frecuencia.

Para el SPI-12 observada, registró 6 eventos de sequía, la mayor duración se suscitó en enero de 2007 a abril de 2012 que duró 63 meses, la mayor intensidad fue en mayo de 1989 con un valor de -1.92 y con mayor frecuencia 14(-1.5) de

sequía severa. El SPI-12 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos y la frecuencia de la sequía, por otro lado, subestimó en 33 meses de duración y la intensidad de la sequía.

**Tabla 17**

*Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 4*

| SPI    | Precipitación | N° de eventos | Duración máxima | Intensidad máxima | Frecuencia máxima |
|--------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| SPI-1  | Observada     | 52            | 7               | -2.88             | 13 (-1.1)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 4             | 10              | -2.77             | 16 (-1.1)         |
| SPI-3  | Observada     | 25            | 15              | -2.77             | 9 (-1.1)          |
|        | PERSIANN-CDR  | 30            | 16              | -2.53             | 13 (-1.2)         |
| SPI-6  | Observada     | 17            | 22              | -2.71             | 19 (-1)           |
|        | PERSIANN-CDR  | 19            | 34              | -2.12             | 16 (-1.1)         |
| SPI-12 | Observada     | 6             | 63              | -1.92             | 14 (-1.5)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 9             | 30              | -2.27             | 18 (-1.1)         |

En la Tabla 18, se resume los resultados de la caracterización de las sequías utilizando valores de SPI (1, 3, 6 y 12 meses) promediados en base a los datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR.

Para el SPI-1 observada, registró 45 eventos de sequía, la mayor duración se suscitó en abril a noviembre de 1995 y marzo a octubre de 2008 que duró 7 meses respectivamente, la mayor intensidad fue en diciembre de 1998 con un valor de -3.08 y con mayor frecuencia de 14(-1.4) de sequía moderada. El SPI-1 de PERSIANN-CDR sobreestimó la duración en 3 meses, al número de eventos, la intensidad y la frecuencia de la sequía.

Para el SPI-3 observada, registró 23 eventos de sequía, la mayor duración se suscitó en diciembre de 2007 a diciembre de 2008 que duró 12 meses, la mayor intensidad fue en agosto de 2008 con un valor de -2.55 y con mayor frecuencia

10(-1.1) de sequía moderada. El SPI-3 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos, la intensidad y la frecuencia de la sequía, por otro lado, subestimó la duración en 2 meses de sequía.

Para el SPI-6 observada, registró 16 eventos de sequía, la mayor duración se suscitó en setiembre de 1995 a enero de 1997 que duró 16 meses, la mayor intensidad fue en setiembre de 2008 con un valor de -2.61 y con mayor frecuencia 9(-1.2) de sequía moderada. El SPI-6 de PERSIANN-CDR sobreestimó al número de eventos, la duración, la intensidad y la frecuencia de la sequía.

Para el SPI-12 observada, registró 8 eventos de sequía, la mayor duración se suscitó en abril de 2008 a diciembre de 2011 que duró 44 meses, la mayor intensidad fue en diciembre de 1983 con un valor de -2.51 y con mayor frecuencia 18(-1) de sequía moderada. SPI-12 de PERSIANN-CDR sobrestimó la intensidad y subestimó al número de eventos, la duración, y la frecuencia de la sequía.

**Tabla 18**

*Caracterización de las sequías basados en SPI (1, 3, 6 y 12), región 5*

| SPI    | Precipitación | N° de eventos | Duración máxima | Intensidad máxima | Frecuencia máxima |
|--------|---------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| SPI-1  | Observada     | 45            | 7               | -3.08             | 14 (-1.4)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 49            | 10              | -2.40             | 16 (-1)           |
| SPI-3  | Observada     | 23            | 12              | -2.55             | 10 (-1.1)         |
|        | PERSIANN-CDR  | 30            | 10              | -2.29             | 17 (-1-1)         |
| SPI-6  | Observada     | 16            | 16              | -2.61             | 9 (-1.2)          |
|        | PERSIANN-CDR  | 17            | 23              | -2.13             | 16 (-1.2)         |
| SPI-12 | Observada     | 8             | 44              | -2.51             | 18 (-1)           |
|        | PERSIANN-CDR  | 7             | 34              | -2.03             | 13 -1)            |

#### 4.3. EVALUACIÓN ESPACIAL Y EL COMPORTAMIENTO DE LA SEQUÍA

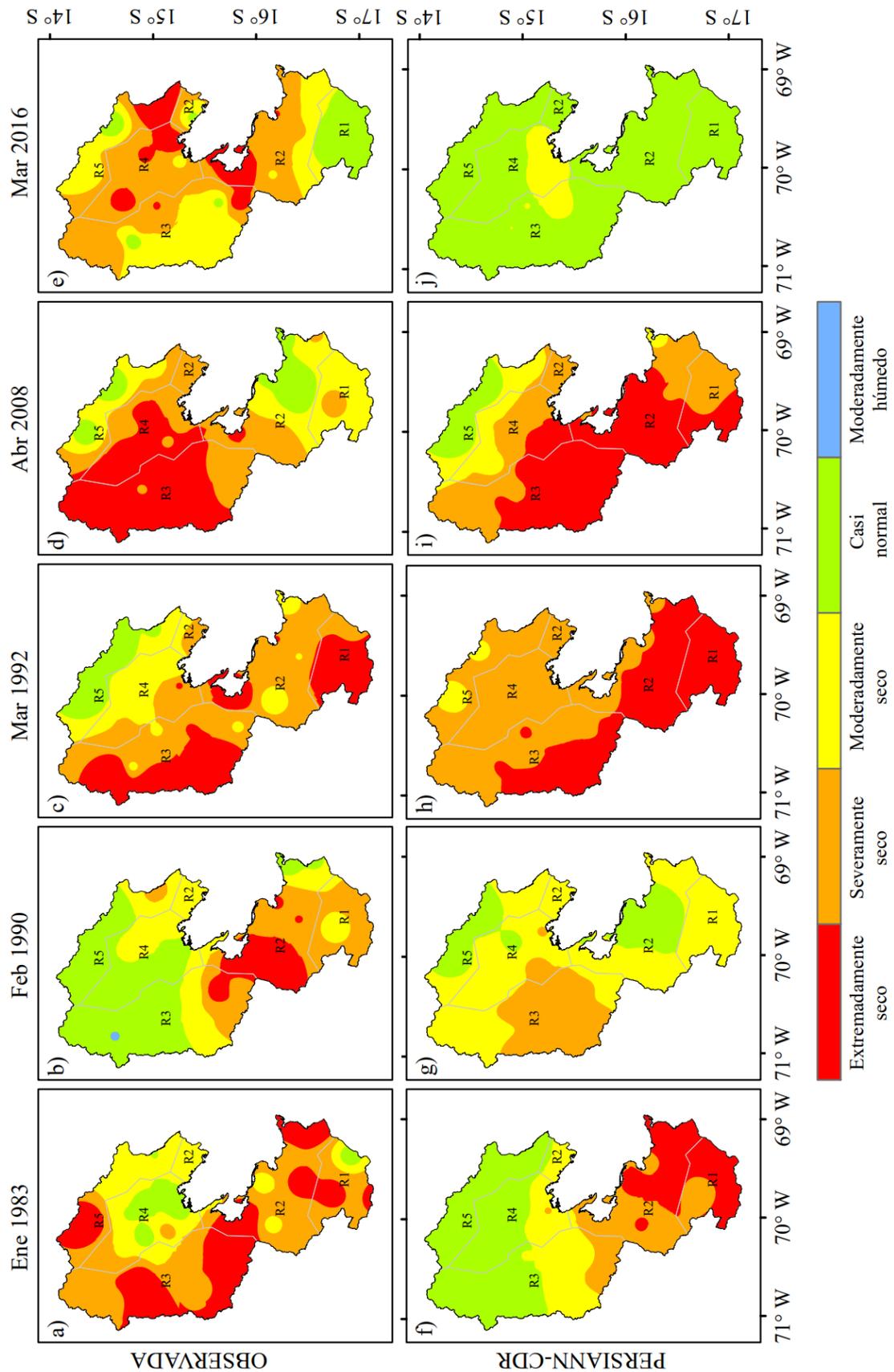
La Figura 30 muestra la distribución espacial de los valores del SPI-1 basados en precipitación observada y PERSIANN-CDR, para los años 1983/01, 1990/02, 1992/03, 2008/04 y 2016/03, que representan los años con mayores altos de índice de sequía, por punto de estación. Los resultados se obtuvieron mediante el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) para las cinco regiones de la cuenca.

El SPI de PERSIANN-CDR concuerda bien en términos de sequía extrema a severa R1 y R2, sin embargo, sobreestimó en R3, R4 y R5 capturando sequía moderada y reflejando condición normal en la parte norte de la cuenca (Figura 30 (f)). En febrero de 1990, PERSIANN-CDR sobreestima el área de cobertura de sequía moderada en R1 y R2, sin embargo, concuerda bien en términos de sequía moderada y casi normal en R4 y una subestimación de la sequía moderada a severa en R3 y R5 (Figura 30 (g)).

Marzo de 1992, el SPI de PERSIANN-CDR concuerda bien en términos de sequía extrema en R1 y sequía severa a extrema en R3 y una subestimación de la sequía extrema en R2 y sequía severa en R4 y R5 (Figura 30 (h)). Abril de 2008, PERSIANN-CDR subestimó en R1 y R2 capturando simultáneamente una sequía severa y extrema, sin embargo, concuerda bien en términos del patrón espacial de las sequías R3 y R4, luego la sequía disminuyó gradualmente hacia el norte en R5 (Figura 30 (i)). En marzo de 2016, el SPI de PERSIANN-CDR reflejan grandes áreas de condición normal, sobreestimando en R2, R3, R4 y R5, sin embargo, concuerda bien en R1 (Figura 30 (j)).

**Figura 30**

*Distribución espacial mensual de los valores SPI-1*



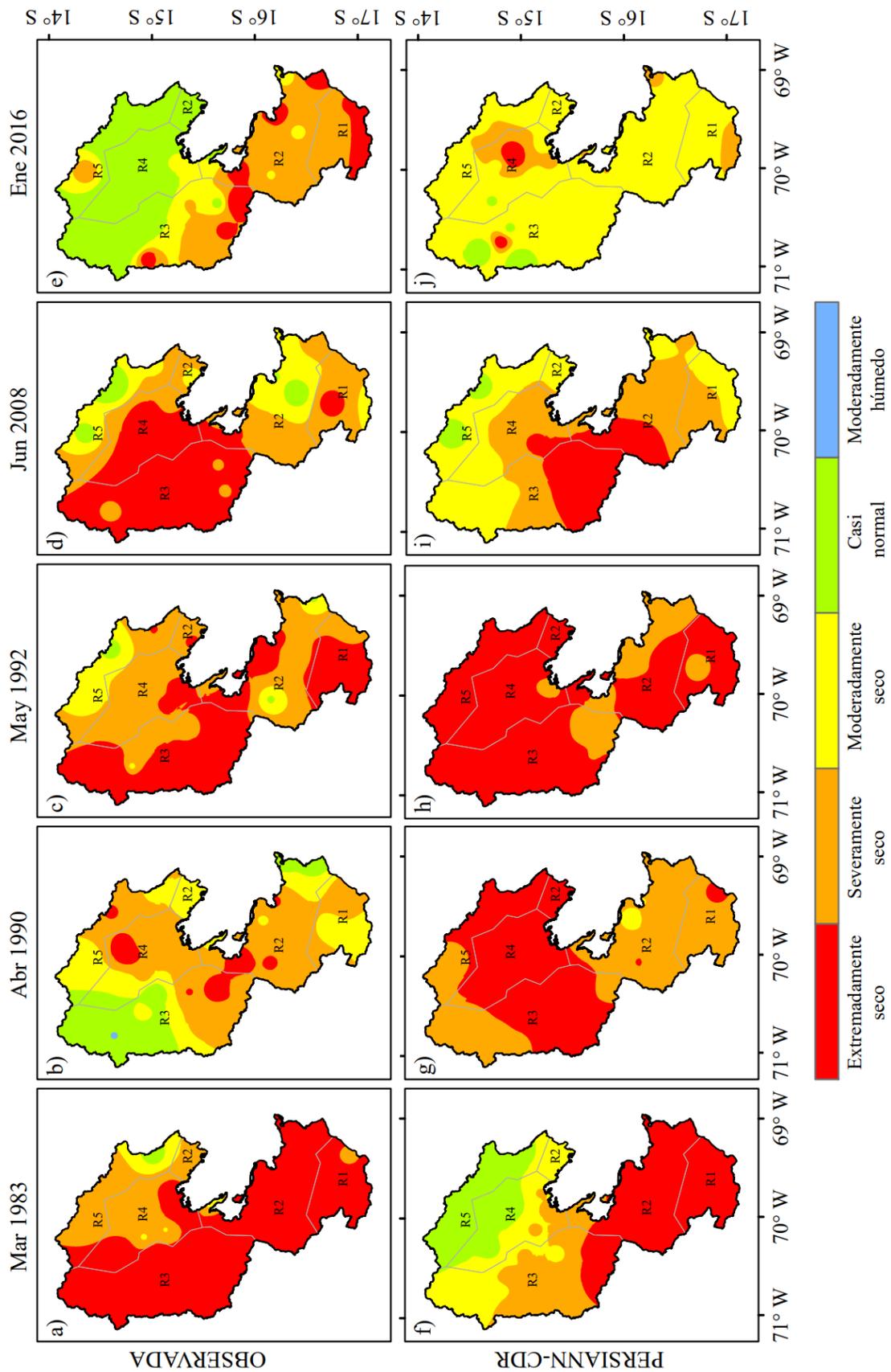
La Figura 31 muestra la distribución espacial de los valores del SPI-3 basados en precipitación observada y PERSIANN-CDR, para los años 1983/03, 1990/04, 1992/05, 2008/06 y 2016/01, que representan los años con mayores altos de índice de sequía, por punto de estación. Los resultados se obtuvieron mediante el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) para las cinco regiones de la cuenca.

El SPI de PERSIANN-CDR concuerda bien en términos de sequía extrema en R1 y R2, sin embargo, sobreestimó en áreas de cobertura de sequía severa, sequía moderada y reflejando condición normal en R3, R4 y R5 respectivamente (Figura 31 (f)). En abril de 1990, PERSIANN-CDR muestra grandes áreas de sequía severa e incluso sequía extrema, sobreestimando en toda la CLT (Figura 31 (g)). Mayo de 1992, el SPI de PERSIANN-CDR concuerda bien en términos de sequía extrema en R1 y R3, sin embargo, PERSIANN-CDR capturó sequía extrema que se expandió hacia el norte y se subestimó significativamente en R2, R4 y R5 (Figura 31 (h)).

Junio de 2008, el SPI de PERSIANN-CDR identifica claramente el área de sequía extrema en el centro de R2 y R3, con un cierto grado de sobreestimación en la parte sur y norte de sequía moderada (Figura 31 (i)). En enero de 2016, el SPI de PERSIANN-CDR identifica grandes áreas de sequía moderada, sobreestimando en la parte sur y subestimando en la parte norte (Figura 31 (j)).

**Figura 31**

*Distribución espacial mensual de los valores SPI-3*



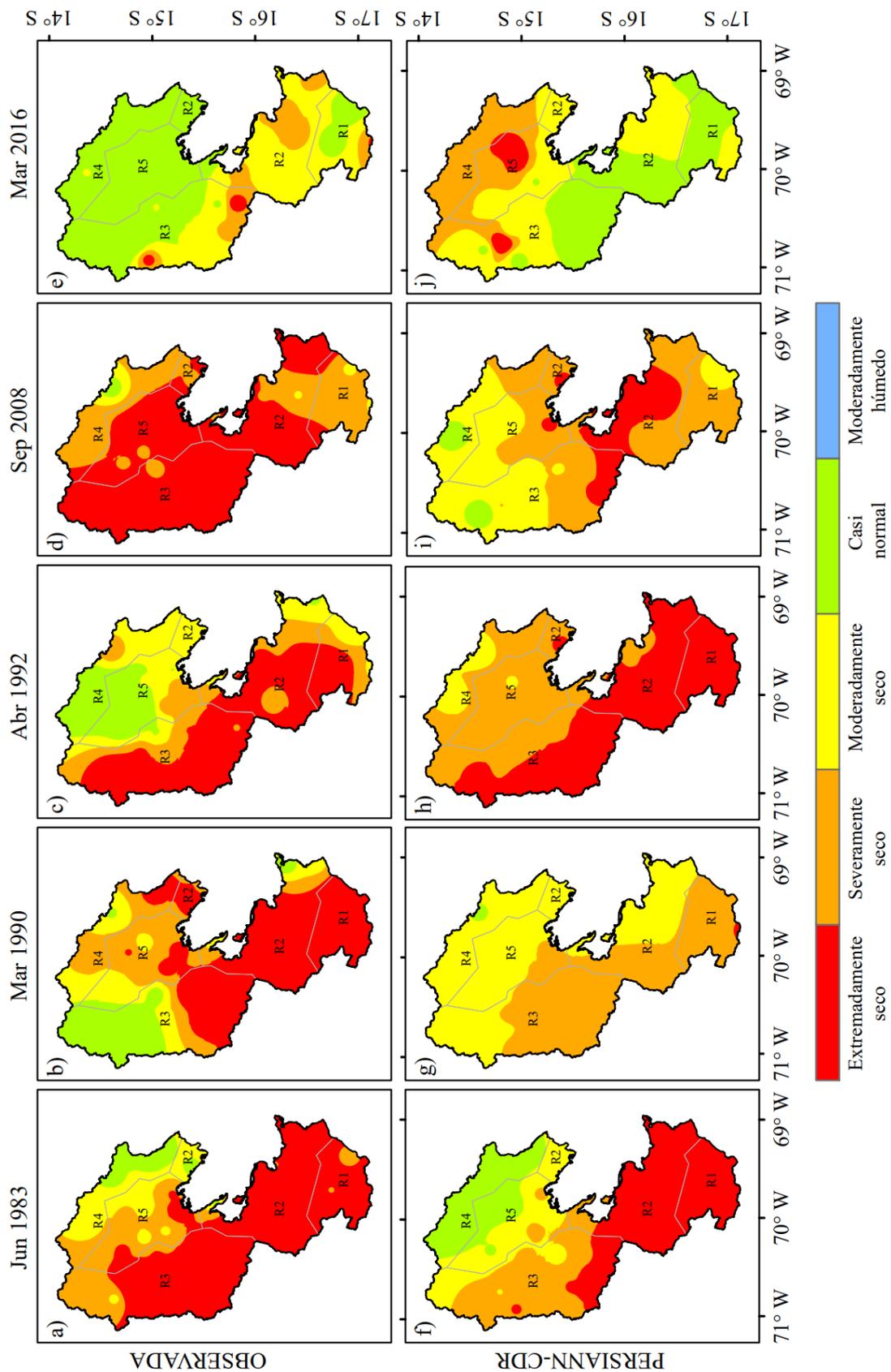
La Figura 32 muestra la distribución espacial de los valores del SPI-6 basados en precipitación observada y PERSIANN-CDR, para los años 1983/06, 1990/03, 1992/04, 2008/07 y 2016/03, que representan los años con mayores altos de índice de sequía, por punto de estación. Los resultados se obtuvieron mediante el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) para las cinco regiones de la cuenca.

El SPI de PERSIANN-CDR concuerda bien en términos de sequía extrema en R1 y R2, sin embargo, sobreestimó en áreas de cobertura de sequía severa en R3, sequía moderada en R5 y reflejan condición normal en R4 (Figura 32 (f)). En marzo de 1990, PERSIANN-CDR sobreestimó en R1 y R2 de sequía severa y moderada, sin embargo, en R3 capturó sequía severa y al norte sequía moderada afectando a la R4 y R5 (Figura 32 (g)). Abril de 1992, el SPI de PERSIANN-CDR concuerda bien en términos de sequía extrema en R1, R2 y R3, sin embargo, PERSIANN-CDR capturó sequía severa en R4 y R5 que subestimó significativamente (Figura 32 (h)).

Setiembre de 2008, el SPI de PERSIANN-CDR identifica claramente el área de sequía extrema entre R2 y R3, sin embargo, hacia el norte identificó sequía moderada afectando las R3, R4 y R5, con un cierto grado de sobreestimación en R1 de sequía severa (Figura 32 (i)). En marzo de 2016, el SPI de PERSIANN-CDR refleja condición normal entre las R1, R2 y R3, con un cierto grado de subestimación en la parte norte de sequía severa (Figura 32 (j)).

**Figura 32**

*Distribución espacial mensual de los valores SPI-6*



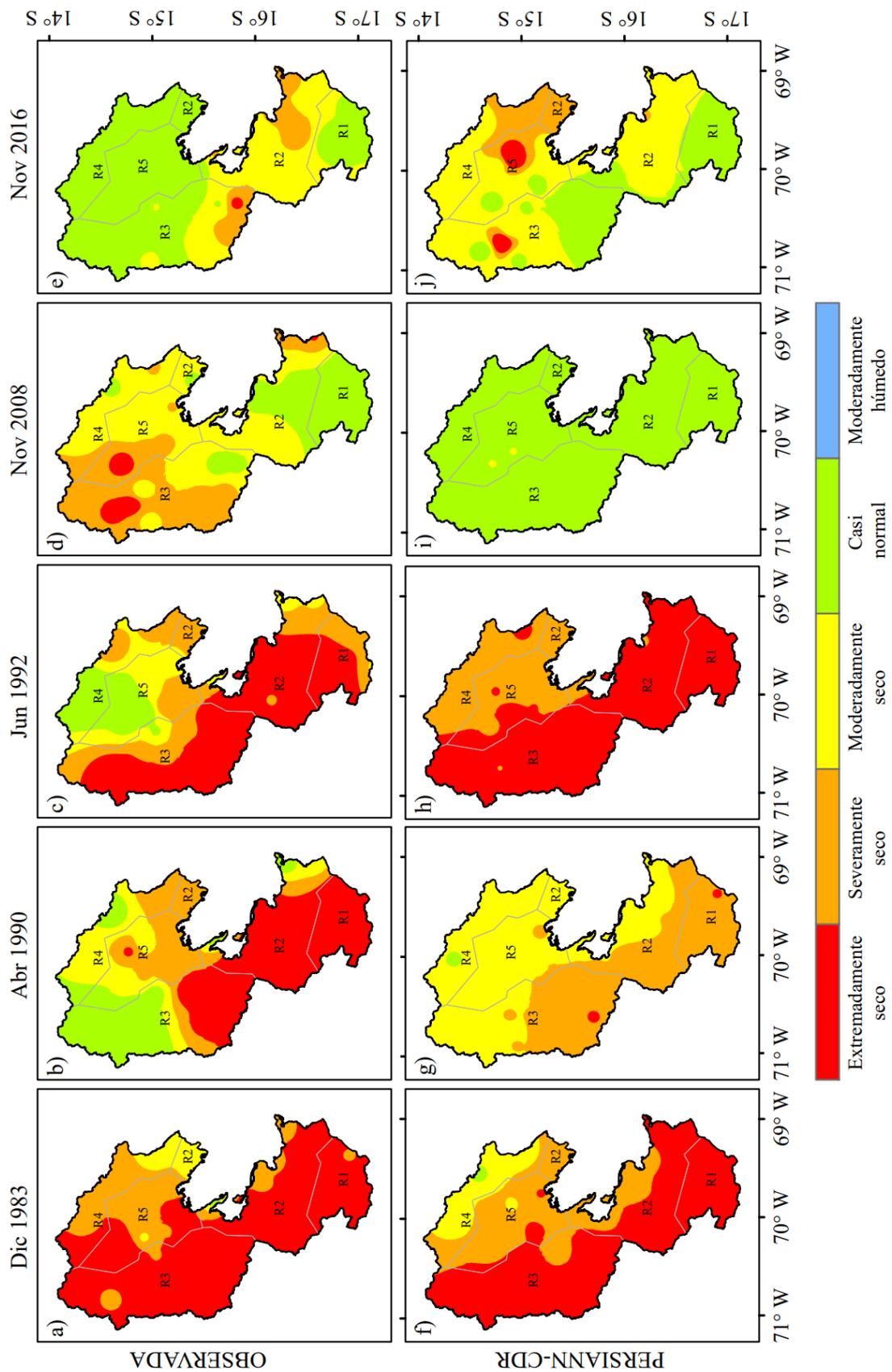
La Figura 33 muestra la distribución espacial de los valores del SPI-12 basados en precipitación observada y PERSIANN-CDR, para los años 1983/12, 1990/04, 1992/06, 2008/11 y 2016/11, que representan los años con mayores altos de índice de sequía, por punto de estación. Los resultados se obtuvieron mediante el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) para las cinco regiones de la cuenca.

El SPI de PERSIANN-CDR concuerda bien en términos del patrón espacial de las sequías en R1, R2 y R3 con lo observado, no obstante, en R4 y R5 sobrestimó a los valores de SPI observado de sequía severa a moderada (Figura 33 (f)). En abril de 1990, PERSIANN-CDR identifica claramente eventos de sequía severa entre las R1, R2 y R3, por el norte capturó sequía moderada entre las R3, R4 y R5 sobreestimando a los valores de SPI observada (Figura 33 (g)). Junio de 1992, el SPI de PERSIANN-CDR identifica claramente el área de sequía extrema en R1, R2 y R3 y la sequía severa en el norte de R4 y R5 subestimando a los valores de SPI observada (Figura 33 (h)).

Noviembre de 2008, el SPI de PERSIANN-CDR refleja condición normal en toda la cuenca, sobreestimando en las R2, R3, R4 y R5 y concuerda bien en términos de patrón espacial en R1 (Figura 33 (i)). En noviembre de 2016, el SPI de PERSIANN-CDR concuerda bien en R1 y R2 que refleja condición normal y sequía moderada respectivamente, subestimando en la R3, R4 y R5 capturando sequía moderada (Figura 33 (j)).

**Figura 33**

*Distribución espacial mensual de los valores SPI-12*



#### 4.4. DISCUSIÓN

Para evaluar los datos de precipitación de PERSIANN-CDR frente a la precipitación observada convencionalmente, existen técnicas de interpolación espacial, como la IDW y el método Kriging (R. Wang et al., 2017). Sin embargo, estos métodos de interpolación pueden inducir grandes incertidumbres y errores (Hofstra et al., 2010; Mair & Fares, 2010). Por lo tanto, para evitar errores e incertidumbres se evaluó a una escala punto de estación sin utilizar ninguna técnica de interpolación (Guo et al., 2022; Nguyen et al., 2019). En ese contexto, estudios previos demostraron el buen desempeño del producto satelital PERSIANN-CDR en la CLT y en términos de CC obtuvo mayores valores a 0.70 y RMSE 29.0-83.2 mm/mes a una escala mensual (Lujano et al., 2023). Sin embargo, los resultados de esta investigación también se obtuvieron valores de  $CC > 0.80$  y RMSE 28.0-83.0 mm/mes demostrando un desempeño óptimo. PERSIANN-CDR sobrestimó la precipitación en la mayoría de las estaciones y subestimó la estación JUL.

Muchos estudios previos evidenciaron la caracterización de la sequía meteorológica en diferentes escalas de tiempo mediante el SPI. Por lo que la precipitación media mensual estuvo por debajo de lo normal generando sequías extremas en los años 1983, 1990, 1992, 2008, 2010 y 2016 (Condori-Apaza et al., 2021; Correa et al., 2021; Cruz-Chagua, 2021; Endara et al., 2019; Zubieta et al., 2021). No obstante, en esta investigación el producto PERSIANN-CDR también evidenció los años de sequías extremas en los años 1983, 1990, 1992, 2008 y 2016.

Sin embargo, muchos estudios previos han demostrado que el producto PERSIANN-CDR puede usarse como una fuente alternativa para caracterizar la sequía, en diferentes partes del mundo así los autores sostienen (Alijanian et al., 2019; Brito et al., 2021; Guo et al., 2016; Nguyen et al., 2019; Sobral et al., 2020; Yang et al., 2022).

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados encontrados se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se evaluó los datos de precipitación satelital PERSIANN-CDR comparados con los datos de precipitación observada son altamente confiables para la caracterización de sequía meteorológicas, ya que alcanzaron valores superiores a ( $CC > 0.80$ ) y errores menores a ( $MAE < 30$  mm/mes y  $RMSE < 40$  mm/mes). PERSIANN-CDR sobrestimó la precipitación en la mayoría de las estaciones y subestimó en la estación JUL y TYU.
- Se evaluó el comportamiento temporal de la sequía meteorológica el producto satelital PERSIANN-CDR permitió cuantificar la temporalidad de las sequías meteorológicas. Los valores de SPI en múltiples de escalas de tiempo a partir de PERSIANN-CDR mostró mayores concordancias en la R2 y R3 alcanzando valores de CC fuerte (0.74), MAE bajo (0.50 mm/mes) y RMSE bajo (0.65 mm/mes) y en la R1, R5 y R4 mostró resultados satisfactorios alcanzando valores de CC (0.59), MAE menor (0.64 mm/mes) y RMSE menor (0.82 mm/mes) comparados con los valores de SPI observada. Es decir, el rendimiento del SPI basado en PERSIANN-CDR era adecuado en comparación con el SPI basado en observaciones para detectar la ocurrencia y las características de los eventos de sequía.
- PERSIANN-CDR representa adecuadamente la variabilidad espacial de la sequía meteorológica, principalmente en el extremo sur, centro y noreste donde alcanzó valores de SPI similares a los valores observados. Además, PERSIANN-CDR mostró los años históricos de sequías conocidos 1983, 1990, 1992, 2008 y 2016.



## VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios sobre los productos de precipitación satelital como CHIRPS y MSWEP utilizando múltiples índices de sequía, con la finalidad de conocer y entender la variabilidad espacio-temporal de las sequías bajo diferentes condiciones climáticas en la CLT.
- Este estudio es una herramienta muy valiosa para los tomadores de decisión, los resultados de este estudio podrían proporcionar información valiosa de considerar PERSIANN-CDR como un conjunto de datos para diversos estudios, se recomienda realizar estudios sobre la sequía hidrológica, agrícola y socioeconómica.
- Además, los resultados de este estudio también pueden ayudar a los desarrolladores de algoritmos a mejorar el rendimiento de los algoritmos de generación de PERSIANN-CDR.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agutu, N. O., Awange, J. L., Zerihun, A., Ndehedehe, C. E., Kuhn, M., & Fukuda, Y. (2017). Assessing multi-satellite remote sensing, reanalysis, and land surface models' products in characterizing agricultural drought in East Africa. *Remote Sensing of Environment*, 194, 287–302. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.03.041>
- Alijanian, M., Rakhshandehroo, G. R., Mishra, A., & Dehghani, M. (2019). Evaluation of remotely sensed precipitation estimates using PERSIANN-CDR and MSWEP for spatio-temporal drought assessment over Iran. *Journal of Hydrology*, 579, 124189. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124189>
- ANA. (2015). *Manual del software TREND pruebas estadísticas de series de tiempo hidrológicas*.
- Aparicio-Mijares, F. Javier. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Noriega.
- Ashouri, H., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., Nelson, B. R., & Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1), 69–83. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>
- Aziz, A., Umar, M., Mansha, M., Khan, M. S., Javed, M. N., Gao, H., Farhan, S. Bin, Iqbal, I., & Abdullah, S. (2018). Assessment of drought conditions using HJ-1A/1B data: a case study of Potohar region, Pakistan. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 1019–1036. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1499558>
- Bai, X., Wu, X., & Wang, P. (2019). Blending long-term satellite-based precipitation data with gauge observations for drought monitoring: Considering effects of different gauge densities. *Journal of Hydrology*, 577, 124007. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124007>
- Bayissa, Y., Tadesse, T., Demisse, G., & Shiferaw, A. (2017). Evaluation of Satellite-Based Rainfall Estimates and Application to Monitor Meteorological Drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Remote Sensing 2017, Vol. 9, Page 669*, 9(7), 669. <https://doi.org/10.3390/RS9070669>



- Bras, R. L. (1990). *Hydrology : an introduction to hydrologic science* / Rafael L. Bras. *Hydrology : An Introduction to Hydrologic Science*.
- Brito, C. S. de, Silva, R. M. da, Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., & Coelho, V. H. R. (2021). Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. *Atmospheric Research*, 250, 105380. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2020.105380>
- Castro, A., Davila, C., Laura, W., Cubas, F., Avalos, G., López-Ocaña, C., Villena, D., Valdez, M., Urbiola, J., Trebejo, I., Menis, L., & Marín, D. (2021). *CLIMAS DEL PERÚ-Mapa de Clasificación Climática Nacional*.
- CEIWR-HEC. (1971). *HEC-4 Monthly Streamflow Simulation User's Manual CPD-4 Generalized Computer Program*.
- Chiew, F., & Siriwardena, L. (2005). *Trend/change detection software*.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada* (M. E. Suarez R., Ed.; NOMOS S.A., Issues 0-07-010810-2).
- Condori-Apaza, V., Mamani-Luque, O. R., Alfaro-Alejo, R., Laqui, W., & Condori, W. F. (2021). Analysis and impact of meteorological droughts in the agriculture of Puno region, Peru. *E3S Web of Conferences*, 304. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130403002>
- Correa, K., Castro, V., Rodriguez, A., Cubas, F., Avalos, G., Quispe, N., Quispe, K., & Barreto, C. (2021). *Caracterización de sequías meteorológicas*.
- Cruz-Chagua, G. N. (2021). *Análisis de sequías meteorológicas, utilizando el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), en el periodo (1964 - 2018) en la Región de Puno*.
- Curi-Tapahuasco, S. (2017). *Caracterización de las sequías hidrológicas en la vertiente peruana del Océano Pacífico*.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65. <https://doi.org/10.1002/WCC.81>



- Dandridge, C., Lakshmi, V., Bolten, J., & Srinivasan, R. (2019). Evaluation of Satellite-Based Rainfall Estimates in the Lower Mekong River Basin (Southeast Asia). *Remote Sensing 2019*, Vol. 11, Page 2709, 11(22), 2709. <https://doi.org/10.3390/RS11222709>
- Das, P., Zhang, Z., & Ren, H. (2022). *Evaluating the accuracy of two satellite-based Quantitative Precipitation Estimation products and their application for meteorological drought monitoring over the Lake Victoria Basin, East Africa*. 25(3), 500–518. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2054731>
- Endara, S., Acuña, J., Vega, F., Febre, C., Correa, K., & Ávalos, G. (2019). *Caracterización espacio-temporal sequía departamentos altoandinos Perú 2019*.
- Fernández-Larrañaga, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. *Ingeniería Del Agua*, 4(4). <https://doi.org/10.4995/IA.1997.2734>
- Gálvez-Ayala, P. E. (2017). *Caracterización de las sequías históricas y proyectadas bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Mantaro*.
- Gebrechorkos, S. H., Bernhofer, C., & Hülsmann, S. (2019). Impacts of projected change in climate on water balance in basins of East Africa. *Science of The Total Environment*, 682, 160–170. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.05.053>
- Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980–2010. *Journal of Hydrology*, 494, 32–42. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2013.04.044>
- Guenang, G. M., & Mkankam Kanga, F. (2014). Computation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and Its Use to Assess Drought Occurrences in Cameroon over Recent Decades. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(10), 2310–2324. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0032.1>
- Guo, H., Bao, A., Liu, T., Chen, S., & Ndayisaba, F. (2016). Evaluation of PERSIANN-CDR for Meteorological Drought Monitoring over China. *Remote Sensing 2016*, Vol. 8, Page 379, 8(5), 379. <https://doi.org/10.3390/RS8050379>
- Guo, H., Li, M., Nzabarinda, V., Bao, A., Meng, X., Zhu, L., & Maeyer, P. De. (2022). Assessment of Three Long-Term Satellite-Based Precipitation Estimates against



- Ground Observations for Drought Characterization in Northwestern China. *Remote Sensing* 2022, Vol. 14, Page 828, 14(4), 828. <https://doi.org/10.3390/RS14040828>
- Hofstra, N., New, M., & McSweeney, C. (2010). The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data. *Climate Dynamics*, 35(5), 841–858. <https://doi.org/10.1007/S00382-009-0698-1/METRICS>
- INEI. (2012). *IV Censo Nacional Agropecuario 2012 (CENAGRO)*.
- Jácome-Mariano, J. J. (2022). *Análisis de las precipitaciones para caracterizar sequías meteorológicas en la subcuenca del río Higuera en el periodo de 1988-2019*.
- Lai, C., Zhong, R., Wang, Z., Wu, X., Chen, X., Wang, P., & Lian, Y. (2019). Monitoring hydrological drought using long-term satellite-based precipitation data. *Science of The Total Environment*, 649, 1198–1208. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.08.245>
- Li, M., Lv, X., Zhu, L., Ochege, F. U., & Guo, H. (2022). Evaluation and Application of MSWEP in Drought Monitoring in Central Asia. *Atmosphere* 2022, Vol. 13, Page 1053, 13(7), 1053. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13071053>
- Liu, X., Zhu, X., Pan, Y., Li, S., Liu, Y., & Ma, Y. (2016). Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, 26(6), 750–767. <https://doi.org/10.1007/S11442-016-1297-9/METRICS>
- Lujano, E., Diaz, R. D., Tapia, B., & Lujano, A. (2023). Evaluación de Productos de Precipitación Satelital sobre la Cuenca del Lago Titicaca. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 38. <https://doi.org/10.1590/0102-778638220078>
- Lujano-Laura, E. (2013). *Caracterización hidroclimática, modelización hidrológica y eventos extremos en las cuencas de los ríos Coata e Ilave*.
- Mair, A., & Fares, A. (2010). Comparison of Rainfall Interpolation Methods in a Mountainous Region of a Tropical Island. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(4), 371–383. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000330)
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (2018). *Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur*.



- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration to time scales*. 17–22.
- Montaseri, M., & Amirataee, B. (2017). Comprehensive stochastic assessment of meteorological drought indices. *International Journal of Climatology*, 37(2), 998–1013. <https://doi.org/10.1002/JOC.4755>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Nguyen, P., Shearer, E. J., Tran, H., Ombadi, M., Hayatbini, N., Palacios, T., Huynh, P., Braithwaite, D., Updegraff, G., Hsu, K., Kuligowski, B., Logan, W. S., & Sorooshian, S. (2019). The CHRS Data Portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Scientific Data 2019 6:1*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296>
- OMM. (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide*.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought U.S. Weather Bur.*
- Pathak, A. A., & Dodamani, B. M. (2020). Comparison of Meteorological Drought Indices for Different Climatic Regions of an Indian River Basin. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56(4), 563–576. <https://doi.org/10.1007/S13143-019-00162-5/METRICS>
- Rahman, K. U., Shang, S., Shahid, M., Wen, Y., & Khan, Z. (2020). Application of a Dynamic Clustered Bayesian Model Averaging (DCBA) Algorithm for Merging Multisatellite Precipitation Products over Pakistan. *Journal of Hydrometeorology*, 21(1), 17–37. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0087.1>
- Rahman, K. U., Shang, S., & Zohaib, M. (2021). Assessment of Merged Satellite Precipitation Datasets in Monitoring Meteorological Drought over Pakistan. *Remote Sensing 2021, Vol. 13, Page 1662*, 13(9), 1662. <https://doi.org/10.3390/RS13091662>
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., & Felipe, O. (2017). Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast.



- International Journal of Climatology*, 37(1), 143–158.  
<https://doi.org/10.1002/JOC.4693>
- Roche, M. A., Bourges, J., Cortes, J., & Mattos, R. (1991). *Climatología e hidrología de la cuenca del lago Titicaca*.
- Sahoo, A. K., Sheffield, J., Pan, M., & Wood, E. F. (2015). Evaluation of the Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought. *Remote Sensing of Environment*, 159, 181–193. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.11.032>
- Shalishe, A., Bhowmick, A., & Elias, K. (2022). Meteorological Drought Monitoring Based on Satellite CHIRPS Product over Gamo Zone, Southern Ethiopia. *Advances in Meteorology*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9323263>
- Shiau, J. T. (2020). Effects of Gamma-Distribution Variations on SPI-Based Stationary and Nonstationary Drought Analyses. *Water Resources Management*, 34(6), 2081–2095. <https://doi.org/10.1007/S11269-020-02548-X/METRICS>
- Shi, L., Feng, P., Wang, B., Liu, D. L., & Yu, Q. (2020). Quantifying future drought change and associated uncertainty in southeastern Australia with multiple potential evapotranspiration models. *Journal of Hydrology*, 590, 125394. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125394>
- Sim, C. H., Gan, F. F., & Chang, T. C. (2005). Outlier Labeling With Boxplot Procedures. *Journal of the American Statistical Association*, 100(470), 642–652. <https://doi.org/10.1198/016214504000001466>
- Sobral, B. S., de Oliveira-Júnior, J. F., Alecrim, F., Gois, G., Muniz-Júnior, J. G., de Bodas Terassi, P. M., Pereira-Júnior, E. R., Lyra, G. B., & Zeri, M. (2020). PERSIANN-CDR based characterization and trend analysis of annual rainfall in Rio De Janeiro State, Brazil. *Atmospheric Research*, 238, 104873. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2020.104873>
- Stocker, T. F. (2013). *Climate change 2013: the physical science basis: summary for policymakers, a report of Working Group I of the IPCC*.



- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. A. (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide*.
- Tabari, H., Marofi, S., Aeni, A., Talaei, P. H., & Mohammadi, K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, *151*(2), 128–136. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2010.09.009>
- Tapoglou, E., Vozinaki, A. E., & Tsanis, I. (2019). Climate Change Impact on the Frequency of Hydrometeorological Extremes in the Island of Crete. *Water* 2019, Vol. 11, Page 587, *11*(3), 587. <https://doi.org/10.3390/W11030587>
- Thavorntam, W., Tantemsapya, N., & Armstrong, L. (2015). A combination of meteorological and satellite-based drought indices in a better drought assessment and forecasting in Northeast Thailand. *Natural Hazards*, *77*(3), 1453–1474. <https://doi.org/10.1007/S11069-014-1501-0/METRICS>
- Valiente, Ó. M. (2001). Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. In *Investigaciones Geográficas*, n° (Vol. 26).
- Vargas-Montes, J. A. (2019). *Estimación de Índice de sequía en la cuenca del río Ichu utilizando datos generados por teledetección - Huancavelica - 2019*.
- Villón-Bejar, M. (2002). *Hidrología*.
- Wang, R., Chen, J., & Wang, X. (2017). Comparison of IMERG Level-3 and TMPA 3B42V7 in Estimating Typhoon-Related Heavy Rain. *Water* 2017, Vol. 9, Page 276, *9*(4), 276. <https://doi.org/10.3390/W9040276>
- Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., Zeng, Z., Lian, Y., & Bai, X. (2018). Climate change enhances the severity and variability of drought in the Pearl River Basin in South China in the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, *249*, 149–162. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.12.077>
- Wilhite, D. A., Glantz, M. H., & And Glantz, M. H. (1985). *Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions*.
- Wu, W., Li, Y., Luo, X., Zhang, Y., Ji, X., & Li, X. (2019). *Performance evaluation of the CHIRPS precipitation dataset and its utility in drought monitoring over Yunnan*



- Province, China. 10(1), 2145–2162.*  
<https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1683082>
- Yang, N., Yu, H., Lu, Y., Zhang, Y., & Zheng, Y. (2022). Evaluating the Applicability of PERSIANN-CDR Products in Drought Monitoring: A Case Study of Long-Term Droughts over Huaihe River Basin, China. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 4460, 14(18), 4460.* <https://doi.org/10.3390/RS14184460>
- Zeng, J., Li, J., Lu, X., Wei, Z., Shangguan, W., Zhang, S., Dai, Y., & Zhang, S. (2022). Assessment of global meteorological, hydrological and agricultural drought under future warming based on CMIP6. *Atmospheric and Oceanic Science Letters, 15(1), 100143.* <https://doi.org/10.1016/J.AOSL.2021.100143>
- Zhong, R., Chen, X., Lai, C., Wang, Z., Lian, Y., Yu, H., & Wu, X. (2019). Drought monitoring utility of satellite-based precipitation products across mainland China. *Journal of Hydrology, 568, 343–359.* <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.10.072>
- Zubieta, R., Molina-Carpio, J., Laqui, W., Sulca, J., & Ilbay, M. (2021). Comparative Analysis of Climate Change Impacts on Meteorological, Hydrological, and Agricultural Droughts in the Lake Titicaca Basin. *Water 2021, Vol. 13, Page 175, 13(2), 175.* <https://doi.org/10.3390/W13020175>



## ANEXOS



### ANEXO 1: Ubicación de las estaciones meteorológicas

| Estación        | Longitud | Latitud  | Región |
|-----------------|----------|----------|--------|
| Pizacoma        | -69.3728 | -16.915  | 1      |
| Mazo Cruz       | -69.7155 | -16.739  | 1      |
| Capazo          | -69.7355 | -17.1877 | 1      |
| Desaguadero     | -69.0404 | -16.5688 | 2      |
| Chilligua       | -69.6313 | -16.4193 | 2      |
| Ilave           | -69.6436 | -16.0847 | 2      |
| Laraqueri       | -70.0666 | -16.1547 | 2      |
| Puno            | -70.0181 | -15.8233 | 2      |
| Capachica       | -69.8321 | -15.6064 | 2      |
| Juli            | -69.4572 | -16.2033 | 2      |
| Tahuaco Yunguyo | -69.0675 | -16.305  | 2      |
| Huaraya Moho    | -69.4914 | -15.3897 | 2      |
| Mañazo          | -70.3389 | -15.8133 | 3      |
| Cabanillas      | -70.3464 | -15.6393 | 3      |
| Lagunillas      | -70.609  | -15.7006 | 3      |
| Lampa           | -70.3648 | -15.3633 | 3      |
| Pampahuta       | -70.6758 | -15.4835 | 3      |
| Ayaviri         | -70.5928 | -14.8811 | 3      |
| Chuquibambilla  | -70.7283 | -14.7964 | 3      |
| Llally          | -70.8981 | -14.9489 | 3      |
| Pucara          | -70.3728 | -15.0336 | 3      |
| Santa Rosa      | -70.7964 | -14.6269 | 3      |
| Cojata          | -69.3556 | -15.0167 | 4      |
| Ananea          | -69.5572 | -14.6043 | 4      |
| Crucero         | -70.0259 | -14.3642 | 4      |
| Arapa           | -70.1182 | -15.1363 | 5      |
| Taraco          | -69.9203 | -15.2558 | 5      |
| Huancane        | -69.7536 | -15.2015 | 5      |
| Muñani          | -69.9518 | -14.7669 | 5      |
| Putina          | -69.868  | -14.9149 | 5      |
| Azangaro        | -70.1907 | -14.9144 | 5      |
| Progreso        | -70.3145 | -14.7156 | 5      |



**ANEXO 2:** Línea de código para generar el diagrama de cajas; ejecutados en el programa de RStudio.

```
#librerías
library(xts)
library(ggplot2)
library(zoo)
library(lattice)

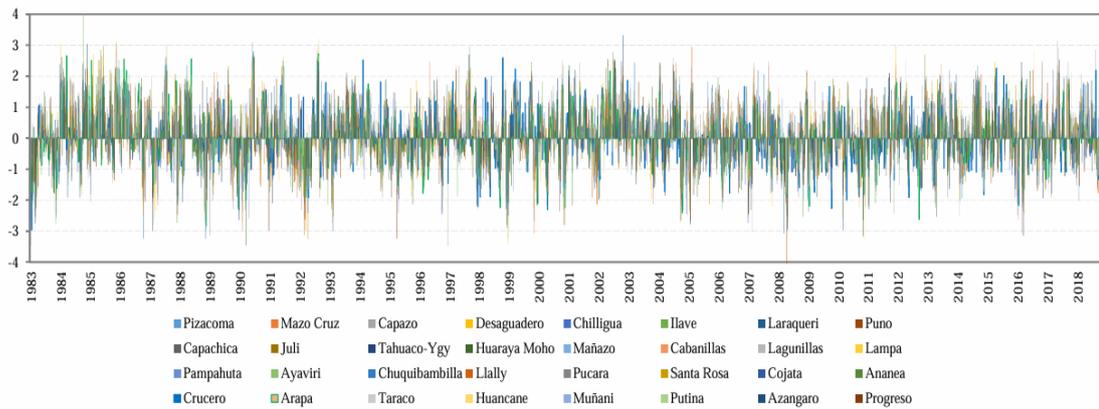
#Importar el directorio de trabajo
pmensual <- read.csv(file.choose(), header = T, check.names = F, stringsAsFactors =
F)
str(pmensual)
idx <- as.Date(pmensual[,1])
data.matrix <- pmensual[,-1]
data.xts <- xts(data.matrix, order.by = idx)
str(data.xts)
plot(data.xts)
plot(data.matrix[,1])

#convirtiendo a un objeto de tipo zoo
data.zoo <- as.zoo(data.xts)
str(data.zoo)

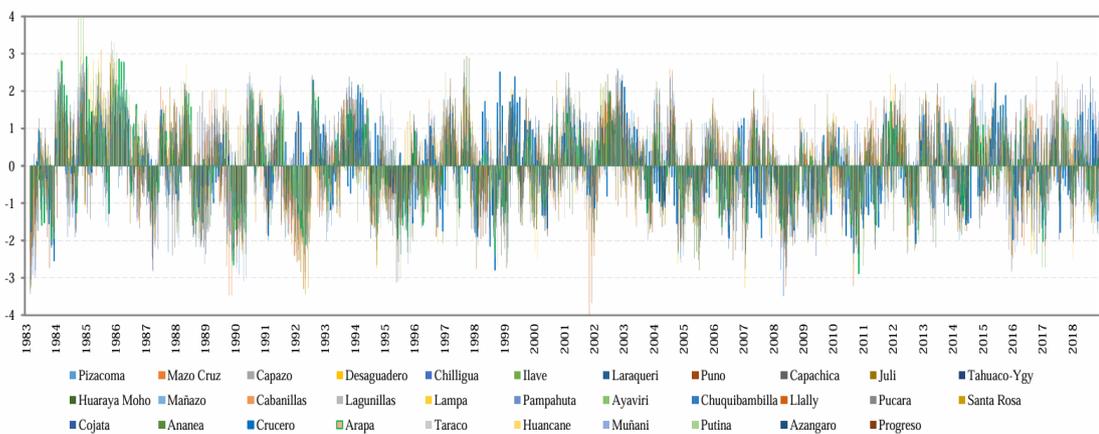
# Imprimir diagrama de cajas
plot(data.zoo, main="series de tiempo de precipitacion", ylim = c(0,80))
xyplot(data.xts, xlab="Fecha", ylab="P(mm/dia)")
autoplot(data.xts[,1:10]) + theme_bw() + xlab("Fecha") + ylab("P(mm/dia)")
boxplot(coredata(data.xts[,1:32]), ylab="Precipitación mensual [mm]",
        boxwex=0.6, las=2, cex.axis=0.6, line = 2,cex=0.6, cex.lab = 0.6, text="Times
New Roman')
```

### ANEXO 3: Valores estimados de Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)

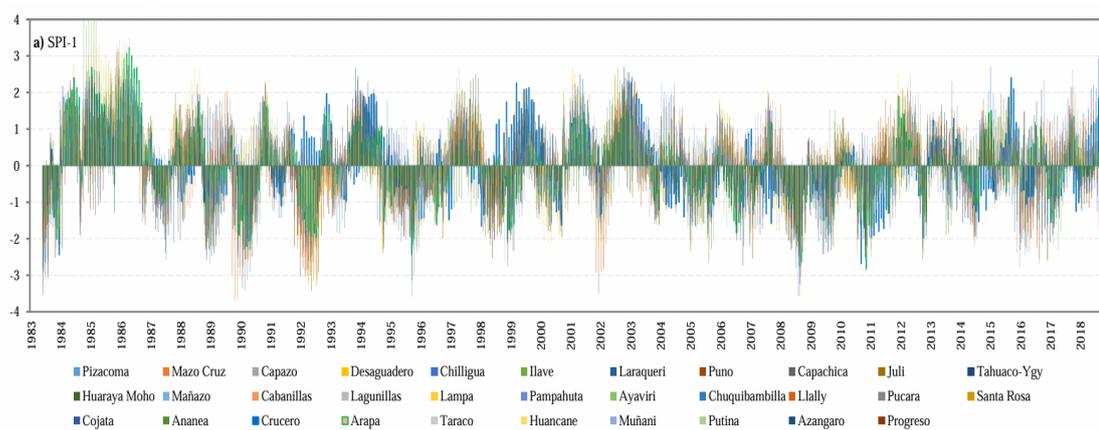
Valores de Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-1) - Observada.



Valores de Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-3) - Observada.

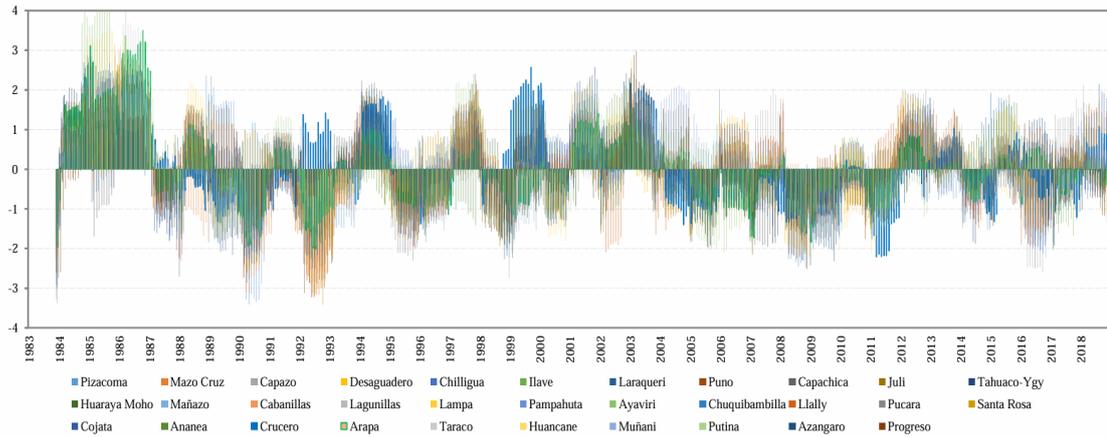


Valores de Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-6) - Observada.

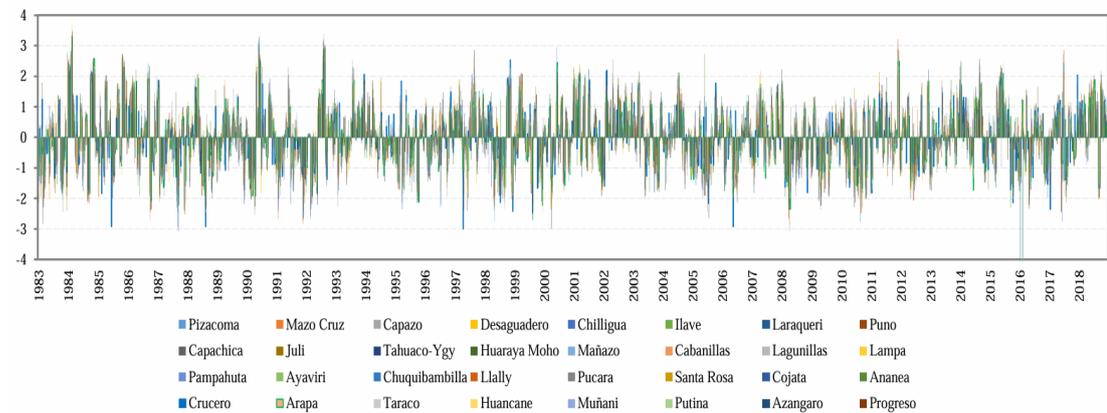




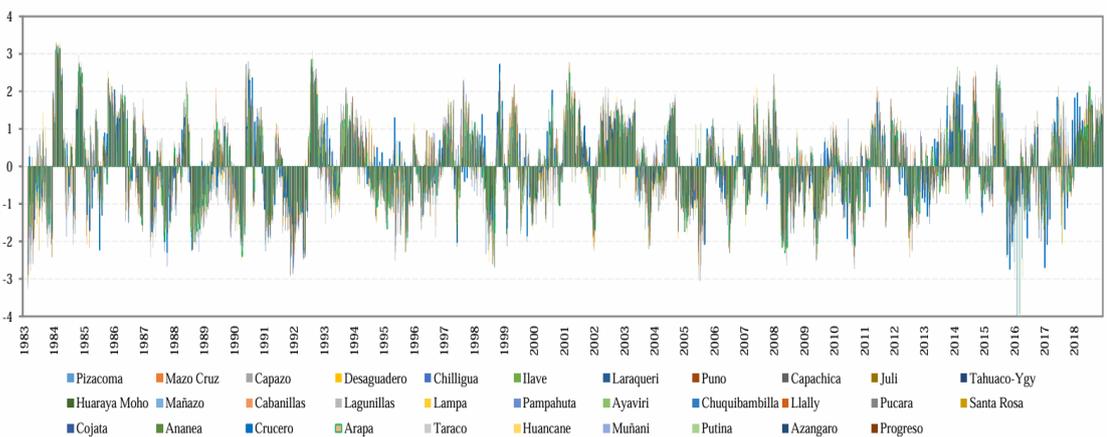
Valores de Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-12) - Observada.



Valores de Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-1) - PERSIANN-CDR.

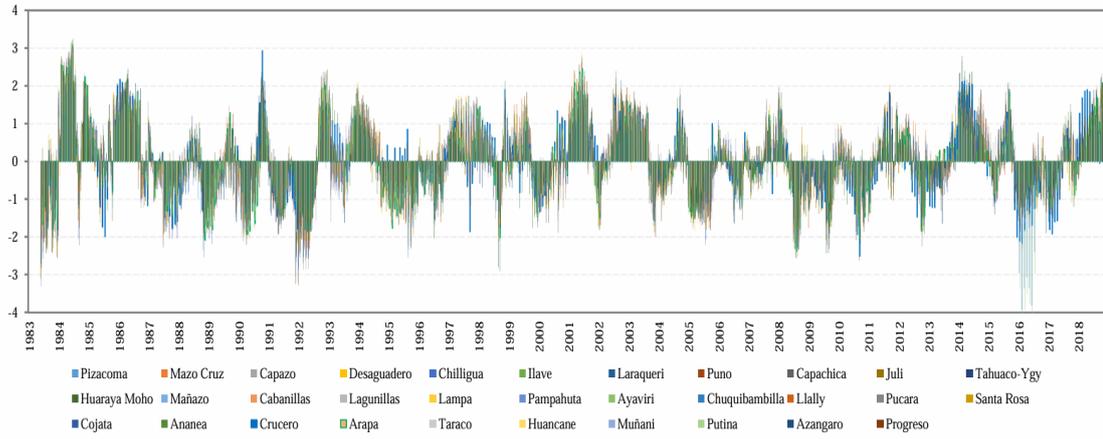


Valores de Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-3) - PERSIANN-CDR.

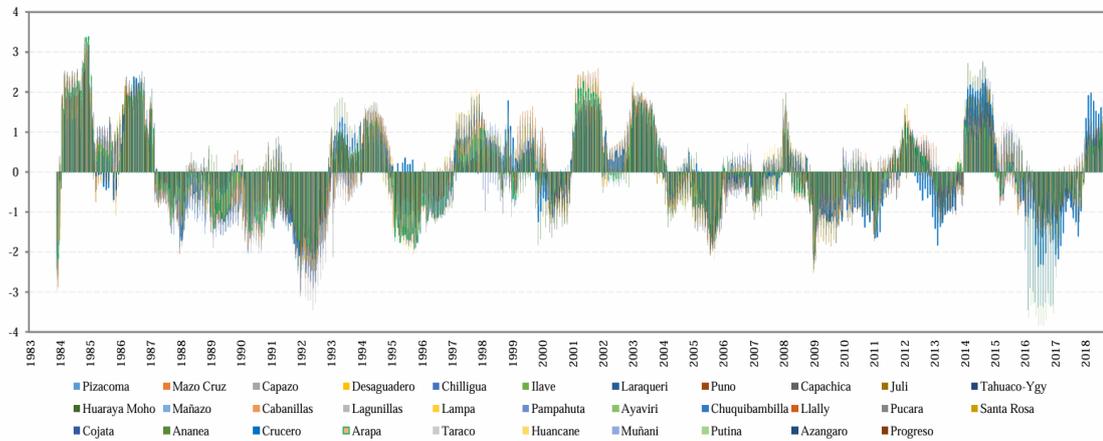




Valores de Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-6) - PERSIANN-CDR.



Valores de Índice de Precipitación Estandarizada (SPI-12) - PERSIANN-CDR.





## ANEXO 4: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo RAUL JULI CANDIA,  
identificado con DNI 74779721 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA AGRÍCOLA

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ EVALUACION DE LA APLICABILIDAD DEL PRODUCTO PERSIANN-CDR  
PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍA METEOROLÓGICA  
EN LA CUENCA DEL LAGO TITICACA ”

Es un tema original.

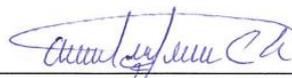
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 09 de ENERO del 2024

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 5: Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo RAUL JULI CANOIA  
identificado con DNI 74778721 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA AGRÍCOLA

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL PRODUCTO  
PERSIANN-COR PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍA  
METEOROLÓGICA EN LA CUENCA DEL LAGO TITICACA ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 09 de ENERO del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella