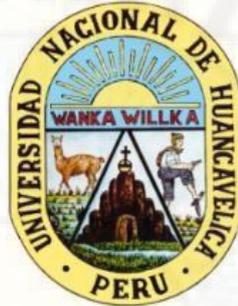


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA**

(Creada por ley N° 25265)

**FACULTAD DE INGENIERÍA MINAS CIVIL AMBIENTAL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL-LIRCAY**



**TESIS**

**ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA EN LA CUENCA  
DEL RÍO ICHU UTILIZANDO DATOS GENERADOS POR  
TELEDETECCIÓN – HUANCAMELICA - 2019**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

**HIDROLOGÍA HIDRÁULICA**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. VARGAS MONTES, Alexander Jefferson**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**HUANCAMELICA, PERÚ**

**2021**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA**  
(Creada por Ley N° 25265)  
**FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS CIVIL AMBIENTAL**

AV. CENTENARIO N°1200 TELÉF. 952847104  
LICENCIADA BAJO RESOLUCIÓN N° 086-2019-SUNEDU/CD



**ACTA DE SUSTENTACIÓN**

EN LA CIUDAD DE LIRCAY DEL DIA 12 DE FEBRERO DEL 2021, SIENDO LAS 10.00 A.M; EN CUMPLIMIENTO A LA **DIRECTIVA N° 001-VRAC-UNH**, APROBADO CON **RESOLUCIÓN N° 355-2020-CU-UNH (20/07/2020)**, MEDIANTE LA PLATAFORMA VIRTUAL MEET SE REUNIERON LOS MIEMBROS DEL JURADO DESIGNADO CON RESOLUCION N° 102- 2020 – FIMCA – UNH (09/11/2020) CONFORMADO EN LA SIGUIENTE MANERA:

**PRESIDENTE** : ING. CAMAC OJEDA ENRIQUE RIGOBERTO.  
**SECRETARIO** : MG. MEDINA CHAMPE DEDICACIÓN MIGUEL.  
**VOCAL** : ING. ÑAHUI GASPAS ANDRÉS ZÓSIMO

Y EN CUMPLIMIENTO A LA RESOLUCIÓN DE CONSEJO DE FACULTAD VIRTUAL N° 030-2021-FIMCA-UNH, DE HORA Y FECHA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS TITULADO: "ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA EN LA CUENCA DEL RÍO ICHU UTILIZANDO DATOS GENERADOS POR TELEDETECCION-HUANCAMELICA-2019" CUYO AUTORES (EL) (LOS) GRADUADOS (S):

**BACHILLER (S):**

**VARGAS MONTES ALEXANDER JEFFERSON**

A FIN DE PROCEDER CON LA SUSTENTACION DE LA TESIS FINAL DE INVESTIGACION CIENTIFICA

ACTO SEGUIDO SE INVITA A LOS SUSTENTANTES Y PÚBLICO EN GENERAL ABANDONAR LA PLATAFORMA DEL MEET POR UNOS MINUTOS PARA LA **DELIBERACIÓN DE LOS RESULTADOS**; LUEGO SE INVITÓ A PASAR NUEVAMENTE AL LA PLATAFORMA DEL MEET A LOS SUSTENTANTES Y PÚBLICO EN GENERAL, EN LA QUE SE DA EL RESULTADO SIENDO **APROBADO POR MAYORÍA**, CULMINANDO A LAS 11:30 A.M.

**BACHILLER: VARGAS MONTES ALEXANDER JEFFERSON**

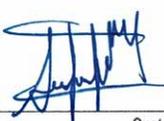
MIEMBROS:	RESULTADO FINAL:
PRESIDENTE	APROBADO POR MAYORÍA
SECRETARIO	
VOCAL	

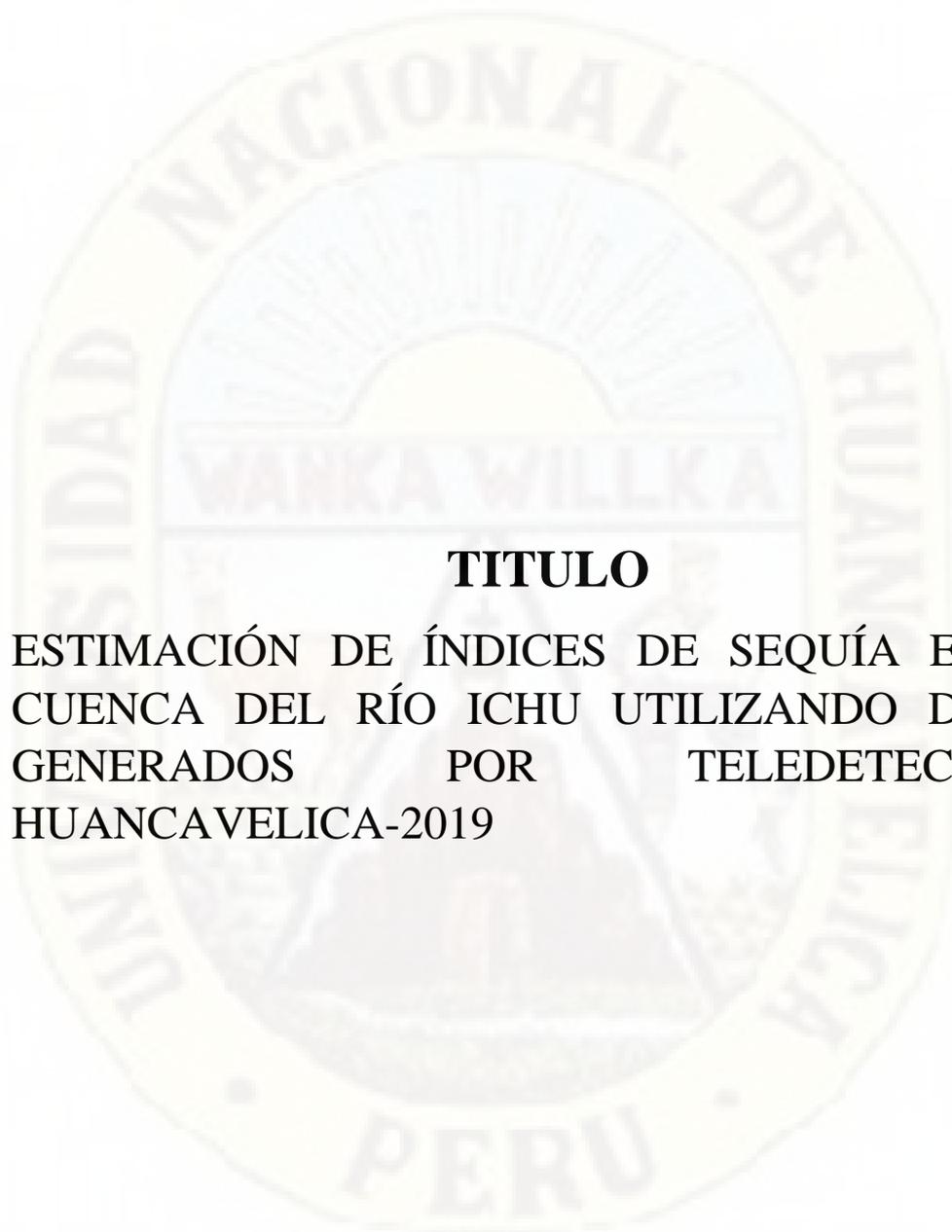
EN CONFORMIDAD A LO ACTUADO FIRMAMOS AL PIE DEL PRESENTE.

  
Presidente  
Ing. CAMAC OJEDA ENRIQUE RIGOBERTO

  
Secretario  
Mag. MEDINA CHAMPE DEDICACIÓN MIGUEL

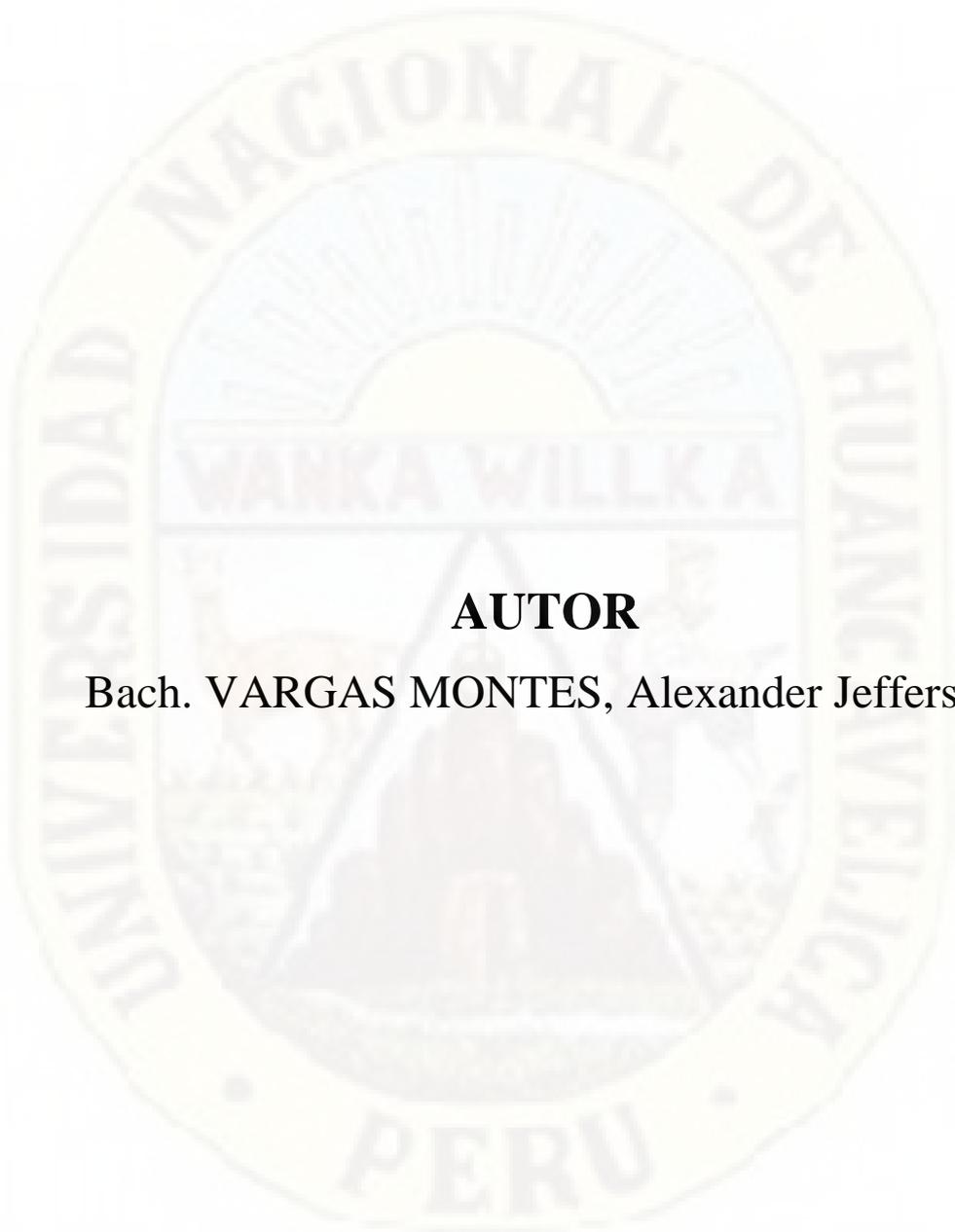
  
Vocal  
Ing. ÑAHUI GASPAS ANDRÉS ZÓSIMO

  
Sustentante  
VARGAS MONTES ALEXANDER JEFFERSON



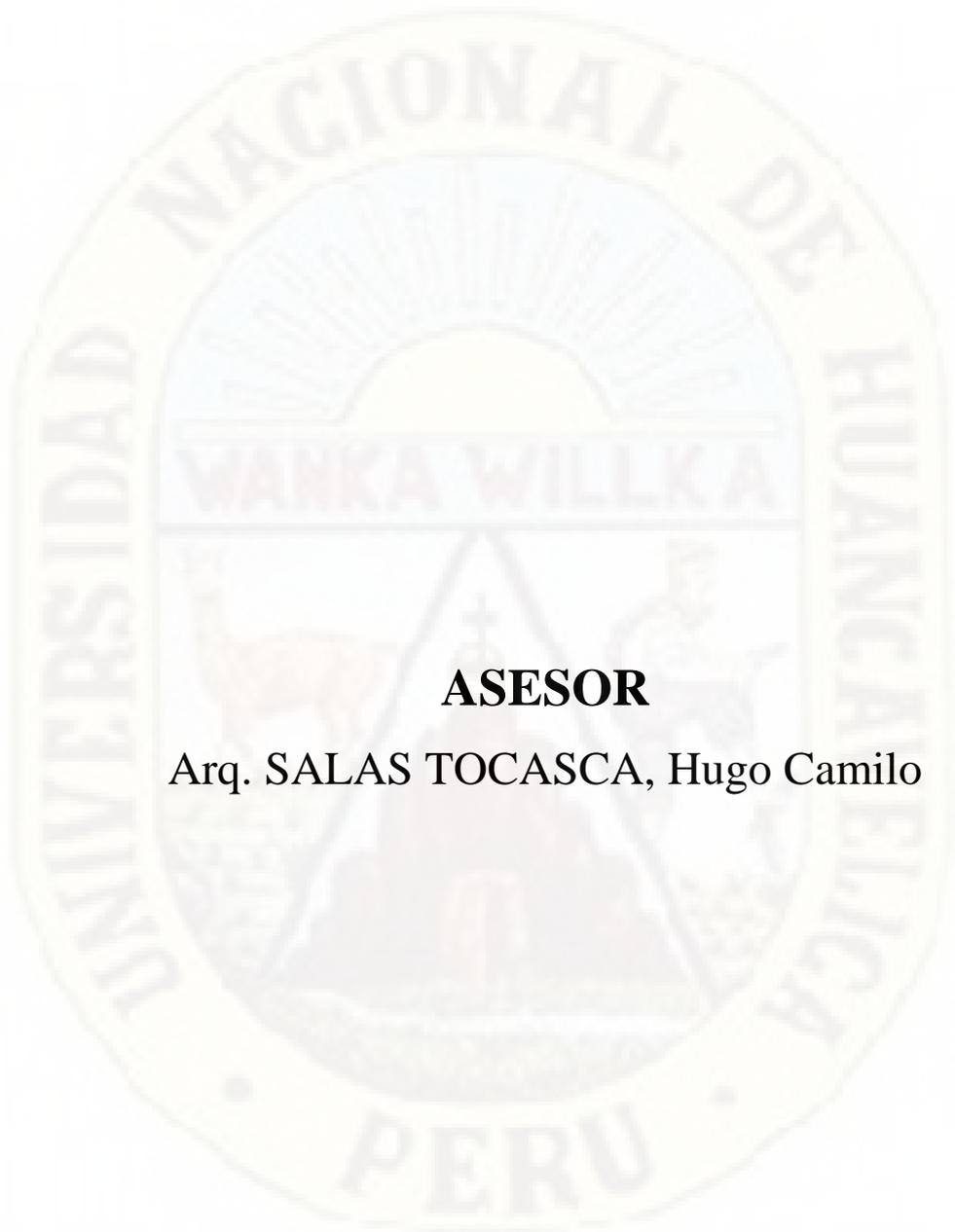
## **TITULO**

ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA EN LA CUENCA DEL RÍO ICHU UTILIZANDO DATOS GENERADOS POR TELEDETECCION-HUANCAVELICA-2019



**AUTOR**

Bach. VARGAS MONTES, Alexander Jefferson



**ASESOR**

Arq. SALAS TOCASCA, Hugo Camilo

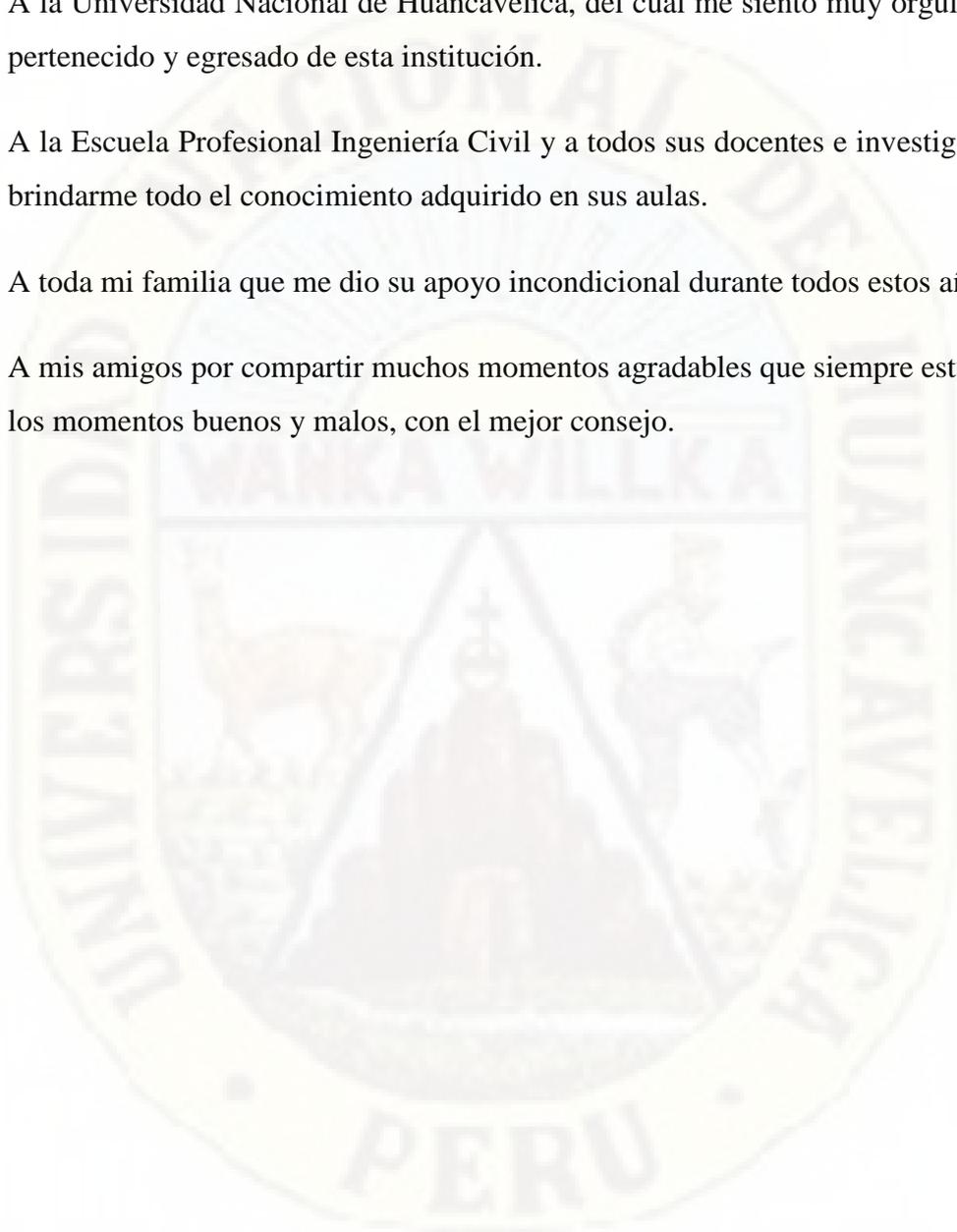
## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional de Huancavelica, del cual me siento muy orgulloso haber pertenecido y egresado de esta institución.

A la Escuela Profesional Ingeniería Civil y a todos sus docentes e investigadores por brindarme todo el conocimiento adquirido en sus aulas.

A toda mi familia que me dio su apoyo incondicional durante todos estos años.

A mis amigos por compartir muchos momentos agradables que siempre estuvieron en los momentos buenos y malos, con el mejor consejo.



## Índice General

Portada.....	i
Acta de Sustentación.....	ii
Título.....	iii
Autor.....	iv
Asesor.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice de General.....	vii
Índice de Tablas.....	xi
Índice de Figuras.....	xii
Resumen.....	xv
Abstract (Keywords).....	xvii
Introducción.....	xix

### CAPITULO I

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema.....	21
1.2 Formulación del problema.....	23
1.2.1 Problema general.....	23
1.2.2 Problemas específicos.....	23
1.3 Objetivos.....	23
1.3.1 Objetivo general.....	23
1.3.2 Objetivos específicos.....	23
1.4 Justificación.....	24
1.5 Limitaciones.....	26

### CAPITULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes.....	28
2.1.1 Ámbito internacional.....	28
2.1.2 Ámbito nacional.....	37
2.2 Bases teóricas.....	43
2.2.1 Cuenca hidrográfica.....	43
2.2.2 El ciclo hidrológico.....	44

2.2.3	La sequía .....	45
2.2.3.1	Definición de sequía.....	48
2.2.3.2	Clasificación de la sequía.....	49
2.2.4	Caracterización de sequias .....	52
2.2.5	Índices de sequias.....	53
2.2.5.1	Índice de precipitación estandarizado (SPI).....	54
2.2.5.2	Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizada (SPEI).....	58
2.2.5.3	Calculo de la evapotranspiración potencial (ETP).....	60
2.2.5.4	Escalas de tiempo .....	61
2.2.6	Sistemas de teledetección.....	64
2.2.6.1	Satélite meteorológico CHIRPS.....	65
2.2.6.1.1	Precipitación CHIRPS.....	65
2.2.6.1.2	Precipitación PISCO .....	67
2.2.7	Cambio climático .....	69
2.2.8	Modelos climáticos globales (GCM) .....	71
2.2.8.1	Escenarios climáticos .....	73
2.3	Bases conceptuales.....	75
2.4	Definición de términos .....	76
2.5	Hipótesis.....	78
2.5.1	Hipótesis general .....	78
2.5.2	Hipótesis específica.....	78
2.6	Identificación de variables .....	78
2.6.1	Variables de estudio .....	78
2.7	Operacionalización de variables .....	79

### **CAPITULO III**

#### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

3.1	Ámbito de estudio temporal y espacial .....	80
3.2	Tipo de investigación .....	81
3.3	Nivel de investigación.....	81
3.4	Población, muestra .....	81
1.4.4	Población.....	81

1.4.2	Muestra.....	82
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	82
3.5.1	Técnicas.....	82
3.5.2	Procedimientos de recolección de datos .....	83
3.5.2.1	Fuentes de información .....	83
3.5.2.2	Procedimientos de recolección de datos .....	84
3.5.3	Instrumentos utilizados .....	86
3.6	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	87
3.6.1	Técnicas de procesamiento .....	87
3.6.1.1	Análisis exploratorio .....	87
3.6.1.2	Análisis de saltos.....	88
3.6.1.3	Estadísticas de comparación por pares.....	94
3.6.1.4	Reducción de escala de los datos estimados por el modelo GCM.....	96
3.6.1.5	Sesgo porcentual (PBIAS) .....	97
3.6.2	Formación de regiones homogéneas .....	98
3.6.3	Análisis de datos .....	101
3.7	Metodología .....	102
3.7.1	Esquema metodológico .....	103
<b>CAPITULO IV</b>		
<b>RESULTADOS</b>		
4.1	Descripción del área de estudio.....	105
4.1.1	Datos observados y periodo de análisis .....	108
4.1.2	Disposición de datos en la cuenca del rio Ichu .....	108
4.2	Análisis exploratorio de datos (AED).....	111
4.3	Análisis de consistencia y comparación de la precipitación observada y estimada por producto PISCO p.....	113
4.3.1	Dependencia puntual .....	113
4.3.1.1	Análisis de consistencia de datos mensuales .....	114
4.4	Formación de regiones homogéneas .....	124
4.5	Resultados del análisis de índices de sequía en sus diferentes escalas de tiempo.....	135

Conclusiones

Recomendaciones

Referencias bibliográficas

Apéndice



## Índice de tablas

2.1. Clasificación de los periodos húmedos y secos de acuerdo al valor del índice SPI .....	58
2.2. Esquema de definición operativa e indicadores.....	79
3.1. Valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe (CE).....	95
3.2. Escala de correlación de Pearson.....	95
3.3. Rangos e interpretación del Sesgo Porcentual (PBIAS).....	98
4.1. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca del rio Ichu.....	108
4.2. Ubicación de los puntos de registro en la cuenca del rio Ichu.....	110
4.3. Datos de precipitación mensual estación Huancavelica .....	114
4.4. Precipitación mensual punto de registro Huancavelica .....	114
4.5. Tabla de distribución “ t- Student” .....	118
4.6. Valores de distribución F de Fisher, $\alpha=0.05$ .....	121
4.7. Resultados de las características importantes de todos los Puntos de Registro.....	128
4.8. Resultados de las características importantes de los grupos que agrupa la región 1 (tabla superior) y región 3 (tabla inferior).....	132
4.9. Características de las sequías más severas ocurridas en cada región homogénea (periodo 1994-2016) .....	141
4.10 Características de las sequías más severas ocurridas en cada homogénea (periodo 1970-2016) .....	147
4.11 Resumen de la correlación cruzada entre el SPI en las 5 escalas temporales para la región 1. Periodo 1994 – 2016.....	151
4.12 Resumen de la correlación cruzada entre el SPEI en las 5 escalas temporales para la región 1. Periodo 1994 – 2015.....	152
4.13 Resumen de la correlación entre los índices de sequía SPI y SPEI para sus diferentes escalas de tiempo .....	153
4.14 Precipitación mensual punto de registro Choclococha.....	171
4.15 Precipitación mensual simulado por GCM corregido, punto de registro Choclococha .....	171
4.16 Tabla de distribución“ t- Student” .....	174

## Índice de figuras

2.1. Cuenca hidrográfica.....	43
2.2. El ciclo hidrológico.....	45
2.3. Características de la sequía para un nivel de truncamiento $X_0$ .....	53
2.4. Ejemplo de: Estimaciones históricas y proyecciones de las precipitaciones en un área de estudio para el 2100 obtenidas con los modelos CMIP5 y los escenarios del IPCC .....	72
2.5. Ejemplo de: Estimaciones históricas y proyecciones de las temperaturas en el área de estudio para el 2100 obtenidas con el CMIP5 y los escenarios del IPCC .....	72
2.6. Diferentes enfoques existentes para la corrección de datos de los MCG.....	74
3.1. Localización del ámbito de estudio de la investigación .....	80
3.2. Identificación de un salto en un hidrógrama.....	89
3.3. Esquema metodológico: Cálculo de los índices de sequía a partir de datos generados por teledetección.....	104
4.1. Ubicación- Localización de la cuenca del río Ichu- Huancavelica.....	106
4.2. Altitudes de la cuenca del río Ichu .....	107
4.3. Series de precipitación de la estación Huancavelica. ....	109
4.4. Series de precipitación de la estación Choclococha .....	109
4.5. Series de precipitación de los 10 puntos de registro.....	111
4.6. Gráfico de Boxplots de la precipitación mensual (periodo 1994-2016).....	112
4.7. Gráfica de Boxplots de la precipitación mensual (periodo 1994-2016). ....	113
4.8. Serie de tiempo de los datos observados y estimados .....	116
4.9. Dendograma en base al método de Ward. GP, Grupo Preliminar .....	125
4.10 Resultados de MVR para todos los puntos de registro .....	128
4.11 Suma de los Índices anuales del Vector y de los Puntos de Registro.....	129
4.12 Resultados de MVR, Índices anuales del Vector y los puntos de Registro del Grupo 1 (Panel superior) y Grupo 3 (Panel inferior).....	130
4.13 Suma de los índices anuales del Vector y Puntos de Registro para la Región 1 (tabla superior) y Región3 (tabla inferior). ....	133
4.14 Estimación del SPI para la región homogénea 1 a escalas de tiempo	

a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 9 meses y e) 12 meses.....	137
4.15 Estimación del SPI para la región homogénea 2 a escalas de tiempo	
a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 9 meses y e) 12 meses.....	138
4.16 Estimación del SPEI para la región homogénea 1 a escalas de tiempo	
a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 9 meses y e) 12 meses.....	143
4.17 Estimación del SPEI para la región homogénea 2 a escalas de tiempo	
a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 9 meses y e) 12 meses.....	145
4.18 Coeficiente de correlación del SPI y SPEI entre sus respectivas escalas de tiempo .....	149
4.19 Correlación entre los índices de sequía SPI y SPEI para diferentes escalas ..	153
4.20 Características de las sequías a escala de tiempo 6 meses por años.....	142
4.21 Análisis de tendencia de sequías con SPI – 6 meses en cada región homogénea.....	163
4.22 Datos simulados para la precipitación con GCM (Esquema superior). Datos simulados para la temperatura media con GCM (Esquema inferior) para la cuenca del rio Ichu.....	165
4.23 Series de tiempo de la precipitación observada y simulados por GCM sin corregir.....	167
4.24 Series de tiempo de la temperatura observada y simulados por GCM sin corregir.....	167
4.25 Datos de precipitación observada y simulado por GCM corregido.....	169
4.26 Datos de temperatura máxima observada y simulado por GCM corregido....	170
4.27 Estimación del SPEI -3 para la región homogénea 1 en el periodo de tiempo	
a) 2020-2040, b) 2041-2060 c) 2061-2080, d) 2081-2100 .....	182
4.28 Estimación del SPEI -12 para la región homogénea 1 en el periodo de tiempo	
a) 2020-2060, b) 2061-2100 .....	184
4.29 Estimación del SPEI -3 para la región homogénea 2 en el periodo de tiempo:	
a) 2020-2040, b) 2041-2060 c) 2061-2080, d) 2081-2100 .....	184
4.30 Estimación del SPEI-12 para la región homogénea 2 en el periodo de tiempo	
a) 2020-2060, b) 2061-2100 .....	186
4.31 Cambios en las características de las sequías de corto plazo (SPEI-3) proyectadas para el periodo: a) 2020-2030, b) 2031-2040, c) 2041-2050,	

d) 2051-2060, e) 2061-2070, d) 2071-2080, e) 2081-2090, f) 2091-2100 ..... 190

4.32 Cambios en las características de las sequias de largo plazo (SPEI-12)

proyectadas para el periodo: a) 2020-2030, b) 2031-2040, c) 2041-2050,

d) 2051-2060, e) 2061-2070, d) 2071-2080, e) 2081-2090, f) 2091-2100 ..... 196



## Resumen

El objetivo de la presente investigación, es determinar la estimación de índices de sequía utilizando datos generados por teledetección en la cuenca del río Ichu, con las metodologías de los índices SPI y SPEI analizados a diferentes escalas de tiempo, que estos fueron evaluados a través de salidas de precipitación y temperatura máxima mínima mensuales provenientes por precipitación satelital PISCOp elaborados por SENAMHI – Perú, con una resolución espacial de  $0.05^\circ$  y datos provenientes de Modelos Climáticos Globales (GCM) de un ensamble multi-modelo Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) con variables de superficie modelo CESM1-BGC con escenario RCP8.5.

Para el estudio de sequías (1994-2016) se utilizó datos estimados por PISCOp, y los datos registrados por las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro de la cuenca de estudio a fin de comparar calibrar y validar los datos provenientes de PISCOp. Los resultados han sido evaluados y validados de acuerdo al estadístico Nash- Sutcliffe llegando al valor de 0.85, donde este valor está calificado como **ajuste excelente** y con la correlación de Pearson llegando al valor de 0.93 que califica como una correlación positiva muy alta, validándose de esta manera la primera hipótesis planteada, seguidamente el índice representativo con su respectiva escala temporal (SPI 6 meses) que representa al desarrollo y crecimiento de la vegetación en la cuenca de estudio con una correlación cruzada llegando al valor de 0.73 que está calificado como correlación positiva alta, validándose de esta manera la segunda hipótesis planteada, finalmente el empleo de los Modelos Climáticos Globales (GCM) para estimar sequías con proyecciones futuras para el periodo (2020 -2100), utilizando las metodologías del índice SPEI para las escalas de tiempo a corto y largo plazo, y así evaluar los cambios en las características de la sequía, para validar los datos provenientes de Modelos Climáticos Globales previamente se realizó una reducción de escala estadística de los datos por (Bias Correction) con el fin de comparar y validar la precipitación simulada por (GCM) con la precipitación estimada por PISCOp, tomando como ejemplo datos del punto de registro Choclococha que se encuentra en la cuenca de estudio, los resultados han sido también evaluados y validados de acuerdo

al estadístico Nash – Sutclie dando un valor de 0.82 que califica como **ajuste excelente** y con la correlación de Pearson llegando al valor de 0.906 que califica de una correlación positiva muy alta, de esta manera se valida la tercera hipótesis planteada.

**Palabras claves:** índices de sequía, teledetección, precipitaciones satelitales, modelos climáticos globales.



## Abstract

The objective of the present investigation is to determine the estimation of drought indices using data generated by remote sensing in the Ichu river basin, using SPI and SPEI index methodologies analyzed at different time scales, which were evaluated through outputs precipitation and maximum monthly minimum temperature from PISCOp satellite precipitation prepared by SENAMHI - Peru, with a spatial resolution of  $0.05^\circ$  and data from Global Climate Models (GCM) of a multi-model assembly Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) with surface variables CESM1-BGC model with RCP8.5 scenario.

For the study of droughts (1994-2016), data estimated by PISCOp was used, and the data recorded by the meteorological stations located within the study basin in order to compare, calibrate and validate the data from PISCOp. The results have been evaluated and validated according to the Nash-Sutcliffe statistic reaching the value of 0.85, where this value is qualified as an excellent fit and with the Pearson correlation reaching the value of 0.93, which qualifies as a very high positive correlation, validating itself as In this way, the first hypothesis proposed, followed by the representative index with its respective time scale (SPI 6 months) that represents the development and growth of the vegetation in the study basin with a cross correlation, reaching the value of 0.73, which is qualified as a positive correlation. high, validating in this way the second hypothesis proposed, finally the use of Global Climate Models (GCM) to estimate droughts with future projections for the period (2020 -2100), using the methodologies of the SPEI index for short time scales and long-term, and thus evaluate changes in the characteristics of the drought, to validate the data pro Due to Global Climate Models, a statistical scale reduction of the data was previously performed by (Bias Correction) in order to compare and validate the precipitation simulated by (GCM) with the precipitation estimated by PISCOp, taking as an example data from the registration point Choclococha found in the study basin, the results have also been evaluated and validated according to the Nash - Sutcliffe statistic, giving a value of 0.82 that qualifies as an excellent fit and with the Pearson correlation reaching

a value of 0.906 that qualifies as a Very high positive correlation, thus validating the third hypothesis proposed.

**Key words:** drought indices, remote sensing, satellite precipitation, global climate models.



## Introducción

En los últimos años las sequías han adquirido una gran relevancia por los daños que ocasionan, que supera en magnitud a lo que producen otros fenómenos hidrometeorológicos y se torna más amenazador por el calentamiento global, entre cuyas secuelas el aumento de la recurrencia de los eventos secos en determinadas zonas del planeta, es uno de los más serios problemas que enfrenta la humanidad, en especial los países ubicados en las zonas subtropicales (Perú), donde la alta radiación y evaporación se combina con la escasa precipitación, favoreciendo la recurrencia de periodos prolongados de sequía en extensas áreas y/o países enteros (Salati y Nobre, 1991).

Las sequías constituyen una adversidad climática recurrente en vastas regiones del mundo y su duración e intensidad son causas de importantes pérdidas económicas y interrupciones en las actividades de las comunidades rurales y urbanas (Downing & Baker, 2000).

Below et al. (2007) mencionan que las sequías causaron más del 50% del total de muertes debidas a desastres naturales entre 1900 y el 2004 y representaron el 35% de la población afectada por desastres y el 7% de las pérdidas económicas, después de las inundaciones y los terremotos. Sin embargo, el impacto económico de las sequías puede ser mayor, debido a que los impactos indirectos son mayores y generalmente son mucho más complejos de evaluar que los impactos directos.

Dado la demanda de recursos hídricos a nivel mundial, porque este recurso es importante para la vida de los seres vivos y para la economía mundial. Donde los gobiernos y agencias vinculadas al agua se enfrentarán al desarrollo de planes de mitigación de los efectos de las sequias, haciendo estudios científicos relacionados a las sequias. Por lo que el estudio de sequias es importante identificar sus características a nivel regional y así tener soluciones de mitigación de sequias.

A lo largo de los años, y a través de estudios, han sido propuestos y validados varios indicadores de alerta temprana para poder evaluar las posibles condiciones de

sequía, así como el estado de humedad del suelo de la cuenca, se pueden aplicar distintas metodologías de estimación operacional de índices relacionados con el déficit hídrico del suelo y estrés hídrico de la vegetación. Se distinguen aquellas basadas en datos meteorológicos, en teledetección y en procesos.

Respecto a los indicadores basados en datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima mínima), destacan el SPI (Índice de Precipitación Estandarizado) y SPEI (Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizada) donde estos dos índices ha sido ampliamente utilizado para el análisis de sequías. Qinna et al. (2011).

Para monitorear estas sequías en la cuenca del río Ichu, se utilizara los parámetros precipitación mensual, temperatura máxima mínima y las estimaciones de estos datos serán a partir de sistemas de teledetección, donde el CHG ha desarrollado el producto de datos de precipitación infrarroja con datos de estación CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations) y Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and Hidrological Observations (PISCO), donde actualmente brinda informaciones calibradas y validadas con una resolución de 0.05° latitud y longitud. Donde Funk et al. (2015, p. 10), mencionan que CHIRPS valida las precipitaciones para el Perú con 403 estaciones que le brinda la Autoridad Nacional del Agua (ANA) Perú.

El presente documento describe la aplicación de la mencionada metodología. El informe se estructura de la siguiente manera: el Capítulo 1 se centra en el problema, la justificación y los objetivos de la investigación; el Capítulo 2 trata de los antecedentes de la investigación y los fundamentos teóricos; el Capítulo 3 detalla los aspectos metodológicos; en el Capítulo 4 se detallan los resultados, por último, la bibliografía de referencia y apéndice (anexos).

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Dentro del grupo de los desastres naturales la sequía es uno de los fenómenos que impacta de manera generalizada a la sociedad, debido a la mayor cobertura espacial y temporal, en comparación con los demás fenómenos naturales. Algunos de los problemas ocasionados por las sequías son la falta de agua, las consecuencias de este fenómeno tenemos problemas en la eficiencia de infraestructuras hidráulicas, la escases de la cobertura vegetal, pérdidas en la agricultura y ganadería, hambrunas, deforestaciones, enfermedades, etc.

La sequía más impactante que se vio en el mundo es en el continente Africano, donde el fuerte calor ocasiona, sequías de fuertes intensidades y duraciones extensas a causa de ello ocasiona problemas económicos, como este fenómeno castiga a los más pobres del mundo como es el continente Africano, una de las sequías históricas más importantes, se registró por El Sahel (África) entre 1969 y 1973; la cual afectó el sur del desierto del Sahara y se extendió en Mauritania, Senegal, Malí, Burquina Faso y Chad. A consecuencia de ese fenómeno murieron de hambre más de 200 mil personas; la mayor parte de los campesinos fueron obligados a migrar por las pérdidas de las cosechas y muerte de ganados.

Según Patrick (2003) y Ravelo (2008) las sequías han sido catalogadas como el peligro individual y natural más grande en el planeta que cuando las sequías son intensas y prolongadas generan fuertes impactos en las actividades agrícolas, ganaderas e industriales con consecuencias sociales y económicas conexas, como son la inseguridad en los suministros alimentarios e importantes pérdidas económicas.

Una de las sequías más importantes que ocurrió en nuestro país (Perú) se registraron entre el año 2000 y 2010 donde se reportaron 163 eventos de sequías, siendo mayor en la vertiente del Pacífico con 157 eventos, seguidos por la vertiente del Titicaca con 25 eventos y la vertiente del Atlántico con 11 eventos. Dichas sequías han ocurrido con distinta frecuencia, siendo mayor el número las de frecuencia anual y las que ocurren entre 3 y 9 años con 85 eventos y 70 eventos. Asimismo, la sequía del año 2010, fue de las más severas para el oriente peruano. En total el país se afectaron 66,724 familias y 332,087 has. (Autoridad Nacional del Agua, 2013).

Por otro lado, Magaña y García (2002) señalan que los periodos de sequías, en múltiples ocasiones han producido cosechas pobres, hambrunas, problemas de salud y migraciones masivas de la población y que hoy en día, no sólo la agricultura se ve afectada por la variabilidad en el clima, sino también otras actividades económicas, como la generación y consumo de energía eléctrica, la pesca, la acuicultura, los asentamientos humanos, el turismo, la ganadería, el uso de recursos hídricos (presas, bocatomas, captaciones y reservorios), las aseguradoras, los bancos, el transporte, e incluso la salud, debido a la gran cantidad de enfermedades relacionadas con las condiciones extremas del clima.

Bajo esta situación, surge la necesidad de estudiar y difundir una metodología, de fácil implementación práctica, en donde se pueda obtener un indicador de sequía, que permita identificar la ocurrencia de la misma y así realizar estimaciones de la frecuencia con la cual se espera que ocurran eventos extremos, y que genere información confiable para la toma de decisiones.

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1 Problema general**

- ¿Cómo la estimación de índices de sequía, utilizando datos generados por teledetección identificara la sequía en la cuenca del río Ichu?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- ¿Cómo es la caracterización espacio - temporal de la sequía mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) para una escala de tiempo ajustado, en la cuenca del río Ichu?
- ¿Cómo son los cambios futuros en las características de las sequias asociados al cambio climático utilizando datos simulados por Modelos Climáticos Globales (GCM) mediante el Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) para una escala de tiempo corto y largo plazo, dentro de la cuenca del río Ichu?

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general**

- Analizar los índices de sequía, utilizando datos generados por teledetección para identificar las sequías en la cuenca del río Ichu.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Analizar la caracterización espacio- temporal de la sequía mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) para una escala de tiempo ajustado en la cuenca del río Ichu.

- Analizar los cambios futuros en las características de las sequías asociados al cambio climático utilizando datos simulados por Modelos Climáticos Globales (GCM) mediante el Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) para una escala de tiempo corto y largo plazo, dentro de la cuenca del río Ichu.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

La cuenca del río Ichu, corresponde a una de las cuencas más importantes del Perú, ya que la población de la ciudad de Huancavelica se abastece de los recursos hídricos de esta cuenca, mediante infraestructuras hidráulicas construidas actualmente como: Reservorios para el abastecimiento de agua potable para la población huancavelicana, sistemas de riego para diferentes centros poblados que se encuentran en dicha cuenca y lo más importante es que el río Ichu desemboca en el caudaloso río Mantaro y este abastece a la represa de Tablachaca, el agua allí almacenada es transportada hasta la central hidroeléctrica Santiago Antúnez de Mayolo y Restitución, por lo tanto, la representación del ciclo hidrológico, requiere atención especial para el control y uso adecuado del recurso hídrico.

En la actualidad se observan muchas escases de los recursos hídricos a causa del cambio climático (calentamiento global) que afectan a nivel mundial y han alterado de manera paulatina los ciclos hidrológicos, donde se ve que las infraestructuras hidráulicas en épocas de estiaje ya no operan de manera eficiente, y a causa de esto, no se puede satisfacer la demanda de la población en acceso al agua potable, sistemas de riego, generación de energía eléctrica, etc. Por esa razón, los fenómenos naturales (como la sequía) requieren atención para caracterizar, informar, analizar y tomar decisiones de manera responsable.

El estudio de las sequías es un tema que interesa a toda la humanidad, ya que todos somos afectados de alguna manera por este fenómeno natural. El hecho

de ser académico e investigador conduce a formarse en un área, donde el ambiente y en especial la climatología, ha sido el tema escogido para desarrollar este tipo de trabajo.

Las sequías son fenómenos naturales que no pueden ser evitados, sin embargo sus impactos pueden ser mitigados, sus efectos negativos ambientales y socioeconómicas, con una adecuada planificación y gestión a través de un análisis congruentes como es el caso de la evaluación con metodologías conforme se plantea en el presente trabajo de investigación.

Velasco, Ochoa y Gutiérrez (2005, p. 51) mencionan: el investigador científico, ve en la ocurrencia de la sequía la oportunidad de estudiar sus causas, efectos y particularidades, desde una perspectiva objetiva y rigurosamente científica e imparcial, con la aplicación de metodologías fundamentales y consistentes. Con ello pretende probar teorías y aportar explicaciones plausibles del fenómeno y elementos de juicio, que apoyen las decisiones a tomar tanto por un usuario como por administradores del recurso. Sus métodos ayudan al mejoramiento de la planeación y, desde un enfoque imparcial y objetivo buscar y encontrar soluciones aceptables y viables ante situaciones de severidad y riesgo creciente.

El mismo Velasco et al. (2005, p. 38) la vulnerabilidad a la sequía está en relación inversa al grado de desarrollo social y económico de las áreas afectadas: en tanto que, para los países más desarrollados, la sequía rara vez representa una amenaza severa, porque disponen de los medio económicos, estructurales y no estructurales para afrontarla, en los de menor desarrollo, una sequía es sinónimo de hambre, desastre y más pobreza.

Por lo tanto, una investigación sobre los cambios futuros en las características de sequías es fundamental para encontrar soluciones sostenibles para la problemática de manejo del recurso hídrico y una asesoría adecuada en el riesgo de sequía. La sequía a diferencia de otros desastres, evoluciona más lentamente a lo largo del tiempo, sus impactos generalmente se expanden a lo

largo de un periodo prolongado de tiempo más allá de la duración del fenómeno. Estas características hacen posible una mitigación más efectiva de sus efectos más adversos, si se tiene un monitoreo de alerta oportuno de una sequía.

En el presente trabajo de investigación, para monitorear las sequías en la cuenca del río Ichu, se busca datos mediante teledetección (sensor remoto) y así conocer las eficiencias de estas, estos datos son parte de la base de datos denominado PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations), siglas en inglés para su difusión internacional. Para la construcción de Producto PISCO fue necesario utilizar como covariable, la base de datos global del proyecto CHIRPS (Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data). CHIRPS es una mezcla de datos provenientes de sensores remotos, modelos y datos provenientes de estaciones terrenas. Los datos de CHIRPS están disponibles desde enero de 1981 para un agrilla global de resolución, emplearemos productos en imágenes raster descargadas de página de SENAMHI- PISCO, de esta manera poder contribuir con un modelo robusto calibrado y validado para la evaluación de los índices de sequía (SPI y SPEI), cuya aplicación será la base para el análisis probabilístico de ocurrencia de sequías.

## **1.5 LIMITACIONES**

También conocidas como restricciones, son un factor importante cuando se establece el plan ya sea de un proyecto de investigación, trabajo monográfico, proyectos de infraestructuras y etc., cuando ya está encaminado. Las restricciones son muy amplias en los trabajos proyectados para obtener resultados aceptables. Por ejemplo, podemos apreciar las restricciones con las que se topa un ingeniero residente cuando enfrenta alguna tarea donde un proyecto costoso puede irse por la borda, por no haber identificado las restricciones con anticipación que podrían a ver sido evitados.

En este trabajo de investigación hubo varias limitaciones que mencionan de la siguiente manera:

- a.** La falta de estaciones meteorológicas para obtener datos confiables de un área de estudio, para poder así calibrar y validar los datos generados por sensores remotos.
- b.** La falta de actualización de los datos estimados por el sensor remoto PISCOp, ya que solo tiene datos actualizados hasta el año 2016, que está a cargo de SENAMHI.
- c.** Banco de datos incompletos y no actualizados registrados por estaciones meteorológicas que se encuentran en el área de estudio también monitoreada por SEMANHI.
- d.** Frente al poco interés de algunas personas en facilitar los datos requeridos para un estudio de investigación científica, lo cual dificulta un poco la obtención de la información clave.
- e.** Carencia de antecedentes sobre investigaciones referente al utilizar datos generados por teledetección (sensores remotos) y modelos climáticos globales (CGM) para hacer investigaciones sobre el comportamiento del medio ambiente a un periodo de tiempo presente y futuro.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES

##### 2.1.1 Ámbito internacional

**Afkhami & Dastorani (2011)**, realizaron la investigación *Aplicación de Redes Neuronales Artificiales en la predicción de sequías en Yazd (centro de Iran)*, en la universidad de Yazd, Irán. En este artículo utilizaron la aplicación de redes neuronales artificiales para predecir la sequía en la estación meteorológica Yazd. En esta investigación, se utilizaron diferentes arquitecturas de redes neuronales artificiales, así como varias combinaciones de parámetros meteorológicos, incluida la media móvil de precipitación de 3 años, temperaturas máximas, temperaturas medias, humedad relativa, velocidad media del viento, dirección del viento predominante y evaporación de 1966 a 2000, se han utilizado como entradas de los modelos. Según los **resultados** extraídos de esta investigación, Las estructuras dinámicas de las redes neuronales artificiales, incluidas Recurrent Network (RN) y Time Lag Recurrent Network (TLRN), mostraron un mejor rendimiento para esta aplicación (debido a una mayor precisión de sus salidas). Finalmente, la red TLRN con una sola

capa oculta y función de transferencia de tangente hiperbólica fue la estructura de modelo más apropiada para predecir la precipitación promedio móvil de 3 años del próximo año. De hecho, mediante la predicción de la precipitación 12 meses antes de que ocurra, es posible evaluar con anticipación las características de la sequía. Los **resultados** indicaron que la combinación de precipitación y temperatura máxima son las entradas más adecuadas de los modelos para obtener la mayor precisión de las salidas. En general, se encontró que ANN es una herramienta eficiente para modelar y predecir eventos de sequía. Llegando a las siguientes **conclusiones**: El estudio se completó en dos fases: en la primera fase la arquitectura más apropiada de ANN fue seleccionados para el modelado y la predicción de sequías 12 meses antes de que ocurra. En la segunda fase trató de elegir el más importante y variables de entrada afectivas para esta solicitud. TLRN con una sola capa oculta que contiene cuatro elementos de procesamiento con función de transferencia de tangente hiperbólica y TDNN elemento dinámico y regla de aprendizaje era la arquitectura ANN adecuada para este propósito. Entre las combinaciones de variables de entrada de la media móvil de precipitaciones mensuales de 3 años y temperatura máxima mensual presentó los resultados de predicción más apropiados. Es debe ser mencionó que la sequía es un altamente variable, en aleatorio y complicado presagio, que es bastante difícil de predecir especialmente con suficiente plazo de entrega y precisión aceptable. Comparando el hallazgo de esta investigación a Mishra (2006) y Morid et. Al (2007) indicaron que la precisión de predicciones en esta investigación es mayor que el presentado en ambos estudios mencionados.

**Cavazos et al., (2013)**, realizaron la investigación *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional*, en la Universidad Nacional Autónoma de México, México. Se utilizaron métricas

climáticas a escala mensual (ciclo anual, errores y diagramas de Taylor) para evaluar el desempeño de cada MCG con respecto a algunas variables superficiales observadas (temperatura máxima del aire, temperatura mínima del aire, temperatura promedio del aire y precipitación) durante el periodo histórico (1961-2000) de la base de datos mensuales del Climate Research Unit (CRU) de la Universidad de East Anglia. También se evaluaron índices climáticos extremos para todo el país mediante el análisis de umbrales presentes y futuros de la temperatura máxima y mínima y de la precipitación a escala anual y estacional. Los **objetivos** fueron: 1) Evaluar métricas climáticas e índices climáticos extremos para 4 regiones del país. 2) Evaluar el ensamble ponderado del REA de los 15 MCG del CMIP5 con todos los modelos y validar con el CRU en las 4 regiones del país. 3) Comparar las salidas del CMIP3 y el CMIP5 con la literatura disponible para México. Con los **resultados** de los 15 MCG se combinaron en un ensamble ponderado mediante el método REA (Reliability Ensemble Averaging) calculando la incertidumbre de cada modelo. Esto se hizo para el periodo histórico (1961-2000) y para las proyecciones usando los escenarios de forzamiento radiactivo bajo (RCP4.5), medio (RCP6.0) y alto (RCP8.5). Se re-evaluaron las métricas climáticas para validar el comportamiento de todos los modelos individuales con respecto al ensamble ponderado del REA y de los datos observados del CRU. Los **resultados** del CMIP3 y el REA del CMIP5 generado en este proyecto muestran aumentos similares de temperatura, entre 1.5 y 5° C de mediados a finales de siglo bajo los escenarios de bajas (B1 y RCP4.5) y altas (A2 y RCP8.5) emisiones, respectivamente. Las reducciones de precipitación para finales de siglo son del orden de 21% en el Noroeste de México; en el resto del país también se esperan reducciones de precipitación, aunque la incertidumbre es muy alta. Sin embargo, el CMIP5 muestra cambios estacionales y regionales diferentes a los que mostraba el CMIP3. Llegando a las siguientes

**conclusiones:** 1) Un cambio importante es que el CMIP5 no produce disminuciones de la precipitación de invierno y primavera

en el Norte de México tan fuertes como las que sugería el CMIP3. Aparentemente, la causa es que la corriente de chorro invernal proyectada por el CMIP5 no cambiará significativamente de posición en el futuro. Va a ser importante investigar por qué los nuevos modelos produjeron este cambio tan drástico en la dinámica invernal, en comparación con los modelos del CMIP3. 2) La comparación del REA del CMIP3 (Montero y Pérez 2008) con el REA del CMIP5 para el periodo 2075-2098 no muestra cambios significativos en los escenarios de temperatura entre los dos grupos de modelos. Tanto CMIP3 como CMIP5 indican incrementos entre 2 y 5oC en el transcurso de este siglo. Además, el CMIP5 también muestra aumentos en las temperaturas extremas (P90 y P10) del mismo orden que las temperaturas promedio (5oC con el escenario RCP8.5 para finales del siglo). 3) Se requiere diseñar y ejecutar un experimento numérico de regionalización dinámica de gran envergadura para estimar los impactos asociados a cambio climático a escalas regionales más finas que la malla de los modelos globales. Este experimento deberá ser inter-institucional y formar recursos humanos durante su desarrollo.

**García et al., (2007)**, realizaron la investigación *Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS*, en la Universidad Politécnica de Cartagena, España. Se ha realizado una aproximación al problema de la alerta temprana frente a sequías a nivel regional en cuencas del sureste español, considerando indicadores basados en teledetección y datos meteorológicos. De los resultados obtenidos, se concluye que índices probabilísticos, basados solo en precipitación, no exhiben el comportamiento espacio-temporal observado desde imágenes satélite. Llegando a las siguientes conclusiones: 1) Se ha demostrado que el

seguimiento temporal del espacio LST-NDVI e incluso de las distribuciones espaciales de los indicadores VTCI, TVDI y WDI, dada la robusta base teórica en que se sustentan, permite detectar condiciones de escasez hídrica o de sequía. 2) Así el patrón espacial de la sequía (variabilidad y grado de severidad) se puede identificar desde la distribución espacial de estos índices en series temporales, mientras que desde el análisis del espacio LST-NDVI se puede detectar un cambio de tendencia en la recta del borde húmedo y de esta forma el inicio (y fin) de condiciones de sequía.

**García y Rodríguez (2014)**, en su tesis: *Evaluación del Comportamiento de las Sequías en el Norte de Sudamérica Utilizando Mallas de Precipitación y Temperatura*, en la Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. La investigación tuvo como objetivo principal determinar el comportamiento espacio-temporal de las sequías en el Norte de Sudamérica utilizando mallas de precipitación y temperatura. En los **resultados** se observan los efectos del ENSO para el año 1991 y 1992, tomando el SPI03 y el PDSI. En los colores cálidos se muestran los déficits de precipitación, mientras que en colores fríos las zonas en donde las lluvias estuvieran por encima de la media histórica. El intervalo 1991-1992 fueron años particularmente secos para Colombia. Llegando a las siguientes **conclusiones**: 1) El SPI siendo un método que solo tiene en cuenta las cantidades de precipitación presenta unos resultados bastante completos en donde se evidencian los periodos de sequías, sus duraciones e intensidades. Así mismo en la representación gráfica de este índice se puede observar claramente la afectación del Norte del continente después de sucedido un fenómeno El Niño. De este modo se puede evidenciar la exactitud que posee el método en cuanto la identificación del déficit de precipitación. En consecuencia, se puede concluir que el método es potencialmente aplicable en la variación climática y posterior comportamiento tomando como bases las series del SPI. Se sugiere tomar las series de precipitación y analizar las

duraciones de las rachas de sequías y sus respectivas magnitudes para hallar la intensidad de cada una de estas en las diferentes escalas que establece el SPI. 2) Siguiendo la teoría de que el agua no se pierde sino se transforma, se toma la teoría de los vientos alisios, los cuales dependiendo de la época del año tendrán una dirección predeterminada, algunos lugares específicos presentaron una tendencia negativa (más seco) mientras otros puntos específicos tienden a humedecerse con el paso de los años; de acuerdo a esto los vientos alisios pueden ser influyentes en estos cambios en las cantidades de precipitación, ya que la fuerza de estos vientos llegan a mover las nubes cargadas de agua de un lugar a otro, esto también hace que se presenten dos fuertes épocas de lluvias al año en regiones aledañas al ecuador. 3) De acuerdo a los resultados y graficas obtenidas se puede evidenciar que el efecto ENSO no afecta de la misma manera cada punto geográfico del continente. La cuenca del Amazonas es muy afectada por la llegada del fenómeno ENSO, junto con la Cordillera de Los Andes en territorio colombiano.

**Hassanzadeh, Kordani & Fakheri (2012)**, realizaron la investigación *Pronóstico de sequía mediante algoritmo genético y modelo combinado de red neuronal-Wavelet*, en la universidad de Tabriz, Irán. Emplearon los AG, para minimizar los factores de forma y escala en la distribución teórica Gamma que representa la función de densidad de probabilidad. Los autores comparan los resultados con el método de estimación de máxima verosimilitud y los AG para los SPIs de 3, 6, 12, 24 y 48 meses. Los **resultados** demuestran que los AG obtienen mejor performance, según los coeficientes de eficiencia calculados. Finalmente para la predicción emplean las RNA con transformada wavelet, tomando el 75% de los datos para el entrenamiento y el resto 25% para la validación y prueba respectiva.

**La Cruz (2015)**, en su tesis: *Análisis de las sequías meteorológicas en Venezuela utilizando el método L-momentos*, en la

Universidad de Carabobo, Venezuela. La investigación tuvo como **objetivo** principal analizar el comportamiento de las sequías meteorológicas en Venezuela mediante el método L-Momentos y desarrollar mapas temáticos sobre la frecuencia de dichos eventos. En los **resultados** se han identificado los años y las regiones donde han ocurrido sequías meteorológicas y con esta información los organismos competentes del Estado pueden desarrollar predicciones en base a estos episodios. Llegando a las siguientes **conclusiones**: 1) El índice de sequía generado están basados en estadística sencilla y de fácil interpretación y permite obtener información confiable de una zona en particular y permite analizar cuatro categorías como son: extremas, severas, moderadas y leves. Con la aplicación de estos índices se determinó que la sequía más relevante hasta el año 2005 en Venezuela sucedió en el año 2002, además de presentarse otros episodios extremos en los años 1989, 2001, 1949, 1957, 1974, 1973, 1977, 1983 y 1992. El mayor porcentaje de los años con manifestaciones de sequías ocurrió después de la década de los años 1970, en donde el estado Cojedes fue uno de los más afectados, específicamente en los sectores Tinaco- El Pao. El año 1989 es donde ocurrió la mayor cantidad de sequías (extremas, severas, moderadas y leves), seguido del año 1974, 1977 y 1973. En cuanto al porcentaje de estaciones secas con respecto al total analizadas se concluye también que el año 2001 presenta el 50% de las estaciones secas, seguidas del año 1997 y 2002 con un 45,5% y 42,5% de las estaciones secas, respectivamente. 2) La distribución espacial de las estaciones que conforman las regiones homogéneas presentan un patrón definido a excepto de la región seis (6) la cual muestra una gran variabilidad en la ubicación geográfica de las estaciones. Los L-momentos regionales hacen concluir que las zonas con climas semiárido tienen una alta heterogeneidad regional con relación a las zonas de clima húmedo. 3) Las 15 curvas de crecimiento regionales tienen una limitante para su aplicación, ya que sólo se pueden identificar probabilidad de ocurrencia de sequías hasta un porcentaje en

particular, lo que limita el cálculo de los mismos para periodos secos extremos.

**Peña et al., (2016)**, realizaron la investigación *Análisis comparativo de índices de sequía en Andalucía para el periodo 1901-2012*, en la Universidad de Granada, España. El objetivo global de este trabajo es el análisis de la detección y evolución de los episodios de las sequías en Andalucía en el período 1901-2012, caracterizadas mediante tres índices de sequía diferentes: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) y el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP), calculados en tres ventanas temporales del periodo inicial 1901-2012. Este análisis se ha llevado a cabo después de un estudio preliminar de las tendencias de precipitación con la intención de entender el comportamiento de las mismas, ya que esta variable climática es una de las más importantes en el análisis de extremos. Los **objetivos** particulares de este estudio son: (1) investigar y caracterizar las sequías meteorológicas en Andalucía, principalmente los episodios más importantes; (2) proporcionar una evaluación global de las capacidades de cada uno de los tres índices analizados para caracterizar la sequía en un territorio climáticamente heterogéneo; y (3) describir el comportamiento de las series precipitación y de los índices de sequía considerados, con el fin de establecer las características generales de la evolución de los mismos en Andalucía. Los resultados han demostrado que no todos los índices responden de la misma manera en la identificación de la intensidad y duración de los periodos de sequía en este tipo de región en la que la variabilidad geográfica y climática es uno de los elementos principales a considerar.

**Sánchez (2009)**, en su tesis *Influencia de variables macroclimáticas en la sequía meteorológica en el sur del Perú*, en la Universidad Politécnica de Valencia, España. El **objetivo** principal de

la investigación son estudiar las interrelaciones que existen entre fenómenos atmosféricos de carácter global y los eventos de sequías que ocurren en la zona Sur del Perú. Enfocado principalmente al fenómeno ENSO. En los resultados la influencia de la variabilidad del ENSO sobre la climatología del Sur peruano, mediante el desarrollo de distintas correlaciones entre los Índices Estandarizados de Precipitación (SPI) y los indicadores climáticos globales a diferentes escalas de agregación y rezagos temporales. Se ha detectado un comportamiento espacialmente homogéneo de la sequía en un área extensa del Sur peruano. Llegando a las siguientes **conclusiones**: 1) El ciclo ENSO explica gran parte de la variabilidad climática interanual en el Trópico, aunque su influencia se extiende también a regiones extratropicales a través de esquemas de teleconexiones climáticas, a las que se superponen efectos de modos climáticos de baja frecuencia, como la Oscilación Decadal del Pacífico. 2) En la zona Sur del Perú, se conjugan diversos factores para crear uno de los climas más áridos del mundo. Sin embargo, la presencia de un océano de aguas frías, que limita la evaporación y mantiene condiciones climáticas estables, es el factor principal y responsable de la ausencia de precipitaciones a lo largo de la Costa peruana. 3) La Cordillera de los Andes constituye otro factor importante en la definición del clima de América del Sur. Este imponente obstáculo a la circulación general que, en su zona central se amplía dando origen al Altiplano peruano-boliviano, evita que grandes masas de aire húmedo –procedentes del Océano Atlántico– produzcan precipitaciones sobre el flanco occidental de la Cordillera de los Andes.

**Zavala (2015)**, en su tesis: *Aplicación de métodos para análisis de sequías en la cuenca del río Sinaloa*, en el Instituto Politécnico Nacional, México. La investigación tenía como **objetivo** identificar periodos de sequías mediante los métodos de las Secuencias o Rachas y el propuesto por la Comisión Federal de Electricidad. En los **resultados** se ha observado que la zona norte del país sufre de muchas

sequias, que ha sido un problema latente para la región, por lo que es de suma importancia el poder anticipar las sequias para poder tomar medidas preventivas a estas. Llegando a la siguiente **conclusión**: 1) Según los análisis realizados, se registró la sequía de mayor duración en la estación Ruiz Cortines, de 10 años (1992-2002), sequia de la estación el Nudo con una sequía de duración de 9 años(1962-1971), aunque el registro oficial muestra sequias con duraciones menores en estos periodos; por lo que se puede fomentar el análisis con varios métodos para poder tomar un criterio sobre los rangos más desfavorables, siendo la comparación de las sequias identificadas con los métodos contra las que se registran oficialmente, buena.

### 2.1.2 **Ámbito nacional**

**Ayala (2016)**, en su tesis *Predicción de sequías con redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos utilizando precipitación por percepción remota*, en la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. El **objetivo** de la investigación, es determinar el desempeño de la predicción de sequía agrícola regional, mediante el modelo de Redes Neuronales Artificiales tipo NARX, utilizando los índices SPI, SPEI, VCI e Índices Climáticos Globales. Se han determinado 10 regiones homogéneas mediante el análisis regional de frecuencias y L-Momentos, definiendo la región más árida y el índice representativo con su respectiva escala temporal (SPEI 6 meses) que responde al crecimiento y desarrollo de la vegetación en la cuenca con correlación de Pearson igual a 0.58. La hipótesis planteada fue que el modelo RNA-NARX permite la predicción de la sequía agrícola, utilizando precipitaciones mensuales por percepción remota y los índices climáticos globales como entradas externas. Para la predicción se han determinado 2 grupos, el primero para la construcción del modelo con 80% del registro y para la validación del modelo y la **hipótesis** con el 20% restante. Los **resultados** de la predicción han sido satisfactorios aceptándose la hipótesis nula planteada. La investigación llego a las

siguientes **conclusiones**: 1) Aplicando la estadística inferencial, la medida de la evidencia (p-value) que aporta el resultado en el modelo RNA-NARX es de 0.104, demostrando ser mayor al nivel de confianza igual 0.05. Por lo tanto, se acepta el modelo RNA-NARX para la predicción de la sequía agrícola, utilizando precipitaciones mensuales por percepción remota y los índices climáticos globales como entradas externas, en la cuenca del Mantaro. 2) El índice de sequía más representativo en función al crecimiento y desarrollo de la vegetación dentro de la cuenca del Mantaro es el SPEI de escala temporal 6 meses, el mismo que presenta 0.58 de coeficiente de correlación y representa correlación positiva moderada.

**Carbajal (2017)**, en su tesis *Estimación del índice de sequía a partir de datos imágenes NDVI y LST del sensor MODIS y TRMM para las regiones de Lambayeque, Piura y Cajamarca – Perú, durante el periodo 2000 – 2013* en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Con el fin de lograr un mayor entendimiento acerca de los factores que inciden en el inicio, duración e intensidad de éste fenómeno, el presente trabajo tuvo como **objetivo** analizar los índices de sequía generados mediante las imágenes satelitales para el seguimiento de la distribución espacial y evolución temporal del índice de sequía sintetizado (ISS), definido como la primera componente principal del índice de condición de la vegetación (ICV), índice de condición de la temperatura (ICT) e índice de condición de la precipitación (ICP). Es decir, el ISS integra tres productos; los dos primeros productos obtenidos del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite Terra; como son: el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y el LST (Land Surface Temperature) y el tercer producto la precipitación estimada por el sensor activo radar de precipitación (PR) a bordo del satélite TRMM 3B43 versión 7 (Tropical Rainfall Measuring Mission). El ISS sintetiza la información acerca del déficit de precipitación, estrés térmico del

suelo y el estado de crecimiento de la vegetación en el proceso de sequía.

En el presente trabajo se muestra los **resultados** de la distribución espacial y evolución temporal del ISS, ICV, ICT e ICP, para la zona árida, semiárida y subhúmeda seca, donde los valores menores a 0.4 corresponden a la sequía extrema, severa y moderada, y también muestra que los años 2004 y 2005 fueron años de sequía. Los índices ISS, ICV, ICT e ICP se evaluaron con el índice de precipitación estandarizada a una escala de 3 meses (IPE3) lo cual refleja adecuadamente la información de la sequía meteorológica para cada zona de aridez. En la zona árida corresponden el ISS y el ICV, en la zona semiárida corresponden el ISS y el ICT y en la zona subhúmeda seca corresponden el ISS y el ICT, donde el ISS tiene una moderada correlación de 0.66 en la zona semiárida y de 0.54 en la zona subhúmeda seca, para las regiones de Piura, Lambayeque y Cajamarca en el periodo marzo 2000 a diciembre 2013.

**Curi (2017)**, en su tesis *Caracterización de las sequías hidrológicas en la vertiente peruana del océano pacífico*, en la Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú. El trabajo de investigación tubo **objetivo** general caracterizar espacial y temporalmente la sequía hidrológica en la Vertiente Peruana del Océano Pacífico mediante un índice de sequía hidrológico estandarizado. Los **resultados** se dieron con el cálculo de un Índice de Sequía de Caudal Estandarizado (IQE), permitió caracterizar espacial y temporalmente los eventos de sequía hidrológica ocurridos entre los años de 1960-2005 en la Vertiente peruana del Pacífico, evaluando sus tres principales características (duración, intensidad y extensión espacial), estas características se evaluó aplicando el método de Umbrales a la serie estandarizada del caudal mensual, estos Umbrales invariables en el tiempo y el espacio se fijaron en Percentil (20) o -0.84 en la escala del IQE para definir los eventos Moderadamente Secos y

Percentil (5) o -1.65 en la escala del IQE para definir los eventos Extremadamente Secos. Llegando a las siguientes **conclusiones**: 1) Los datos hidrométricos recopilados, analizados mediante diferentes pruebas estadísticas, redujo las incertidumbres inherentes al proceso de recolección. Los supuestos básicos de toda variable hidroclimática (Homogeneidad y Estacionariedad), permitió elaborar una base hidrométrica (caudal mensual) de calidad, con una cobertura espacial y temporal lo suficientemente amplia para caracterizar los eventos de sequías hidrológica, ocurridos históricamente en la Vertiente peruana del Pacífico. 2) El diagrama de boxplot, obtenido de los valores estandarizados de cada una de las seis distribuciones evaluadas, permitió identificar la robustez de tres Distribuciones de Probabilidad (DP), que aproximan a los valores estadísticamente esperados de toda variables estandarizada (media = 0 y desviación estándar =1), estas tres DP son: Valor Extremo Generalizado (GEV), Log Normal (LN3) y Logistic Generalizado (GLO), sin embargo las dos primeras distribuciones (GEV y LN3) tienden a subestimar y sobrestimar los valores estadísticamente esperados de la variable estandarizada (IQE). 3) La distribución seleccionada (Logistic Generalizado), forma un índice estandarizado capaz de caracterizar las sequías hidrológicas ocurridas en la Vertiente peruana del Pacífico. Sin embargo el comportamiento hídrico de un río o conjunto de ríos no puede ser descrito por una sola DP dada la marcada estacionalidad del recurso hídrico (avenida y estiaje), siendo estos comportamientos descritos por diferentes DP.

**Vega (2018)**, en su tesis *Variabilidad espacio-temporal de las sequías en el Perú y el peligro asociado al fenómeno del niño*, en la Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. En el presente estudio se analiza por primera vez la variabilidad espacio-temporal, las características y las tendencias de las sequías en el Perú y el peligro de sequías asociado al ENSO (El Niño-Oscilación del Sur), para el periodo

de 1970 al 2014. Con este fin, se realizó la regionalización de las sequías utilizando una combinación del método de Análisis de Componentes Principales con el método de Cluster, basado en el Índice de Precipitación Estandarizada (IPE). Finalmente, sobre las regiones delimitadas, se realizó la caracterización de las sequías, análisis de tendencias, correlación con índices océano-atmosféricos y evaluación del peligro de sequía durante el ENSO. Los **resultados** muestran que, la variabilidad espacio-temporal de las sequías se puede resumir en 8 regiones homogéneas, con diferentes características entre ellas. Así, las tendencias indican un incremento de las sequías en la Vertiente del Titicaca y mayor intensidad y severidad de las sequías en la parte alta de la vertiente del Amazonas, mientras el norte de la Vertiente del Pacífico evidenció tendencia a la reducción de la duración y severidad de las sequías. Considerando un análisis decadal de las sequías (1970-2010), en todas las regiones se ha reducido el número de meses de sequías en la última década (2000-2010) en comparación con décadas anteriores. Asimismo, se encontraron correlaciones significativas entre las series regionales del IPE y algunos índices océano-atmosféricos (C, E, SOI y TPI). Finalmente, la evaluación del peligro de sequía durante el ENSO, identificó un incremento del peligro de sequías en el sur de la vertiente del pacífico, en la vertiente del Titicaca y al sur y norte de la Vertiente del Amazonas bajo anomalías positivas del Índice Oceanográfico del Niño (ONI). Llegando a la siguiente **conclusión**: 1) Se determinó que la variabilidad espacio-temporal de las sequías en el Perú se puede representar mediante las 8 regiones homogéneas definidas en función del IPE. Asimismo, se identificaron los cuatro eventos de sequía más importantes, que afectaron varias de las regiones identificadas para el Perú: la sequía de 1992, que afectó las regiones del centro al sur del país (CVP, SVP, SVA y TVT) seguida de la sequía de 1990, que afectó a las regiones del sur del país (CVP, SVP,SVA); la sequía de 1983, que afectó a las regiones (SVP y TVT) y la de 1977,

que afectó a las regiones localizadas mayoritariamente al norte del país (NVP, CVP, NAN, NVA, AVA y TVT).

**Zavala (2015)**, realizó la investigación: Determinación de las frecuencias de sequías en la sub cuenca del río Huenque con fines de planeamiento de los recursos hídricos para uso en actividades agropecuarias, en la Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú. El **objetivo** principal es determinar la frecuencia de las sequías a través del método de Índice de precipitación estandarizada en la sub cuenca del río Huenque, con fines de planteamiento de los recursos hídricos para uso de las actividades agropecuarias. Los **resultados** del estudio nos indican que en promedio para las 08 estaciones, considerando un periodo de 48 años (1964 al 2010) hubieron 564 eventos analizados, el 1.3% representa eventos extremadamente húmedos, el 4,1% eventos muy húmedos, 9.7% eventos moderadamente húmedos, 67.1% eventos normales, 9.8% eventos ligeramente seco, 4.9% eventos de sequías moderadas, 3.1% eventos de sequías severas y el 3.1% eventos de sequías extremas. Para mitigar las sequías se propone la construcción de 07 presas y 09 sistemas de riego en el ámbito de la sub cuenca del río Huenque. La investigación llegó a la siguiente **conclusión**: 1) Para mitigar la presencia de sequías en la sub cuenca del río Huenque se propone las siguientes medidas: Mejoramiento y ampliación de los sistemas de riego, evaluar y reestructurar la cédula de cultivos, donde practican la agricultura en seco, Explotar los recursos de agua subterránea, forestación en las partes altas de la sub cuenca, considerar las técnicas de cosecha de agua, construir nuevos sistemas de riego y aumentar la eficiencia de riego con sistemas presurizados. Realizar la gestión al Gobierno Regional Puno para la construcción de infraestructura de riego para solucionar la presencia de sequías en el ámbito de la sub cuenca del río Huenque, a través de la construcción de 07 presas y 09 sistemas de riego para irrigar 14,070 hectáreas que beneficiara a 3,600 familias.

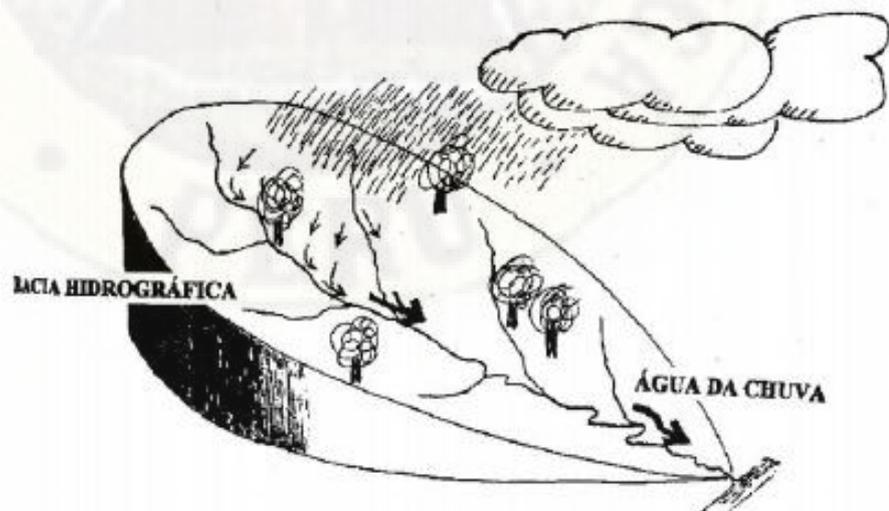
## 2.2 BASES TEÓRICAS

### 2.2.1 CUENCA HIDROGRÁFICA

Una cuenca hidrográfica de un curso de agua es un área de captación natural del agua de la precipitación que hace converger los escurrimientos hacia un único punto de salida, su exutorio. Está compuesta básicamente por un conjunto de superficies vertientes de una red de drenaje formada por cursos de agua que confluyen hasta resultar en un lecho único en el exutorio. Cuenca hidrográfica es, por tanto, un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o por un sistema conectado de cursos de agua, de modo tal que todo el caudal efluente es descargado por una simple salida. Se puede considerar un sistema físico donde la entrada es el volumen de agua precipitado y la salida es el volumen de agua escurrido por el exutorio (Figura 2.1), considerándose como pérdidas intermedias los volúmenes evaporados y traspirados, y también los infiltrados profundamente (Pedrazzi, 2003).

**Figura 2.1**

*Cuenca hidrográfica*



Fuente: (Pedrazzi, 2003)

### 2.2.2 EL CICLO HIDROLÓGICO

Los eventos extremos son fenómenos meteorológicos naturales que se pueden presentar en cualquier lugar y momento, las sequías como las inundaciones son resultado de alteraciones en la dinámica de la humedad atmosférica. La naturaleza de ambos fenómenos es compleja, mientras una parte sufre sequía, otra puede encontrarse inundada, simultáneamente (Velasco, 2013).

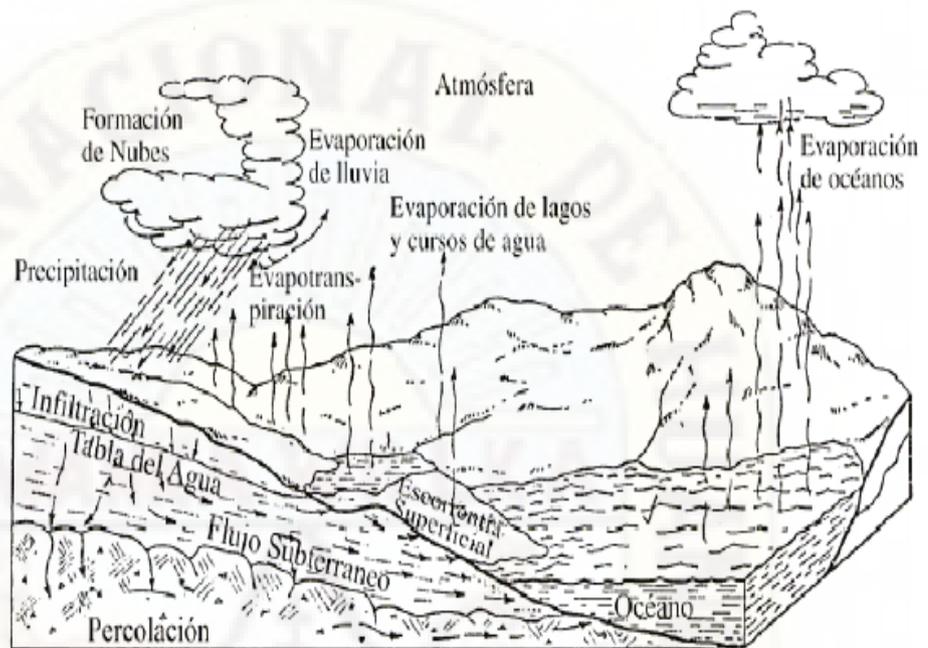
Se denomina evento extremo al evento hidroclimático (inundación y/o sequía) que tiene muy baja probabilidad de ocurrencia, es un episodio raro que se presenta en un lugar y en una época en particular, un evento extremo puede considerarse cuando el cuantil es superior e inferior a los percentiles 90 o 10 de una función de probabilidad (Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2009).

Algunos de los eventos extremos que alteran el proceso del ciclo hidrológico y por ende la humedad atmosférica son: El Niño, las erupciones volcánicas, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la actividad industrial (Velasco, 2013).

Considerando que los eventos hidroclimáticos extremos (sequías y/o inundaciones) son las manifestaciones más dramáticas en el ciclo hidrológico, es de esperar que estos fenómenos aumenten en intensidad, severidad y duración, atribuidas al cambio climático, incrementando la frecuencia de ocurrencia así como el impacto que ocasiona en la sociedad (Velasco, 2013).

## Figura 2.2

### *El ciclo hidrológico*



Fuente: (Fattorelli & Fernandez, 2011).

### 2.2.3 LA SEQUÍA

La sequía se percibe como uno de los desastres naturales más costosos y menos entendidos, dada la dificultad para definir su comienzo y fin, su lento desarrollo y las múltiples facetas que posee a nivel regional. Entre todos los eventos meteorológicos extremos, posee la mayor duración y la menor predictibilidad (Mishra y Singh, 2010).

Este fenómeno ocurre virtualmente en todas las zonas climáticas, tanto en regiones húmedas como secas y en cualquier época del año. Si bien no posee una definición universal, en términos generales puede decirse que es un período prolongado, usualmente de longitud estacional o mayor, durante el cual la precipitación se encuentra por debajo de sus valores normales. A la ausencia de una definición de sequía precisa y universalmente aceptada se suma la confusión acerca

de si existen o no condiciones de sequía y si existen, su grado de severidad (Wilhite y Svoboda ,2000). Esta deficiencia natural en la precipitación resulta en escasez de agua para ciertas actividades, grupos o sectores ambientales (White y Walcott, 2009).

En general, es posible organizar las definiciones de sequía como conceptual y operacional. La definición conceptual, es aquella de tipo teórico que, solo se limita a definir y describir al fenómeno. Por otro lado, la definición operacional intenta identificar el inicio, evolución y el fin del fenómeno, y a veces requiere considerar su frecuencia, severidad y duración. Analizar la sequía involucra diversas disciplinas, cada una de las cuales incorpora diferentes factores en su definición. Por ello, la sequía puede ser de tipo meteorológico, agrícola, hidrológico, socioeconómico, etc. y sus diferencias radican en el grado de intervención humana en el sistema (Kundzewicz et al., 1993).

Aunque no exista una definición universalmente aceptable del concepto de sequía, existen diversas definiciones, todas ellas dependen del sector en la que se experimenta el déficit del recurso hídrico, encontrando más de 150 definiciones de este tipo, categorizándola en grupos según la disciplina científica desde la que se analiza al fenómeno. La sequía también puede ser estudiada en un contexto político y social, delineando las consecuencias e impactos así como los productos de las políticas de manejo de sequías (Kundzewicz et al., 1993).

La disponibilidad del recurso hídrico incluye el contenido de humedad del suelo, el agua subterránea, la escorrentía superficial y el almacenamiento en reservorios. Los impactos de las sequías, provocan que la demanda de agua exceda al suministro de la fuente del recurso hídrico. Existe una gran variabilidad temporal de los procesos de transferencia de la precipitación hasta que el recurso hídrico esté disponible en su forma aprovechable (ríos, riachuelos, pozos). Por el

lado de la demanda, los usos del agua se anejan en diversas escalas temporales; en consecuencia, los impactos sobre los déficits de agua son el resultado de una compleja interacción entre las fuentes y los usos del agua (McKee et al., 1993).

El conocimiento del comportamiento de las sequías ha sido un importante aspecto del planeamiento y manejo de los sistemas de recursos hídricos. Generalmente los embalses cumplen una importante función supliendo los requerimientos de la demanda durante el episodio de las sequías de una determinada magnitud y duración (Hyu-Suk Shin & Salas, 2000).

Los efectos de las sequías generalmente se acumulan de forma gradual durante periodos de tiempo extensos, pudiendo durar incluso años después de que el evento ha terminado dificultando la determinación del inicio y el fin del evento. Los impactos de las sequías son de carácter no destructivos y se producen sobre áreas extensas, en comparación con los impactos causados por otros desastres naturales, por lo que es complicado cuantificar sus efectos. Sin embargo, al comparar las sequías con otros desastres naturales, esta es la que presenta los impactos más importantes con respecto a la duración del evento, grado de severidad, extensión superficial, pérdidas de vidas, pérdidas económicas, efectos sociales y tiempo necesario para su desarrollo o recuperación (Villalobos, 2007).

Por lo general, se está de acuerdo en considerar a la sequía como un período prolongado de escasez del recurso hídrico capaces de provocar efectos adversos sobre la sociedad o los sistemas productivos teniendo su origen común: el déficit de la precipitación (Núñez et al., 2007, Wilhite & Glantz, 1985).

### **2.2.3.1 DEFINICIÓN DE SEQUÍA**

Fernández y Donoso (2000) dicen que, la sequía se define como un evento en que la demanda supera a la oferta de agua, generándose un déficit que tiene asociado un daño; si no hay daño, no se habla de sequía, aun cuando haya déficit. El concepto de sequía tiene varias aplicaciones; se habla de sequías meteorológicas, cuando hay escasez de lluvias, y de sequías hidrológicas, cuando hay escasez de caudales. Cada evento de sequía queda caracterizado básicamente por la duración del déficit, la intensidad del déficit y la magnitud del déficit. El análisis espacial continuo de estos eventos permite, además, determinar el área de influencia espacial de cada sequía.

Mendoza (1994) manifiesta que, las sequías es un fenómeno frecuentemente mencionado como el causante de grandes catástrofes en la economía andina, motiva que las autoridades reiteradamente declaren en emergencia la agricultura.

Chow (1994) manifiesta que los sistemas hidrológicos son afectados algunas veces por eventos extremos, tales como tormentas severas, crecientes y sequías. La magnitud de un evento extremo esta inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribución de probabilidades. Se supone que la información hidrológica analizada es independiente y está idénticamente distribuida, y

el sistema hidrológico que la produce se considera estocástico, independiente del espacio tiempo.

El Instituto Nacional de Ecología (INE, 1995) definió la sequía meteorológica como una función del déficit de precipitación con respecto a la precipitación media anual o estacional de largo periodo, y su duración en una determinada región.

### **2.2.3.2 CLASIFICACIÓN DE LA SEQUÍA**

Las sequías son típicamente causadas por la persistencia de bajas precipitaciones durante un largo periodo de tiempo; que genera la disminución en la disponibilidad de agua en todos los estados del ciclo hidrológico; sin embargo, sus efectos pueden ser amplificadas por la influencia del nivel de evaporación (dependiente de la radiación solar, la temperatura del aire, la presión de vapor del agua y la velocidad del viento); así como las características del suelo y la cobertura vegetal (Kundzewicz et al., 1993).

Wilhite y Glantz (1985), agruparon diversas definiciones de sequías, en cuatro grupos según la disciplina científica desde la cual se analiza el fenómeno: sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica.

- **Sequía meteorológica**

Basada en datos climáticos, es una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media durante un período de tiempo determinado. Ante la dificultad de establecer una duración y magnitud del déficit pluviométrico válidas para diferentes áreas geográficas, algunas definiciones de sequía optan por no especificar umbrales fijos.

Por ejemplo, Palmer (1965) define sequía meteorológica como el intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar disminuye progresivamente por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad climatológicamente apropiado.

Wilhite y Glantz (1985) la refieren como el grado de desviación de la precipitación en comparación a un comportamiento “normal”, de una serie de tiempo preestablecida.

- **Sequía agrícola.**

Cadena (2005) afirma que por ser el primer sector económico que resulta afectado por la escasez de precipitaciones, la agricultura adquiere una especial relevancia en relación con la sequía. Así, se produce una sequía agrícola cuando no hay suficiente humedad en el suelo para permitir el desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento. Dado que la cantidad de agua es diferente para cada cultivo, e incluso puede variar a lo largo del crecimiento de una misma planta, no es posible establecer umbrales de sequía agrícola válidos ni tan siquiera para una única área geográfica.

- **Sequía hidrológica**

Valiente (2001) indica que la sequía hidrológica se asocia a una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalses, lagos, entre otros). Al producirse un desfase entre la escasez de lluvias o

nieves y la reducción del caudal de ríos o el nivel de lagos y embalses, las mediciones hidrológicas no pueden ser utilizadas como un indicador del inicio de la sequía, pero sí de su intensidad. A diferencia de la sequía agrícola, que tiene lugar poco tiempo después de la meteorológica, la sequía hidrológica puede demorarse durante meses desde el inicio de la escasez pluviométrica o, si las lluvias retornan en poco tiempo, no llegar a manifestarse. Por tanto, la secuencia temporal es: sequía meteorológica, a continuación sequía agrícola y, en último lugar, sequía hidrológica.

Linsley et al. (1975) definen a la sequía hidrológica como el periodo durante el cual los caudales son inadecuados para satisfacer los usos establecidos bajo un determinado sistema de gestión de aguas.

- **Sequía socioeconómica.**

National Drought Mitigation Center (NDMC, 2016) menciona que una sequía socioeconómica se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (económicos o personales) a la población de la zona afectada por la escasez de lluvias. Para hablar de sequía socioeconómica no es necesario que se produzca una restricción del suministro de agua, sino que basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica.

National Drought Mitigation Center (NDMC, 2016) menciona que en el caso de la sequía socioeconómica, son tan determinantes la magnitud y la duración del evento seco como la forma en que la economía y la sociedad desarrollan sus actividades, ya que determinadas acciones incrementan la vulnerabilidad a la escasez de precipitaciones. En función de

esa vulnerabilidad, los efectos de la sequía sobre la economía y la sociedad, medidos en forma de pérdidas materiales, población afectada o pérdida de vidas humanas, adquirirán mayor o menor relevancia, llegando a configurar situaciones en las que la sequía es considerada una catástrofe.

#### 2.2.4 CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS

Yevjevich (1967) la caracterización de las sequías presenta rasgos individuales distintivos, para su identificación se propuso la teoría de rachas o sucesiones. Esta analiza las sequías en base a los procesos espacio temporales que consideran la oferta y la demanda del recurso hídrico en una región. La diferencia en una serie cronológica, representa la disponibilidad del recurso hídrico, mientras que la necesidad de hacer uso de este recurso identifica las sequías. La teoría de rachas permite la caracterización de una serie de episodio seco en base a tres características principales como son: duración, severidad y la intensidad a partir de un nivel de truncamiento o umbral definido (Lorenzo, 2012).

- **Duración (L)**

La duración de un evento de sequía, se define como el número de sucesiones temporales consecutivas e interrumpidas (uno o más meses) con una precipitación inferior al nivel promedio registrado en un periodo de tiempo relativamente largo. Se conoce también como la longitud del run (-), expresado en meses o años consecutivos (Sosa, 2016 y Ayala, 2016).

- **Severidad (D)**

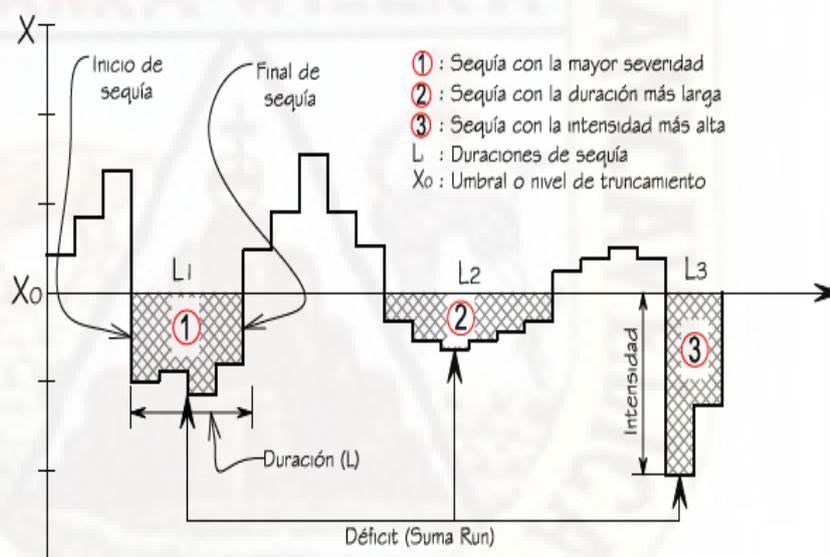
Este término hace referencia la acumulación de la deficiencia de las sequías según el umbral  $x_0$  definido. Es decir, la suma de los déficit durante la longitud o duración, el cual se cuantifica mediante la sucesión negativa acumulada (Ayala, 2016).

- **Intensidad (I)**

Hay un parámetro muy usual que se utiliza en la caracterización de sequías que viene ser la intensidad. La cual es una medida de severidad del evento, algunos autores la calculan como la severidad entre la duración de la sequía y corresponde entonces a la intensidad promedio, en otros casos se define como el máximo valor del déficit ocurrido durante el evento, conocido como intensidad máxima (Sosa, 2016).

**Figura 2.3**

*Características de la sequía para un nivel de truncamiento  $x_0$ .*



**Fuente:** Adaptado desde Mishra y Singh (2010, p. 209).

### 2.2.5 ÍNDICES DE SEQUÍAS

Los esfuerzos que se han realizado en diversas partes del mundo para definir de forma objetiva un fenómeno tan complejo y que tiene diversas concepciones, ha dado lugar a que se desarrollen diversos índices o indicadores de sequías que buscan proporcionar una escala uniforme de los criterios para evaluar las sequías. Los índices numéricos

son necesarios para comparar valores de este fenómeno en diversas regiones, así como para comparar eventos del pasado. Sin embargo, debido a las múltiples definiciones de la sequía y el amplio rango de sectores afectados hace difícil cuantificar sus efectos, resultando problemático el desarrollo de un único índice numérico universal que pueda representar la intensidad, severidad así como los impactos sobre una determinada área (Heim, 2002).

Los índices también son utilizados para monitorear el comportamiento de las sequías en tiempo real y poder evaluar su evolución. Los índices deben ser valores simples determinados mediante procedimientos de cálculo estandarizados, que resuman los criterios y las características de un evento de sequías (Villalobos, 2007).

A continuación, se mencionan los principales índices de sequía.

#### **2.2.5.1 Índice de precipitación estandarizado (SPI)**

El SPI (Standardized Precipitation Index) fue propuesto por McKee et al. (1993) y se ha popularizado debido a su planteamiento teórico y por usar sólo el registro mensual de precipitación, preferentemente con más de 30 años. Su procedimiento de cálculo comienza ajustando el modelo probabilístico Gamma de dos parámetros, el cual se transforma a una distribución Normal, cuya variable es el índice SPI, con valores positivos para los años húmedos y negativos para los secos o de sequía. Velasco (2002) da mayores detalles de su planteamiento teórico.

Como el índice SPI se estima generalmente para las siete duraciones mensuales siguientes: 1, 3, 6, 9, 12, 24 y 48; entonces se comienza por obtener los valores factibles en cada lapso indicado. Para la duración de un mes se ajusta el modelo

Gamma a todo el registro mensual, cuyo número de datos es  $nd=12.NA$ , siendo  $NA$  el número años del registro disponible. Para lapsos siguientes se obtienen las sumas móviles. Por ejemplo, para tres meses, el primer dato es la suma de los tres primeros meses del registro y el segundo dato será la suma del mes dos al cuarto y así sucesivamente. Por tanto, el nuevo  $nd$  será:

$$nd = 12.NA - dm + 1 \quad (1.1)$$

en donde,  $dm$  es la duración en meses de la nueva secuencia de datos que se calculan como sumas móviles. Debido a la posibilidad de tener sumas móviles iguales a cero en las duraciones cortas, se utiliza la distribución Gamma Mixta para su ajuste.

La distribución probabilidades Gamma de dos parámetros de ajuste tiene como función de densidad de probabilidad la expresión siguiente:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \cdot e^{-x/\beta} \quad \text{para } x > 0 \quad (1.2)$$

en la cual,  $\alpha > 0$  es el parámetro de forma,  $\beta > 0$  el de escala,  $x > 0$  la precipitación en un cierto lapso y  $\Gamma(\alpha)$  la función matemática factorial o función Gamma que da nombre a tal distribución, originalmente conocida como Pearson tipo III. Varios métodos se han propuesto para estimar los parámetros de ajuste, uno de ellos, el de máxima verosimilitud es bastante exacto y sus expresiones son (Haan, 1997 y Campos, 2005):

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (1.3)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (1.4)$$

siendo  $A$  una variable auxiliar definida como:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_{i=1}^{n'} \ln(x_i)}{n'} \quad (1.5)$$

en la cual,  $n'$  es el número de datos no nulos ( $x_i$ ), cuya media aritmética es  $\bar{x}$ . La estimación del parámetro de forma con la ecuación 3, requiere una corrección originada por el método de máxima verosimilitud, que consiste en restarle el término  $\Delta_\alpha$  cuando resultó menor de 5.60, ésta es:

$$\Delta_\alpha = a_0 + a_1 \cdot \alpha + a_2 \cdot \alpha^2 + a_3 \cdot \alpha^3 + a_4 \cdot \alpha^4 + a_5 \cdot \alpha^5 \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.04701236 & a_1 &= -0.0742802 & a_2 &= 0.05139812 \\ a_3 &= -0.0177746 & a_4 &= 0.002974521 & a_5 &= -0.0001899932 \end{aligned}$$

La distribución Gamma Mixta toma en cuenta la probabilidad de tener valores nulos  $q$  y de no tenerlos  $p = 1 - q$ , cuando se evalúa la probabilidad de no excedencia de un valor  $x$ , su expresión es:

$$H(x) = q + p \cdot G(x) \quad (1.7)$$

Entonces, cuando  $x = 0$ ,  $H(0) = q$ . Si  $m$  es el número de ceros de la serie que se procesa, el valor de  $q$  será estimado por  $m/n_d$  y por lo tanto.  $n' = n_d - m$ . Cuando la serie no tiene valores nulos,  $q$  será cero y  $H(x) = G(x)$ .

Para estimar la probabilidad de no excedencia  $G(x)$  relativa, un valor  $x$ , se empleará la conversión del modelo Pearson tipo III a la distribución  $ji$  cuadrada  $\chi^2$  con  $\nu$  grados de libertad, cuya equivalencia de variables es (Haan, 1997; Bobee y Ashkar 1991; Rao y Hamed 2000):

$$\chi^2 = 2 \cdot x/\beta \quad (1.8)$$

$$\nu = 2 \cdot \alpha \quad (1.9)$$

Ahora se aplica la aproximación por expansión en serie para estimar la probabilidad de no excedencia en la distribución  $\chi^2$  para un valor de  $\nu$ ; ésta es (Zelen y Severo, 1965):

$$G(x) = P(\chi^2/\nu)$$

$$= \left(\frac{\chi^2}{2}\right)^{\nu/2} \frac{e^{-\chi^2/2}}{\Gamma\left(\frac{\nu+2}{2}\right)} \left[1 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{\chi^{2r}}{(\nu+2)\cdot(\nu+4)\cdots(\nu+2r)}\right] \quad (1.10)$$

Davis (1965) La función factorial Gamma fue estimada con la fórmula de Stirling, que para valores grandes del argumento  $\varepsilon$  es bastante aproximada con un error cercano a cero; ésta es:

$$\Gamma(\varepsilon) \cong e^{-\varepsilon} \cdot \varepsilon^{\varepsilon-1/2} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \left(1 + \frac{1}{12\cdot\varepsilon} + \frac{1}{288\cdot\varepsilon^2} - \frac{139}{51840\cdot\varepsilon^3} - \frac{571}{2788320\cdot\varepsilon^4} \cdots\right) \quad (1.11)$$

Por último, de acuerdo con Edwards y McKee (1997) se emplea una aproximación numérica racional, expuesta en Zelen y Severo (1965), para convertir la probabilidad acumulada  $H(x)$  en la variable normal estandarizada  $Z$  de media cero y varianza unitaria, la cual define el índice SPI; sus ecuaciones son:

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2}{1 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2 + c_3 \cdot t^3}\right) \quad \text{para } 0 < H(x) < 0.50 \quad (1.12)$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2}{1 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2 + c_3 \cdot t^3}\right) \quad \text{para } 0.50 < H(x) < 1 \quad (1.13)$$

Dónde:

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0 < H(x) < 0.50 \quad (1.14)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(1-H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0.50 < H(x) < 1 \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} b_0 &= 2.515517 & b_1 &= 0.802853 & b_2 &= 0.010328 \\ c_1 &= 1.432788 & c_2 &= 0.189269 & c_3 &= 0.001308 \end{aligned}$$

Los niveles de humedad o de sequía se definen en la Tabla 2.1, en el cual se indican sus probabilidades de ocurrencia correspondientes; por ejemplo, las sequías moderadas ( $SPI \leq -1$ ) tienen una probabilidad de ocurrencia del 15.9 % y las extrema.

**Tabla 2.1**

*Clasificación de los periodos húmedos y secos de acuerdo al valor del índice SPI.*

<b>Valor de SPI</b>	<b>Designación:</b>
>2.00	Húmedo Extremo
1.50 a 1.999	Húmedo Severo
1.00 a 1.499	Húmedo Moderado
0 a 0.999	Húmedo Ligero
0 a -0.999	Sequia Ligera (SL)
-1.00 a -1.499	Sequia Moderada (SM)
-1.50 a -1.999	Sequia Severa (SS)
< -2.00	Sequía Extrema (SE)

**Fuente:** Adaptado de OMM, Svoboda, Hayes y Wood (2012, p. 5).

#### **2.2.5.2 Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizada (SPEI)**

La principal limitación del SPI es que se basa sólo en la precipitación e ignora otras variables que afectan la demanda de agua atmosférica, como temperatura, velocidad del viento, radiación solar y déficit de presión de vapor (McEvoy, Huntington, Abatzoglou, & Edwards, 2012). Para superar esta limitación, Vicente-Serrano et al. (2010) desarrollaron el SPEI, el cual combina la sensibilidad del PDSI con los cambios en la demanda de la evaporación causados por fluctuaciones y tendencias de la temperatura, con la sencillez de cálculo y la naturaleza multiescalar del SPI (Vicente-Serrano et al., 2010; Banimahd & Khalili, 2013; Li et al., 2014).

El SPEI se basa en un balance de agua climático mensual (precipitación menos evapotranspiración potencial, llamada serie D) que se calcula en diferentes escalas de tiempo y matemáticamente es similar al SPI, pero incluye el papel de la evapotranspiración potencial (López et al., 2013). Su cálculo sigue un enfoque similar al seguido para el cálculo del SPI, pero utilizando una distribución de probabilidad Log-logística de tres parámetros en lugar de la distribución Gamma de dos parámetros. La clasificación de sequía del SPI puede ser usada también para evaluar el SPEI (**Tabla 2.1**).

Para el cálculo del SPEI, primero se calcula la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial del mes  $j$  del año  $i$  (serie  $D^{ij}$ ), en mm; después la serie  $D^{ij}$  se agrega en la escala de tiempo  $k$  de interés para obtener las series  $D_k^{ij}$ , en milímetros.

$$D^{ij} = P_{ij} - ETP_{ij} - ETP_{ij} \quad (3.1)$$

donde  $P_{ij}$  y  $ETP_{ij}$  son la precipitación y la evapotranspiración potencial del mes  $j$  del año  $i$ , respectivamente, en mm.

Para el cálculo del SPEI es necesario utilizar una distribución de probabilidad de tres parámetros, dado que en una de dos parámetros, la variable  $x$  tiene un límite inferior de cero ( $0 < x < \infty$ ), mientras que en una función de distribución de tres parámetros,  $x$  puede tomar valores en el rango ( $\gamma < x < \infty$ , donde  $\gamma$  es el parámetro de origen de la distribución), por lo cual, (Vicente Serrano et al., 2010) propusieron utilizar la distribución Log-logística de tres parámetros, pues la serie  $Dk$  puede tener valores negativos, y cuya función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[ 1 + \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (3.2)$$

donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son los parámetros de escala, forma y origen, respectivamente, para los valores  $D_k$  en el rango de ( $\gamma > D_k < \infty$ ).

Los parámetros de la distribución Log-logística pueden obtenerse por diferentes métodos, de los cuales, el método de momentos L es el más robusto y de fácil aplicación (Ahmad, Sinclair, & Werritti, 1988; Singh, Guo, & Yu, 1993):

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (3.3)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \quad (3.4)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (3.5)$$

donde  $\Gamma(1+1/\beta)$  es la función Gamma de  $(1+1/\beta)$ , y  $w_s$  es el momento de probabilidad pesada de orden  $s$  ( $s=0,1,2$ ):

$$w_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \chi_i \left(1 - \frac{i-0.35}{n}\right)^s \quad (3.6)$$

donde  $x_i$  es la muestra aleatoria ordenada ( $x_1 < x_2, \dots, < x_n$ ) de los valores de  $D_k$  y  $n$  es el tamaño de la muestra.

La distribución de probabilidad de las series  $D_k$ , de acuerdo con la distribución Log-logística está dada por (Vicente-Serrano *et al.*, 2010):

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^\beta\right]^{-1} \quad (3.7)$$

Finalmente, para obtener los valores del SPEI, los valores de  $F(x)$  se transforman en la variable normal estándar  $Z$ , sustituyendo  $(x)$  por  $(x)$  en las ecuaciones (1.12) y (1.13). El criterio de evaluación es simular al índice SPI.

El índice SPEI, presenta ventajas respecto a otros índices, ya que éste es multiescalar e incluye la variable temperatura y su aplicación es adecuado para el monitoreo de la sequía relacionado con el cambio climático (Hao & Singh, 2015).

### 2.2.5.3 Cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP)

Para el cálculo del SPEI, la evapotranspiración potencial fue estimada mediante el método de Thornthwaite (1948), como lo proponen (Tsakiris y Vangelis, 2005; Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Este método es uno de los más sencillos para calcular la ETP (ecuación (3.1.1)), ya que sólo requiere de datos de temperatura media mensual y la latitud del lugar donde se desea estimar la ETP:

$$ETP = 16K \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad (3.1.1)$$

donde  $ETP$  es la evapotranspiración potencial mensual (mm/mes);  $T$ , la temperatura media mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ), e  $I$  es el índice de calor (ecuación (3.1.2)), el cual se calcula como la suma de 12 valores de índices mensuales:

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1.5414} \quad (3.1.2)$$

$m$  es un coeficiente que depende del índice de calor  $I$ .

$$m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.492 \quad (3.1.3)$$

$K$  es un coeficiente de corrección calculado como una función de la latitud y el mes:

$$K = \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{NDM}{30}\right) \quad (3.1.4)$$

donde  $NDM$  es el número de días del mes y  $N$  el número máximo de horas de sol (ecuación (3.1.5)).

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right) w_s \quad (3.1.5)$$

Y  $w_s$  es el ángulo horario de la salida del sol (ecuación (3.1.6)):

$$w_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (3.1.6)$$

en la cual,  $\varphi$  es la latitud (radianes) de la estación climatológica y  $\delta$  la declinación solar (radianes) calculada como:

$$\delta = 0.4093 \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi J}{365} - 1.405 \right) \quad (3.1.7)$$

donde  $J$  es el día Juliano promedio del mes.

#### 2.2.5.4 ESCALAS DE TIEMPO

Estas escalas de tiempo sobre las cuales se acumulan los déficits de la precipitación son extremadamente importantes y separan distintos tipos de sequías. Típicamente, el SPI y SPEI se calcularán en ventanas de 1, 3, 6, 9 y 12 meses.

##### a. SPI-1 e SPEI-1

Donde el SPI-1 y SPEI-1 representa la escala de un mes, que refleja la condición de sequía inmediata. Por ejemplo, el SPI-1 para el mes de enero de un año en particular compara la precipitación de enero de ese año con los totales de precipitación de enero de todos los años. Dado que el SPI en escala de 1 mes refleja

las condiciones de la precipitación a corto plazo, como se mencionó anteriormente donde su aplicación puede relacionarse fuertemente con las sequías meteorológicas, en conjunto con la humedad del suelo a corto plazo y el estrés de los cultivos, principalmente en la estación de crecimiento. (Rivera, 2014).

#### **b. SPI-3 e SPEI-3**

Los SPI e SPEI en escala de 3 meses, por ejemplo, para el mes de enero compara la precipitación total del trimestre noviembre-diciembre-enero de un año en particular con la precipitación total de noviembre-diciembre-enero para todos los años considerados en el registro de la serie. El SPI-3 refleja las condiciones de humedad en corto y mediano plazo, y provee una estimación estacional de la precipitación. En regiones agrícolas primarias, el SPI-3 puede ser más efectivo que el índice de severidad de sequía de Palmer (Palmer, 1965) en reflejar las condiciones de humedad disponibles (OMM, 2012).

Según Rivera (2014) un período de 3 meses con condiciones normales o húmedas puede ocurrir en el medio de una sequía de largo plazo, la cual sólo podría ser identificada en escalas de tiempo mayores. Por lo tanto, para identificar esta variabilidad es importante realizar una comparación entre el SPI-3 y el SPI calculado en escalas de tiempo mayores. El monitoreo en escalas de tiempo más largas puede prevenir la malinterpretación de resultados que indican un período temporario húmedo o normal.

#### **c. SPI-6 e SPEI-6**

El SPI e SPEI en escala de 6 meses en un mes determinado compara la precipitación en un período de 6 meses con el mismo período sobre el registro completo. De esta forma, el SPI-6 del mes de enero compara la precipitación total del período agosto enero del año en cuestión con la precipitación total agosto-enero para todos los años.

A partir de la cantidad de meses involucrados, el SPI-6 indica tendencias entre períodos estacionales y de mediano plazo en la precipitación, y puede ser bastante efectivo en mostrar las condiciones de la precipitación en varias estaciones astronómicas. Por ejemplo, el SPI-6 del mes de febrero puede ser un buen indicador de la cantidad de precipitación registrada durante la estación lluviosa en la la cuenca del río Ichu, que típicamente se extiende entre octubre y marzo. Dependiendo de la región considerada y de la época del año, esta escala temporal puede relacionarse con anomalías en las escorrentías superficiales y los niveles de los reservorios. (Rivera, 2014).

#### **d. SPI-9 e SPEI-9**

El SPI y SPEI en escala de 9 meses provee información de los patrones de precipitación en escala inter-estacional sobre una escala de tiempo mediana. Las sequías se desarrollan en un lapso de tiempo que usualmente es de una estación astronómica o más. Los valores de SPI-9 por debajo de -1,5 son usualmente buenos indicadores de condiciones secas que poseen un impacto significativo en la agricultura y que a su vez podrían estar afectando otros sectores. Este período de tiempo es clave para el monitoreo de períodos secos que tuvieron una duración estacional y que en escalas de tiempo más largas pueden volverse sequías hidrológicas o multi-anales. (Rivera, 2014).

#### **e. SPI-12 e SPEI-12**

La escala de tiempo de 12 meses refleja los patrones de precipitación de larga escala. El SPI-12 es la comparación de la precipitación para un período consecutivo de 12 meses respecto al mismo período para todos los años de datos. Dado que la escala de tiempo de 12 meses es el resultado de la acumulación de períodos de tiempo más cortos que pudieron ser secos o húmedos, las series de SPI de largo plazo tienden a gravitar hacia cero a menos que una tendencia hacia condiciones húmedas o secas esté teniendo lugar. Los valores del

SPI en esta escala de tiempo tienden a estar vinculados con las variaciones de los caudales, niveles de reservorios e incluso niveles de aguas subterráneas (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2005).

Se debe saber que, en cualquier escala de tiempo, el valor del SPI siempre corresponde al mes final del período de análisis. Por ejemplo, el valor de junio del SPI-6 corresponde a la ventana de tiempo que finaliza en el mes de junio y considera dicho mes y los anteriores 5 meses. Por otro lado, si una serie de tiempo comienza en enero, el primer valor de la serie de SPI-6 corresponderá al mes de junio, que contendrá la información de los 5 meses anteriores. (Rivera, 2014).

#### **2.2.6 SISTEMAS DE TELEDETECCIÓN**

Un sistema de teledetección, se encuentra compuesto esencialmente por 2 elementos: la plataforma que corresponde al satélite y el sensor remoto, sin restarle importancia a los demás elementos como el objeto, la fuente de energía, el sistema de transmisión y la función del usuario. (Caicedo, 2008).

La NASA tiene una cierta cantidad de sistemas de observación terrestre para el reconocimiento y la investigación de nuestro planeta, para el estudio de este trabajo de investigación se utilizarán datos generados por el sensor remoto CHIRPS, donde este sensor aprovecha el poder de la tecnología satelital y que puede proporcionar observaciones regulares y detalladas de regiones enteras. Con cada pasada de satélite, los observadores obtienen información completa sobre cómo interactúa la precipitación con la geografía.

## **2.2.6.1 SATÉLITE METEOROLÓGICO CHIRPS**

### **2.2.6.1.1 PRECIPITACIÓN CHIRPS**

El sensor CHIRPS es un algoritmo para estimar la distribución de la precipitación en tres dimensiones a partir de la radiación en el espectro visible, desarrollado por la USGS (U.S. Geological Survey) y el grupo de riesgo climático (CHG) de la universidad de California, donde CHIRPS en sus siglas en inglés (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station), es un producto nuevo puesto a la disposición desde 2014 empezando reportar información desde 1 de enero de 1981 hasta la actualidad.

El rango de operación en tierra del sensor CHIRPS es de 50°S - 50°N tomando en cuenta todas las longitudes, también CHIRPS incorpora una resolución espacial de 0.05° aproximadamente 5.6 km.

Donde este sensor CHIRPS tiene un conjunto de datos de precipitación de alta calidad, a largo plazo y alta resolución es un requisito clave para respaldar el monitoreo de la sequía y el análisis de tendencias a largo plazo. En esta presentación presentamos un nuevo conjunto de datos: el grupo de Riesgos Climáticos de Precipitación Infrarroja con Estaciones (CHIRPS) v2.0, desarrollado por científicos de la Universidad de California, Santa Bárbara y el Centro de Observación y Ciencia de los Recursos Terrestres del Servicio Geológico de los Estados

Unidos. Este nuevo producto de precipitación casi global está disponible en escalas de tiempo diarias a estacionales, con una resolución espacial de 0.05 ° y un período de registro de 1981 a casi en tiempo real. Los tres tipos principales de información utilizados en los CHIRPS son:

- En una climatología de 0.05° que incorpora información satelital para representar ubicaciones escasamente calibradas diarias, pentadales y mensuales de 1981 a presente.
- Estimaciones de precipitación cuadrículadas derivadas de la duración de la nube de frío variable en el tiempo.
- Observaciones de precipitación in situ.

El Grupo de Riesgos Climáticos (CHG) ha desarrollado una extensa base de datos de precipitaciones in situ diarias, pentadales y mensuales con más de mil millones de observaciones diarias en todo el mundo. Se desarrolló un procedimiento de detección para marcar y eliminar posibles ceros falsos de los datos diarios de GTS y GSOD. Estos datos potencialmente espurios pueden suprimir artificialmente los totales de lluvia de CHIRPS. Utilizando GPCC v7 como el mejor estándar disponible, comparamos CHIRPS con ARC2, CFS-Reanalysis, CHIRP, CMORPH, CPC-Unified, ECMWF, PERSIANNE, RFE2, TAMSAT, TRMM-RT7 y TRMM-V7. Se muestra que CHIRPS tiene una correlación más alta y errores sistemáticos (sesgo) más bajos y errores

medios absolutos con GPCC v7 que los otros conjuntos de datos. La comparación con datos de validación independientes sugiere que el rendimiento de CHIRPS es similar a los productos de calidad de investigación como GPCC y GPCP, pero con mayor resolución y menor latencia. Concluimos observando el cambio en la disponibilidad de datos de la estación dentro de un marco de tiempo de monitoreo, contrastando países con y sin datos casi en tiempo real. (Peterson, P. et al., 2015).

El mismo Peterson (2014) menciona que desde la versión 1.8 se ha añadido nuevas estaciones en todo el mundo, donde se mencionan algunos países como en el Perú con 400 nuevas estaciones con una muestra de validación realizada para nuestro país Perú, mediante 403 estaciones proporcionadas que monitorea ANA, y 1200 nuevas estaciones para el continente 5462 de África, 11000 en Brasil, más de 1000 en México, 76 de África del Sur, 500 en Rusia, y 250 en Asia Central.

#### **2.2.6.1.2 PRECIPITACIÓN PISCO**

PISCO (Peruvian Interpolation of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Stations), elaborado por la Dirección General de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, es una base de datos espacial de precipitación mensual, a una resolución de grilla de 0.05° para una serie de

datos que reporta el 1 de enero de 1981 hasta el presente (Aybar et al., 2017).

Para la generación de PISCO – precipitación se hizo una combinación que consistieron en: i) una base de precipitación de todo el Perú (datos in situ) y ii) datos satelitales del producto CHIRPS a escala mensual (Lavado et al. 2015).

Según Lavado, W. (2015) citado por Ayala, I. (2016) Para la obtención de las precipitaciones mensuales con corrección ( $P_C$ ), se emplea la ecuación 3.2, el mismo que consiste en restar la precipitación CHIRPS ( $P_{CHIRPS}$ ) y los valores de interpolación ( $IP$ ) de la diferencia de  $P_{CHIRPS}$  y precipitaciones de las distintas estaciones registradas por SENAMHI ( $P_{SENAMHI}$ ) según el esquema.

$$P_C = P_{CHIRPS} - IP (P_{CHIRPS} - P_{SENAMHI}) \quad (3.2)$$

Los resultados de las variables climatológicas como las precipitaciones diarias y mensuales, temperatura mínima, temperatura máxima son puestos a disposición en formatos raster en la dirección <http://peruclima.pe/>, desde el 1 de enero del año 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016.

La fuente de información PISCO, que se encuentra en la página de SENAMHI estos datos climatológicos ya se encuentran calibrados y validados dentro del territorio peruano por las

operaciones expuestas anteriormente con la ecuación 3.2.

Según Aybar, C., et al (2017). Esta experiencia ganada en todo este proceso tuvo su mejor momento a mediados del año 2014 cuando se obtiene para el Perú la primera base de datos espacial de precipitación a paso de tiempo mensual, a una resolución de grilla de  $0.05^\circ$  para una serie que se inicia en enero de 1981 hasta el presente. Dichos datos son parte de la base de datos denominada PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations), siglas en inglés para su difusión internacional. Para la construcción del producto PISCOp fue necesario utilizar como covariable, la base de datos global del proyecto CHIRPS (Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data). CHIRPS es una mezcla de datos provenientes de sensores remotos, modelos y datos provenientes de estaciones terrenas. Los datos de CHIRPS están disponibles desde enero de 1981 para una grilla global de resolución de  $0.05^\circ$ . (~ 5km). La resolución temporal mínima es de 1 día, pero también hay posibilidad de agregaciones a mayores intervalos de tiempo.

### **2.2.7 CAMBIO CLIMÁTICO**

Según Greenpeace (2019) El cambio climático es el mal de nuestro tiempo y sus consecuencias pueden ser devastadoras si no reducimos drásticamente la dependencia de los combustibles fósiles y

las emisiones de gases de efecto invernadero. De hecho, los impactos del cambio climático ya son perceptibles y quedan puestos en evidencia por datos como:

- La temperatura media mundial ha aumentado ya 1,1°C desde la época preindustrial.
- El período 2015-2019, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), será probablemente el quinquenio más cálido jamás registrado.
- La tasa de subida del nivel del mar ha ascendido a 5 mm al año en el quinquenio 2014 -2019.

Pero hoy también estamos viendo los impactos económicos y sociales, que serán cada vez más graves, como:

- Daños en las cosechas y en la producción alimentaria.
- Las sequías.
- Los riesgos en la salud.
- Los fenómenos meteorológicos extremos, como danas, tormentas y huracanes.
- Mega-incendios.

En los peores escenarios probables que los expertos reflejan, el aumento de temperatura podría llegar a los 4,8 °C para final de siglo. El cambio climático es un problema global que alcanza una perspectiva ambiental, política, económica y social en la que las peores previsiones también implican enormes pérdidas económicas. Y es que cuanto más tardemos en actuar, mucho más elevadas serán las inversiones para la adaptación al aumento de la temperatura.

El 79% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea son debidas a la quema de combustibles para usos energéticos o de transporte, según datos de Eurostat. Todavía en 2017, el 91% de la energía usada en España provenía de fuentes no renovables

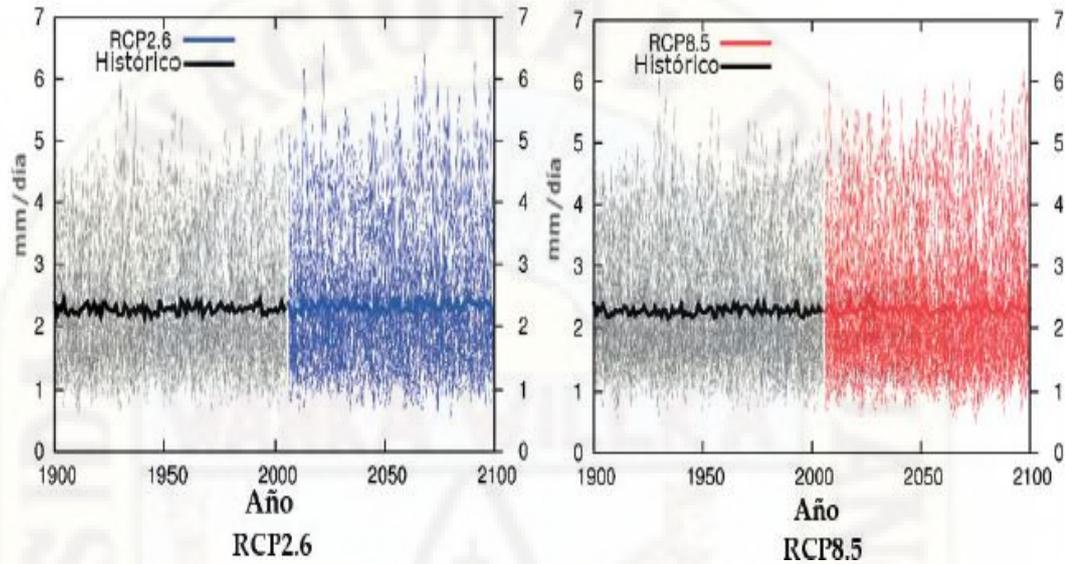
como combustibles fósiles o energía nuclear. De hecho España, junto con otros cinco países de la Unión Europea, acumula alrededor del 70% de todos los gases de efecto invernadero del continente. (Greenpeace, 2019).

### 2.2.8 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES (GCM)

En las predicciones de las variaciones futuras de las precipitaciones y las temperaturas producto del Cambio Climático se ha decidido usar un Modelo Global del Clima (GCM por sus siglas en inglés) y los escenarios del IPCC que se describen más adelante. Un GCM toma en cuenta los procesos físicos fundamentales de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie de la tierra (Bonilla-Ovallos y Mesa, 2017). En esta investigación se va emplear los modelos GCM del Proyecto Inter-Comparación de Modelos Acoplados-fase 5 (CMIP5). Lo anterior debido a que el CMIP5 ha sido uno de los métodos más usados desde finales de los ochenta (Giorgetta *et al.*, 2013), al considerar un total de 18 GCMs de manera conjunta para realizar las predicciones (Neelin *et al.*, 2013). Los CMIP5 tienen una resolución espacial de 50 kilómetros (Taylor *et al.*, 2012) y han sido implementados a través de la aplicación web KNMI Climate Explorer desarrollado por el Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos (KNMI) (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>). El KNMI Climate Explorer contienen una colección completa de datos climáticos y herramientas de análisis (Trouet y Oldenborgh, 2013). Para realizar las proyecciones de precipitación y temperatura se introduce la longitud y latitud de la zona de estudio. Además, se especifica el escenario climático, la variable y el período de proyección de dicha variable. En las Figuras 2.4 y 2.5 se muestran ejemplos de las proyecciones obtenidas para el área de estudio aplicando el KNMI Climate Explorer. En las figuras se puede observar también que las proyecciones están basadas en el comportamiento de las series históricas en el período de 1990 al 2005. (Orozco, I., Ramírez, A.I., Francés, F., 2018).

**Figura 2.4**

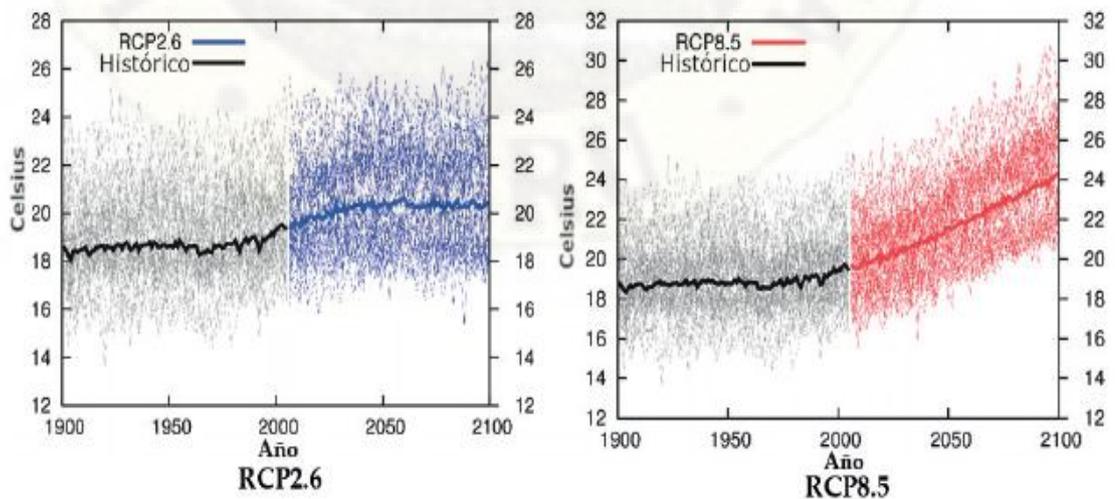
*Ejemplo de: Estimaciones históricas y proyecciones de las precipitaciones en un área de estudio para el 2100 obtenidas con los modelos CMIP5 y los escenarios del IPCC.*



**Fuente:** Adaptado desde Orozco, et al. (2018, p.131).

**Figura 2.5**

*Ejemplo de: Estimaciones históricas y proyecciones de las temperaturas en el área de estudio para el 2100 obtenidas con el CMIP5 y los escenarios del IPCC.*



**Fuente:** Adaptado desde Orozco, et al. (2018, p.131).

### 2.2.8.1 ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Para Stocker et al. (2013), citado por Orozco, et al. (2018, p.130) Los escenarios del Cambio Climático del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) empleados han sido el RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 donde el escenario RCP2.6 es el más optimista, asume menos emisiones de gases efecto invernadero y una reducción total de las emisiones antes del 2030. El escenario RCP4.5 asume que es posible que se tomen acciones para reducir los gases de efecto invernadero antes del 2050. El escenario RCP6.0 asume que no se reducirán tan rápidamente los gases de efecto invernadero y que será la generación del 2030, la que empezará a tomar decisiones para reducir las emisiones de manera efectiva y de forma apresurada. El último escenario, el RCP8.5 es el más desfavorable y considera que no habrá un cambio y que se seguirán emitiendo gases de efecto invernadero.

Ellos utilizaron como fuente los modelos del CMIP5, que es un proyecto del IPCC que pretende proveer una herramienta basada en múltiples modelos de circulación global (MCGs por sus siglas en inglés) y escenarios para ilustrar el rango de los cambios posibles en el clima durante el siglo XXI. Los modelos utilizados en el CMIP5 varían desde aquellos que representan solamente la interacción entre el océano y la atmósfera, hasta modelos del sistema climático terrestre que representan las interacciones de los ciclos biogeoquímicos, la vegetación, capas de hielo, etc. Los modelos del CMIP5 son la principal fuente de información disponible actualmente para predecir el clima en horizontes de largo plazo, y pueden informar sobre el rango de “escenarios posibles” del clima terrestre frente a diferentes cambios naturales o antrópicos. A su vez, esta información contiene los modelos hidrológicos utilizados para representar las condiciones

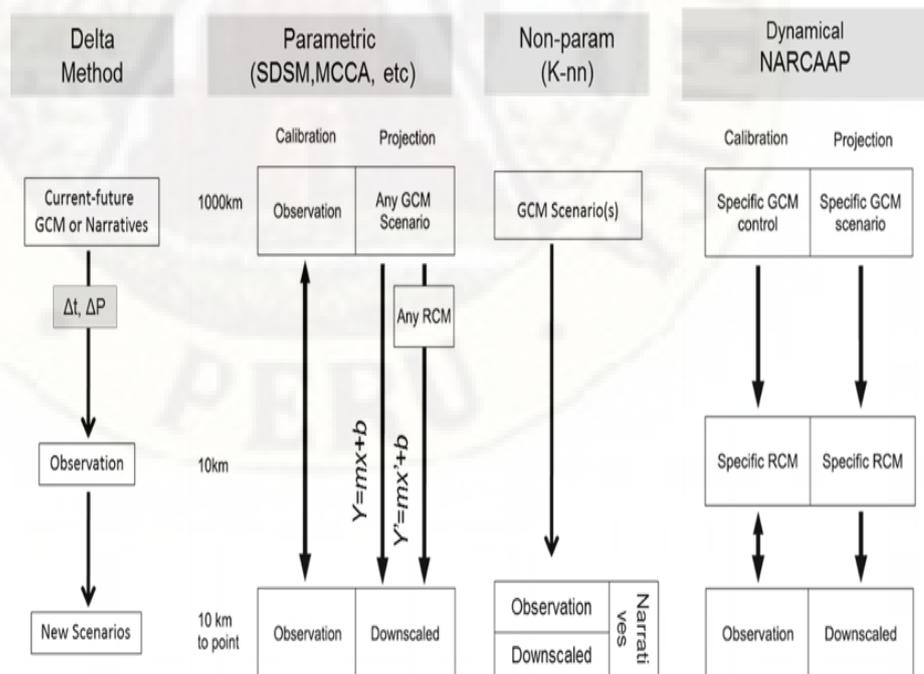
locales en las cuencas y los efectos esperados por los cambios en el clima.

Sin embargo, la aplicación de los resultados del CMIP5 en la estimación del efecto del cambio climático global sobre los sistemas hidrológicos presenta algunas limitaciones con respecto al nivel de detalle espacial alcanzado por los modelos globales.

Existen diferentes enfoques para el proceso de reducción de escala, desde los más sencillos, como los análisis de sensibilidad basados en incrementos constantes ( $\Delta$ -Delta), hasta los métodos dinámicos (ver Figura 2.6). Por su parte, los métodos estadísticos ocupan una posición intermedia y comprenden métodos paramétricos y no paramétricos.

**Figura 2.6**

*Diferentes enfoques existentes para la corrección de datos de los MCG.*



**Fuente:** Maraun et al., (2010).

## 2.3 BASES CONCEPTUALES

- **Sequias**

Definiciones de las sequias:

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010) **define** la sequía como la “ausencia prolongada de precipitaciones o escasez acusada de precipitación en una región para un periodo de tiempo determinado”

Una **definición** dada por Cadena (2006), afirma que la sequía corresponde a una deficiencia de precipitación por un periodo extenso de tiempo, que genera déficit hídrico en áreas determinadas, y altera el desarrollo normal de los procesos biofísicos y socioeconómicos en la región afectada. Esta validación conceptual, establece una relación directa entre el componente espacial y temporal de la sequía, identificando rápidamente las dimensiones donde debe establecerse un monitoreo continuo de este fenómeno.

Hurtado, J. (1986) **define** la sequía como “Anormal periodo seco suficientemente prolongado para que la falta de agua cause un serio desbalance hidrológico en una zona ocasionando daños a los cultivos, desabastecimiento de agua, etc.”

Finalmente Mayorga et al. (2006) **definen** la sequía como un fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de recursos tierras.

- **Índices de sequia**

Villa et al. (1985) **definen** el índice de sequía como un número que señala en forma indirecta el grado de afectación de un territorio por la deficiencia de humedad, como resultado de un inadecuado suministro de agua al suelo o por una demanda inusual por parte de la vegetación.

Cadena, A. (2006), **define** el índice de sequía como el valor que permite clasificar mediante rangos, el grado de afectación de un territorio, debido a la ocurrencia de una sequía, y avanza un poco más ya que afirma que este número es de por sí más útil que los datos climáticos originales, a la hora de tomar decisiones.

- **Teledetección (sensores remotos)**

Jordán, J. (2013) define la teledetección como la técnica, en la cual se puede obtener información de los diferentes objetos de la superficie de la tierra, para su análisis, en donde son: recibidos, registrados y transmitidos desde una plataforma. Dicha plataforma puede ser terrestre, aérea o espacial satelital, etc.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2006) **define** los sensores remotos como instrumentos que reúnen y analizan datos de la zona u organismo de estudio que se encuentra físicamente alejado del equipo sensor, por ejemplo, instrumentos de detección de la superficie marina, satélites o aviones.

## 2.4 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Consiste en dar el significado preciso y según el contexto a los conceptos principales, expresiones o variables involucradas en el problema formulado.

Según Tamayo (1993), la definición de términos básicos "es la aclaración del sentido en que se utilizan las palabras o conceptos empleados en la identificación y formulación del problema." (p. 78).

- a. Cambio Climático:** Un cambio climático se define como la variación en el estado del sistema climático, formado por la atmósfera, la hidrosfera, la cromosfera, la litosfera y la biosfera, que perdura durante periodos de tiempo suficientemente largos (décadas o más tiempo) hasta alcanzar un nuevo

equilibrio. Puede afectar tanto a los valores medios meteorológicos como a su variabilidad y extremos.

- b. Cuenca hidrográfica:** Es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que drena sus aguas al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico.
- c. Escenarios climáticos:** Es la representación plausible y en ocasiones simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas internamente coherente definido explícitamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropógeno, y que puede introducirse como datos entrantes en los modelos de impacto. (Centro UC Cambio Global).
- d. Índices de sequía:** Los índices o indicadores de sequía suelen ser representaciones numéricas informatizadas de la gravedad de las sequías, a partir de datos climáticos hidrometeorológicos, entre los que se incluyen la precipitación, la temperatura, los caudales fluviales, los niveles de las aguas subterráneas y de los embalses, humedad del suelo y el manto de nieve.
- e. Precipitación:** Hacen referencia al agua que cae sobre la tierra, desde la atmosfera en forma líquida (lluvia o llovizna) que es la que ocurre con mayor frecuencia, o sólida (nieve o granizo).
- f. Sequia:** Es un periodo seco que se prolonga de manera significativa. Se caracteriza porque durante la sequía la disponibilidad del agua está por debajo de sus niveles habituales, y, en consecuencia, no puede abastecer las necesidades de los seres vivos (animales, plantas y personas) que habitan en una región determinada.
- g. Teledetección:** la teledetección o percepción remota (en inglés Remote Sensing) es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de

conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis, la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios. Sus principales fuentes de información son las medidas y las imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales.

## **2.5 HIPÓTESIS**

### **2.5.1 Hipótesis General**

- La estimación de índices de sequía, utilizando datos generados por teledetección podrá identificar la sequía en la cuenca del río Ichu.

### **2.5.2 Hipótesis Específico**

- El índice de precipitación estandarizada (SPI) a una escala de tiempo ajustado, permite la caracterización espacio-temporal de la sequía en la cuenca del río Ichu.
- El índice de precipitación y evapotranspiración estandarizada (SPEI) permite evaluar los cambios futuros en las características de las sequias asociados al cambio climático utilizando datos simulados por Modelos Climáticos Globales (GCM) dentro de la cuenca del río Ichu.

## **2.6 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES**

### **2.6.1 Variable de estudio:**

Estimación de Índices de sequía.

#### **Dimensiones:**

- Índice de precipitación estandarizado (SPI).
- Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizada (SPEI).

## 2.7 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

**Tabla 2.2**

*Esquema de definición operativa de variables e indicadores.*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERATIVA	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	ESCALAS DE MEDICIÓN	INSTRUMENTOS
<b>Variable de estudio:</b> Estimación de Índices de sequía.	Los índices de sequía vienen a ser mediciones cuantitativas que caracterizan los niveles de sequía, percibiendo datos de uno o más variables tales como las precipitaciones, temperatura o evapotranspiración (Zargar, Sadiq, Naser & Khan, 2011).	Se cuantifican o determinan mediante datos climáticos o hidrometeorológicos entre los que se incluyen la precipitación, la temperatura, los caudales fluviales y la humedad del suelo.	▪ Índice de precipitación estandarizado (SPI).	▪ Precipitaciones mensuales	"mm"	Intervalo	RStudio  ArcGIS
			▪ Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizado (SPEI).	▪ Precipitaciones mensuales.	"mm"	Intervalo	RStudio  ArcGIS
				▪ Temperaturas máximas y mínimas mensuales.	Grados Celsius "°C"	intervalo	
				▪ Parámetro de localización espacial - Latitud.	Grados	Intervalo	

**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO TEMPORAL Y ESPACIAL

El ámbito de estudio del presente trabajo de investigación se realizó en la cuenca del Río Ichu en un área de 1384.06 Km<sup>2</sup> desde la naciente del río pasando la zona urbana de la ciudad de Huancavelica y desemboca al río Mantaro, ubicado en la provincia, departamento y distrito de Huancavelica, en la zona suroccidental del Perú y se ubica entre los paralelos 12° 45' a 13° 05' latitud sur; y entre los 74° 58' a 75° 14' longitud oeste del meridiano de Greenwich.

#### Figura 3.1

*Localización del ámbito de estudio de la investigación.*





Fuente: Elaboracion propia.

### 3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación es de tipo Aplicada no Experimental, porque busca contribuir a la ampliación del conocimiento científico en la evaluación de índices de sequía.

### 3.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación corresponde a **EXPLICATIVO**.

**Oseda (2011)**, Nivel explicativo se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto.

### 3.4. POBLACIÓN, MUESTRA, MUESTREO

#### 3.4.1. POBLACIÓN

La población consta de la precipitación observada y estimada por sensores remotos (teledetección) establecidos por la estación meteorológica y puntos de registro ubicadas dentro y alrededor de la cuenca del río Ichu, ubicada en el departamento de Huancavelica, en un área de 1384.06 Km<sup>2</sup>.

### 3.4.2. MUESTRA

En este caso la muestra la constituye la precipitación mensual.

## 3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

### 3.5.1. TÉCNICAS

Las técnicas de recolección de datos que se han de utilizar en la ejecución del presente trabajo de investigación serán:

- a. **La observación:** Mediante esta técnica lograremos captar hechos y/o sucesos que se suscitarán durante la etapa de recolección de datos meteorológicos tales como las precipitaciones mensuales y temperaturas máximas mínimas mensuales, que se medirán mediante las estaciones meteorológicas, sensores remotos (teledetección) e identificación de escenarios climáticos por (GCM); en la cuenca en estudio.
- b. **La medición:** Proceso que vincula conceptos abstractos con indicadores empíricos; Con esta técnica se logró el registro de datos meteorológicos en la cuenca del río Ichu observados en diversos periodos de tiempo.

#### **Para la cuenca del río Ichu.**

- Cartas nacionales.

#### **Recolección de datos para estimar sequías.**

- Mediciones realizadas por la SENAMHI.
- Datos de imágenes satelitales en formato NC, proporcionadas por PISCOp.
- Datos de mediciones por Modelos Climáticos Globales (CGM).

- c. **La descripción:** Este método implica la recopilación y presentación sistemática de datos obtenidos de la medición y observación, para dar una idea clara en la caracterización de las sequías en la cuenca de río Ichu.

### 3.5.2. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.5.2.1. FUENTES DE INFORMACIÓN

##### ➤ Fuentes primarias

También denominada fuente directa. Bajo la solicitud presentada al SENAMHI, se obtuvieron las precipitaciones mensuales y temperaturas máximas mínimas de las estaciones pluviométricas que se encuentran dentro de la cuenca río Ichu. De manera alternativa se obtuvieron los datos de las precipitaciones mensuales.

##### ➤ Fuentes secundarias

Corresponde a la adquisición de las variables climáticas por teledetección (sensoramiento remoto) como son: las precipitaciones mensuales, temperaturas máximas mínimas mensuales, que se detallan a continuación:

- **PRODUCTO PISCO:** El producto PISCO de precipitación (PISCOp) en su versión diaria y mensual es el resultado de la combinación de datos de estaciones terrenas con climatologías, reanálisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial (5\*5 km); los datos grillados abarcan una serie temporal que se inicia el 1ro de enero 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016.

Se desarrolló un script en **SONICS - SENAMHI** (Sistema de Observación de Inundaciones Potenciales del Senamhi) para la descarga de estos datos que se puede encontrar en la dirección [ftp://r-publi\\_dgh2:s0loLectur%40@ftp.senamhi.gob.pe/](ftp://r-publi_dgh2:s0loLectur%40@ftp.senamhi.gob.pe/)

Se descargan los archivos en tipo NC que posteriormente serán importados al RStudio y con un código desarrollado mediante una programación en RStudio, considerando como la latitud y longitud del lugar de estudio dentro del territorio peruano, se podrá extraer los datos de precipitación mensual y temperaturas máximas mínimas.

- **IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS:** Para la predicción de las variaciones futuras de las precipitaciones y temperaturas se utilizara el Modelo Global del Clima (GCM) del Proyecto Inter-Comparación de Modelos Acoplados-fase 5 (CMIP5) con apropiados escenarios del IPCC, para la descarga de estos datos se puede encontrar en la dirección <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>

### **3.5.2.2. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

En principio, se realizó los procedimientos administrativos para la adquisición de los datos de las estaciones que monitorea SENAMHI dentro de la cuenca del río Ichu, y las estaciones meteorológicas instaladas son Huancavelica y Choclococha que se encuentran dentro y fuera de la cuenca respectivamente.

En el estudio de Teledetección, se tomará en cuenta la ubicación exacta de la zona o cuenca hidrográfica de estudio y así obtener datos

correctos para el lugar requerido, estos datos se obtienen de los sensores remotos PISCOp, que se obtiene una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución. Estos datos están disponibles en los formatos (NC y RASTER), se encuentran en subdirectorios en **DESCARGAS SONICS** se encuentra en la página de la SONICS-SENAMHI en la dirección [ftp://r-publi\\_dgh2:s0loLectur%40@ftp.senamhi.gob.pe/](ftp://r-publi_dgh2:s0loLectur%40@ftp.senamhi.gob.pe/) Estos archivos se descargan respectivamente en formato NC, los mismos que contienen información de precipitaciones mensuales, temperaturas máximas, mínimas mensuales, con sus respectivas variables espaciales como latitud y longitud.

Seguidamente se usa el Modelo Global del Clima (GCM) con sus respectivos escenarios de Cambio Climático del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), que se encuentra en la dirección <https://climexp.knmi.nl/start.cgi> de donde se descarga datos tomando en cuenta la ubicación exacta de la zona de estudio para así obtener las proyecciones futuras de las precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas como máximo dato es hasta el año 2100.

Finalmente para la variable de estudio índices de sequía, es necesario conocer las variables climáticas por sensores remotos precipitación espacial PISCOp, datos in situ SENAMHI y por último se usará el Modelo Global del Clima (GCM) para las predicciones de las variaciones futuras de las precipitaciones y las temperaturas producto del cambio climático para la cuenca del río Ichu, para calibrar estos datos se utilizarán varios métodos, fórmulas, paquetes estadísticos, etc., que mencionaremos más adelante.

Estos datos calibrados y validados se utilizarán en las metodologías de los índices que estamos estudiando donde tenemos

el SPI y SPEI. Donde cada índice de sequía se representará en hietogramas y mapas.

Para la recolección de datos para el variable de estudio se realizaron los siguientes trabajos:

#### **Para el índice de sequía.**

- Describir la delimitación de la cuenca del rio Ichu mediante cartas nacionales.
- Analizar las influencias topográficas, longitud y latitud de la cuenca de estudio para detectar mediante teledetección y la instalación de puntos de registro.
- Obtener las precipitaciones y temperaturas máximas mínimas mensuales de las estaciones pluviométricas instaladas por SENAMHI en la cuenca del rio Ichu.
- Corresponde a la adquisición de las variables climáticas por teledetección a partir de precipitaciones espaciales PISCOp como las precipitaciones mensuales, temperaturas máximas mínimas mensuales.
- Recolección de datos de precipitaciones, temperaturas máximas mínimas mensuales históricas. Por ultimo usando un Modelo Global del Clima (GCM) se obtendrán datos futuros en las precipitaciones y temperaturas máximas mínimas mensuales, y estos de extraerán dentro de la cuenca del rio Ichu.

#### **3.5.3. INSTRUMENTOS UTILIZADOS**

Para llegar al objetivo de la tesis, las aplicaciones utilizadas son:

**RStudio:** Código libre y entorno de desarrollo integrado (IDE) para R. Lenguaje de programación para el cálculo de Downscaling para la calibración de datos de los MCG, cálculo de los SPI y SPEI, resultados estadístico, gráficos, entre otros.

**ArcGIS:** Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica (SIG).

**HYDRACCES:** Es un software completo, homogéneo y de fácil manejo, que permite importar y guardar varios tipos de datos hidrológicos en una base de datos en formato Microsoft Access 2000, y realizar procesamientos básicos de acuerdo a las necesidades de un hidrólogo.

**MINITAB 18:** Minitab es un programa de computadora diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. Combina lo amigable del uso de Microsoft Excel con la capacidad de ejecución de análisis estadísticos.

### **3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

#### **3.6.1. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO.**

El registro de los datos como la precipitación, temperatura máxima, mínima se realizan en estaciones de medición puntual, mediante instrumentos de medición discreta o continua, por lo que la disponibilidad de datos confiables es un requisito indispensable para el tratamiento de datos. Por lo mismo se ha realizado un análisis exploratorio de consistencia y homogeneidad para su incorporación en los procedimientos de análisis.

##### **3.6.1.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO**

El análisis consiste en la detección de datos atípicos (outliers), donde se usará el método del diagrama de cajas (Boxplot). Los posibles datos atípicos que serán detectados con el gráfico de Boxplot, serán contrastados y verificados correctamente conociendo su fecha de ocurrencia con el

comportamiento de eventos de precipitación de estaciones contiguas; donde estos datos atípicos se pondrán en juicio, así analizar si estos datos atípicos detectados deberán ser eliminados o incluidos en la siguiente etapa de análisis.

- **Diagrama de caja (Boxplot)**

La regla de Boxplot es un test visual para reconocer outliers. El rango intercuartil es incluido dentro de una caja y los intervalos de confianza de 5% y 95% son indicados con barras de error fuera de la caja. Aquellos valores que caen fuera de los intervalos de confianza son candidatos a ser outliers (Iglewicz y Hoaglin, 1993).

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%:

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

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

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

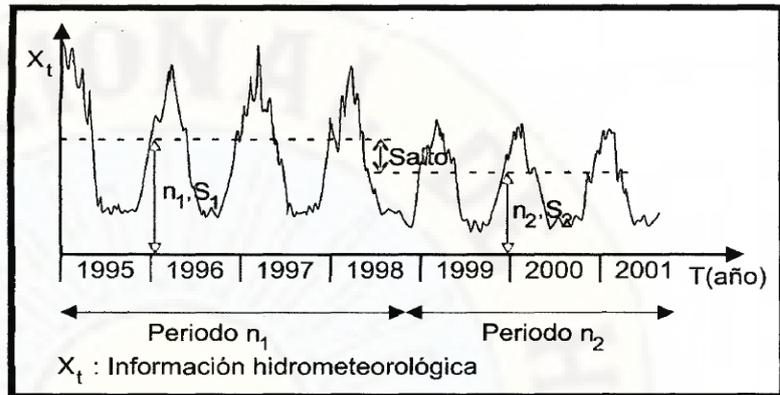
Donde  $L_l, L_s$  es el valor crítico en la regla de Boxplot,  $x$  es el punto fuera del límite más alto o más bajo en la regla de boxplot y  $Q_i =$  Cuartil  $i$ -ésimo.

### 3.6.1.2 ANÁLISIS DE SALTOS

Son periodos de transición en la que u73na serie hidrológica pasa de un estado a otro debido a diversos motivos, algunos causados por la intervención del hombre (construcción de una derivación) y otros por cambios en la naturaleza (embalsamiento por deslizamientos).

**Figura 3.2**

*Identificación de un salto en un hidrograma.*



**Fuente:** (Aliaga Araujo, 1983).

En los hidrogramas de caudal vs. Tiempo se podrá observar y distinguir los periodos, así como el salto, presentando su variación en la media, desviación estándar y otros parámetros. Para el presente estudio de caudales mensuales se tiene mayor representatividad para los parámetros (promedio y desviación estándar). Un salto puede ser ocasionado por el cambio brusco de las condiciones normales aguas arriba de la estación de control (caudales) o alrededor de la estación de medición (precipitación).

Procedimiento para la identificación de un salto:

- **Información de campo:** Es importante identificar las acciones o causas posibles que hayan ocasionado la presencia de saltos, ocasionados generalmente por traslados de la estación de medición, construcción de canales, regulación de los ríos.
- **Análisis de series de tiempo de los datos:** Una vez obtenida la información hidrológica disponible es necesario graficar

las series de tiempo de datos (tiempo vs. precipitación), realizando una apreciación visual se podrá observar de forma evidente una variación significativa en el registro de datos. Para analizar se distribuye en varios periodos tratando de identificar los saltos, sin confundir con periodos largos de sequía o humedad. O cuando la estación es trasladada a otro lugar.

Para identificar los posibles periodos que presentan información dudosa se tienen los siguientes criterios:

- ✓ Cuando se tienen estaciones vecinas se comparan los registros históricos y se evalúa el periodo en el que se observa variaciones notorias respecto al otro.
- ✓ Cuando se tiene precipitación y descargas se comparan sus hidrogramas, los cuales deben tener similar comportamiento, teniendo en cuenta que se debe evaluar los periodos incongruentes.

#### **a) Evaluación y cuantificación**

Según Aliaga Araujo (1983), la evaluación y cuantificación de errores detectados en forma de saltos se realiza mediante un análisis estadístico; a partir de las medias y desviación estándar se realizan las pruebas de T de Student y F de Fisher.

Después de haber verificado la existencia de posibles errores en campo, así como en el análisis de doble masa se determina los periodos para su análisis y posible corrección, antes se procede a calcular sus parámetros desviación estándar y media, para comprobar si sus valores se encuentran dentro del rango permisible según las pruebas estadísticas y un cierto nivel de significación.

- **Consistencia en la media**

Mediante la prueba estadística T de Student se analiza si los valores promedios son estadísticamente iguales o diferentes. A continuación, se calcula los promedios y las desviaciones estándar para cada periodo según las ecuaciones.

$$\bar{X}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} X_i$$

$$S_1(x) = \sqrt{\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (X_i - \bar{X}_1)^2}$$

$$\bar{X}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} X_j$$

$$S_2(x) = \sqrt{\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{j=1}^{n_2} (X_j - \bar{X}_2)^2}$$

$$\bar{X}_1, \bar{X}_2 ; X_i, X_j ; S_1(x), S_2(x) ; n_1, n_2 ; n$$

El procedimiento a seguir es de la siguiente manera:

- 1. Se establecen las hipótesis y nivel de significación.**

$H_p: \mu_1 = \mu_2$  (Significa que existe igualdad o semejanza entre las medias poblacionales de los periodos 1 y 2).

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$  (No existe semejanza entre las medias poblacionales de los periodos 1 y 2).

$\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia del 5%).

- 2. Cálculo de las desviaciones estándar:**

- De las diferencias de los promedios.

$$S_d = S_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

- Ponderada

$$S_d = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

### 3. Calculando el Tc (T calculado)

$$T_c = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_d}$$

Asumiendo la semejanza:  $\mu_1 - \mu_2 = 0$  (Según planteamos en la hipótesis).

### 4. Calculando el Tc (T calculado)

si  $\alpha = 0.1$  la tabla es de una sola cola.

si  $\alpha = 0.05$  la tabla es de dos colas.

$$G. L. = n_1 + n_2 - 2$$

Dónde:

$G. L.$  = Grados de libertad.

$\alpha$  = Nivel de significación.

### 5. Calculando el Tc (T calculado)

Si:  $|T_c| \leq |T_t|$  (95%) entonces  $\bar{X}_1 = \bar{X}_2$ , estadísticamente las medias son iguales.

Si:  $|T_c| > |T_t|$  (95%) entonces  $\bar{X}_1 \neq \bar{X}_2$ , estadísticamente las medias son diferentes (no hay semejanza) por lo tanto se define la existencia de salto.

- **Consistencia en la desviación estándar**

El análisis de consistencia en la desviación estándar se realiza con la prueba “F” de Fisher según el procedimiento:

- Se calcula la varianza en ambos periodos

$$S_1^2(x) = \left[ \frac{1}{n_1 - 1} \right] \cdot \sum_{i=1}^{n_1} (X_i - \bar{X}_1)^2$$

$$S_2^2(x) = \left[ \frac{1}{n_2 - 1} \right] \cdot \sum_{j=1}^{n_2} (X_j - \bar{X}_2)^2$$

**1. Planteando la hipótesis y el nivel de significancia:**

$H_p: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$  (se considera varianzas poblacionales semejantes).

$H_p: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$  (se considera varianzas poblacionales semejantes).

$\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia del 5%).

Calculando  $F_c$  (F calculado)

$$F_c = \frac{S_1^2(x)}{S_2^2(x)}, \quad \text{si } S_1^2(x) > S_2^2(x)$$

$$F_c = \frac{S_2^2(x)}{S_1^2(x)}, \quad \text{si } S_2^2(x) > S_1^2(x)$$

Encontrar el valor de  $F_t$  (F tabulado) según las tablas:

Para:  $\alpha = 0.05$

$$\left[ \begin{array}{l} GLN = n_1 - 1 \\ GLD = n_2 - 1 \end{array} \right] \quad \text{si } S_1^2(x) > S_2^2(x)$$

$$\left[ \begin{array}{l} GLN = n_2 - 1 \\ GLD = n_1 - 1 \end{array} \right] \quad \text{si } S_2^2(x) > S_1^2(x)$$

Dónde:

$\alpha$  : Nivel de significación.

G.L.N : Grados de libertad del numerador.

G.L.D. : Grados de libertad del denominador.

Probabilidad a decidir:

Si:  $F_c \leq F_t$  (95%) entonces  $S_1(x) = S_2(x)$  se considera que las desviaciones estándar son iguales estadísticamente.

Si:  $F_c > F_t$  (95%) entonces  $S_1(x) \neq S_2(x)$ , las desviaciones estándar son diferentes estadísticamente por lo tanto se considera a que existe salto.

**b) Corrección de los datos**

Cuando los promedios y desviaciones estándar resultan estadísticamente iguales, los datos ya no se corrigen por ser consistentes al 95% de probabilidad, a pesar que en algunos casos en el análisis doble masa se observen pequeños quiebres. En caso contrario se debe corregir y el procedimiento es mantener los datos del periodo más confiable y solo corregir los datos del periodo que se desconfía. Para corregir algún periodo se plantea las ecuaciones:

▪ **Para corregir el primer periodo**

$$X_{(t)} = \left[ \frac{X_t - \bar{X}_1}{S_1(x)} \right] \cdot S_2(x) + \bar{X}_2$$

▪ **Para corregir el segundo periodo**

$$X_{(t)} = \left[ \frac{X_t - \bar{X}_2}{S_2(x)} \right] \cdot S_1(x) + \bar{X}_1$$

Dónde:

$X_{(t)}$ : Valor corregido de los datos

$X_t$ : Valor a corregir

**3.6.1.3 ESTADÍSTICAS DE COMPARACIÓN POR PARES**

**a) Coeficiente de eficiencia (CE)** Para verificar la hipótesis se realizará la prueba del coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). Donde el rango de CE es desde  $-\infty$  (ajuste malo) hasta 1 (ajuste perfecto). Este criterio es comúnmente usado en la evaluación de los modelos hidrológicos.

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} ; \quad -\infty < CE \leq 1$$

Dónde:

$N$  : Numero de observaciones

$P_i$  : Valores simulados o pronosticados

$O_i$  : Valores observados

$\bar{O}$  : Media de los valores observados

En la tabla 3.1 se aprecia el rango de valores del coeficiente de Nash- Sutcliffe (CE) y la descripción del ajuste respectivo.

**Tabla 3.1**

*Valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe (CE).*

Rango de CE	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

**Fuente:** Molnar (2011).

**b) Coeficiente de Correlación de Pearson (r)**

El coeficiente de correlación de Pearson es la medida más común de asociación entre dos variables. Indica el grado de asociación o relación que existe entre dos variables. El rango de r varía desde -1 a +1.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}$$

**Tabla 3.2**

*Escala de correlación de Pearson*

Valor	Significado
-------	-------------

-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0.9 a -0.99	Correlación negativa muy alta
-0.7 a -0.89	Correlación negativa alta
-0.4 a -0.69	Correlación negativa moderada
-0.2 a -0.39	Correlación negativa baja
-0.01 a -0.19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0.01 a 0.19	Correlación positiva muy baja
0.2 a 0.39	Correlación positiva baja
0.4 a 0.69	Correlación positiva moderada
0.7 a 0.89	Correlación positiva alta
0.9 a 0.99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

**Fuente:** Orlando Suarez Mario (2012)

#### **3.6.1.4 REDUCCIÓN DE ESCALA DE LOS DATOS ESTIMADOS POR EL MODELO GCM**

Los datos para la estimación del efecto del cambio climático global serán extraídos de un Modelo Global del Clima (GCM) del Proyecto Inter-Comparación de Modelos Acoplados-fase 5 (CMIP5) con apropiados escenarios climáticos, estos datos extraídos presentan algunas limitaciones con respecto al nivel de detalle espacial alcanzado por los modelos globales. Debido a su resolución espacial, estos resultados no son suficientes para representar los atributos del clima local. Por esta razón, la evaluación de los impactos locales en los recursos hídricos requiere el desarrollo de proyecciones climáticas a escala reducida. Las técnicas de reducción de escala o “Linear Scaling Bias Correction V.1.0” consisten en asociar las propiedades de la atmósfera, obtenidas a partir de las salidas de los MCG (Modelos climáticos Globales) a las condiciones meteorológicas locales ya sea mediante modelos matemáticos de base física modelos estadísticos (*Bias Correction* estadístico). Tales métodos recurren a los registros meteorológicos locales para establecer los modelos óptimos que

representan mejor los datos observados permitiendo mayor confianza en la representatividad del clima futuro.

Para la utilización de los datos de precipitación en crudo del modelo GCM se realiza el procedimiento que se detalla a continuación:

- Datos binarios GCM
- Extracción de datos de GCM en torno a la estación de destino. Para el clima presente se hicieron comparaciones de lluvia registrada y estimada en las estaciones meteorológicas, buscando el punto de grilla más cercano que ofreció el modelo de alta resolución con el punto geográfico de la estación meteorológica.
- Convertir los datos binarios a ASCH alrededor de la estación de destino.
- Obtención de parámetros de reducción de escala. Se realiza la reducción de los datos GCM según la estación elegida. Para lo cual se emplea una función para (Bias correction).

#### ➤ **Reducción de escala paramétrica**

En el presente estudio se realiza una reducción de escala estadística de los datos simulados por (GCM), este método emplea la corrección de sesgo paramétrica “*Bias correction*”, el cual asume que la precipitación registrada se ajusta a una distribución normal.

#### **3.6.1.5 SESGO PORCENTUAL (PBIAS)**

Para validar los datos corregidos por reducción de escala paramétrica “*Bias correction*” se hace un análisis de consistencia preliminar por Sesgo Porcentual (PBIAS), así como indica Asurza (2017), la cuantificación del BIAS en

porcentaje mide la tendencia de los valores simulados si son más grandes o más pequeños en función de los valores observados. Es no dimensional. El óptimo valor del porcentaje del BIAS es 0, valores negativos indican subestimación y valores positivos indica sobreestimación, donde la ecuación toma la forma:

$$BIAS(\%) \text{ o } PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)}{\sum_{i=1}^n Oi}$$

Dónde: “Si” son los valores de la precipitación estimada por satélite y “Oi” son los valores de precipitación observadas.

**Tabla 3.3**

*Rangos e interpretación del Sesgo Porcentual (PBIAS).*

<b>PBIAS</b>	<b>Interpretación Modelo</b>
PBIAS < ±10	Muy bueno
±10 ≤ PBIAS < ±15	Bueno
±15 ≤ PBIAS < ±25	Satisfactorio
PBIAS ≥ ±10	Insatisfactorio

**Fuente:** (Moriassi, Arnold, Van Liew, Bingner, & Harmel, 2007).

### **3.6.2 FORMACIONES DE REGIONES HOMOGÉNEAS**

La formación de regiones homogéneas consiste en dos etapas: primero, formación preliminar de regiones en base a una aglomeración preliminar de las estaciones. Segundo, formación de regiones homogéneas.

Para la primera etapa existen diversas formas clásicas de agrupar estaciones por ejemplo en base a criterios subjetivos como la proximidad, características fisiográficas o elevación de las estaciones. También existen técnicas matemáticas que permiten aglomerar

estaciones entre ellas se tiene las técnicas de aglomeración jerárquica (p.e. método de Ward), métodos de aglomeración particionales (p.e. K-means), método de análisis de componentes principales y entre otros. Así, en este estudio utilizamos el método de Ward para la agrupación preliminar de los 10 puntos de registro consideradas en este estudio en base a sus datos de precipitación promedio mensual de cada mes del período 1994-2016.

En la segunda etapa se define si cada formación preliminar de regiones es una región homogénea a través del Método del Vector Regional (MVR) utilizando el programa HYDRACCESS. El MVR permite agrupar estaciones pluviométricas con comportamiento similar con respecto a la variabilidad interanual de la precipitación y ha sido ampliamente utilizado en Perú (Curi-Tapahuasco, 2017; Espinoza et al., 2009; León-Altuna, 2014; Rau et al., 2017).

#### a) Método de Ward

El método de Ward es un método aglomerativo, que consiste en generar una serie de particiones de los datos: la primera partición consta de  $n$  grupos (clusters) de una sola estación cada una y la última partición consiste en un sólo grupo que contiene todas las  $n$  estaciones. Para la aglomeración de los grupos se utilizan medidas de proximidad y para el caso específico del método Ward la fusión de dos grupos se basa en la medida del criterio suma de los errores al cuadrado. El objetivo en cada etapa es minimizar el aumento total de la suma de los errores al cuadrado ( $E$ ) dentro del cluster, dada por:

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

Donde:

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

En la que  $\bar{x}_{m,k} = (\frac{1}{n_m}) \sum_{l=1}^{n_m} x_{ml,k}$  (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  $n_m n_q / (n_m + n_q)$  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

El vector regional (VR) es una estación ficticia que es una “especie de promedio” de todas las estaciones de una región preliminarmente definida, con la cual se comparan cada una de las estaciones para finalmente descartar aquellas que no son consistentes con el VR. El VR se calcula bajo el concepto de precipitación media extendida, salvando así los problemas del peso de las estaciones con valores de precipitación muy baja y alta. Luego, empleando el método de mínimos cuadrados se encuentran los índices pluviométricos regionales anuales  $Z_i$  y la precipitación media extendida  $P_j$ , esto se logra al minimizar la siguiente ecuación:

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left( \frac{P_{ij}}{P_j} - Z_i \right)^2$$

Donde;  $i$  es el índice del año,  $j$  es el índice de la estación,  $N$  es el número de años,  $M$  es el número de estaciones.  $P_{ij}$  es la

precipitación anual en la estación  $j$  el año  $i$ ,  $P_j$  es la precipitación media extendida al período de  $N$  años y finalmente  $Z_i$  es el índice pluviométrico regional del año  $i$ .

Rau et al., (2017), mencionan: una región se considera como homogénea si la desviación estándar de las diferencias entre los índices pluviométricos anuales de las estaciones y los índices del VR son menores a 0.4. Además, el coeficiente de correlación entre el VR y los valores pluviométricos anuales de las estaciones deben ser mayores a 0.7.

Como resultado de esta etapa se tendrá las regiones homogéneas con comportamiento similar respecto a la variabilidad interanual de la precipitación, el cual es muy importante en este estudio ya que cada región homogénea permitirá conocer el conjunto de estaciones que lo conforman.

### **3.6.3 ANÁLISIS DE DATOS.**

Para realizar el análisis de los datos de investigación, se emplearán las siguientes utilidades:

- Programa ArcGIS 10.6
- Hydraces
- Minitab
- Lenguaje de programación RStudio.

Los datos de investigación a analizar son los datos registrados por las estaciones meteorológicas de SENAMHI, datos estimados por PISCOp y datos simulados por Modelos Climáticos Globales (GCM).

Según Aliaga, A. (1983), el tratamiento consiste en un ajuste de datos históricos a una condición homogénea que incluye la evaluación y corrección de posibles errores de medición, así como completar y extender datos.

### 3.7 METODOLOGÍA

Para lograr el objetivo de la presente investigación, se plantea procedimientos de secuencia como se muestran en la figura 3.2, el mismo que contiene 5 etapas, que consiste en:

**Etapa 1:** Correspondiente a la adquisición de datos, tales como las precipitaciones y las temperaturas máximas mínimas mensuales dentro de la unidad de estudio, donde se recurrieron al SENAMHI, precipitaciones espacial PISCO y MCG (Modelos Climáticos Globales), Las series de tiempo de las variables precipitaciones y temperaturas se utilizaran los registros desde 1994 hasta 2016 (22 años de registro) y para las proyecciones futuras de las variables de precipitación y temperaturas las series de tiempo serán 1994 hasta 2100 (106 años). La adquisición de estos datos será extraída en archivos NC a través de las rutinas RStudio y Arc GIS.

**Etapa 2:** Corresponde al análisis exploratorio y consistencia de los datos o productos extraídos, incluidos la altitud, que permiten conocer las diferentes variables para fines de agrupamiento y análisis regional de sequías en la cuenca del río Ichu. Mediante el análisis estadístico descriptivo, en el mismo que interviene con la metodología de importar estos productos a un análisis exploratorio, datos faltantes, reducción de escala (*Bias Correction de los MCG*), etc., y esto análisis se harán a través de paquetes estadísticos ya mencionados y a través de las rutinas de programación lenguaje R.

**Etapa 3:** En la región de análisis, se estiman los índices SPI y SPEI para las escalas tiempo 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses a fin de identificar las características a diferentes escalas de tiempo y seguidamente elegir el mejor índice representativo con su correspondiente escala temporal frente a la respuesta de la caracterización espacio - temporal y a los cambios futuros en las características de las sequías asociados al calentamiento global en la cuenca del río Ichu. Donde el índice SPEI de Vicente-Serrano et al. (2010), incluye el

parámetro de la Evapotranspiración Potencial para estimar cuantitativamente los índices de sequía.

**Etapa 4:** Corresponde al cálculo de la Evapotranspiración Potencial, que se usara el método Thornthwaite (Thornthwaite, 1948). Donde el índice SPEI incluye el parámetro Evapotranspiración Potencial para su respectiva estimación.

**Etapa 5:** Finalmente las series de las precipitaciones observadas y los simulados previa calibración, se someten a las pruebas estadísticas para su respectiva validación de la hipótesis planteada. Para ello se emplea rutinas en el lenguaje de programación R.

**Validación de la hipótesis 1:** Donde se estimará los índices de sequía, utilizando datos generados por teledetección para identificar sequías en la cuenca del río Ichu.

**Validación de la hipótesis 2:** Donde se usará el índice SPI a una escala ajustada para la caracterización espacio- temporal de la sequía en la cuenca del río Ichu.

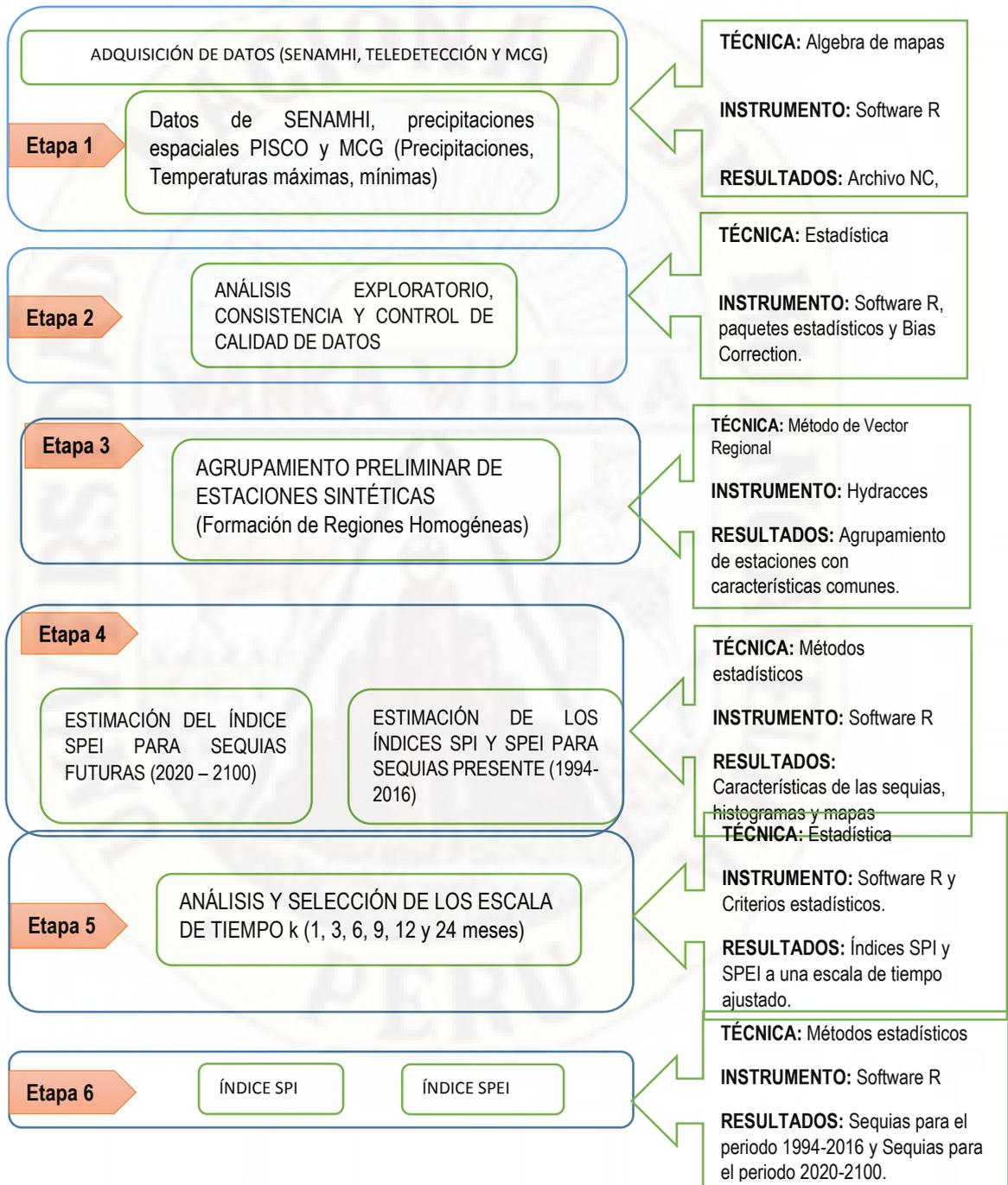
**Validación de la hipótesis 3:** Donde se usará el índice SPEI, que incluye el parámetro de la Evapotranspiración Potencial para la evaluación de los cambios futuros en las características de las sequias asociados al cambio climático dentro de la cuenca del río Ichu.

### 3.7.1 ESQUEMA METODOLÓGICO

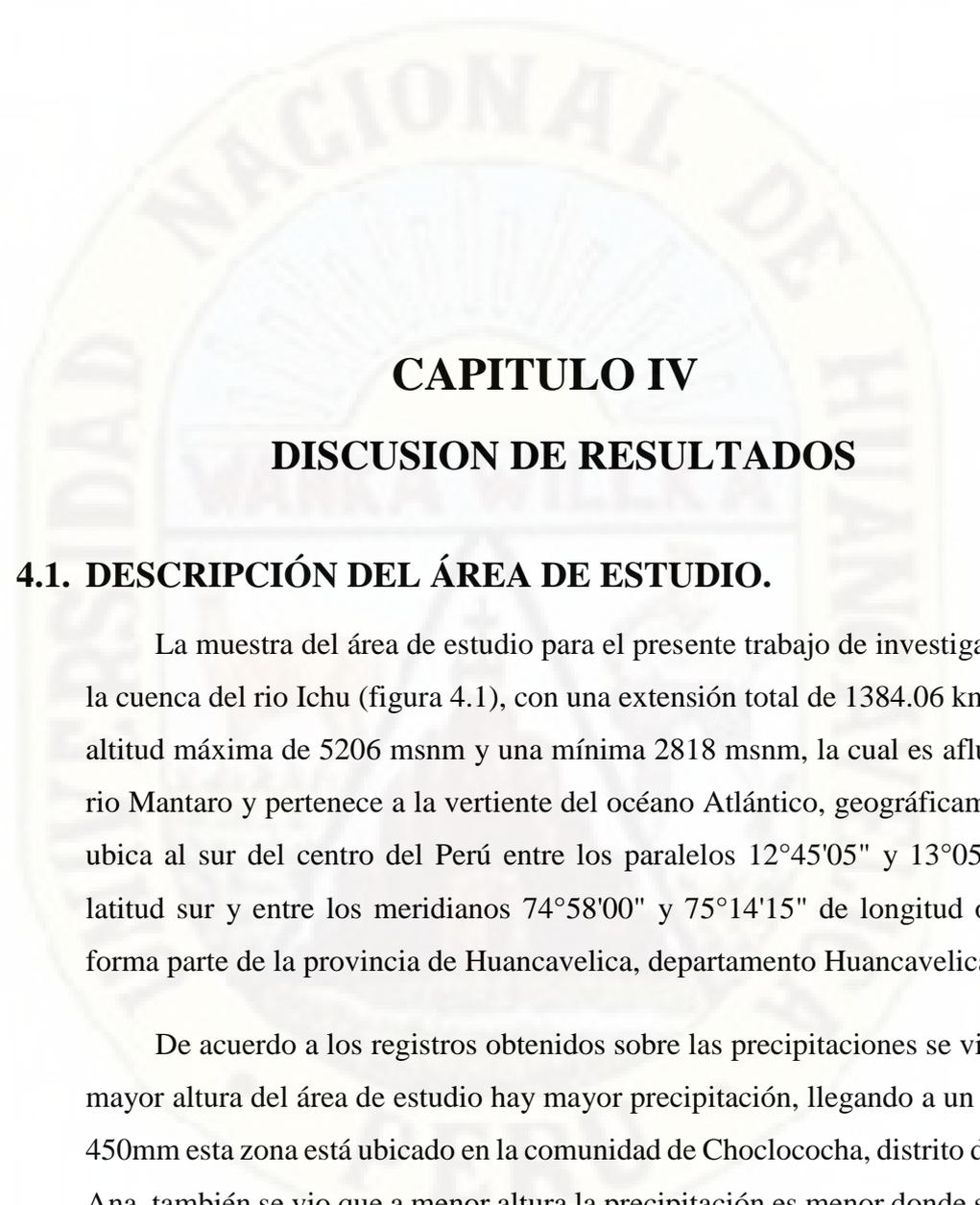
Para lograr el objetivo de la presente investigación, se plantea procedimientos de secuencia como se muestra en la figura 3.2. Donde contiene 6 etapas, que consiste en:

**Figura 3.2**

*Esquema metodológico: Cálculo de los índices de sequía a partir de datos generados por teledetección.*



**Fuente:** Elaboración propia.



## **CAPITULO IV**

### **DISCUSION DE RESULTADOS**

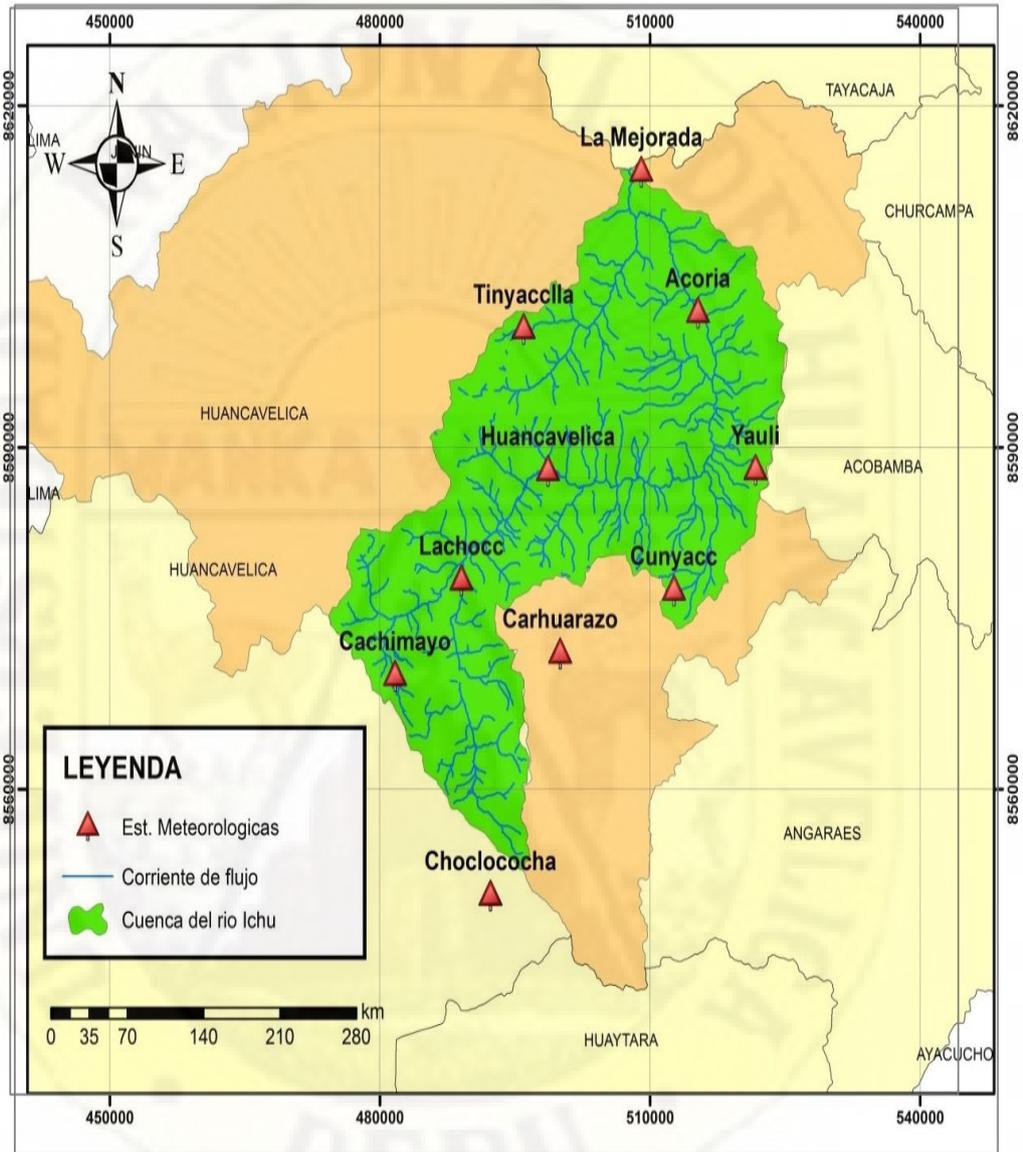
#### **4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.**

La muestra del área de estudio para el presente trabajo de investigación es la cuenca del río Ichu (figura 4.1), con una extensión total de 1384.06 km<sup>2</sup>, una altitud máxima de 5206 msnm y una mínima 2818 msnm, la cual es afluente al río Mantaro y pertenece a la vertiente del océano Atlántico, geográficamente se ubica al sur del centro del Perú entre los paralelos 12°45'05" y 13°05'22" de latitud sur y entre los meridianos 74°58'00" y 75°14'15" de longitud oeste, y forma parte de la provincia de Huancavelica, departamento Huancavelica.

De acuerdo a los registros obtenidos sobre las precipitaciones se vio que a mayor altura del área de estudio hay mayor precipitación, llegando a un pico de 450mm esta zona está ubicada en la comunidad de Choclococha, distrito de Santa Ana, también se vio que a menor altura la precipitación es menor donde se ubica la comunidad de La Mejorada.

**Figura 4.1**

*Ubicación - Localización de la cuenca del río Ichu- Huancavelica.*

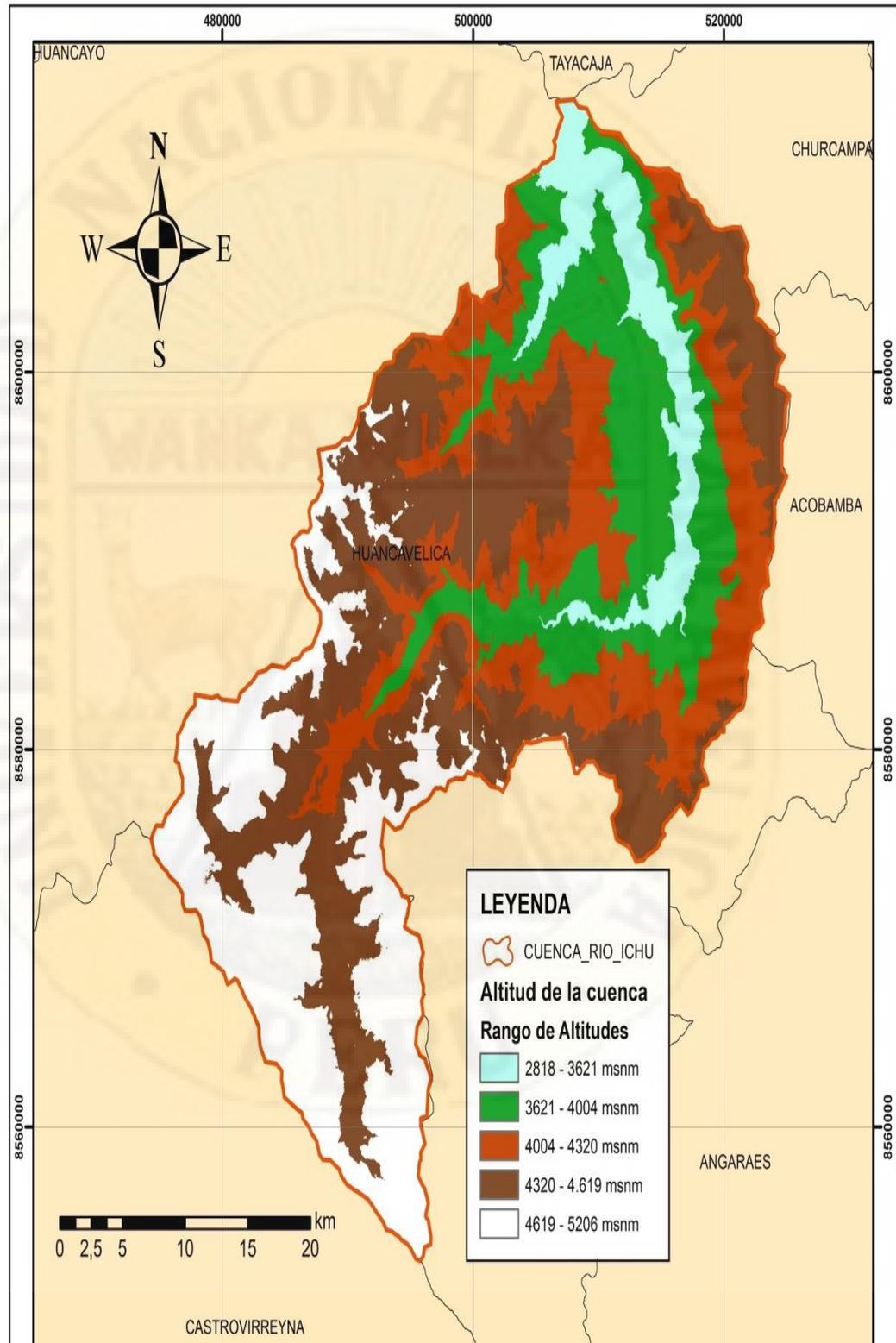


UBICACIÓN-LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ICHU		
	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA</b>	FACULTAD: INGENIERÍA MINAS CIVIL-AMBIENTAL ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL
	TESIS: "ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA EN LA CUENCA DEL RÍO ICHU UTILIZANDO DATOS GENERADOS POR TELEDETECCIÓN HUANCVELICA - 2019"	FECHA: HUANCVELIC
		DISTRITO: HUANCVELICA
		TESISTA: Bach.VARGAS MONTES,Alexander Jefferson FUENTE: Elaboracion Propia

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 4.2**

*Altitudes de la cuenca del río Ichu.*



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.1. DATOS OBSERVADOS Y PERIODO DE ANÁLISIS

Para poder evaluar las sequías dentro de la cuenca del Ichu, se utilizaron datos de precipitación, temperatura máxima mínima utilizando estaciones meteorológicas instaladas por SENAMHI y datos de los satélites que registra las precipitaciones espaciales de PISCO con una resolución de 0.05°. Tanto para los datos de las estaciones meteorológicas como de las precipitaciones espaciales de PISCO se harán su respectivo análisis de consistencia de datos y luego estos se utilizarán para calcular los índices de sequías SPI y SPEI para un periodo de enero 1994 a diciembre 2016.

#### 4.1.2. DISPOSICIÓN DE DATOS EN LA CUENCA DEL RIO ICHU

##### a. Estaciones meteorológicas dentro y fuera de cuenca.

En la cuenca del río Ichu se encuentra 02 estaciones meteorológicas instaladas por SENAMHI, una de ellas es la estación Huancavelica que se encuentra dentro de la cuenca y la segunda es la estación Choclococha que se encuentra fuera próxima a la cuenca.

**Tabla 4.1**

*Ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca del río Ichu.*

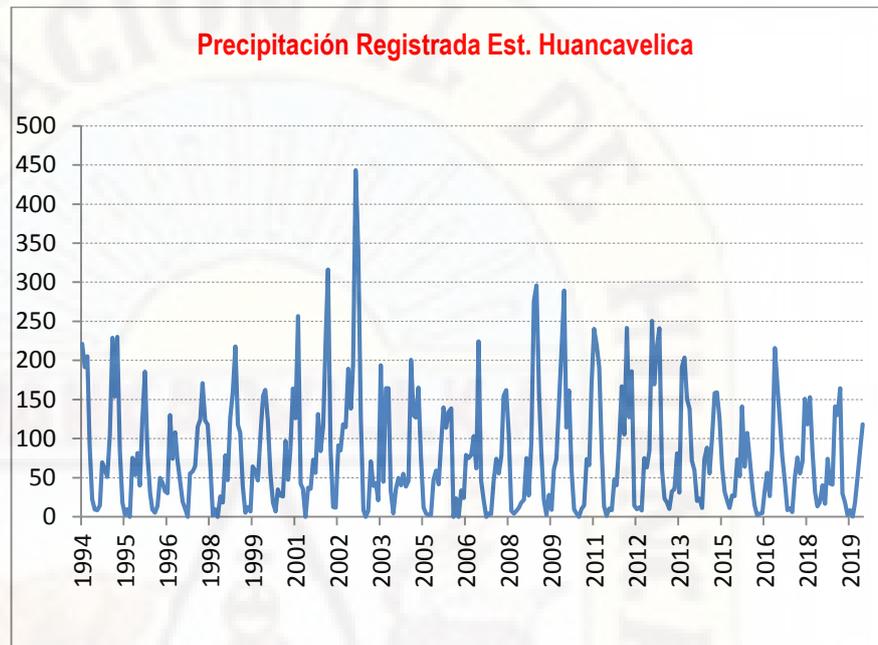
<b>Estaciones Meteorológicas – Ubicación</b>				
<b>N°</b>	<b>ESTACIÓN</b>	<b>LATITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>ALTITUD (msnm)</b>
1	Huancavelica	- 12°46'17.86"	-75°0'44.52"	3715
2	Choclococha	-13°6'31.69"	-75°4'17.22"	4547

**Fuente:** Elaboración Propia

**b. Series de tiempo de datos registrados por las estaciones meteorológicas.**

**Figura 4.3**

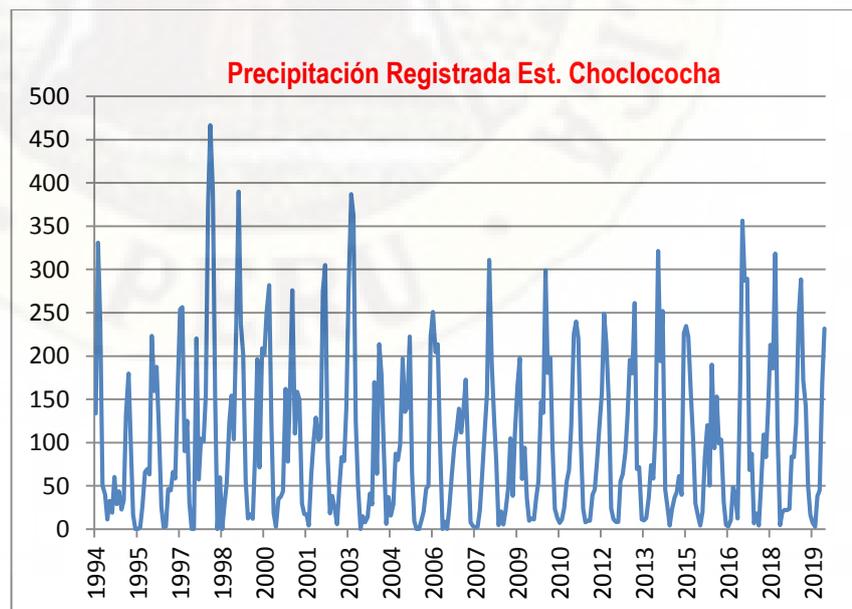
*Series de precipitación de la estación Huancavelica.*



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 4.4**

*Series de precipitación de la estación Choclococha.*



**Fuente:** Elaboración propia.

**c. Puntos de registro dentro y fuera de la cuenca.**

En la cuenca del río Ichu se ubicará 10 puntos de registro que serán bien analizadas para así monitorear la precipitación dentro de la cuenca ya que solo con dos estaciones meteorológicas no se podrá analizar correctamente el área de estudio. Y tenemos en cuenta que estos puntos estén bien localizados para así descargar las precipitaciones espaciales que tiene PISCOp.

**Tabla 4.2**

*Ubicación de los puntos de registro en la cuenca del río Ichu.*

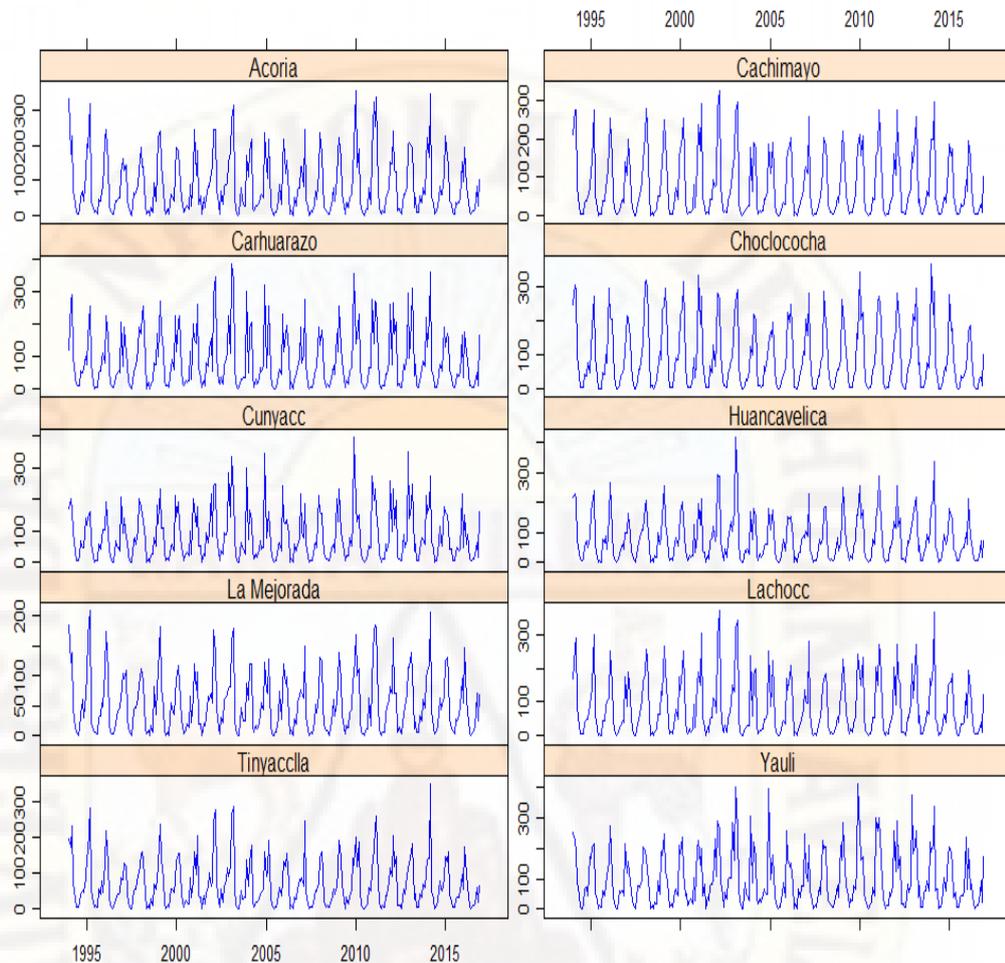
<i>Puntos de Registro – Ubicación</i>				
N°	PUNTO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (msnm)
1	Acoria	-12°38'45.855"	-74°51'32.255"	3183
2	Cachimayo	-12°56'3.551"	-75°10'8.648"	4662
3	Carhuarazo	-12°54'59.763"	-75°0'0"	4577
4	Choclococha	-13°6'31.69"	-75°4'17.22"	4547
5	Cunyacc	-12°51'59.939"	-74°53'0.07"	4502
6	Huancavelica	-12°46'17.86"	-75°0'44.52"	3715
7	La Mejorada	-12°32'1"	-74°55'1"	3150
8	Lachocc	-12°51'30.841"	-75°6'3.772"	4217
9	Tinyaccla	-12°39'32.021"	-75°2'14.301"	4493
10	Yauli	-12°46'14.879"	-74°47'59.999"	4080

**Fuente:** Elaboración propia.

**d. Series de tiempo de los datos estimados en los 10 puntos de registro ubicados dentro y fuera del área de estudio.**

**Figura 4.5**

*Series de precipitación de los 10 puntos de registro.*



**Fuente:** Elaboración Propia

## 4.2. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (AED)

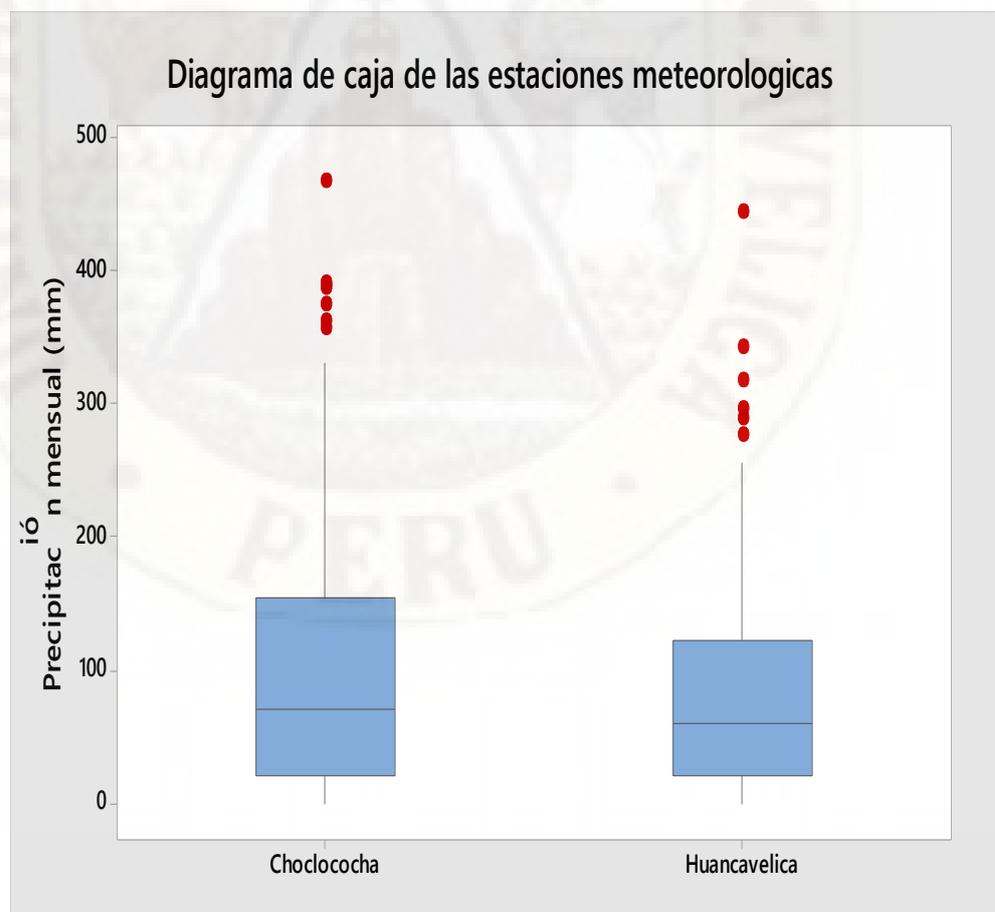
En la etapa del AED se ha realizado los gráfico119s de cajas (Boxplots), para detectar los datos atípicos (outliers) de manera cualitativa, de esta manera, los puntos fuera de las cajas representan los valores atípicos para cada mes. La Figura 4.6, muestra las gráficas de Boxplot elaboradas a nivel mensual para las 2 series de datos obtenidos de las estaciones meteorológicas instaladas por SENAMHI y seguidamente en la Figura 4.7 se muestra las gráficas de Boxplot para las 10 series de datos descargados del satélite PISCOp, estos correspondientes a la cuenca del rio Ichu.

Donde en las dos figuras se muestran el diagrama de caja de la distribución de los datos mensuales por estación y puntos de registro, donde se observa que la mayoría de las estaciones tiene los valores de precipitación dentro de los límites de confianza (superior e inferior). La mayor cantidad de los posibles datos atípicos de precipitación fueron registrados en los meses de la temporada lluviosa y las magnitudes de estos datos también fueron registrados en estaciones vecinas; por lo que cada valor atípico fue validado comparándolo con los valores encontrados en las estaciones vecinas, por lo que no se encontró una clara evidencia de que éstos sean datos atípicos y por lo tanto no se han reportado presencia de datos atípicos en este estudio.

- **Graficas de Boxplots para las estaciones meteorológicas**

**Figura 4.6**

*Gráfico de Boxplots de la precipitación mensual (periodo 1994-2016).*

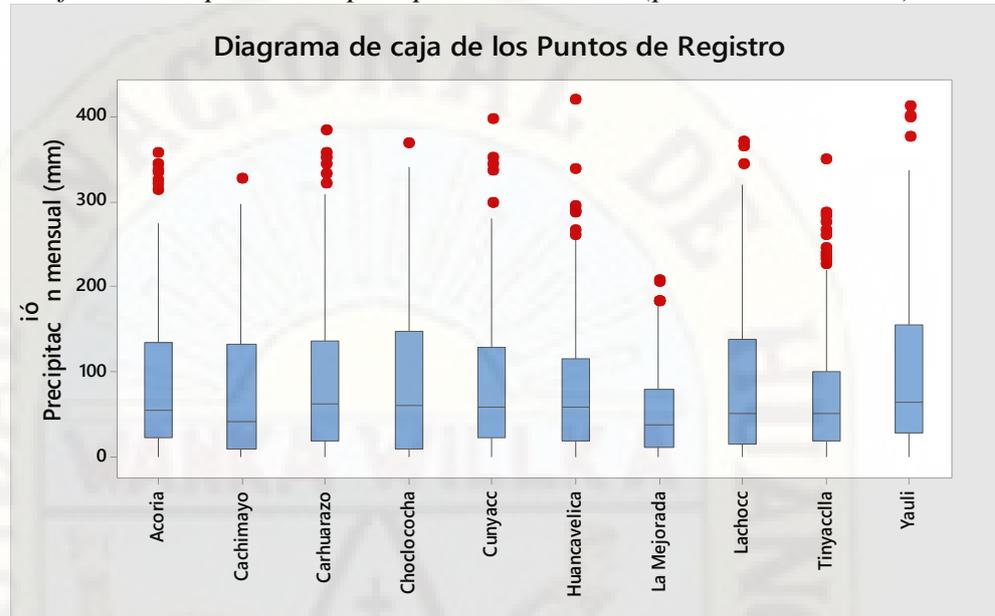


**Fuente:** Elaboración Propia

- Graficas de Boxplots para los puntos de registro.

**Figura 4.7**

*Grafica de Boxplots de la precipitación mensual (periodo 1994-2016).*



**Fuente:** Elaboración propia.

### 4.3. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA Y COMPARACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN OBSERVADA Y ESTIMADA POR PRODUCTO PISCOp.

Para verificar y contrastar la calidad del producto PISCOp se realiza la comparación de datos de precipitación mensual registrados por estaciones meteorológicas y de la información satelital PISCOp, para ello se realizará un análisis estadístico puntual y espacial. Para este caso se selecciona la estación Huancavelica por ser la estación que se encuentra dentro de la cuenca de estudio y presentar datos consistentes para la verificación de la información satelital.

#### 4.3.1. DEPENDENCIA PUNTUAL

Estos datos se trabajan con la escala mensual, ya que las correlaciones entre la precipitación observado y estimada a partir de PISCO indican que es aceptable a escala mensual y resulta pobre a escala anual y diaria.

#### 4.3.1.1. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS MENSUALES

Para efectos de mostrar el procedimiento del análisis se escoge la estación Huancavelica, por contar con la mayor cantidad de datos observado, y también es una de las estaciones meteorológicas que se encuentra dentro de la cuenca del río Ichu.

##### a. Análisis de saltos

En la **Figura 4.8** se observa la serie de tiempo de los datos observados y estimados, donde se puede apreciar que no hay presencia de salto en ambos datos, por lo tanto, este análisis será preliminar no valida la hipótesis, este análisis se realiza con el fin de conocer si los datos observados y estimados tiene semejanza en su media y desviación estándar.

Los datos disponibles para el análisis de consistencia se encuentran en las Tablas 4.3 y 4.4, definiendo los periodos de análisis que son de 1994-2016 tanto para los datos observados y estimados.

**Tabla 4.3**

*Datos de precipitación mensual estación Huancavelica.*

ESTACIÓN METEOROLÓGICA HUANCAVELICA													
N°	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	1994	221.1	191.3	205.3	92.1	22.1	9.2	8.6	14.6	69.8	61.2	51	105.2
2	1995	229	153.6	230.3	84.8	18.3	2.4	9.8	0	75.4	53.5	81.4	39.9
3	1996	124.3	185.7	79.1	30.6	9.2	5.2	13.8	49.7	43.2	33.1	30	130
4	1997	74.2	108.2	72.5	46	19.3	10.1	0	55.3	58	64.6	115	124.5
5	1998	171.1	123.2	117.8	65.9	1.9	9.6	0	26	18.2	78.8	46.6	126.4
6	1999	158.9	217.7	117.6	108	39.5	5	12.3	6.9	64.5	58.5	46.5	104
7	2000	154.5	162.2	123.6	54.6	17.7	6.9	35.1	27.1	25.8	97.1	47.1	84.9
8	2001	163.9	125.9	256.5	42.3	35.9	0	36.8	35.9	72.9	56.2	132	84
9	2002	115.8	230.7	316.3	85.5	12.5	11.5	91.1	84.6	118	114	190	138.3
10	2003	194.8	443.4	341.4	127	8.9	0	7.4	70.9	39.4	43.3	20.9	193.8
11	2004	44.8	164.4	164.3	33.3	4.2	35.3	49.5	40.2	55	38.8	45.6	200.7
12	2005	129.6	127	165.1	74.5	11.7	3.8	2.1	2.3	47.5	59.2	41.5	90.5

13	2006	139.7	113.8	134.2	139	0	23.6	0	33.8	24.1	79	75	79.1
14	2007	103.3	61.9	224.4	46.5	21	0	4.2	3.6	46.1	74.2	55.2	78.5
15	2008	154.5	161.8	104.9	7.4	3.9	7	11.2	18.3	21.5	75.1	27.1	94
16	2009	275.4	296	158.4	83.7	21.5	2.1	28.2	8.8	60.4	74.2	146	213.9
17	2010	289.2	114.2	161.6	59.5	9.3	3.9	0	10.1	14.4	73.9	66	167.5
18	2011	240.5	219.9	191.2	82.9	13.3	1.1	10.3	8.2	47.8	40.1	94	166.8
19	2012	105.1	241.5	127.1	186	14.2	9.5	12.1	7.8	74.9	63.1	84.5	250.7
20	2013	169.2	216.1	241.2	61	23	18.8	9.9	32.5	35.4	81.2	30.7	191.3
21	2014	203.4	150.6	137.9	71.5	59.5	20.2	23.2	11.3	73.7	88.6	55.4	102.3
22	2015	158.2	159.2	126.1	64.1	31.7	20.1	11.3	27.1	26.3	73.5	52.2	141
23	2016	63.8	107.2	73.9	38.3	14.4	2	3.8	4.6	35.4	56.2	26.5	81.1

Fuente: SENAMHI

**Tabla 4.4**

*Precipitación Mensual punto de registro Huancavelica.*

DATOS ESTIMADOS PISCO-PUNTO DE REGISTRO HUANCAVELICA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	218.98	227.88	210.28	69.69	35.61	9.31	6.48	10.89	56.53	73.24	49.23	83.70
1995	166.60	190.14	237.60	55.66	19.21	3.17	6.11	3.25	75.28	63.33	85.35	45.85
1996	146.91	266.87	103.81	28.77	11.60	3.24	6.41	23.18	45.16	59.74	42.86	99.22
1997	96.71	162.07	92.76	40.80	21.63	5.29	0.39	43.24	67.09	81.44	109.48	109.49
1998	183.37	206.18	141.27	53.90	2.25	10.73	0.00	22.15	18.89	101.28	62.40	88.05
1999	150.28	255.01	128.77	79.22	28.51	5.76	9.05	5.94	66.63	80.98	52.73	89.43
2000	170.43	203.42	148.53	38.89	21.70	6.33	22.62	18.76	23.43	123.09	32.55	86.69
2001	196.81	127.64	213.71	39.24	34.94	1.62	24.36	13.87	71.81	84.41	122.28	68.90
2002	100.57	293.94	286.72	71.03	20.84	6.91	42.41	15.44	79.05	112.93	138.92	102.86
2003	169.85	418.63	259.57	68.84	10.83	1.82	3.01	41.21	35.26	46.88	30.70	167.95
2004	77.21	180.10	160.06	24.21	7.18	25.67	17.08	29.40	53.90	59.74	58.35	181.69
2005	111.74	139.43	172.42	36.40	11.32	1.65	2.79	4.41	44.72	79.51	40.66	88.43
2006	154.85	148.70	152.01	88.38	1.57	16.99	0.40	27.02	33.68	79.56	86.52	80.90
2007	104.48	86.11	227.90	45.43	17.68	0.50	5.58	3.86	46.87	75.14	61.04	76.07
2008	182.35	186.95	101.22	19.14	5.42	11.07	6.36	12.01	32.52	82.69	41.25	67.07
2009	140.04	247.91	124.57	62.99	25.52	4.18	22.59	10.40	52.21	78.82	159.56	155.75
2010	257.33	149.75	175.24	49.96	15.46	5.59	0.65	8.68	19.96	76.59	62.98	143.87
2011	196.85	287.87	201.30	75.56	19.15	1.49	8.62	6.59	49.80	50.36	81.97	136.01
2012	115.50	256.06	120.61	146.86	10.84	13.38	7.25	2.38	71.75	66.01	105.43	123.19
2013	152.23	198.43	218.74	36.78	56.77	6.36	5.54	25.39	53.67	91.13	68.05	107.60
2014	187.38	210.47	338.00	47.30	34.07	2.90	7.12	17.22	92.22	79.42	59.37	101.23
2015	179.70	158.15	146.98	42.26	31.89	7.83	4.12	18.37	40.82	48.03	49.51	96.17
2016	61.31	210.31	84.75	65.69	9.29	4.13	5.22	7.43	17.37	73.46	19.31	72.93

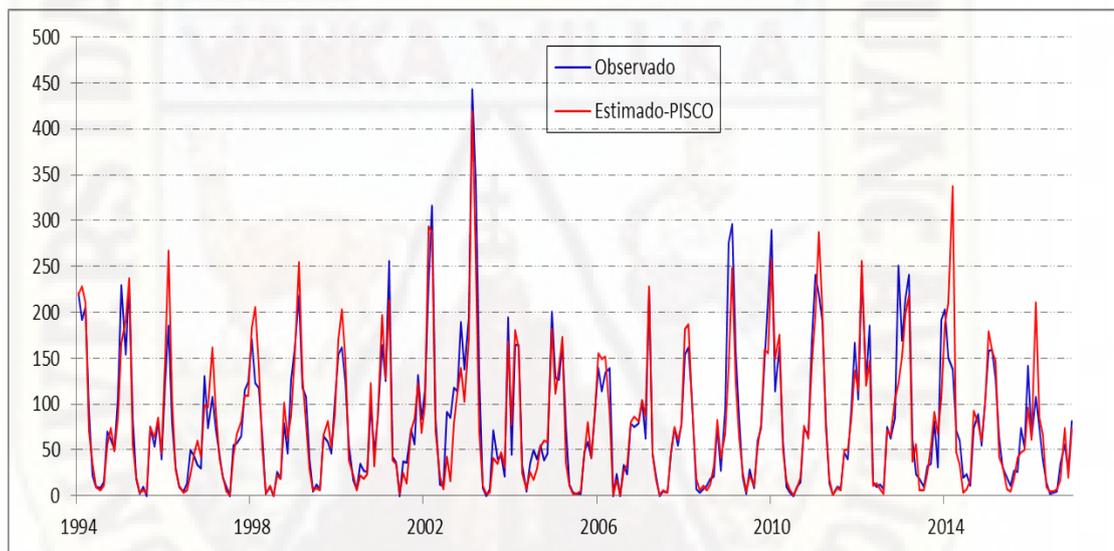
Fuente: Producto PISCO

### a.1 Series de tiempo para los datos observado y estimado

En la Figura 4.8, se muestra en una serie de tiempo para los datos mensuales observados y estimados por producto PISCO, además podemos observar en la imagen que las magnitudes de las precipitaciones tanto para el observado y estimado son similares. Utilizaremos como una muestra la estación Huancavelica y el punto de registro también llamado Huancavelica ya que este punto se ubicó en el mismo lugar de la estación meteorológica llamado Huancavelica, con un periodo de registro (1994-2016).

**Figura 4.8**

*Serie de tiempo de los datos observados y estimados*



**Fuente:** Elaboración Propia.

### a.2 Consistencia en la media

Mediante la prueba estadística T de Student se detectará la inconsistencia en la media, por eso se analiza si los valores promedios son estadísticamente iguales o diferentes. A continuación, se calcula los promedios y las desviaciones estándar para los datos observados y estimados, con las ecuaciones que tiene T de Student.

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i \quad S_1(x) = \left[ \frac{1}{n_1-1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$n_1 = 276 \quad \bar{x}_1 = 80.17681159 \quad s_1(x) = 74.50225016$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} x_j \qquad S_2(x) = \left[ \frac{1}{n_2-1} \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$n_1 = 276 \qquad \bar{x}_1 = 78.8832163 \qquad s_1(x) = 74.6128951$$

**Dónde:**

$x_i$  : Información de análisis de datos observados.

$x_j$  : Información de análisis de datos estimados.

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$  : Media de los datos observados y estimados, respectivamente.

$S_1(x), S_2(x)$  : Desviación estándar de los datos observados y estimados, respectivamente.

$n_1, n_2$  : Numero de datos observados y estimados.

El procedimiento a seguir es de la siguiente manera:

### 1. Se establecen las hipótesis y nivel de significancia.

$H_p: \mu_1 = \mu_2$  (Significa que existe igualdad o semejanza entre las medias poblacionales de los datos observados y estimados).

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$  (No existe semejanza entre las medias poblacionales de los datos observados y estimados).

$\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia de 5%).

### 2. Calculo de $S_p$ y $S_d$

Dónde:

$$S_p = \left[ \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2} \right]^{1/2} \qquad ; S_p = 74.50225016$$

$$S_d = S_p \left[ \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]^{1/2} \qquad ; S_d = 74.6128951$$

3. **Calculo de Tc (T calculado).**

$$t_c = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{S_d}$$

$$t_c = 0.203819669$$

4. **Calculo de Tt (T tabulado o tablas).**

**Tabla 4.5**

*Tabla de distribución "t - Student".*

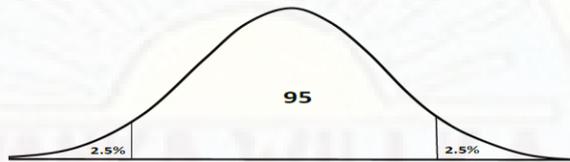


TABLA DE CUANTILES DE LA DISTRIBUCIÓN ' T ' DE STUDENT						
GL	ÁREA DE DOS COLAS					
	0.40	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
1	1.3764	3.0777	6.3138	12.7062	31.8205	63.6567
2	1.0607	1.8856	2.92	4.3027	6.9646	9.9248
3	0.9785	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8409
4	0.941	1.5332	2.1318	2.7764	3.7469	4.6041
5	0.9195	1.4759	2.015	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.9057	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.896	1.4149	1.8946	2.3646	2.998	3.4995
8	0.8889	1.3968	1.8595	2.306	2.8965	3.3554
9	0.8834	1.383	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.8791	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.8755	1.3634	1.7959	2.201	2.7181	3.1058
12	0.8726	1.3562	1.7823	2.1788	2.681	3.0545
13	0.8702	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.8681	1.345	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.8662	1.3406	1.7531	2.1314	2.6025	2.9467
16	0.8647	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.8633	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.862	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.861	1.3277	1.7291	2.093	2.5395	2.8609
20	0.86	1.3253	1.7247	2.086	2.528	2.8453
21	0.8591	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.8583	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.8575	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.8569	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7969

25	0.8562	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.8557	1.315	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.8551	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.8546	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.8542	1.3114	1.6991	2.0452	2.462	2.7564
30	0.8538	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.75
50	0.8489	1.2987	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778
100	0.8452	1.2901	1.6602	1.984	2.3642	2.6259
200	0.8434	1.2858	1.6525	1.9719	2.3451	2.6006
500	0.8423	1.2832	1.6479	1.9647	2.3338	2.5857
641	0.8422	1.2829	1.6472	1.9637	2.3322	2.5835
1000	0.842	1.2824	1.6464	1.9623	2.3301	2.5808

**Fuente:** Elaboración propia con la herramienta Excel.

Por lo tanto  $t_t = 1.964286551$

### 5. Criterio de decisión

Si:  $|T_c| \leq |T_t|$  (95%) entonces,  $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$  estadísticamente las medias son iguales (podemos decir hay semejanza entre ambos datos analizados).

Si:  $|T_c| > |T_t|$  (95%) entonces,  $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$  estadísticamente las medias son diferentes (no hay semejanza) por lo tanto se define la existencia de salto.

Como  $|T_c = 0.203819669| < |T_t = 1.964286551|$  al (95% de efectividad) entonces, estadísticamente las medias son iguales, por lo tanto la información de datos observados y estimados tienen una consistencia en la media.

### a.3 Consistencia en la desviación estándar

El análisis de consistencia en la desviación estándar se realiza con la prueba “F” de Fisher según el procedimiento:

Se calcula la varianza de los datos observados y estimados.

$$s_1^2(x) = \frac{1}{n_1-1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \quad s_1^2(x) = 5550.58528$$

$$s_2^2(x) = \frac{1}{n_2-1} \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \quad s_2^2(x) = 5567.084115$$

**1. Planteando la hipótesis y el nivel de significancia:**

$H_p: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$  (se considera varianzas poblacionales semejantes).

$H_p: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$  (se considera varianzas poblacionales semejantes).

$\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia del 5%).

**2. Calculando  $F_c$  (F calculado)**

$$F_c = \left[ \frac{S_1(x)}{S_2(x)} \right]^2, \quad \text{si } S_1^2(x) > S_2^2(x)$$

$$F_c = \left[ \frac{S_2(x)}{S_1(x)} \right]^2, \quad \text{si } S_2^2(x) > S_1^2(x)$$

Como:  $S_2^2(x) > S_1^2(x)$ , entonces  $F_c = \left[ \frac{S_2(x)}{S_1(x)} \right]^2 F_c = 1.00297245$

**3. Encontrar el valor de  $F_t$  (F tabulado) según las tablas:**

Para:  $\alpha = 0.05$

$$\left[ \begin{array}{l} GLN = n_1 - 1 \\ GLD = n_2 - 1 \end{array} \right] \quad \text{si } S_1^2(x) > S_2^2(x)$$

$$\left[ \begin{array}{l} GLN = n_2 - 1 \\ GLD = n_1 - 1 \end{array} \right] \quad \text{si } S_2^2(x) > S_1^2(x)$$

Como  $S_2^2(x) > S_1^2(x)$ , entonces  $G.L.N. = n_2 - 1 = 275$ ,  $G.L.D. = n_1 - 1 = 275$

**Dónde:**

$\alpha$  : Nivel de significancia.  
G.L.N. : Grados de libertad del numerador.  
G.L.D. : Grados de libertad de denominador.

**Tabla 4.6**

*Valores de distribución F de Fisher,  $\alpha=0.05$*

TABLA DE CUANTILES DE LA DISTRIBUCIÓN FISHER F, $\alpha=0.05$												
n1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	536	1000
n2												
10	2.637	2.588	2.572	2.563	2.558	2.555	2.553	2.551	2.549	2.548	2.547	2.543
15	2.178	2.123	2.105	2.095	2.089	2.085	2.083	2.081	2.079	2.078	2.077	2.072
20	1.966	1.907	1.886	1.875	1.869	1.865	1.862	1.859	1.858	1.856	1.855	1.85
25	1.842	1.779	1.757	1.746	1.739	1.735	1.731	1.729	1.727	1.725	1.724	1.718
30	1.761	1.695	1.672	1.66	1.652	1.647	1.644	1.641	1.639	1.637	1.636	1.63
35	1.703	1.635	1.61	1.598	1.59	1.585	1.581	1.578	1.576	1.574	1.573	1.566
40	1.66	1.589	1.564	1.551	1.542	1.537	1.533	1.53	1.528	1.526	1.525	1.517
45	1.626	1.554	1.527	1.513	1.505	1.499	1.495	1.492	1.49	1.488	1.487	1.479
50	1.599	1.525	1.498	1.484	1.475	1.469	1.465	1.461	1.459	1.457	1.456	1.448
55	1.577	1.501	1.473	1.459	1.45	1.444	1.439	1.436	1.433	1.431	1.43	1.422
60	1.559	1.481	1.453	1.438	1.428	1.422	1.418	1.414	1.412	1.409	1.408	1.399
65	1.543	1.464	1.435	1.42	1.41	1.404	1.399	1.396	1.393	1.391	1.389	1.38
70	1.53	1.45	1.42	1.404	1.394	1.388	1.383	1.379	1.377	1.374	1.373	1.364
75	1.518	1.437	1.407	1.391	1.381	1.374	1.369	1.365	1.362	1.36	1.359	1.349
80	1.508	1.426	1.395	1.379	1.368	1.361	1.356	1.353	1.35	1.347	1.346	1.336
85	1.499	1.416	1.384	1.368	1.357	1.35	1.345	1.341	1.338	1.336	1.334	1.325
90	1.491	1.407	1.375	1.358	1.348	1.34	1.335	1.331	1.328	1.326	1.324	1.314
95	1.484	1.399	1.367	1.35	1.339	1.331	1.326	1.322	1.319	1.316	1.315	1.304
100	1.477	1.392	1.359	1.342	1.331	1.323	1.318	1.314	1.311	1.308	1.306	1.296
105	1.471	1.385	1.352	1.334	1.323	1.316	1.31	1.306	1.303	1.3	1.299	1.288
150	1.436	1.345	1.309	1.29	1.278	1.269	1.263	1.258	1.255	1.252	1.25	1.238
200	1.415	1.321	1.283	1.263	1.249	1.24	1.234	1.228	1.224	1.221	1.219	1.205
250	1.402	1.306	1.267	1.246	1.232	1.222	1.215	1.209	1.205	1.202	1.199	1.185
300	1.393	1.296	1.256	1.234	1.22	1.21	1.202	1.196	1.192	1.188	1.186	1.17
400	1.383	1.283	1.242	1.219	1.204	1.193	1.185	1.179	1.174	1.17	1.167	1.15
500	1.376	1.275	1.233	1.21	1.194	1.183	1.175	1.168	1.163	1.159	1.156	1.138
1000	1.363	1.26	1.216	1.19	1.174	1.161	1.152	1.145	1.139	1.134	1.131	1.11

**Fuente:** Elaboración Propia con función de Excel.

**Donde obtenemos de la tabla:  $F_t = 1.219840622$**

#### **4. Probabilidad a decidir:**

*Si:  $F_c \leq F_t$  (95%) entonces  $S_1(x) = S_2(x)$  se considera que las desviaciones estándar son iguales estadísticamente.*

*Si:  $F_c > F_t$  (95%) entonces  $S_1(x) \neq S_2(x)$ , las desviaciones estándar son diferentes estadísticamente por lo tanto se considera a que existe salto.*

**Como:  $F_c = 1.00297245 < F_t = 1.219840622$  (95%) entonces  $S_1(x) = S_2(x)$ , se considera que las desviaciones estándar son estadísticamente iguales.**

**Por lo tanto, no se debe corregir la información de estos dos tipos de datos.**

En resumen, en este caso para los datos observados y estimados tanto por la estación Huancavelica y el punto de registro Huancavelica podemos deducir que tanto la media y la desviación estándar cumplen que estos son semejantes o similares y no deben ser corregidos de acuerdo a los resultados de las pruebas “t” y “F”; por lo que también se puede confirmar que ambos datos no presentan saltos.

Y viendo el análisis de los datos observados y estimados, obtenemos un resultado estadísticamente que ambos son similares o semejantes y no necesitan ser corregidos. Podemos decir que los datos estimados por PISCOp son semejantes a los registrados.

#### **b. Estadísticas de comparación por pares**

El análisis de comparación de pares para los datos observados y estimados será fundamental ya que con este análisis validaremos las hipótesis planteadas en este trabajo de investigación.

**b.1 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)** También conocido como el coeficiente de eficiencia. El rango de NSE es desde  $-\infty$  (ajuste malo) hasta 1 (ajuste perfecto).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Dónde:

$n$  : Número de observaciones

$P_i$  : Valores simulados o pronosticados

$O_i$  : Valores observados

$\bar{O}$  : Media de los valores observados

Entonces:

$$\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 = 221619.001$$

$$\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 = 1526410.952$$

$$NSE = 1 - \frac{221619.001}{1526410.952}$$

$$NSE = 0.854810396$$

Con este valor de  $NSE = 0.854810396$ , podemos decir según la **Tabla 3.1** propuesta por Nash- Sutcliffe, donde considera que valores mayores a **0.8** se considera **ajuste Excelente**.

**b.2 Coeficiente de correlación de Pearson (r)** Indica el grado de asociación o relación que existe entre dos variables. El rango de R varía desde **-1** a **+1**.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}$$

Entonces:

$$\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) = \mathbf{1418100.969}$$

$$\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 = \mathbf{1526410.952}$$

$$\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 = \mathbf{1530948.131}$$

$$r = \frac{1418100.969}{\sqrt{1526410.952}\sqrt{1530948.131}}$$

$$\mathbf{r = 0.927665015}$$

Con el valor de  $r = \mathbf{0.927665015}$  podemos decir según la Tabla 3.2 presentada en anterior capítulo, que hay una **correlación positiva muy alta** en los datos observados y simulados.

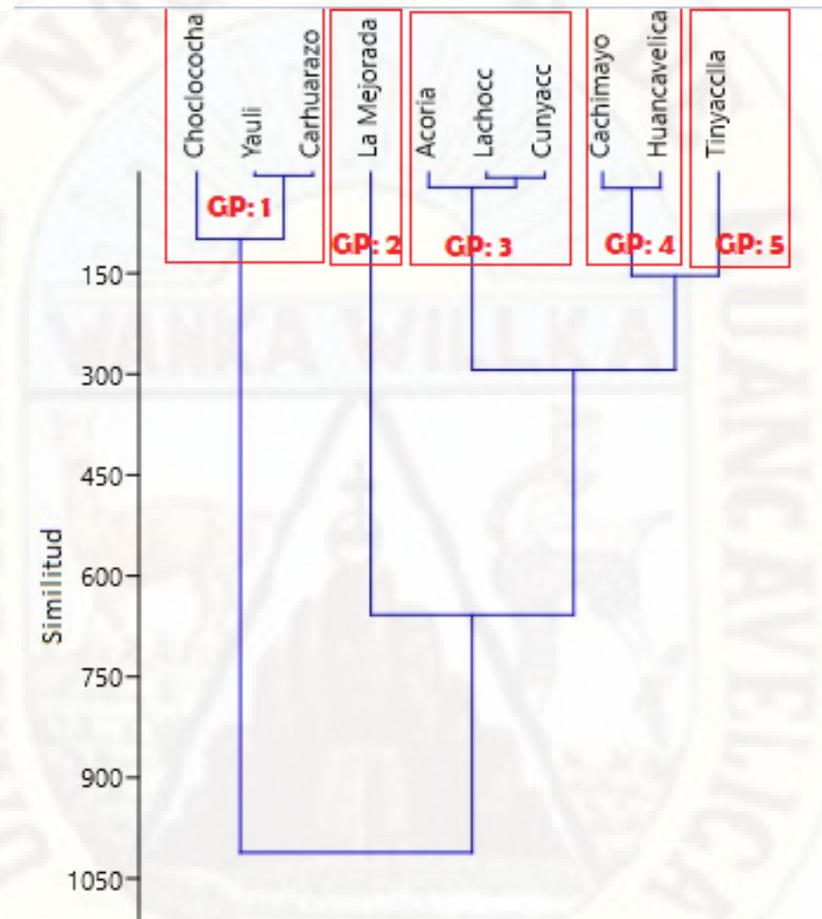
#### **4.4. FORMACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS**

Utilizando 10 puntos de registro en la cuenca de estudio, con datos estimados por precipitación espacial PISCO se podrá formar regiones homogéneas que serán definidos utilizando el Método del Vector Regional (MVR) en el programa HYDRACCESS. Para ello en una primera etapa a través de Clustering método de Ward se realizó una agrupación preliminar de estaciones utilizando como variables regionales: la precipitación media Anual, elevación, longitud y latitud; siendo previamente todas las variables estandarizadas, dando mayor peso a la magnitud de la precipitación en todos los puntos de registro. Así, la agrupación preliminar en base Clustering método de Ward se presenta en el gráfico un dendrograma, el cual es un diagrama de árbol que muestra los grupos que se forman al crear los conglomerados de las observaciones en cada paso y

sus niveles de similitud. Así, en este estudio en base al dendrograma se ha definido una partición final de 5 grupos preliminares o regiones homogéneas lo cual ocurre a un nivel de similitud de cada punto de registro (Figura 4.9).

**Figura 4.9**

*Dendrograma en base al método de Ward. GP, Grupo Preliminar.*



**Fuente:** Elaboración propia

La distribución espacial del agrupamiento preliminar de estaciones en base a Clúster método de Ward, donde se puede apreciar que el grupo 1 corresponde a las estaciones localizadas en las partes más altas donde hay presencia de grandes magnitudes en la precipitación, lo agrupan las zonas de Choclococha, Carhuarazo y Yauli, en el grupo 2 se encuentran solo un punto de registro La Mejorada en la parte más baja de la cuenca donde hay presencia de poca

precipitación, y los grupos 3,4 y 5 se encuentran en la parte media de la cuenca y otras alrededor de la ciudad de Huancavelica.

En la segunda etapa del proceso de formación de regiones homogéneas, se utilizará MVR (método vector regional) para así confirmar o verificar si los grupos preliminares definidos con el método de Ward son regiones homogéneas. Los resultados definitivos de MVR para cada región, se aprecia los índices anuales de cada estación pluviométrica y del vector regional con sus respectivos límites de confianza.

En el análisis del VR se podrán identificar 3 características importantes. La primera característica es la Correlación (CC) de los puntos de registro respecto al Vector, donde se aceptarán los puntos de registro con correlaciones altas entre si y el Vector, se descartaran los puntos de registro con un comportamiento diferente al Vector. La segunda característica importante es la Desviación Estándar de las Desviaciones (DED) que nos indican que tan alejados están los Índices de los puntos de registro respecto al Vector, o que tan alejadas se encuentran de los límites (superior e inferior) establecidos para el cálculo (líneas rojas punteadas). La tercera característica es la gráfica de Suma de los índices anuales del Vector y de los Puntos de Registro, que presenta la doble acumulación de los índices de los Puntos de Registro en el eje Y y del Vector en el eje X, donde las que presentaran un cambio de pendiente en las gráficas reflejara la probabilidad de datos erróneos en esos años.

Otra característica fundamental es la Calidad de los Puntos de Registro, donde varia de 0 a 10 donde tener valores altos significa tener una buena calidad de datos.

Un grupo preliminar es considerado como región homogénea si los valores de DED son menores a 0.4 y si los valores de CC son mayores a 0.7 (Rau et al., 2017).

Para en análisis del vector regional de los Puntos de Registro que se encuentran en la cuenca de estudio, tenemos 5 regiones homogéneas preliminares agrupadas mediante Clusters Método Ward, se tendrá en cuenta que hay 3

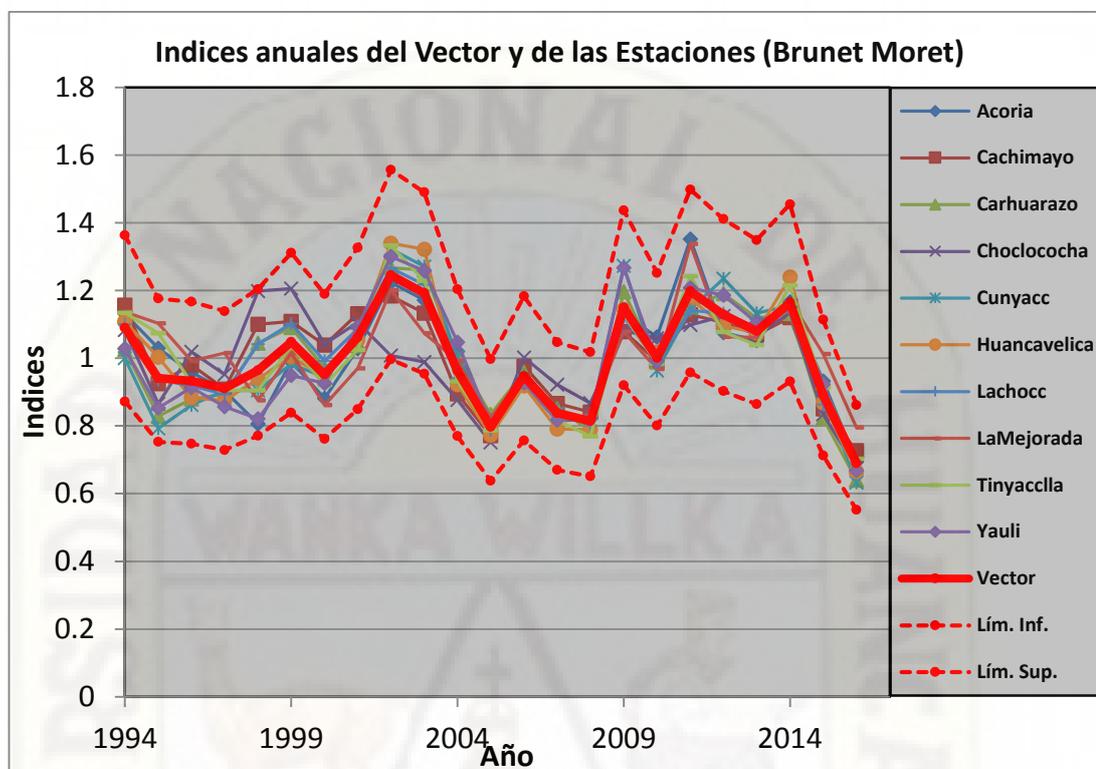
regiones homogéneas que agrupan como máximo 2 Puntos de Registro y que estas no cumplen las condiciones del programa HYDRACCES ya que pide como mínimo 3 puntos de registro, por esta razón primeramente se analizara en VR con todos los puntos de Registro y así saber las características de estas 3 regiones homogéneas respecto a otras regiones homogéneas.

Por lo tanto con el criterio anterior mencionado, primeramente empezaremos a calcular el Vector Regional tomando todos los Puntos de Registro como una solo región homogénea, y ahí se podrá analizar las características de las regiones que no se puede analizar independientemente por falta Estaciones o Puntos de Registro, tenemos la región 2 que agrupa solo un punto de registro La Mejorada, la región 4 que agrupa dos puntos de Registro Huancavelica y Cachimayo, la región 5 que solo agrupa un Punto de Registro Tinyaccla. También se hará un cálculo independiente del vector regional para las regiones 1 y 3.

Los resultados preliminares del VR para todos los Puntos de Registro Figura 4.10, se aprecia que todos los datos de los Puntos de Registro se encuentran dentro de los límites de confianza del Vector. En la Tabla 4.7 podemos apreciar los demás resultados como en base a la D.E.D y la CC todos los Puntos de Registro son homogéneos debido a los bajos valores de D.E.D ( $<0.104$ ) y demás que los valores de CC en general son mayores a 0.7 en cada uno de los Puntos de Registro. Por ultimo en la Figura 4.11 se observa una consistencia de la información registrada, no se observan quiebres significativos en la suma de los Puntos de Registro, esto refleja en altos valores de correlación. No se observan cambios de pendiente.

**Figura 4.10**

*Resultados de MVR para todos los puntos de registro*



**Fuente:** Software Hydraces.

**Tabla 4.7**

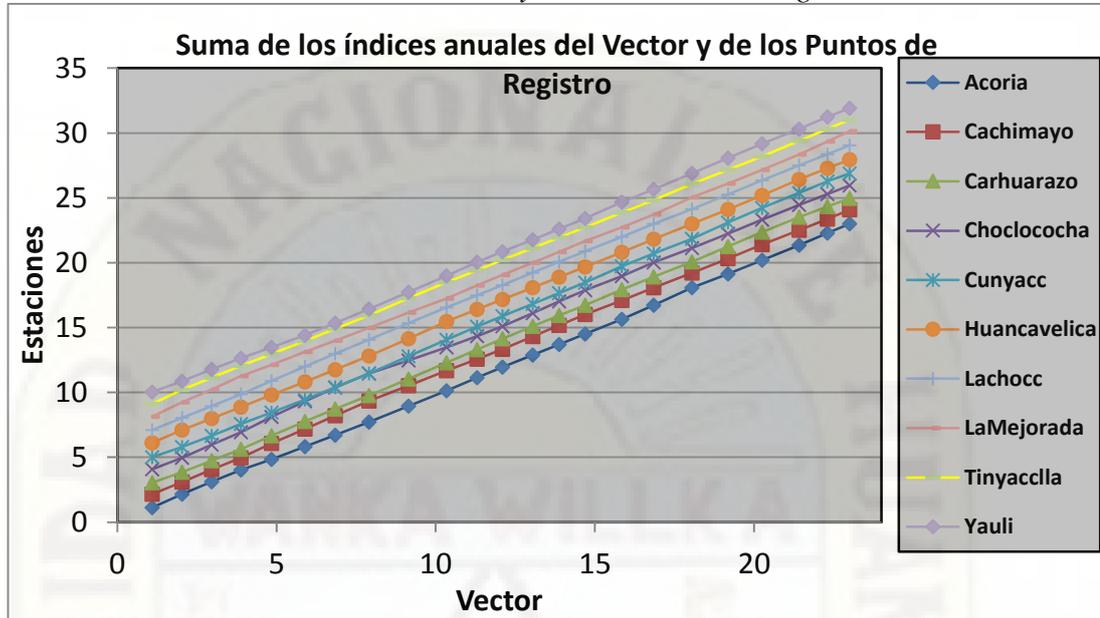
*Resultados de las características importantes de todos los Puntos de Registro.*

Punto de Registro	Nº Años	Coficiente de Variación	Desvíos (D.E.D)	Homogeneidad B.M.	Correlación /Vector	Calidad (/10)	Evaluación (/10)
Acoria	23	0.158	0.06	0.116	0.921	9.9	7.9
Cachimayo	23	0.132	0.056	0.027	0.918	9.9	9.5
Carhuarazo	23	0.165	0.049	0.014	0.955	9.9	9.8
Choclococha	23	0.137	0.104	0.202	0.717	9.6	9.6
Cunyacc	23	0.18	0.064	0.012	0.941	9.8	9.8
Huancavelica	23	0.176	0.047	0.621	0.973	9.9	9.9
Lachocc	23	0.147	0.029	0.004	0.98	10	10
LaMejorada	23	0.135	0.079	0.022	0.837	9.7	9.7
Tinyacclla	23	0.163	0.046	0.278	0.961	9.9	9.9
Yauli	23	0.174	0.06	0.006	0.944	9.9	9.9

**Fuente:** Software Hydraces.

**Figura 4.11**

*Suma de los Índices anuales del Vector y de los Puntos de Registro*



**Fuente:** Hydraces.

De acuerdo a la Figura 4.10, podemos observar que la Región 2, que agrupa solo un Punto de Registro La Mejorada muestra un comportamiento similar entre todos sus integrantes y también muestra un acercamiento aceptable en el incremento y decremento en los mismos años que el vector, con un D.E.D de 0.079 que se muestra en la Tabla 4.7, esto significa que el Punto de Registro La Mejorada está muy cerca respecto al Vector, podemos decir también que el Punto de Registro está más alejado de los límites (superior e inferior) y con un CC de 0.837 que cumple la regionalización preliminar porque es mayor que 0.7, por último en la **Figura 4.11** se presenta la doble acumulación de los índices de los Puntos de Registro y el vector donde se puede ver que no hay cambios de pendiente en los datos del Punto de Registro La Mejorada esto refleja que no hay datos erróneos y no necesitamos corrección de datos, con esto podemos decir o confirmar la regionalización preliminar para la región 2.

Para la región 4 que agrupa dos Puntos de Registro Huancavelica y Cachimayo, podemos apreciar según la **Figura 4.10** que estos dos Puntos también muestran un comportamiento similar entre si y el Vector, con un D.E.D de 0.047 y 0.056

respectivamente que se muestra en la Tabla 4.7, significa que estos dos puntos están más próximo al Vector que el Punto de Registro La Mejorada, con un CC de 0.973 y 0.918 que también cumple porque estos son mayor que el 0.7, también se aprecia en la Figura 4.11 que estos dos puntos de registro no presentan cambios de pendientes respectivamente esto reflejaría que no hay datos erróneos y no se necesita corrección de datos, con esto podemos confirmar la regionalización preliminar para el grupo 4.

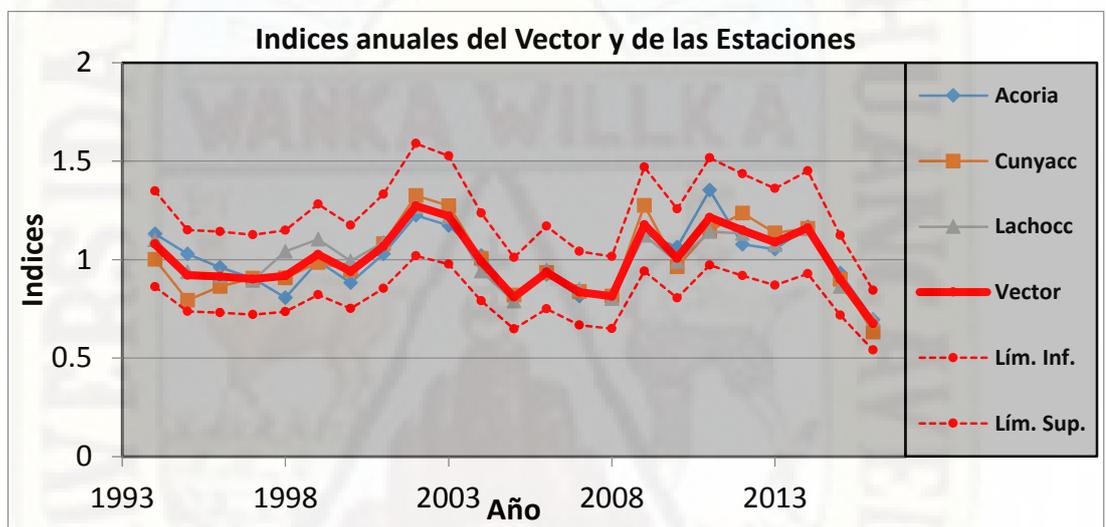
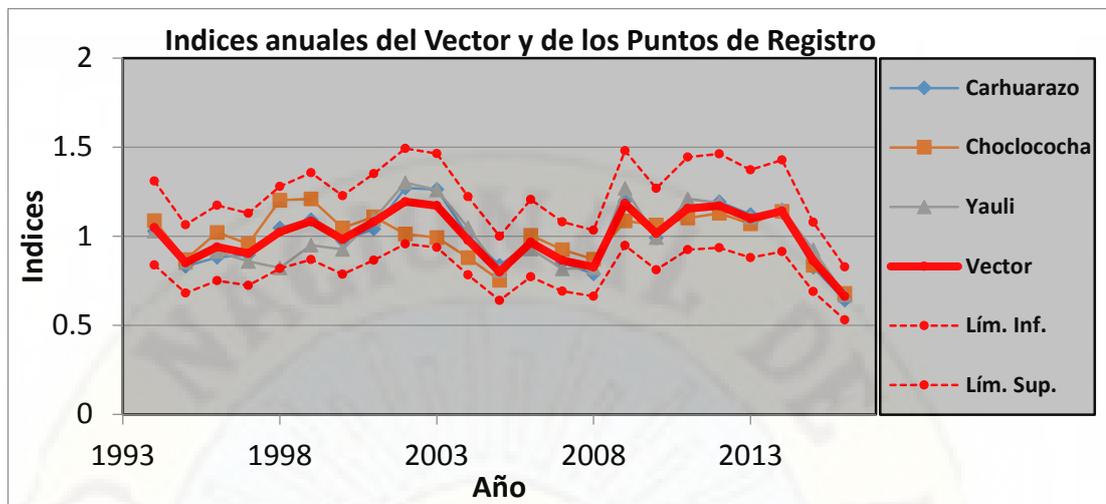
Se observa también las características que tiene la región 5 que agrupa solo un Punto de Registro Tinyacclla podemos analizar las características de este punto que se muestra en la **Figura 4.10**, que los datos de este punto muestran un comportamiento similar al Vector, con un acercamiento aceptable con el incremento y decremento respecto al Vector, con un D.E.D de 0.046 de esto podemos decir que este punto es aún más cercano respecto al vector que las dos regiones analizadas anteriormente, también tiene un CC de 0.961 que cumple la condición de la regionalización siendo mayor que 0.7, por último en la **Figura 4.11** los datos del Punto de Registro Tinyacclla no presenta cambios de pendientes esto reflejaría que no hay datos erróneos y no sería necesario una corrección de datos, con esto podemos confirmar la regionalización preliminar para el grupo 5.

Para culminar con la regionalización tenemos 2 regiones homogéneas, la Región 1 que agrupa 3 Puntos de Registro (Carhuarazo, Choclococha y Yauli), y la Región 3 que agrupa también 3 Puntos de Registro (Acoria, Cunyacc y Lachocc), estas si cumplen las condiciones que da el programa HYDRACCES ya que tienen 3 estaciones como mínimo, y se podrá calcular el VR regional de estas dos regiones que se muestran posteriormente.

En los resultados preliminares de estas dos regiones podemos apreciar que todos los datos de los Puntos de Registro que agrupan la Región 1 (Panel superior) y la Región 3 (Panel inferior) se encuentran dentro de los límites superior e inferior del Vector calculado. **Figura 4.12.**

#### **Figura 4.12**

*Resultados de MVR, Índices anuales del Vector y los puntos de Registro del Grupo 1 (Panel superior) y Grupo 3 (Panel inferior)*



**Fuente:** Software Hydraces

También se aprecia las características de la región 1 y 3 Tabla 4.8, donde la Región 1 (tabla superior), la primera característica es la D.E.D que varía de 0.035 a 0.085 en cada uno de los Puntos de Registro que agrupa, donde cumplen la condición de D.E.D menor a 0.4 para ser considerado como una regionalización preliminar, la segunda característica es la CC que varía de 0.811 a 0.98 que también es aceptable por que es mayor que 0.7, también podemos apreciar la característica de la Homogeneidad B.M. que sus valores son similares entre sí, en general podemos decir que cumple o se confirma la regionalización preliminar realizado por Cluster Método Ward.

Por otro lado se aprecia las características de la Región 3 Tabla 4.8 (tabla inferior), donde agrupa los Puntos de Registro Acoria, Cunyacc y Lachocc, donde la

D.E.D varía de 0.041 a 0.057 que es aceptable para una regionalización preliminar ya que es menor de 0.4, además la CC varia de 0.931 a 0.963, y los valores son muy similares entre sí, podemos decir también que son muy mayores a 0.7, con estos análisis realizados podemos confirmar la regionalización preliminar realizados por Cluster Metodo Ward.

**Tabla 4.8**

*Resultados de las características importantes de los grupos que agrupa la Región 1 (Tabla superior) y Región 3 (Tabla inferior).*

Punto de Registro	Nº Años	Coficiente de Variación	Desvíos (D.E.D)	Homogeneidad B.M.	Correlación /Vector	Calidad (/10)	Evaluación (/10)
Carhuarazo	23	0.165	0.035	0.062	0.982	9.9	7.9
Choclococha	23	0.137	0.085	0.052	0.811	9.8	9.4
Yauli	23	0.174	0.068	0.062	0.92	9.9	9.8

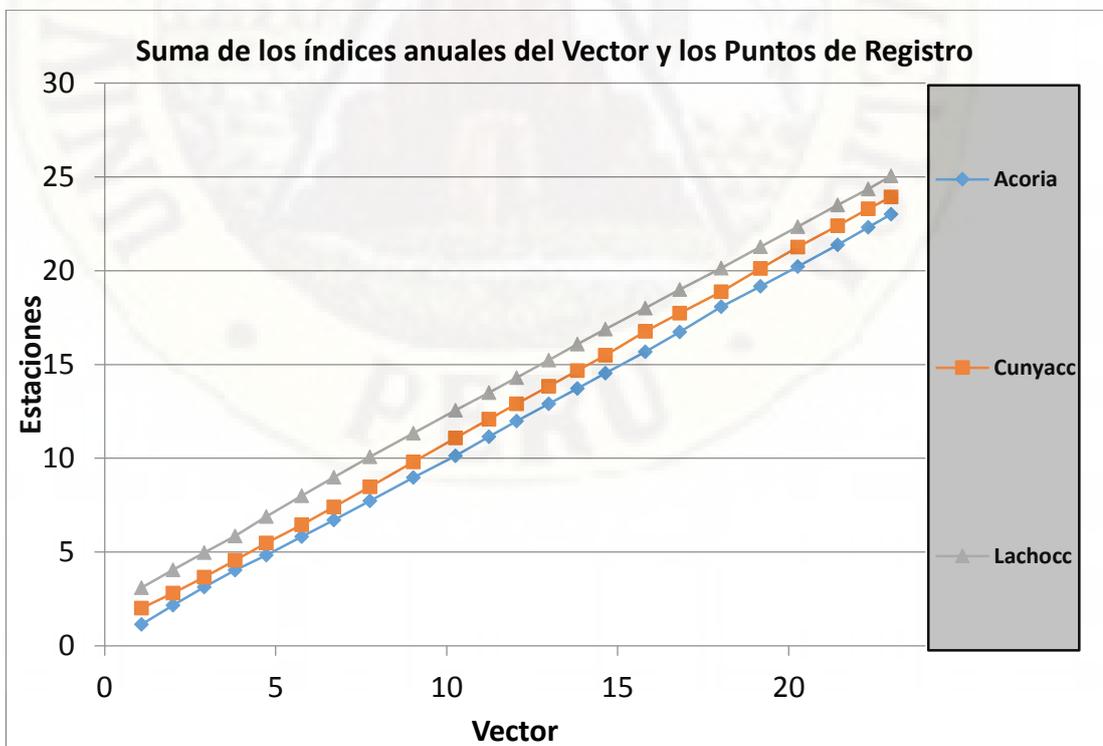
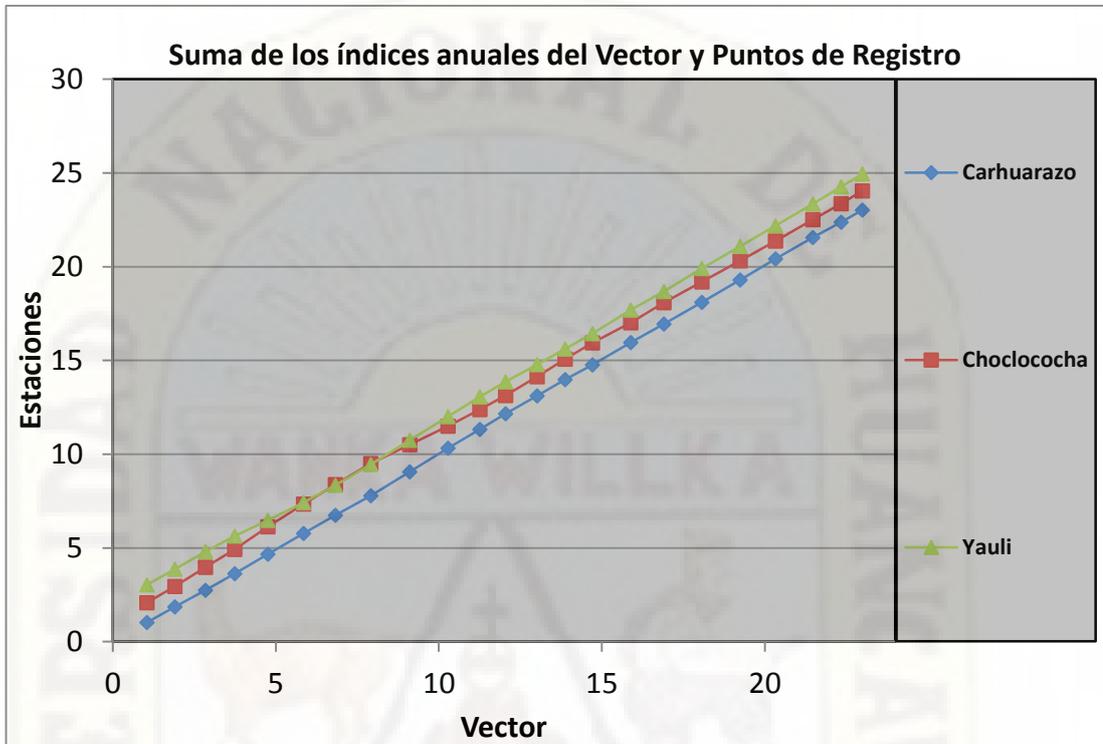
Punto de Registro	Nº Años	Coficiente de Variación	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correlación /Vector	Calidad (/10)	Evaluación (/10)
Acoria	23	0.158	0.057	0.127	0.931	9.9	7.9
Cunyacc	23	0.18	0.051	0.044	0.963	9.9	9.5
Lachocc	23	0.147	0.041	0.003	0.962	9.9	9.9

**Fuente:** Software Hydraces

Para culminar con el análisis de la regionalización preliminar mediante el MVR, también se aprecia la gráfica de Suma de los índices anuales del Vector y Puntos de Registro de la Región 1. **Figura 4.13** (panel superior), podemos decir de la gráfica que se muestra, que los Puntos Carhuarazo y Yauli no presentan cambios de pendiente, en cambio en los primeros años para el Punto Choclococha hay un ligero cambio de pendiente, pero es aceptable, con esto podemos decir que hay una consistencia en la información registrada por estos puntos, y no habrá la necesidad de corregir dichos datos. Por ultimo para la Región 3. **Figura 4.13** (panel inferior), podemos ver en la gráfica que nos muestra que no hay cambio de pendiente o quiebres en los 3 Puntos de Registro que agrupa la Región 3, y decir que hay una consistencia en la información que tienen cada Punto, no hay la necesidad de corregir dicha información.

**Figura 4.13**

*Suma de los índices anuales del Vector y Puntos de Registro para la Región 1 (tabla superior) y Región3 (tabla inferior).*



**Fuente:** Hydraces

En consecuencia, de los análisis realizados anteriormente se muestra la delimitación de las regiones homogéneas en base Cluster confirmados por cálculo del MVR, donde la delimitación de cada región fue realizada en base el área de influencia de cada uno de los Puntos de Registro que lo conforman utilizando el método de Isoyetas.

Es así, que se obtuvo 5 regiones homogéneas, cuya distribución preliminar se basa en Cluster Método de Ward, dando mayor peso a la magnitud de precipitación en cada punto de registro, confirmando cada región homogénea mediante un análisis de Vector Regional. Y en base a estos análisis realizados anteriormente se detallan las 5 regiones a continuación:

**Región 1: PMA= 1109 mm.** Conformado por 3 puntos de registro **Choclococha, Carhurazo y Yauli** que se ubican en las partes más altas de la cuenca, donde la zona es lluviosa con grandes magnitudes en la precipitación, considerado la región más húmeda de la cuenca de estudio.

**Región 2: PMA= 633 mm.** Conformado por solo 1 punto de registro **La Mejorada** que se ubica en la parte más baja de la cuenca, donde la zona presenta un clima árido deficiente de lluvia, considerado como la región más seca de la cuenca de estudio.

**Región 3: PMA= 1002 mm.** Conformado por 3 puntos de registro **Acoria, Lachocc y Cunyacc** que se ubican en la parte media de la cuenca con una altura de 3600 a 4000 msnm donde es la segunda región que presenta en sus zonas lluvias de magnitud moderada elevada, considerado la segunda región húmeda.

**Región 4: PMA= 933 mm.** Conformado por 2 puntos de registro **Huancavelica y Cachimayo** que estas zonas se ubican en la zona centro de la cuenca, la magnitud de la lluvia es moderada.

**Región 5: PMA= 840 mm.** Conformado por 1 punto de registro **Tinyaccla** que se ubica en la parte norte de la cuenca, considerada la segunda región seca por que presenta déficit moderado de lluvia.

#### **4.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ÍNDICES DE SEQUIA EN SUS DIFERENTES ESCALAS DE TIEMPO**

Por lo general, los distintos sistemas hidrológicos, ecológicos y agrícolas responden a las sequías climáticas a diferentes escalas de tiempo. Por lo tanto, el SPI y SPEI se calculan a escalas temporales de 1 a 48 meses, para este propósito el análisis de sequías en la cuenca del río Ichu que está conformado por 5 regiones homogéneas descritas anteriormente, donde se ha obtenido datos de cada región homogénea, como la precipitación, temperatura máxima mínima y latitud longitud con una serie de precipitación mensual (1994-2016) y con una serie temperatura máxima mínima mensual (1994-2015). Luego de este proceso, con la metodología de SPI (the standardized precipitation index) y SPEI (índice de precipitación y evapotranspiración estandarizada) que fueron diseñados para cuantificar el déficit de precipitación para múltiples escalas de tiempo, estas escalas de tiempo reflejan el impacto de la sequía en la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos, las condiciones de humedad del suelo responden a las anomalías de precipitación en una escala relativamente corta, por ejemplo 1, 3 y 6 meses, mientras para el agua subterránea, el flujo de la corriente y el almacenamiento del reservorio reflejan las anomalías de precipitación a largo plazo, del orden de 6 meses hasta 48 meses. Más adelante se detallan las diferentes escalas de tiempo que existe. Por estas razones Mckeet et al (2014) originalmente calculo el SPI para escalas de tiempo de 3, 6, 12, 24 y 48 meses.

Es así para esta investigación se tendrá que estudiar el SPI y SPEI para las escalas de tiempo 1, 3, 6, 9 y 12 meses para la sequía meteorológica, considerando que entre 1 y 6 meses para la sequía agrícola, y de entre unos 6 a 48 meses para el análisis de sequía hidrológica, también se podrá analizar la sequía para un periodo futuro (2020-2100) con la metodología del SPEI, el cual se basa en un algoritmo similar al del SPI pero incorpora la temperatura donde nos permite evaluar los cambios futuros de las sequías asociadas al cambio climático.

En ese sentido, los índices mencionados permitirán caracterizar la sequía en cada región en términos de su duración, intensidad, severidad y probabilidad de ocurrencia.

#### **4.5.1. PROBLEMAS DEL SPI y SPEI EN LA CUENCA DEL RIO ICHU**

A modo de ejemplo se mostrarán los resultados del SPI e SPEI, solo para dos regiones que conforman la cuenca del río Ichu, primeramente, la Región 1, considerada como la región más húmeda dentro de la cuenca del río Ichu, que conforma parte de las áreas de los centros poblados de Choclococha, Carhuarzo y las alturas del distrito de Yauli, donde estas zonas son lluviosas, según los datos obtenidos por PISCO. Por otro lado, tenemos la Región 2 que conforma una parte de área del distrito de Mariscal Cáceres (La Mejorada), donde esta región presenta un clima árido deficiente de lluvia, se considera como la región más seca dentro del área de estudio. Por último, para las 3 regiones restantes, los resultados del SPI y SPEI ya se mostrarán en los anexos, ya que estas regiones no presentan zonas muy lluviosas o muy secas, podemos decir que están en un equilibrio con los variables climáticos.

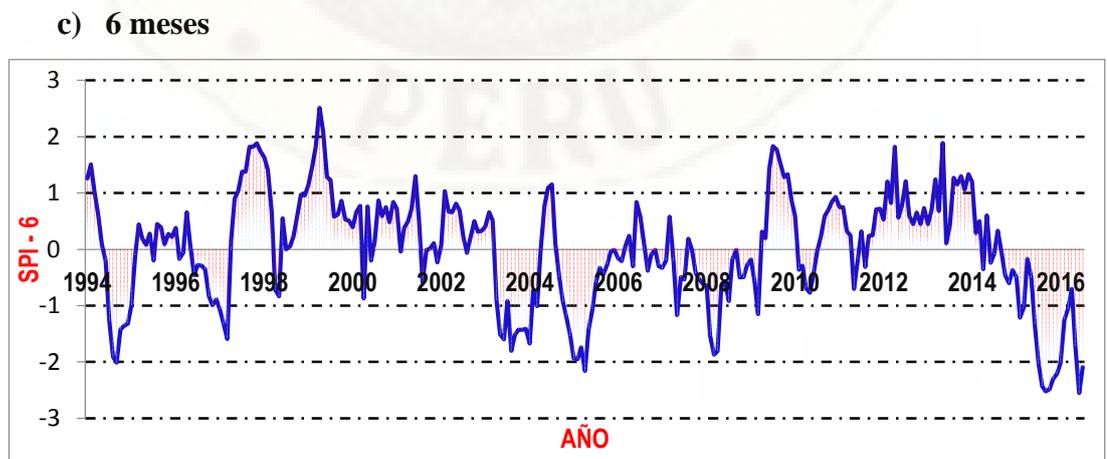
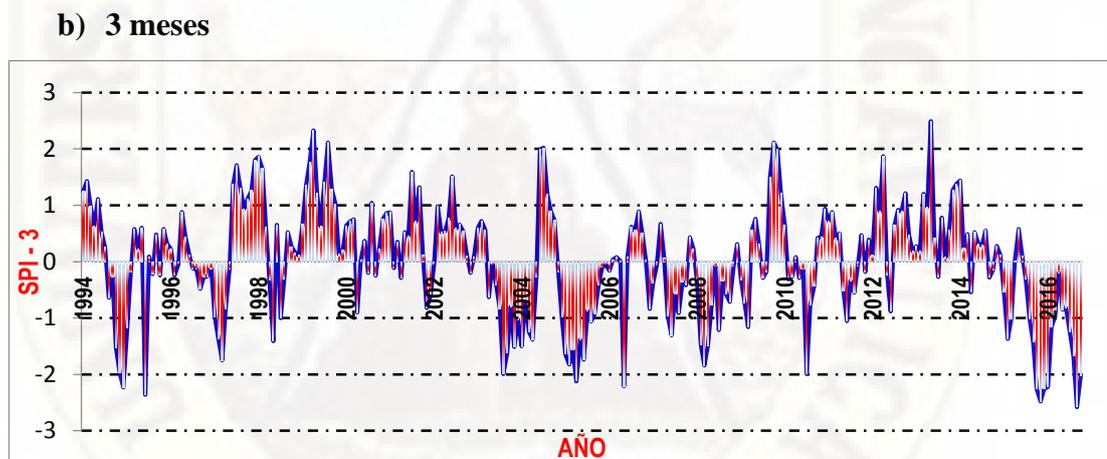
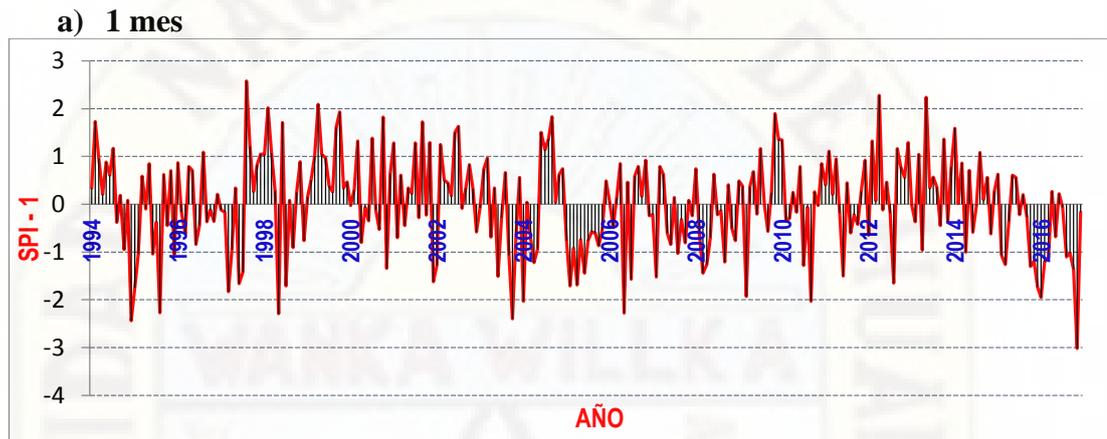
##### ***4.5.1.1. ANÁLISIS DE SPI PARA LAS REGIONES HOMOGÉNEAS 1 Y 2.***

En las siguientes graficas se muestran las características de las sequías para diferentes escalas de tiempo 1, 3, 6, 9, 12 (ver **Figura 4.14**), tomando como ejemplo las regiones homogéneas 1 y 2, seguidamente se muestra una tabla de resumen de los resultados para las 5 regiones homogéneas con las sequias más severas ocurridos dentro del periodo de 1994-2016, donde se observa el número de eventos; la duración máxima en meses; las intensidades máximas y las severidades máximas, ver Tabla 4.9.

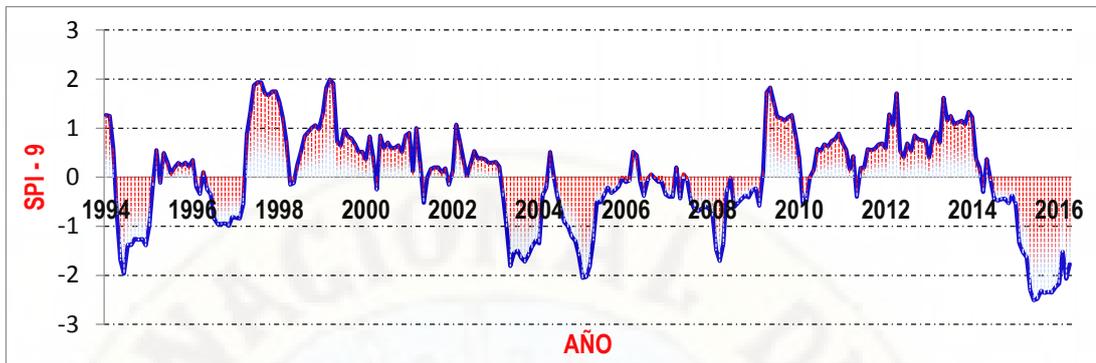
**a. Análisis de SPI a escalas de tiempo 1, 3, 6, 9 y 12 en la región homogénea 1**

**Figura 4.14**

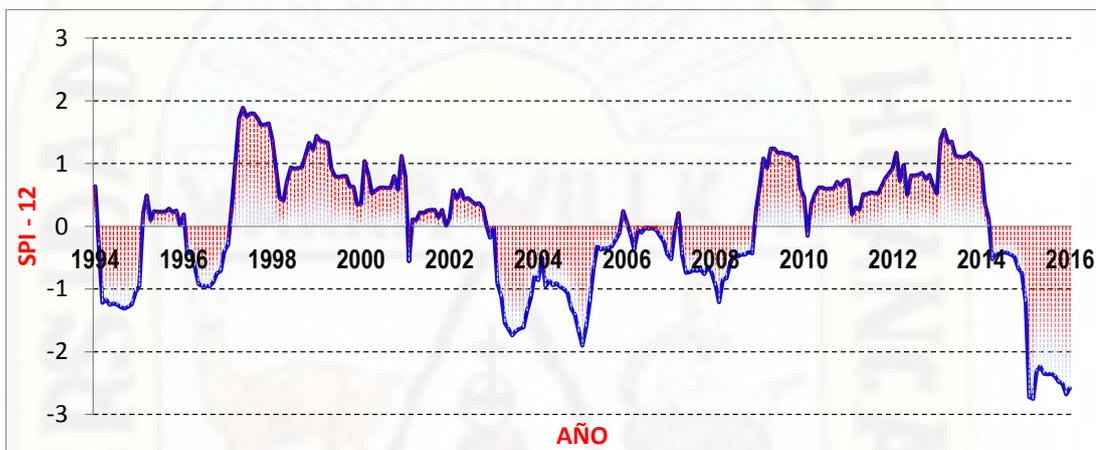
*Estimación del SPI para la región homogénea 1 a escalas de tiempo a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 9 meses y e) 12 meses.*



**d) 9 meses**



e) 12 meses



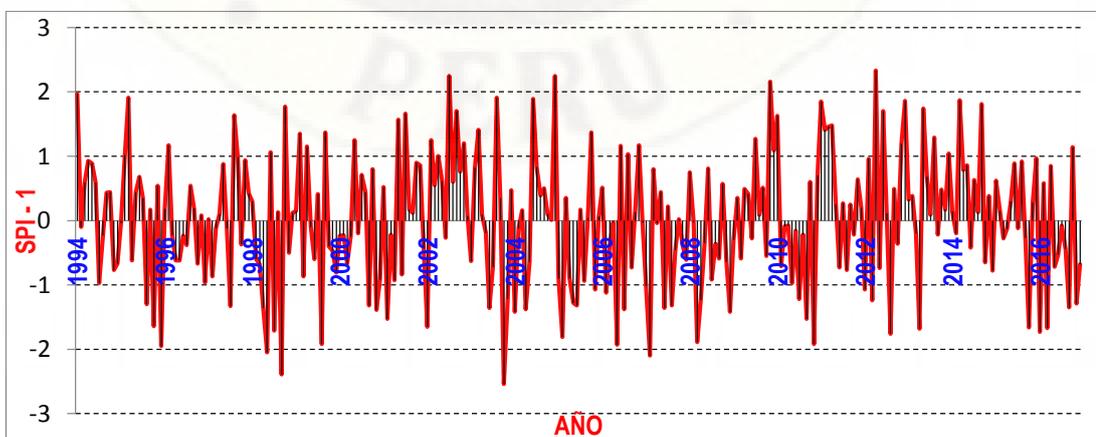
Fuente: Elaboración propia.

**b. Análisis de SPI a escalas de tiempo 1, 3, 6, 9 y 12 en la región homogénea 2**

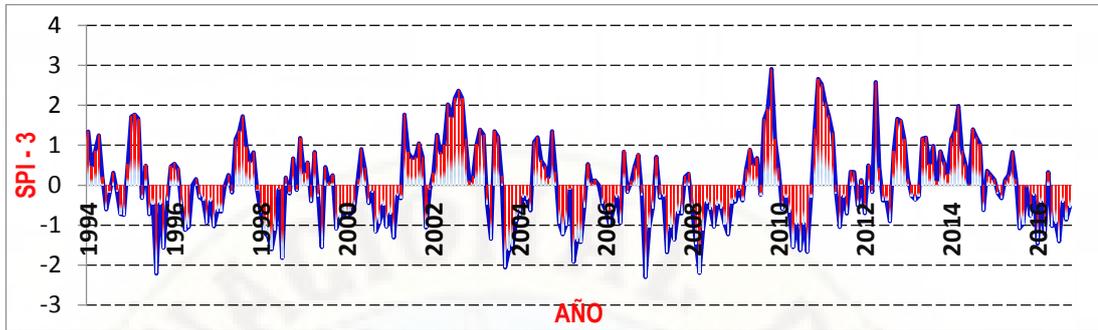
**Figura 4.15**

*Estimación del SPI para la región homogénea 2 a escalas de tiempo a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 9 meses y e) 12 meses.*

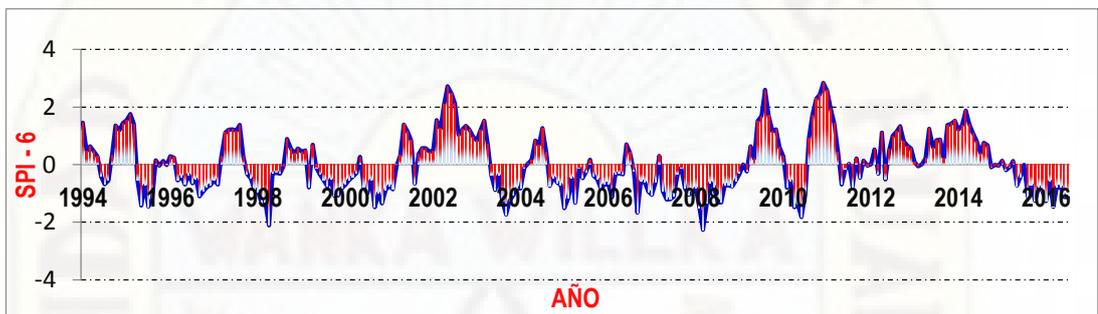
a) 1 mes



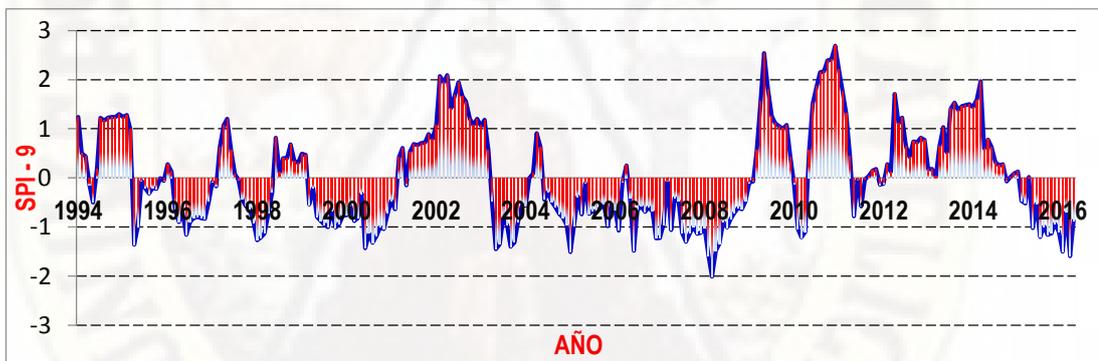
b) 3 meses



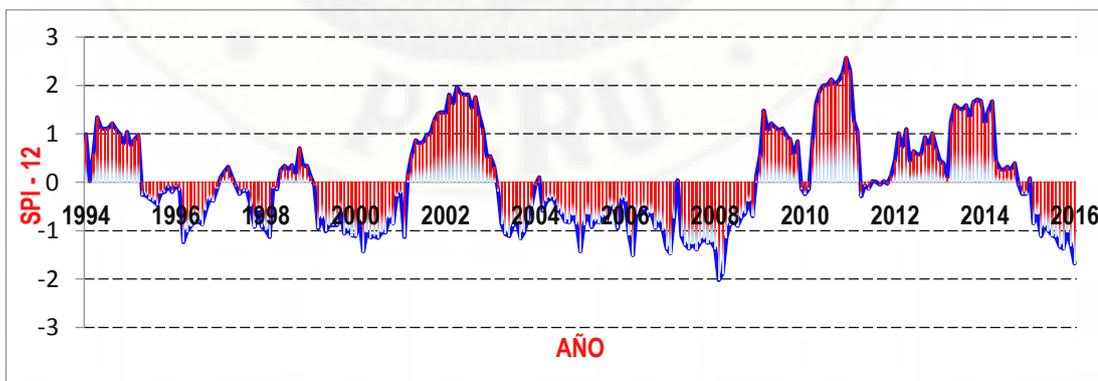
c) 6 meses



d) 9 meses



e) 12 meses



Fuente: Elaboración propia.

En función de las distintas ventanas del SPI y con el fin de mostrar su variabilidad, en las Figura 4.14 y 4.15 muestra las series del SPI para las escalas de 1, 3, 6, 9 y 12 meses para las Regiones 1 y 2. En escalas de tiempo cortas (SPI-1 e SPI-3) se observa que el SPI varía frecuentemente alrededor de cero en ambas regiones. En el caso del SPI3, cada mes posee un gran impacto en la suma de la precipitación, con lo cual es relativamente fácil observar una respuesta rápida del SPI, de valores negativos a valores positivos, asimismo se aprecia que en la Región 2 hay más eventos secos que a la Región 1. De esto se puede identificar fuertemente la sequía agrícola, como la humedad del suelo a corto plazo y el estrés de los cultivos, principalmente en la estación de crecimiento.

A medida que la escala de tiempo se incrementa, el peso de cada mes disminuye y las fluctuaciones del SPI se suavizan, respondiendo más lentamente a las variaciones de la precipitación. Es el caso en escalas de tiempo mediano (SPI-6 e SPI-9). Por ejemplo, el SPI-6 puede ser un buen indicador de la cantidad de precipitación registrada durante una estación lluviosa, puede relacionarse fuertemente con anomalías en las escorrentías superficiales y los niveles de reservorios, por otra parte los valores SPI-9 debajo de -1.5 son usualmente buenos indicadores de condiciones secas que poseen un impacto significativo en la agricultura ,además se observa una reducción en los períodos en los que el SPI es positivo o negativo, pero su duración es mayor.

En el caso para una escala de tiempo largo tenemos el SPI-12, de este análisis para la Región 1, podemos decir que en el periodo 1994-2016 se identificaron 5 episodios de sequías severas para dicha región, en términos de déficit de precipitación y se presentaron en los años 1994, 2003, 2003, 2008 y 2016, seguidamente se puede observar en el análisis SPI-12 para la Región 2, región considerada como la más seca dentro de la cuenca del río Ichu, donde también en el periodo de 1994-2016 se identificó sequías importantes en los años 1994, 1998, 2002, 2010 y 2016, donde la duración de estas sequías son más extensas a la Región 1 (Figura 4.14). De esta forma, esta escala de tiempo permite capturar la ocurrencia de sequías multi-anales y tienden a estar vinculados con las variaciones de los caudales, niveles de reservorio e incluso niveles de aguas subterráneas.

Considerando las características de las sequías (ver Figuras 4.14 y 4.15), se ha construido una tabla de resumen con las principales características de sequía, en el cual se aprecia los resultados para las 5 regiones homogéneas, seguidamente se muestran sus respectivas conclusiones para cada uno de los resultados, donde se observa el número de eventos; Inicio, fin de la sequía; duración máxima en meses; las intensidades máximas y las severidades máximas, con su respectivos años de ocurrencia. **Tabla 4.9.**

**Tabla 4.9**

*Características de las sequías más severas ocurridas en cada región homogénea (periodo 1994-2016).*

SPI-Escala	Duración (meses)	Intensidad	Severidad	Inicio (año mes)	Fin (Año mes)
<b>REGIÓN 1</b>					
SPI-1	10	-1.71	-9.85	01/02/2005	01/12/2005
SPI-3	13	-2.12	-13.86	01/03/2005	01/04/2006
SPI-6	16	-2.16	-15.08	01/04/2005	01/08/2006
SPI-9	18	-2.05	-14.83	01/05/2005	01/11/2006
SPI-12	33	-1.9	-34.13	01/02/2004	01/11/2006
<b>REGIÓN 2</b>					
SPI-1	2	-2.54	-3.76	01/10/2003	01/12/2003
SPI-3	14	-2.2	-11.51	01/04/2008	01/06/2009
SPI-6	21	-2.27	-19.83	01/10/2007	01/07/2009
SPI-9	33	-2.01	-29.67	01/02/2007	01/11/2009
SPI-12	20	-2.02	-22.81	01/03/2008	01/11/2009
<b>REGIÓN 3</b>					
SPI-1	6	-2.58	-7.13	01/10/2015	01/04/2016
SPI-3	8	-1.79	-10.37	01/12/1995	01/08/1996
SPI-6	22	-1.91	-22.62	01/12/1994	01/10/1996
SPI-9	34	-1.89	-36.8	01/01/1995	01/11/1997
SPI-12	32	-1.67	-36.1	01/06/1995	01/02/1998
<b>REGIÓN 4</b>					
SPI-1	5	-1.8	-4.78	01/01/2004	01/06/2004
SPI-3	12	-2.12	-10.67	01/08/2007	01/08/2008
SPI-6	13	-1.73	-16.68	01/08/1996	01/09/1997
SPI-9	13	-1.73	-17.3	01/11/1996	01/12/1997
SPI-12	66	-1.67	-51.94	01/05/2004	01/11/2009
<b>REGIÓN 5</b>					

SPI-1	5	-1.77	-5.09	01/01/2004	01/06/2004
SPI-3	12	-2.13	-12.78	01/04/2008	01/04/2009
SPI-6	21	-2.16	-21.08	01/10/2007	01/07/2009
SPI-9	21	-2.03	-21.88	01/12/2007	01/09/2009
SPI-12	67	-1.96	-57.26	04/01/2004	01/11/2009

**Fuente:** Elaboración propia.

En la **Tabla 4.9**, se determinaron las características de las sequías más severas por región homogénea, a escalas de tiempo 1, 3, 6, 9 y 12. Encontrándose a corto plazo, un mayor número de eventos y una mayor frecuencia en las regiones 2 y 5, opuesto al menor número de eventos y menor frecuencia hay en la región 1; respecto a la duración de los eventos, las regiones 2 y 5 son las que presentan mayores duraciones y las de menor duración fue la región 3; respecto a la intensidad, las regiones 1, 2 y 5 presentan mayores intensidades y las regiones 3 y 4 son las que presentaron menores intensidades; asimismo, la severidad fue mayor en las regiones homogéneas 3 y 5, la menor severidad se vio en la región homogénea 4. Las sequías a largo plazo mostraron resultados similares, con ligeras variaciones en algunas de las características. Cuyos resultados muestran que, en términos de cantidad de eventos, la región 2 presenta el mayor número de eventos secos de la cuenca del río Ichu, mientras que las regiones 1 y 4 son las que menos eventos secos presentan durante el periodo de análisis. En relación a la duración de las sequías, las regiones que presentaron mayor duración fueron las regiones homogéneas 2, 3 y 5, respectivamente; mientras que las menores duraciones se evidenciaron en las regiones 1 y 5, asimismo, la severidad fue mayor en las regiones homogéneas 3, 4 y 5, las menores severidades presentaron las regiones homogéneas 1 y 2. Finalmente, las mayores intensidades de sequías se han presentado en las regiones 2 y 5.

#### 4.5.1.2. ANÁLISIS DE SPEI PARA LAS REGIONES HOMOGÉNEAS 1 Y 2.

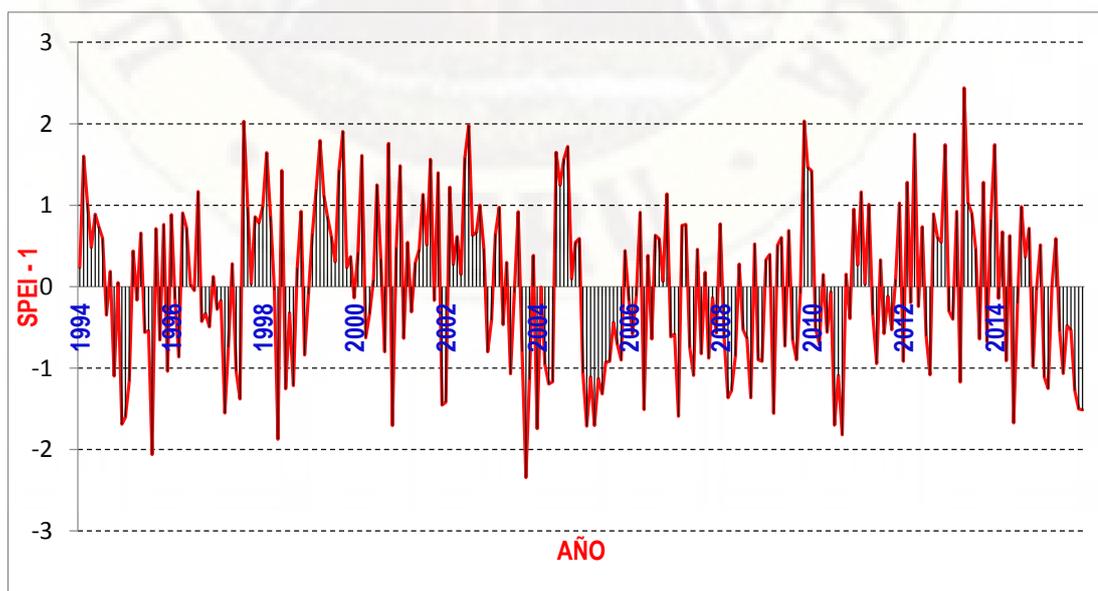
Otro de los índices más importantes es el SPEI, es nada más la metodología del SPI que en su análisis incluye la temperatura y la evapotranspiración potencial, los resultados se muestran en las siguientes gráficas, donde se aprecia los eventos y características de las sequías para diferentes escalas de tiempo 1, 3, 6, 9, 12 (ver Figura 4.16), tomando como ejemplo las regiones homogéneas 1 y 2, seguidamente se muestra una tabla de resumen con los resultados de las sequias más severas ocurridos dentro del periodo de 1994-2015, donde se observa también el número de eventos; la duración máxima en meses; las intensidades máximas y las severidades máximas, y los años de ocurrencia. Ver **Tabla 4.10**.

##### a. Análisis de SPEI a escalas de tiempo 1, 3, 6, 9 y 12 en la región homogénea 1.

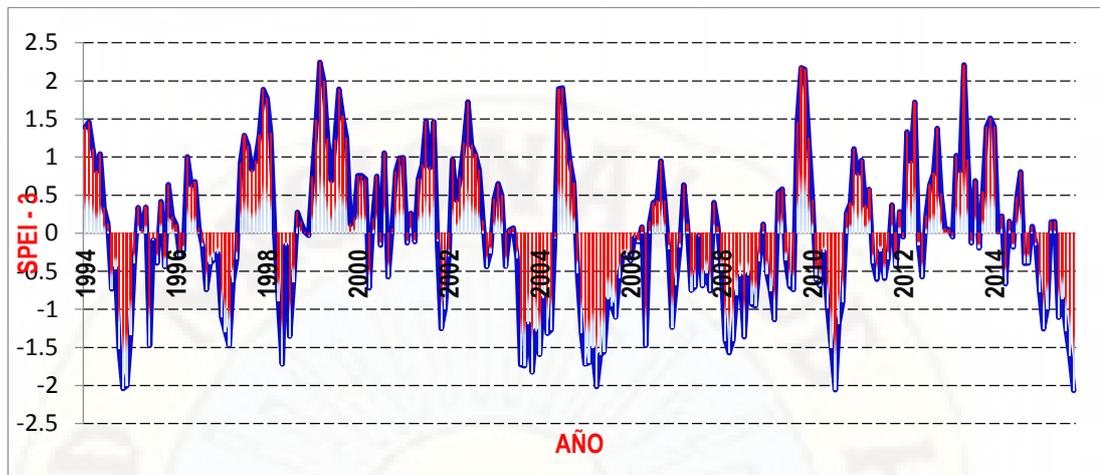
**Figura 4.16**

*Estimación del SPEI para la región homogénea 1 a escalas de tiempo a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 9 meses y e) 12 meses.*

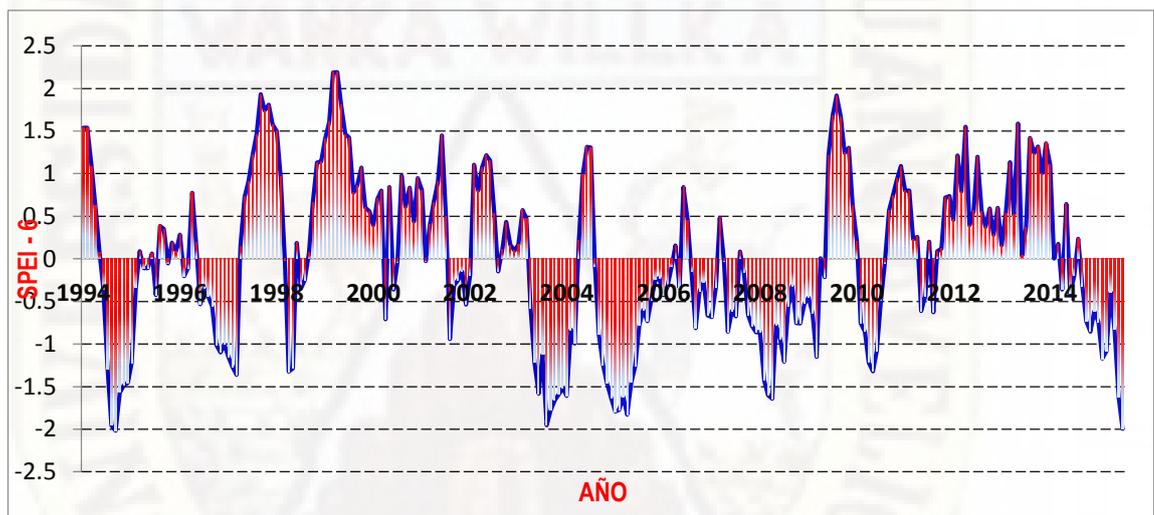
##### a) 1 mes



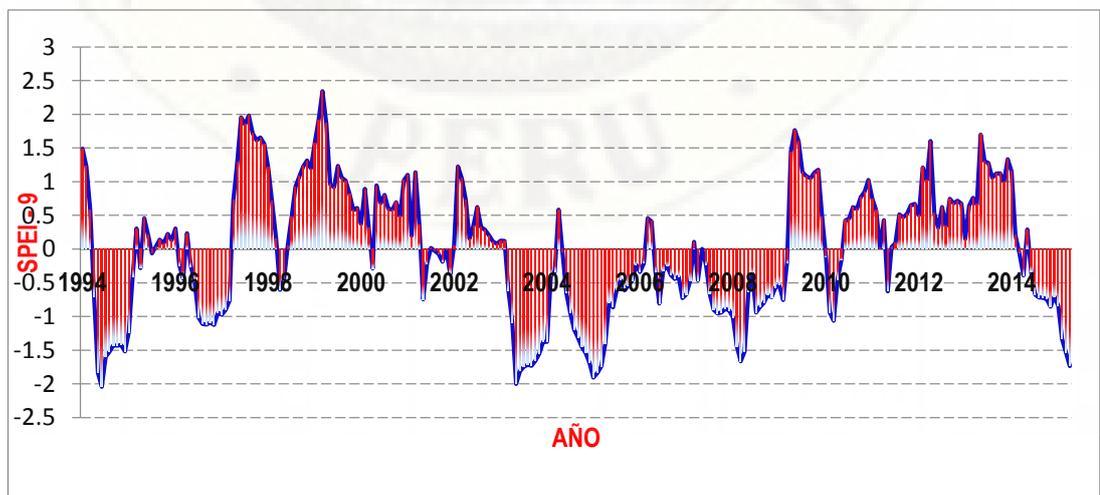
**b) 3 meses**



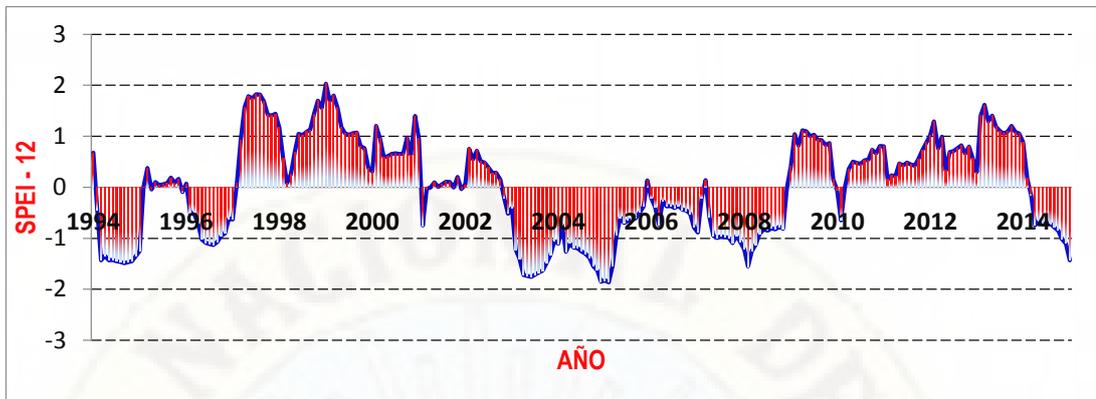
**c) 6 meses**



**d) 9 meses**



**e) 12 meses**



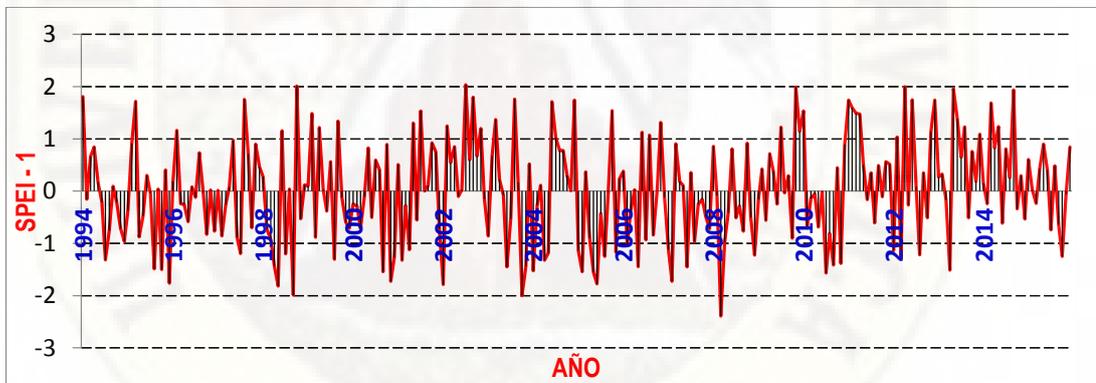
Fuente: Elaboración propia.

**b. Análisis de SPEI a escalas de tiempo 1, 3, 6, 9 y 12 en la región homogénea 2.**

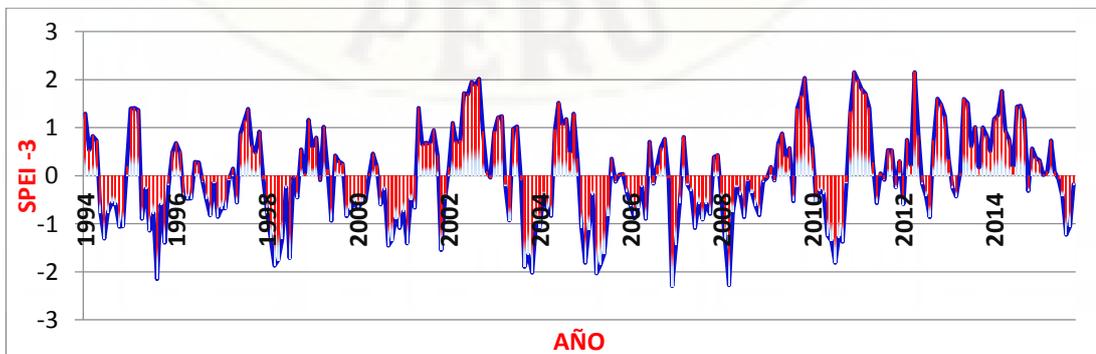
**Figura 4.17**

*Estimación del SPEI para la región homogénea 2 a escalas de tiempo a) 1 mes, b) 3 meses, c) 6 meses, d) 9 meses y e) 12 meses.*

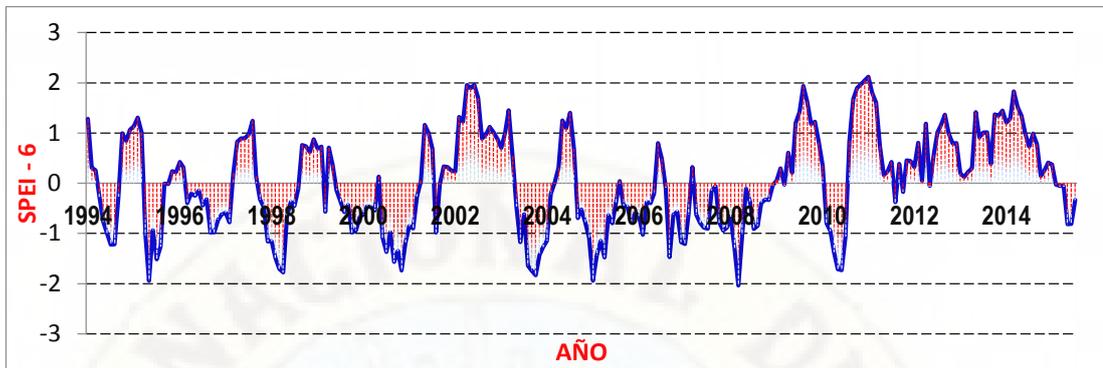
**a) 1 mes**



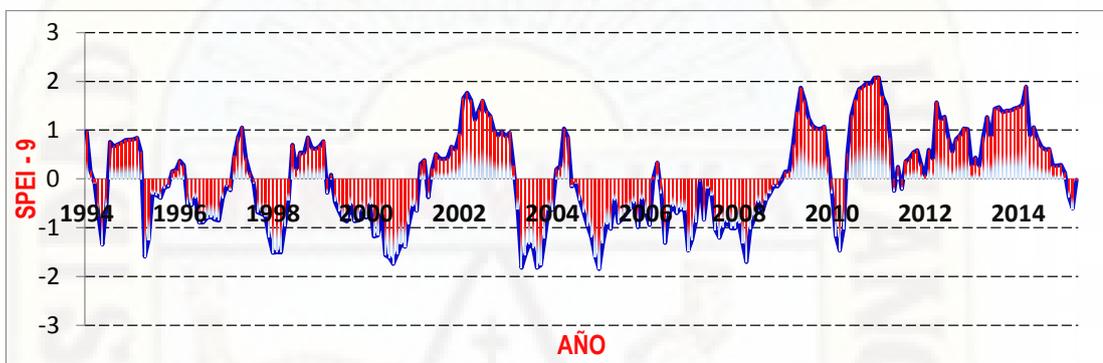
**b) 3 meses**



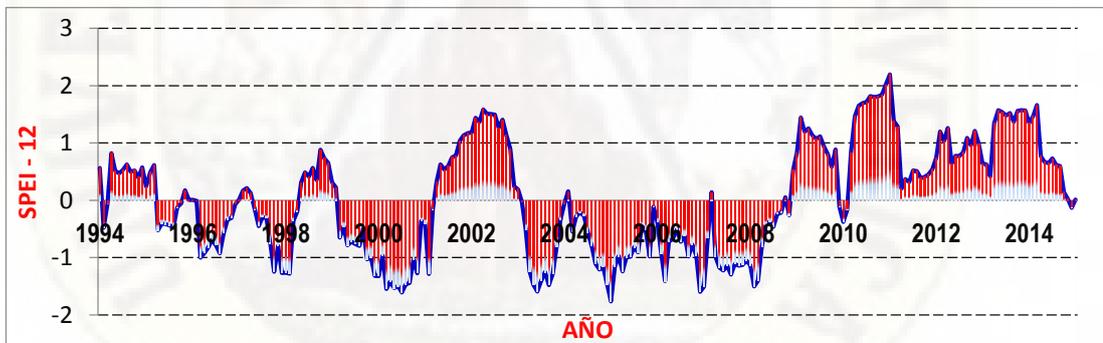
**c) 6 meses**



d) 9 meses



e) 12 meses



**Fuente:** Elaboración propia.

El índice SPEI también se analizará para las escalas de tiempo 1, 3, 6, 9 y 12 meses, con el fin de mostrar su variabilidad de eventos de sequía en el periodo de tiempo 1994 - 2015 ver Figura 4.17, este análisis a modo de ejemplo será para las Regiones 1 y 2 como se hizo en el anterior análisis del SPI. En los resultados preliminares se puede observar que las características de la sequías varían a los resultados que presento el índice SPI, esas variaciones son la duración y severidad de la sequía, con el análisis del índice SPEI en las diferentes escalas de tiempo podemos

apreciar que hay un ligero aumento en la duración y la severidad de la sequías respecto a los resultados presentados por el índice SPI.

Asimismo podemos interpretar el análisis del SPEI a una escala de tiempo largo tenemos el SPEI-12, de este análisis para la Región 1, podemos decir que en el periodo 1994-2015 se identificaron 5 episodios de sequías severas para dicha región, en términos de déficit de precipitación y se presentaron en los años 1994, 2003, 2003, 2008 y 2016, seguidamente se puede observar en el análisis SPEI-12 para la Región 2, donde también en el periodo de 1994-2015 se identificó sequías importantes en los años 1994, 1998, 2002, 2010 y 2016, donde también se observa que en la Región 2 hay más eventos secos que en la Región 1.

Considerando las características de las sequías (ver Figura 4.17), se ha construido una tabla de resumen con las principales características de sequía, en el cual se aprecia los resultados para las 5 regiones homogéneas, en el periodo de tiempo exacto en los cuales se presentaron las sequías más extremas se han calendarizado los eventos más fuertes basados en las propiedades de las sequías, en la Tabla 4.3 se muestra los eventos de sequías más fuertes en cada uno de las 5 regiones homogéneas con sus respectivas características donde se observa el número de eventos; Inicio, fin de la sequía; duración máxima en meses; las intensidades máximas y las severidades máximas. Tabla 4.10.

**Tabla 4.10**

*Características de las sequías más severas ocurridas en cada región homogénea (periodo 1970-2010).*

SPEI-Escala	Duración (meses)	Intensidad	Severidad	Inicio (año mes )	Fin (Año mes)
<b>REGIÓN 1</b>					
SPEI-1	11	-1.71314881	-11.927503	01/01/2005	01/11/2005
SPEI-3	17	-2.01592836	-16.5173553	01/01/2005	01/05/2006
SPEI-6	20	-1.83017995	-18.9381046	01/01/2005	01/08/2006
SPEI-9	22	-1.90397039	-20.8069914	01/01/2005	01/10/2006
SPEI-12	37	-1.86242744	-43.6439502	01/10/2003	01/06/2006
<b>REGIÓN 2</b>					

SPEI-1	6	-1.77352091	-5.93345753	01/04/2005	01/09/2005
SPEI-3	8	-2.03227789	-10.7516121	01/02/2005	01/09/2005
SPEI-6	21	-2.03646047	-14.3717169	01/09/2007	01/05/2009
SPEI-9	23	-1.70005798	-23.9646889	01/01/2007	01/08/2009
SPEI-12	49	-1.7639133	-42.2846446	01/01/2004	01/01/2008
<b>REGIÓN 3</b>					
SPEI-1	10	-1.99820249	-7.09879794	01/02/2010	01/11/2010
SPEI-3	15	-1.88327528	-12.3857755	01/08/1994	01/10/1995
SPEI-6	24	-2.15590397	-25.5761061	01/10/1994	01/09/1996
SPEI-9	35	-1.98356051	-41.0505538	01/12/1994	01/10/1997
SPEI-12	37	-1.84802522	-44.2250071	01/01/1995	01/01/1998
<b>REGIÓN 4</b>					
SPEI-1	10	-1.77588663	-6.32125128	01/02/2010	01/11/2010
SPEI-3	16	-1.64355067	-13.9960027	01/02/2005	01/05/2006
SPEI-6	18	-2.08472077	-19.0523483	01/03/1996	01/08/1997
SPEI-9	21	-1.99379026	-22.376801	01/03/1996	01/11/1997
SPEI-12	69	-1.83623544	-64.3161483	01/02/2004	01/10/2009
<b>REGIÓN 5</b>					
SPEI-1	5	-1.68993056	-5.36390662	01/01/2004	01/05/2004
SPEI-3	13	-1.88182833	-13.9186925	01/03/2008	01/03/2009
SPEI-6	21	-2.03327172	-21.653428	01/09/2007	01/05/2009
SPEI-9	21	-1.97041568	-22.3846728	01/12/2007	01/08/2009
SPEI-12	48	-1.69350491	-43.4146868	01/02/2004	01/01/2008

**Fuente:** Elaboración propia.

Considerando las metodologías del índice SPI y SPEI para las regiones 1 y 2, podemos hacer una comparación de los resultados que estas nos muestran, para la Región 1 se observa que ambos índices SPI y SPEI apuntan al mismo año 2005 -2006 donde se identifican las sequias más severas, en cambio para la Región 2 considerada como la región homogénea más árida de la cuenca del río Ichu, donde el análisis del índice SPI apunta al año 2007,2008 y 2009 en su mayoría donde se observa las sequias más severas, en análisis del SPEI apunta al año 2004, 2007,2008 y 2009 donde se observa las sequias más severas, con esta observación podemos afirmar que la Región 2 presenta más eventos secos en el periodo de análisis de 1994-2015 que a la Región 1.

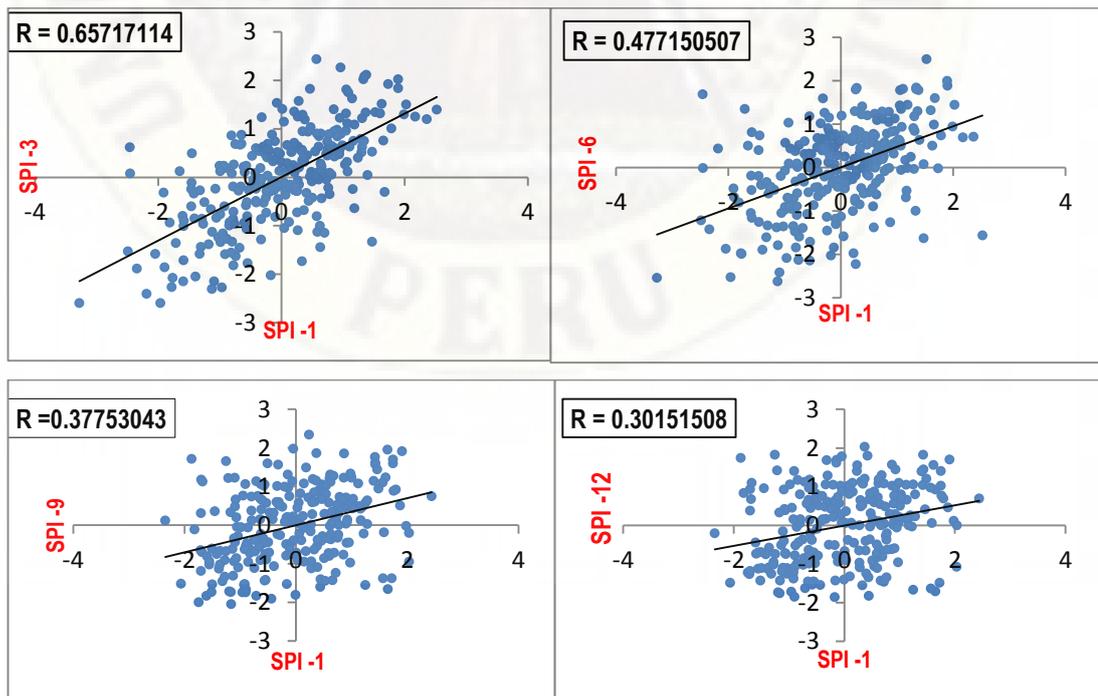
#### 4.5.2. CORRELACIÓN Y ESTIMACIÓN DEL MEJOR ÍNDICE DE SEQUÍA CON SU RESPECTIVA ESCALA DE TIEMPO

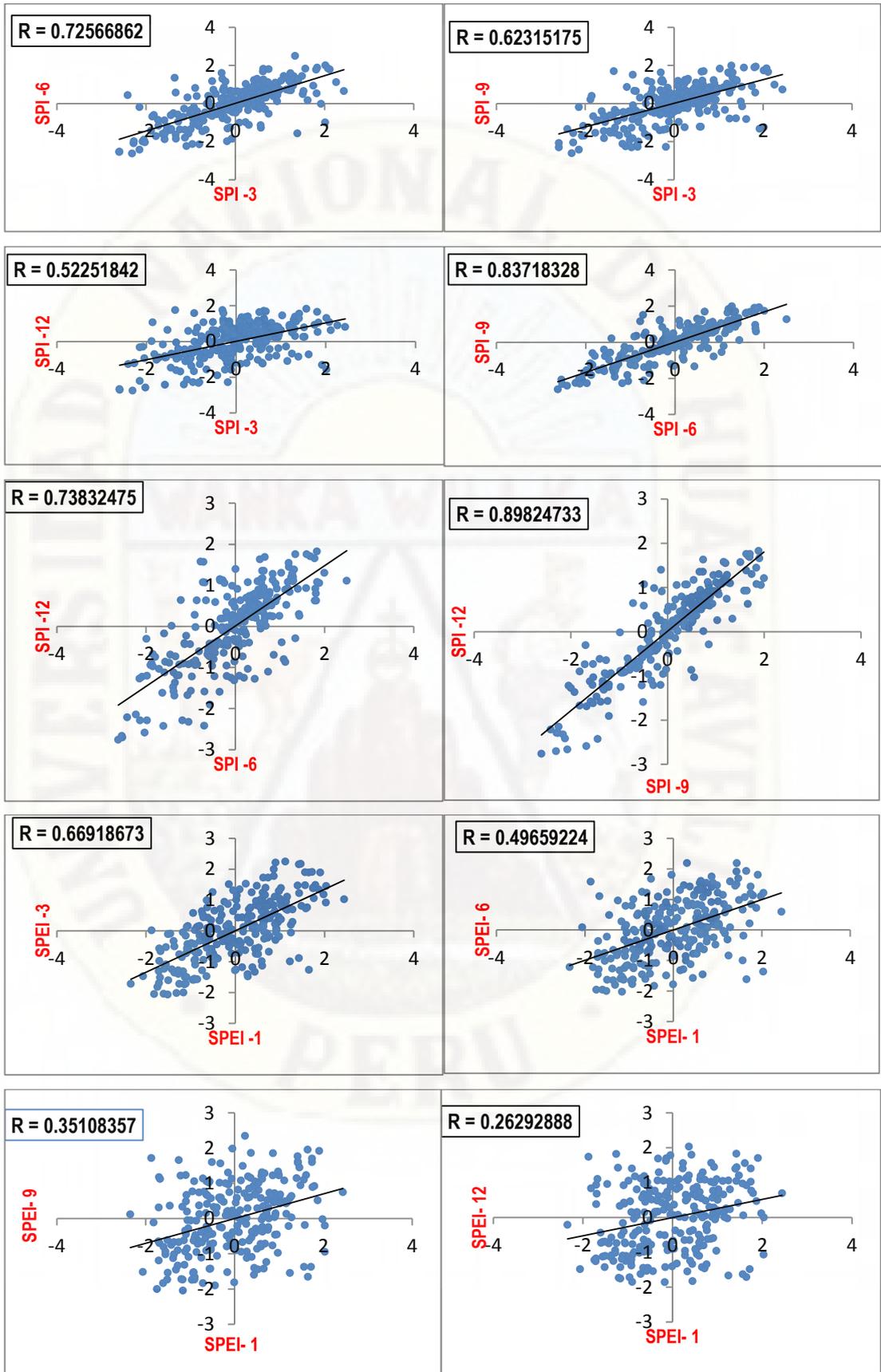
Para el validez de los índices de sequía se realiza un análisis estadístico de correlación de Pearson, para las metodologías del SPI y SPEI descritas anteriormente, se podrá establecer la información de la variabilidad de los índices contenida en sus distintas ventanas, primeramente se calculara los coeficientes de correlación del SPI y SPEI entre sus distintas ventanas respectivamente, seguidamente se correlacionaran entre los índices SPI y SPEI con sus respectivas escalas de tiempo de 1, 3, 6, 9 y 12, haciendo un total de 10 índices, las cuales se mostraran en la **Tabla 4.11**.

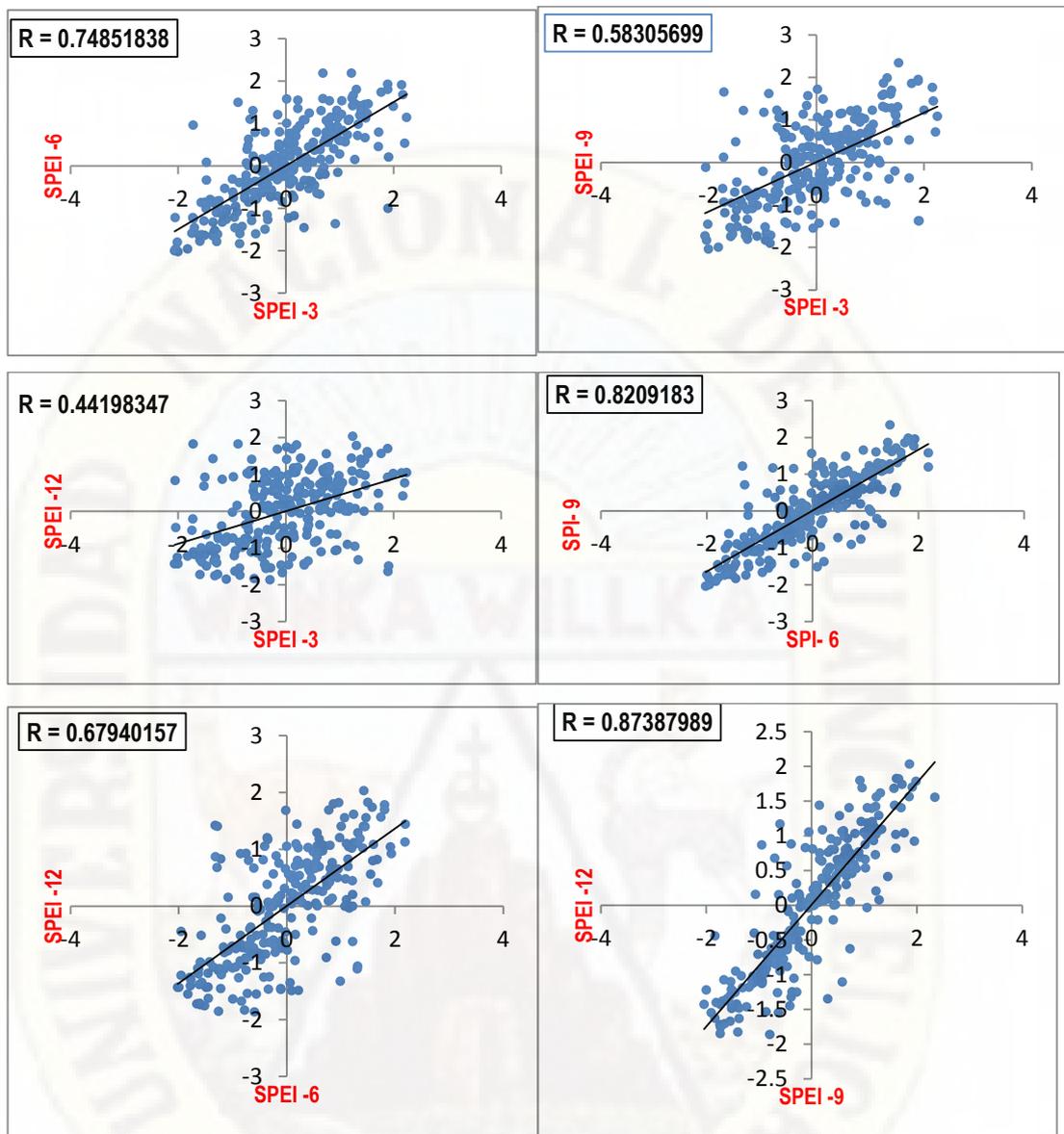
Para el análisis de correlación de Pearson, se consideraron como ejemplo las series de tiempo de la Región 1 que agrupa los puntos de registro Choclococha, Ccarhuarazo y Yauli, aunque los valores de correlación son similares en las 5 regiones homogéneas que conforma la cuenca del río Ichu.

**Figura 4.18**

*Coeficiente de correlación del SPI y SPEI entre sus respectivas escalas de tiempo.*







Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.11**

*Resumen de la Correlación cruzada entre el SPI en las 5 escalas temporales para la Región 1. Periodo 1994 - 2016.*

Coef. Correl.	SPI - 1	SPI - 3	SPI - 6	SPI - 9	SPI - 12
SPI-1	1	0.65717114	0.47715051	0.37753043	0.30151508
SPI-3		1	0.72566862	0.62315175	0.52251842
SPI-6			1	0.83718328	0.73832475
SPI-9				1	0.89824733
SPI-12					1

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.12**

*Resumen de la correlación cruzada entre el SPEI en las 5 escalas temporales para la Región 1. Periodo 1994 – 2015.*

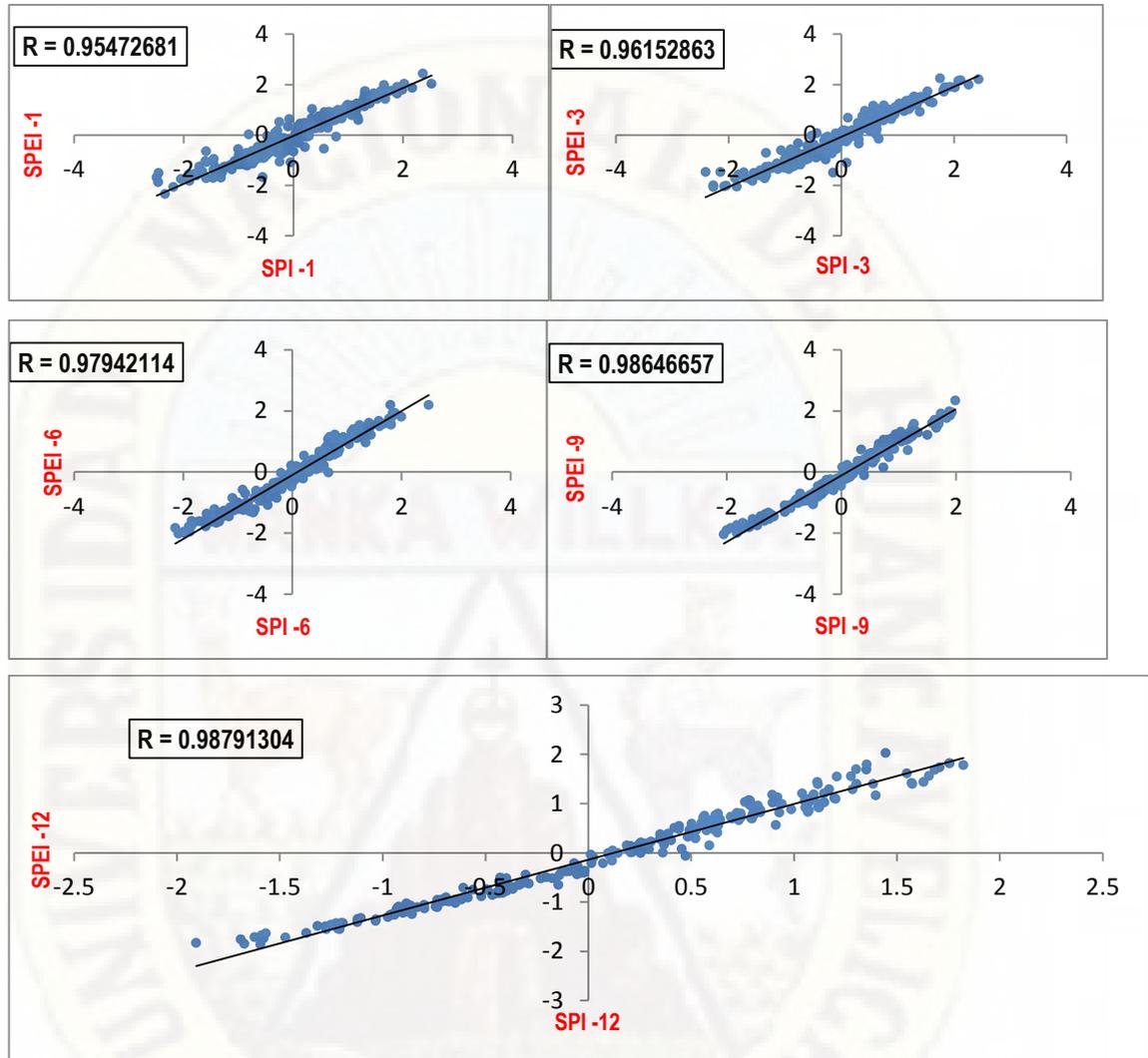
Coef. Correl.	SPEI - 1	SPEI - 3	SPEI - 6	SPEI - 9	SPEI - 12
SPEI-1	1	0.66918673	0.49659224	0.35108357	0.26292888
SPEI-3		1	0.74851838	0.58305699	0.44198347
SPEI-6			1	0.8209183	0.67940157
SPEI-9				1	0.87387989
SPEI-12					1

**Fuente:** Elaboración propia.

A partir de las correlaciones, se observa un alto grado de asociación entre las distintas ventanas temporales, el cual se incrementa cuando se consideran las mayores escalas, de la tabla 4.11 podemos decir que SPI-1 explica casi el 65% de la variabilidad del SPI-3, el SPI-3 explica el 72% de la varianza del SPI-6, el SPI-6 explica el 83% de la variabilidad del SPI-9, y el SPI-9 explica más del 85% del SPI-12, seguidamente se puede observar en la Tabla 4.12 las correlaciones del SPEI entre sus distintas ventanas temporales, donde el SPEI-1 explica el 66% de la variabilidad del SPEI-3, el SPEI-3 explica el 74% de la varianza del SPEI-6, el SPEI-6 explica el 82% de la variabilidad del SPEI-9, y el SPEI-9 explica más del 85% del SPI-12. Las relaciones entre las distintas ventanas de tiempo son evidentes en la Figura 4.18. Se puede considerar, en función a nuestro propósito, la información que cada serie de tiempo respecto a cada escala temporal. Por ejemplo, si se tiene en cuenta la estrecha relación entre las variabilidades de las series de SPI-9 y SPI-12, se podría descartar alguna de estas escalas a fin de disminuir la cantidad de información a analizar, lo cual puede ser una ventaja al momento de la toma de decisiones, con el análisis de correlación que se muestra en la Tabla 4.11 y 4.12, podemos hacer un descarte de estos dos índices a escalas 9 y 12, donde tendremos el SPI-6 e SPEI-6 como las escalas más sobresaliente respectivamente donde correlaciona mejor a las escalas descartados con 0.83 e 0.67 para el SPI y 0.82 e 0.67 para el SPEI.

**Figura 4.19**

*Correlación entre los índices de sequía SPI y SPEI para diferentes escalas.*



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 4.13**

Resumen de la correlación entre los índices de sequía SPI y SPEI para sus diferentes escalas de tiempo.

Coef. Correl.	SPI-1	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12
SPEI-1	0.95472681	0.6253849	0.4570522	0.33838945	0.2442271
SPEI-3		0.96152863	0.70260771	0.58123204	0.44777718
SPEI-6			0.97942114	0.81282718	0.68530545
SPEI-9				0.98646657	0.86569181
SPEI-12					0.98791304

**Fuente:** Elaboración propia.

La relación entre el SPI y el SPEI en sus escalas de 1, 3, 6, 9 y 12 meses, los valores de coeficiente de correlación (R) para la Región 1 superan el valor de 0,95 esto nos indica que ambos índices tienen una buena relación. La discrepancia se observa que los coeficientes de correlación se incrementan al igual que las escalas de tiempo aumentan, llegando a un máximo de R igual 0.98. Esta relación es particularmente buena durante los eventos de sequía. El índice SPI generalmente presenta menores valores en la intensidad y duración de los eventos secos que el SPEI, Esta similitud entre el SPI y SPEI se da debido a que, conocer como es el comportamiento de las características de las sequías considerando solo datos de precipitación que utiliza la metodología del SPI y considerando datos de precipitación y temperatura máxima mínima que utiliza la metodología del SPEI, de estos resultados podemos decir que entre ambos índices hay una buena correlación. Y para un estudio de sequías se recomendaría utilizar cualquiera de los índices presentados ya sus resultados tienen una buena correlación.

Al igual que en el anterior análisis se determinará también la escala de tiempo adecuado teniendo en cuenta la correlación que hay entre el SPI y SPEI, así confirmar la escala de 6 meses como escala adecuada como se determinó en el anterior análisis, en tanto es usuario puede considerar, en función de sus propósitos, la información de cada serie de tiempo respecto a cada escala temporal. Por ejemplo, podemos observar en la Tabla 4.13 la estrecha relación entre las variabilidades de las series de SPEI-9 e SPI-9 y SPEI-12 e SPI-12, con una correlación de 0.986 y 0.987 respectivamente, se podría descartar alguna de estas escalas a fin de disminuir la cantidad de información a analizar, lo cual puede ser una ventaja al momento de la toma de decisiones.

Tomando la decisión de descartar las escalas 9 y 12, se obtendrá la escala temporal 6 meses como el adecuado ya que presenta una mayor correlación (0.979).

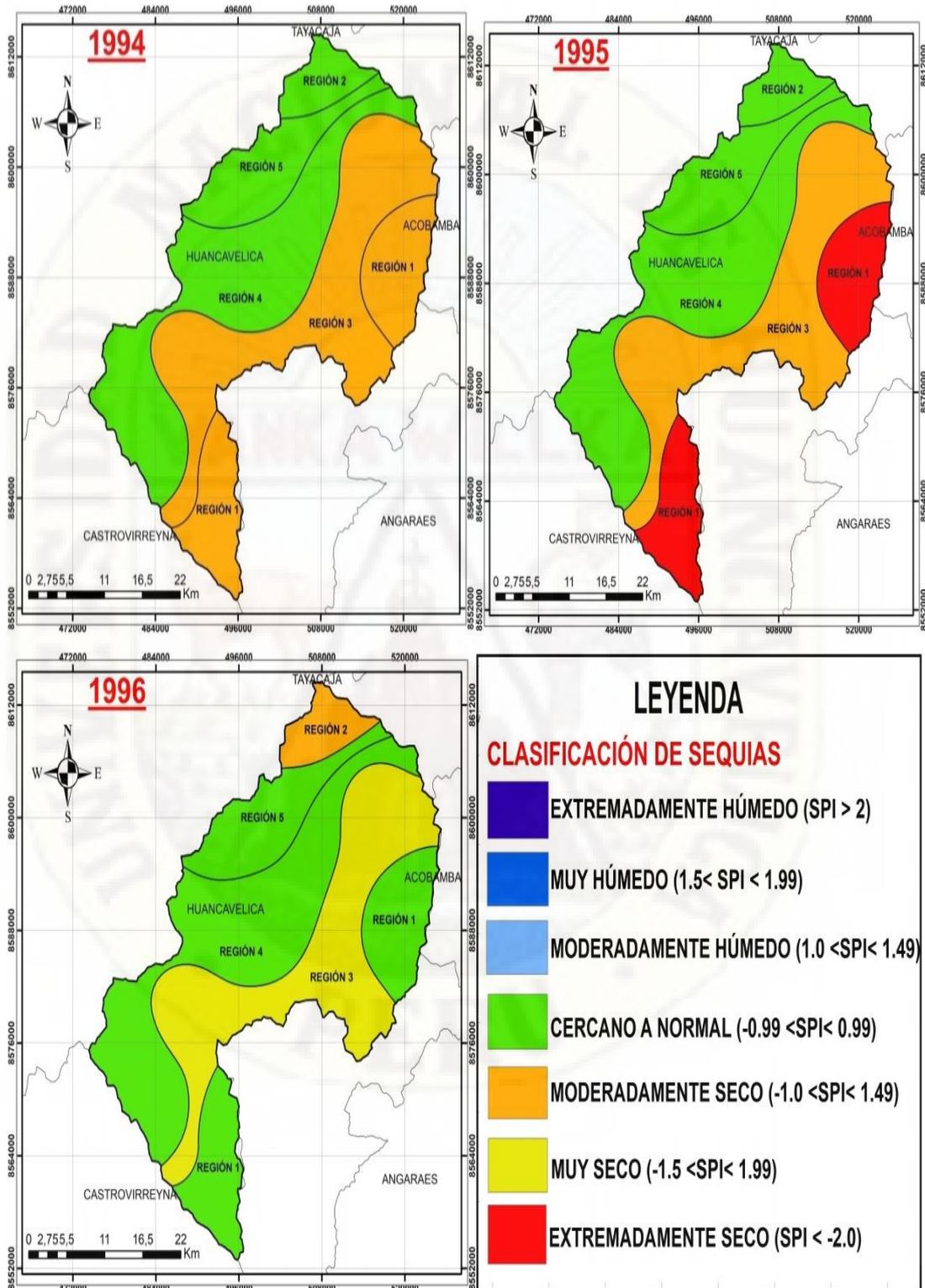
#### **4.5.2.1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y EVOLUCIÓN TEMPORAL DE SEQUIAS CON EL ÍNDICE SPI A ESCALA DE TIEMPO 6 MESES.**

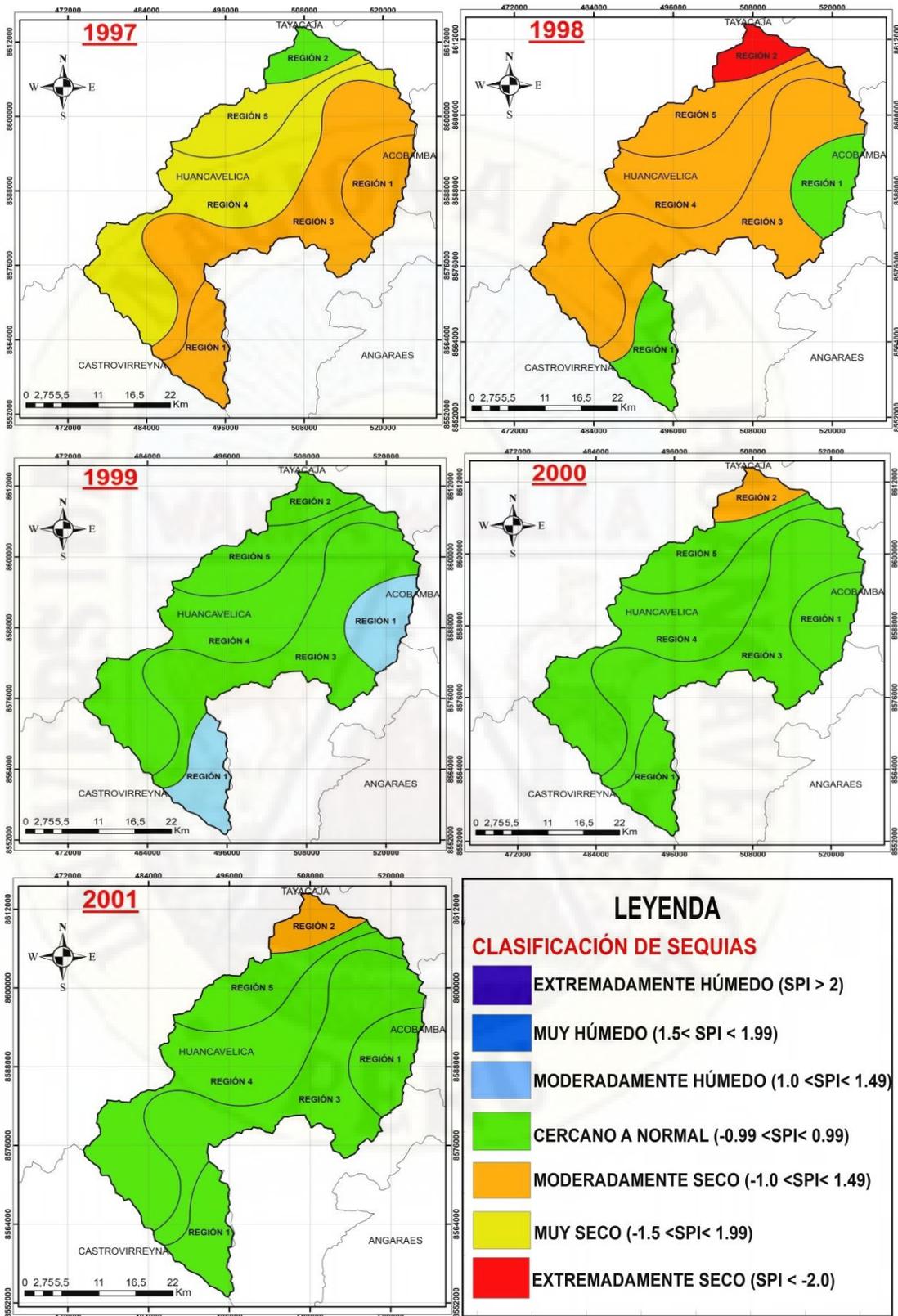
En las imágenes se representan las sequías más severas que existieron durante el periodo 1994 al 2016. En la **figura 4.20**, se muestran los promedios medios anuales de la distribución espacial y evolución temporal del índice SPI, donde se observa el promedio medio anual del SPI de los años 2005, 2008 y 2016 presentan valores de sequías más severas y extremas, mientras el 1997, 1998, 2003 y 2007 tiene valores de sequía moderada y leve, por lo tanto, hay un déficit de precipitación moderado durante esos años. La escala de colores indica los valores de índices van variando los valores de  $< -2$  color rojo, que son valores de extrema sequía, hasta  $> 2$ , color azul intenso, son valores donde no hay sequía.

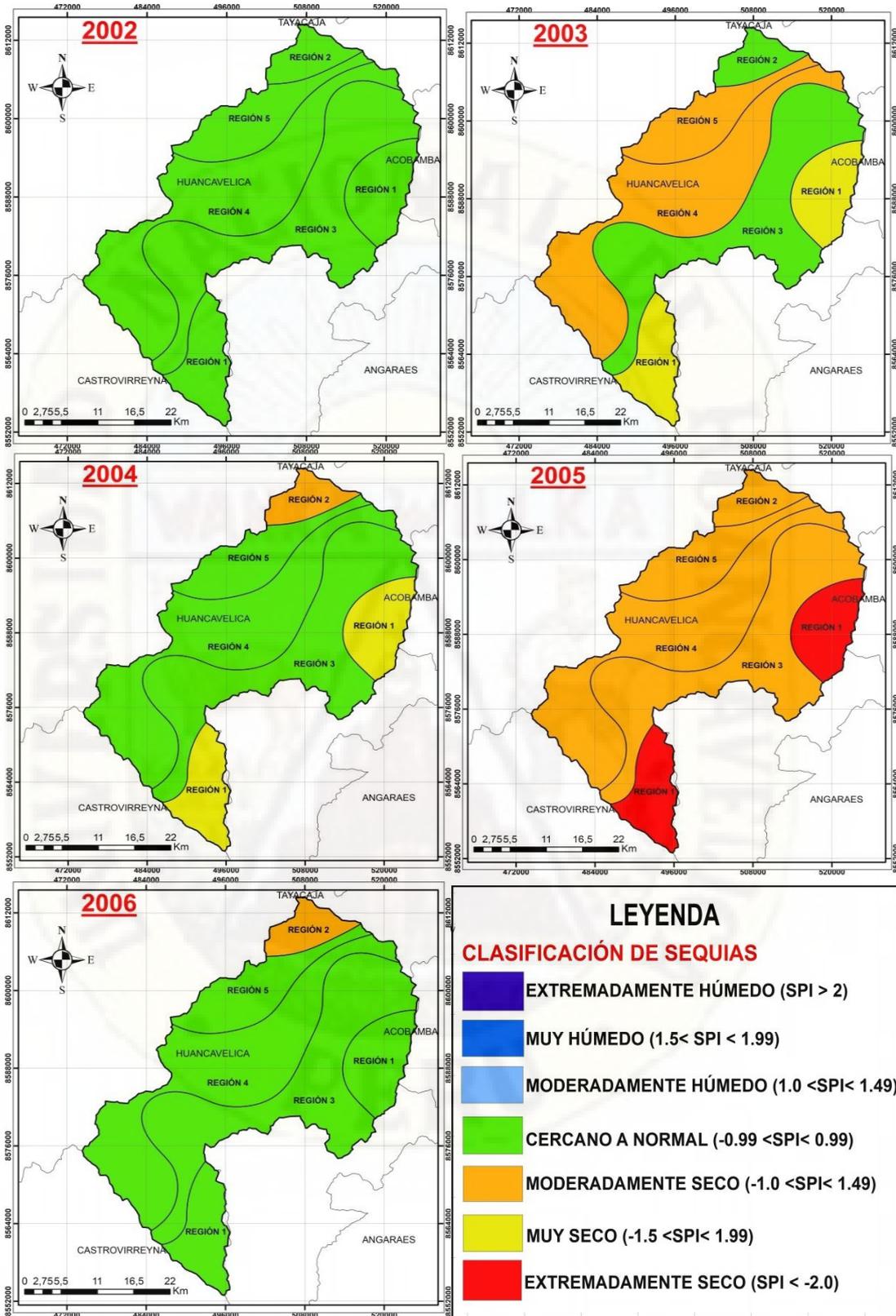
Las sequías extremas de los años 2005, 2008 y 2016 ha afectado a las 5 regiones homogéneas que conforma la cuenca del río Ichu, con las sequías del año 2005, la región 1 fue el más golpeado por estos eventos secos, las sequías de 2008 afectaron fuertemente a la región 2 y 5, finalmente en las sequías de 2016 la región 1 fue otra vez fuertemente afectada. Podemos decir que en estos años secos los más afectados pudieron ser la pérdida en la agricultura y ganadería. Afectando los distritos de Acoria, Yauli, Huancavelica y Mariscal Cáceres (La Mejorada), comunidades de Choclococha, Tinyaccla, Carhuarzu, Cachimayo y tras comunidades que se encuentran dentro de las 5 regiones homogéneas respectivamente, Cachimayo comunidad ganadera podemos decir que hubo pérdida de hatos de ganado debido a la escasez de pastos y propiciando la migración del poblador rural a las ciudades urbano marginales.

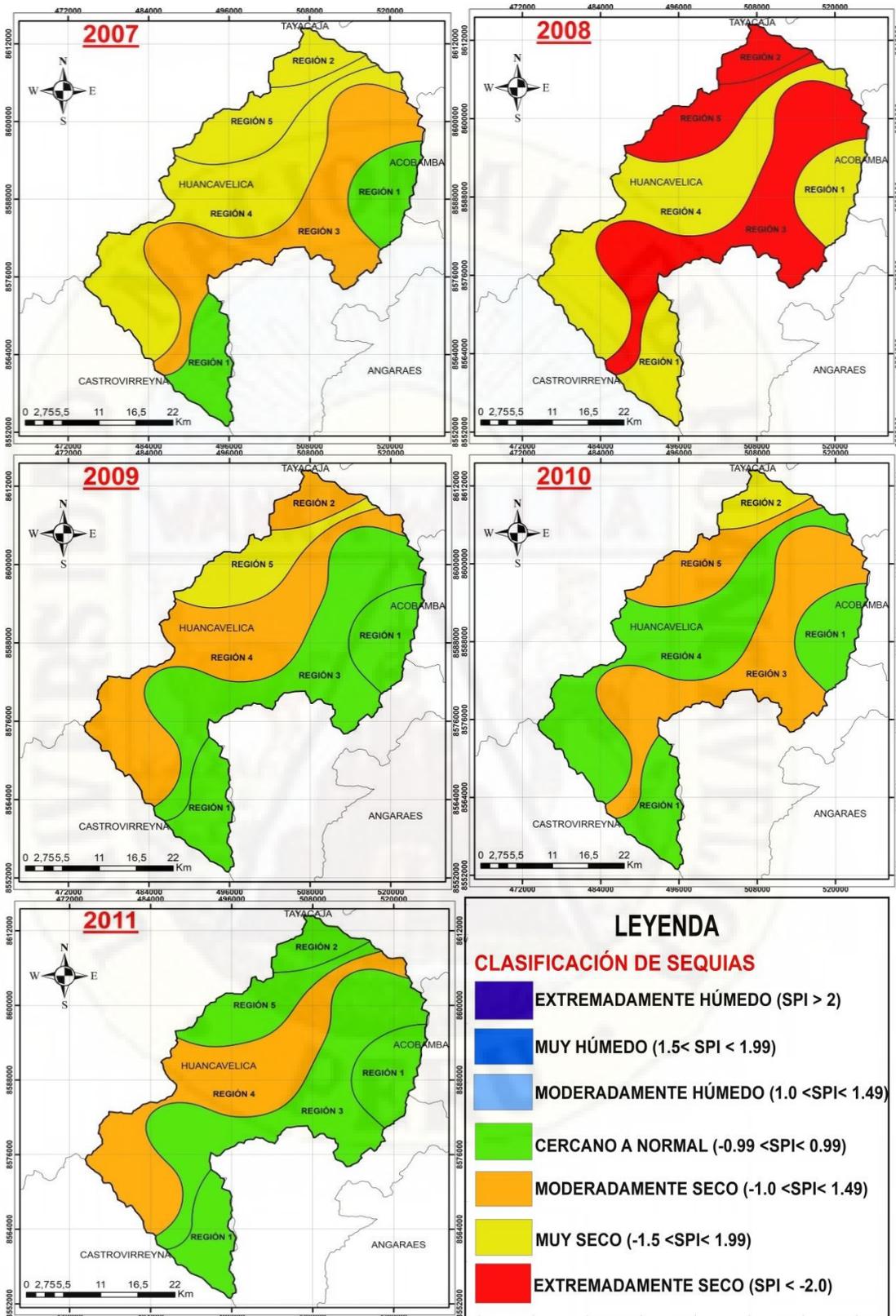
**Figura 4.20**

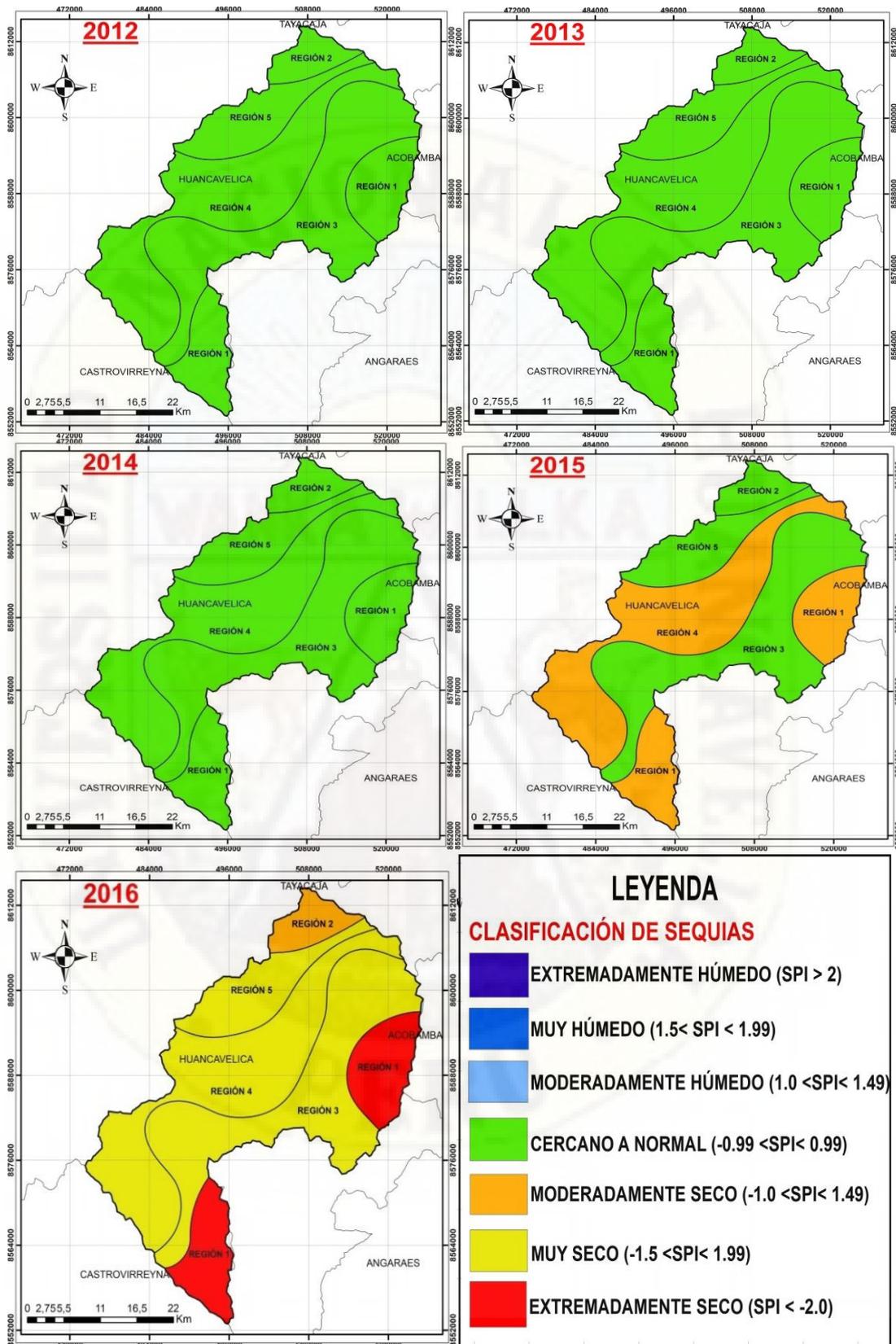
*Características de las sequias a escala de tiempo 6 meses por años.*











Fuente: Elaboración Propia

Para validar los resultados obtenidos para el año 2016 donde la región 1 ubicada en distrito de choclococha de la provincia de castrovirreyna donde se tuvo una sequía con una intensidad considerada como extremadamente seco donde se tiene una información de RRP Noticias donde informa el día 03 de febrero del 2016 **“Huancavelica: 16 mil agricultores de Castrovirreyna afectados por la sequía”**, El alcalde **Edgar Ñahui**, indico que la escasez de lluvias afecta a los cultivos de papa, cebada, habas y la ganadería y también precisó que los 13 distritos de Catrovirreyna son afectados por la sequía. En ese sentido, solicitó al Ejecutivo a declarar en emergencia la región. Agregó que el agua de las 40 lagunas en dicha región descendió su nivel entre 40 y 50 metros. (RRP Noticias, 2016). Fuente: <https://rpp.pe/peru/huancavelica/16-mil-agricultores-de-castrovirreyna-afectados-por-sequia-noticia-931698?ref=rpp>

#### **4.5.2.2. ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS SEQUIAS OBSERVADAS**

##### **a. Tendencias de sequías observadas a escala de 6 meses (SPI- 6)**

Para este análisis de tendencia se utilizará la metodología del SPI con una escala de tiempo de 6 meses, ya que esta escala es la más sobresaliente en el análisis de sequias.

A continuación, se evidencia la tendencia de las series de SPI para una escala de tiempo de 6 meses en las 5 regiones homogéneas que conforman la cuenca del rio Ichu. Las sequías identificadas para las diferentes regiones

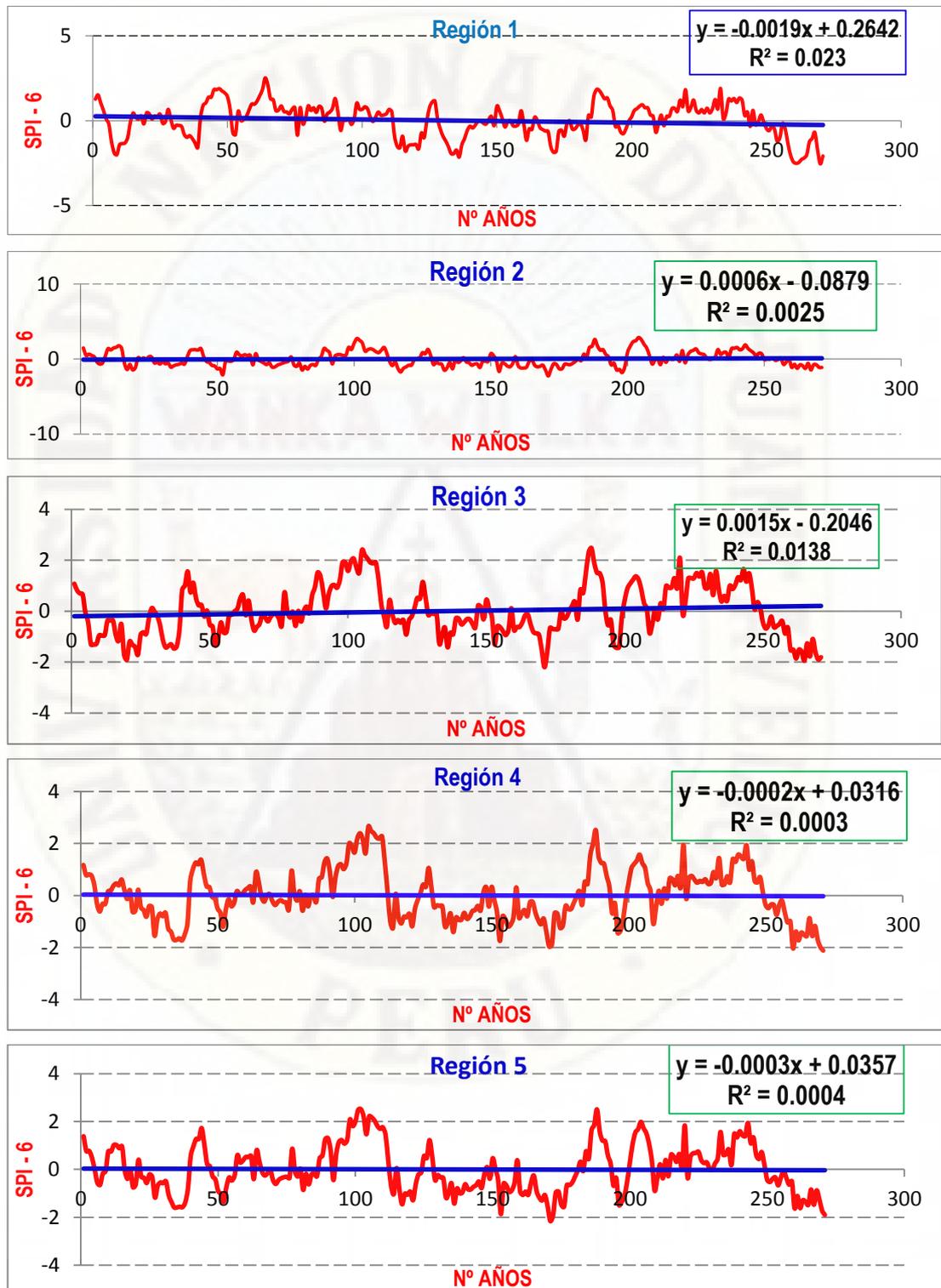
homogéneas variarán en cantidad y duración. En la Figura 4.21 se presentará los resultados para las 5 regiones homogéneas.

Las tendencias en la serie de SPI para las 5 regiones homogéneas consistió en calcular la pendiente de la recta de mejor ajuste a la serie ( $y = mx+b$ ), para observar si las sequías en la cuenca de estudio están incrementándose o disminuyendo, pero con el objetivo de identificar más claro las tendencias de en los valores de 6 meses, estas evaluaciones se realizarán para las 5 regiones homogéneas. Los resultados del análisis de tendencia se muestran en la Figura 4.21. Considerando los valores SPI en conjunto de todos los años 1994-2016.

Se puede apreciar que para la Región 1, Región 4 y Región 5 (Figura 4.21) en su serie de SPI-6 se encontró una pendiente negativa de -0.0019, -0.0002 y -0.0003 respectivamente, de esta manera existe evidencia estadística suficiente para afirmar que estas 3 regiones ha ido aumentando los eventos secos con el paso de tiempo, seguidamente también se puede observar pendientes positivas para las regiones 2 y 3 en su serie de SPI-6 de 0.0006 y 0.0015 respectivamente, de esta manera existe evidencia estadística para afirmar que en estas regiones ha ido aumentando los eventos húmedos con el paso del tiempo.

**Figura 4.21**

*Análisis de tendencia de sequías con SPI – 6 meses en cada región homogénea.*



**Fuente:** Elaboración propia.

- A nivel de las 5 regiones homogéneas, las regiones más susceptibles a incrementar el riesgo de sequías son las regiones 1, 4 y 5 por tener una tendencia de pendiente negativa, en cambio las 2 y 3 empiezan a ganar años húmedos en los últimos años, por eso podemos ver que presentan una tendencia de pendiente positiva, ya que la región 2 en los años anteriores presento mayor frecuencia de eventos secos, con mayores intensidades, pero de corta duración.

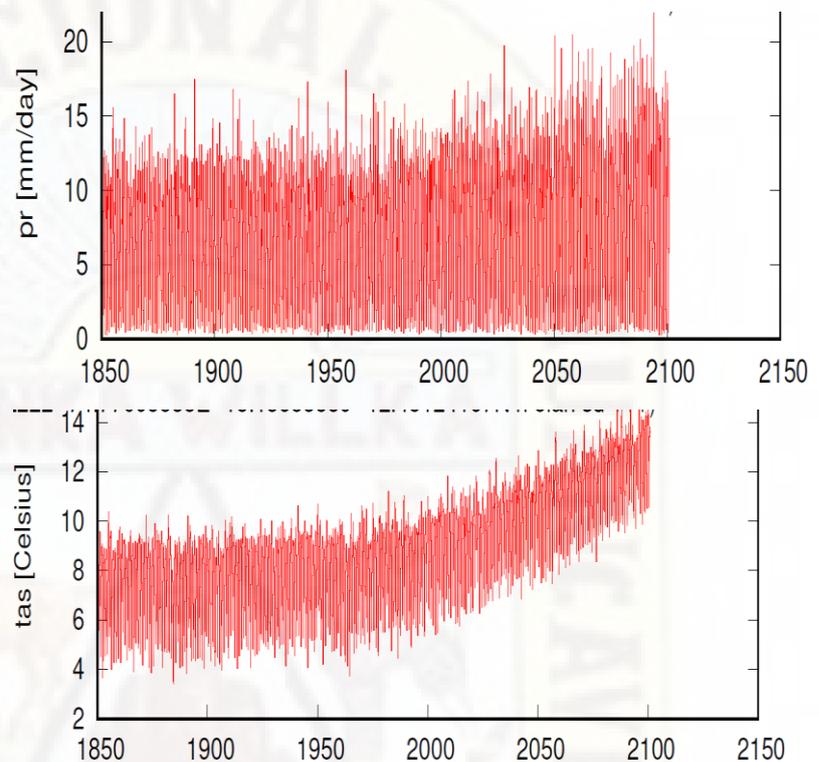
### **4.5.3. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LA PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA SIMULADAS POR MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES (GCM)**

#### **4.5.3.1. SIMULACIÓN CLIMA FUTURO**

El análisis del impacto del cambio climático en las características principales de los eventos de sequía en la región Huancavelica es importante, ya que con este análisis, se pueda prevenir o mitigar las sequias en un futuro cercano, se utilizara Modelos Climáticos Globales (GCM) que será evaluado a través de las salidas de precipitación provenientes de un ensamble multi-modelo de 15 miembros del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), con Variables de Superficie modelo CESM1-BGC con escenario RCP85. Para Stocker et al. (2013), el escenario RCP85 es el más desfavorable y considera que no habrá un cambio y que se seguirán emitiendo gases de efecto invernadero causando una elevación en la temperatura del planeta. Por lo tanto, los datos que se obtendrá son de precipitación, temperatura máxima mínima con periodo de registro (1994-2100) para el área de estudio. Los datos preliminares sin corrección se muestran en la Figura 4.22.

**Figura 4.22**

*Datos simulados para la precipitación con GCM (Esquema superior). Datos simulados para la temperatura media con GCM (Esquema inferior) para la cuenca del río Ichu.*



**Fuente:** GCM\_CMIP5\_modelo\_ CESM1-BGC\_escenario\_ RCP8.5.

En las siguientes líneas se evaluará si los resultados de los modelos sobreestiman o subestiman la precipitación registrada.

#### **4.5.3.2. REDUCCIÓN DE ESCALA DE LA PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA ESTIMADA DEL MODELO CESM1-BGC CON ESCENARIO RCP8.5.**

Para los datos simulados por modelos GCM, se realiza un análisis estadístico de dichos datos que se representan en una serie de tiempo (1994-2100), ya que estos no están calibrados o corregidos correctamente respecto a los datos

observados dentro de la cuenca de estudio. A partir de los resultados de los modelos CESM1-BGC, se realiza la reducción de escala paramétrica. Es decir, se utiliza el método estadístico de reducción de escala conocido como corrección de sesgo de exploración lineal.

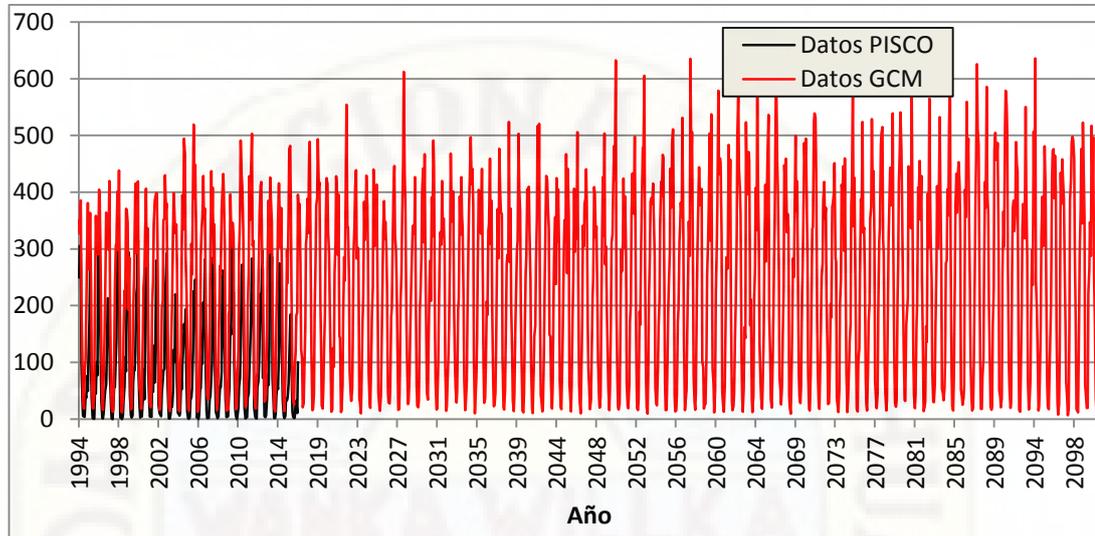
La reducción de escala se basa en la diferencia promedio entre las series de tiempo observadas mensualmente y las series de tiempo de ejecución histórica de GCM / RCM durante el mismo periodo de la serie observada. Estas diferencias se aplican luego a los datos climáticos simulados para obtener variables climáticas con corrección de sesgo. La corrección aditiva es preferible para la temperatura, mientras que la corrección multiplicativa es preferible a variables como la precipitación, la presión de vapor, la radiación solar, etc. La serie temporal futura o el clima previsto se reducen utilizando el mismo factor de corrección. (Shrestha M. (2015). El análisis de datos de baso en el archivo Microsoft Excel de corrección de sesgo escala lineal (V.1.0).

Como ejemplo se tomará los datos de precipitación, temperatura máxima, mínima del Punto de Registro Choclococha. Donde en la figura 4.13 se muestran las series de tiempo de datos de precipitación observados (1994-2016) y simulados (1994-2100). Donde se aprecia que los datos simulados sin corregir son más elevados en la magnitud de la precipitación de los datos observados.

Por otro lado, en la Figura 4.23 se muestran las series de tiempo de la temperatura máxima observado con un periodo de tiempo (1994-2015) y simulado (1994-2100). Donde se observa que los datos de temperatura son un poco elevados a los datos observados dentro de la cuenca de estudio.

**Figura 4.23**

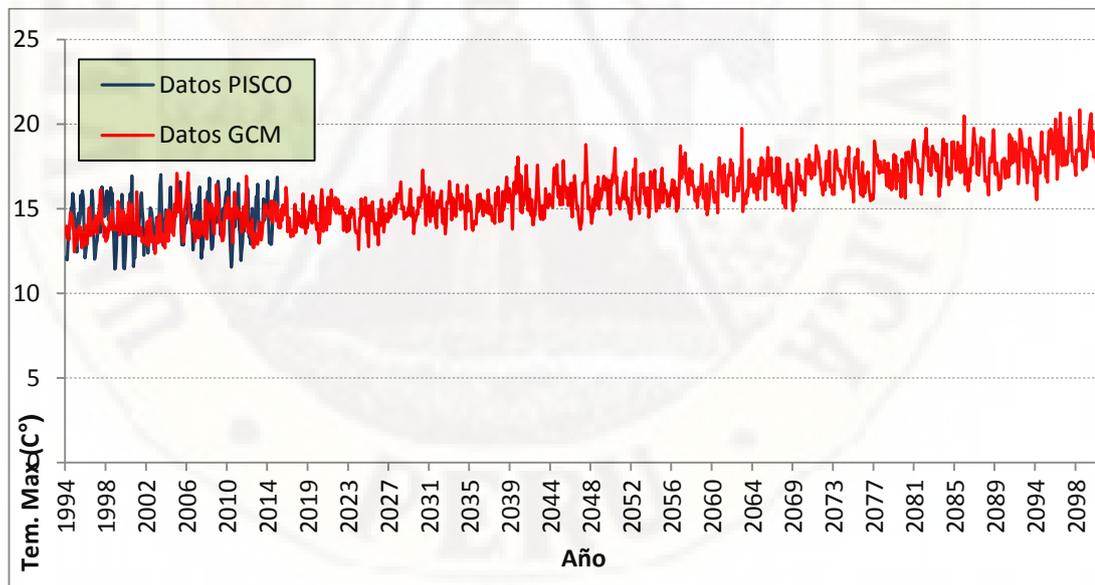
*Series de tiempo de la precipitación observada y simulados por GCM sin corregir.*



**Fuente:** Elaboración Propia.

**Figura 4.24**

*Series de tiempo de la Temperatura observada y simulados por GCM sin corregir.*



**Fuente:** Elaboración Propia.

Para la corrección de datos simulados por GCM se aplicará el método de corrección de sesgo de escala lineal paramétrica (Bias correction). En la serie de tiempo de datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas respectivamente Figuras 4.23 y 4.24.

#### 4.5.3.3. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA PRELIMINAR DE DATOS SIMULADOS POR GCM CORREGIDOS

Para corregir los datos GCM se utiliza la metodología de (Linear Scaling bias correction V.1.0. Microsoft Excel file) elaborado por Shrestha M. (2015). Se aplicará el método de corrección de escala lineal paramétrica (Bias correction).

Seguidamente se realiza un análisis preliminar de consistencia con los datos GCM corregidos con la metodología **Bias Correction**, este análisis se realiza con el propósito de que, si los datos GCM corregidos son consistentes con los datos estimados por PISCO, para así continuar con las siguientes análisis de nuestra investigación, la estadística utilizada será de comparación por pares de distribución Sesgo Porcentual.

$$BIAS(\%) = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

$$\sum_{i=1}^n (S_i - O_i) = -453.43$$

$$\sum_{i=1}^n (O_i) = 25551.47$$

$$BIAS(\%) = -1.77$$

Con este valor de  $BIAS(\%) = -1.77$ , podemos decir según la Tabla 3.3 propuesta por la metodología del Sesgo Porcentual (PBIAS), donde considera que valores menores  $PBIAS < \pm 10$  se tiene la interpretación de muy Bueno.

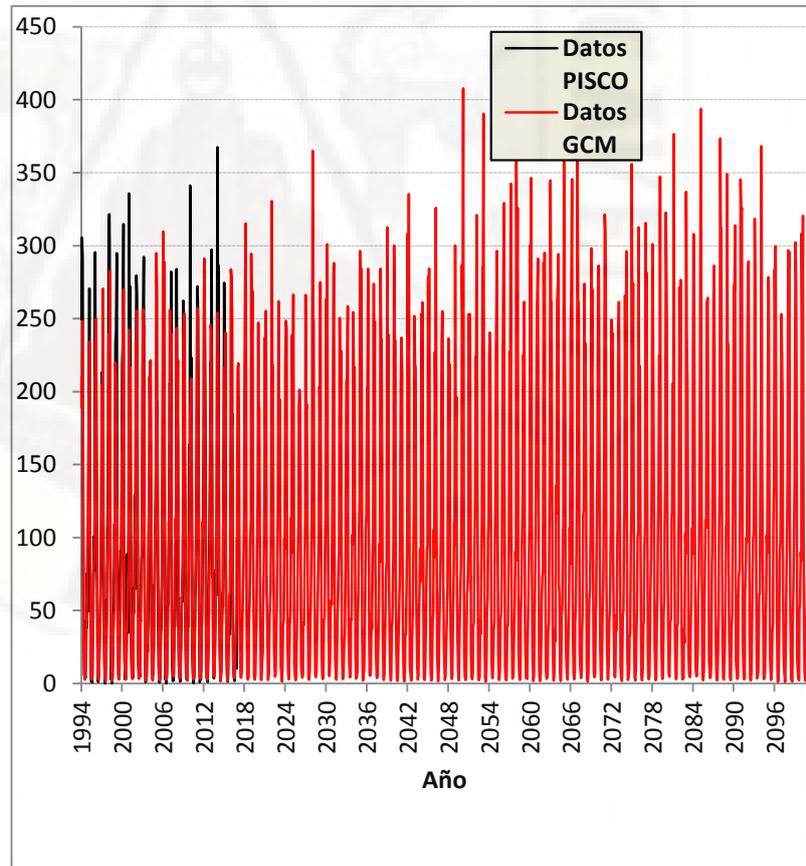
Las líneas de color negro representan los datos observados en el Punto de Registro Choclococha, la segunda línea de color rojo representa los datos simulados por GCM,

Figura 4.25 pero ya corregidos, se puede apreciar la similitud aceptable que hay en ambos datos.

Finalmente, se observa en la Figura 4.26 las series de tiempo de las temperaturas máximas. La línea de color azul representa los datos observados en el Punto de registro Choclococha, la segunda línea de color rojo representa los datos simulados por GCM también corregidos por (Bias correction), en la figura podemos apreciar ambos datos como intentan interponerse entre ambas líneas. Podemos decir que es aceptable esta corrección.

**Figura 4.25**

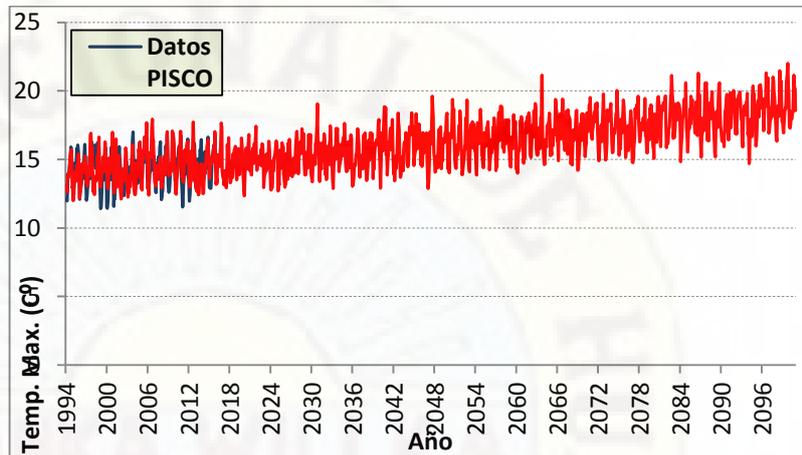
*Datos de precipitación observada y simulado por GCM corregido.*



**Fuente:** Elaboración propia con el Software Microsoft Excel (Bias Correction).

**Figura 4.26**

*Datos de temperatura máxima observada y simulado por GCM corregido*



**Fuente:** Elaboración Propia con el Software Microsoft Excel (Bias Correction).

#### **4.5.3.4. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA CON PISCO Y SIMULADO POR GCM.**

Para verificar y contrastar la calidad de los datos GCM, se realiza un análisis de consistencia de ambos datos estimados por PISCO y simulados por GCM, para ello se realizará un análisis estadístico. Para este caso se selecciona el lugar llamado Choclococha, ya que este lugar tiene tanto los datos observados, estimados y simulados.

##### **4.5.3.4.1. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS MENSUALES**

Para efectos de mostrar el procedimiento del análisis se escoge el punto de Registro Choclococha, por contar con la mayor cantidad de datos observados y simulados.

###### **a. Análisis de saltos**

Los datos disponibles para el análisis de consistencia se encuentran en la Tabla 4.14 y 4.15, definiendo los periodos de análisis que son de 1994-2016 tanto para los datos estimados y simulados.

**Tabla 4.14**

*Precipitación Mensual punto de registro Choclococha.*

DATOS ESTIMADOS PISCO-PUNTO DE REGISTRO CHOCLOCOCHA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	249.64	305.50	292.26	99.24	37.79	5.78	6.02	3.76	42.91	37.87	75.68	49.15
1995	113.34	174.96	270.68	91.64	37.29	1.49	1.12	0.56	48.64	44.94	100.92	77.35
1996	295.43	211.39	207.46	114.40	34.28	1.81	1.02	10.11	36.06	50.14	60.63	110.89
1997	213.37	210.83	154.86	73.37	27.28	0.76	0.10	21.07	57.24	56.68	106.18	138.19
1998	311.98	321.47	298.85	101.11	2.61	11.08	0.00	5.33	30.32	56.47	109.41	84.45
1999	234.11	241.93	294.96	153.45	41.58	7.29	2.93	6.01	63.65	91.14	85.76	118.81
2000	219.82	231.94	314.74	76.31	20.64	2.82	7.08	4.61	34.32	88.54	34.89	124.38
2001	335.74	188.51	272.15	83.70	27.35	4.44	6.57	4.07	65.54	48.44	129.28	64.72
2002	137.92	279.47	265.83	105.18	24.51	9.90	8.49	4.71	44.85	67.22	85.24	88.85
2003	215.91	253.04	292.20	78.51	27.21	0.90	1.27	7.81	28.68	21.71	51.48	121.90
2004	100.50	220.11	204.21	67.86	10.50	9.91	5.89	11.69	67.35	52.76	97.26	127.49
2005	167.86	150.58	193.30	59.33	12.38	0.97	0.60	3.20	33.47	38.96	55.27	119.63
2006	225.70	196.95	246.03	115.98	2.63	5.24	0.04	7.49	51.06	55.00	110.87	97.91
2007	205.66	157.37	282.15	110.04	13.87	1.82	2.22	2.15	36.64	39.82	75.88	97.95
2008	283.93	191.93	170.83	67.14	12.75	5.89	1.42	4.51	27.36	59.24	55.99	84.25
2009	262.34	235.99	151.05	103.33	33.69	3.16	5.96	4.98	33.80	56.22	163.69	148.97
2010	341.13	202.97	223.21	100.34	19.20	6.51	0.17	4.78	20.33	56.50	71.79	131.20
2011	255.45	272.07	249.65	118.64	18.99	0.91	3.12	3.16	37.84	45.43	82.82	133.74
2012	175.85	282.82	242.10	159.79	19.99	5.24	1.47	1.16	56.53	66.25	94.81	146.46
2013	220.65	202.21	297.25	73.06	75.46	4.81	3.53	6.45	35.15	78.26	60.25	128.84
2014	367.59	218.64	286.47	72.25	34.38	2.29	1.79	10.05	41.55	61.93	52.73	113.13
2015	274.47	173.94	178.26	85.81	32.39	5.61	1.41	5.80	37.27	33.34	38.15	62.15
2016	104.15	168.42	185.14	100.75	12.96	4.41	1.71	2.02	29.13	32.63	10.36	99.97

Fuente: Producto PISCO

**Tabla 4.15**

*Precipitación mensual simulado por GCM corregido, punto de registro Choclococha.*

DATOS SIMULADOS POR GCM- LUGAR CHOCLOCOCHA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	209.51	189.1	248.35	86.92	31.88	6.49	2.7	9.34	24.5	37.5	80.1	111.6
1995	157.75	176.62	234.08	101.1	25.69	4.31	2.69	4.91	47.1	73.2	81.7	102.1
1996	173.25	234.04	249.86	111	34.94	6.34	2.4	8.07	33.8	44.5	94.3	101.4
1997	204.75	172.82	270.55	93.63	19.34	4.53	1.89	1.86	27.2	46.2	79.1	90.99
1998	239.26	172.32	282.67	100.6	31.43	3.99	1.7	3.75	34.1	46.2	50.3	108.7

1999	219.8	200.36	124.35	119.2	30.16	3.47	2.81	10.88	44	51.4	89.4	121.8
2000	174.88	238.2	269.99	73.27	15.48	9.95	2.57	5.23	33.7	47.3	66.9	94.13
2001	242.42	156.33	216.8	56.99	17.27	5.48	2.99	7.08	46.3	50.5	88.4	112.6
2002	233.58	231.01	255.39	91.29	20.64	3.3	3.3	8.85	45.2	42.5	90.7	103.4
2003	256.43	213.22	245.24	110.2	20.08	4.76	2.05	4.89	36	42.6	86.6	116.8
2004	210.41	189.7	221.31	115.6	23.54	3.52	2.07	10.86	27.1	61.2	102	97.9
2005	294.89	270.18	184.48	92.79	43.65	3.86	2.17	8.53	34.7	63.2	65.9	124.1
2006	309.73	225.01	288.98	128.2	17.75	2.61	2.54	5.06	26.8	58.5	87.1	103.9
2007	255.85	205.22	239.42	98.24	39.77	8.42	5.09	6.63	38.2	57.1	113	99.97
2008	243.45	159.06	221.34	78.41	21.44	3.38	3.74	10.62	40.3	55.3	65.8	108.4
2009	237.18	249.96	253.5	122	22.12	3.11	3.67	1.87	42.7	39.2	103	102.1
2010	181.23	200.41	208.85	48.38	22.07	3.57	2.95	8.46	27.6	60.2	91.3	144
2011	257.31	236.78	216.89	86.49	23.33	4.35	3.29	9	44.6	52.9	111	103.1
2012	258.73	291.23	197.32	131.6	12.83	6.02	2.71	8.54	19	47.2	76.2	106.8
2013	245.62	241.86	177.44	110.4	33.77	6.35	4.93	5.11	38.4	60.1	99.8	85.76
2014	254.07	223.62	224.08	80.05	23.3	4.13	1.92	8.07	40.5	53.7	90.5	121.9
2015	216.85	174.86	240.09	90.34	22.32	6.55	2	8.43	35	60.9	62	107.9
2016	283.8	278.73	248.09	93.73	15.95	7.36	3.64	10.35	27.4	37.2	48.8	116

Fuente: Elaboración Propia con el Software Microsoft Excel (Bias Correction).

### a.1 Consistencia en la media

También los datos estimados y simulados serán analizados mediante la prueba estadística T de Student, donde se detectará si hay inconsistencia en la media, por eso se analiza si los valores promedios son estadísticamente iguales o diferentes, este análisis es preliminar no confirma la hipótesis. A continuación, se calcula los promedios y las desviaciones estándar para los datos observados y estimados, con las ecuaciones que tiene T de Student.

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i \quad S_1(x) = \left[ \frac{1}{n_1-1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$n_1 = 276 \quad \bar{x}_1 = 92.57777293 \quad s_1(x) = 93.16056905$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} x_j \quad S_2(x) = \left[ \frac{1}{n_2-1} \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$n_1 = 276 \quad \bar{x}_1 = 91.15481884 \quad s_1(x) = 87.65658769$$

**Dónde:**

$x_i$  : Información de análisis de datos estimados.

$x_j$  : Información de análisis de datos simulados.

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$  : Media de los datos estimados y simulados, respectivamente.

$S_1(x), S_2(x)$  : Desviación estándar de los datos estimados y simulados, respectivamente.

$n_1, n_2$  : Numero de datos estimados y simulados.

El procedimiento a seguir es de la siguiente manera:

}

**1. Se establecen las hipótesis y nivel de significancia.**

$H_p: \mu_1 = \mu_2$  (Significa que existe igualdad o semejanza entre las medias poblacionales de los datos estimados y simulados).

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$  (No existe semejanza entre las medias poblacionales de los datos estimados y simulados).

$\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia de 5%).

**2. Calculo de  $S_p$  y  $S_d$**

Dónde:

$$S_p = \left[ \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2} \right]^{1/2} ; S_p = 90.45045326$$

$$S_d = S_p \left[ \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right]^{1/2} ; S_d = 7.699653905$$

**3. Calculo de  $T_c$  (T calculado)**

$$t_c = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{S_d}$$

$$t_c = 0.184807539$$

#### 4. Calculo de Tt (T tabulado o tablas)

**Tabla 4.16**

*Tabla de distribución "t – Student".*

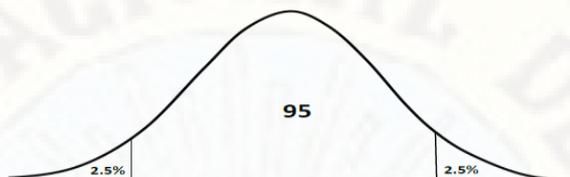


TABLA DE CUANTILES DE LA DISTRIBUCIÓN 'T' DE STUDENT						
GL	ÁREA DE DOS COLAS					
	0.40	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
1	1.3764	3.0777	6.3138	12.7062	31.8205	63.6567
2	1.0607	1.8856	2.92	4.3027	6.9646	9.9248
3	0.9785	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8409
4	0.941	1.5332	2.1318	2.7764	3.7469	4.6041
5	0.9195	1.4759	2.015	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.9057	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.896	1.4149	1.8946	2.3646	2.998	3.4995
8	0.8889	1.3968	1.8595	2.306	2.8965	3.3554
9	0.8834	1.383	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.8791	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.8755	1.3634	1.7959	2.201	2.7181	3.1058
12	0.8726	1.3562	1.7823	2.1788	2.681	3.0545
13	0.8702	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.8681	1.345	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.8662	1.3406	1.7531	2.1314	2.6025	2.9467
16	0.8647	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.8633	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.862	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.861	1.3277	1.7291	2.093	2.5395	2.8609
20	0.86	1.3253	1.7247	2.086	2.528	2.8453
21	0.8591	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.8583	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.8575	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.8569	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7969
25	0.8562	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.8557	1.315	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.8551	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.8546	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633

29	0.8542	1.3114	1.6991	2.0452	2.462	2.7564
30	0.8538	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.75
50	0.8489	1.2987	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778
100	0.8452	1.2901	1.6602	1.984	2.3642	2.6259
200	0.8434	1.2858	1.6525	1.9719	2.3451	2.6006
500	0.8423	1.2832	1.6479	1.9647	2.3338	2.5857
641	0.8422	1.2829	1.6472	1.9637	2.3322	2.5835
1000	0.842	1.2824	1.6464	1.9623	2.3301	2.5808

**Fuente:** Elaboración propia con la herramienta Excel.

Por lo tanto  $t_t = 1.964286551$

### 1. Criterio de decisión

Si:  $|Tc| \leq |Tt|$  (95%) entonces,  $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$  estadísticamente las medias son iguales (podemos decir hay semejanza entre ambos datos analizados).

Si:  $|Tc| > |Tt|$  (95%) entonces,  $\bar{x}_1 \neq \bar{x}_2$  estadísticamente las medias son diferentes (no hay semejanza) por lo tanto se define la existencia de salto.

Como  $|Tc = 0.184807539| < |Tt = 1.964286551|$  al (95% de efectividad) entonces, estadísticamente las medias son iguales, por lo tanto la información de datos estimados y simulados tienen una consistencia en la media.

### a.2 Consistencia en la desviación estándar

El análisis de consistencia en la desviación estándar se realiza con la prueba “F” de Fisher según el procedimiento:

Se calcula la varianza de los datos observados y estimados.

$$s_1^2(x) = \frac{1}{n_1-1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 \quad s_1^2(x) = 8678.891626$$

$$s_2^2(x) = \frac{1}{n_2-1} \sum_{j=1}^{n_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 \quad s_2^2(x) = 7683.677365$$

### 1. Planteando la hipótesis y el nivel de significancia:

$H_p: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$  (se considera varianzas poblacionales semejantes).

$H_p: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$  (se considera varianzas poblacionales semejantes).

$\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia del 5%).

**2. Calculando Fc (F calculado)**

$$F_c = \frac{[S_1(x)]^2}{[S_2(x)]^2}, \quad \text{si } S_1^2(x) > S_2^2(x)$$

$$F_c = \frac{[S_2(x)]^2}{[S_1(x)]^2}, \quad \text{si } S_2^2(x) > S_1^2(x)$$

Como:  $S_1^2(x) > S_2^2(x)$ , entonces  $F_c = \frac{[S_1(x)]^2}{[S_2(x)]^2} \quad F_c = 1.129523172$

**3. Encontrar el valor de Ft (F tabulado) según las tablas:**

Para:  $\alpha = 0.05$

$$\begin{cases} GLN = n_1 - 1 \\ GLD = n_2 - 1 \end{cases} \quad \text{si } S_1^2(x) > S_2^2(x)$$

$$\begin{cases} GLN = n_2 - 1 \\ GLD = n_1 - 1 \end{cases} \quad \text{si } S_2^2(x) > S_1^2(x)$$

Como  $S_1^2(x) > S_2^2(x)$ , entonces  $G.L.N. = n_1 - 1 = 275, G.L.D. = n_2 - 1 = 275$

Dónde:

$\alpha$  : Nivel de significancia.

G.L.N. : Grados de libertad del numerador.

G.L.D. : Grados de libertad de denominador.

**Tabla 4.17**

Valores de distribución F de Fisher,  $\alpha=0.05$

TABLA DE CUANTILES DE LA DISTRIBUCIÓN FISHER F, $\alpha=0.05$												
n1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	536	1000
n2												
10	2.637	2.588	2.572	2.563	2.558	2.555	2.553	2.551	2.549	2.548	2.547	2.543
15	2.178	2.123	2.105	2.095	2.089	2.085	2.083	2.081	2.079	2.078	2.077	2.072
20	1.966	1.907	1.886	1.875	1.869	1.865	1.862	1.859	1.858	1.856	1.855	1.85
25	1.842	1.779	1.757	1.746	1.739	1.735	1.731	1.729	1.727	1.725	1.724	1.718
30	1.761	1.695	1.672	1.66	1.652	1.647	1.644	1.641	1.639	1.637	1.636	1.63
35	1.703	1.635	1.61	1.598	1.59	1.585	1.581	1.578	1.576	1.574	1.573	1.566
40	1.66	1.589	1.564	1.551	1.542	1.537	1.533	1.53	1.528	1.526	1.525	1.517
45	1.626	1.554	1.527	1.513	1.505	1.499	1.495	1.492	1.49	1.488	1.487	1.479

50	1.599	1.525	1.498	1.484	1.475	1.469	1.465	1.461	1.459	1.457	1.456	1.448
55	1.577	1.501	1.473	1.459	1.45	1.444	1.439	1.436	1.433	1.431	1.43	1.422
60	1.559	1.481	1.453	1.438	1.428	1.422	1.418	1.414	1.412	1.409	1.408	1.399
65	1.543	1.464	1.435	1.42	1.41	1.404	1.399	1.396	1.393	1.391	1.389	1.38
70	1.53	1.45	1.42	1.404	1.394	1.388	1.383	1.379	1.377	1.374	1.373	1.364
75	1.518	1.437	1.407	1.391	1.381	1.374	1.369	1.365	1.362	1.36	1.359	1.349
80	1.508	1.426	1.395	1.379	1.368	1.361	1.356	1.353	1.35	1.347	1.346	1.336
85	1.499	1.416	1.384	1.368	1.357	1.35	1.345	1.341	1.338	1.336	1.334	1.325
90	1.491	1.407	1.375	1.358	1.348	1.34	1.335	1.331	1.328	1.326	1.324	1.314
95	1.484	1.399	1.367	1.35	1.339	1.331	1.326	1.322	1.319	1.316	1.315	1.304
100	1.477	1.392	1.359	1.342	1.331	1.323	1.318	1.314	1.311	1.308	1.306	1.296
105	1.471	1.385	1.352	1.334	1.323	1.316	1.31	1.306	1.303	1.3	1.299	1.288
150	1.436	1.345	1.309	1.29	1.278	1.269	1.263	1.258	1.255	1.252	1.25	1.238
200	1.415	1.321	1.283	1.263	1.249	1.24	1.234	1.228	1.224	1.221	1.219	1.205
250	1.402	1.306	1.267	1.246	1.232	1.222	1.215	1.209	1.205	1.202	1.199	1.185
300	1.393	1.296	1.256	1.234	1.22	1.21	1.202	1.196	1.192	1.188	1.186	1.17
400	1.383	1.283	1.242	1.219	1.204	1.193	1.185	1.179	1.174	1.17	1.167	1.15
500	1.376	1.275	1.233	1.21	1.194	1.183	1.175	1.168	1.163	1.159	1.156	1.138
1000	1.363	1.26	1.216	1.19	1.174	1.161	1.152	1.145	1.139	1.134	1.131	1.11

Fuente: Elaboración Propia con función de Excel.

Donde obtenemos de la tabla:  $F_t = 1.219840622$

### 1. Probabilidad a decidir:

Si:  $F_c \leq F_t$  (95%) entonces  $S_1(x) = S_2(x)$  se considera que las desviaciones estándar son iguales estadísticamente.

Si:  $F_c > F_t$  (95%) entonces  $S_1(x) \neq S_2(x)$ , las desviaciones estándar son diferentes estadísticamente por lo tanto se considera a que existe salto.

Como:  $F_c = 1.129523172 < F_t = 1.219840622$  (95%) entonces  $S_1(x) = S_2(x)$ , se considera que las desviaciones estándar son estadísticamente iguales.

Por lo tanto, no se debe corregir la información de estos dos tipos de datos.

En resumen, en este caso para los datos estimados y simulados del lugar de choclococha podemos deducir que tanto la media y la desviación estándar cumplen que los datos observados y estimados son semejantes o similares y no deben ser corregidos de acuerdo a los resultados de las pruebas “t” y “F”; por lo que también se puede confirmar que los datos estimados y simulados no presenta saltos.

## b. Estadísticas de comparación por pares

**b.1 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)** También conocido como el coeficiente de eficiencia. El rango de NSE es desde  $-\infty$  (ajuste malo) hasta 1 (ajuste perfecto).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Dónde:

$n$  : Número de observaciones

$P_i$  : Valores simulados o pronosticados

$O_i$  : Valores observados

$\bar{O}$  : Media de los valores observados

Entonces:

$$\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 = 426998.974$$

$$\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 = 2386695.197$$

$$NSE = 1 - \frac{426998.974}{2386695.197}$$

$$NSE = 0.821091954$$

Con este valor de  $NSE = 0.821091954$ , podemos decir según la Tabla 3.1 propuesta por Nash- Sutcliffe, donde considera que valores mayores a 0.8 se considera ajuste Excelente.

**b.2 Coeficiente de correlación de Pearson (r)** Indica el grado de asociación o relación que existe entre dos variables. El rango de R varía desde -1 a +1.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}$$

$$\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) = 2036633.171$$

$$\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 = 2386695.197$$

$$\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 = 2113011.275$$

$$r = \frac{2036633.171}{\sqrt{2386695.197} \sqrt{2113011.275}}$$

$$r = 0.906908404$$

Con el valor de  $r = 0.906908404$  podemos decir según la Tabla 3.2 presentada en anterior capítulo, que hay una **correlación positiva muy alta** en los datos observados y simulados.

#### 4.5.4. CAMBIOS FUTUROS EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS SEQUIAS ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS DEL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTANDARIZADA (SPEI)

Según el Cuarto Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007), el cambio climático se refiere a cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de las actividades humanas. Estos cambios pueden resultar en cambios en las propiedades estadísticas de la función distribución de la variable considerada, como cambios en su valor medio y su amplitud o variabilidad. Los cambios en la variabilidad de la precipitación pueden incluir eventos extremos más frecuentes y destructivos como pueden ser las sequías.

Por lo tanto, es esperable que el cambio climático afecte principalmente la frecuencia y severidad de las sequías. Sin embargo, la mayor parte de la bibliografía existente en el Sur de Sudamérica

(SSA) se concentró principalmente en los cambios en el estado medio del clima en lugar de los cambios en su variabilidad temporal. De esta forma, el impacto del cambio climático en las características de las sequías permanece parcialmente desconocido. Diversos trabajos han evidenciado la ocurrencia de tendencias positivas en los totales de precipitación en diversas escalas de tiempo durante la segunda mitad del siglo XX sobre gran parte de Sudamérica. En concordancia con estas variaciones, se observó un decrecimiento en la cantidad anual de días secos sobre una gran porción de Sudamérica (Rivera et al., 2013).

Por consiguiente, las salidas de los modelos climáticos son necesarias a fin de evaluar si la precipitación y temperatura máxima mínima modelada muestra estos cambios de baja frecuencia y ver si estas reversiones en las tendencias van a continuar durante el siglo XXI, dada la importancia de las mismas en la economía de la región. Si se proyecta un retorno a condiciones secas, las sequías pueden volverse una amenaza más recurrente, y sus características en cuanto a severidad y duración pueden alterarse. Por lo tanto, el conocimiento cuantitativo de las características de las sequías en la región es un aspecto importante de la planificación y el manejo de las prácticas agrícolas y de recursos hídricos. Marengo et al. (2009) indican que las tendencias en las precipitaciones hacia el final del siglo XXI continuarán con el patrón observado durante la segunda mitad del siglo XX, esto es, con incrementos en los valores de precipitación. No obstante, Junquas et al. (2012) indican que la primera mitad del siglo XXI estará caracterizada por una disminución de las precipitaciones asociadas al trimestre de verano.

Teniendo en consideración las razones en la demanda de recursos hídricos por gobiernos y agencias vinculadas al agua, se enfrentarán al desarrollo de planes de mitigación de los efectos de las sequías. Por lo que, el objetivo es identificar si el cambio climático agravara los

problemas del agua a través del cambio en las características de las sequías a nivel regional, y hacer una evaluación qué tan bien se representan las características de las sequías en la cuenca del río Ichu a través de un ensamble multi-modelo de los Modelos Climáticos Globales (MCG) pertenecientes al Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), y evaluar los cambios futuros en la frecuencia, duración y severidad de las sequías.

Para el análisis de las sequías con proyecciones futuras se consideraron cinco criterios sensibilidad, flexibilidad, transparencia, tratabilidad y dimensionalidad con énfasis sobre las sequías de corto y largo plazo, representadas por las escalas de 3 y 12 meses, respectivamente. En la que se estableció que el Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) es la mejor opción para la detección de los eventos de sequía con proyecciones futuras y para evaluar sus variaciones espacio-temporales en la cuenca del río Ichu. El SPEI demostró poseer la mayor sensibilidad a los cambios de la precipitación en escalas de 3 y 12 meses, es flexible y adimensional por definición.

Del comentario anterior en este trabajo de investigación se usarán las metodologías del Índice de Precipitación y Evapotranspiración considerando a sus escalas de tiempo de 3 (SPEI-3) y 12 (SPEI-12) meses, las cuales representan condiciones de sequía de corto y largo plazo que a la vez representa la sequía agrícola y la sequía en los almacenamientos de reservorios, caudales de los ríos y aguas subterráneas, etc. El SPEI ha sido ampliamente utilizado para el análisis de las condiciones de sequía futuras considerando el cambio climático ya que este índice en su metodología de análisis considera la temperatura máxima mínima.

El uso del índice de precipitación estandarizado (SPEI) para la identificación de las características de las sequías resultó conveniente,

dado que los datos de precipitación, temperatura máxima mínima mensuales son una variable común en todas las salidas de MCGs de la base de datos del CMIP5 con escenario climático RCP 8.5 que representa un rápido incremento de CO<sub>2</sub> en la concentración, que se emiten estos gases actualmente hacia la atmósfera. Por lo que en este trabajo de investigación se utilizará el SPEI que será calculado para una serie de tiempo de 3 y 12 meses. Los tres parámetros utilizados para la caracterización de sequías son: (a) frecuencia – cantidad de eventos de sequía en el período de interés; (b) duración – duración de todos los eventos de sequía; y (c) severidad – valor máximo del SPEI considerando todos los eventos de sequía. Las regiones consideradas se muestran en la Figura 10.3 y fueron determinadas subjetivamente con el fin de analizar la existencia de variaciones regionales en los cambios de las características de las sequías. No obstante, estas regiones poseen son coherentes desde el punto de vista de la climatología.

Para evaluar los cambios en el clima futuro se consideran periodos de tiempo de cada 10 años, los períodos del comienzo (2020-2030), (2031-2040), (2041-2050), (2051-2060), (2061-2070), (2071-2080), (2081-2090) y final del siglo XXI (2091-2100).

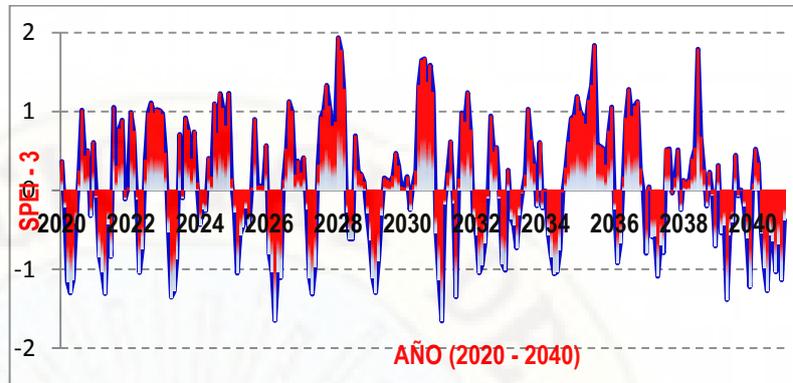
#### **4.5.4.1. RESULTADOS SPEI A ESCALA DE TIEMPO 3 Y 12 MESES EN LA REGIÓN HOMOGÉNEA 1.**

##### **a. Resultados de SPEI a escala de tiempo 3 meses.**

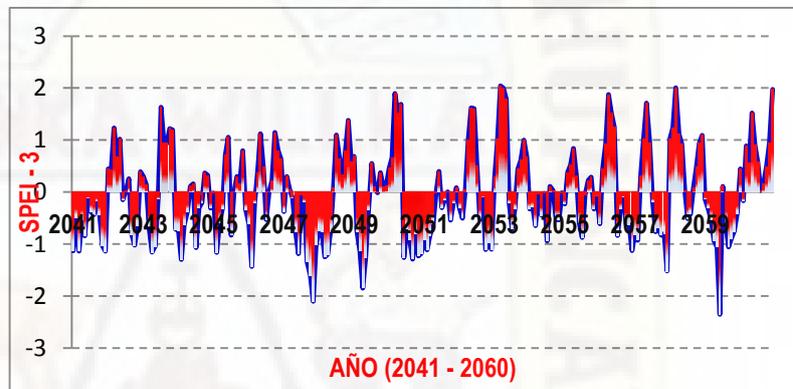
#### **Figura 4.27**

*Estimación del SPEI -3 para la región homogénea 1 en el periodo de tiempo a) 2020-2040, b) 2041-2060 c) 2061-2080, d) 2081-2100.*

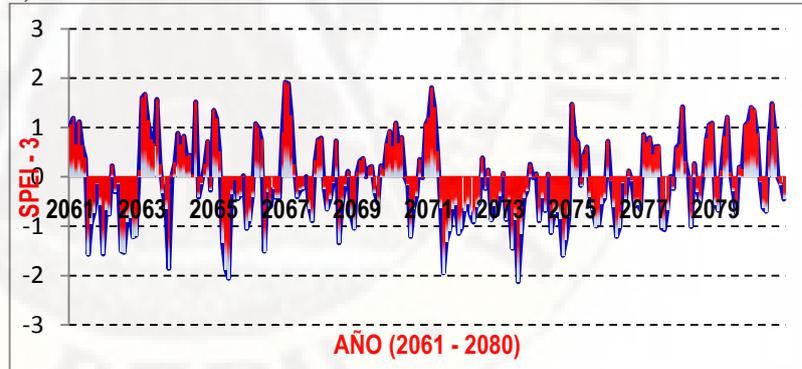
a) Año 2020-2040



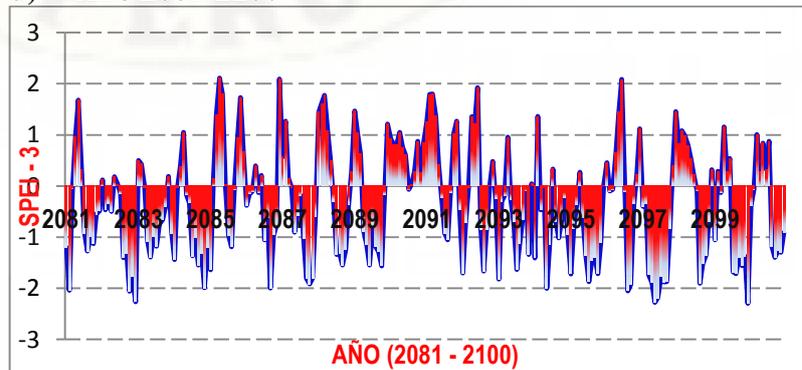
b) Año 2041-2060



c) Año 2061-2080



d) Año 2081-2100

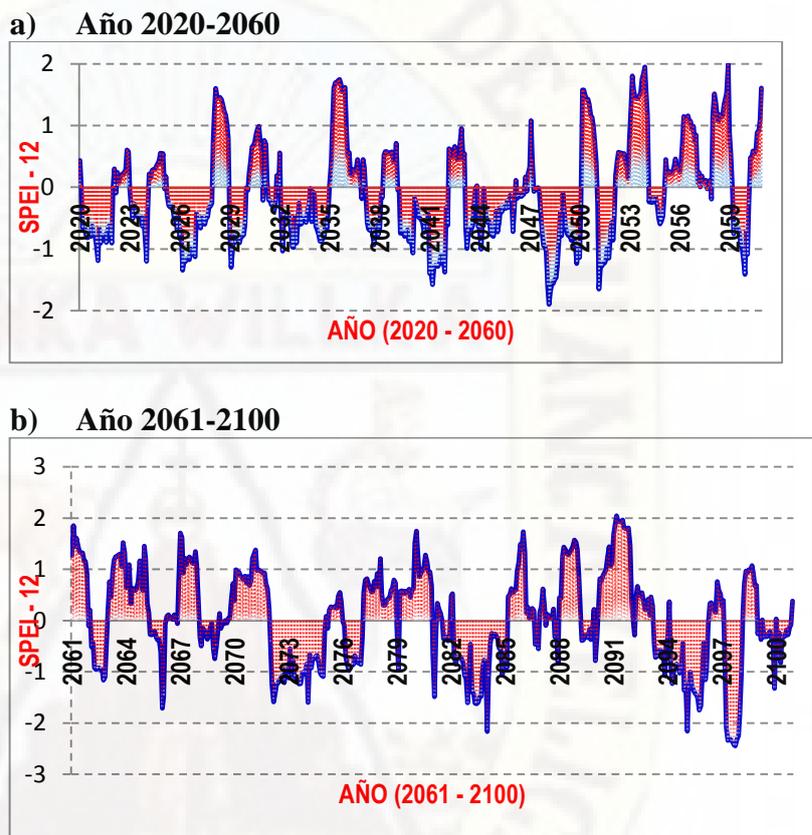


Fuente: Elaboración Propia.

**b. Resultados de SPEI a escala de tiempo 12 meses.**

**Figura 4.28**

*Estimación del SPEI -12 para la región homogénea 1 en el periodo de tiempo a) 2020-2060, b) 2061-2100.*



**Fuente:** Elaboración propia.

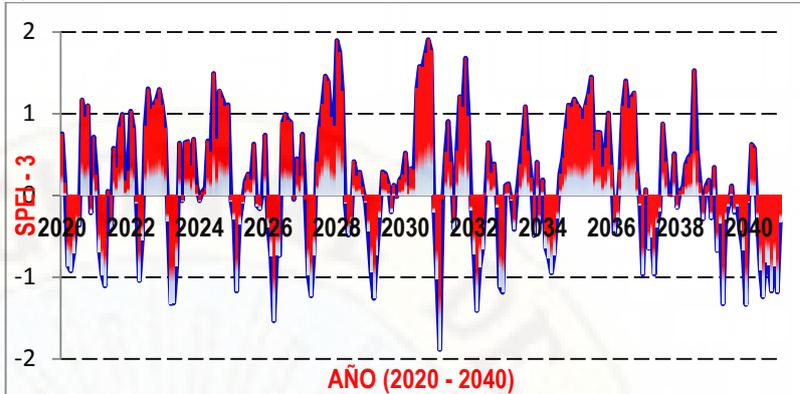
**4.5.4.2. RESULTADOS DE SPEI A ESCALA DE TIEMPO 3 Y 12 MESES EN LA REGIÓN HOMOGÉNEA 2.**

**a. Resultados de SPEI a escala de tiempo 3 meses.**

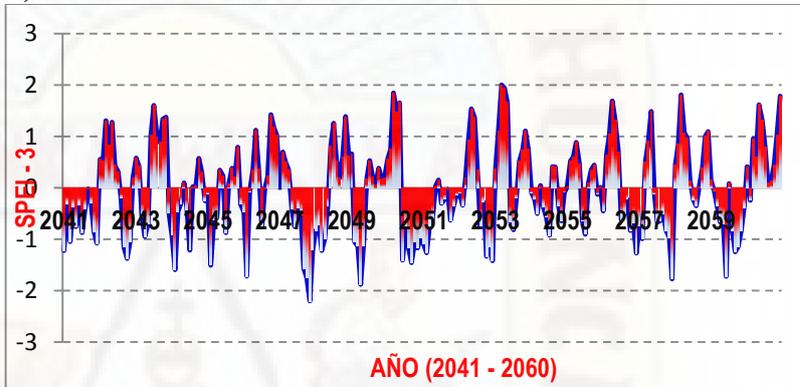
**Figura 4.29**

*Estimación del SPEI -3 para la región homogénea 2 en el periodo de tiempo: a) 2020-2040, b) 2041-2060 c) 2061-2080, d) 2081-2100.*

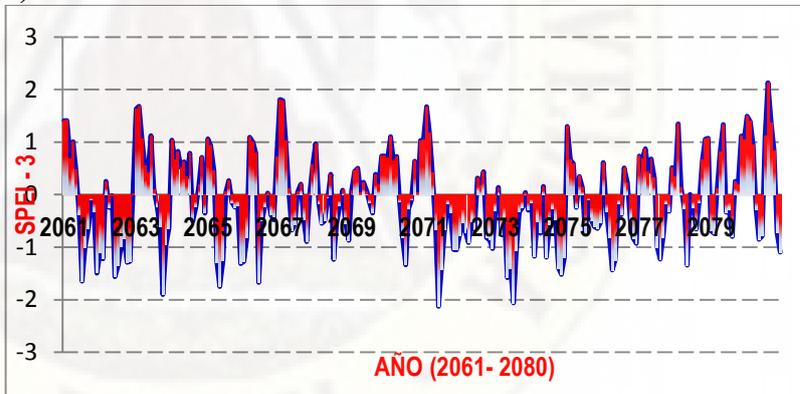
a) Año 2020-2040



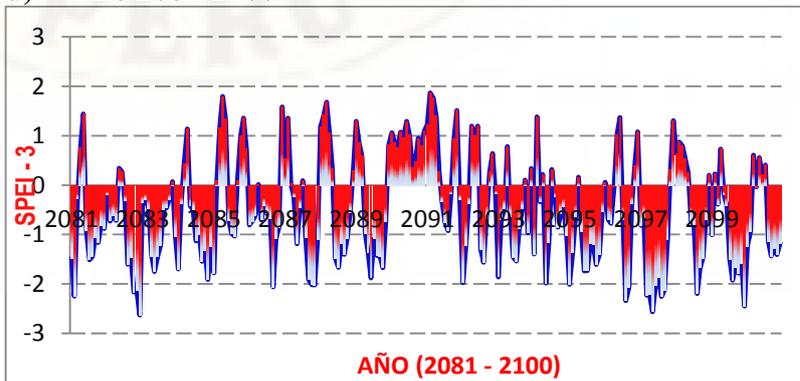
b) Año 2041-2060



c) Año 2061-2080



d) Año 2081-2100



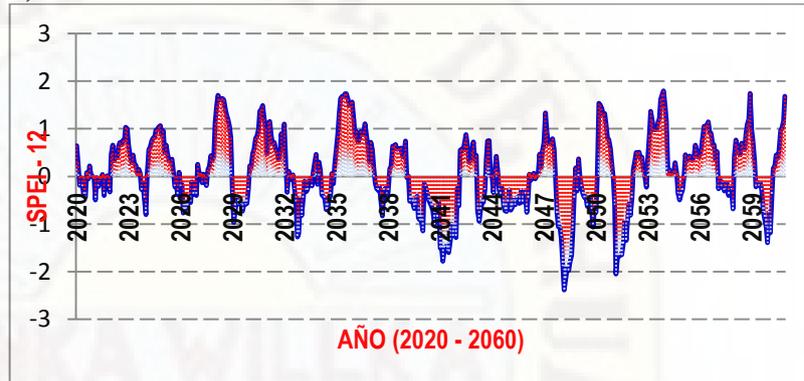
Fuente: Elaboración propia.

**b. Resultados de SPEI a escala de tiempo 12 meses.**

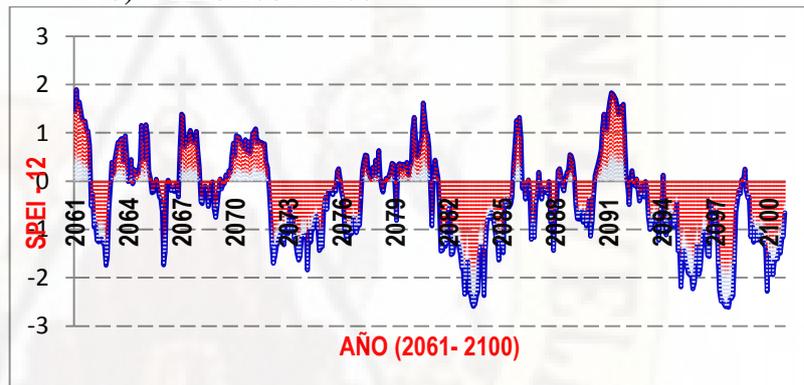
**Figura 4.30**

*Estimación del SPEI-12 para la región homogénea 2 en el periodo de tiempo a) 2020-2060, b) 2061-2100.*

**a) Año 2020-2060**



**b) Año 2061-2100**



**Fuente:** Elaboración Propia.

En este análisis se mostrarán las sequías futuras más críticas o peligrosas identificados dentro de la cuenca del río Ichu con la metodología del Índice de Precipitación Estandarizada y Evapotranspiración (SPEI) teniendo en cuenta la sequía agrícola (SPEI -3) y la sequía en almacenamiento de reservorios, caudal de los ríos y agua subterránea (SPEI- 12) en periodos de 10 años, comenzado el año 2020 y culminando el año 2100.

#### 4.5.4.2.1. CAMBIOS PROYECTADOS EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS SEQUIAS: 2020 – 2100

##### a. Índice SPEI – 3 “sequía a corto plazo”

Las proyecciones de los escenarios RCP-8.5, lo cual nos indica que un incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero el período 2020-2100 tendrá un gran impacto en el cambio futuro de las sequías a corto plazo, en promedio, la ocurrencia de sequías de corto plazo será más frecuente con el paso de tiempo donde se presentan sequías con mayores intensidades, duraciones y severidades, con respecto al periodo visto en el anterior capítulo en el periodo de tiempo 1994-2016.

El periodo de **tiempo de 2020-2030** la sequía más peligrosa ocurre a finales del año 2025 con una intensidad considerada como **muy seca**, la región 3 es la más afectada por que presenta una mayor duración que las demás regiones que tienen menores duraciones y mayores severidades (Figura 31).

Seguidamente en el periodo de **tiempo 2031-2040** se observa muchos eventos secos la más peligrosa ocurre casi a principios del año 2039 hasta finales del año 2041 afectando las 5 regiones homogéneas, con duraciones aproximada de 32 meses y severidades moderadas.

Para el periodo de **tiempo 2041-2050** los eventos secos van en aumento la sequía más extrema ocurre a finales del año 2047 hasta mitad del año 2048, con una intensidad considerada extremadamente seco en las 5

regiones con una duración aproximada de 13 meses, pero con mayores severidades.

Continuando con el periodo de **tiempo 2051-2060** en este periodo los eventos secos disminuyen al igual que los años húmedos para las 5 regiones, pero se observa una sequía con una intensidad considerada moderadamente seco, que empieza a mitad del año 2050 hasta principios del año 2052 con una duración aproximada de 18 meses con menores severidades. Podemos concluir que en este periodo de tiempo la región empieza a recuperar los eventos húmedos.

Para el periodo de **tiempo 2061-2070** al igual que el periodo anterior se mantiene los años húmedos, pero en menor cantidad al periodo anterior que también afecta las 5 regiones, pero también hay presencia de una sequía con una intensidad máxima considerada **muy seco**, que comienza a mitad del año 2061 hasta finales del año 2062 con una duración aproximada de 16 meses, pero con mayores severidades. Podemos decir que este periodo de tiempo esta sequia es la más peligrosa en las 5 regiones porque presenta mayores severidades.

Para el periodo de **tiempo 2071 - 2080** en este periodo los eventos secos aumentan preocupantemente en las 5 regiones, hay presencia de una sequía con una intensidad extremadamente seco que comienza a mitad del año 2071 hasta finales del 2074 con duraciones aproximadamente de 37 meses y con severidades también mayores. Podemos decir que desde este periodo se presentaran más eventos secos a lo largo de los años posteriores.

Para el periodo de **tiempo 2081 – 2090** en este periodo los eventos secos van en aumentan para las 5 regiones, más que el periodo 2071-2080, la sequía más peligrosa con una intensidad considerada extremadamente seco que empieza a mitad del año 2081 hasta principios del año 1985, con una duración aproximadamente de 30 meses y mayores severidades. Podemos decir que casi 3 años la agricultura será fuertemente afectada.

Finalmente en el periodo de **tiempo 2091-2100**, en este periodo los eventos secos casi cubren los 10 años, la región 1 es la única región que tiene presencia de eventos húmedos pero con magnitud mínima y poca duración, la región 2 es la más golpeada por la sequía, porque casi ya no presenta años húmedos durante estos 10 años, las 3 regiones restantes también presentan eventos secos casi al igual de la región 2, una de las sequias más peligrosas o considerado como extremadamente seco y con severidades a un mayores a los identificados en los anteriores periodos que inicia a mitad del año 2096 hasta finales del año 2097 que esta tiene una duración de 14 meses. Podemos decir que en estos 14 meses tanto la agricultura y cobertura vegetal será fuertemente afectado.

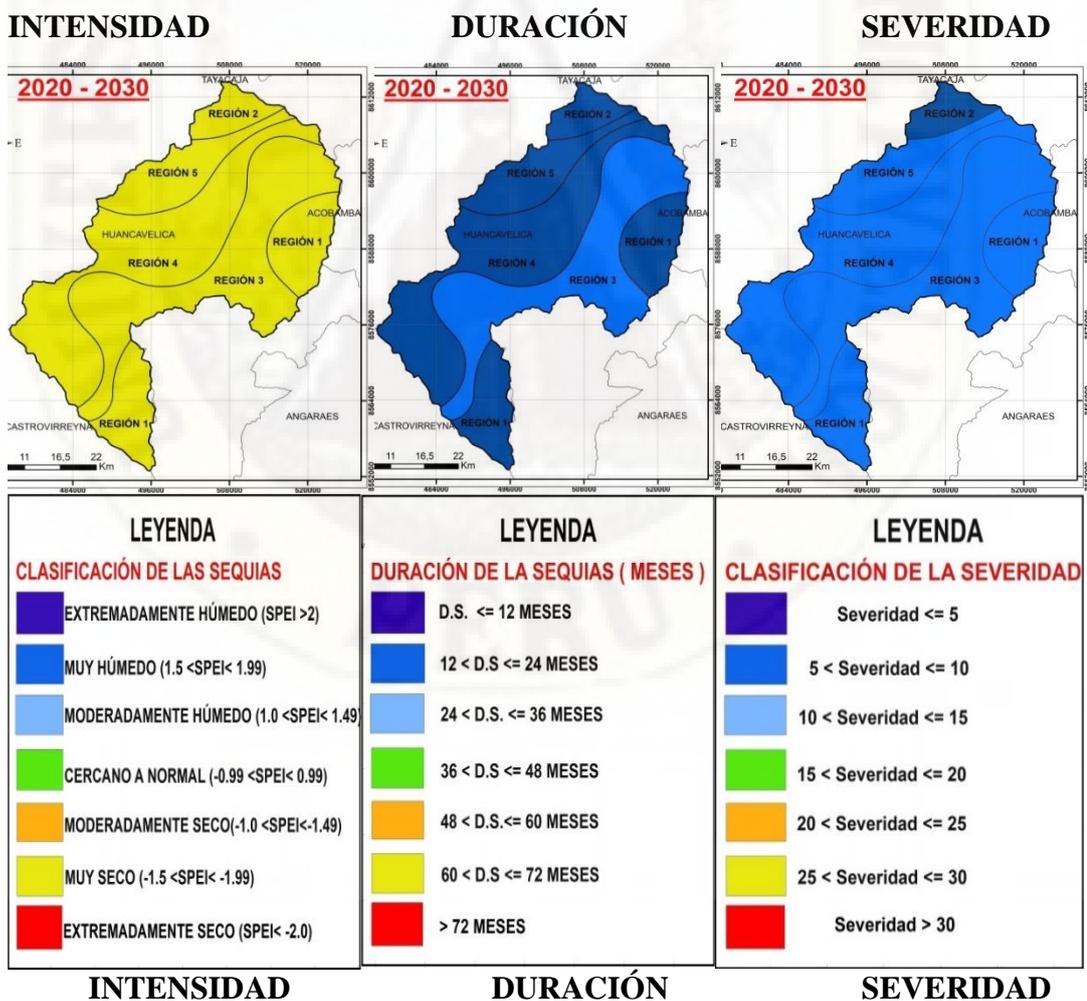
Por lo tanto, los cambios en las condiciones medias del clima, y más específicamente, de la precipitación, tendrán superpuestos un incremento en las variabilidades estacionales e interanuales que incrementarán la ocurrencia de extremos de precipitación, en este caso, las sequías.

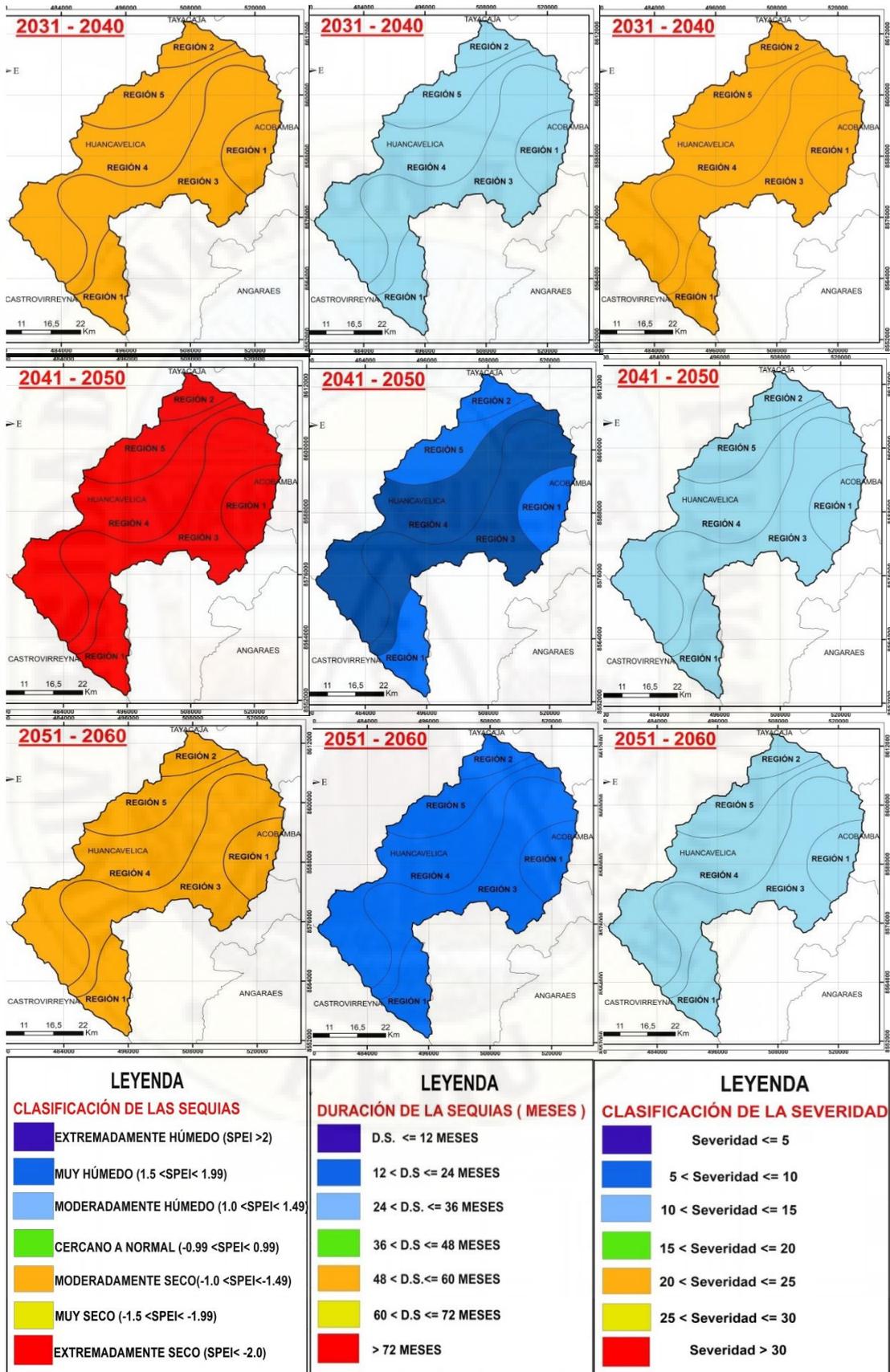
**a.1. Caracterización de las sequías con el índice SPEI – 3 para las 5 regiones homogéneas periodo (2020 – 2100).**

Climatología de sequías basada en el ensamble multi-modelo CMIP5 con escenario climático RCP 8.5 para el análisis de las características de las sequías de corto plazo (SPEI-3) proyectados para el año 2020-2100, donde se muestra en las siguientes figuras el Panel izquierdo: Intensidad; panel central: duración; panel derecho: severidad de las sequías.

**Figura 4.31**

*Cambios en las características de las sequías de corto plazo (SPEI-3) proyectadas para el periodo: a) 2020-2030, b) 2031-2040, c) 2041-2050, d) 2051-2060, e) 2061-2070, d) 2071-2080, e) 2081-2090, f) 2091-2100.*

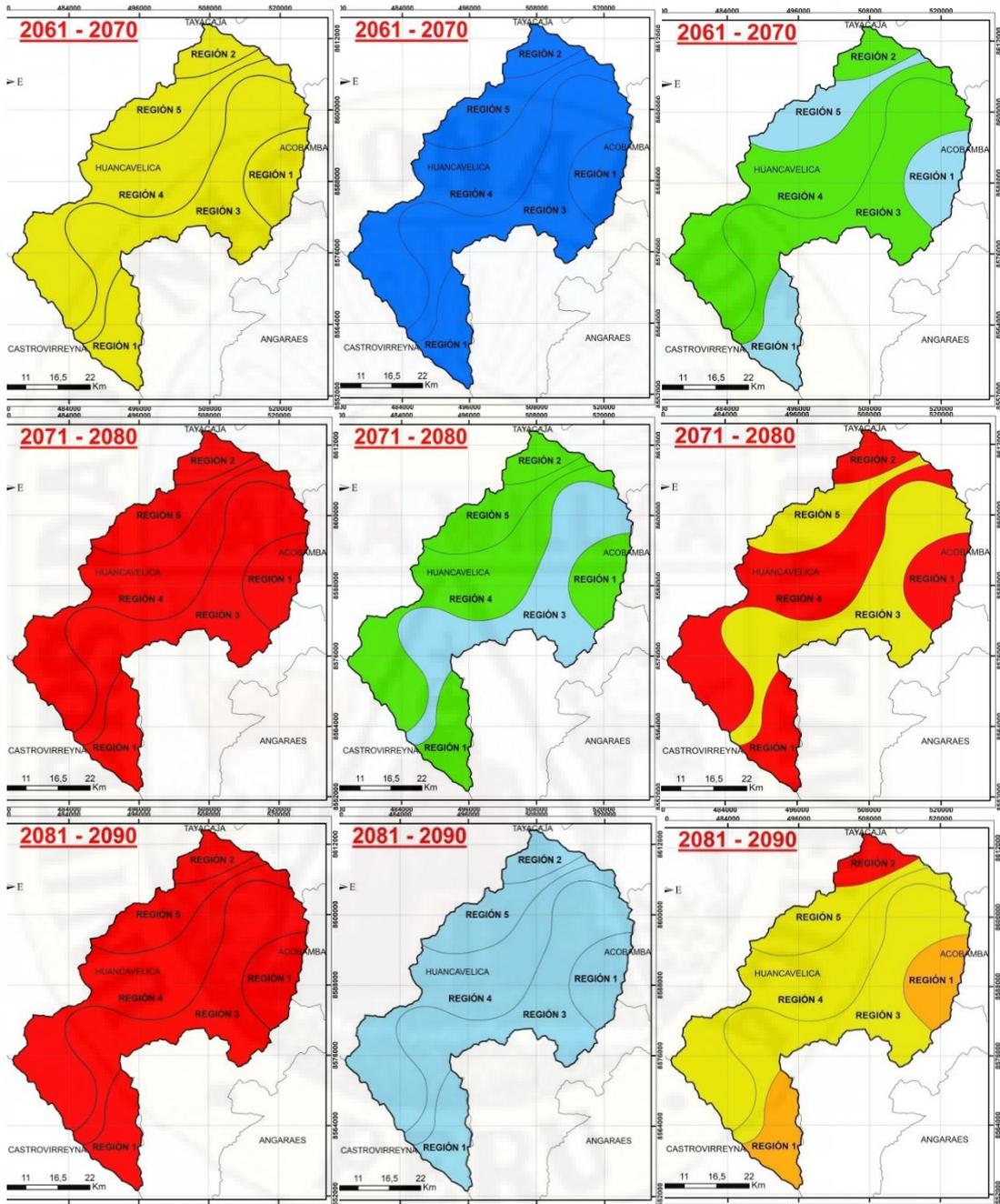




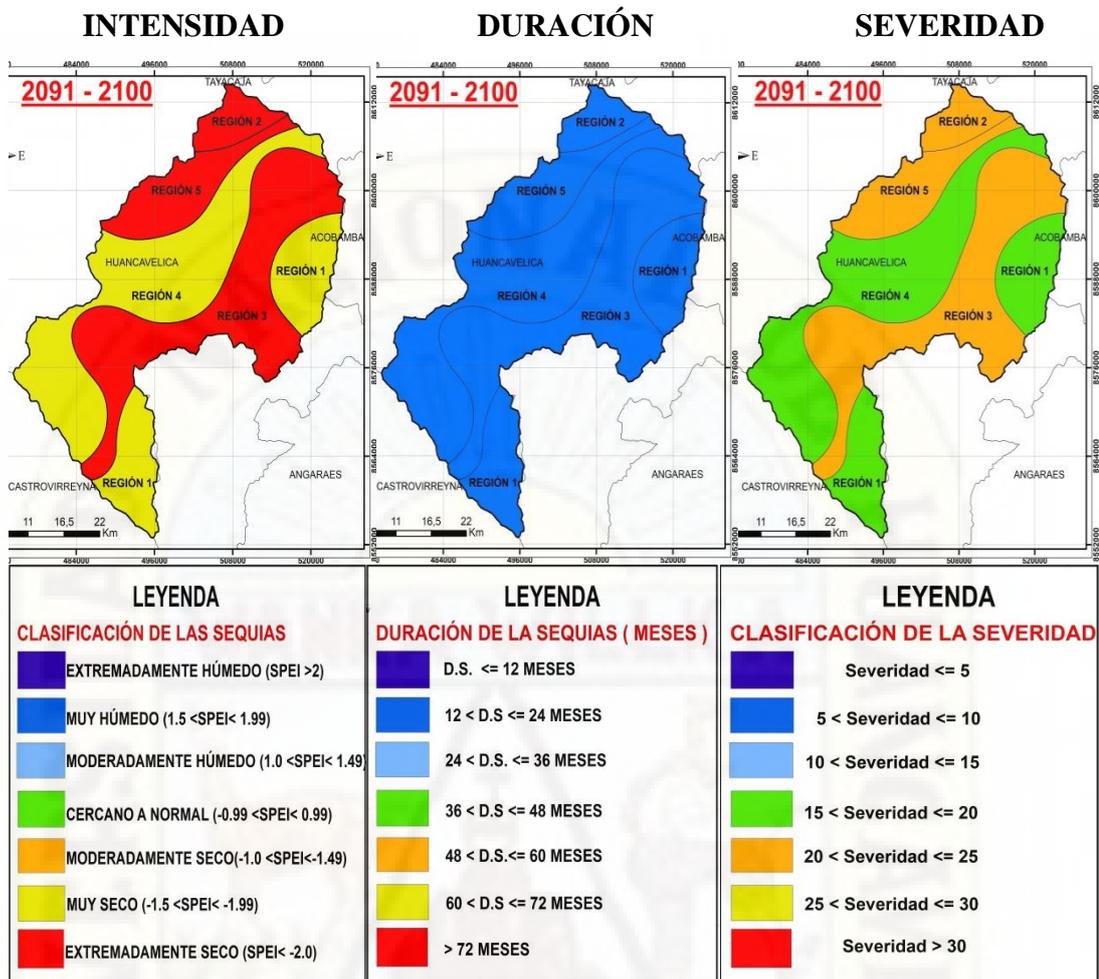
### INTENSIDAD

### DURACIÓN

### SEVERIDAD



LEYENDA	LEYENDA	LEYENDA
CLASIFICACIÓN DE LAS SEQUIAS	DURACIÓN DE LA SEQUIAS ( MESES )	CLASIFICACIÓN DE LA SEVERIDAD
EXTREMADAMENTE HÚMEDO (SPEI > 2)	D.S. <= 12 MESES	Severidad <= 5
MUY HÚMEDO (1.5 < SPEI < 1.99)	12 < D.S. <= 24 MESES	5 < Severidad <= 10
MODERADAMENTE HÚMEDO (1.0 < SPEI < 1.49)	24 < D.S. <= 36 MESES	10 < Severidad <= 15
CERCANO A NORMAL (-0.99 < SPEI < 0.99)	36 < D.S. <= 48 MESES	15 < Severidad <= 20
MODERADAMENTE SECO (-1.0 < SPEI < -1.49)	48 < D.S. <= 60 MESES	20 < Severidad <= 25
MUY SECO (-1.5 < SPEI < -1.99)	60 < D.S. <= 72 MESES	25 < Severidad <= 30
EXTREMADAMENTE SECO (SPEI < -2.0)	> 72 MESES	Severidad > 30



Fuente: Elaboración propia

### b. Índice SPEI – 12 “sequía a largo plazo”

En cuanto a la metodología del SPEI-12, utilizando datos del escenario RCP8.5, lo cual nos indica que un incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero tendrá un gran impacto en el cambio futuro de las sequías a largo plazo, durante el periodo de tiempo 2020 – 2100, estas sequías son mayores que las sequías de corto plazo (Figura 4.31). Una gran porción del área de estudio experimentara crecimientos en la duración y frecuencia. Los mayores cambios en la severidad de sequías se ubican en la región 2 y 5, con un incremento bien definido. Estos incrementos en la severidad serán a un mayor a principios del año 2071 que será considerado como sequías peligrosas.

La región 1 presenta menores duraciones y severidades respecto a las 4 regiones que están acompañados con mayores duraciones y mayores severidades, las sequías más vulnerables se detallan a continuación en un periodo de 10 años comenzado el año 2020.

El periodo de **tiempo de 2020-2030** la sequía más peligrosa en el almacenamiento de agua, ocurre a mediados del año 2025 con una intensidad considerada como moderadamente seco, la región 1 es la más afectada por que presenta una duración de 33 meses y mayor severidad, la región 2 es la menos afectada ya que tiene una intensidad considerada cercano a normal, las 3 regiones restantes presentan sequías similares a la región 1 pero con menores severidades. (Figura 32).

Seguidamente en el periodo de **tiempo 2031-2040** la sequía más peligrosa da comienzo aproximadamente al principio del año 2039 finalizando a los principios del año 2042, con una intensidad considerada como moderadamente seco que afecta a las 5 regiones con duraciones de casi 37 meses y con mayores severidades.

En el periodo de **tiempo 2041 - 2050** hay un considerable aumento de eventos secos, la sequía más peligrosa ocurre a mediados del año 2047 dando por finalizado a los principios del año 2050 con una intensidad considerada extremadamente seco que también afecta en conjunto a las 5 regiones, con duraciones aproximadamente de 30 meses y con severidades a unos mayores presentados en los periodos anteriores.

Para el periodo de **tiempo 2051 – 2060** los eventos secos disminuyen en las 5 regiones y los eventos húmedos van en aumento, pero con poca intensidad en la humedad, pero también hay presencia de eventos seco peligroso de empieza a principios del año 2051 que finaliza también a principios del año 2052 con una intensidad considerada como extremadamente seco, con duraciones de 13 meses y severidades a un mayores.

En el periodo de **tiempo 2061 – 2070** los eventos secos siguen disminuyendo en las 5 regiones y los años húmedos van ganando intensidad, pero también hay presencia de una sequía que se tendrá en cuenta que da comienzo a finales del año 2061 hasta principios del año 2063 con una intensidad considerada muy seco, con

duraciones aproximadamente de 14 meses y con severidades mayores. Podemos concluir que este evento seco es la única que considero muy peligroso en este periodo de tiempo ya que la severidad es preocupante.

En el periodo de **tiempo 2071 – 2080** los eventos secos aumentan preocupantemente en todas las regiones, que da comienzo a principios del año 2072 dando por finalizado a mediados del 2075, con una intensidad considerado muy seco con duraciones de casi 45 meses y severidades considerados peligrosos.

En el periodo de **tiempo 2081 – 2090** los eventos secos siguen en aumento, casi ya no hay presencia de años húmedos excepto la región 1 que a un presenta años húmedos pero con intensidad mínima, la región 2 es la más afectada por ya no presenta años húmedos, en este periodo de tiempo la sequía más peligrosa da comienzo a mitad del año 2082 dando por finalizado a mediados del año 2085 con una intensidad considerada extremadamente seco con duraciones de 48 meses y severidades considerados muy peligrosos.

Finalmente en el periodo de **tiempo 2091-2100**, en estos 10 años casi ya no hay presencia de años húmedos, excepto de la región 1 que intenta presentar años húmedos con intensidad y duración mínima, de la región 2 se puede decir que ya no hay presencia de años húmedos y es la más afectada y preocupante ya que esta parte de la cuenca de estudio no contara con recursos hídricos en el almacenamiento de agua y aguas subterráneas, las 3 regiones restantes son los segundos fuertemente afectados seguido de la región 2 que se considera como zona extremadamente seco.

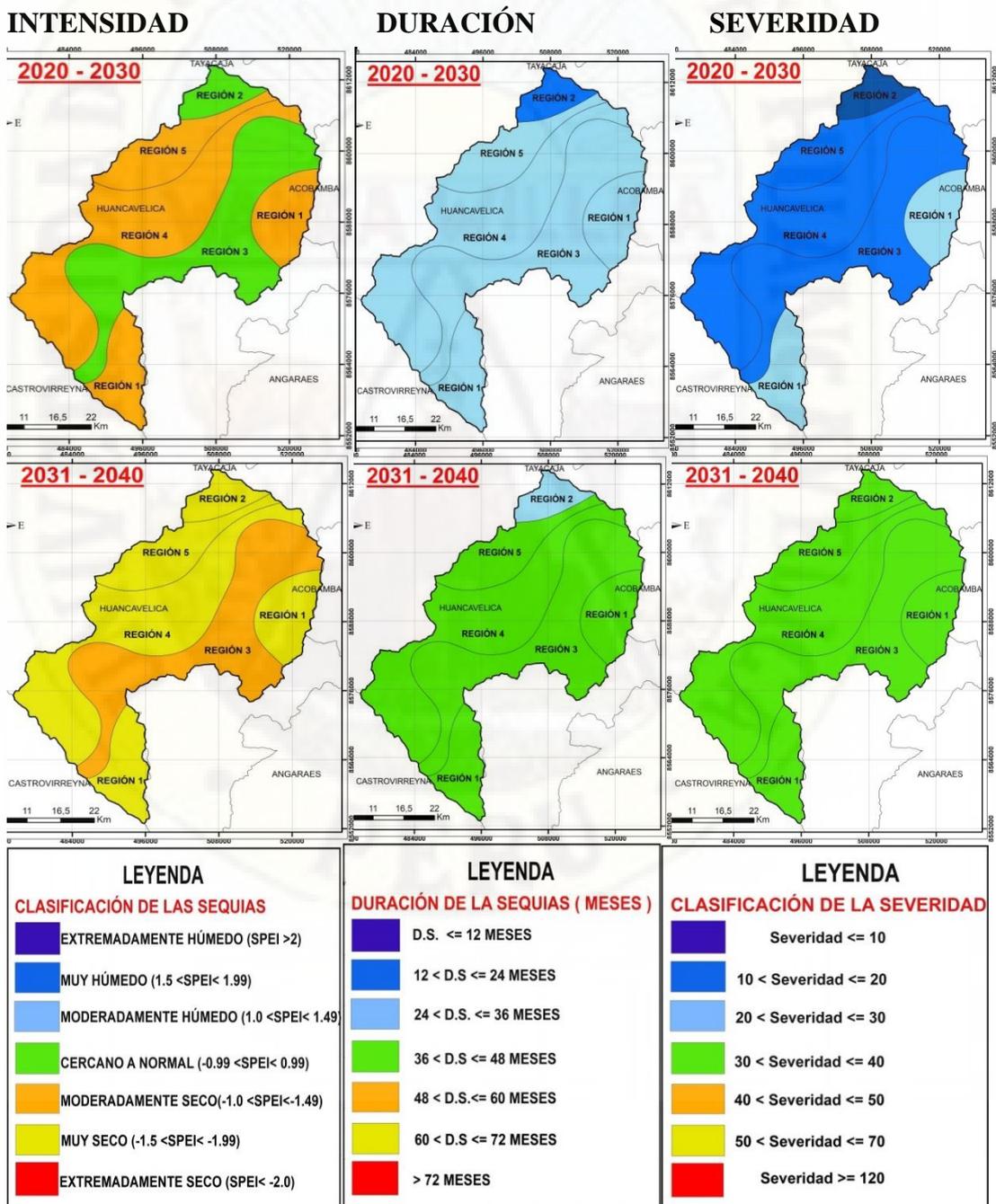
#### **b.1 Caracterización de sequias con el índice SPEI – 12 para cada una de las 5 regiones homogéneas periodo (2020 – 2100).**

Igualmente, que en el anterior análisis se verá como la climatología de sequías basada en el ensamble multi-modelo CMIP5 con escenario climático RCP 8.5 varia a lo largo de los años del siglo XXI, para esto se hará el análisis correspondiente de las características de las sequias de largo plazo (SPEI-12) proyectados para el año 2020-

2100, donde se muestra en las siguientes figuras el Panel izquierdo: Intensidad; panel central: duración; panel derecho: severidad de las sequías.

**Figura 4.32**

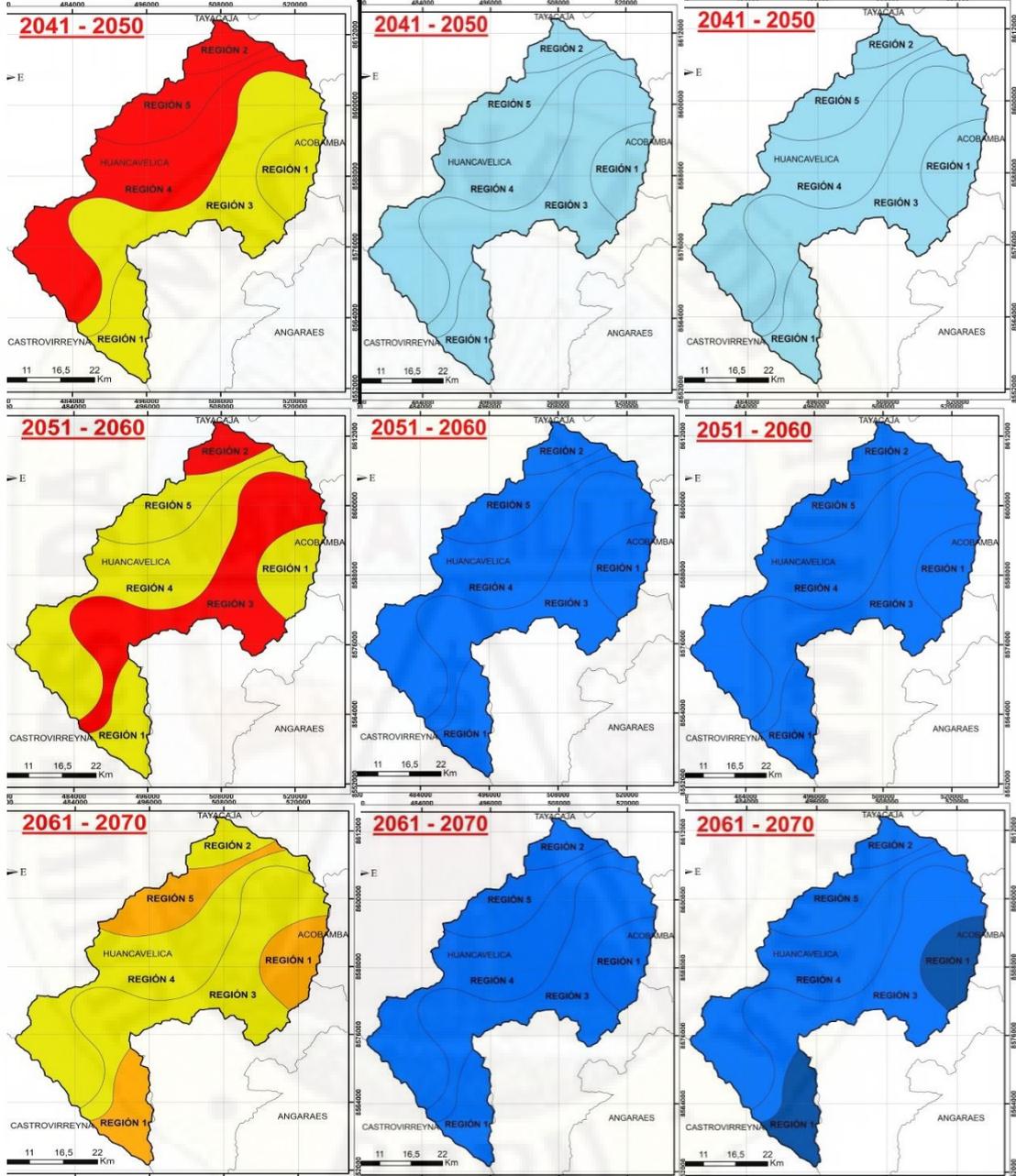
*Cambios en las características de las sequías de largo plazo (SPEI-12) proyectadas para el periodo: a) 2020-2030, b) 2031-2040, c) 2041-2050, d) 2051-2060, e) 2061-2070, d) 2071-2080, e) 2081-2090, f) 2091-2100.*

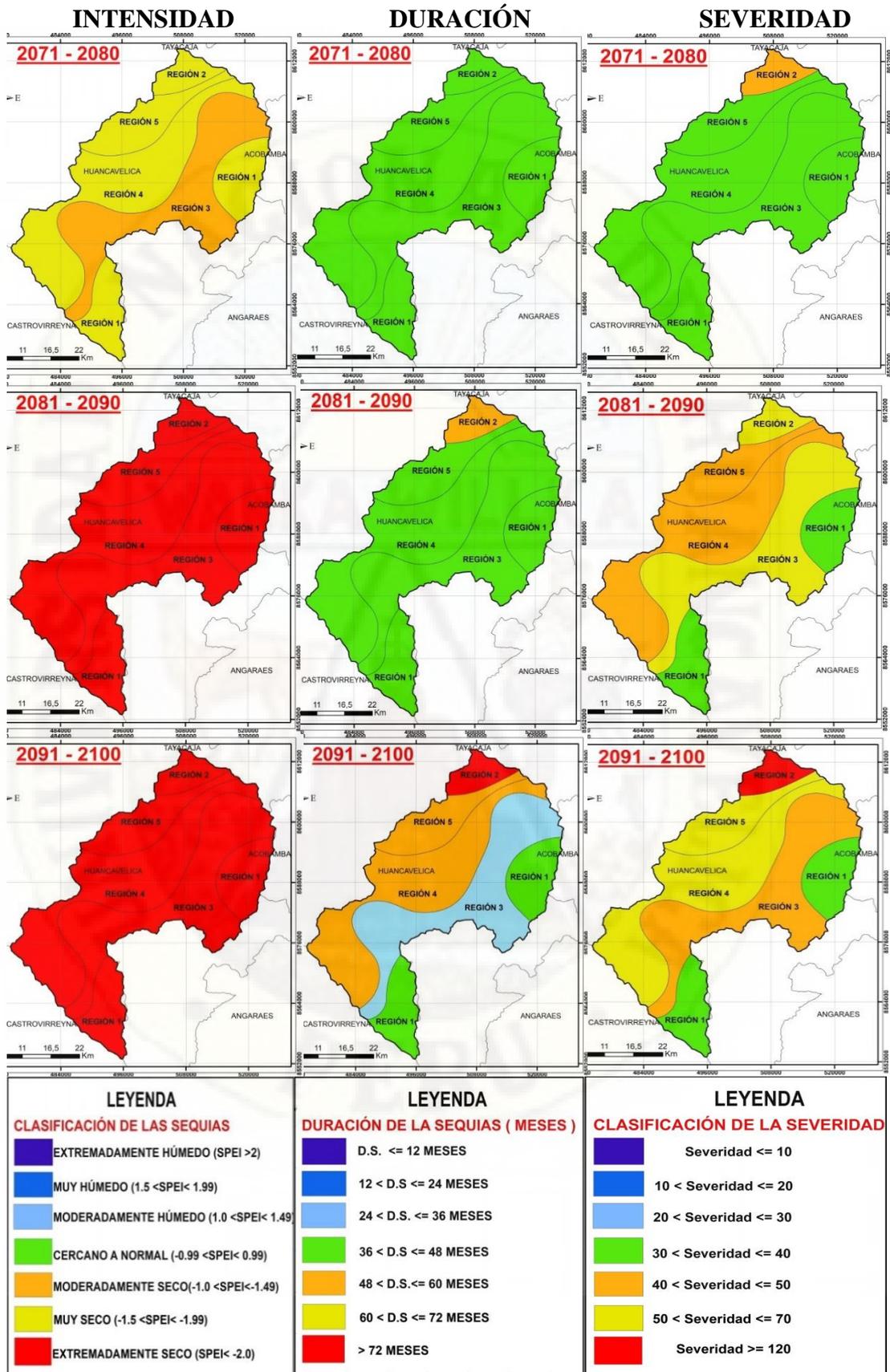


## INTENSIDAD

## DURACIÓN

## SEVERIDAD





Fuente: Elaboración propia.

Los principales resultados indican un posible incremento en la cantidad de eventos de sequía en la cuenca de estudio durante el siglo XXI, los cuales tendrán menores duraciones y mayores severidades, lo que significa sequías peligrosas. El incremento en la temperatura media proyectado para el siglo XXI posiblemente tenga impacto en las variaciones temporales de la evapotranspiración, lo cual podría incrementar la severidad de las sequías agrícolas e hidrológicas.

Por lo tanto, los resultados del análisis de sequías con proyecciones futuras poseen implicancias en el manejo de los recursos hídricos a futuro, los cuales deben ser utilizados efectivamente para la toma de decisiones.

Otro factor que no se tiene en cuenta en este análisis es el incremento poblacional, que prevé un incremento considerable de habitantes para el año 2050 con respecto al año 2020. Según Eden et al. (2013) mencionan que el impacto del cambio climático y su relación con la ocurrencia de sequías sea menor que el impacto asociado al incremento poblacional y el consecuente incremento en la demanda hidrológica. De mantenerse las tendencias recientes en las precipitaciones y las temperaturas medias, es esperable que durante la primera parte del siglo XXI los impactos en el sector socio-económico asociados a las sequías sean mayores a lo esperado hacia fines del siglo XXI, dado que la tendencia hacia un incremento en las precipitaciones podría compensar levemente el incremento poblacional.

La sostenibilidad de la población dependerá de la disponibilidad de áreas propicias para el desarrollo de agricultura, incorporando sistemas de riego para mitigar los períodos secos o abastecer de agua potable para el consumo humano mediante la construcción de reservorios y presas, tomando en cuenta los estudios de sequías del lugar donde se requiera construir estas obras, para así dimensionar correctamente las infraestructuras hidráulicas y no tener problemas a futuro con el abastecimiento de este recurso y también apoyados con las investigaciones de los recursos sub-superficiales, lo cual permitirá un adecuado uso de los recursos.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se analizó la variabilidad espacio-temporal de las sequías en la cuenca del río Ichu para el periodo de 1994 al 2016 utilizando datos generados por teledetección (sensores remotos), y las proyecciones futuras de las sequías utilizando modelos de GCM, para el periodo de 2020 al 2100. Arribando a las siguientes conclusiones:

- La influencia de los datos generados por el sensor remoto PISCOp serie mensual, fue aceptable obteniéndose parámetros calibrados en la escala del índice de eficiencia Nash –Sutcliffe de 0.855 obteniéndose un ajuste excelente y correlación de Pearson de 0.928 obteniéndose una correlación positiva muy alta, entre las precipitaciones registradas por la estación meteorológica Huancavelica y las precipitaciones observadas por PISCOp. De esta manera se concluye que la estimación de índices de sequía a diferentes escalas de tiempo realizada en la cuenca del río Ichu considerando precipitaciones remotas reflejara buena aceptación.

El análisis de sequías se realizó por regiones homogéneas donde la región 1 se considera como la más húmeda con PMA=1109mm y la región 2 como la más seca con PMA= 633 mm de la cuenca de estudio, para estimar las sequías se utilizó primeramente la metodología del SPI en sus 5 escalas de tiempo que representan humedad del suelo a corto plazo, humedad a mediano plazo, escorrentías superficiales, sequías hidrológicas y niveles de reservorios respectivamente donde se identificaron sequías importantes en los años 1996, 2000, 2004, 2006, 2008 y 2016 afectando la cuenca del río Ichu en el almacenamiento de agua, aguas subterráneas, niveles de lagunas, reservorios y caudales de los ríos. Seguidamente se utiliza la metodología SPEI donde solo es la metodología del SPI pero considerando la temperatura máxima mínima y la localización, donde se identificaron sequías importantes en los mismos años que identificó la metodología SPI, donde solo hay pequeñas variaciones como región 1 donde la duración, intensidad y severidad disminuye un poco a la

caracterización con la metodología SPI, en cambio para la región 2 es diferente ya que la duración, intensidad y severidad es un poco mayor a las caracterizadas con la metodología SPI, esto se debe a que la región 1 se encuentra en la parte más alta la cuenca donde las temperaturas son mínimas y la región 2 se encuentra en la parte más baja de la cuenca donde la temperatura es más elevada a las demás regiones también podemos llamarla como la región más cálida dentro de la cuenca.

- El índice SPI a escala de tiempo de 6 meses es la más sobresaliente de la correlación cruzada del SPI es sus 5 escalas temporales, el mismo que presenta 0.73 de coeficiente de correlación y representa correlación positiva alta. Identificando este las 5 sequías más importantes que se dio en cada una de las regiones homogéneas que conforma la cuenca del río Ichu; la sequía de 1995 que afecto la región 1, seguida de la sequía 1998 que afecto la región 2, la sequía 2007 que afecto la región 3 y 5 respectivamente y la de 2016 que afecto la región 1 y 4. Donde esta escala de tiempo de 6 meses también representa al desarrollo y crecimiento de la vegetación en la cuenca de estudio.
- A partir del análisis estadístico realizado sobre la relación de precipitación observa por PISCOp en el punto de registro Choclococha y la precipitación simulada por modelos climáticos globales (GCM) que primeramente pasa por un análisis de reducción de escala utilizando Bias Correction, se verifica mediante los parámetros calibrados en la escala de índice de eficiencia Nash – Sutclie de 0.821 obteniéndose un ajuste excelente y la de correlación de Pearson de 0.907 que representa una correlación positiva muy alta, dando que los datos de los GCM corregidos por Bias Correction son aceptables. De manera la estimación de sequías a corto y largo plazo proyectadas a un futuro realizada en la cuenca del río Ichu reflejara buena aceptación en los resultados utilizando la metodología del índice SPEI (Índice de Precipitación Estandariza y Evapotranspiración).

El análisis de las sequías empiezan del año 2020 al 2100, en vista de los cambios observados en las series de SPEI en las escalas de tiempo a corto y largo plazo se evalúan los cambios futuros en las características de las sequías mediante un ensamble de modelos climáticos globales perteneciente al CMIP5. Los principales resultados indican un incremento en la cantidad de eventos de sequía en la cuenca del río Ichu durante los años 2020 al 2050 los cuales tendrán menores duraciones y mayores severidades, seguido para los años 2051-2070 los eventos secos disminuyen y se observa años húmedos pero con mínima magnitud, seguidamente para los años 2071-2100 los eventos secos van en aumento preocupantemente, con duraciones mayores y severidades a un más mayores, ya casi no hay la existencia de años húmedos, de todas las regiones homogéneas la más afectada es la región 2 y la menos afectada es la región 1.

## RECOMENDACIONES

- Actualmente la densidad de las estaciones meteorológicas que monitorea SENAMHI en el territorio peruano, no cubre los radios de influencia teóricos para una buena representación meteorológica espacial y hay zonas donde no existen información de precipitaciones temperaturas por lo que se recomienda hacer uso de teledetección (sensores remotos), tales como los datos que tiene el producto PISCOp, los mismos que están calibrados y validados con más de 420 estaciones que controla SENAMHI – Perú, para otros territorios, las precipitaciones por sensoramiento remoto deberá ser calibrada y validada bajo una estación meteorológica propios de cada territorios.

Se recomienda usar datos del producto PISCOp para realizar estudios hidrológicos para así diseñar correctamente las infraestructuras hidráulicas, en lugares donde no contamos con una estación meteorológica.

Tomar mayor interés en la gestión local, regional y nacional para la mitigación adecuada de la zona norte de la cuenca del río Ichu también considerada como la Región 2, que corresponde a los distritos Mariscal Cáceres y los distritos seguidos de esta, el mismo que presenta muchos eventos secos con severidades preocupantes.

- Se recomienda usar la escala temporal de 6 meses para la caracterización espacio- temporal de la sequías, donde esta escala de tiempo que representa las sequías agrícolas en su etapa de crecimiento y la cobertura vegetal, ya que el departamento de Huancavelica es una zona agrícola y ganadera en especial la cuenca del río Ichu que es zona netamente ganadera.
- Las consecuencias del cambio climático ocasionan el incremento en la temperatura media proyectada para el siglo XXI tendrá un impacto en la variaciones temporales de la evapotranspiración, lo cual podría incrementar la

severidad de la sequías, no obstante la ocurrencia de sequías afecta tanto a regiones húmedas, áridas y semiáridas, por lo que hay la necesidad de capacitar a la población más vulnerable con mitigación de las sequías en cada región de nuestro territorio, esto nos lleva al desarrollo de obras de infraestructura para el almacenaje y transporte de agua para los periodos de escasez en las precipitaciones, como son los embalses, presas, diques y los canales de riego a fin de prever daños irreversibles. Por lo tanto, los resultados del análisis de sequías proyectadas a un futuro poseen implicancias y anticipación de condiciones del clima para el manejo de los recursos hídricos a futuro, los cuales deben ser utilizados efectivamente para la toma de decisiones.

Para la construcción de infraestructuras hidráulicas se recomienda, primeramente, el análisis de sequías en el lugar donde se requiere construir estas obras, para así llegar a conocer las características de las sequías que se pueden presentar en el lugar y teniendo en cuenta todo ese análisis dimensionar correctamente estas infraestructuras para los años de estiaje que tendríamos a un futuro, y así no tener problemas con la demanda de este recurso que es indispensable para toda la humanidad.

También se recomienda mejorar las parametrizaciones físicas del modelo, así como buscar otras metodologías para la calibración y validación de los datos simulados por los modelos (MCG) para tener una base de datos confiables a fin de ampliar los resultados aceptables para prever condiciones de sequías futuras extremas, se recomienda utilizar la metodología del índice SPEI ya que en su análisis considera como parámetros las temperaturas máximas mínimas y latitud de la zona de estudio, con el fin de ampliar los resultados para un área de estudio.

Realizar modelos completos definiendo una relación entre las sequías climáticas e hidrológicas para determinar el criterio de un diagnóstico real desde los parámetros climatológicos. De esta manera, crear sistemas de alarmas cuando es considerado sequías severas y responder a través de una gestión local (operacional y demanda), gestión regional y gestión de sequía Nacional.

Se recomienda generar a través de la investigación, alertas de peligro y vulnerabilidad futura de las sequías bajo escenarios de cambio climático para una mejor toma de decisión en el proceso de aprovechamiento, manejo, operación y control de los recursos hídricos en la CRM y a nivel nacional.

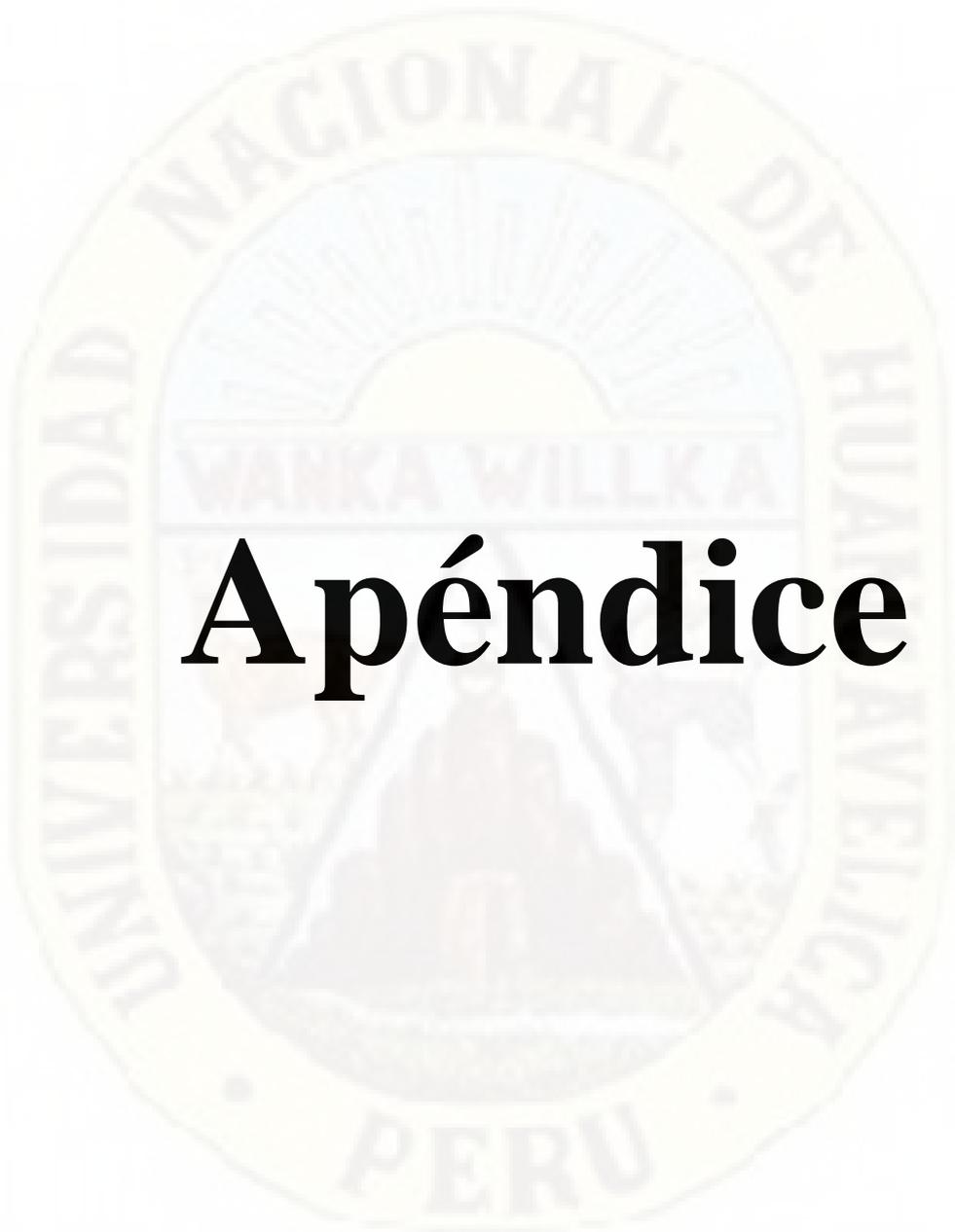


## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acuña, J., Felipe, O., Ordoñez, J. y Arboleda, F. (2011). Análisis regional de frecuencia de precipitación anual para la determinación de mapas de sequías. *Geo-atmosférica RPGA*, (3), 104-115.
2. Aguilar, J. (2015). *Variabilidad Espacio-temporal de la Temperatura de la Superficie del Suelo en el Perú y su relación con los eventos extremos, mediante imágenes MODIS/Terra durante el periodo 2000-2012* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
3. Anculle, T. (2016). *Modelo del inicio de la sequía en la costa norte de Perú a partir del NDVI de los sensores AVHRR, VEGETATION, MODIS y los datos ENOS (1982-2013)* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
4. Ayala, I. (2016). *Predicción de sequías con redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos utilizando precipitaciones por percepción remota* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
5. Brizuela, A., Noretto, M., Aguirre, C., y Bressán, M. (2015). Comparación de datos de precipitación estimada por trmm con mediciones en estaciones meteorológicas de entre ríos. *UD y la geomática*, (10) ,18–26.
6. Beguería, S. and Vicente-Serrano, S. (2013). *Package "SPEI": Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*. Recuperado de <http://sac.csic.es/spei>.
7. Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección* (10), 1-9.
8. Chuvieco, E. 2002. Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Barcelona. *Ariel Ciencia*, p.584. doi: ISBN 978-84-344-8073-3
9. Campos, D. F. (2014). Comparación de tres métodos estadísticos para detección y monitoreo de sequías. *Agrociencia*, 48 (5), 463-476. doi: 48:463-476.2014
10. Chávez, S. (2013). *Caracterización de tormentas en el Valle del Mantaro mediante Sensoramiento Remoto*. (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
11. Campos, A. 2012. Estimación de la severidad de sequías ambientales mediante registros de lluvia mensual. *Tecnología y Ciencias del Agua III*, 123-130.

12. Carbajal, G., Willems, B., y Lavado, W. (2018). Identificación de patrones relevantes a la sequía agrícola a partir del análisis espacial y temporal del Índice de Condición de la Vegetación – Caso estudio: Áreas agrícolas de la región Piura, Perú (2000 - 2017). *ECIPerú*, 15(2), 81-89.
13. Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., y Huang. Y. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, (23), 245-253.
14. Hernández Sampieri, R., Hernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ta ed.). Mc Graw Hill.
15. Huffman, G. (1997). Estimates of root-mean-square random error for finite samples of estimated precipitation. *J. Appl. Meteor*, (36), 1191–1201.
16. Huffman, G. & Bolvin, D. (2014). *Real-Time TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis Data Set Documentation*. doi: TRMM 3B4XRT\_doc\_V7
17. Kogan, F. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15 (11), 91–100.
18. Komuscu, A. (1999). Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in Turkey. *Drought Netw. News* 11 (1), 7-13.
19. Lavado, P., y Condom, T. (2010). Análisis espacio temporal de la precipitación en las zonas de montaña de Perú (1998-2007). *Revista Peruana Geo-Atmosférica* (2), 16-29.
20. Ramos, L. (2013). *Estudio de la utilidad de la Lluvia Estimada de Satélite en la Modelación Hidrológica Distribuida* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
21. Rodríguez, O. E., y Arredondo, H. A. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la nasa, aplicando en estudios de ingeniería civil* (tesis de grado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
22. Rivera, J. A. (2014). *Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras* (tesis doctoral). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
23. Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, (38), 55–94.

24. Sigmur. (2006). *SIG y Teledetección*. Murcia, España.: Universidad de Murcia. Recuperado de <http://www.um.es/geograf/Sigmur/index.html>
25. Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), 622–640.
26. Vicente-Serrano S., Santiago, J., & López-Moreno, J. (2010). A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, (23), 1696-1718.
27. White, D., & Walcott, J. (2009). The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review. *Crop & Pasture Science* (60), 599-616.
28. W. S. L. Casimiro, D. Labat, and J. L. Guyot, “Validación de lluvia utilizando trmm en dos cuencas amazónicas peruanas y su aplicación en modelos mensuales de balance hídrico. validation of rainfall using the trmm for two peruvian amazon basins and its inclusion in monthly wáter balance models,” *Revista Peruana Geo-Atmosférica Rpga* (1), pp. 11–19, 2009.
29. Zuluaga, J. (2009). *Análisis de La Variabilidad Espacio-Temporal de La Sequía En Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.: Masters. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/2275/>.



# Apéndice

**TITULO:**  
**“ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA EN LA CUENCA DEL RÍO ICHU UTILIZANDO DATOS GENERADOS POR TELEDETECCIÓN - HUANCAMELICA”**

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	MARCO TEÓRICO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p><b>Problema general</b></p> <p>¿Cómo la estimación de índices de sequía, utilizando datos generados por teledetección identificara la sequía en la cuenca del río Ichu?</p> <p><b>Problemas específicos:</b></p> <p>a. ¿Cómo es la caracterización espacio – temporal de la sequía mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) a una escala de tiempo ajustado, en la cuenca del río Ichu?</p> <p>b. ¿Cómo son los cambios futuros en las características de las sequías asociados al cambio climático utilizando datos simulados por Modelos Climáticos Globales (GCM) mediante el Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) a una escala de tiempo corto y largo plazo, dentro de la cuenca del río Ichu?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Analizar los índices de sequía, utilizando datos generados por teledetección para identificar las sequías en la cuenca del río Ichu.</p> <p><b>Objetivos Específicos:</b></p> <p>a. Analizar la caracterización espacio- temporal de la sequía mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) a una escala de tiempo ajustado en la cuenca del río Ichu.</p> <p>b. Analizar los cambios futuros en las características de las sequías asociados al cambio climático utilizando datos simulados por Modelos Climáticos Globales (GCM) mediante el índice de precipitación y evapotranspiración estandarizada (SPEI) a una escala de tiempo corto y largo plazo, dentro de la cuenca del río Ichu.</p>	<p><b>Ámbito internacional</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Rivera, (2014), realizo la investigación: “Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras”, en la Universidad de Buenos Aires, Argentina.</li> <li>La Cruz, (2015), realizo la investigación: “Análisis de las sequías meteorológicas en Venezuela utilizando el método L-momentos”, en la Universidad de Carabobo, Venezuela.</li> </ul> <p><b>Ámbito nacional</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Zavala, (2015), realizo la investigación: “Determinación de las frecuencias de sequías en la sub cuenca del rio Huenque con fines de planeamiento de los recursos hídricos para uso en actividades agropecuarias”, en la Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú.</li> <li>Curi, (2017), realizo la investigación: “Caracterización de las sequías hidrológicas en la vertiente peruana del océano pacífico”, en la Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú.</li> </ul>	<p><b>Hipótesis General:</b></p> <p>La estimación de índices de sequía, utilizando datos generados por teledetección podrá identificar la sequía en la cuenca del río Ichu</p> <p><b>Hipótesis Especifico:</b></p> <p>a. El índice de precipitación estandarizada (SPI) a una escala de tiempo ajustado, permite la caracterización espacio-temporal de la sequía en la cuenca del río Ichu.</p> <p>b. El índice de precipitación y evapotranspiración estandarizada (SPEI) permite evaluar los cambios futuros en las características de las sequías asociados al cambio climático utilizando datos simulados por Modelos Climáticos Globales (GCM) dentro de la cuenca del río Ichu.</p>	<p><b>Identificación de Variables</b></p> <p><b>Variable de estudio:</b></p> <p>Estimación de Índices de sequía.</p> <p><b>Dimensiones:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Índice de precipitación estandarizado (SPI).</li> <li>Índice de precipitación y evapotranspiración estandarizada (SPEI).</li> </ul>	<p><b>Tipo</b> : Aplicada.</p> <p><b>Nivel</b> : Explicativo.</p> <p><b>Diseño:</b> No experimental - Longitudinal.</p> <p><b>Población y Muestra:</b></p> <p><b>Población:</b> La población consta de la precipitación observada y estimada en la cuenca del río Ichu, ubicada en el departamento de Huancavelica, en un área de 1384.06 Km2.</p> <p><b>Muestra:</b> En este caso la muestra la constituye la precipitación mensual.</p> <p><b>No Probabilística</b>, conformada por las Sub cuencas del río Ichu.</p> <p><b>Técnicas e Instrumentos de Recolección Datos</b></p> <p><b>Técnicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Recolección de datos para la evaluación del índice de sequía. <ul style="list-style-type: none"> <li>Mediciones realizadas por la SENAMHI, producto PISCOp y Modelos Climáticos Globales (GCM).</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Instrumentos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Instrumentos para análisis de datos <ul style="list-style-type: none"> <li>ArcGIS 10.5.</li> <li>RStudio.</li> <li>Hydracces</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Técnicas de Procesamiento de datos.</b></p> <p>Análisis estadístico y exploratorio. (diagrama de caja (Boxplot), análisis de saltos, mediantes de dispersión, coeficiente de Nash y coeficiente de correlación de Pearson (r))</p> <p><b>Para el análisis e interpretación de datos</b></p> <p>Los resultados se desarrollaran a través de un lenguaje de programación y módulos (cuadros, gráficos de frecuencia, histogramas, etc.)</p>

## CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividad – tiempo	CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN INFORME DESARROLLO DE TESIS							
	MES 1	MES2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7	MES8
Esquema de informe de tesis	X							
Recolección de datos	X	X						
Procesamiento de datos		X	X					
Descripción de resultados			X	X				
Contrastación de hipótesis					X			
Discusión de resultados					X	X		
Conclusiones y recomendaciones							X	
Revisión y ajustes finales docente metodólogo y especialista								X
Revisión jurado								X

Fuente: Elaboración propia.

## PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Nº ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	S/ COSTO UNITARIO	S/ COSTO TOTAL
<b>1.</b>	<b>Materiales y útiles</b>			<b>S/. 3200.00</b>
1.1.	Libros y separatas	Total	Total	S/. 300.00
1.2.	Útiles de escritorio	Total	Total	S/. 300.00
1.3	Laptop	1	2500	S/. 2500.00
1.4	Otros	Total	Total	S/. 100.00
<b>2.</b>	<b>Servicios</b>			<b>S/. 1618.00</b>
2.1.	Fotocopias	Total	Total	S/. 150.00
2.2.	Servicio de internet e telefónica	8 meses	S/. 100.00	S/. 800.00
2.3.	Pasajes y viajes de transporte	24 viajes	S/. 15.00	S/. 360.00
2.4.	Impresiones	Total	Total	S/. 100.00
2.5.	Anillados	8	S/. 3.00	S/. 24.00
2.6.	Empastado	3	S/. 20	S/. 60.00
2.7.	Otros			S/. 100.00
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>S/. 4818.00</b>

Fuente: Elaboración propia

## A.1. REGISTRO DE PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MÁXIMAS MÍNIMAS POR PISCOp.

### A.1.1. REGISTRO -PRECIPITACIONES

REGISTRO DE PRECIPITACIONES POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO ACORIA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	334.68	176.87	225.56	75.13	32.87	10.02	4.06	16.72	49.97	66.77	40.85	114.53
1995	202.37	194.68	320.73	38.93	23.97	6.71	14.00	5.15	45.06	39.21	75.53	78.23
1996	218.14	246.63	149.33	32.84	14.39	4.48	5.60	40.38	42.69	51.60	49.82	118.37
1997	163.14	128.48	142.79	47.38	25.37	5.80	0.76	62.99	61.81	62.05	86.03	131.16
1998	192.32	140.53	136.38	33.70	4.00	13.51	0.02	23.21	10.27	92.44	43.36	128.38
1999	224.10	237.98	146.45	73.32	22.46	4.12	16.49	3.85	61.82	56.12	41.38	117.64
2000	192.38	183.53	137.36	41.19	34.35	7.17	24.54	27.36	17.22	85.71	28.14	115.57
2001	243.36	115.21	186.80	31.76	53.02	2.05	49.44	24.57	49.03	80.92	82.59	125.55
2002	131.36	243.46	245.13	72.75	33.16	5.64	68.19	30.67	82.51	85.36	92.38	152.16
2003	177.84	274.39	312.90	50.29	19.18	0.00	3.77	77.71	46.25	33.01	26.48	168.82
2004	110.69	186.58	216.77	23.60	14.31	27.88	25.88	35.31	50.43	59.52	48.65	236.59
2005	144.20	103.69	216.32	33.12	11.28	0.40	9.23	8.48	40.75	86.07	33.41	144.52
2006	216.49	121.54	156.28	60.08	3.76	15.58	1.13	49.35	28.32	71.41	76.41	138.27
2007	138.00	83.83	243.78	46.38	23.70	0.06	15.33	7.27	33.60	66.85	46.08	121.81
2008	236.91	179.59	94.90	23.58	15.66	10.08	4.17	15.77	29.43	76.56	39.03	107.73
2009	174.89	221.05	163.01	64.66	28.83	5.07	38.82	23.90	49.37	59.41	120.10	199.78
2010	356.57	139.05	190.25	45.16	16.52	5.16	1.48	16.90	19.15	78.89	31.32	178.45
2011	325.43	255.49	335.99	80.27	24.24	2.09	14.97	10.44	43.63	54.96	74.33	150.91
2012	149.76	242.15	130.66	126.15	12.95	17.29	10.60	4.07	57.93	57.51	78.65	205.29
2013	207.23	197.09	195.01	23.70	49.52	8.49	8.82	56.74	35.38	79.31	60.27	146.76
2014	223.26	165.53	344.23	54.54	34.38	3.41	13.67	24.67	82.09	60.86	61.14	115.91
2015	227.63	168.13	148.91	40.63	31.19	10.84	6.31	37.33	33.93	38.20	51.29	151.52
2016	94.75	195.46	82.36	61.54	13.95	3.67	7.23	15.55	16.60	83.00	27.20	103.01

REGISTRO DE PRECIPITACIONES POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO CACHIMAYO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	213.93	273.90	274.74	69.93	23.92	5.22	3.68	5.22	33.19	38.46	46.95	72.07
1995	114.33	143.78	275.52	52.14	19.25	1.62	2.14	2.18	36.63	38.16	73.48	89.70
1996	168.18	253.43	153.99	49.70	16.99	1.95	2.10	13.95	25.24	41.01	32.12	140.85
1997	105.85	198.65	113.65	42.00	19.41	1.55	0.22	27.34	42.71	52.98	83.83	145.70
1998	207.81	279.21	231.54	55.17	1.69	7.76	0.00	6.32	14.61	49.38	51.68	104.20
1999	134.42	250.47	198.16	90.31	25.18	5.39	4.10	4.49	44.70	70.78	42.29	147.08
2000	174.31	201.74	253.34	39.45	13.88	3.29	9.31	8.10	16.45	80.28	21.71	131.64
2001	235.99	168.41	294.46	47.30	19.94	2.82	9.97	5.85	40.44	43.76	94.08	74.79
2002	80.21	273.83	327.37	74.68	15.51	6.74	13.97	7.71	36.43	57.23	77.83	114.81
2003	158.37	272.70	298.12	38.35	11.67	1.64	2.02	11.75	18.68	22.92	26.29	176.63
2004	62.08	188.80	179.76	29.94	5.67	11.18	7.66	12.36	42.00	40.65	56.91	184.35
2005	108.13	141.32	189.54	30.89	7.77	1.28	1.02	3.40	25.27	34.51	28.32	136.18
2006	168.44	183.74	203.45	67.20	1.62	7.28	0.24	12.25	32.07	40.46	68.66	110.91
2007	127.42	109.02	260.45	56.67	7.82	0.99	2.68	2.54	25.86	37.68	45.47	117.50
2008	204.56	184.66	133.60	30.38	6.24	7.37	2.71	6.30	15.65	46.58	33.01	100.99
2009	170.02	220.38	119.51	55.25	20.63	3.13	9.46	6.50	26.14	53.49	124.25	180.74
2010	213.55	158.76	209.07	48.66	13.26	4.79	0.48	4.72	12.90	45.00	41.63	156.98
2011	170.01	275.71	211.03	81.26	12.89	0.88	4.21	3.94	26.21	33.39	53.98	161.87
2012	106.02	274.85	163.31	120.26	9.05	6.87	2.93	1.73	42.44	51.23	69.96	166.49
2013	141.49	201.11	259.40	33.91	41.92	6.19	3.94	11.27	28.66	62.03	49.04	142.94
2014	200.25	198.79	296.04	47.18	21.88	2.51	3.23	9.84	44.57	48.27	32.29	122.48
2015	186.75	156.81	173.78	49.09	21.37	5.86	2.04	8.70	28.37	26.35	28.72	92.30
2016	64.50	196.77	153.78	77.63	7.38	4.40	2.70	3.21	16.06	29.10	8.44	102.75

REGISTRO DE PRECIPITACIÓN POR PISCO <sub>p</sub> EN EL PUNTO DE REGISTRO CHOCLOCOCHA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	249.64	305.50	292.26	99.24	37.79	5.78	6.02	3.76	42.91	37.87	75.68	49.15
1995	113.34	174.96	270.68	91.64	37.29	1.49	1.12	0.56	48.64	44.94	100.92	77.35
1996	295.43	211.39	207.46	114.40	34.28	1.81	1.02	10.11	36.06	50.14	60.63	110.89
1997	213.37	210.83	154.86	73.37	27.28	0.76	0.10	21.07	57.24	56.68	106.18	138.19
1998	311.98	321.47	298.85	101.11	2.61	11.08	0.00	5.33	30.32	56.47	109.41	84.45
1999	234.11	241.93	294.96	153.45	41.58	7.29	2.93	6.01	63.65	91.14	85.76	118.81
2000	219.82	231.94	314.74	76.31	20.64	2.82	7.08	4.61	34.32	88.54	34.89	124.38
2001	335.74	188.51	272.15	83.70	27.35	4.44	6.57	4.07	65.54	48.44	129.28	64.72
2002	137.92	279.47	265.83	105.18	24.51	9.90	8.49	4.71	44.85	67.22	85.24	88.85
2003	215.91	253.04	292.20	78.51	27.21	0.90	1.27	7.81	28.68	21.71	51.48	121.90
2004	100.50	220.11	204.21	67.86	10.50	9.91	5.89	11.69	67.35	52.76	97.26	127.49
2005	167.86	150.58	193.30	59.33	12.38	0.97	0.60	3.20	33.47	38.96	55.27	119.63
2006	225.70	196.95	246.03	115.98	2.63	5.24	0.04	7.49	51.06	55.00	110.87	97.91
2007	205.66	157.37	282.15	110.04	13.87	1.82	2.22	2.15	36.64	39.82	75.88	97.95
2008	283.93	191.93	170.83	67.14	12.75	5.89	1.42	4.51	27.36	59.24	55.99	84.25
2009	262.34	235.99	151.05	103.33	33.69	3.16	5.96	4.98	33.80	56.22	163.69	148.97
2010	341.13	202.97	223.21	100.34	19.20	6.51	0.17	4.78	20.33	56.50	71.79	131.20
2011	255.45	272.07	249.65	118.64	18.99	0.91	3.12	3.16	37.84	45.43	82.82	133.74
2012	175.85	282.82	242.10	159.79	19.99	5.24	1.47	1.16	56.53	66.25	94.81	146.46
2013	220.65	202.21	297.25	73.06	75.46	4.81	3.53	6.45	35.15	78.26	60.25	128.84
2014	367.59	218.64	286.47	72.25	34.38	2.29	1.79	10.05	41.55	61.93	52.73	113.13
2015	274.47	173.94	178.26	85.81	32.39	5.61	1.41	5.80	37.27	33.34	38.15	62.15
2016	104.15	168.42	185.14	100.75	12.96	4.41	1.71	2.02	29.13	32.63	10.36	99.97

REGISTRO DE PRECIPITACIÓN POR PISCO <sub>p</sub> EN EL PUNTO DE REGISTRO CUNYACC												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	168.98	199.85	169.89	100.18	39.02	7.32	3.99	14.33	65.72	48.89	47.29	136.97
1995	120.23	142.28	162.08	60.06	22.88	1.48	5.45	5.39	55.88	41.68	74.39	103.41
1996	102.67	193.10	95.05	42.55	14.87	2.67	3.15	65.59	52.84	48.31	38.15	205.64
1997	93.36	140.52	72.15	65.82	22.01	3.30	0.31	69.21	79.56	57.69	102.16	199.94
1998	174.70	156.45	135.28	71.92	2.34	12.43	0.00	20.69	27.05	75.30	51.82	179.87
1999	122.89	232.86	107.94	108.24	32.71	6.08	11.24	5.28	53.55	59.29	35.94	209.29
2000	144.48	189.20	117.55	48.30	30.39	7.92	25.84	32.77	21.79	99.02	25.33	203.61
2001	174.35	113.95	176.32	50.49	53.56	3.00	25.31	19.67	94.56	64.77	92.42	214.24
2002	84.05	241.72	248.40	87.21	33.64	7.95	37.76	25.12	94.99	87.62	97.55	281.06
2003	143.46	336.84	218.46	76.00	21.87	0.89	3.02	59.97	46.68	39.51	28.79	299.06
2004	71.73	166.00	134.96	37.52	12.69	27.39	16.81	38.96	67.70	43.05	46.33	343.12
2005	77.95	109.89	159.81	50.12	16.68	1.22	4.25	7.71	51.48	63.91	35.13	242.61
2006	127.92	124.28	134.65	94.19	2.03	11.90	0.54	55.46	38.91	58.37	72.56	215.18
2007	97.03	76.83	186.09	64.95	23.34	0.68	8.24	8.09	53.99	60.00	47.12	212.93
2008	160.39	156.68	79.16	31.64	11.84	10.54	5.13	16.26	49.29	59.74	32.98	202.80
2009	129.09	231.84	94.13	79.58	35.67	5.53	22.77	22.35	75.66	54.24	129.24	395.97
2010	179.34	130.47	147.69	63.94	27.36	6.70	0.61	12.87	23.87	51.75	45.45	275.42
2011	193.52	231.03	165.38	91.25	26.22	1.55	9.73	11.99	59.19	36.21	65.12	256.91
2012	95.88	231.24	118.39	194.17	13.76	13.16	6.39	4.68	89.28	48.66	72.03	350.40
2013	139.57	176.58	247.02	38.55	57.95	5.25	5.17	44.17	77.53	74.60	58.24	211.56
2014	156.98	177.58	270.62	65.99	45.13	3.02	4.78	26.61	114.25	65.59	52.54	176.06
2015	161.72	152.10	119.77	43.51	42.23	7.71	4.11	26.28	46.75	37.34	43.33	214.68
2016	45.73	150.47	54.89	89.65	10.07	4.32	5.23	10.91	24.49	62.21	14.21	161.16

REGISTRO DE PRECIPITACIÓN POR PISCO <sub>p</sub> EN EL PUNTO DE REGISTRO HUANCVELICA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	218.98	227.88	210.28	69.69	35.61	9.31	6.48	10.89	56.53	73.24	49.23	83.70

1995	166.60	190.14	237.60	55.66	19.21	3.17	6.11	3.25	75.28	63.33	85.35	45.85
1996	146.91	266.87	103.81	28.77	11.60	3.24	6.41	23.18	45.16	59.74	42.86	99.22
1997	96.71	162.07	92.76	40.80	21.63	5.29	0.39	43.24	67.09	81.44	109.48	109.49
1998	183.37	206.18	141.27	53.90	2.25	10.73	0.00	22.15	18.89	101.28	62.40	88.05
1999	150.28	255.01	128.77	79.22	28.51	5.76	9.05	5.94	66.63	80.98	52.73	89.43
2000	170.43	203.42	148.53	38.89	21.70	6.33	22.62	18.76	23.43	123.09	32.55	86.69
2001	196.81	127.64	213.71	39.24	34.94	1.62	24.36	13.87	71.81	84.41	122.28	68.90
2002	100.57	293.94	286.72	71.03	20.84	6.91	42.41	15.44	79.05	112.93	138.92	102.86
2003	169.85	418.63	259.57	68.84	10.83	1.82	3.01	41.21	35.26	46.88	30.70	167.95
2004	77.21	180.10	160.06	24.21	7.18	25.67	17.08	29.40	53.90	59.74	58.35	181.69
2005	111.74	139.43	172.42	36.40	11.32	1.65	2.79	4.41	44.72	79.51	40.66	88.43
2006	154.85	148.70	152.01	88.38	1.57	16.99	0.40	27.02	33.68	79.56	86.52	80.90
2007	104.48	86.11	227.90	45.43	17.68	0.50	5.58	3.86	46.87	75.14	61.04	76.07
2008	182.35	186.95	101.22	19.14	5.42	11.07	6.36	12.01	32.52	82.69	41.25	67.07
2009	140.04	247.91	124.57	62.99	25.52	4.18	22.59	10.40	52.21	78.82	159.56	155.75
2010	257.33	149.75	175.24	49.96	15.46	5.59	0.65	8.68	19.96	76.59	62.98	143.87
2011	196.85	287.87	201.30	75.56	19.15	1.49	8.62	6.59	49.80	50.36	81.97	136.01
2012	115.50	256.06	120.61	146.86	10.84	13.38	7.25	2.38	71.75	66.01	105.43	123.19
2013	152.23	198.43	218.74	36.78	56.77	6.36	5.54	25.39	53.67	91.13	68.05	107.60
2014	187.38	210.47	338.00	47.30	34.07	2.90	7.12	17.22	92.22	79.42	59.37	101.23
2015	179.70	158.15	146.98	42.26	31.89	7.83	4.12	18.37	40.82	48.03	49.51	96.17
2016	61.31	210.31	84.75	65.69	9.29	4.13	5.22	7.43	17.37	73.46	19.31	72.93

**REGISTRO DE PRECIPITACIONES POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO LA MEJORADA**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	183.43	120.89	139.17	43.78	15.43	6.39	0.85	11.83	35.83	59.23	31.56	67.54
1995	100.04	165.65	208.00	22.42	12.38	6.86	6.60	4.34	31.73	32.40	54.44	50.15
1996	107.78	172.21	104.87	22.44	6.80	2.80	2.53	20.92	32.01	43.53	45.46	63.34
1997	102.31	95.84	108.86	31.13	15.36	3.24	0.31	40.47	45.66	47.51	63.16	85.28
1998	111.83	104.21	88.62	15.36	2.43	9.17	0.00	15.67	6.71	82.46	35.61	80.02
1999	106.55	180.17	82.57	47.60	9.24	1.73	7.04	2.09	53.61	47.03	36.07	65.50
2000	93.61	116.66	89.15	26.65	18.29	2.94	9.53	19.61	13.97	65.04	23.55	63.85
2001	120.17	77.06	105.35	19.27	21.01	1.16	20.93	16.17	30.97	66.66	61.46	71.08
2002	55.46	175.64	137.39	44.87	13.60	2.70	30.92	21.78	61.04	64.39	69.27	79.17
2003	81.72	156.72	179.99	30.95	8.78	0.00	1.43	46.57	34.52	23.98	25.49	86.11
2004	60.76	120.42	120.22	15.21	6.73	15.71	10.69	18.84	37.02	54.07	44.26	121.19
2005	74.13	70.07	128.34	19.54	4.40	0.15	5.34	6.28	29.67	74.81	27.48	79.16
2006	119.91	88.19	99.05	29.46	2.69	9.88	0.25	28.60	19.88	54.58	68.53	77.54
2007	70.88	63.14	148.88	29.31	12.40	0.00	5.68	4.25	22.99	52.88	37.35	68.43
2008	129.17	123.64	53.94	16.35	8.00	7.59	0.96	10.64	21.41	61.21	33.48	56.97
2009	91.83	137.98	91.68	36.72	12.20	2.69	15.68	15.22	37.24	45.10	95.01	97.50
2010	166.97	100.56	110.21	28.72	5.45	3.09	0.44	11.93	12.24	61.69	17.90	90.28
2011	177.19	182.83	182.44	53.68	11.23	1.41	6.00	7.38	32.92	49.56	56.62	81.39
2012	69.63	162.76	71.24	71.63	6.31	14.02	4.99	2.57	36.88	47.57	69.31	112.81
2013	113.12	139.07	105.95	12.88	22.53	6.89	4.87	33.30	26.02	59.82	47.21	96.56
2014	106.45	117.58	205.72	41.40	15.23	2.23	8.80	15.69	63.72	43.85	51.12	65.93
2015	123.99	130.06	102.86	28.14	11.52	8.11	3.69	26.76	25.34	32.21	49.26	95.26
2016	53.79	146.77	59.49	42.37	6.40	1.92	3.93	9.95	13.77	70.78	24.67	67.42

**REGISTRO DE PRECIPITACION POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO LACHOCC**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	170.17	261.97	287.38	87.45	28.13	7.62	7.54	8.04	40.97	48.02	50.86	93.54
1995	112.61	147.04	296.89	65.18	19.52	2.56	5.46	2.78	46.69	45.30	83.84	102.08
1996	112.42	251.20	156.06	56.44	16.51	2.34	4.61	21.10	31.56	44.74	40.85	173.20
1997	88.81	187.88	120.18	54.14	19.66	2.61	0.65	37.39	50.34	62.56	101.28	161.49
1998	181.03	255.57	234.46	65.16	1.92	10.48	0.15	10.17	18.54	62.96	62.04	130.87
1999	119.76	263.47	193.60	103.93	28.76	6.07	10.14	5.85	56.41	80.04	51.43	174.32

2000	137.52	197.88	251.61	45.74	16.74	4.55	21.37	13.44	19.40	94.14	27.14	155.12
2001	189.23	149.29	303.57	53.60	26.86	3.10	23.38	9.12	51.06	53.51	112.50	103.20
2002	67.25	286.95	369.91	87.11	17.78	9.31	32.53	11.29	49.52	74.37	99.69	150.71
2003	132.03	319.76	343.65	55.38	11.90	1.96	3.82	20.38	23.83	28.50	31.48	235.05
2004	58.70	177.29	198.63	32.15	6.45	17.49	16.08	19.64	47.17	47.37	63.31	249.19
2005	86.60	135.25	223.43	38.92	9.51	1.59	2.28	4.57	32.93	44.21	35.00	167.35
2006	135.46	173.94	207.61	86.81	1.69	10.82	0.83	19.70	35.20	49.15	80.62	138.01
2007	100.49	95.20	281.70	63.32	10.06	0.90	6.29	3.95	32.53	46.82	54.61	145.21
2008	168.25	183.50	140.30	32.21	6.17	9.92	6.42	9.59	20.35	54.58	39.40	124.20
2009	138.25	227.47	134.77	68.43	23.19	4.00	22.26	9.20	35.79	58.26	149.92	242.12
2010	184.00	151.19	231.97	60.43	14.31	6.01	1.29	6.54	16.29	54.93	52.58	202.96
2011	150.71	271.01	244.24	90.85	15.66	1.17	9.67	5.76	32.95	38.52	67.47	204.89
2012	90.73	268.89	167.47	156.33	10.54	10.06	6.19	2.30	54.25	53.78	91.71	211.17
2013	112.68	202.60	271.55	40.86	57.79	8.24	8.19	19.50	37.95	74.98	61.89	171.04
2014	152.19	203.35	364.02	55.83	31.35	3.35	7.28	15.65	62.84	58.19	41.13	150.67
2015	157.01	159.00	185.76	61.73	32.74	7.91	3.94	13.85	33.58	33.81	41.64	124.83
2016	52.12	191.39	141.33	89.47	10.43	5.62	5.17	5.00	17.38	40.79	10.87	122.78

REGISTRO DE PRECIPITACION POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO TINYACLLA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	198.45	172.57	231.50	72.94	27.30	7.26	5.02	13.28	42.72	51.84	45.72	83.35
1995	145.48	160.03	282.94	52.25	19.79	4.33	9.48	5.21	54.18	40.58	78.13	49.22
1996	128.22	218.89	130.55	36.75	11.99	2.54	6.48	25.27	37.89	44.77	48.01	87.89
1997	85.68	127.12	121.31	43.78	18.95	3.57	0.64	49.95	54.04	55.23	96.99	103.14
1998	151.98	160.72	136.57	46.97	2.85	8.75	0.04	27.79	11.52	72.01	55.84	84.62
1999	125.12	235.69	140.37	81.34	20.61	3.62	12.61	5.65	58.16	58.26	48.88	79.96
2000	132.31	156.04	155.31	40.48	23.80	4.56	25.75	21.88	16.09	86.58	32.60	78.22
2001	159.38	95.15	206.53	39.00	31.91	1.37	36.01	17.06	46.22	61.72	100.06	66.05
2002	74.69	239.69	276.25	73.92	20.86	5.11	57.63	20.15	66.91	78.40	113.16	92.29
2003	121.00	265.88	286.87	63.09	11.33	1.09	3.67	51.35	30.00	27.23	32.62	136.79
2004	66.12	131.54	176.79	22.05	7.96	21.35	20.70	30.11	39.45	47.46	56.79	161.75
2005	90.85	102.93	193.71	36.15	10.68	1.05	4.73	6.16	37.09	61.47	36.94	79.50
2006	134.15	120.62	156.49	73.14	2.60	12.19	0.78	35.07	27.12	56.41	83.71	76.72
2007	86.23	66.27	245.68	48.40	17.36	0.23	7.92	4.99	33.03	49.86	53.92	71.44
2008	146.45	159.72	100.19	22.62	6.85	9.35	6.06	14.14	22.69	57.13	40.65	60.06
2009	108.84	193.92	146.92	69.72	23.31	3.63	31.72	14.33	37.44	52.19	143.44	122.22
2010	202.14	118.30	188.93	50.21	12.23	4.21	1.08	11.33	14.79	61.67	49.74	111.41
2011	163.55	226.21	259.44	83.05	18.40	1.20	12.02	8.08	39.34	39.60	75.18	117.20
2012	90.71	205.82	119.82	144.70	10.19	13.21	9.46	2.94	55.14	44.37	92.55	115.19
2013	127.49	162.49	182.96	30.52	44.80	6.60	8.49	40.78	35.42	71.20	60.57	100.93
2014	138.82	143.16	349.28	53.34	28.47	2.47	10.93	22.72	78.64	54.04	53.06	85.51
2015	146.16	132.46	160.04	44.78	24.80	7.73	5.37	26.91	34.47	35.57	52.13	95.84
2016	54.76	176.19	97.27	67.53	10.17	2.95	6.42	11.94	14.69	62.01	21.96	64.67

REGISTRO DE PRECIPITACIONES POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO YAULI												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	251.56	225.13	187.40	87.86	49.07	9.06	4.81	17.79	64.05	69.58	44.25	173.98
1995	166.35	203.03	218.26	51.56	33.45	3.25	10.49	6.77	58.41	46.84	76.75	107.30
1996	155.17	273.28	109.45	45.88	20.15	3.94	4.48	60.43	54.48	62.45	45.79	216.19
1997	118.57	155.35	92.64	57.35	29.35	5.07	0.54	77.13	78.98	71.71	95.57	205.52
1998	194.58	170.45	128.49	57.75	3.23	13.80	0.05	26.26	20.11	93.41	49.93	188.19
1999	176.97	246.78	126.74	94.13	44.54	6.40	15.98	5.09	59.01	64.21	42.42	211.51
2000	182.39	236.82	121.27	45.44	49.52	10.67	30.22	36.54	19.37	105.66	26.69	202.19
2001	226.07	144.50	200.81	43.99	83.84	3.24	40.17	26.47	78.35	83.18	95.04	233.85
2002	108.33	290.45	270.10	90.05	48.55	7.38	58.12	33.82	99.29	101.64	103.25	287.24
2003	160.05	400.31	264.67	65.04	31.06	0.92	3.97	88.79	54.41	45.50	27.75	307.35

2004	90.08	222.73	171.06	35.00	19.50	31.81	25.33	46.26	64.26	54.92	48.39	397.58
2005	100.00	132.46	179.40	46.40	19.88	1.22	7.78	9.24	50.88	87.23	39.14	256.47
2006	168.87	140.11	151.35	88.57	3.40	15.99	1.09	64.54	37.08	75.54	75.44	245.99
2007	123.52	93.15	212.74	61.55	30.36	0.71	13.50	9.97	49.59	72.29	47.96	225.77
2008	201.95	202.44	89.71	28.53	19.77	11.52	5.81	18.99	42.27	77.41	37.27	211.15
2009	160.65	284.54	134.64	77.28	47.03	6.72	33.76	29.78	74.62	64.15	134.90	411.49
2010	252.40	160.79	173.96	58.06	33.25	7.07	1.22	18.34	22.49	70.63	43.31	300.01
2011	260.25	301.26	236.19	91.32	34.86	2.35	14.08	13.34	56.26	45.70	77.72	258.94
2012	123.92	288.60	133.47	172.55	20.36	17.85	9.58	5.68	82.31	58.12	78.33	375.54
2013	183.55	211.34	257.30	38.05	75.45	6.86	8.06	55.94	58.64	92.37	62.09	223.62
2014	186.94	213.43	337.35	62.13	64.97	3.23	8.64	26.09	102.83	76.01	63.56	180.35
2015	206.47	190.24	139.46	39.33	57.16	9.93	6.54	33.54	43.20	46.72	54.48	237.09
2016	65.76	201.56	64.33	82.87	17.13	3.59	7.95	14.02	23.14	91.58	23.33	174.08

### A.1.2. REGISTRO –TEMPERATURAS MÁXIMAS MENSUAL.

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO CACHIMAYO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	11.70	11.60	11.56	12.52	13.65	13.53	14.10	14.79	14.86	15.57	14.88	14.12
1995	13.07	12.67	12.00	14.01	14.42	13.85	14.30	15.57	14.46	15.66	15.20	13.50
1996	11.71	11.88	12.43	12.97	13.52	13.30	13.58	14.03	15.01	15.70	14.84	13.25
1997	11.60	11.80	12.39	12.69	13.39	14.16	14.97	13.42	15.26	15.85	15.53	15.06
1998	14.06	14.19	14.22	15.62	15.61	14.02	14.78	15.16	15.86	15.41	15.42	13.82
1999	12.70	11.00	11.10	12.30	13.67	13.79	13.28	14.54	14.47	13.67	15.48	13.50
2000	11.18	11.06	11.52	13.16	14.18	13.66	13.40	14.26	15.62	14.21	16.53	13.86
2001	11.16	11.69	11.68	13.19	13.63	13.69	13.40	13.86	14.55	15.23	15.50	14.59
2002	13.98	11.84	12.59	13.00	13.51	13.51	12.24	13.83	13.92	14.73	14.53	14.35
2003	13.56	12.96	12.14	12.98	13.58	14.23	13.79	14.02	14.53	16.01	16.58	14.10
2004	13.57	12.42	13.08	13.82	14.63	13.25	13.05	13.25	14.08	15.03	15.81	14.09
2005	13.59	13.37	13.26	14.29	14.95	14.50	14.62	15.21	14.64	14.96	16.21	13.58
2006	12.43	12.71	12.39	13.16	14.02	13.83	14.08	14.49	15.15	15.54	14.66	14.81
2007	14.07	13.35	12.11	13.09	14.09	14.55	13.33	14.92	13.80	15.51	15.87	14.33
2008	11.64	11.98	12.24	13.78	13.88	14.15	14.30	15.09	15.62	14.93	16.29	14.14
2009	12.74	12.08	12.26	13.07	13.84	14.45	13.92	15.26	15.79	16.21	15.29	14.11
2010	12.99	13.61	13.92	14.58	14.66	14.69	15.36	15.65	15.53	15.45	16.21	13.25
2011	12.23	11.00	11.51	12.82	13.74	14.09	13.67	14.84	14.57	15.31	16.03	13.30
2012	12.97	11.53	11.95	12.49	13.54	13.41	14.43	14.86	15.19	15.77	15.58	12.87
2013	12.99	12.45	13.30	14.61	14.01	13.03	13.07	14.40	15.32	15.13	16.00	13.54
2014	12.82	13.09	12.93	13.60	13.91	15.29	14.02	14.27	14.21	14.75	16.07	14.47
2015	12.48	12.57	12.41	12.44	13.72	15.04	14.98	15.40	15.73	15.52	16.45	14.75

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO CARHUARAZO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	12.65	12.44	12.43	13.38	14.69	14.72	15.26	16.09	15.90	16.58	15.87	15.02
1995	13.88	13.52	12.88	15.01	15.33	14.93	15.54	16.90	15.54	16.69	16.20	14.41
1996	12.57	12.86	13.28	13.84	14.54	14.37	14.72	15.20	16.08	16.74	16.00	14.13
1997	12.59	12.73	13.30	13.62	14.23	15.23	16.05	14.26	16.41	17.00	16.46	15.84
1998	14.92	14.99	14.97	16.53	16.54	15.07	15.98	16.47	17.11	16.46	16.56	14.66
1999	13.51	11.92	11.97	13.07	14.57	14.94	14.38	15.72	15.67	14.61	16.48	14.34
2000	12.15	11.93	12.35	13.96	15.12	14.67	14.41	15.41	16.70	15.11	17.68	14.80
2001	12.10	12.57	12.54	14.01	14.52	14.68	14.59	14.87	15.58	16.14	16.53	15.43
2002	14.82	12.70	13.51	14.06	14.43	14.54	13.23	14.99	14.92	15.67	15.28	15.25
2003	14.54	13.72	12.99	13.74	14.48	15.35	14.86	15.02	15.55	17.10	17.71	14.94
2004	14.61	13.24	13.92	14.79	15.57	14.31	14.19	14.32	15.08	16.04	16.79	14.88

2005	14.66	14.30	14.02	15.21	15.90	15.62	15.76	16.45	15.84	15.93	17.31	14.44
2006	13.43	13.63	13.24	14.06	14.99	15.00	15.28	15.58	16.26	16.67	15.43	15.71
2007	14.95	14.40	13.07	13.92	15.06	15.69	14.62	16.30	14.88	16.67	16.90	15.29
2008	12.60	12.91	13.16	14.77	14.94	15.31	15.59	16.56	16.84	15.94	17.40	15.18
2009	13.50	13.06	13.07	13.86	14.81	15.60	15.09	16.57	17.04	17.32	16.24	15.03
2010	13.86	14.50	14.77	15.46	15.69	15.91	16.81	17.05	16.81	16.71	17.49	14.17
2011	13.22	11.96	12.35	13.67	14.66	15.29	14.94	16.26	15.76	16.57	17.13	14.17
2012	14.09	12.30	12.81	13.43	14.47	14.36	15.52	16.16	16.34	16.96	16.61	13.68
2013	13.83	13.34	14.16	15.52	14.95	14.07	14.17	15.67	16.55	16.18	16.96	14.36
2014	13.73	13.91	13.89	14.39	14.90	16.53	15.26	15.59	15.54	15.78	17.27	15.45
2015	13.50	13.60	13.37	13.27	14.65	16.08	16.18	16.68	16.93	16.59	17.57	15.56

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO CHOCLOCOCHA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	12.13	12.01	11.97	12.87	13.98	13.78	14.29	15.02	15.11	15.91	15.28	14.49
1995	13.41	13.14	12.43	14.37	14.73	14.10	14.50	15.80	14.71	16.04	15.58	13.92
1996	12.10	12.33	12.86	13.29	13.87	13.53	13.84	14.26	15.30	16.10	15.32	13.66
1997	12.02	12.31	12.85	13.11	13.75	14.43	15.23	13.60	15.61	16.29	15.96	15.53
1998	14.52	14.66	14.68	16.05	15.94	14.33	15.06	15.47	16.24	15.84	15.91	14.18
1999	13.13	11.42	11.52	12.64	14.00	14.04	13.48	14.75	14.83	14.03	15.85	13.86
2000	11.52	11.45	11.95	13.53	14.48	13.79	13.50	14.47	15.90	14.54	16.93	14.22
2001	11.59	12.13	12.10	13.53	13.88	13.84	13.61	13.99	14.83	15.57	15.93	14.96
2002	14.34	12.24	13.02	13.38	13.81	13.74	12.37	14.04	14.19	15.05	14.89	14.75
2003	14.01	13.32	12.55	13.32	13.91	14.49	13.97	14.18	14.77	16.41	17.01	14.54
2004	13.97	12.81	13.51	14.20	14.92	13.50	13.25	13.47	14.44	15.48	16.27	14.54
2005	14.08	13.82	13.64	14.70	15.24	14.78	14.82	15.44	14.92	15.31	16.60	13.99
2006	12.86	13.21	12.85	13.56	14.35	14.15	14.31	14.74	15.48	15.98	15.04	15.23
2007	14.46	13.81	12.57	13.48	14.42	14.80	13.57	15.19	14.10	15.91	16.28	14.75
2008	12.07	12.46	12.74	14.19	14.25	14.40	14.53	15.49	15.99	15.34	16.81	14.63
2009	13.20	12.60	12.75	13.51	14.20	14.73	14.17	15.60	16.20	16.62	15.78	14.63
2010	13.43	14.10	14.39	15.00	15.01	15.03	15.64	15.97	15.98	15.90	16.77	13.74
2011	12.79	11.54	11.97	13.27	14.09	14.37	13.93	15.16	15.01	15.82	16.49	13.78
2012	13.49	11.95	12.46	12.99	13.93	13.67	14.65	15.12	15.60	16.22	16.05	13.32
2013	13.46	12.90	13.78	15.02	14.32	13.32	13.33	14.69	15.70	15.58	16.45	14.02
2014	13.32	13.61	13.44	14.03	14.26	15.57	14.32	14.62	14.66	15.22	16.63	14.96
2015	12.98	13.03	12.89	12.90	14.08	15.28	15.18	15.65	16.05	15.96	16.86	15.19

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO CUNYACC												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	12.66	12.38	12.37	13.38	14.88	15.06	15.61	16.52	16.18	16.82	16.03	15.06
1995	13.82	13.45	12.84	15.11	15.47	15.20	15.92	17.34	15.82	16.91	16.39	14.45
1996	12.52	12.88	13.22	13.89	14.72	14.66	15.05	15.56	16.38	17.01	16.25	14.16
1997	12.61	12.70	13.28	13.64	14.31	15.50	16.38	14.50	16.73	17.31	16.61	15.84
1998	14.95	14.92	14.88	16.61	16.70	15.33	16.35	16.89	17.49	16.72	16.81	14.68
1999	13.44	11.90	11.90	13.03	14.72	15.29	14.71	16.09	16.02	14.79	16.69	14.37
2000	12.16	11.85	12.29	13.96	15.29	14.91	14.71	15.75	17.01	15.24	17.93	14.87
2001	12.10	12.51	12.47	13.99	14.65	14.96	14.97	15.13	15.83	16.30	16.73	15.48
2002	14.79	12.66	13.52	14.22	14.55	14.79	13.48	15.31	15.16	15.84	15.30	15.32
2003	14.60	13.64	12.95	13.69	14.61	15.66	15.16	15.28	15.82	17.37	17.99	14.98
2004	14.68	13.17	13.88	14.87	15.74	14.60	14.54	14.63	15.33	16.27	16.98	14.88
2005	14.73	14.29	13.94	15.28	16.07	15.94	16.11	16.84	16.23	16.12	17.58	14.48
2006	13.50	13.60	13.18	14.10	15.17	15.35	15.66	15.87	16.57	16.96	15.50	15.80
2007	14.96	14.48	13.10	13.91	15.25	16.06	15.05	16.77	15.15	17.01	17.13	15.40
2008	12.63	12.90	13.16	14.91	15.18	15.69	16.05	17.06	17.25	16.17	17.67	15.32
2009	13.44	13.09	12.99	13.84	14.99	15.97	15.48	17.00	17.43	17.61	16.37	15.08
2010	13.86	14.49	14.74	15.52	15.91	16.29	17.34	17.51	17.17	17.07	17.83	14.22

2011	13.27	11.94	12.29	13.68	14.80	15.67	15.37	16.75	16.10	16.93	17.40	14.19
2012	14.22	12.20	12.76	13.46	14.58	14.59	15.85	16.59	16.67	17.34	16.82	13.65
2013	13.79	13.31	14.15	15.59	15.11	14.34	14.47	16.11	16.95	16.43	17.15	14.35
2014	13.73	13.88	13.92	14.34	15.09	16.97	15.70	16.04	15.97	16.00	17.59	15.58
2015	13.59	13.68	13.39	13.25	14.79	16.37	16.57	17.09	17.28	16.85	17.84	15.59

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO CHOCLOCOCHA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	12.13	12.01	11.97	12.87	13.98	13.78	14.29	15.02	15.11	15.91	15.28	14.49
1995	13.41	13.14	12.43	14.37	14.73	14.10	14.50	15.80	14.71	16.04	15.58	13.92
1996	12.10	12.33	12.86	13.29	13.87	13.53	13.84	14.26	15.30	16.10	15.32	13.66
1997	12.02	12.31	12.85	13.11	13.75	14.43	15.23	13.60	15.61	16.29	15.96	15.53
1998	14.52	14.66	14.68	16.05	15.94	14.33	15.06	15.47	16.24	15.84	15.91	14.18
1999	13.13	11.42	11.52	12.64	14.00	14.04	13.48	14.75	14.83	14.03	15.85	13.86
2000	11.52	11.45	11.95	13.53	14.48	13.79	13.50	14.47	15.90	14.54	16.93	14.22
2001	11.59	12.13	12.10	13.53	13.88	13.84	13.61	13.99	14.83	15.57	15.93	14.96
2002	14.34	12.24	13.02	13.38	13.81	13.74	12.37	14.04	14.19	15.05	14.89	14.75
2003	14.01	13.32	12.55	13.32	13.91	14.49	13.97	14.18	14.77	16.41	17.01	14.54
2004	13.97	12.81	13.51	14.20	14.92	13.50	13.25	13.47	14.44	15.48	16.27	14.54
2005	14.08	13.82	13.64	14.70	15.24	14.78	14.82	15.44	14.92	15.31	16.60	13.99
2006	12.86	13.21	12.85	13.56	14.35	14.15	14.31	14.74	15.48	15.98	15.04	15.23
2007	14.46	13.81	12.57	13.48	14.42	14.80	13.57	15.19	14.10	15.91	16.28	14.75
2008	12.07	12.46	12.74	14.19	14.25	14.40	14.53	15.49	15.99	15.34	16.81	14.63
2009	13.20	12.60	12.75	13.51	14.20	14.73	14.17	15.60	16.20	16.62	15.78	14.63
2010	13.43	14.10	14.39	15.00	15.01	15.03	15.64	15.97	15.98	15.90	16.77	13.74
2011	12.79	11.54	11.97	13.27	14.09	14.37	13.93	15.16	15.01	15.82	16.49	13.78
2012	13.49	11.95	12.46	12.99	13.93	13.67	14.65	15.12	15.60	16.22	16.05	13.32
2013	13.46	12.90	13.78	15.02	14.32	13.32	13.33	14.69	15.70	15.58	16.45	14.02
2014	13.32	13.61	13.44	14.03	14.26	15.57	14.32	14.62	14.66	15.22	16.63	14.96
2015	12.98	13.03	12.89	12.90	14.08	15.28	15.18	15.65	16.05	15.96	16.86	15.19
2016	65.76	201.56	64.33	82.87	17.13	3.59	7.95	14.02	23.14	91.58	23.33	14.08

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO HUANCAVELICA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	14.49	14.39	14.38	15.21	16.26	16.14	16.51	17.21	17.11	17.79	17.22	16.68
1995	15.81	15.30	14.78	16.68	16.84	16.34	16.79	18.00	16.78	17.81	17.52	16.01
1996	14.46	14.72	15.10	15.55	16.04	15.70	15.90	16.31	17.19	17.78	17.18	15.74
1997	14.52	14.57	15.15	15.39	15.80	16.64	17.22	15.54	17.57	18.10	17.72	17.23
1998	16.49	16.69	16.63	18.00	17.92	16.32	17.12	17.50	18.10	17.54	17.69	16.20
1999	15.30	13.85	13.99	14.84	16.00	16.22	15.62	16.84	16.76	15.96	17.75	15.91
2000	14.22	14.04	14.25	15.64	16.59	16.24	15.80	16.59	17.81	16.47	18.89	16.44
2001	14.04	14.57	14.51	15.84	16.13	16.02	15.81	16.21	16.76	17.39	17.70	16.95
2002	16.66	14.65	15.36	15.74	16.12	15.96	14.71	16.25	16.18	17.04	16.71	16.80
2003	16.24	15.62	14.91	15.55	16.01	16.70	16.17	16.29	16.79	18.23	18.81	16.40
2004	16.48	15.19	15.70	16.50	17.07	15.64	15.45	15.48	16.16	17.08	17.88	16.32
2005	16.38	16.09	15.85	16.83	17.38	16.92	16.95	17.58	16.97	17.14	18.51	16.02
2006	15.27	15.37	15.07	15.78	16.46	16.24	16.47	16.73	17.37	17.73	16.76	17.15
2007	16.66	16.21	14.93	15.67	16.51	16.92	15.87	17.25	16.08	17.64	18.02	16.72
2008	14.41	14.65	14.88	16.26	16.29	16.47	16.65	17.39	17.72	17.01	18.32	16.60
2009	15.11	14.75	14.81	15.50	16.25	16.76	16.23	17.51	17.92	18.34	17.40	16.38
2010	15.52	16.12	16.41	16.95	17.01	17.00	17.74	17.99	17.66	17.68	18.30	15.64
2011	14.81	13.81	14.21	15.29	16.06	16.47	16.08	17.20	16.70	17.44	18.18	15.65
2012	15.75	14.24	14.57	15.11	15.94	15.69	16.64	17.18	17.29	17.91	17.75	15.26
2013	15.55	15.18	15.80	17.06	16.39	15.37	15.34	16.68	17.52	17.21	18.00	15.89
2014	15.38	15.51	15.50	15.99	16.27	17.56	16.29	16.56	16.51	16.86	18.22	16.77
2015	15.14	15.34	15.11	14.97	16.10	17.34	17.39	17.80	18.07	17.71	18.75	17.00

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO LA MEJORADA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	19.45	19.53	19.62	20.13	20.76	20.48	20.42	20.84	20.68	21.41	21.26	21.38
1995	21.10	20.10	19.83	21.26	21.00	20.41	20.57	21.47	20.42	21.20	21.32	20.41
1996	19.46	19.70	19.94	20.11	20.32	19.63	19.46	19.64	20.53	21.00	20.91	20.17
1997	19.74	19.62	20.07	20.20	20.05	20.76	20.72	19.10	21.10	21.63	21.31	21.03
1998	20.80	21.26	20.98	22.14	21.86	19.94	20.66	20.79	21.38	20.90	21.37	20.39
1999	19.84	19.07	19.26	19.55	20.07	20.09	19.28	20.30	20.20	19.82	21.44	20.30
2000	19.65	19.49	19.32	20.12	20.76	20.63	19.72	20.22	21.18	20.39	22.54	21.02
2001	19.41	19.94	19.89	20.96	20.63	20.07	19.49	20.05	20.18	20.74	21.25	21.08
2002	21.43	19.78	20.48	20.62	21.05	19.98	18.77	19.92	19.80	20.96	20.70	21.13
2003	21.04	20.55	20.02	20.19	20.27	20.74	19.99	19.89	20.41	21.76	22.33	20.57
2004	21.47	20.18	20.43	21.16	21.19	19.45	19.16	18.85	19.38	20.35	21.04	20.14
2005	20.99	20.75	20.48	21.10	21.36	20.72	20.50	21.00	20.35	20.51	21.92	20.18
2006	20.33	20.04	19.89	20.44	20.55	20.01	20.05	19.97	20.61	20.91	20.27	20.92
2007	21.11	21.00	19.94	20.22	20.49	20.56	19.54	20.22	19.44	20.61	21.24	20.51
2008	19.12	19.22	19.38	20.24	19.99	19.85	19.83	20.11	20.48	20.10	21.13	20.46
2009	19.19	19.25	19.31	19.68	20.18	20.14	19.51	20.51	20.72	21.43	20.62	20.00
2010	19.89	20.25	20.61	20.84	20.60	20.23	20.93	21.13	20.57	20.73	21.19	19.64
2011	19.22	18.68	19.01	19.42	19.75	19.86	19.54	20.23	19.56	20.26	21.31	19.57
2012	20.39	19.17	19.09	19.52	19.78	19.17	19.75	20.29	20.21	20.94	21.03	19.38
2013	19.96	19.96	20.09	21.11	20.28	19.00	18.72	19.85	20.64	20.27	20.99	19.90
2014	19.80	19.65	19.79	20.02	19.96	20.70	19.40	19.72	19.68	19.96	21.22	20.37
2015	19.60	19.97	19.67	19.35	20.00	20.89	20.95	21.22	21.44	20.98	22.24	20.74

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO LACHOCC												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	12.59	12.48	12.45	13.37	14.49	14.36	14.87	15.58	15.58	16.28	15.63	14.94
1995	13.93	13.50	12.88	14.87	15.19	14.65	15.11	16.37	15.21	16.36	15.95	14.30
1996	12.58	12.78	13.27	13.79	14.33	14.07	14.33	14.77	15.71	16.37	15.60	14.04
1997	12.53	12.68	13.27	13.55	14.15	14.96	15.69	14.07	16.00	16.58	16.23	15.74
1998	14.82	14.98	14.98	16.38	16.35	14.76	15.54	15.93	16.59	16.10	16.15	14.58
1999	13.52	11.90	12.02	13.10	14.41	14.58	14.03	15.29	15.21	14.40	16.21	14.26
2000	12.15	12.00	12.38	13.94	14.95	14.48	14.16	15.01	16.32	14.93	17.31	14.68
2001	12.07	12.60	12.57	14.02	14.42	14.43	14.18	14.61	15.26	15.92	16.20	15.34
2002	14.82	12.73	13.46	13.87	14.33	14.29	13.02	14.61	14.64	15.46	15.21	15.12
2003	14.41	13.79	13.00	13.78	14.35	15.02	14.55	14.75	15.25	16.73	17.30	14.82
2004	14.50	13.29	13.91	14.67	15.40	14.01	13.82	13.96	14.75	15.68	16.47	14.79
2005	14.49	14.24	14.08	15.10	15.73	15.28	15.38	15.99	15.40	15.66	16.96	14.36
2006	13.33	13.55	13.23	13.98	14.79	14.61	14.85	15.21	15.86	16.25	15.32	15.55
2007	14.89	14.26	13.00	13.90	14.86	15.31	14.16	15.69	14.53	16.20	16.56	15.10
2008	12.52	12.83	13.08	14.58	14.66	14.91	15.07	15.86	16.31	15.60	16.96	14.93
2009	13.49	12.94	13.06	13.83	14.61	15.20	14.66	16.01	16.49	16.90	15.98	14.84
2010	13.79	14.42	14.72	15.34	15.42	15.45	16.16	16.43	16.24	16.20	16.91	14.01
2011	13.06	11.89	12.36	13.60	14.48	14.87	14.46	15.62	15.27	16.02	16.73	14.05
2012	13.86	12.38	12.78	13.33	14.31	14.14	15.15	15.63	15.88	16.47	16.29	13.63
2013	13.80	13.32	14.10	15.39	14.77	13.78	13.80	15.14	16.04	15.80	16.65	14.28
2014	13.64	13.85	13.76	14.36	14.67	16.04	14.76	15.02	14.97	15.43	16.77	15.21
2015	13.33	13.46	13.28	13.24	14.48	15.78	15.76	16.19	16.49	16.22	17.20	15.46

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÁXIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO TINYACLLA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	13.71	13.63	13.61	14.55	15.69	15.69	16.11	16.74	16.56	17.25	16.61	16.12
1995	15.18	14.48	13.98	16.04	16.27	15.84	16.37	17.56	16.24	17.23	16.95	15.32

1996	13.76	13.93	14.33	14.92	15.44	15.22	15.36	15.77	16.59	17.14	16.48	15.04
1997	13.75	13.70	14.29	14.61	15.08	16.07	16.60	14.90	16.89	17.39	17.03	16.44
1998	15.58	15.83	15.76	17.24	17.32	15.69	16.57	16.87	17.43	16.83	16.97	15.58
1999	14.60	13.11	13.23	14.15	15.39	15.76	15.16	16.35	16.13	15.33	17.20	15.30
2000	13.65	13.40	13.50	14.97	16.07	15.98	15.52	16.14	17.33	15.89	18.34	15.86
2001	13.32	13.84	13.77	15.26	15.70	15.70	15.37	15.84	16.26	16.85	17.12	16.35
2002	16.08	13.94	14.60	15.13	15.60	15.53	14.36	15.78	15.63	16.53	16.18	16.16
2003	15.52	14.92	14.15	14.92	15.44	16.26	15.78	15.86	16.32	17.63	18.21	15.71
2004	15.74	14.47	14.92	15.81	16.54	15.15	14.97	14.91	15.49	16.34	17.16	15.58
2005	15.58	15.31	15.14	16.11	16.85	16.43	16.53	17.10	16.38	16.57	17.93	15.40
2006	14.51	14.52	14.26	15.07	15.84	15.68	15.95	16.18	16.74	17.04	16.12	16.48
2007	15.94	15.43	14.14	14.97	15.92	16.44	15.40	16.70	15.48	16.97	17.39	16.02
2008	13.63	13.80	14.00	15.49	15.66	15.99	16.12	16.69	17.03	16.33	17.55	15.80
2009	14.25	13.86	13.96	14.68	15.57	16.19	15.65	16.87	17.22	17.68	16.68	15.57
2010	14.68	15.23	15.54	16.16	16.30	16.41	17.20	17.41	16.91	16.96	17.50	14.85
2011	13.91	12.86	13.34	14.49	15.39	15.88	15.53	16.57	15.92	16.66	17.48	14.87
2012	14.89	13.41	13.63	14.24	15.19	15.10	16.08	16.61	16.59	17.21	17.03	14.48
2013	14.67	14.35	14.95	16.34	15.79	14.77	14.77	16.09	16.83	16.49	17.32	15.08
2014	14.49	14.59	14.63	15.19	15.58	16.96	15.65	15.86	15.73	16.07	17.44	15.97
2015	14.29	14.52	14.25	14.15	15.42	16.85	16.95	17.28	17.45	16.98	18.18	16.25

REGISTRO DE TEMPERATURAS MAXIMAS POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO YAULI												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	15.32	15.09	15.10	15.95	17.17	17.08	17.32	18.21	17.94	18.71	18.10	17.42
1995	16.42	16.03	15.54	17.56	17.66	17.16	17.66	19.00	17.61	18.72	18.46	16.82
1996	15.13	15.59	15.84	16.32	16.92	16.52	16.75	17.19	18.10	18.81	18.25	16.54
1997	15.41	15.40	16.00	16.22	16.58	17.51	18.06	16.32	18.53	19.17	18.62	18.05
1998	17.39	17.44	17.35	18.90	18.83	17.26	18.05	18.58	19.25	18.57	18.84	17.02
1999	16.03	14.62	14.74	15.58	16.87	17.18	16.44	17.76	17.78	16.86	18.66	16.64
2000	15.00	14.64	14.92	16.32	17.39	16.91	16.39	17.39	18.66	17.26	19.90	17.27
2001	14.87	15.24	15.18	16.46	16.78	16.71	16.59	16.76	17.48	18.19	18.63	17.63
2002	17.32	15.26	16.09	16.53	16.82	16.70	15.20	17.06	16.94	17.85	17.41	17.72
2003	17.17	16.32	15.71	16.22	16.85	17.60	16.88	16.91	17.52	19.24	19.85	17.21
2004	17.34	15.83	16.42	17.37	17.87	16.49	16.26	16.27	17.06	18.08	18.89	17.03
2005	17.29	16.89	16.47	17.66	18.22	17.85	17.73	18.49	17.95	18.01	19.53	16.77
2006	16.09	16.15	15.81	16.60	17.37	17.24	17.37	17.58	18.32	18.78	17.47	17.98
2007	17.43	17.13	15.78	16.42	17.42	17.90	16.81	18.35	16.91	18.73	19.01	17.62
2008	15.26	15.44	15.71	17.19	17.30	17.45	17.69	18.60	18.82	17.99	19.40	17.55
2009	15.81	15.65	15.53	16.27	17.20	17.81	17.17	18.58	18.99	19.42	18.24	17.26
2010	16.30	16.90	17.22	17.79	18.00	18.05	18.87	19.05	18.67	18.78	19.47	16.50
2011	15.70	14.64	14.94	16.08	16.94	17.49	17.05	18.34	17.73	18.54	19.17	16.41
2012	16.77	14.88	15.38	15.98	16.80	16.46	17.45	18.16	18.31	19.07	18.76	15.95
2013	16.27	15.91	16.58	17.88	17.25	16.22	16.16	17.70	18.56	18.14	18.85	16.65
2014	16.21	16.28	16.40	16.74	17.17	18.61	17.28	17.64	17.69	17.86	19.43	17.79
2015	15.98	16.27	15.92	15.70	16.91	18.12	18.18	18.73	19.01	18.68	19.69	17.72

### A.1.3. REGISTRO –TEMPERATURAS MÍNIMAS

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÍNIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO ACORIA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	6.81	7.13	6.28	5.40	2.95	0.52	0.41	1.46	4.10	4.15	5.46	6.31
1995	6.56	6.35	6.77	4.64	2.58	1.71	2.12	2.91	4.58	4.94	5.68	5.49
1996	6.46	6.84	6.81	5.92	3.42	1.12	0.92	3.42	4.12	5.06	4.78	6.03
1997	6.88	6.61	5.69	4.31	3.16	0.66	1.50	3.39	4.90	5.85	6.48	7.57
1998	8.87	8.82	8.13	6.34	3.19	3.07	1.84	3.94	4.15	6.19	5.53	6.29
1999	6.76	7.34	6.88	5.80	3.77	1.72	1.61	1.76	4.03	5.21	5.01	6.03
2000	6.76	6.86	6.44	5.12	3.60	2.26	1.55	3.09	3.80	5.27	3.84	5.40

2001	6.60	7.01	6.68	4.19	3.56	1.90	2.46	1.56	4.74	5.66	6.09	5.88
2002	5.90	7.25	6.95	5.93	3.81	2.46	2.85	2.73	4.85	5.92	6.15	6.66
2003	7.13	7.42	6.94	5.54	4.15	1.91	1.59	2.92	3.95	4.99	4.94	7.06
2004	7.25	7.18	6.87	5.03	2.87	1.76	2.32	2.75	4.62	5.72	5.61	6.75
2005	6.43	7.44	7.35	5.64	2.61	0.78	1.20	1.73	4.69	5.43	5.42	6.82
2006	7.00	7.54	7.50	5.83	1.98	2.67	0.77	3.58	4.46	5.68	6.57	6.82
2007	7.74	7.03	7.40	6.27	3.79	1.75	2.12	2.59	4.48	5.02	5.22	5.70
2008	7.34	6.60	5.75	4.34	2.26	1.83	1.26	2.56	3.84	5.85	6.04	6.33
2009	7.01	7.56	6.83	5.77	3.64	1.56	2.27	2.71	4.71	5.48	6.85	7.23
2010	7.54	8.29	7.74	6.23	4.33	2.74	1.08	1.92	4.07	5.02	5.19	6.63
2011	6.79	7.14	6.80	5.71	3.36	1.97	1.65	2.73	4.79	5.07	6.21	6.47
2012	6.45	6.96	6.69	6.12	3.26	2.22	1.38	1.83	3.96	5.57	6.28	7.49
2013	6.93	7.67	7.42	4.51	4.21	3.42	2.26	2.72	4.06	5.97	5.86	6.93
2014	7.20	7.23	6.71	5.67	4.07	2.61	2.62	2.82	5.22	5.63	5.80	6.86
2015	6.65	7.12	7.02	6.24	4.87	2.85	1.96	2.78	5.48	6.30	6.32	6.92

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÍNIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO CACHIMAYO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	0.52	0.81	-0.07	-0.94	-4.66	-7.37	-6.97	-5.94	-2.75	-3.00	-1.33	-0.33
1995	-0.08	-0.76	0.14	-2.69	-5.39	-6.77	-6.24	-4.96	-2.48	-2.46	-1.18	-1.34
1996	-0.05	0.55	0.03	-0.57	-4.06	-7.22	-7.35	-4.02	-3.39	-2.26	-2.12	-0.23
1997	0.63	0.24	-1.20	-3.16	-5.31	-8.71	-7.02	-4.58	-2.04	-1.68	-0.72	0.38
1998	2.50	2.08	1.28	-1.27	-5.43	-4.88	-6.27	-4.10	-3.44	-0.85	-1.43	-0.12
1999	0.36	1.11	0.71	-0.57	-3.59	-6.79	-6.24	-5.64	-3.60	-1.13	-2.45	-0.49
2000	0.72	0.65	0.18	-1.74	-4.04	-6.11	-6.58	-4.58	-3.67	-1.27	-3.29	-0.82
2001	0.66	0.95	0.64	-2.10	-3.80	-5.59	-5.88	-5.89	-2.15	-1.10	-0.53	-0.71
2002	-0.33	1.15	0.67	-0.59	-3.23	-4.82	-4.66	-4.70	-1.99	-0.47	-0.34	0.22
2003	0.83	0.97	0.68	-1.35	-3.28	-6.44	-6.33	-5.00	-3.57	-2.36	-2.17	0.40
2004	0.78	0.61	0.31	-1.81	-5.51	-6.36	-5.69	-4.17	-2.13	-1.44	-1.31	0.21
2005	0.08	1.20	0.78	-1.06	-5.45	-7.97	-6.42	-6.35	-2.60	-1.47	-1.27	0.60
2006	0.73	0.97	1.27	-0.68	-5.85	-5.49	-7.55	-4.01	-3.13	-1.33	0.22	0.26
2007	1.14	0.49	1.21	-0.29	-3.33	-5.72	-5.55	-4.81	-1.63	-1.52	-1.53	-0.60
2008	1.40	0.36	-0.80	-2.85	-6.08	-6.50	-7.32	-5.82	-4.05	-0.98	-0.75	0.04
2009	0.64	1.22	0.35	-1.13	-4.18	-7.29	-5.89	-6.05	-2.59	-1.46	0.59	0.82
2010	1.28	1.95	1.25	-0.87	-3.41	-5.04	-7.12	-5.60	-3.13	-1.79	-2.03	0.50
2011	0.71	1.02	0.46	-1.02	-4.32	-6.24	-6.30	-5.08	-2.20	-2.29	-0.52	0.21
2012	0.21	0.67	0.17	-0.38	-4.60	-6.16	-6.75	-6.19	-3.01	-1.21	-0.31	1.52
2013	0.68	1.31	0.75	-2.74	-3.08	-4.30	-4.79	-4.69	-3.36	-0.78	-0.80	0.91
2014	0.83	0.57	0.00	-1.16	-4.25	-5.82	-5.33	-4.42	-1.09	-0.60	-0.98	0.47
2015	0.23	0.70	0.64	-0.17	-3.07	-5.28	-6.65	-5.15	-1.86	-0.83	-0.57	-0.08

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÍNIMAS POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO CARHUARAZU												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	1.55	1.87	0.98	0.15	-3.28	-5.86	-5.44	-4.50	-1.42	-1.62	-0.20	0.76
1995	0.94	0.33	1.20	-1.50	-4.03	-5.18	-4.71	-3.52	-1.12	-1.06	0.03	-0.07
1996	1.05	1.57	1.20	0.54	-2.80	-5.74	-5.86	-2.66	-2.00	-0.91	-1.04	0.84
1997	1.60	1.24	-0.13	-1.98	-4.00	-7.25	-5.72	-3.34	-0.81	-0.37	0.46	1.64
1998	3.52	3.15	2.42	0.02	-3.88	-3.52	-4.78	-2.56	-1.95	0.48	-0.26	1.15
1999	1.39	2.11	1.72	0.48	-2.36	-5.20	-4.82	-4.42	-2.21	0.07	-1.10	0.69
2000	1.60	1.64	1.21	-0.61	-2.72	-4.55	-5.06	-3.21	-2.31	-0.09	-2.03	0.14
2001	1.62	1.91	1.60	-1.11	-2.55	-4.19	-4.43	-4.55	-0.93	0.12	0.60	0.36
2002	0.65	2.08	1.63	0.42	-2.09	-3.56	-3.38	-3.39	-0.67	0.74	0.85	1.34
2003	1.84	1.99	1.67	-0.20	-2.02	-4.81	-4.86	-3.51	-2.13	-0.93	-0.92	1.57
2004	1.83	1.67	1.41	-0.66	-4.07	-4.86	-4.29	-2.95	-0.84	-0.06	-0.02	1.39
2005	1.13	2.22	1.92	0.06	-4.10	-6.41	-5.00	-4.87	-1.26	-0.20	-0.14	1.66
2006	1.74	1.96	2.31	0.48	-4.54	-4.05	-6.05	-2.64	-1.70	-0.08	1.40	1.42
2007	2.25	1.51	2.16	0.85	-2.11	-4.27	-4.20	-3.43	-0.40	-0.21	-0.35	0.46

2008	2.38	1.41	0.33	-1.60	-4.62	-4.97	-5.77	-4.34	-2.59	0.34	0.53	1.11
2009	1.76	2.24	1.47	0.06	-2.83	-5.66	-4.42	-4.49	-1.10	-0.05	1.74	1.93
2010	2.31	2.99	2.38	0.36	-2.11	-3.61	-5.67	-4.14	-1.71	-0.50	-0.74	1.55
2011	1.67	1.95	1.43	0.08	-3.00	-4.80	-4.93	-3.68	-0.87	-0.91	0.74	1.31
2012	1.19	1.60	1.18	0.66	-3.31	-4.74	-5.33	-4.81	-1.69	0.08	0.89	2.50
2013	1.64	2.33	1.82	-1.56	-1.81	-2.91	-3.47	-3.33	-1.92	0.52	0.48	1.89
2014	1.87	1.69	1.10	-0.03	-2.81	-4.28	-3.87	-3.06	0.12	0.60	0.24	1.58
2015	1.27	1.70	1.62	0.81	-1.73	-3.74	-5.13	-3.74	-0.52	0.51	0.68	1.10

**REGISTRO DE TEMPERATURAS MÍNIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO CHOCLOCOCHA**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	0.93	1.25	0.35	-0.48	-4.17	-6.85	-6.43	-5.48	-2.39	-2.64	-1.06	0.02
1995	0.34	-0.39	0.52	-2.29	-4.96	-6.32	-5.87	-4.65	-2.15	-2.16	-0.84	-0.97
1996	0.34	0.93	0.45	-0.20	-3.69	-6.82	-6.94	-3.72	-3.13	-2.00	-1.84	0.12
1997	1.00	0.65	-0.78	-2.72	-4.91	-8.31	-6.55	-4.27	-1.66	-1.41	-0.43	0.78
1998	2.98	2.53	1.75	-0.85	-4.92	-4.51	-5.81	-3.80	-3.10	-0.59	-1.14	0.28
1999	0.72	1.52	1.11	-0.17	-3.20	-6.36	-5.83	-5.29	-3.33	-0.77	-2.13	-0.11
2000	1.11	1.04	0.61	-1.27	-3.62	-5.73	-6.17	-4.28	-3.37	-0.97	-2.92	-0.40
2001	1.07	1.38	1.09	-1.60	-3.41	-5.15	-5.56	-5.51	-1.91	-0.82	-0.24	-0.36
2002	0.07	1.56	1.12	-0.19	-2.83	-4.41	-4.35	-4.36	-1.70	-0.13	0.02	0.61
2003	1.23	1.39	1.08	-0.99	-2.93	-5.97	-5.91	-4.66	-3.25	-1.98	-1.76	0.79
2004	1.19	1.03	0.77	-1.35	-5.11	-5.94	-5.35	-3.84	-1.79	-1.13	-0.95	0.63
2005	0.56	1.62	1.21	-0.61	-5.03	-7.48	-5.93	-5.93	-2.33	-1.24	-0.97	0.95
2006	1.14	1.40	1.72	-0.23	-5.36	-5.10	-7.04	-3.66	-2.81	-1.05	0.54	0.64
2007	1.58	0.88	1.62	0.15	-2.94	-5.23	-5.20	-4.46	-1.31	-1.19	-1.23	-0.26
2008	1.81	0.82	-0.31	-2.40	-5.63	-6.06	-6.91	-5.48	-3.74	-0.66	-0.40	0.40
2009	1.08	1.63	0.85	-0.67	-3.75	-6.84	-5.51	-5.78	-2.22	-1.05	0.91	1.20
2010	1.68	2.39	1.70	-0.42	-2.98	-4.62	-6.72	-5.15	-2.79	-1.48	-1.72	0.84
2011	1.12	1.42	0.79	-0.59	-3.92	-5.79	-5.90	-4.76	-1.95	-2.03	-0.20	0.62
2012	0.59	1.05	0.59	0.02	-4.21	-5.75	-6.28	-5.84	-2.63	-0.89	0.01	1.85
2013	1.05	1.72	1.13	-2.35	-2.66	-3.94	-4.37	-4.32	-3.00	-0.50	-0.46	1.25
2014	1.28	0.97	0.44	-0.74	-3.86	-5.35	-4.93	-3.97	-0.76	-0.23	-0.64	0.84
2015	0.63	1.15	1.07	0.22	-2.72	-4.78	-6.26	-4.78	-1.58	-0.51	-0.22	0.29

**REGISTRO DE TEMPERATURAS MÍNIMAS POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO CUNYACC**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	1.56	1.90	1.00	0.18	-3.15	-5.67	-5.20	-4.27	-1.20	-1.39	-0.09	0.82
1995	0.93	0.36	1.22	-1.45	-3.91	-4.93	-4.47	-3.29	-0.87	-0.82	0.17	0.13
1996	1.11	1.60	1.29	0.61	-2.72	-5.56	-5.66	-2.43	-1.75	-0.68	-0.99	0.92
1997	1.58	1.23	-0.15	-1.98	-3.97	-7.19	-5.67	-3.27	-0.69	-0.21	0.54	1.77
1998	3.50	3.16	2.46	0.11	-3.71	-3.39	-4.58	-2.25	-1.65	0.72	-0.15	1.36
1999	1.42	2.12	1.73	0.51	-2.29	-4.95	-4.64	-4.34	-2.00	0.23	-0.91	0.81
2000	1.51	1.65	1.21	-0.60	-2.61	-4.32	-4.83	-3.02	-2.12	0.05	-1.91	0.06
2001	1.61	1.87	1.56	-1.18	-2.46	-4.00	-4.26	-4.37	-0.76	0.29	0.70	0.39
2002	0.62	2.03	1.56	0.40	-2.03	-3.44	-3.23	-3.21	-0.42	0.91	1.01	1.41
2003	1.85	2.00	1.68	-0.12	-1.89	-4.52	-4.64	-3.24	-1.86	-0.67	-0.82	1.68
2004	1.87	1.68	1.43	-0.62	-3.93	-4.64	-4.13	-2.80	-0.65	0.17	0.15	1.48
2005	1.12	2.23	1.99	0.07	-4.03	-6.27	-4.86	-4.69	-1.05	0.01	-0.05	1.74
2006	1.75	1.93	2.33	0.58	-4.50	-3.89	-5.88	-2.47	-1.47	0.09	1.58	1.51
2007	2.28	1.51	2.13	0.92	-2.01	-4.05	-4.03	-3.22	-0.17	0.03	-0.23	0.52
2008	2.39	1.43	0.38	-1.52	-4.47	-4.77	-5.56	-4.15	-2.36	0.57	0.72	1.19
2009	1.84	2.26	1.50	0.12	-2.70	-5.42	-4.22	-4.24	-0.82	0.19	1.89	2.01
2010	2.33	3.01	2.46	0.44	-2.00	-3.41	-5.54	-3.94	-1.45	-0.29	-0.59	1.62
2011	1.65	1.93	1.44	0.12	-2.87	-4.65	-4.78	-3.47	-0.62	-0.65	0.96	1.40
2012	1.20	1.58	1.17	0.68	-3.23	-4.58	-5.20	-4.64	-1.50	0.29	1.05	2.54
2013	1.63	2.36	1.85	-1.52	-1.71	-2.72	-3.30	-3.16	-1.68	0.76	0.68	1.92

2014	1.86	1.75	1.13	0.02	-2.65	-4.09	-3.67	-2.89	0.32	0.79	0.41	1.67
2015	1.28	1.69	1.60	0.78	-1.61	-3.55	-4.93	-3.56	-0.30	0.72	0.84	1.20

REGISTRO DE TEMPERATURAS MÍNIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO HUANCVELICA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	3.56	3.86	3.04	2.18	-0.91	-3.43	-3.21	-2.25	0.66	0.53	1.95	2.87
1995	3.11	2.64	3.32	0.87	-1.51	-2.62	-2.17	-1.11	0.97	1.17	2.15	1.98
1996	3.10	3.56	3.31	2.59	-0.42	-3.17	-3.33	-0.40	0.28	1.30	1.16	2.80
1997	3.62	3.29	2.12	0.44	-1.25	-4.19	-2.96	-0.75	1.35	1.98	2.76	3.86
1998	5.55	5.31	4.59	2.43	-1.24	-1.00	-2.31	-0.18	0.29	2.59	1.95	3.04
1999	3.44	4.10	3.70	2.53	-0.01	-2.63	-2.43	-2.05	0.11	1.97	1.20	2.73
2000	3.63	3.63	3.22	1.60	-0.30	-1.98	-2.58	-0.83	-0.01	1.94	0.21	2.22
2001	3.57	3.89	3.61	1.01	-0.19	-1.90	-1.84	-2.22	1.19	2.20	2.72	2.49
2002	2.70	4.08	3.71	2.56	0.19	-1.27	-1.02	-1.08	1.38	2.67	2.84	3.36
2003	3.87	4.04	3.69	2.00	0.35	-2.33	-2.45	-1.12	0.10	1.22	1.28	3.61
2004	3.85	3.75	3.49	1.54	-1.45	-2.40	-1.80	-0.79	1.21	2.09	2.10	3.42
2005	3.17	4.23	3.97	2.23	-1.51	-3.67	-2.65	-2.35	0.96	1.92	2.00	3.63
2006	3.76	4.09	4.28	2.51	-2.04	-1.50	-3.47	-0.29	0.61	2.09	3.34	3.47
2007	4.34	3.64	4.18	2.91	0.14	-2.03	-1.79	-1.17	1.44	1.72	1.79	2.50
2008	4.30	3.42	2.43	0.72	-2.01	-2.40	-3.11	-1.71	-0.17	2.36	2.58	3.10
2009	3.75	4.27	3.52	2.25	-0.36	-2.93	-1.91	-1.76	1.04	1.98	3.66	3.94
2010	4.31	5.01	4.41	2.60	0.34	-1.22	-3.07	-1.85	0.44	1.57	1.50	3.49
2011	3.65	3.95	3.50	2.24	-0.57	-2.22	-2.42	-1.27	1.27	1.32	2.78	3.27
2012	3.22	3.67	3.31	2.78	-0.76	-2.09	-2.76	-2.26	0.44	2.12	2.91	4.39
2013	3.69	4.36	3.96	0.80	0.49	-0.52	-1.31	-1.03	0.31	2.53	2.48	3.83
2014	3.91	3.79	3.24	2.17	-0.20	-1.67	-1.43	-0.86	2.01	2.48	2.34	3.58
2015	3.32	3.77	3.72	2.92	0.79	-1.26	-2.45	-1.26	1.73	2.66	2.79	3.32

REGISTRO DE TEMPERATURAS MINIMAS POR PISCOp EN PUNTO DE REGISTRO LA MEJORADA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	8.79	9.15	8.21	7.23	5.10	2.45	2.04	3.27	5.81	6.04	7.55	8.49
1995	8.77	8.78	9.00	7.01	4.97	4.12	4.63	5.17	6.56	7.15	7.77	7.59
1996	8.54	8.97	9.03	7.98	5.75	3.62	3.36	5.67	6.35	7.30	7.02	8.05
1997	8.97	8.74	7.97	6.77	5.99	3.66	4.20	5.96	6.95	8.18	8.79	10.01
1998	10.98	11.06	10.34	8.75	5.85	5.49	4.17	6.38	6.30	8.34	7.67	8.23
1999	8.86	9.38	8.88	7.83	6.07	4.21	3.89	3.86	6.33	7.04	7.26	7.94
2000	8.70	8.89	8.39	7.25	5.91	4.68	3.86	5.34	5.89	7.14	5.73	7.17
2001	8.37	8.87	8.46	5.99	5.76	3.98	5.01	3.57	6.72	7.60	7.99	7.91
2002	7.78	9.18	8.92	8.03	5.98	4.59	5.07	4.89	6.76	7.68	8.07	8.62
2003	9.17	9.62	8.99	7.82	6.48	4.32	3.83	5.23	6.15	7.12	6.97	9.21
2004	9.28	9.34	8.93	7.09	5.46	4.20	4.77	4.85	6.61	7.93	7.68	8.81
2005	8.41	9.41	9.45	7.72	5.03	3.21	3.22	3.94	6.86	7.40	7.34	8.70
2006	8.99	9.73	9.45	7.71	4.27	5.10	3.01	5.80	6.61	7.70	8.40	8.79
2007	9.79	9.10	9.40	8.27	5.80	3.71	4.23	4.55	5.95	6.71	7.06	7.49
2008	9.10	8.47	7.67	6.44	4.79	4.29	3.73	4.99	6.10	7.86	8.02	8.31
2009	9.05	9.67	8.88	7.94	6.05	4.12	4.67	5.33	6.69	7.37	8.66	9.23
2010	9.55	10.38	9.82	8.45	6.76	4.96	3.31	3.86	5.99	6.93	7.34	8.59
2011	8.81	9.25	8.99	7.88	5.77	4.44	3.98	5.05	6.78	7.26	8.21	8.40
2012	8.47	9.13	8.89	8.22	5.74	4.80	3.76	4.12	5.84	7.56	8.23	9.46
2013	8.98	9.80	9.65	6.80	6.40	5.71	4.19	4.75	6.13	7.96	7.79	8.86
2014	9.27	9.40	8.88	7.81	6.70	5.05	4.91	4.84	6.96	7.34	7.84	8.85
2015	8.74	9.25	9.09	8.32	7.44	5.22	4.51	5.07	7.67	8.43	8.37	9.16

REGISTRO DE TEMPERATURAS MINIMAS POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO LACHOCC												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	2.16	2.28	1.37	1.04	-2.11	-4.94	-4.56	-3.54	-0.44	-0.90	0.54	1.47

1995	1.34	0.25	1.47	-0.92	-3.08	-4.19	-3.83	-2.59	-0.22	-0.28	0.97	0.35
1996	1.79	1.90	1.86	1.42	-1.71	-5.10	-5.18	-1.76	-1.23	-0.29	-0.20	1.47
1997	2.39	1.51	0.05	-1.41	-3.04	-6.91	-5.36	-3.09	-0.11	0.28	1.28	2.35
1998	4.29	3.79	3.23	1.21	-2.60	-2.78	-4.05	-1.53	-0.82	1.59	0.95	2.27
1999	2.41	2.69	2.52	1.65	-1.11	-4.30	-4.01	-3.58	-1.01	1.16	0.28	1.91
2000	2.68	2.25	2.18	0.57	-1.50	-3.06	-4.07	-2.23	-0.95	0.91	-0.49	1.37
2001	2.14	2.32	2.26	0.09	-1.42	-3.04	-3.37	-3.64	0.20	1.25	1.96	1.71
2002	1.65	2.71	2.45	1.34	-1.40	-2.52	-2.91	-2.82	-0.05	1.64	1.55	2.30
2003	2.35	2.04	1.88	0.09	-1.59	-4.43	-4.57	-2.89	-1.20	0.00	0.42	2.42
2004	2.89	2.31	2.16	0.44	-2.64	-3.91	-3.39	-2.08	0.14	1.17	1.36	2.79
2005	2.20	3.20	2.98	1.35	-2.42	-4.76	-3.70	-3.46	0.16	1.20	1.31	2.72
2006	2.34	2.58	3.17	1.65	-2.96	-2.86	-5.18	-1.36	-0.36	0.91	2.57	2.60
2007	3.36	1.77	3.23	2.14	-0.67	-3.12	-2.96	-2.25	1.21	1.01	0.96	1.54
2008	3.23	2.17	0.91	-0.71	-3.24	-3.69	-4.75	-3.20	-1.21	1.61	1.70	2.20
2009	2.91	2.85	2.34	1.09	-1.55	-4.49	-3.44	-3.66	0.43	1.24	2.77	3.20
2010	3.18	3.65	3.23	1.50	-0.78	-2.33	-4.00	-2.60	-0.40	0.33	0.18	2.09
2011	1.86	1.90	1.59	0.42	-2.67	-4.46	-4.83	-3.44	-0.74	-0.53	1.08	1.48
2012	1.16	1.27	0.84	0.77	-3.07	-4.89	-5.33	-4.90	-1.68	0.28	1.23	2.65
2013	1.53	2.25	1.85	-1.21	-0.19	-1.46	-2.10	-1.75	-0.39	1.84	1.98	3.20
2014	2.93	2.52	1.96	1.06	-1.33	-3.02	-2.81	-2.02	1.26	1.64	1.33	2.75
2015	2.10	2.15	2.12	1.40	-0.48	-2.26	-4.31	-2.78	0.52	1.60	1.91	2.20

**REGISTRO DE TEMPERATURAS MÍNIMAS POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO TINYACCLLA**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	2.70	2.98	2.15	1.25	-1.90	-4.51	-4.31	-3.20	-0.17	-0.32	1.24	2.09
1995	2.23	1.79	2.51	-0.01	-2.47	-3.57	-2.97	-1.85	0.22	0.46	1.40	1.13
1996	2.30	2.76	2.49	1.81	-1.25	-4.03	-4.14	-1.12	-0.41	0.63	0.48	2.01
1997	2.83	2.44	1.22	-0.48	-2.15	-5.16	-3.91	-1.57	0.49	1.25	2.01	3.01
1998	4.62	4.40	3.64	1.51	-2.26	-1.86	-3.23	-0.90	-0.48	1.93	1.23	2.20
1999	2.66	3.25	2.87	1.69	-0.86	-3.52	-3.25	-2.83	-0.57	1.22	0.46	1.90
2000	2.81	2.80	2.37	0.67	-1.18	-2.86	-3.47	-1.59	-0.75	1.21	-0.63	1.32
2001	2.68	3.00	2.69	0.00	-1.05	-2.80	-2.59	-3.09	0.52	1.49	1.99	1.68
2002	1.81	3.22	2.80	1.68	-0.70	-2.12	-1.79	-1.89	0.65	1.90	2.06	2.54
2003	3.02	3.17	2.84	1.19	-0.47	-3.26	-3.33	-1.90	-0.66	0.42	0.42	2.78
2004	3.02	2.87	2.56	0.59	-2.35	-3.31	-2.58	-1.58	0.45	1.36	1.29	2.57
2005	2.23	3.33	3.10	1.30	-2.43	-4.67	-3.59	-3.24	0.29	1.24	1.28	2.84
2006	2.88	3.20	3.40	1.59	-3.02	-2.36	-4.51	-1.10	-0.16	1.34	2.58	2.65
2007	3.48	2.76	3.31	2.01	-0.75	-3.00	-2.63	-1.99	0.67	0.95	1.01	1.68
2008	3.40	2.46	1.42	-0.27	-2.96	-3.31	-4.02	-2.55	-0.95	1.61	1.79	2.29
2009	2.85	3.39	2.54	1.32	-1.30	-3.90	-2.78	-2.51	0.25	1.14	2.91	3.10
2010	3.42	4.11	3.48	1.67	-0.58	-2.11	-3.91	-2.75	-0.34	0.83	0.78	2.71
2011	2.78	3.09	2.70	1.34	-1.45	-3.14	-3.29	-2.01	0.57	0.65	2.01	2.39
2012	2.34	2.82	2.41	1.88	-1.69	-3.01	-3.65	-3.10	-0.38	1.37	2.15	3.63
2013	2.84	3.50	3.11	-0.09	-0.40	-1.36	-2.20	-1.87	-0.48	1.83	1.72	3.02
2014	3.01	2.91	2.32	1.26	-1.10	-2.64	-2.31	-1.75	1.24	1.67	1.54	2.76
2015	2.46	2.84	2.79	2.04	-0.06	-2.26	-3.35	-2.13	1.00	1.89	1.97	2.46

**REGISTRO DE TEMPERATURAS MINIMAS POR PISCOp EN EL PUNTO DE REGISTRO YAULI**

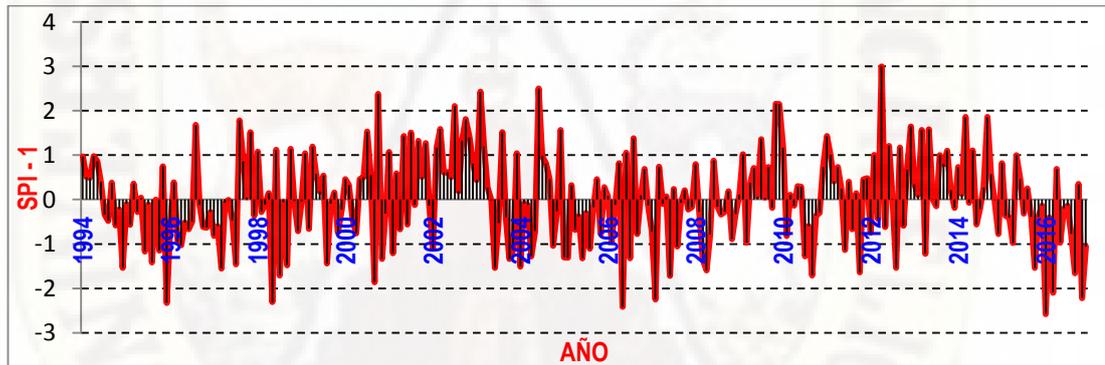
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	4.54	4.85	4.02	3.28	0.49	-1.89	-1.62	-0.77	1.94	1.89	3.02	3.89
1995	4.06	3.60	4.27	2.01	-0.13	-1.06	-0.74	0.25	2.27	2.44	3.29	3.24
1996	4.12	4.47	4.37	3.64	0.67	-1.84	-1.98	0.82	1.52	2.52	2.06	3.78
1997	4.48	4.17	3.06	1.53	-0.08	-2.89	-1.80	0.28	2.43	3.13	3.79	4.95
1998	6.44	6.27	5.66	3.67	0.27	0.26	-0.89	1.22	1.67	3.78	3.02	4.23
1999	4.40	5.01	4.61	3.51	1.18	-1.12	-1.10	-0.89	1.34	3.07	2.45	3.88
2000	4.45	4.53	4.18	2.70	0.99	-0.50	-1.14	0.46	1.26	3.02	1.54	3.16

2001	4.46	4.78	4.54	2.01	1.01	-0.51	-0.53	-0.88	2.33	3.37	3.82	3.55
2002	3.66	4.93	4.61	3.54	1.34	-0.01	0.16	0.18	2.61	3.83	3.96	4.45
2003	4.81	4.97	4.62	3.06	1.55	-0.78	-1.05	0.27	1.41	2.60	2.49	4.71
2004	4.86	4.70	4.52	2.69	-0.03	-0.97	-0.56	0.35	2.35	3.32	3.29	4.51
2005	4.19	5.15	5.02	3.30	-0.21	-2.20	-1.30	-0.95	2.09	3.10	3.08	4.64
2006	4.72	5.01	5.27	3.70	-0.72	-0.19	-1.92	0.90	1.93	3.24	4.49	4.59
2007	5.37	4.58	5.05	4.01	1.38	-0.59	-0.53	0.17	2.61	2.96	2.92	3.54
2008	5.23	4.42	3.53	1.97	-0.58	-0.99	-1.66	-0.31	1.15	3.58	3.83	4.15
2009	4.81	5.20	4.58	3.41	0.97	-1.36	-0.54	-0.36	2.43	3.34	4.75	5.04
2010	5.26	5.97	5.50	3.80	1.63	0.18	-1.74	-0.43	1.79	2.76	2.66	4.44
2011	4.47	4.70	4.28	3.34	0.72	-0.87	-1.10	0.08	2.48	2.58	4.01	4.36
2012	4.16	4.46	4.23	3.77	0.48	-0.69	-1.43	-0.89	1.69	3.30	4.07	5.31
2013	4.58	5.28	4.93	1.92	1.72	0.80	-0.03	0.27	1.65	3.73	3.68	4.73
2014	4.86	4.81	4.28	3.30	1.18	-0.17	-0.06	0.48	3.15	3.67	3.53	4.66
2015	4.30	4.70	4.63	3.86	2.02	0.17	-1.04	0.07	2.93	3.88	3.99	4.44

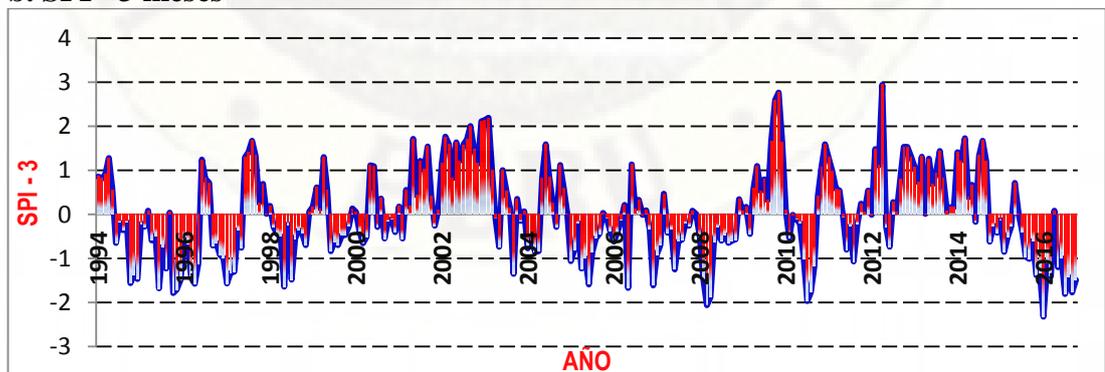
## A.2. RESULTADOS DE SPI A ESCALAS 1, 3, 6, 9 y 12 PARA CADA UNA DE LAS 5 REGIONES.

### A.2.1. SPI A ESCALAS 1, 3, 6, 9 y 12 PARA LA REGIÓN HOMOGÉNEA 3.

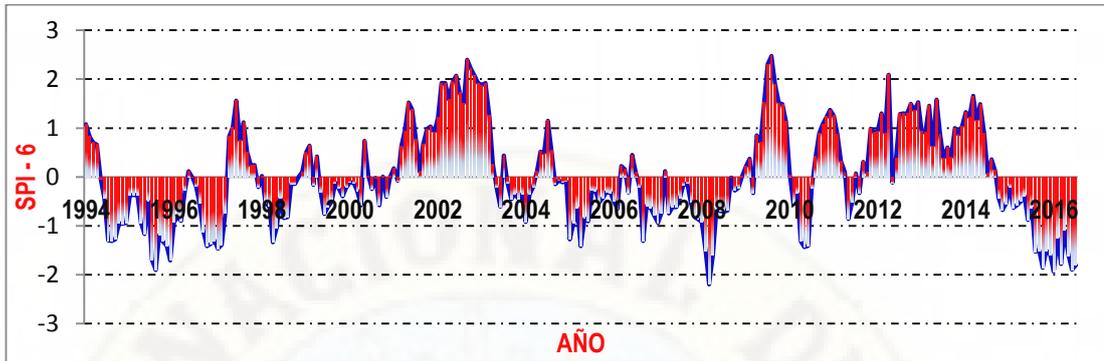
#### a. SPI - 1 mes



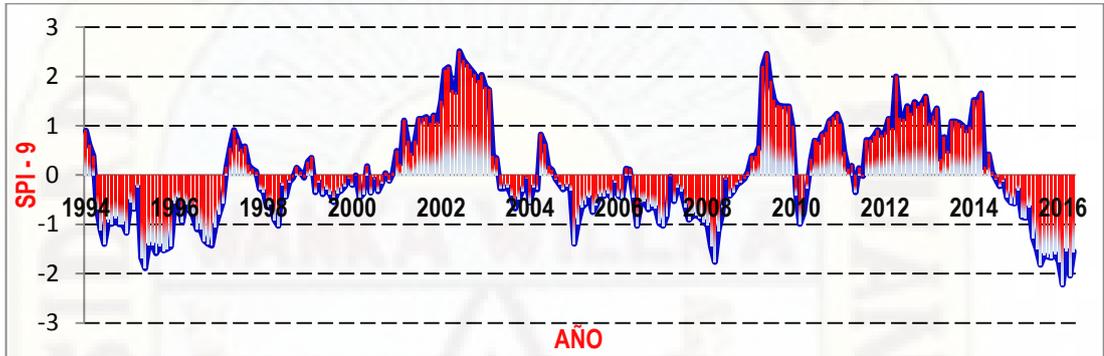
#### b. SPI - 3 meses



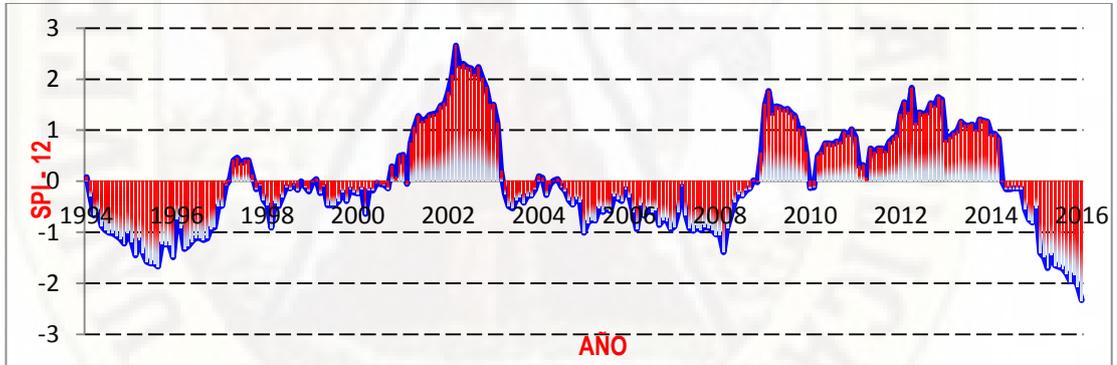
#### c. SPI - 6 meses



**d. SPI – 9 meses**

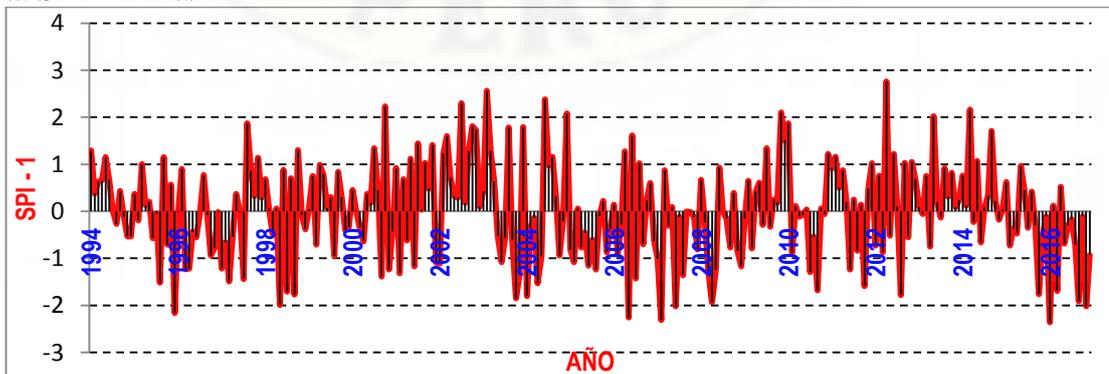


**e. SPI - 12 meses**

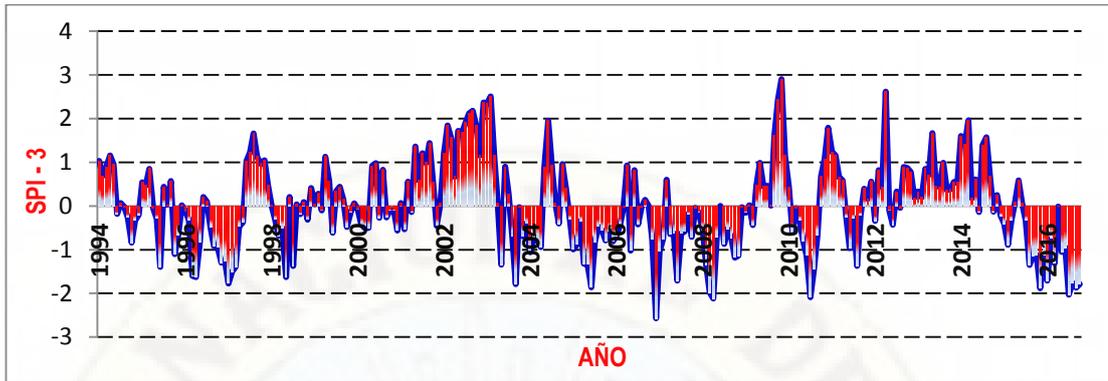


**A.2.2. SPI A ESCALAS 1, 3, 6, 9 y 12 PARA LA REGIÓN HOMOGÉNEA 4.**

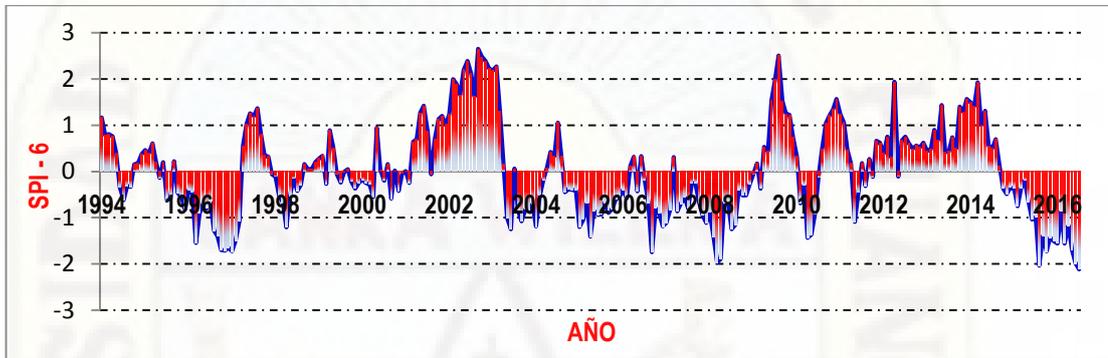
**a. SPI – 1 mes**



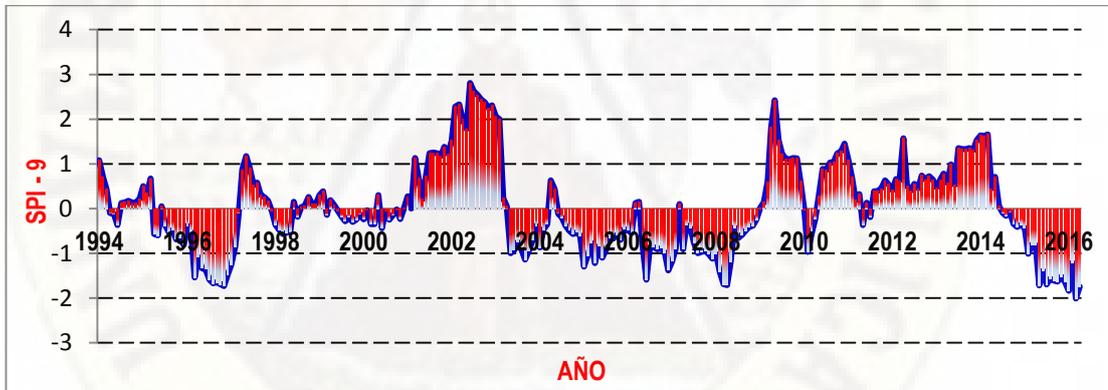
**b. SPI - 3 meses**



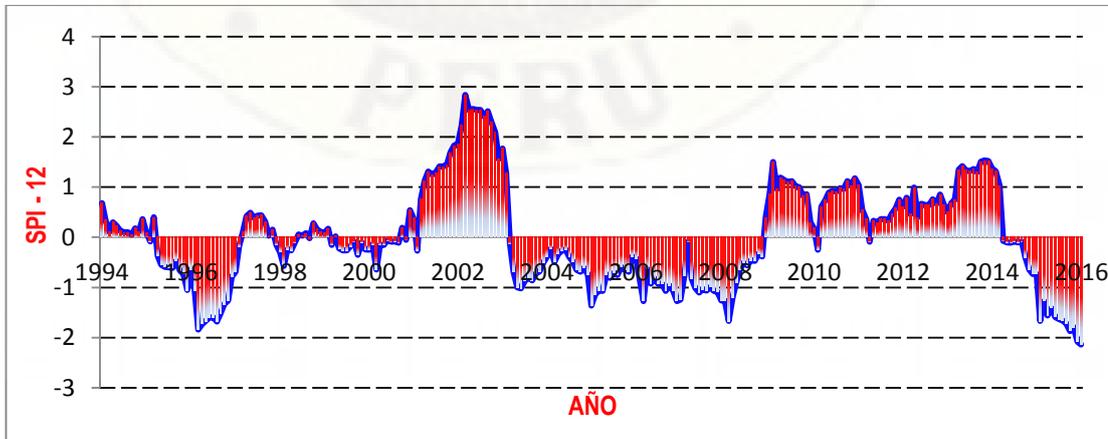
c. SPI – 6 meses



d. SPI – 9 meses

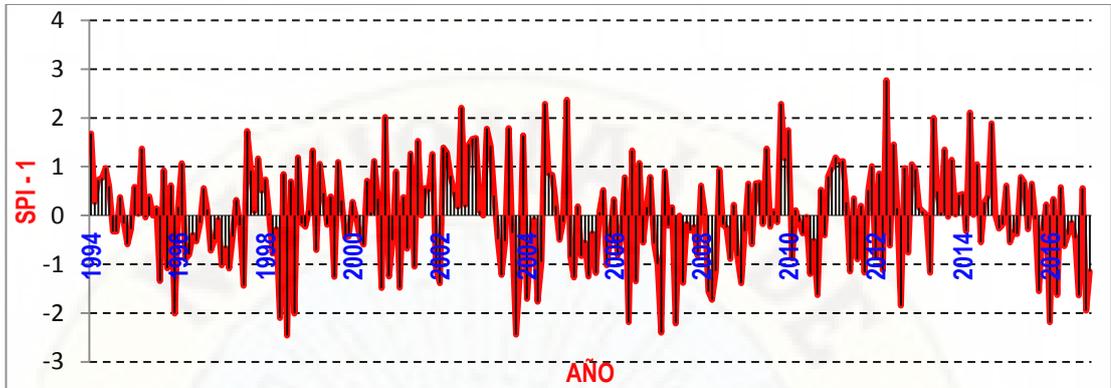


e. SPI – 12 meses

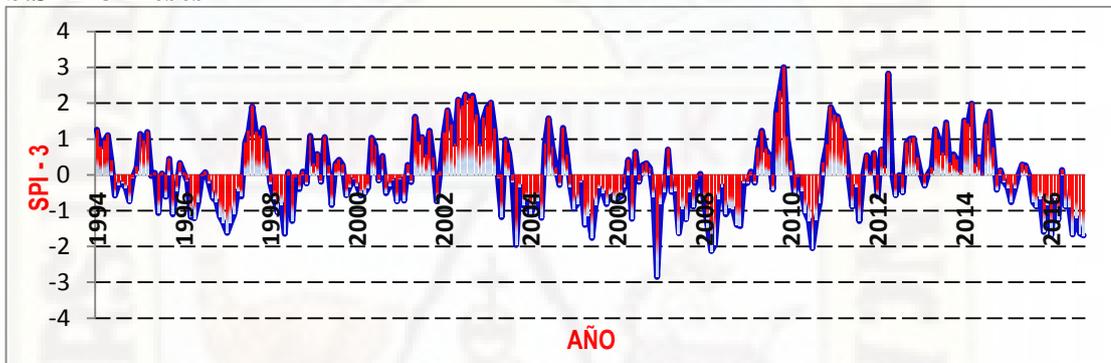


A.2.3. SPI A ESCALAS 1, 3, 6, 9 y 12 PARA LA REGIÓN HOMOGÉNEA 5.

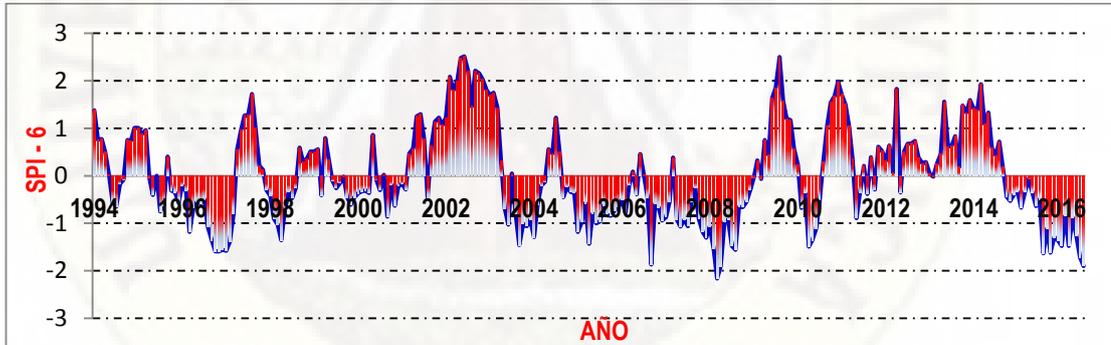
a. SPI- 1 mes



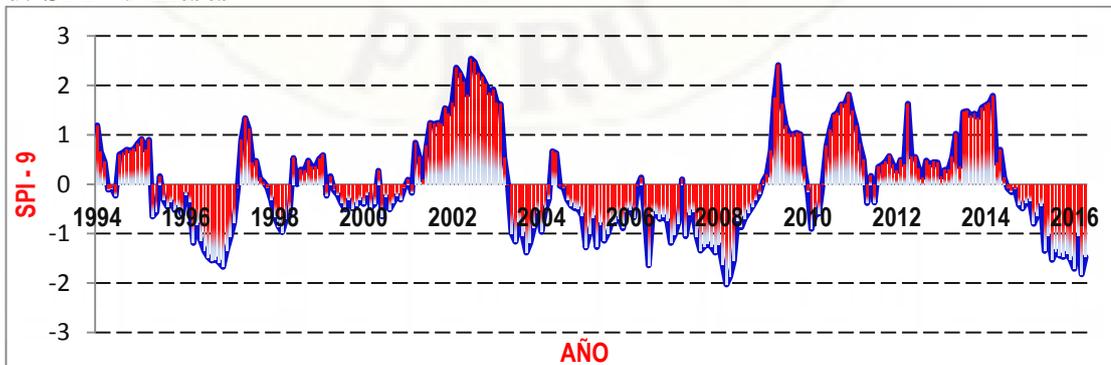
b. SPI- 3 meses



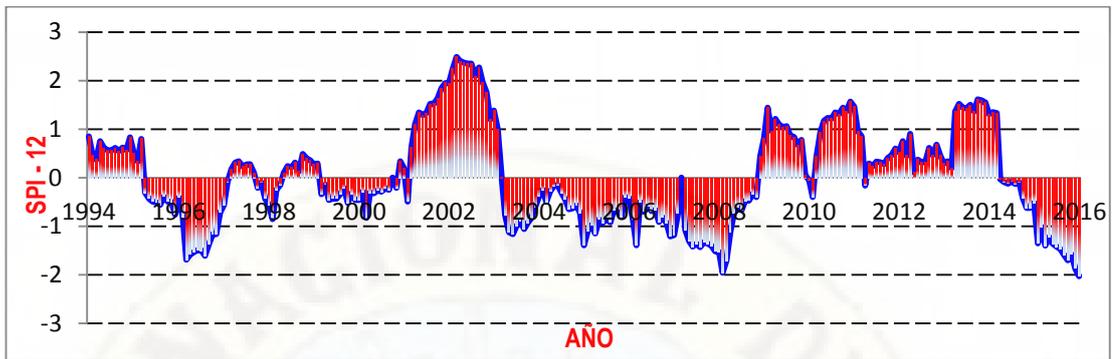
c. SPI - 6 meses



d. SPI - 9 meses



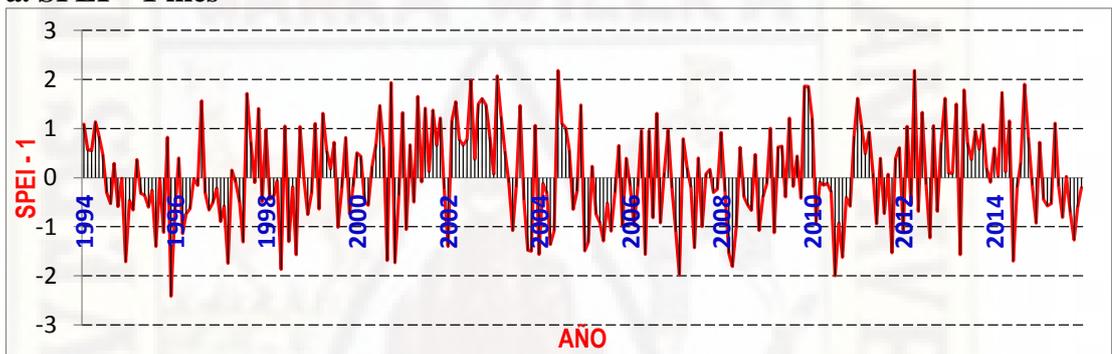
e. SPI - 12 meses



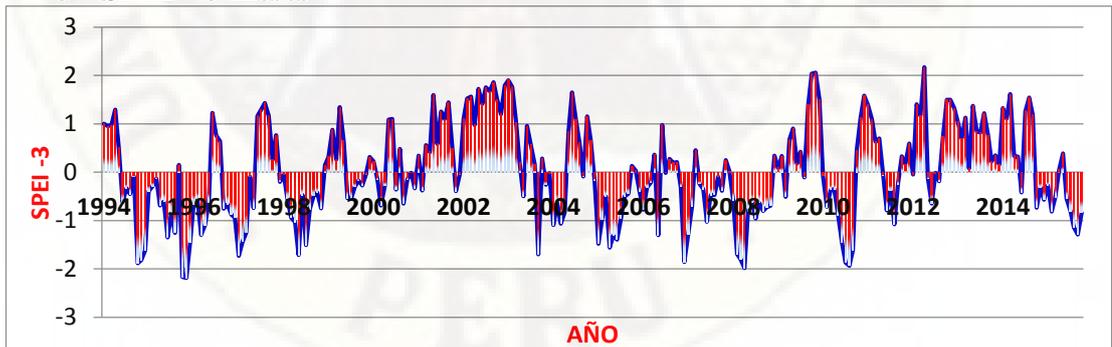
### A.3. RESULTADOS DE SPEI A ESCALAS 1, 3, 6, 9 y 12 PARA CADA UNA DE LAS 5 REGIONES.

#### A.3.1 SPEI A ESCALAS 1, 3, 6, 9 y 12 PARA LA REGIÓN HOMOGÉNEA 3.

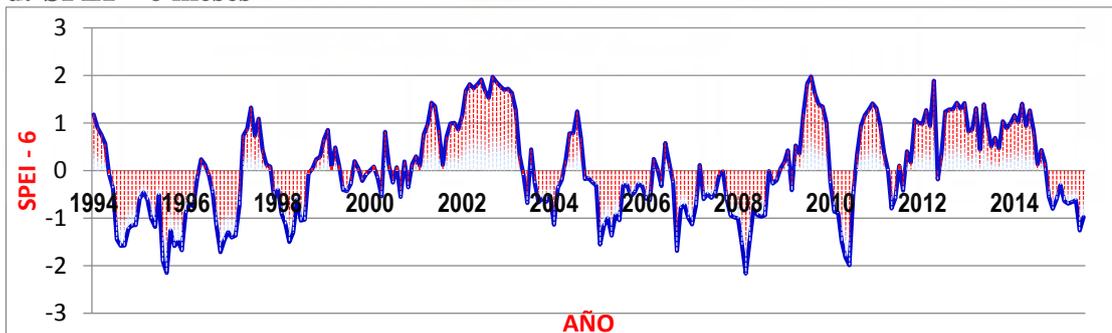
##### a. SPEI – 1 mes



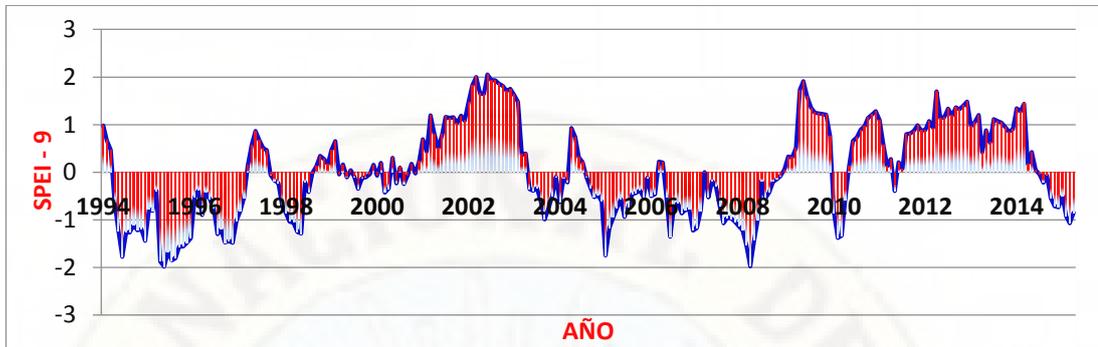
##### c. SPEI – 3 meses



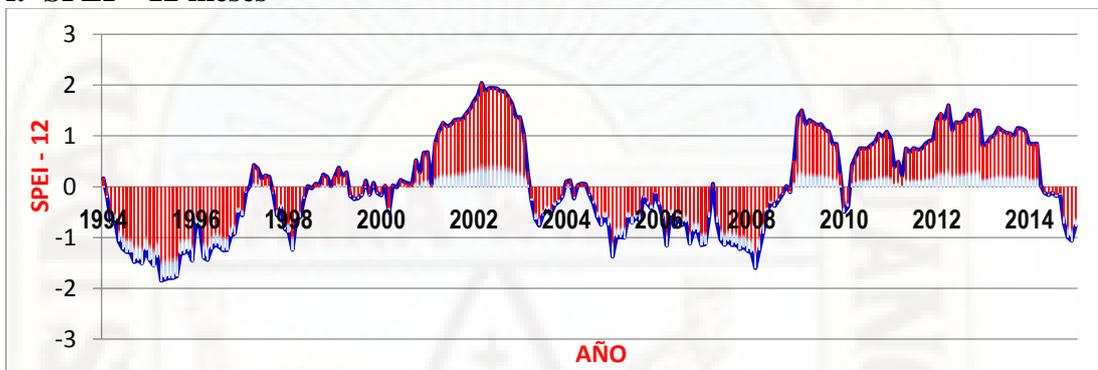
##### d. SPEI – 6 meses



**e. SPEI – 9 meses**

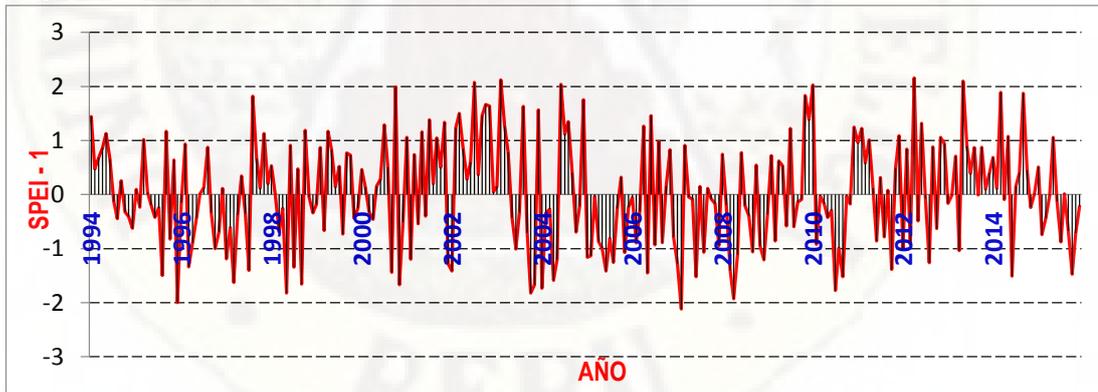


**f. SPEI – 12 meses**

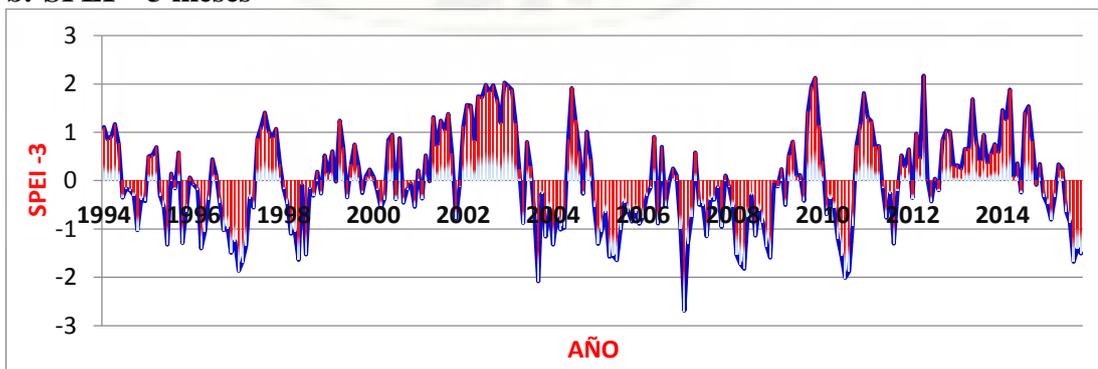


### A.3.2 SPEI A ESCALAS 1, 3, 6, 9 y 12 PARA LA REGIÓN HOMOGÉNEA 4.

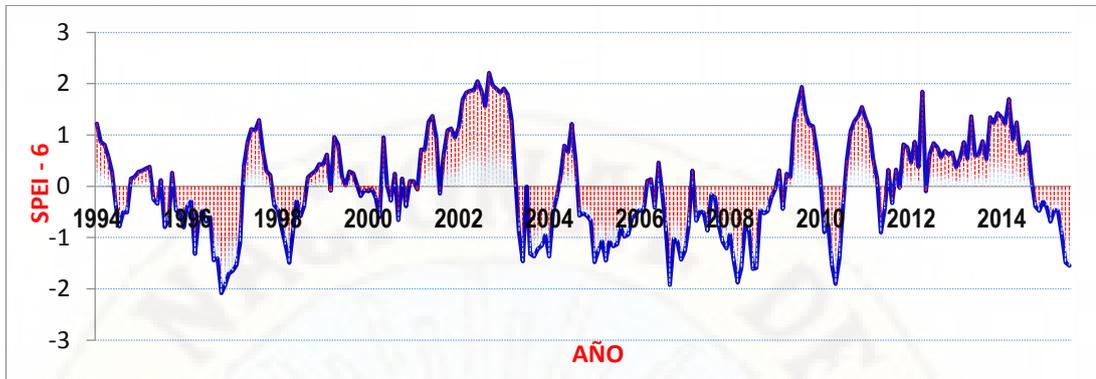
**a. SPEI – 1 mes**



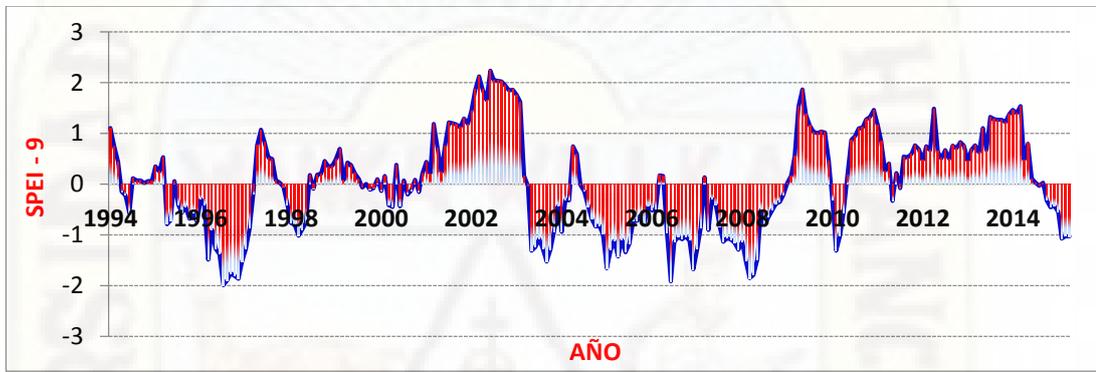
**b. SPEI – 3 meses**



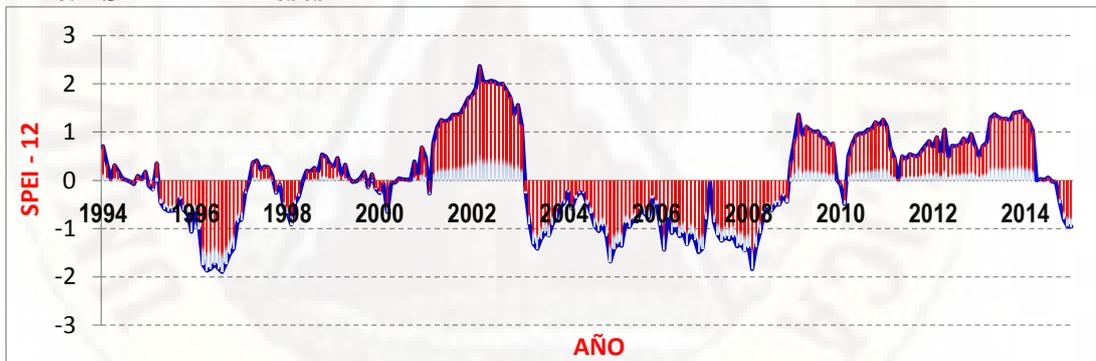
c. SPEI – 6 meses



d. SPEI – 9 meses

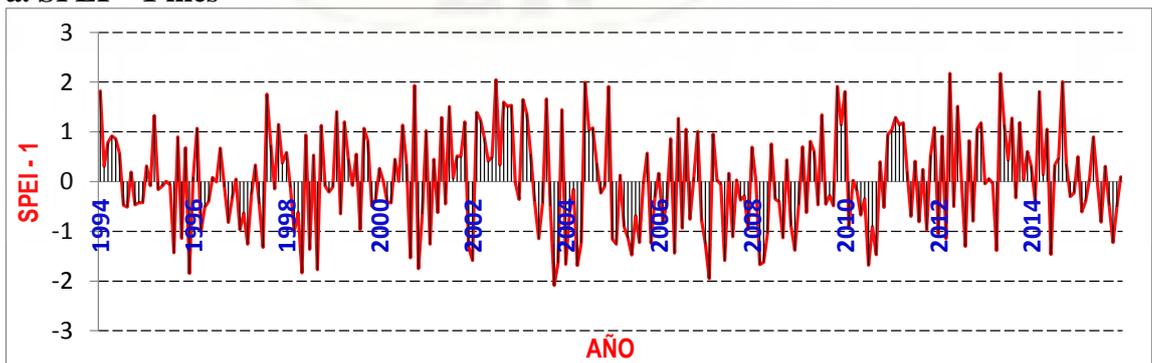


e. SPEI – 12 meses

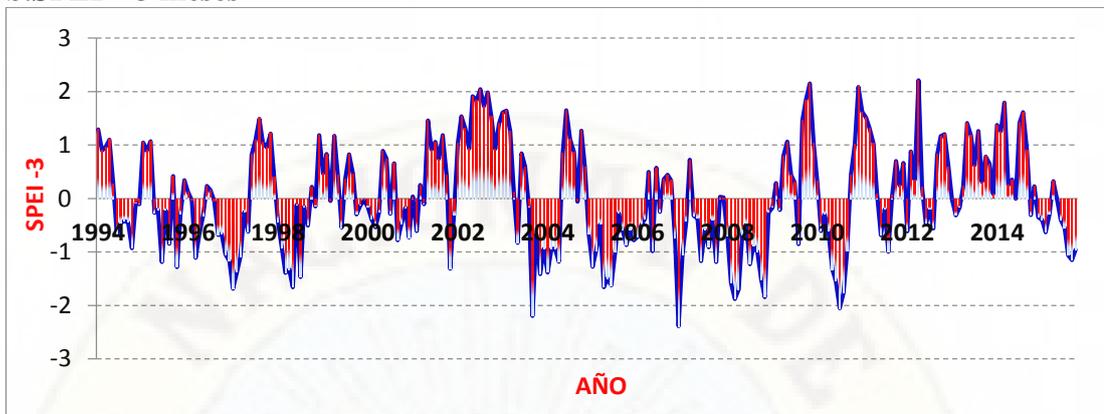


### A.3.3 SPEI A ESCALAS 1, 3, 6, 9 y 12 PARA LA REGIÓN HOMOGÉNEA 5.

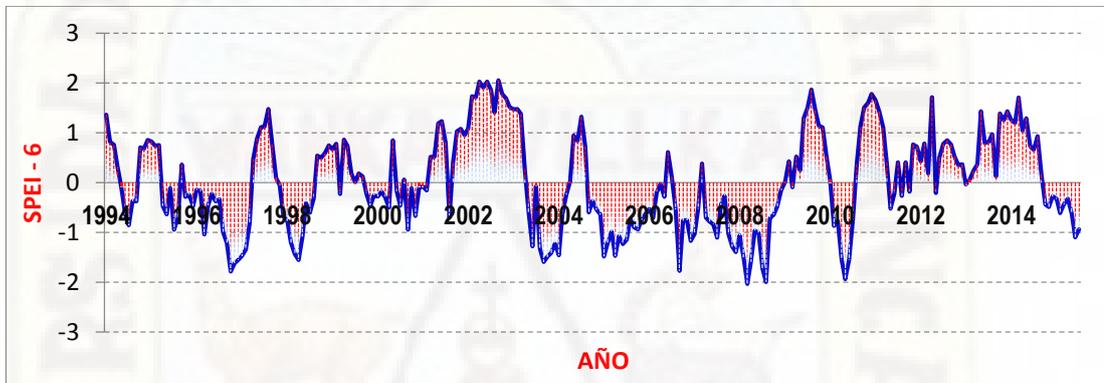
a. SPEI – 1 mes



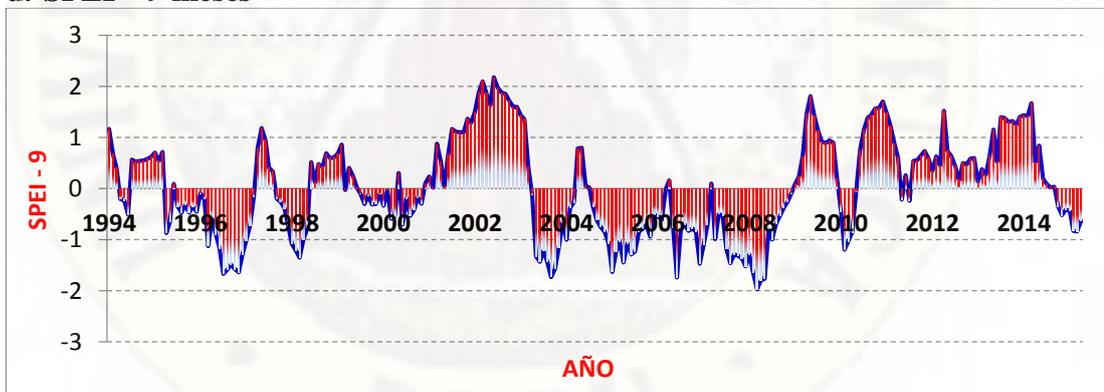
**b. SPEI – 3 meses**



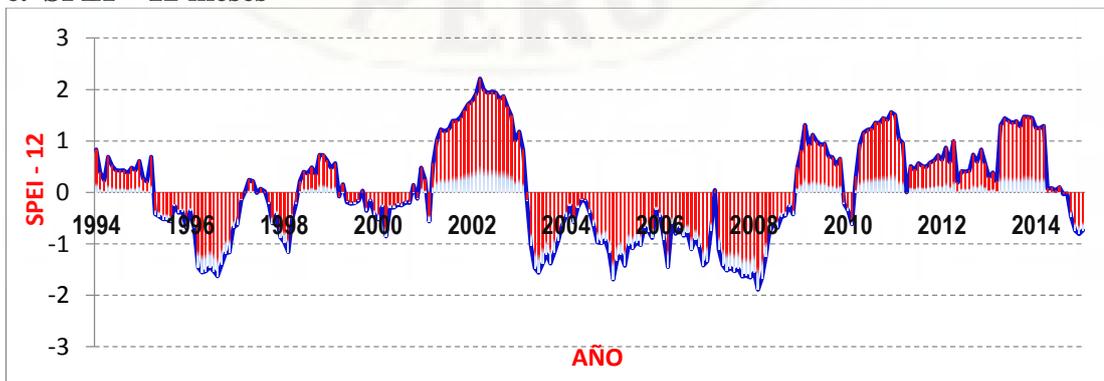
**c. SPEI – 6 meses**



**d. SPEI – 9 meses**



**e. SPEI – 12 meses**



## A.4. REGISTROS SIMULADOS DE PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MÁXIMAS MÍNIMAS POR MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES (GCM).

### A.4.1. REGISTRO –PRECIPITACIONES.

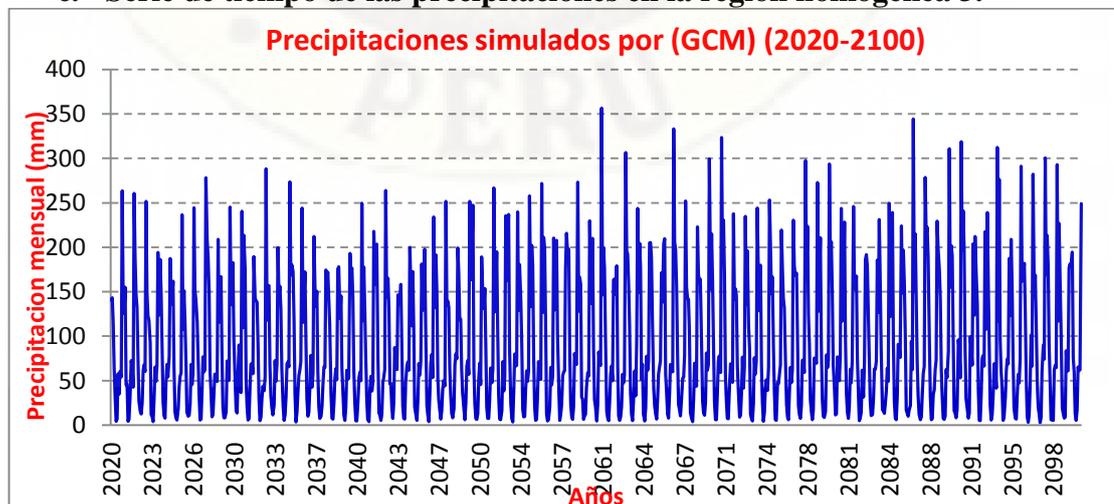
#### a. Serie de tiempo de las precipitaciones en la región homogénea 1.



#### b. Serie de tiempo de las precipitaciones en la región homogénea 2.



#### c. Serie de tiempo de las precipitaciones en la región homogénea 3.



**d. Serie de tiempo de las precipitaciones en la región homogénea 4.**

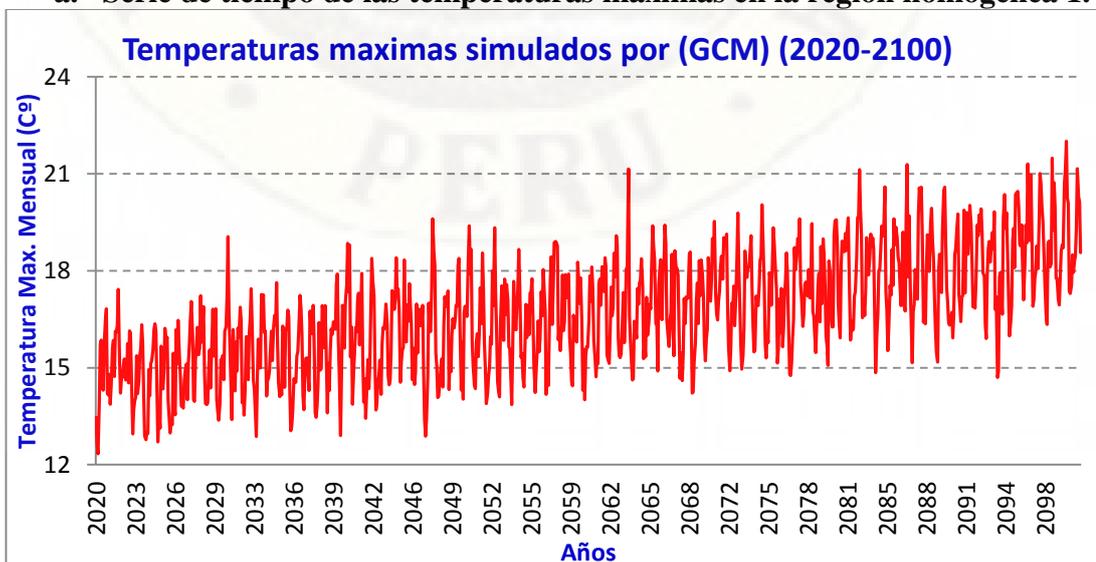


**e. Serie de tiempo de las precipitaciones en la región homogénea 5.**

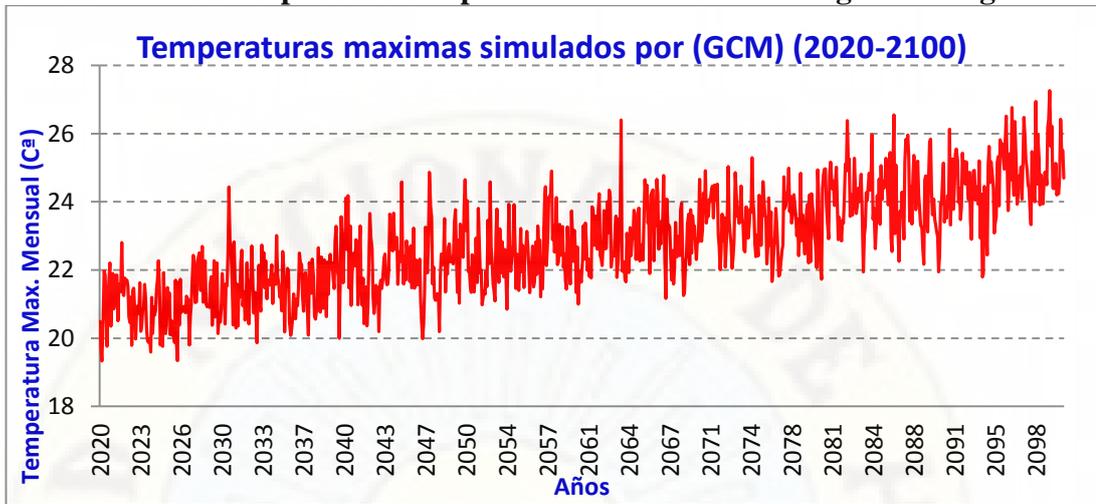


**A.4.2. REGISTRO –TEMPERATURA MÁXIMAS.**

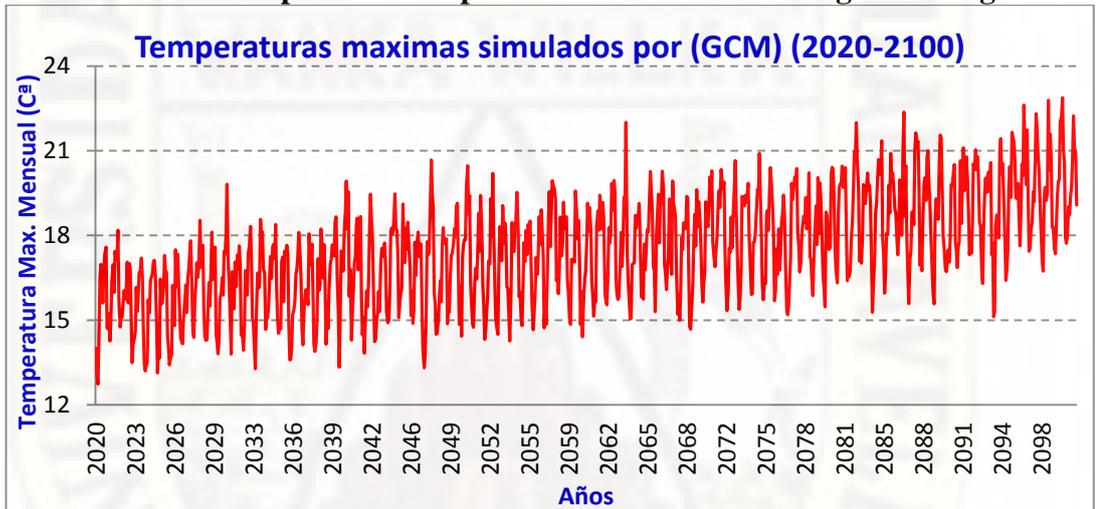
**a. Serie de tiempo de las temperaturas máximas en la región homogénea 1.**



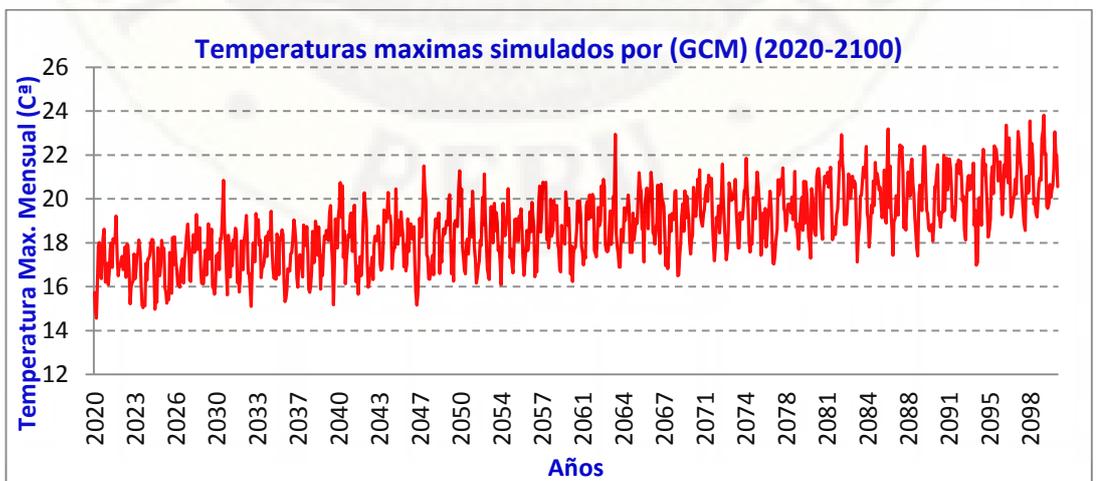
**b. Serie de tiempo de las temperaturas máximas en la región homogénea 2.**



**c. Serie de tiempo de las temperaturas máximas en la región homogénea 3.**



**d. Serie de tiempo de las temperaturas máximas en la región homogénea 4.**



**e. Serie de tiempo de las temperaturas máximas en la región homogénea 5.**

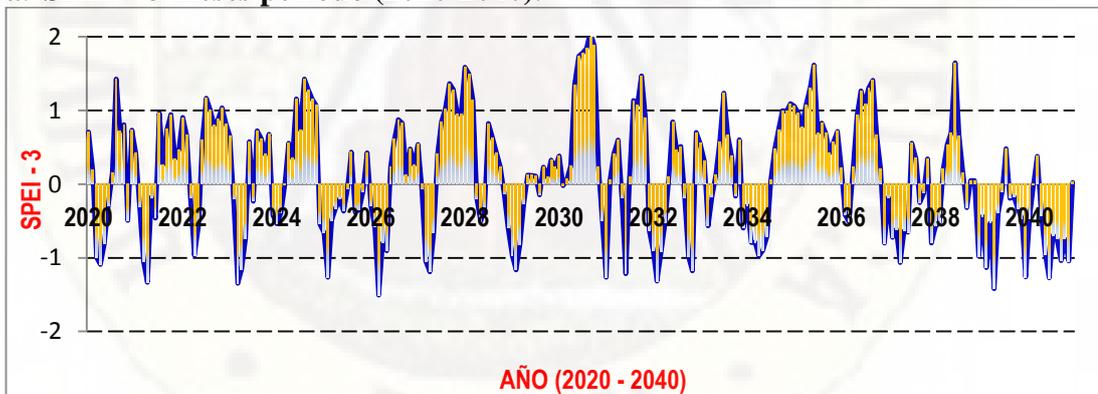


**A.5. RESULTADOS DE SPEI A ESCALAS 3 y 12 MESES PARA CADA UNA DE LAS 5 REGIONES**

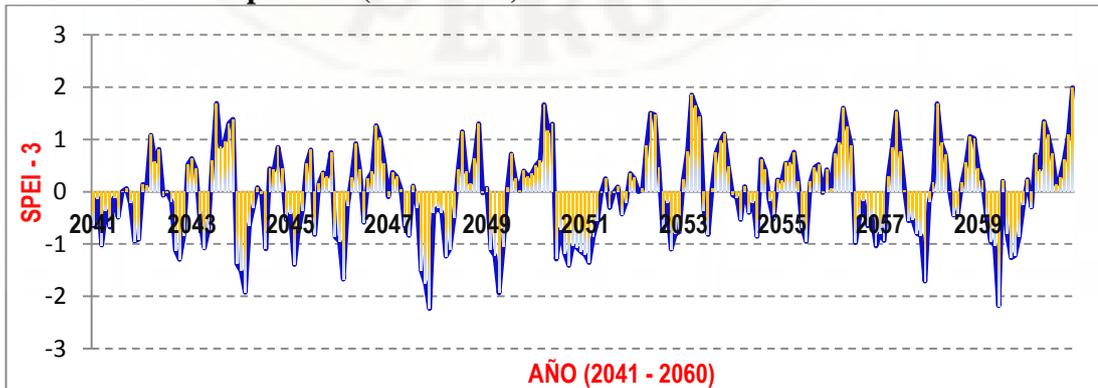
**A.5.1. SPEI A ESCALAS 3 y 12 MESES PARA LA REGIÓN HOMOGÉNEA 3.**

**A.5.1.1. SPEI – 3 (SEQUIA A CORTO PLAZO)**

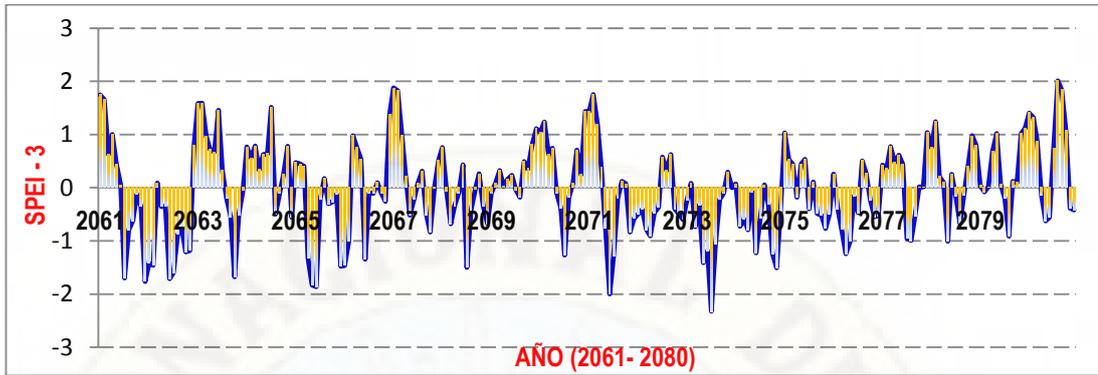
**a. SPEI – 3 meses periodo (2020-2040).**



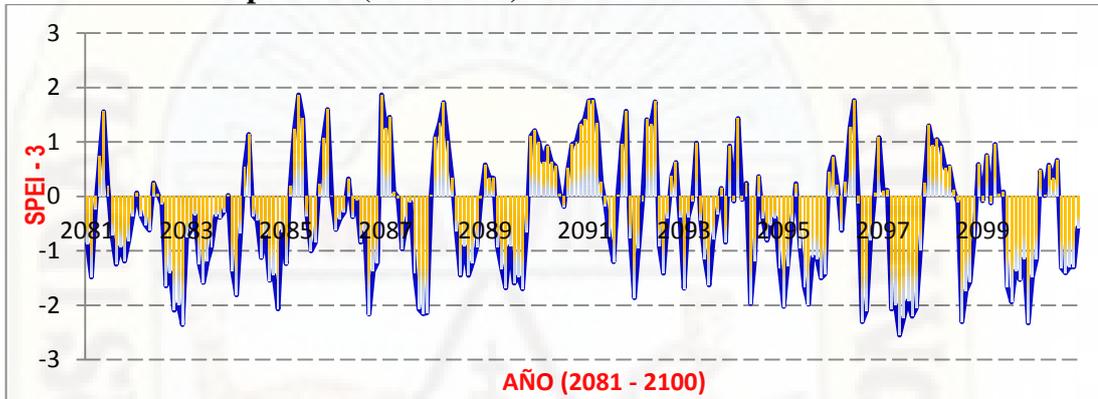
**b. SPEI -3 meses periodo (2041-2060).**



**c. SPEI -3 meses periodo (2061-2080).**

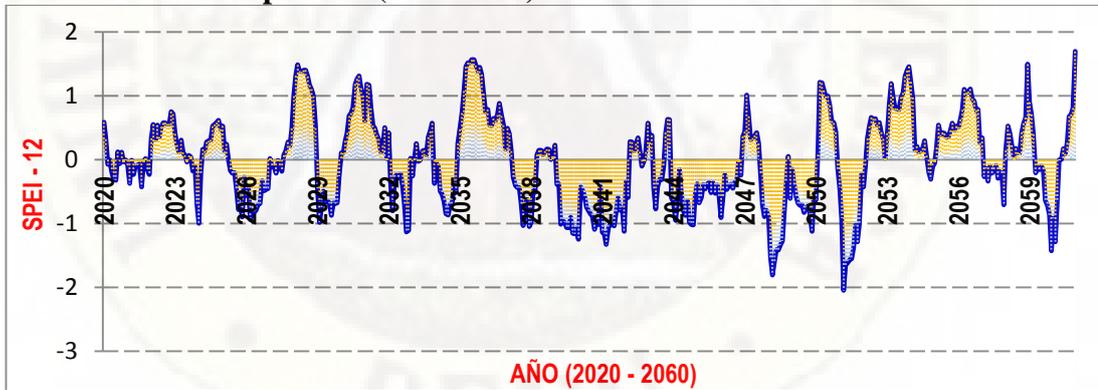


**d. SPEI -3 meses periodo (2081-2100).**

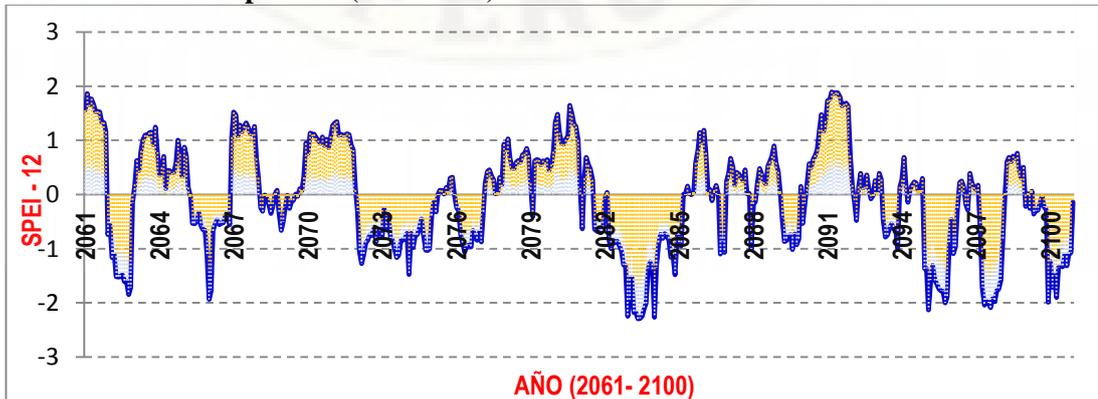


**A.5.1.2. SPEI – 12 (SEQUIA A LARGO PLAZO).**

**a. SPEI- 12 meses periodo (2020-2060).**



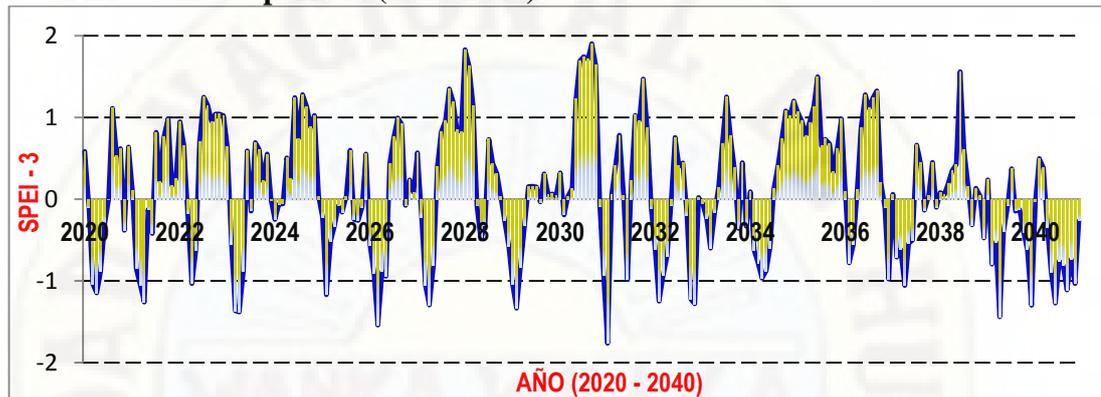
**b. SPEI -12 meses periodo (2061-2100)**



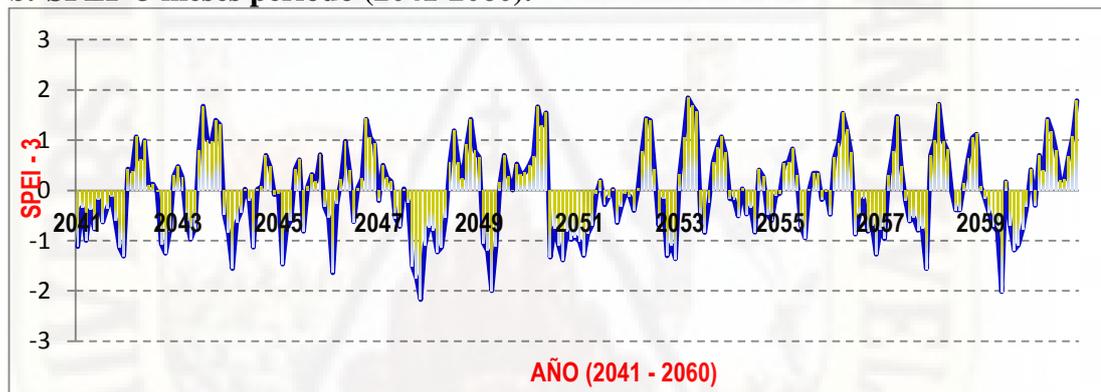
## A.5.2. SPEI A ESCALAS 3 y 12 MESES PARA LA REGIÓN HOMOGÉNEA 4.

### A.5.2.1. SPEI – 3 (SEQUIA A CORTO PLAZO)

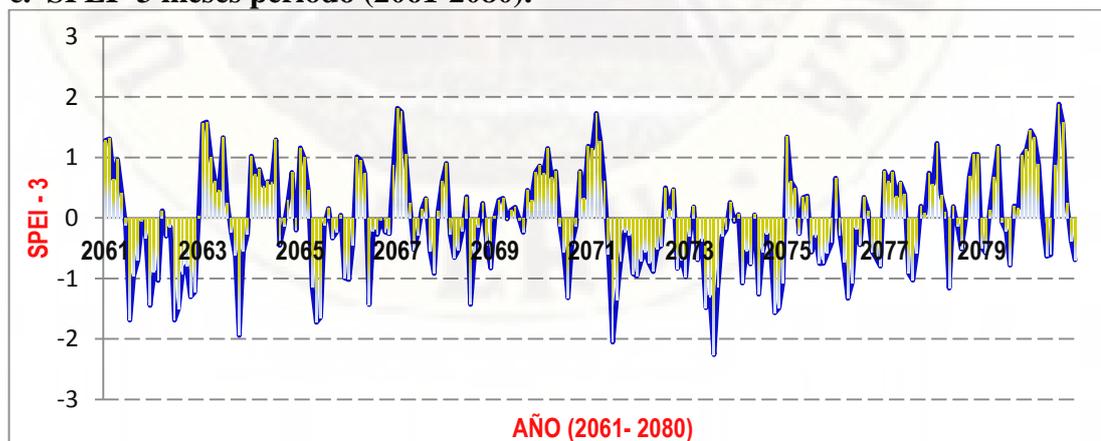
#### a. SPEI – 3 meses periodo (2020-2040).



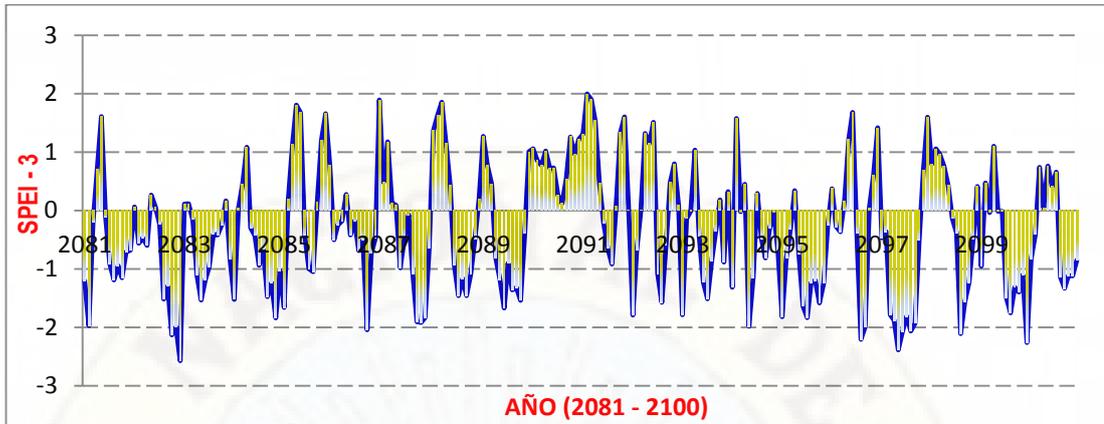
#### b. SPEI -3 meses periodo (2041-2060).



#### c. SPEI -3 meses periodo (2061-2080).

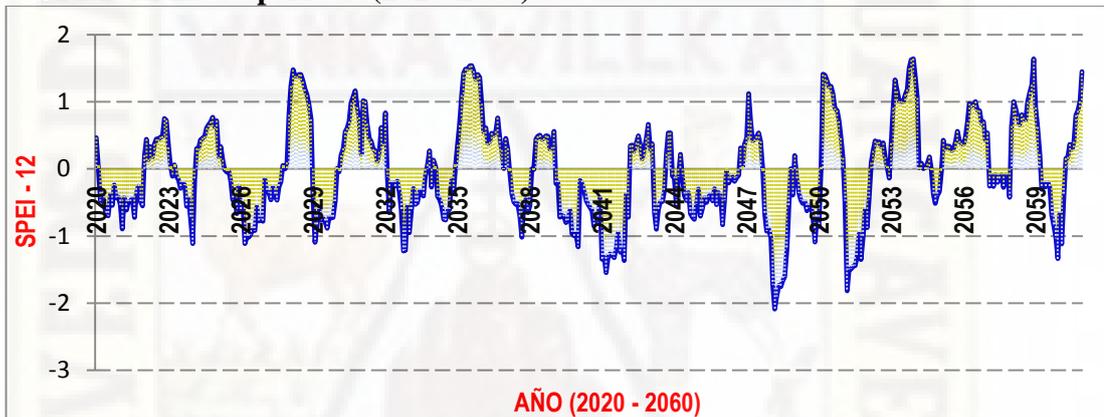


#### d. SPEI -3 meses periodo (2081-2100).

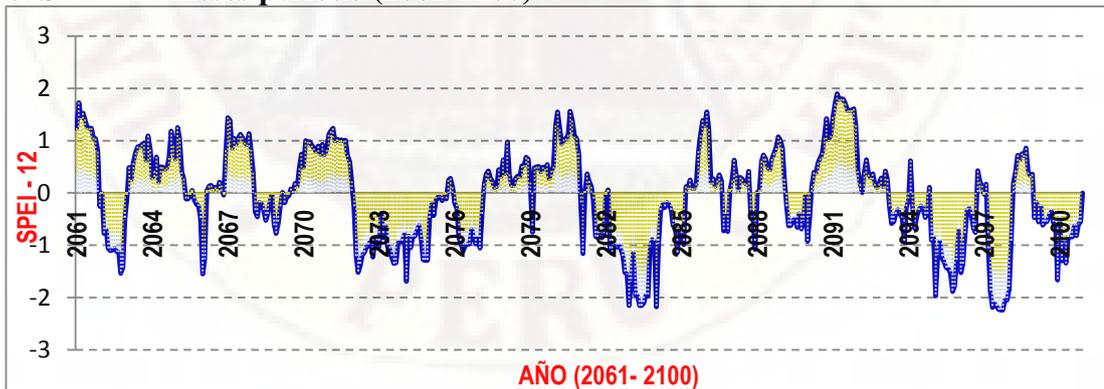


### A.5.2.2. SPEI – 12 (SEQUIA A LARGO PLAZO).

#### a. SPEI- 12 meses periodo (2020-2060).



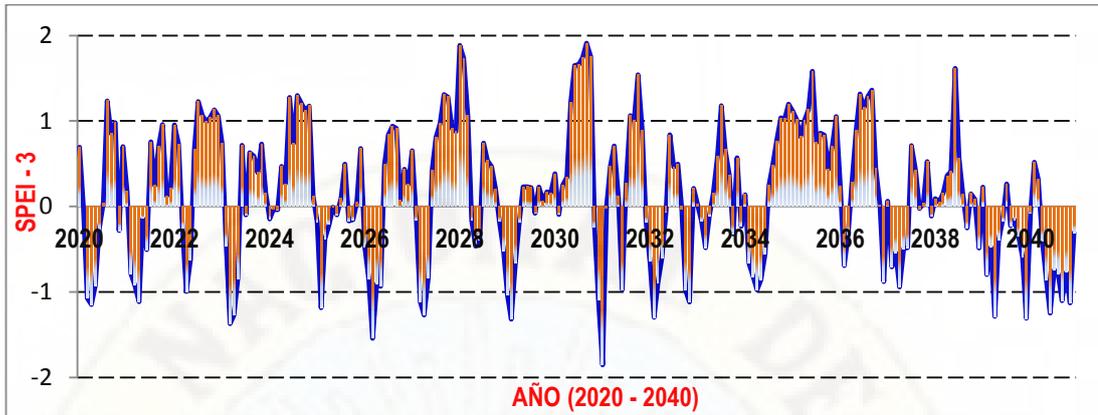
#### b. SPEI -12 meses periodo (2061-2100)



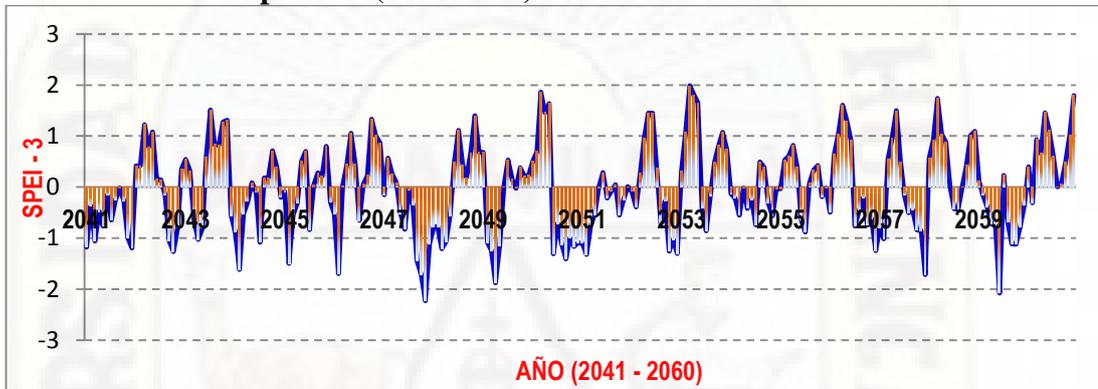
### A.5.3. SPEI A ESCALAS 3 y 12 MESES PARA LA REGIÓN HOMOGÉNEA 5.

#### A.5.3.1. SPEI – 3 (SEQUIA A CORTO PLAZO)

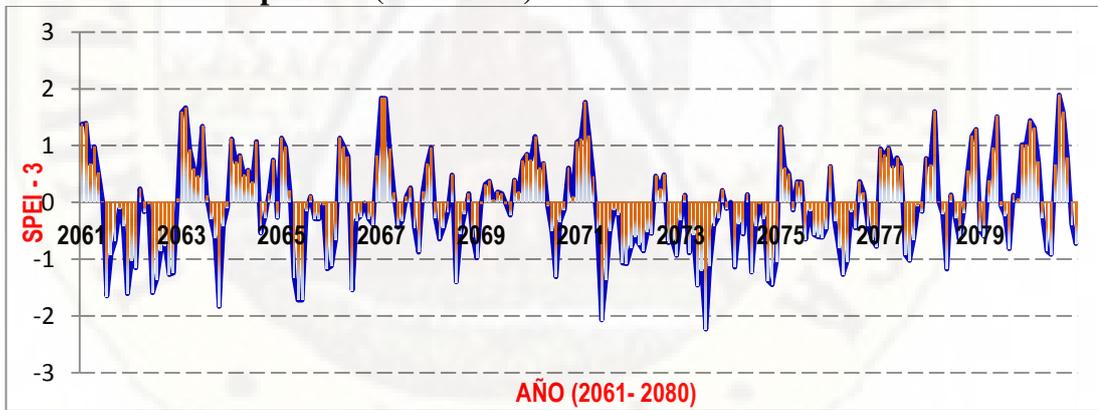
##### a. SPEI – 3 meses periodo (2020-2040).



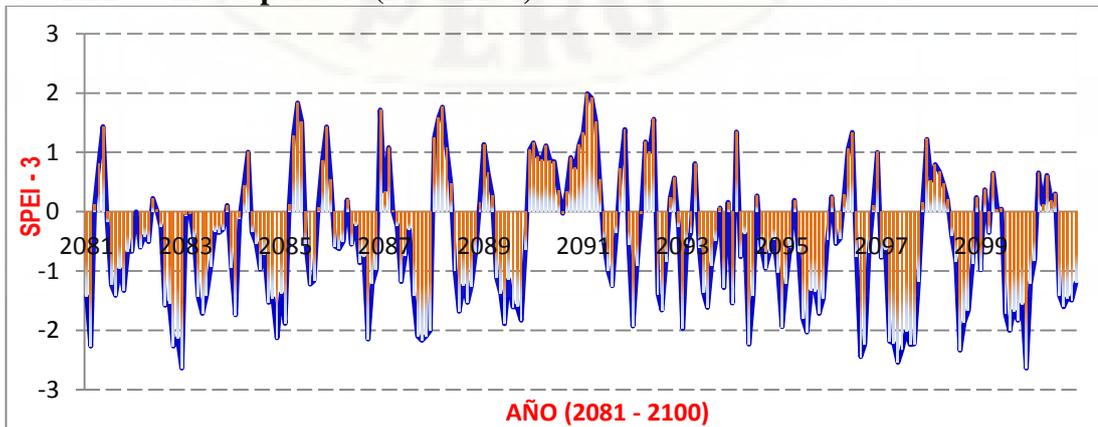
**b. SPEI – 3 meses periodo (2041-2060).**



**c. SPEI – 3 meses periodo (2061-2080).**

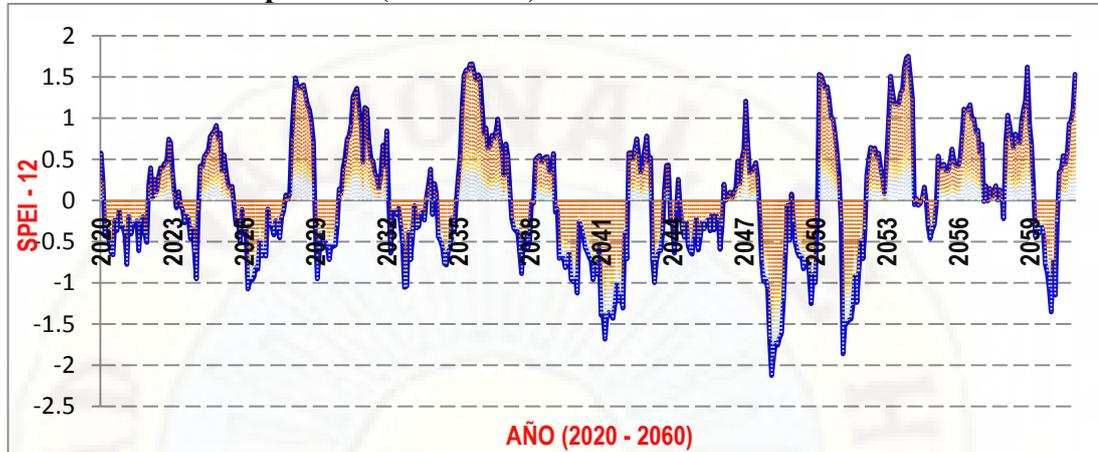


**d. SPEI – 3 meses periodo (2081-2100).**

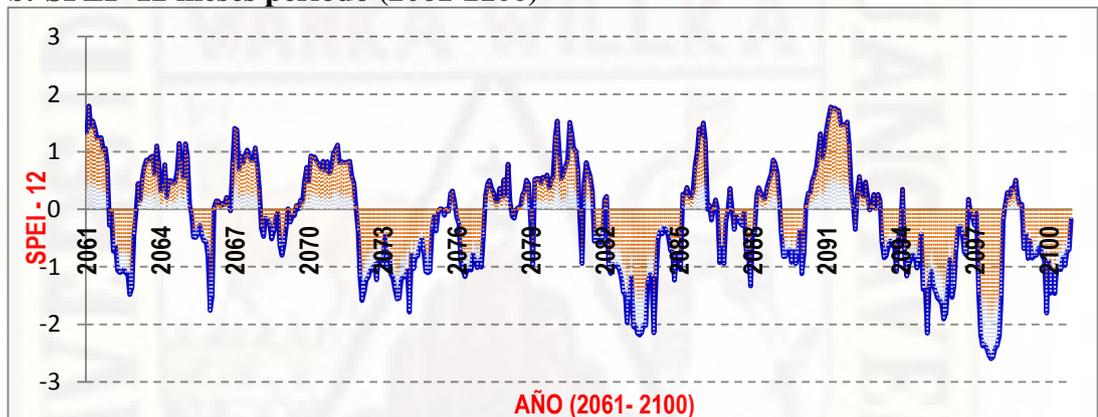


### A.5.3.2. SPEI – 3 (SEQUIA A LARGO PLAZO)

#### a. SPEI- 12 meses periodo (2020-2060).



#### b. SPEI- 12 meses periodo (2061-2100)



### A.6. Rutinas R para obtener Resultados en la investigación.

#### a. Código Fuente A.6.1: Rutinas R para generar datos de precipitaciones y temperaturas máximas mínimas mensuales de precipitaciones espaciales de PISCOp.

```
# UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA.  
# TESIS: ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUIA EN LA CUENCA DEL  
# RIO ICHU UTILIZANDO DATOS GENERADOS POR TELEDETECCIÓN  
# -HUANCVELICA-2019.  
# AUTOR: Bachiller: VARGAS MONTES, Alexander Jefferson.  
#=====
```

#Rutinas R para generar datos de precipitaciones y -  
#-temperaturas maximas minimas mensuales de precipitaciones-  
#-espaciales PISCOp  
#=====

```
# INSTALAR Y CARGAR PAQUETES NECESARIOS  
# Instalar paquetes  
install.packages("raster")  
install.packages("ncdf4")  
#cargar paquetes  
library(raster)  
library(ncdf4)
```

```

#=====
# GUARDANDO EL PROYECTO EN EL DIRECTORIO DE TRABAJO |
#"seleccionar carpeta"
#Carpeta de trabajo lo más cerca de MIS DOCUMENTOS
setwd("E:/Alexander_Datos_PISCO/Leer PISCO")
rm(list = ls())
#=====
# CARGAR FUNCIONES AUXILIARES
#=====
long_lat <- read.csv("long_lat.csv", header = T)
raster_pp <- raster::brick("PISCOpm.nc")
sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]], long_lat,
                                  cellnumbers = T)[,1]
data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
write.csv(data_long_lat, "data_long_lat.csv", quote = F)

```

**b. Código Fuente A.6.2: Rutinas R para obtener series de tiempo de los 10 puntos de registro.**

```

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA.
# TESIS: ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA EN LA CUENCA DEL
# RIO ICHU UTILIZANDO DATOS GENERADOS POR TELEDETECCIÓN
# -HUANCAMELICA-2019.
# AUTOR: Bachiller: VARGAS MONTES, Alexander Jefferson.
# Email:jefferson_15_94@hotmail.com
#=====
#Rutinas R para obtener series de tiempo de los 10 puntos
#- de registro
#=====
# INSTALAR Y CARGAR PAQUETES NECESARIOS
#=====
# Instalar paquetes
install.packages("gstat")
install.packages("sp")
install.packages("rgdal")
install.packages("rgeos")
install.packages("maptools")
install.packages("xts")
install.packages("lubridate")
install.packages("raster")
install.packages("corrplot")
install.packages("airGR")
#cargar paquetes
library(gstat)
library(sp)
library(rgdal)
library(rgeos)
library(maptools)
library(xts)
require(lubridate)
library(corrplot)
library(cutoffR)
library(airGR)
library(lattice)
library(latticeExtra)
#=====
# GUARDANDO EL PROYECTO EN EL DIRECTORIO DE TRABAJO
#=====

```

```

#"seleccionar carpeta"
#Carpeta de trabajo lo más cerca de MIS DOCUMENTOS
WF <- "E:/cutoff_Alexander"
setwd(WF)
#=====
# CARGAR FUNCIONES AUXILIARES
#=====
source("Script.auxiliares/idw.utilidades.R")
source("Script.auxiliares/utilidades.R")
#=====
#DEFINIENDO SISTEMA DE COORDENADAS Y VARIABLE A INTERPOLAR
#=====
utm<-"+init=epsg:32718"# EPSG:32718: WGS 84 / UTM zone 18S
wgs<-"+proj=longlat +datum=WGS84"
#variable = "TEMP"#variable a interpolar
id.comun = "CODIGO" #identificador de estaciones
#=====
# IMPORTAR Y DAR FORMATO A LOS DATOS;
#=====
PUNTOS.DE.REGISTRO.EN.LA.CUENCA.DEL.RIO.ICHU <- as.xts(read.zoo
("Datos/prec.csv",header = TRUE,sep = ",",check.names = FALSE))
plot.zoo(PUNTOS.DE.REGISTRO.EN.LA.CUENCA.DEL.RIO.ICHU)
library(RColorBrewer)
#DEFINIR PERIODO DE ANALISIS AQUI #>definir periodo de analisis <
obs_d <- window(data.mensual[,],start="1994-01-01",end="2016-12-01")
plot.zoo(as.zoo(obs_d),main="Seriesdetiempodelospuntosderegistro")
# GRAFICANDO LAS PRECIPITACIONES EN SERIES DE TIEMPO
xyplot(obs_d, col="blue")# DATOS OBSERVADOS

```

c. Código Fuente A.6.3: **Rutinas R para obtener el SPI a diferentes escalas de tiempo.**

```

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA.
# TESIS: ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA EN LA CUENCA DEL
# RIO ICHU UTILIZANDO DATOS GENERADOS POR TELEDETECCIÓN
# -HUANCAMELICA-2019.
# AUTOR: Bachiller: VARGAS MONTES, Alexander Jefferson.
# Email:jefferson_15_94@hotmail.com
#=====
#Rutinas R para obtener SPI a diferentes escalas de tiempo
#=====
# INSTALAR Y CARGAR PAQUETES NECESARIOS
#=====
# Instalar paquetes
install.packages("SPEI")
#cargar paquetes
library(SPEI)
#=====
# GUARDANDO EL PROYECTO EN EL DIRECTORIO DE TRABAJO
#=====
#"seleccionar carpeta"
#Carpeta de trabajo lo más cerca de MIS DOCUMENTOS
WF <- "E:/Datos_Alexander"
setwd(WF)
#=====
# CARGAR FUNCIONES AUXILIARES
#=====
# SPI a una escala de tiempo 1 mes
spi1<-spi(Datos1$prcp,1)

```

```

spi1
plot(spi1)
# SPI a una escala de tiempo 3 meses
spi3<-spi(Datos1$prcp,3)
spi3
plot(spi3)
# SPI a una escala de tiempo 6 meses
spi6<-spi(Datos1$prcp,6)
spi6<-spi(Datos1$prcp,6)
spi6
plot(spi6)
# SPI a una escala de tiempo 9 meses
spi9<-spi(Datos1$prcp,9)
spi9
plot(spi9)
# SPI a una escala de tiempo 12 meses
spi12<-spi(Datos1$prcp,12)
spi12
plot(spi12)

```

**d. Código Fuente A.6.4: Rutinas R para obtener el SPEI a diferentes escalas de tiempo.**

```

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA.
# TESIS: ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA EN LA CUENCA DEL
# RIO ICHU UTILIZANDO DATOS GENERADOS POR TELEDETECCIÓN
# -HUANCAMELICA-2019.
# AUTOR: Bachiller: VARGAS MONTES, Alexander Jefferson.
# Email:jefferson_15_94@hotmail.com
#=====
#Rutinas R para obtener SPEI a diferentes escalas de tiempo
#=====
# INSTALAR Y CARGAR PAQUETES NECESARIOS
#=====
# Instalar paquetes
install.packages("SPEI")
#cargar paquetes
library(SPEI)
#=====
# GUARDANDO EL PROYECTO EN EL DIRECTORIO DE TRABAJO
#=====
#"seleccionar carpeta"
#Carpeta de trabajo lo más cerca de MIS DOCUMENTOS
WF <- "E:/Datos_Alexander"
setwd(WF)
#=====
# CARGAR FUNCIONES AUXILIARES
#=====
Region1$PET<-thornthwaite(Tmin= Region1$Tmin, Tmax = Region1$Tmax,
                          lat = -13.1088028)

Region1$PET
CwBAL<-Region1$prcp-Region1$PET
CwBAL]
# SPI a una escala de tiempo 1 mes
spei1<-spi(CwBAL,1)
spei1
plot.spei(spei1)
# SPI a una escala de tiempo 3 meses
spei3<-spi(CwBAL,3)

```