



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



**“ANÁLISIS DE SEQUÍAS CON PERSPECTIVAS DE CAMBIO  
CLIMÁTICO EN LA UNIDAD HIDROGRÁFICA HUANCANÉ, EN  
EL PERÍODO 2020 – 2100”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. HEIDI MARGARITA SARDON QUISPE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AGRÍCOLA**

**PUNO - PERÚ**

**2021**



## DEDICATORIA

*A Dios y la Virgen, que me han dado fuerzas para poder cumplir una de mis tantas metas trazadas para mi vida. A mi padre Hernán Sardon Espezua por haberme ofrecido su amor y calidez. Papá, eres mi motivación más grande para concluir cada logro en mi vida. A mi madre Clotilde Quispe Romero por ser la mujer que me dio la vida, por quererme con todo su corazón y cuidar de mí hasta hoy en día. No va haber manera de devolverles todo lo que me han dado.*

*Dedico de manera especial a mi hermana Emily pues ella fue el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, sentó en mí la base de responsabilidad y deseos de superación.*

*Por último, a mi abuela Constantina Romero Cuevas (Q.E.P.D), sé que desde el cielo sonrío y está orgullosa de mí. Eres mi ángel guardián, mi protectora incondicional.*

***Heidi Margarita Sardon Quispe***



## AGRADECIMIENTOS

Querido Dios, solo quiero tomarte un minuto y no pedirte nada, simplemente agradecerte por todo lo que me has dado.

Gracias papá por tus enseñanzas, historias, paseos y por tu mano fuerte que aún me sigue acompañándome. Por haberte esforzado por mi futuro y entregarme tu día a día, dándome motivación constantemente para alcanzar mis anhelos. Madre mía, gracias por enseñarme que no es más valioso el que más tiene sino el que más da a quien lo necesite, tu agradable forma de ser y tu actitud bondadosa no tiene comparación.

A todos que contribuyeron en mi formación académica y profesional: a mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, quienes compartieron conmigo sus conocimientos a lo largo de mi educación universitaria, particularmente a mi asesor el Dr. Roberto Alfaro Alejo por su conocimiento científico, para guiarme durante todo el desarrollo de la presente Tesis.

Finalmente, de manera especial a mi querido amigo y colega Kevin Traverso, por su apoyo académico y paciencia para la elaboración de este trabajo, que Dios te bendiga querido amigo.

**Heidi Margarita Sardon Quispe**



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 14**

**ABSTRACT..... 15**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1. GENERALIDADES..... 16**

**1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN ..... 17**

**1.3. OBJETIVOS..... 18**

1.3.1. Objetivo general..... 18

1.3.2. Objetivos específicos ..... 18

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1. ANTECEDENTES ..... 19**

2.1.1. Sequías en el Perú ..... 22

**2.2. SEQUÍA ..... 24**

**2.3. ARIDEZ ..... 25**

**2.4. DESERTIFICACIÓN..... 26**



<b>2.5. TIPOS DE SEQUÍA.....</b>	<b>27</b>
2.5.1. Sequía meteorológica.....	27
2.5.2. Sequía agrícola.....	28
2.5.3. Sequía hidrológica .....	28
2.5.4. Sequía socioeconómica.....	29
<b>2.6. CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS .....</b>	<b>30</b>
2.6.1. Severidad.....	31
2.6.2. Intensidad.....	31
2.6.3. Duración.....	31
2.6.4. Frecuencia.....	31
<b>2.7. ÍNDICES DE SEQUÍAS.....</b>	<b>32</b>
2.7.1. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).....	32
2.7.2. Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) .....	35
2.7.3. Índice de Sequía de Caudales (SDI) .....	36
<b>2.8. CLIMA Y SISTEMA CLIMÁTICO.....</b>	<b>36</b>
2.8.1. Variabilidad climática.....	38
2.8.2. Cambio climático.....	39
<b>2.9. MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL (GCM).....</b>	<b>41</b>
2.9.1. Las trayectorias de concentración representativas (RCP).....	44
<b>2.10. REDUCCIÓN DE ESCALA (“DOWNSCALING”).....</b>	<b>47</b>
2.10.1. Corrección de sesgo de escala lineal (Linear Scaling Bias Correction) .....	48

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1. ZONA DEL ESTUDIO.....</b>	<b>49</b>
-----------------------------------	-----------



3.1.1.	Ubicación geográfica .....	49
3.1.2.	Ubicación hidrográfica.....	49
3.1.3.	Ubicación política .....	49
3.1.4.	Población y demografía .....	49
3.1.5.	Caracterización socio-económica .....	50
<b>3.2.</b>	<b>DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN.....</b>	<b>52</b>
3.2.1.	Modelo Digital de Elevación (DEM).....	52
3.2.2.	PISCOp – (Información Observada).....	52
3.2.3.	Precipitación de los GCM.....	53
<b>3.3.</b>	<b>MATERIALES Y SOFTWARE .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.</b>	<b>METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>57</b>
3.4.1.	Downscaling para los modelos de cambio climático .....	59
3.4.2.	Determinación de las sequías históricas y proyectadas .....	64
3.4.3.	Caracterización de las sequías observadas y proyectadas.....	66
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
<b>4.1.</b>	<b>DOWNSCALING DE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA (GCM).....</b>	<b>69</b>
4.1.1.	Extracción de datos - precipitación mensual PISCOp .....	70
4.1.2.	Extracción de precipitación mensual proyectada GCM.....	70
4.1.3.	Reducción de escala para los GCM .....	71
<b>4.2.</b>	<b>ANÁLISIS DE SEQUÍAS OBSERVADAS Y PROYECTADAS EN</b>	
	<b>CAMBIO CLIMÁTICO.....</b>	<b>74</b>
4.2.1.	Sequías observadas PISCOp (SPI-6) .....	75
4.2.2.	Sequías proyectadas GCM (SPI-6) .....	77



<b>4.3. CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS EN TÉRMINOS DE SU DURACIÓN, INTENSIDAD Y SEVERIDAD .....</b>	<b>85</b>
4.3.1. Características de las sequías observadas (1981 - 2005) .....	86
4.3.2. Características de las sequías proyectadas período I (2020 – 2050).....	87
4.3.3. Características de las sequías proyectadas período II (2070 – 2100) .....	90
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>95</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>106</b>
<b>Anexo A:</b> Unidad Hidrográfica Huancané y sus 58 subcuencas.....	106
<b>Anexo B:</b> Código para leer la información de la base de datos PISCO en RStudio. ...	107
<b>Anexo C:</b> Downscaling por Linear Scaling Bias Correction .....	109
<b>Anexo D:</b> Sequías históricas y proyectadas – SPI6.....	112
<b>Anexo E:</b> Caracterización de sequías proyectadas .....	125

**Área:** Ingeniería y Tecnología

**Línea:** Recursos Hídricos

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 19 de julio del 2021



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de los valores del SPI.....	34
<b>Tabla 2.</b> Definición de estados de sequía hidrológica según el SDI.....	36
<b>Tabla 3.</b> Detalle de los modelos GCM más aplicados. ....	43
<b>Tabla 4.</b> Visión de conjunto de los “Representative Concentration Pathways” (RCP). 45	
<b>Tabla 5.</b> Modelos de Circulación General utilizados en el presente estudio. ....	53
<b>Tabla 6.</b> Modelos seleccionados para este estudio, en base al CMIP5.....	56
<b>Tabla 7.</b> Áreas de influencia en la Unidad Hidrográfica Huancané. ....	69
<b>Tabla 8.</b> Cálculo del factor de corrección del modelo CMCC/ RCP 8.5. ....	72
<b>Tabla 9.</b> Categorías del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). ....	74
<b>Tabla 10.</b> Características de las sequías proyectadas (SPI-6) - período (2020-2050) ...	89
<b>Tabla 11.</b> Características de las sequías proyectadas (SPI-6) - período (2070-2100). ..	91
<b>Tabla 12.</b> Caracterización temporal de la sequía histórica en el período 1981 – 2005	112
<b>Tabla 13.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo CMCC-CM en el escenario RCP 4.5 .....	113
<b>Tabla 14.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo CMCC-CM en el escenario RCP 8.5 .....	114
<b>Tabla 15.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo GFDL - CM3 en el escenario RCP 4.5.....	115
<b>Tabla 16.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo GFDL – CM3 en el escenario RCP 8.5.....	116
<b>Tabla 17.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5 .....	117





<b>Tabla 18.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5 .....	118
<b>Tabla 19.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo CMCC-CM en el escenario RCP 4.5. ....	119
<b>Tabla 20.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo CMCC-CM en el escenario RCP 8.5 .....	120
<b>Tabla 21.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo GFDL – CM3 en el escenario RCP 4.5 .....	121
<b>Tabla 22.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo GFDL - CM3 en el escenario RCP 8.5.....	122
<b>Tabla 23.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5 .....	123
<b>Tabla 24.</b> Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5 .....	124



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Secuencia de los diversos tipos de sequía .....	30
<b>Figura 2.</b> Componentes del sistema climático. ....	37
<b>Figura 3.</b> Futuros niveles de forzamiento radiativo para RCP y concentraciones totales de CO <sub>2</sub> -equivalente (en ppm) en 2100. ....	47
<b>Figura 4.</b> Ubicación hidrográfica de la cuenca Huancané en la vertiente del Titicaca..	51
<b>Figura 5.</b> Proyecciones de precipitaciones global CMIP5. ....	55
<b>Figura 6.</b> Diagrama de la metodología de la presente investigación. ....	58
<b>Figura 7.</b> Delimitación por Taudem en la Unidad Hidrográfica Huancané. ....	59
<b>Figura 8.</b> Reducción de escala adaptada a los modelos globales. ....	62
<b>Figura 9.</b> Características de las sequías. ....	68
<b>Figura 10.</b> Climatología histórica en base a PISCOp, período 1981-2005. ....	70
<b>Figura 11.</b> Precipitación observada y proyectada sin corrección de sesgo. ....	72
<b>Figura 12.</b> Comprobación de la corrección de sesgo del modelo CMCC-CM/ RCP 4.5. ....	73
<b>Figura 13.</b> Series de SPI6 para las 58 subcuencas en el período 1981-2005. ....	75
<b>Figura 14.</b> Series de SPI6 basado en el modelo CMCC-CM, período 2020-2050. ....	78
<b>Figura 15.</b> Series de SPI6 basado en el modelo GFDL-CM3, período 2020-2050. ....	79
<b>Figura 16.</b> Series de SPI6 basado en el modelo MIROC5, período 2020-2050 .....	80
<b>Figura 17.</b> Series de SPI6 basado en el modelo CMCC-CM, período 2070-2100 .....	82
<b>Figura 18.</b> Series de SPI6 basado en el modelo GFDL-CM3, período 2070-2100 .....	83
<b>Figura 19.</b> Series de SPI6 basado en el modelo MIROC5, período 2070-2100 .....	84
<b>Figura 20.</b> Mapas de duración, intensidad y severidad en el período (1981-2005). ....	87



<b>Figura 21.</b> Mapas de duración, intensidad y severidad en el período I (2020-2050)	
-RCP4.5.....	88
<b>Figura 22.</b> Mapas de duración, intensidad y severidad en el período I (2020-2050)	
-RCP8.5.....	89
<b>Figura 23.</b> Mapas de duración, intensidad y severidad en el período II (2070-2100)	
-RCP4.5.....	90
<b>Figura 24.</b> Mapas de duración, intensidad y severidad en el período II (2070-2100)	
-RCP8.5.....	91
<b>Figura 25.</b> Downscaling por Linear Scaling Bias Correction en el modelo	
CMCC-CM. ....	109
<b>Figura 26.</b> Downscaling por Linear Scaling Bias Correction en el modelo	
GFDL-CM3.....	110
<b>Figura 27.</b> Downscaling por Linear Scaling Bias Correction en el modelo MIROC5.	111
<b>Figura 28.</b> Probabilidad de sequías proyectadas (2020 - 2050) en duración, intensidad y severidad con el GCM - CMCC-CM.....	125
<b>Figura 29.</b> Probabilidad de sequías proyectadas (2020 - 2050) en duración, intensidad y severidad con el GCM – GFDL-CM3. ....	125
<b>Figura 30.</b> Probabilidad de sequías proyectadas (2020 - 2050) en duración, intensidad y severidad con el GCM – MIROC5.....	126
<b>Figura 31.</b> Probabilidad de sequías proyectadas (2070 - 2100) en duración, intensidad y severidad con el GCM – CMCC-CM.....	126
<b>Figura 32.</b> Probabilidad de sequías proyectadas (2070 - 2100) en duración, intensidad y severidad con el GCM – GFDL-CM3. ....	127



**Figura 33.** Probabilidad de sequías proyectadas (2070 - 2100) en duración,  
intensidad y severidad con el GCM – MIROC5..... 127



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

<b>ANA</b>	: Autoridad Nacional del Agua
<b>CMIP</b>	: Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados
<b>DEM</b>	: Modelo Digital de Elevación
<b>GCM</b>	: Modelos Climáticos Globales
<b>GEI</b>	: Gases de Efecto Invernadero
<b>OMM</b>	: Organización Meteorológica Mundial
<b>PISCO</b>	: Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological
<b>R</b>	: Lenguaje de Programación
<b>RCP</b>	: Trayectoria de Concentración Representativa
<b>SENAMHI</b>	: Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología
<b>SPI</b>	: Índice Estandarizado de Precipitación
<b>TDPS</b>	: Titicaca, Desaguadero, Poopó, Salar de Coipasa



## RESUMEN

La sequía es uno de los mayores desastres naturales que ocasiona pérdidas económicas principalmente en el sector agrícola, lo cual sumado a una agricultura en secano con escasa tecnificación hacen de esta una zona vulnerable ante las sequías, por lo tanto, la presente investigación tiene como objeto realizar el análisis espacio – temporal de las sequías históricas y proyectadas en la Unidad Hidrográfica Huancané. Esta cuenca se ubica en el sistema TDPS, al sur del Perú en el departamento de Puno. Para este fin se utilizó precipitación histórica mensual de la base de datos PISCOp en su período 1981-2005, y datos de precipitación proyectada 2020-2100 obtenido de los GCM (CMCC-CM, GFLD-CM3 y MIROC5). La metodología planteada desarrolló el procedimiento de Downscaling para los 6 escenarios climáticos (3GCM x 2RCP). Seguidamente se empleó el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) para la caracterización de sequía en duración, intensidad y severidad. Los resultados identificaron condiciones de exceso y déficit de las precipitaciones a corto plazo (2020-2050) y a largo plazo (2070-2100). En el período II se presentó 14 eventos de sequías moderada a extrema siendo el período con mayor número de eventos, asimismo en el período I se identificó 9 eventos de sequías. Se evidenció que a largo plazo se incrementó la intensidad y severidad de las sequías para el escenario de emisión RCP4.5, y a corto plazo para ambos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5); en comparación a las sequías históricas. Adicionalmente se observó que para ambos períodos la duración de las sequías en promedio es de 2 a 3 meses. Finalmente, se determinó un peligro de sequías a largo plazo, siendo probable que se incremente históricamente a causa de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI).

**Palabras clave:** Sequía, cambio climático, SPI, downscaling, cuenca Huancané.



## ABSTRACT

Drought is one of the major natural disasters that causes economic losses mainly in the agricultural sector, which, added to a dry agriculture with little technification, make this an area vulnerable to droughts, therefore, the present research aims to carry out the spatio-temporal analysis of the historical and projected droughts in the Huancané Hydrographic Unit. This basin is located in the TDPS system, in southern Peru in the department of Puno. For this purpose, monthly historical precipitation from the PISCOp database was used in its period 1981-2005, and projected precipitation data 2020-2100 obtained from the GCMs (CMCC-CM, GFLD-CM3 and MIROC5). The proposed methodology developed the Downscaling procedure for the 6 climate scenarios (3GCM x 2RCP). Next, the Standardized Precipitation Index (SPI) was used to characterize drought in duration, intensity and severity. The results identified short-term (2020-2050) and long-term (2070-2100) rainfall excess and deficit conditions. In period II there were 14 moderate to extreme drought events, being the period with the highest number of events, also in period I 9 drought events were identified. It was evidenced that in the long term the intensity and severity of the droughts increased for the emission scenario RCP4.5, and in the short term for both emission scenarios (RCP4.5 and RCP8.5); compared to historical droughts. Additionally, it was observed that for both periods the duration of the droughts on average is 2 to 3 months. Finally, a long-term danger of droughts was determined, which is likely to increase historically due to the concentration of greenhouse gases (GHG).

**Keywords:** Drought, climate change, SPI, downscaling, Huancané basin.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. GENERALIDADES

El uso y disponibilidad del recurso hídrico ha representado un problema desde tiempos inmemoriales en la mayoría de países; nos encontramos frente a un recurso limitado cuya distribución espacial y temporal es muy variable y difícil de predecir.

Las sequías son particularmente importantes en regiones donde las actividades económicas son altamente dependientes de los recursos hídricos (Vicente-Serrano et al., 2015, p. 3032), como es el caso del Perú. Siendo el Altiplano una región sujeta al cambio climático (Pilares et al., 2018), y la cuenca del río Huancané uno de los principales tributarios del Lago Titicaca (Traverso et al., 2019), el trabajo planteado considera analizar las sequías con perspectivas de cambio climático bajo los escenarios histórico (1981–2005) y futuro (2020-2100), como caso de estudio se ha determinado la cuenca Huancané – Puno cuyas características climáticas y actividades agrícolas – agropecuarias de la población ha hecho de la sequía un eje muy importante, este análisis de sequía se determina a través del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).

Según Pinazo (2016), el método de índice SPI es un método apropiado para determinar las sequías en el departamento de Puno porque utiliza información de precipitación total mensual, el mismo que se cuenta con esta información y permite realizar un análisis temporal de los eventos de sequías enfatizando en las sequías moderadas, sequías severas y sequías extremas.





## 1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La falta de precipitaciones que se vive en nuestro país y la irregularidad de las mismas traerá como consecuencia eventos de sequía que pueden aumentar su magnitud por la presencia del fenómeno de El Niño, la Niña y el cambio climático.

El informe Nacional de Gestión de Sequías de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2013), describieron que la sierra específicamente en el Altiplano de Puno es la zona con mayor vulnerabilidad a las sequías, predominando en las áreas que son dependientes directamente de la lluvia (agricultura en secano) ya que aproximadamente el 95% de la tierra de cultivo son en secano (1'200,000 ha) (pp. 1-3).

En la cuenca de Huancané y en el Altiplano puneño, la problemática del productor andino es la escasez de alimentos para los ganados en épocas de estiaje (Belizario, 2014, 2015), (abril a noviembre), de tal manera que en épocas de lluvia los productores se dedican a la siembra de forraje, con el fin de almacenar alimentos para la época de estiaje. Sin embargo, a veces en las épocas de lluvia no hubo precipitaciones y sumado la presencia esporádica de heladas, el sector agro se vio afectado.

Por consiguiente, este trabajo analizó las sequías proyectadas en la Unidad Hidrográfica Huancané para el período de 2020 – 2100, empleando el análisis de sequías por el Índice Estandarizado de Precipitación SPI (“Standard Precipitation Index”) este índice predecirá el nivel de severidad y la extensión espacial y temporal de los episodios secos y húmedos de los episodios a corto plazo y largo plazo. En los últimos años, debido a la influencia de múltiples factores, la frecuencia de la sequía ha aumentado y el alcance de la sequía se ha expandido (Belizario et al., 2013b, 2013a), por el ende el uso de índices estandarizados para caracterizar condiciones de secuencia se ha incrementado, lo que es evidente desde el punto de vista científico en un enfoque de investigación conceptual de



los índices como desde el aspecto operativo como herramienta para asistir a la toma de decisiones en el sector agrícola y el manejo de recursos hídricos (Hayes et al., 2011, p. 485-488).

En ese contexto, conocer la variación espacio-temporal de las sequías de una cuenca y sus características presentes y futuras serán de utilidad en la evaluación de la vulnerabilidad frente a las sequías a fin de elegir adecuadas estrategias de mitigación de los impactos de las sequías en esta zona de Perú (Gálvez, 2017).

### **1.3. OBJETIVOS**

#### 1.3.1. Objetivo general

- Analizar las sequías con perspectivas de cambio climático bajo los escenarios histórico y futuro de los períodos 1981-2005 y 2020-2100 respectivamente, en la Unidad Hidrográfica Huancané.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar el procedimiento de Downscaling para los modelos de cambio climático y sus experimentos correspondientes (rcp4.5 y rcp8.5).
- Determinar las sequías históricas y proyectadas a futuro bajo dos escenarios de cambio climático en la cuenca Huancané.
- Determinar la severidad, intensidad y duración de las sequías para cada período de análisis.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES

A pesar que existe interés por el tema de las sequías, son pocos los estudios que se centran en la relación causal entre las sequías meteorológicas y la consecuencia espacio-temporal en los recursos hídricos. Van Loon (2013) investigó los procesos de propagación de la sequía en los recursos hídricos mediante factores climáticos y físicos de cinco cuencas en Europa. Rodríguez (2013) y Lorenzo-Lacruz et al. (2013), estudiaron la variabilidad espacial y temporal de las sequías hidrológicas y su respuesta ante las sequías meteorológicas.

La gestión de los recursos hídricos para mitigar los riesgos de sequía se basa en comprender las características futuras, como el grado de gravedad, la probabilidad de ocurrencia, la frecuencia y la duración de las sequías previstas (Kamali et al., 2017, p. 241). Muchos investigadores han proyectado la ocurrencia de sequías en escenarios climáticos futuros utilizando Modelos Climáticos Globales (GCM). Liu et al. (2012), utilizó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), para construir una proyección histórica y futura de los patrones de sequía para la cuenca del río azul en Oklahoma, sus resultados predijeron más eventos de sequía en el futuro, periodo que comprende del año 2010 al 2099.

Pinazo (2016) investigó y determinó las sequías a través del método Índice de Precipitación Estandarizada en la provincia de Puno, para las estaciones Puno, Capachica, Uros, Laraqueri y Mañazo para un período de 48 años (1964 al 2011), de los 576 eventos analizados, donde el 1.2 % corresponde eventos extremadamente



húmedos, el 3.3 % a eventos muy húmedos, 10.2 % a eventos moderadamente húmedos, 41.1 % a eventos ligeramente húmedos, 24.1 % a eventos ligeramente seco, 11.8 % a eventos de sequías moderadas, 5.2 % a eventos de sequías severas y al 3 % a eventos de sequías extremas, estas últimas afectan a las actividades agrícolas por falta de humedad en el suelo. Y también recomienda la aplicación de modelos matemáticos, en el área de hidrología, que permitirá solucionar problemas medioambientales de carácter natural o inducidos por el hombre.

De acuerdo con Valverde & Marengo (2007), en su investigación de escenarios de cambio climático para la precipitación estacional en América del Sur a partir de modelos IPCC - CMIP4, analiza y compara 5 modelos globales (CCCMA, GFDL, MIROC, GISS y HadCM3), para evaluar la capacidad de estos modelos de reproducir la precipitación climatológica observada en América del Sur durante el período 1970-1999. También se discute el cambio de la climatología del modelo en un escenario de cambio climático para el período 2070-2099. Los resultados muestran que los modelos son capaces de reproducir las principales características del ciclo estacional de precipitación en América del Sur.

Campozano et al. (2020), evaluó las características espacio-temporal de las sequías presentes y futuras en Ecuador bajo dos vías de concentraciones representativas, denominados el RCP 4.5 y RCP 8.5. Los GCM aplicados en su estudio fueron dinámicamente reducidos del proyecto de comparación de modelos acoplados del CMIP fase 5, para las sequías en el tiempo presente de 1981–2005 y para el tiempo futuro del 2041-2070 utilizó el índice de precipitación estandarizado (SPI). Los resultados mostraron una tendencia ligeramente decreciente para futuras sequías para



todo el país, con una mayor reducción para sequías moderadas, seguidas de sequías severas y extremas.

Desde la posición de Segovia (2016), en su trabajo de investigación titulado “Precipitación estimada y sequía meteorológica futura en la cuenca Río Grande mediante el modelo de circulación global MRI”, donde primeramente realizo la reducción de escala del modelo climático, luego se empleó dicho modelo para estimar un escenario futuro para el escenario cercano (2020 - 2039) y lejano (2080 - 2099). Los resultados indicaron que las correlaciones entre precipitación estimada a partir del modelo y la precipitación de referencia, es aceptable a escala mensual.

Asimismo, existe otros antecedentes enfocados en Perú, relacionados con los escenarios de cambio climático hacia el futuro. Entre ellos se encuentra el trabajo de Moya et al. (2015), donde muestra algunos resultados para Perú con el modelo MIROC5, a partir de la cual se ajustaron sus proyecciones simuladas y se obtuvieron las tendencias futuras de las precipitaciones hacia 2030, 2070 y 2100. Los resultados mostraron un incremento de las precipitaciones hacia la zona norte del país (27.6 % hacia 2100), que incluye la zona costera y la región de Iquitos, al tiempo que puede esperarse una disminución hacia el sector sur.

Sostiene Sanabria et al. (2019), que el Altiplano peruano (Departamento de Puno) es considerado una de las zonas más sensibles y perturbadas por la variabilidad climática con implicancias en las actividades del sector agropecuario, hidroeléctrico, minero, etc.

Segovia (2016), menciona que en el futuro por el posible cambio climático la vulnerabilidad y las condiciones de vida en general serían afectadas, principalmente la actividad agropecuaria que es el principal sustento de la población.



El reporte de SENAMHI elaborado por Lavado et al. (2016), describe las condiciones de sequía a enero en el 2016 en las regiones Pasco, Junín, Lima, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Cusco, Moquegua, Arequipa, Tacna y Puno, considerando estados de sequía a corto (meteorológico) y largo plazo (hidrológico). Donde los resultados comparan los registros de precipitación promediados por cada región, se observa que considerando el SPI-3 comparado con períodos históricos (1981-2015) hasta enero del 2016. Las regiones de Tacna, Puno y Moquegua han superado sus períodos históricos de sequías extremas. Asimismo, Tacna y Moquegua también han superado sus históricos para el SPI-6. Mientras que para los caudales los ríos Mala, Pisco, Camaná-Majes e Ilave (SDI-6) han superado sus valores históricos de sequías extremas considerando el período 1970-1971 hasta 2014-2015.

Hoy en día, la sequía sigue afectando a la población mundial de diferentes maneras, y se considera como el fenómeno natural que afecta más personas que cualquier otro desastre natural en el planeta.

#### 2.1.1. Sequías en el Perú

Uno de los impactos más importantes del cambio climático en el Perú ocurre sobre el agua, más aun tomando en cuenta que el país posee el 5% del agua dulce del mundo y que esta agua proviene de la lluvia y en algunas cuencas también de los glaciares. En 18 años, el Perú ha sufrido la pérdida de 510 km<sup>2</sup> de glaciares (de 2042 km<sup>2</sup> en 1989 pasó a 1595 km<sup>2</sup> en 1997 y a 1531 km<sup>2</sup> en 2007), que significan 14 millones de metros cúbicos de reserva de agua. De acuerdo a las proyecciones realizadas el Perú estaría dentro de los países con estrés hídrico al año 2025 (Gardner-Outlwa y Engelman, 1997). A esto se suma el impacto del cambio climático sobre otras fuentes de agua, como son los lagos y lagunas, cursos de agua,



acuíferos y aguas desalinizadas, y su repercusión sobre el ciclo hidrológico (MINAM, 2016).

Según un estudio publicado en el 2019, elaborado por especialistas del Grupo de Trabajo de Sequías (GTS) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), en los últimos 37 años nuestro país ha registrado 10 episodios de sequías severas. Dicha investigación lleva como título “Caracterización espacio temporal de la sequía en los departamentos andinos del Perú (1981-2018)”.

En el estudio nos indican que la sequía del año 1992 fue la más severa y afectó a 16 departamentos (Amazonas, Cajamarca, La Libertad, Áncash, Junín, Huánuco, Huancavelica, Pasco, Lima, Cusco, Apurímac, Ayacucho, Arequipa, Tacna, Moquegua y Puno). Coincidentemente se presentó en un año donde hubo un evento El Niño. Esta sequía impacto entre 50% a 100% de su superficie, a los departamentos de Áncash, Apurímac, Arequipa, Ayacucho, Huancavelica, Junín, Lima, Moquegua, Pasco y Puno; teniendo una severidad más alta (37.6) como consecuencia de ello presentaron disminución de la producción y productividad agropecuaria debido a la pérdida de la superficie cultivada, así como por falta de semillas para la próxima campaña agrícola con pérdidas en el orden de 15% – 58% principalmente en la región de Puno.

De acuerdo con SENAMHI (2019), investigar y analizar las sequías constituye un importante instrumento para la planificación y gestión del riesgo de sequía y por consiguiente al establecimiento de sistemas de monitoreo y pronóstico de las sequías para acciones de prevención.



## 2.2. SEQUÍA

Lopez (1985) citado por Pita Lopez (1989), menciona que la sequía se puede definir como un déficit hídrico inusual y anómalo, que genera impactos severos en la sociedad que la padece, y puede originarse en cualquier tipo de climas, incluso en aquellos caracterizados por su abundante precipitación. De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2006), la sequía es una desviación acumulativa respecto de las condiciones normales o previstas de precipitación, es decir, respecto de una media estadística o de un promedio a largo plazo. Este déficit de precipitación puede sobrevenir en poco tiempo o tardar meses en manifestarse a través de la disminución del caudal de los ríos, de los niveles de los embalses o de la altura de las aguas subterráneas.

Según Ortega (2013), la sequía es un fenómeno climático recurrente caracterizado por una reducción en la precipitación pluvial con respecto a la considerada como normal, que no presenta epicentro ni trayectorias definidas. Tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y del espacio, y provoca que el agua disponible sea insuficiente para satisfacer las distintas necesidades humanas y de los ecosistemas. En los conceptos de sequía se detectaron un promedio de 150 definiciones de este tipo y en la mayoría de casos nos dice algo parecido a “deficiencia de precipitaciones durante un tiempo prolongado”.

En términos generales puede ser considerada como la insuficiente disponibilidad de agua en una región, por un período prolongado para satisfacer las necesidades de los elementos bióticos locales, estas necesidades dependerán de la distribución de las poblaciones de plantas, animales y seres humanos, de su modo de vida y del uso de la tierra.





Wilhite y Glantz (1985) citado por Hernández et al. (2007), señalan que la sequía es un proceso natural errático, que se origina como resultado de una deficiencia de precipitación durante un período de tiempo extenso, en general de una estación o más, provoca en consecuencia un desbalance hídrico que afecta las actividades humanas y los procesos ambientales; se trata de una situación de un fenómeno natural y complejo debido a sus características, que se categoriza en cuatro grupos según la disciplina científica desde la que sea analizado el fenómeno: sequía meteorológica, sequía hidrológica, sequía agrícola y sequía socioeconómica.

Sin embargo, existen otras clasificaciones como la de SUDENE (1999) citado por Valiente (2001), que clasifica en tipo meteorológico y divide las sequías en hidrológicas, agrícolas y efectivas (estas tres últimas equivalen a socioeconómicas) o la de AghaKouchak et al. (2021), quien propone la sequía antropogénica que considera el espectro completo de retroalimentaciones y procesos dinámicos (por ejemplo, interacciones tierra-atmósfera, balance hídrico y energético) dentro de los sistemas humanos-naturaleza. Dicho lo anterior, para el presente trabajo adoptaremos la definición mejor sustentada que es la propuesta de Wilhite y Glantz (1985).

### **2.3. ARIDEZ**

La Gran enciclopedia Aragonesa de Geografía (GEA), describe que la aridez puede interpretarse como la característica de un clima respecto a la insuficiencia de sus precipitaciones para mantener la vegetación. También puede considerarse como la condición por la cual la precipitación es siempre inferior a la evaporación. En otras palabras, alude a lo seco o lo estéril. Este concepto es bioclimático, está íntimamente ligado al medio vegetal, pero no es un factor determinante, es decir, no es la única condición por la cual se puede identificar o no la presencia de aridez.



La caracterización hídrica de una región puede realizarse con distintos parámetros que cuantifiquen la relación existente entre el agua disponible y las necesidades de la vegetación. En este sentido, las variaciones de la lluvia en tiempo y espacio son determinantes en los estudios hidrológicos tendientes a la planificación del uso del agua (OMM, 2006).

Según Moral et al. (2016), los estudios sobre el balance hídrico o sobre los índices de aridez dan una idea objetiva de la situación del agua en relación a su comportamiento temporal y espacial, y definen las características intrínsecas del lugar, a partir de lo cual se puede evaluar su potencial productivo, así como su vulnerabilidad a factores externos, sobre todo en el caso de aquellas áreas en donde el agua es fundamental para la agricultura.

#### **2.4. DESERTIFICACIÓN**

El Ministerio del Ambiente (MINAM), define la desertificación como la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultantes de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas. La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por Sequía Grave o Desertificación, en particular en África (CNULDS), da a conocer la desertificación como un proceso de alta complejidad que necesita un doble estímulo: la presión de factores naturales y factores antrópicos (tanto sociales como económicos y culturales), que se combinan en un proceso de sinergia negativa.

MINAM (2016), realizaron un estudio a nivel mundial de 132 casos de investigaciones sobre la desertificación para identificar a los principales impulsores de cambio que estarían desencadenando dichos procesos en las tierras secas,



determinando cuatro grupos principales de agentes causantes que son: el aumento de la aridez, los impactos de la actividad agrícola y ganadera, extracción de productos maderables y otros de la vegetación e impactos del crecimiento de infraestructura de tipo agrícola, carreteras, urbana.

El Perú ocupa el tercer lugar, después de Argentina y Brasil, entre los países con mayor extensión de tierras secas en América del Sur (MINAM, 2016). Además, el Centro Peruano de Estudios Sociales (CEPES, 2015), indicó que las principales causas de la desertificación en el Perú son:

- En la Costa: salinización del suelo, erosión hídrica, erosión eólica y contaminación del suelo por relaves mineros.
- En la Sierra: erosión hídrica, erosión eólica, compactación por sobrepastoreo y contaminación.
- En la Selva: erosión hídrica.

## **2.5. TIPOS DE SEQUÍA**

### **2.5.1. Sequía meteorológica**

Se dice que se está en sequía meteorológica cuando se produce una reducción continuada de las precipitaciones en algún período (día, mes, temporada, año) por debajo de una cantidad determinada, normalmente definida como alguna proporción del promedio a largo plazo para un período de tiempo específico. El origen de la escasez de precipitaciones está relacionado con el comportamiento global del sistema océano-atmósfera, donde influyen tanto factores naturales como



factores antrópicos, como la deforestación o el incremento de los gases de efecto invernadero (Observatorio Nacional de Sequía, 2018).

### 2.5.2. Sequía agrícola

Los cultivos requieren condiciones muy particulares de temperatura, humedad y nutrientes durante su crecimiento para alcanzar su desarrollo máximo. Si la disponibilidad de humedad (o de cualquier otro factor) es inferior al nivel óptimo requerido durante el desarrollo, entonces el crecimiento será menor y la producción se reducirá. Entonces la sequía agrícola o hidroedáfica se puede definirse como déficit de humedad en la zona radicular para satisfacer las necesidades de un cultivo en un lugar en una época determinada. 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 un área geográfica (MITECO, s.f.).

El Ministerio para la Transición Ecológica y el reto Demográfico (MITECO), también menciona que en zonas de cultivos de secano va ligada a la sequía meteorológica con un pequeño desfase temporal dependiente de la capacidad de retención de humedad del suelo edáfico. En zonas irrigadas la sequía agrícola está más vinculada a la sequía hidrológica.

### 2.5.3. Sequía hidrológica

MITECO (s.f.) define a la sequía hidrológica como la reducción en los recursos acuáticos (flujo en ríos, nivel de lagos, agua subterránea, mantos acuíferos) por debajo de un nivel determinado para un período dado de tiempo. Una definición exacta sería la disminución en las disponibilidades de aguas superficiales y



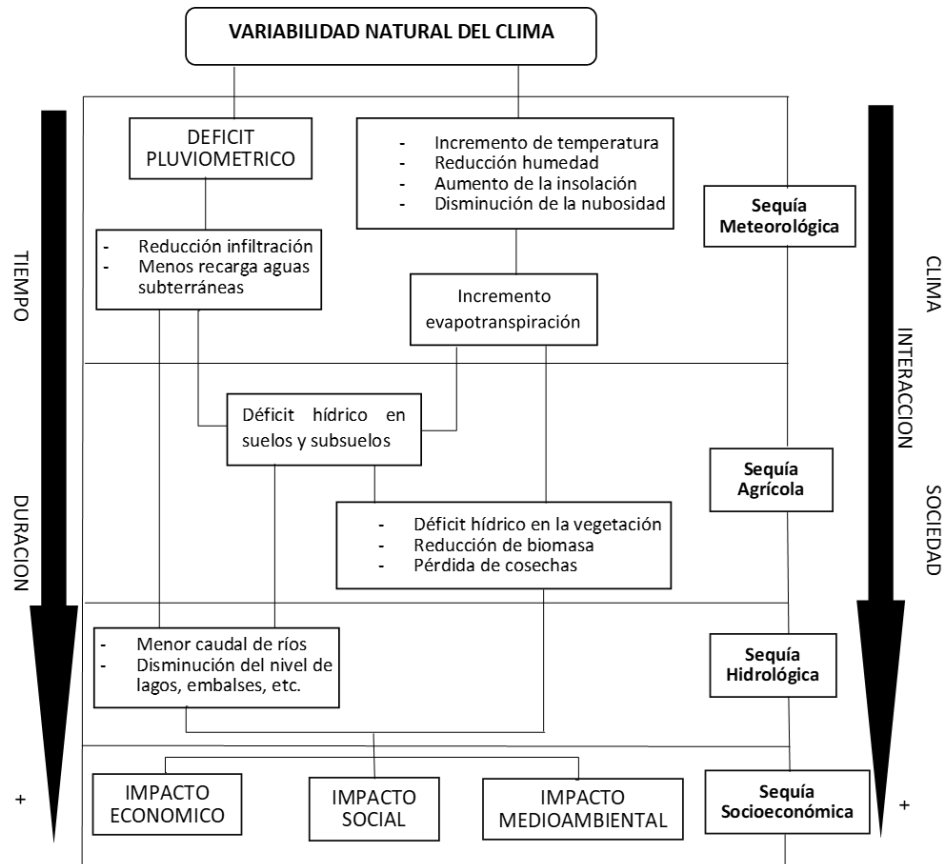
subterráneas en un sistema de gestión durante un plazo temporal dado, respecto a los valores medios, que puede impedir cubrir las demandas de agua al cien por cien.

Valiente (2001), agrega que, a diferencia de la sequía agrícola, que tiene lugar poco tiempo después de la meteorológica, la sequía hidrológica puede demorarse durante meses o algún año desde el inicio de la escasez pluviométrica o si las lluvias retornan en poco tiempo, no llegar a manifestarse.

#### 2.5.4. Sequía socioeconómica

Valiente (2001), define a la sequía socioeconómica cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de generar daños económicos o sociales sobre poblaciones de zonas afectadas por la escasez de precipitaciones. 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 con consecuencias económicas desfavorables.

Otro factor es la creciente presión de la actividad humana sobre el recurso agua que hace cada vez mayor la incidencia de la sequía socioeconómica, con pérdidas económicas crecientes (MITECO, s.f.).



**Figura 1.** Secuencia de los diversos tipos de sequía

**Fuente:** Basado en NDMC (1995).

Los diferentes cuatro tipos de sequías analizados reflejan un proceso de evolución, determinado tanto por la variabilidad natural del clima, como la duración del evento y por la interacción entre el clima y la sociedad.

## 2.6. CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS

La duración, la intensidad y la severidad son las características temporales básicas para la definición de sequía (Real-Rangel et al. 2020).

A continuación, se definen cada característica de sequía.



### 2.6.1. Severidad

Este término hace referencia al déficit acumulado de agua (precipitación) por debajo de cierto umbral durante un período de sequía; el cual se cuantifica mediante la acumulación de la sucesión negativa de los déficits de precipitación en un evento de sequía (Valiente, 2001).

### 2.6.2. Intensidad

Es un parámetro muy usual que se utiliza en la caracterización de sequías, algunos autores la calculan como la magnitud 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 de sequía, conocido como intensidad máxima (Curi-Tupahuasco, 2017).

### 2.6.3. Duración

La duración es el tiempo (número total de días, meses o años consecutivos) durante el cual la precipitación o el caudal totales registrados son inferiores a la precipitación o el caudal medio de ese mismo período. Se relacionan los parámetros magnitud, severidad y duración, de tal forma que partiendo de la formula  $MAGNITUD = SEVERIDAD/DURACION$ , cualquiera de los tres puede ser conocido (Real-Rangel et al., 2020).

### 2.6.4. Frecuencia

Valiente (2001), la frecuencia es el número de casos que se producen durante un período determinado. Puede medirse también a través de la probabilidad empírica de que la precipitación sea inferior a la media, o del período de retorno del



evento seco (intervalo medio de tiempo dentro del que puede esperarse que ocurra una sequía de determinada magnitud).

## 2.7. ÍNDICES DE SEQUÍAS

A lo largo de los años se elaboraron muchos conceptos sobre índices de sequía y como deberían ser utilizados en determinados climas, ya que por la extensión a la que afectan, las sequías son regionales y cada región tiene unas características climáticas diferentes. La Organización Meteorológica Mundial (2012), señala que los meteorólogos y climatólogos de todo el mundo han creado y utilizado muchos métodos diferentes para vigilar la sequía, que varían de unos índices sencillos, a otros más complicados. De acuerdo a lo anterior a continuación, detallaremos las características de estos 3 principales índices:

### 2.7.1. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El Índice de precipitación estandarizado, el SPI fue desarrollado por Mckee et al. (1993), en la Universidad del Estado de Colorado para cuantificar el déficit de precipitación para múltiples escalas de tiempo (1, 3, 6, 12, 24 y 48 meses en valores acumulados móviles) y se concibió para cuantificar el déficit de precipitación en distintas escalas de tiempo, las cuales reflejan el estado de humedad bajo diversas condiciones de acumulación de las lluvias.

El SPI se ajusta a una distribución normal, por lo que puede ser usado para monitorear tanto los períodos húmedos como los períodos secos (Tsakiris et al., 2007). El SPI ha sido extensamente utilizado porque puede ser calculado para una variedad de escalas temporales de manera relativamente sencilla. Esta versatilidad le permite al SPI ser usado indistintamente para monitorear las provisiones de agua





a corto plazo, como es el caso de la humedad del suelo, la cual es importante para la producción agrícola y los recursos hídricos a largo plazo, tales como el agua subterránea, el caudal y los niveles de lagos y reservorios (Mckee et al., 1993).

Adicionalmente, el SPI requiere sólo de datos de precipitación, los cuales son usualmente disponibles en la mayoría de países. Este índice puede ser también aplicado consistentemente en diferentes jurisdicciones puesto que la metodología ha incorporado la estandarización del propio índice. Además, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda el uso del SPI para determinar las sequías meteorológicas y para complementar los índices de sequías meteorológicas locales.

Idealmente el SPI se calcula disponiendo de un mínimo de entre 20 y 30 años de valores mensuales de precipitación, pero lo óptimo y preferible sería contar con entre 50 y 60 años o más (OMM, 2012, pág. 14).

Edwards y McKee, (1997) citado por la OMM (2012), describen que el cálculo del SPI para cualquier localidad se basa en el registro de precipitaciones a largo plazo para un período deseado. Dicho registro a largo plazo se ajusta a una distribución de probabilidades y a continuación se transforma en una distribución normal de modo que el SPI medio para la localidad y el período deseado sea cero. Los valores positivos de SPI indican que la precipitación es mayor que la mediana, y los valores negativos, que es menor. McKee y otros (1993), utilizaron el sistema de clasificación mostrado en el cuadro de valores de SPI que se muestra a continuación (Tabla 1).

**Tabla 1.** Clasificación de los valores del SPI

Valores de SPI	Clasificación
Mayor o igual a 2,00	Extremadamente húmedo
Entre 1.50 y 1.99	Muy húmedo
Entre 1,00 y 1.49	Moderadamente húmedo
Entre -0.99 y 0.99	Aproximadamente normal
Entre -1,00 y -1,49	Moderadamente seco
Entre -1.50 y -1.99	Severamente seco
Menor o igual a -2.00	Extremadamente seco

**Fuente:** National Drought Mitigation Center (2006).

La OMM (2012), en su Guía del usuario del Índice normalizado de precipitación explica que una sequía se produce cuando el SPI es siempre negativo y alcance un valor igual o menos que -0.99, de manera que el fenómeno finalizará cuando el SPI se haga positivo. Por consiguiente, cada fenómeno de sequía tiene una duración definida por su comienzo y final, y una intensidad diferente para cada mes que dure el evento de sequía. El sistema de clasificación para definir las intensidades de la sequía está en función a los distintos valores de SPI. Por tanto, los episodios de sequía tienen lugar siempre que el SPI sea continuamente negativo y alcance una intensidad de -1.0 a menos. Donde la intensidad máxima será el valor extremo negativo de SPI y la severidad es la suma de los valores de SPI de un episodio seco.

Mediante el uso del SPI, se lograron evaluar diferentes parámetros de las sequías, tales como intensidad, magnitud, frecuencia, duración y cobertura espacial, resultados que se constituyen en un insumo importante para la planificación y adaptación de los sistemas productivos agrícolas de la zona.

En la presente investigación utilizamos el SPI para el análisis de las sequías en la Cuenca Hidrográfica Huancané, principalmente por las siguientes razones: este índice tiene un requerimiento mínimo de datos (sólo precipitación) y requiere un mínimo de esfuerzo computacional, además de ser un índice comparable con otras cuencas del Perú.

### 2.7.2. Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI)

Este índice recientemente fue creado por Vicente-Serrano et al. (2009), Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). Este índice tiene un carácter multiescalar y está basado en la ecuación del balance hidrológico, es un índice que evalúa la sequía multiescalar basado en datos climáticos. Puede usarse para determinar el inicio, la duración y la magnitud de las condiciones de sequía.

El SPEI capta el impacto principal del aumento de las temperaturas en la demanda de agua. El SPEI se puede calcular en un rango de escalas de tiempo de 1-48 meses (SENAMHI, 2007). Este índice emplea la evapotranspiración real (ET) para representar la disponibilidad de agua. Con los valores mensuales de Precipitación y Evapotranspiración Potencial (ETP), que se calcula con el método de Thornthwaite a partir de  $T_m$ , el valor de ET se estima de acuerdo a los resultados del balance de agua secuencial de Thornthwaite, utilizando distintas condiciones de retención de agua del suelo dependiendo de cada lugar.

Los valores que toma el SPEI para la determinación de episodios secos son los mismos que el SPI (Tabla 1). Este índice ha sido ampliamente aceptado y utilizado en estudios de sequía a muy diversas escalas (Vicente, Serrano et al., 2014a; Manatsa et al., 2015; Yang et al., 2016).

### 2.7.3. Índice de Sequía de Caudales (SDI)

El índice de sequía de caudales (SDI) ha sido desarrollado por Nalbantis y Tsakiris (2008), para la caracterización de la sequía hidrológica. El SDI analiza de forma simple y eficaz el estado de sequía de una determinada unidad hidrográfica. El análisis de sequías de caudales bajo este método se basa en los volúmenes de caudales acumulados por períodos de tres, seis, nueve y doce meses que se superponen dentro de cada año hidrológico.

Los valores SDI positivos reflejan condiciones de no sequía mientras que los valores negativos indican sequías hidrológicas. En base al SDI, se definen en cinco estados de sequía hidrológica indicados por un número entero que va de 0 (No sequía) a 4 (sequía extrema) se definen a través de los criterios de la Tabla 2.

**Tabla 2.** Definición de estados de sequía hidrológica según el SDI.

Estado	Descripción	Criterio	Probabilidad (%)
0	No sequía	$SDI \geq 0.0$	50.0
1	Sequía leve	$-1.0 \leq SDI < 0.0$	34.1
2	Sequía moderada	$-1.5 \leq SDI < -1.0$	9.2
3	Sequía severa	$-2.0 \leq SDI < -1.5$	4.4
4	Sequía extrema	$SDI < -2.0$	2.3

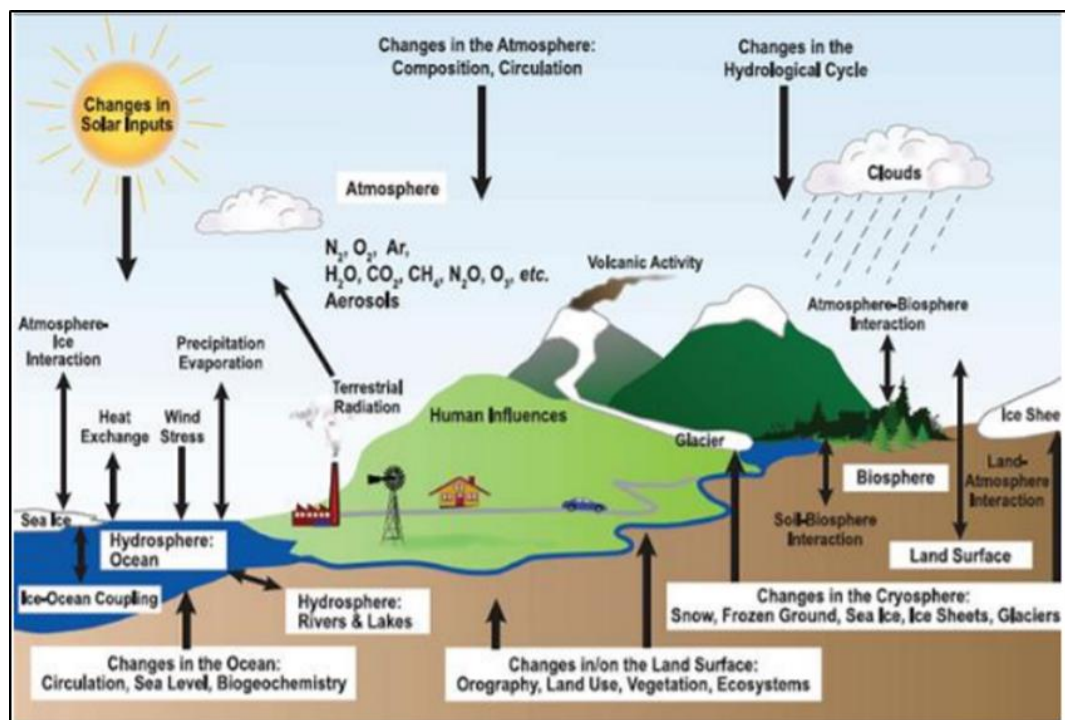
**Fuente:** Nalbantis y Tsakiris (2009).

## 2.8. CLIMA Y SISTEMA CLIMÁTICO

IPCC (2007), afirma que el clima es el conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas caracterizado por los estados y la evolución del tiempo, en el curso de un período suficientemente largo y en un dominio espacial determinado, cuando se habla de “período”, esos promedios pueden oscilar desde meses hasta 106 años (dependiendo de la escala temporal de estudio), aunque en general se toman promedios

a lo largo de 30 años. El clima es consecuencia de las complejas interacciones entre los diversos componentes del sistema climático.

Además, IPCC (2007) refiere que la descripción del mismo se lleva a cabo a través del cálculo de promedios de variables como la temperatura, la precipitación, la humedad, cobertura nubosa etc., así como del uso de algunas medidas de variabilidad de estas variables.



**Figura 2.** Componentes del sistema climático.

**Fuente:** IPCC (2007).

El sistema climático se define como una entidad compuesta por cinco componentes interactuantes entre sí (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera) que, en conjunto, funcionan complejamente como un todo. El sistema climático en general se asume como un sistema cerrado, pues permite la existencia de un flujo de energía con el espacio, pero no un intercambio de materia. (IPCC, 2007)



El componente más importante del sistema climático es sin duda la atmósfera (capa gaseosa que rodea al planeta), pues esta determina el presupuesto energético que define el clima global, por lo que resulta importante conocer su composición y estructura (GCCIP, 1997). La atmósfera está compuesta aproximadamente por un 79% de nitrógeno, 20% de oxígeno y 1% de otros gases. Dentro del 1% de los “otros gases”, la atmósfera contiene diferentes proporciones de los mismos, y entre ellos se encuentran los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Los principales GEI son: vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ) y el ozono ( $O_3$ ).

### 2.8.1. Variabilidad climática

El Instituto de Hidrología, Meteorológica y Estudios Ambientales - IDEAM (2018), define a la variabilidad climática como la fluctuación de las condiciones atmosféricas predominantes (clima) alrededor de la norma dentro de rangos establecidos para los procesos en el sistema climático. A través del tiempo en meses, años, siglos, milenio; el clima presenta ciclos o fluctuaciones de diversa duración. En diferentes años, los valores de las variables climatológicas como la temperatura del aire y precipitación fluctúan por encima o por debajo de lo normal.

Montealegre y Pabón, (2000) citado por Alzate et al. (2015), indican que la secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de anomalías.

En síntesis, a lo anterior la variabilidad climática, responde a las fluctuaciones del clima que a través de los años y desde épocas remotas se han presentado en diversas escalas de tiempo y espacio. Tales fluctuaciones se originan,



generalmente, por modificaciones en la forma de interacción entre los distintos componentes del sistema climático y por cambios en los factores radiativos forzantes.

### 2.8.2. Cambio climático

IPCC (2007), define el cambio climático como una modificación identificable y persistente del estado del clima por variabilidad natural o por efecto de la actividad humana. En la actualidad se viene usando este término para referirse al acelerado calentamiento que se viene produciendo en la superficie terrestre como resultado de una mayor acumulación de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Según un informe del Centro de Investigación Tyndall Center de Inglaterra (2004), el Perú es el tercer país más vulnerable al cambio climático después de Bangladesh y Honduras. Si bien han pasado muchos años desde su publicación de este informe el problema aún es preocupante ante el aumento de las emisiones. En la evolución del planeta se han presentado cambios climáticos, como evidencia de ello en la actualidad se tiene los rastros de períodos muy fríos (períodos glaciales) que duraron miles de años seguidos de calentamientos (interglaciares) de similar duración.

#### **a. Efecto invernadero**

El efecto invernadero es un fenómeno que afecta a todos los cuerpos planetarios dotados de atmósfera, de los temas actualmente planteados con relación al cambio climático el efecto invernadero ocupa atención preferente.

BCRP (2019) refiere que, mediante este efecto, determinados gases que son componentes de una atmósfera planetaria, retienen parte de la energía que el



suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar. Con ello, los GEI garantizan una temperatura promedio global adecuada para vivir. Así, de no existir gases de efecto invernadero en la atmósfera, la temperatura promedio global del planeta alcanzaría los 18°C bajo cero, mientras que la temperatura actual es de 15 grados en promedio.

Como es sabido, el dióxido de carbono es capaz de retener determinadas radiaciones de onda larga emitidas por la Tierra y que potencialmente podrían ser eliminadas por difusión en el espacio exterior. Esta absorción provoca un caldeoamiento de la atmósfera terrestre que, por analogía, es denominado efecto invernadero. El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no es el único gas de efecto invernadero; también el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y varios gases, tales como el metano ( $\text{CH}_4$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), clorofluorocarburos (artificiales) y otros.

## **b. Cambio climático y sequías**

Los efectos del cambio climático conducen a un escenario de aumento general de la severidad de las sequías tanto meteorológicas como hidrológicas, debido a los efectos combinados de la reducción de las precipitaciones y el incremento de la evapotranspiración. En el Perú, los principales efectos climáticos del aumento de la temperatura global estarán asociados al retroceso glaciar, el aumento de la frecuencia e intensidad del Fenómeno del Niño y la elevación del nivel del mar (IDEAM, 2018).

El Consejo Nacional del Ambiente (CONAM, 2016), afirma que el fenómeno del Niño genera principalmente una gran alteración climática que se manifiesta en intensas lluvias en el norte y graves sequías en la región altiplánica





del sur del país, en la medida que el impacto del cambio climático puede ser similar al fenómeno del Niño y que existe una alta probabilidad que los efectos del mismo se agudicen, se hace necesario investigar sobre los impactos y daños causados por dicho fenómeno a fin de determinar en cierta medida un escenario nacional de posibles impactos ante el cambio climático. Ante la preocupación mundial por la variabilidad y el cambio climático como la mayor amenaza ambiental de los últimos tiempos (Cuarto Informe de Evaluación de IPPC, 2007), el estudio de las sequías cobra mayor importancia.

Valiente (2001), la sequía es un fenómeno climático complejo que afecta la sociedad y el medio ambiente; los riesgos más comunes en el sector agrícola son la reducción de rendimientos en cultivos, menor desarrollo vegetativo, reducción de germinación de las plantas, de número o tamaño de los frutos, pérdidas parciales o totales de las cosechas, incremento de plagas y enfermedades en las plantas, disminución de la producción agropecuaria, y de la producción de alimentos, entre otros.

## **2.9. MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL (GCM)**

Las herramientas más desarrolladas y avanzadas para la generación de las proyecciones futuras del clima son los Modelos de Circulación Global (o GCM por las siglas de Global Circulation Models). Solomon et al. (2007), deduce que estos modelos representan procesos físicos en la atmósfera, océano, crósfera y en la superficie de la Tierra; actualmente están disponibles para simular la respuesta del sistema climático global al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero.



Para poder hacer proyecciones cuantitativas del cambio climático futuro, es necesario utilizar modelos climáticos que simulen todos los procesos importantes que rigen la evolución futura del clima.

Los modelos climáticos se han perfeccionado en los últimos decenios gracias al desarrollo de las computadoras. Durante ese período se crearon modelos separados de cada uno de los componentes principales, la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos y el hielo marino, que luego se fueron integrando gradualmente. Los Modelos de Circulación Global (GCM) de la atmósfera usan ecuaciones matemáticas para representar los principales procesos físicos a gran escala, los que posteriormente se enlazan para simular el sistema climático completo (Solomon et al., 2007).

Los GCM actuales utilizan un mallado tridimensional global con una resolución horizontal de aproximadamente 1 a 2 grados para el componente atmosférico y de alrededor de 1 grado para el océano. Por lo que a número de capas verticales se refiere, están comprendidos entre 10 y 40 para la atmósfera y de 30 a 60 para el océano, aunque algunos modelos pueden incluso llegar hasta las 80 capas o más en la atmósfera (Flato et al., 2013).

El acoplamiento de los distintos componentes es un proceso difícil. El objetivo final es, por supuesto, incluir en el modelo la mayor parte posible del sistema climático de la Tierra, para que todos los componentes puedan interactuar y para que de esa manera las predicciones del cambio climático puedan siempre tener en cuenta el efecto de las retroacciones entre los distintos componentes (IPCC, 2013). En la siguiente tabla se muestra los modelos más conocidos y empleados en la actualidad:

**Tabla 3.** Detalle de los modelos GCM más aplicados.

Institución	Modelo	Resolución (lat x lon)
CSIRO and Bureau of Meteorology	ACCESS 1.0	1.25° × 1.875°
	ACCESS 1.3	
Beijing Climate Center	BCC-CSM 1.1	~2.8° × 2.8°
	BCC-CSM 1.1(m)	1.125° × 1.125°
GCESS, Beijing Normal University	BNU-ESM	~2.8° × 2.8°
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CanESM2	~2.8° × 2.8°
National Center for Atmospheric Research	CCSM4	~0.9° × 1.25°
	CESM1-BGC	~0.9° × 1.25°
Community Earth System Model Contributors		
CESM1-CAM5		
Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici	CESM1FASTCHEM	1.875° × 1.875°
	CESM1-WACCM	1.875° × 1.875°
	CMCC-CESM	3.75° × 3.75°
	CMCC-CM	0.75° × 0.75°
CNRM and CERFACS	CMCC-CMS	1.875° × 1.875°
	CNRM-CM5	~1.4° × 1.4°
CSIRO, Industrial Research Organization & QCCCE	CSIRO-Mk 3.6.0	1.875° × 1.875°
LASG, IAP, Chinese Academy of Sciences and THU	FGOALS-g2.0	3° × 2.8°
LASG, IAP, Chinese Academy of Sciences	FGOALS-s2.0	~1.6° × 2.8°
	The first Institution of Oceanography	FIO-ESM
NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-CM3	2° × 2.5°
	GFDL-ESM2G	
	GFDL ESM2M	
	GISS-E2-H	
NASA Goddard Institute for Space Studies	GISS-E2-H-CC	2° × 2.5°
	GISS-E2-R	
	GISS-E2-R-CC	
National Institute of Meteorological Research/KMA	HadGEM2-AO	1.25° × 1.875°
	HadCM3	2.5° × 3.75°
Met Office Hadley Centre	HadGEM2-CC	1.25° × 1.875°
	HadGEM2-ES	1.25° × 1.875°
Institute for Numerical Mathematics	INM-CM4	1.5° × 2°
	IPSL-CMS LR	1.875° × 3.75°
Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL-CMS MR	1.25° × 2.5°
	IPSL-CM5 LR	1.875° × 3.75°
	JAMEST, AORI, and NIES	MIROC-ESM
AORI, NIES, and JAMEST	MIROC-ESM	~2.8° × 2.8°
	MIROC4h	~0.6° × 0.6°
Max Planck Institute for Meteorology	MIROC5	~1.4° × 1.4°
	MPI-ESM-LR	1.875° × 1.875°
	MPI-ESM-MR	
MPI-ESM-P		
Meteorological Research Institute	MRI-CGCM3	1.125° × 1.125°
Norwegian Climate Centre	NorESM1-M	1.875° × 2.5°
	NorESM1-ME	1.875° × 2.5°

**Fuente:** Aarón, A., (2016).



### 2.9.1. Las trayectorias de concentración representativas (RCP)

Representative Concentration Pathways (RCP por sus siglas en inglés), son escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre (Moss et al., 2010).

La palabra “representativa” significa que cada trayectoria de concentración ofrece uno de los muchos posibles escenarios que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo. La palabra trayectoria hace hincapié en que únicamente son de interés los niveles de concentración a largo plazo, pero también indica el camino seguido a lo largo del tiempo para llegar al resultado en cuestión (Moss et al., 2010). Las trayectorias de concentración ampliadas describen ampliaciones de las trayectorias de concentración representativas entre 2100 y 2500 calculadas mediante normas sencillas generadas a partir de las consultas con las partes interesadas y no representan escenarios plenamente coherentes.

En el informe de evaluación del IPCC se han seleccionado de la literatura publicada las siguientes cuatro trayectorias de concentración representativas elaboradas a partir de modelos de evaluación integrados como base para las predicciones climáticas y las proyecciones climáticas presentadas en GTI IE5 capítulos 11 a 14 (IPCC, 2013): RCP 2.6 Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente  $3 \text{ w/m}^2$  antes de 2100 y posteriormente disminuye (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las emisiones sean constantes después de 2100).

El RCP 4.5 y RCP 6, son dos trayectorias de estabilización intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente  $4.5 \text{ w/m}^2$  y  $6.0$

$w/m^2$  después de 2100 (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las concentraciones sean constantes después de 2150). RCP8.5 Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores  $> 8.5 w/m^2$  en 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que las emisiones sean constantes después de 2100 y las concentraciones sean constantes después de 2250). A continuación, en la (Tabla 4) se describen brevemente los principales supuestos y características de estas 4 vías de concentraciones:

**Tabla 4.** Visión de conjunto de los “Representative Concentration Pathways” (RCP).

Escenarios	Description	Concentración de $CO_2$ en el año 2100	Aumento de temperatura global estimada en el año 2100
RCP 8.5	Pathway con forzamiento radiativo alto, llegando a $8.5 w/m^2$ en 2100. Continuación del aumento después de 2100.	$\sim 1370 \text{ ppm } CO_2$	$3.4 - 5.5 \text{ }^\circ C$
RCP 6	Pathway con forzamiento radiativo medio, llegando a $6 w/m^2$ en 2100. Estabilización después de 2100.	$\sim 850 \text{ ppm } CO_2$	
RCP 4.5	Pathway con forzamiento radiativo medio, llegando a $4.5 w/m^2$ en 2100. Estabilización después de 2100.	$\sim 650 \text{ ppm } CO_2$	$1.5 - 2.5 \text{ }^\circ C$
RCP 2.6	Pathway con forzamiento radiativo bajo, llegara a $3 w/m^2$ antes de 2100. Después disminución a $2.6 w/m^2$ en 2100.	$\sim 490 \text{ ppm } CO_2$ $\sim 400 \text{ ppm } CO_2$	$0.7 - 1.4 \text{ }^\circ C$

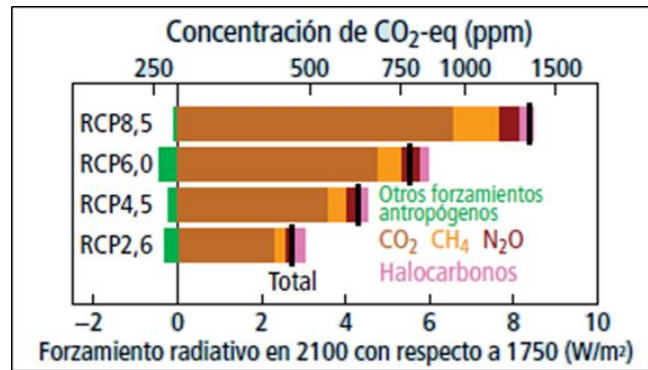
**Fuente:** Van Vuuren et al., (2011).



Los escenarios de emisiones que se utilizó en la presente investigación son los siguientes:

- **RCP 4.5:** Como el pathway PCP6, también el RCP 4.5 es un escenario de estabilización, que llega a un forzamiento radiativo de  $4.5 \text{ w/m}^2$  al año 2100, sin haberlo excedido antes. El RCP 4.5 es más ambicioso que el RCP 6 y resulta en un calentamiento global de aproximado  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo que corresponde con el objetivo climático de limitar el calentamiento global a  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- **RCP 8.5:** El pathway RCP 8.5 representa una vía de emisiones y concentraciones relativamente altas. Sus principales supuestos incluyen alto crecimiento demográfico, relativamente bajo crecimiento de PIB, con tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética. Esto lleva a importantes demandas energéticas y consecuentes emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario no se implementan políticas de cambio climático. Por eso el escenario RCP 8.5 también es llamado “business as usual”-escenario que significa “todo sigue como hasta ahora”. Basado en este escenario se calcula para el año 2100 un aumento de la temperatura global entre  $3.4$  y  $5.5 \text{ }^\circ\text{C}$  respecto a la temperatura media global en el período 1980-1999.

La tercera columna muestra la concentración estimada de los gases de efecto invernadero (GEI) en el año 2100 expresada en concentración de  $\text{CO}_2$ . La cuarta columna indica el aumento estimado de la temperatura global en el año 2100 con respecto al período 1980-1999 (Van Vuuren et al., 2011).



**Figura 3.** Futuros niveles de forzamiento radiativo para RCP y concentraciones totales de  $CO_2$  -equivalente (en ppm) en 2100.

**Fuente:** IPCC (2013).

## 2.10. REDUCCIÓN DE ESCALA (“DOWNSCALING”)

Los datos de proyecciones de cambio climático se obtienen de los GCM, los cuales, no consideran información regional ya que toman la media de las elevaciones dentro de cada pixel con la consecuente pérdida de información en la variabilidad topográfica y en los procesos atmosféricos relacionados, debido a que tienen una resolución muy grande de aproximadamente  $1^\circ$  a  $5^\circ$  de latitud y longitud (Tschöke et al. 2015), que es también equivalente a unos 200km esta resolución tan grande provoca que la información suministrada sobre el clima sea inadecuada si vamos a usar ésta como variable de entrada para un modelo de impacto (Von Storch et al. 1993), el problema es que los estudios de impacto son esenciales para el diseño de las políticas de adaptación que tratan de minimizar los impactos negativos del cambio climático y de aprovechar los positivos.

Para poder resolver este desajuste, en las últimas décadas se ha realizado un esfuerzo considerable en el desarrollo de diferentes estrategias que permitan inferir información de alta resolución a partir de las variables de baja resolución, es decir,



proyectar de forma precisa la información disponible a gran escala sobre la escala regional (Von Storch et al., 1993).

Teutschbein & Seibert (2012), denominan a estas estrategias “técnicas de Downscaling” (o de regionalización o de reducción de escala), se tienen dos enfoques, estadístico y dinámico, éste último se realiza con Modelos Climáticos Regionales (RCM) teniendo en cuenta que los modelos regionales aún no están disponibles en Perú; y el estadístico es recomendable para los GCM. Sin embargo, estos datos bajados de escala, presentan errores sistemáticos debido a una imperfecta conceptualización, a la discretización y a los promedios utilizados en las celdas, es por ello importante realizar una corrección de los datos mediante métodos que permiten reducir el sesgo en sus estadísticos.

#### 2.10.1. Corrección de sesgo de escala lineal (Linear Scaling Bias Correction)

Existen diversos métodos para realizar la corrección del sesgo, los más utilizados son el “Delta Change Approach” (Déqué, 2007; Fowler & Kilsby, 2007), Local Intensity, Linear Scaling, Power Transformation y Quantile-Mapping, (Fang et al., 2015; Tschöke et al., 2015; Teutschbein & Seibert, 2012; Gudmundsson et al., 2012; Wilcke et al., 2013). En ese sentido, en este trabajo de investigación se empleó el siguiente tipo de corrección de sesgo:

- **Reducción de escala paramétrica:** Este método emplea la corrección de sesgo paramétrica conocido como bias correction, la cual asume que la precipitación observada se ajusta a una distribución normal, es decir, se aplica una corrección a la media y desviación estándar (Segovia et al., 2016).





## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. ZONA DEL ESTUDIO

##### 3.1.1. Ubicación geográfica

La cuenca Huancané se encuentra ubicada en coordenadas UTM (WGS84), por el este 376030 – 468557, norte: 8301965 – 8397410 y con una altitud media 3,855 - 5,100 m.s.n.m.

##### 3.1.2. Ubicación hidrográfica

La cuenca Huancané, hidrográficamente se encuentra ubicada en la región hidrográfica del Titicaca Sistema Hídrico del TDPS (Titicaca – Desaguadero – Poopó - Salar de Coipasa), en la vertiente del Titicaca.

##### 3.1.3. Ubicación política

La cuenca Huancané, políticamente se encuentra ubicada en Puno en las provincias de Huancané, San Antonio de Putina, Moho y Azángaro, abarca los distritos de Huancané Vilquechico, Huayrapata, Rosaspata, Cojata, Potoni, Inchupalla, Huatasani, Quilcapunco, Putina, Muñani y Ananea, se muestra el mapa de ubicación correspondiente de la cuenca del río Huancané en la figura 4.

##### 3.1.4. Población y Demografía

Según los resultados del Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de comunidades Indígenas, la población total involucrada en la Unidad Hidrográfica Huancané es de 57 651 habitantes.



<b>Provincia</b>	<b>Habitantes</b>	<b>Superficie en km<sup>2</sup></b>	<b>Densidad</b>
Huancané	57 651	2 806	24.78 hab/km <sup>2</sup>

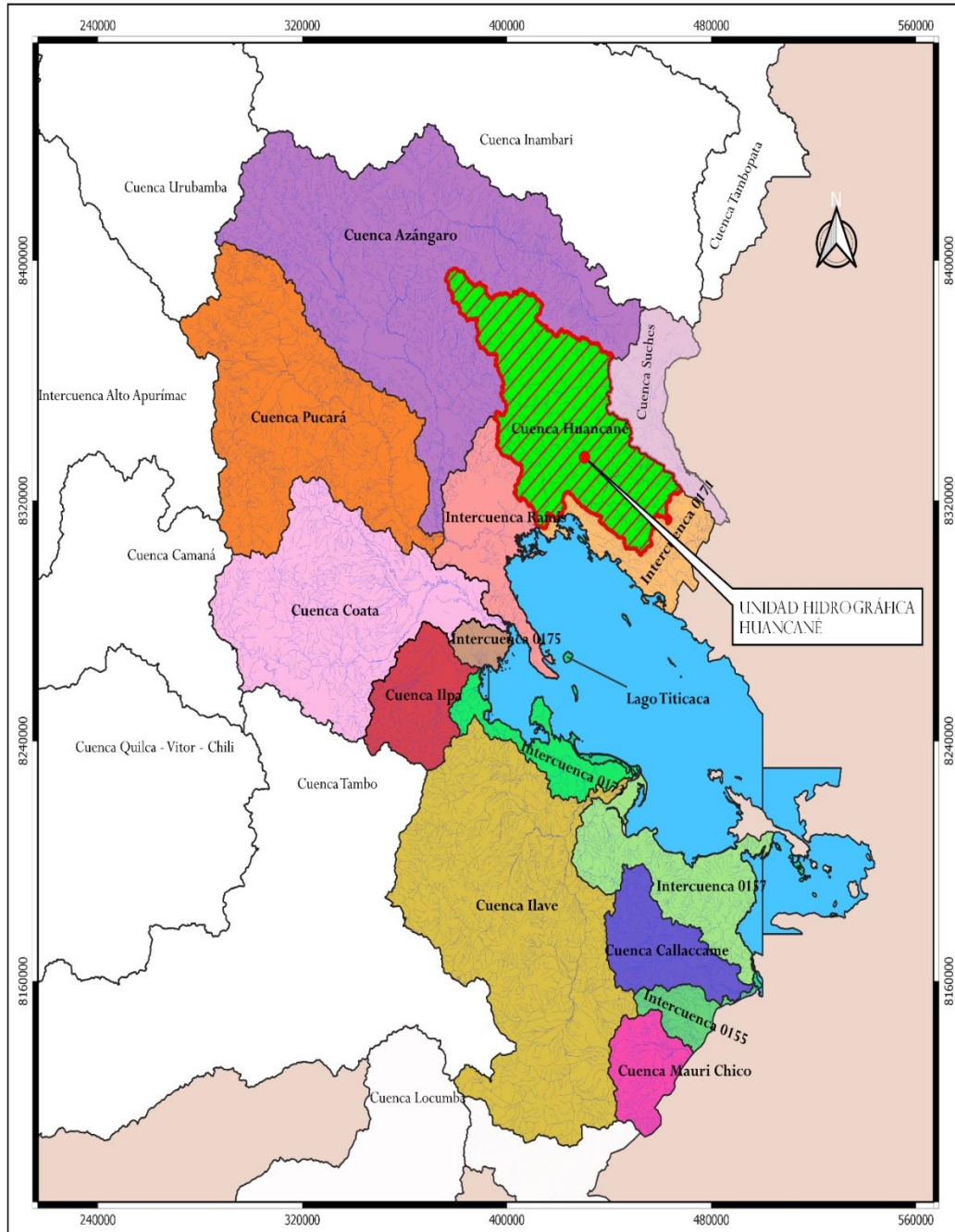
### 3.1.5. Caracterización socio-económica

Es importante mencionar que la precipitación es una de las variables climatológicas más importantes en la cuenca Huancané, tomando en cuenta que las principales actividades de esta región son la agricultura y la ganadería.

Los cultivos principales, son: papa, cebada (grano y forrajera), avena (grano y forrajera), habas, quinua, cañihua, trigo, olluco, oca, alfalfa, pastos cultivados y otros. La mayor parte de los cultivos son para consumo humano y subsistencia de los mismos y un mínimo porcentaje lo llevan al mercado para la venta o intercambio de alimentos.

La ganadería es otra actividad principal en la cuenca Huancané, porque constituye fuente de ocupación e ingreso para el productor rural, representado por varias especies en menor cantidad en ganado ovino, porcino y otros, y en mayor cantidad ganado vacuno y los camélidos sudamericanos. En cuanto se refiere a camélidos, dentro de la cuenca Huancané, en la subcuenca Llache parte alta existe la crianza y domesticación de vicuñas, que está encargado por el Centro multicomunal Cala Cala, que es el patrimonio cultural del Perú.

De acuerdo al Estudio hidrológico Huancané de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), afirman que la existencia de pastos naturales, cultivos de forrajes y pastos cultivados favorecen la crianza del ganado, siendo los vacunos de doble propósito (carne y leche), los ovinos para carne, porcinos (carne) y en cuanto a los camélidos (fibra).



**Figura 4.** Ubicación hidrográfica de la cuenca Huancané en la vertiente del Titicaca.

**Fuente:** Elaboración propia.

## 3.2. DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACIÓN

### 3.2.1. Modelo Digital de Elevación (DEM)

La información del modelo digital de elevación DEM se ha tomado de la fuente de datos de alta resolución SRTM (La Misión Topográfica Shuttle Radar), que proviene del proyecto internacional entre la Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial, NGA, y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, NASA. Para este estudio se está empleando el DEM con una resolución espacial de pixel de 30m.

### 3.2.2. PISCOp – (Información Observada)

El producto PISCOp (Peruvian Interpolate data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) en su versión 2.1 elaborado por (Aybar et al., 2019), que se encuentra en el período de 1981 – 2016 abarcando una extensión espacial que está entre las longitudes  $81.25^{\circ}\text{O}$  –  $68.05^{\circ}\text{O}$  y entre las latitudes  $0.95^{\circ}\text{N}$ - $18.74^{\circ}\text{S}$  para el producto de precipitaciones. PISCOp presenta una resolución espacial de  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  (~10 km), este conjunto de datos está disponible al público y está destinado a apoyar los estudios hidrológicos, la gestión del agua, monitoreo de sequías y balance hídrico.

Esta base de datos fue obtenida de la combinación geo-estadística de datos de la red de estaciones del SENAMHI y del producto satelital de lluvia Climate Hazards Group InfraRed Precipitation (CHIRP por sus siglas en inglés).

### 3.2.3. Precipitación de los GCM

Las proyecciones climáticas de las próximas décadas, están representadas por los Modelos de Circulación Global (GCM), y los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5 para este estudio, que serán utilizadas con el fin de obtener las proyecciones de precipitaciones hasta el año 2100, teniendo un conjunto final de 6 proyecciones climáticas (3GCM x 2RCP).

En esta investigación se trabajó con 3 Modelos de Circulación Global considerados como "satisfactorios" para la zona de estudio McSweeny et al., (2015). Por lo que según sus antecedentes se seleccionó un modelo óptimo (GFDL-CM3) y un modelo que sobrestima y subestima la precipitación (MIROC5) y el modelo CMCC-CM es intermedio, este criterio de selección permite tener una adecuada evaluación del manejo de las incertidumbres en este tipo de estudios.

**Tabla 5.** Modelos de Circulación General utilizados en el presente estudio.

Institución	Modelo	Resolución (lat x lon)
Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici	CMCC - CM	0.75° x 0.75°
NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL – CM3	2° x 2.5°
AORI, NIES, and JAMEST	MIROC5	~1.4° x 1.4°

**Fuente:** Elaboración propia.

Para la selección de los GCM se tomó en consideración la investigación de Moya et al. (2015), donde revela que el modelo MIROC5 mediante una reducción de escala permite obtener resultados más precisos en las proyecciones de cambio climático hacia los años 2030, 2070 y 2100, para las zonas sur y norte del Perú. También se informaron resultados similares en el estudio de Ahmed et al. (2019),



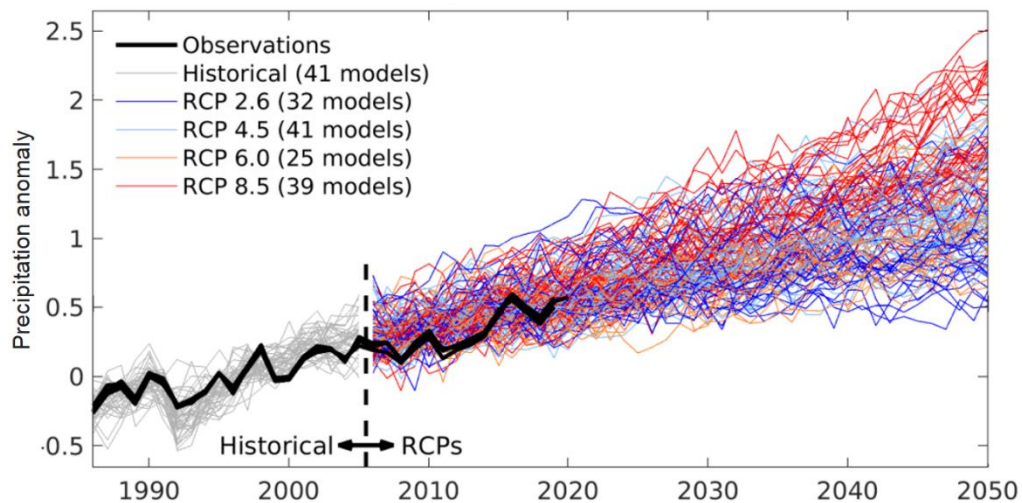
donde clasificó al modelo GFDL-CM3 más hábil respectivamente en la simulación de precipitación. Y el modelo CMCC-CM sostiene buena capacidad de simulación, tal como afirma Ta et al. (2018), en su estudio orientado a evaluar la capacidad de cada modelo CMIP5 de reproducir las variaciones climatológicas mensuales y estacionales de precipitación observadas.

- **Trayectorias de Concentración Representativas:** Las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) describen cuatro trayectorias distintas de las emisiones y las concentraciones atmosféricas de GEI; por ello para la selección de los RCP se tomó según la revisión de SENAMHI (2014), el RCP 4.5 (Thomson et al. 2011) es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiativo total se estabiliza antes de 2100 por el empleo de una serie de tecnologías y estrategias para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. El RCP 8.5 (Riahi et al. 2011), que se basa en el escenario A2r (Riahi et al. 2011), se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a través del tiempo. Por esta razón los dos escenarios utilizados para este estudio se utilizaron el RCP4.5 y RCP8.5.
- **Escenarios de proyecto de intercomparación de modelo acoplado Fase-5 (CMIP5)**

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, más conocido por sus siglas en inglés como IPCC, proporciona información objetiva sobre el estado de conocimientos acerca del cambio climático a los responsables políticos y otros sectores interesados. Hasta el año 2014 el IPCC ha emitido cinco informes de evaluación del cambio climático, y el más reciente entre los años 2013 y 2014 es el CMIP5.

En este estudio se adoptaron 6 proyecciones climáticas (3GCM x 2RCP), para realizar experimentos a partir del CMIP5 que, de acuerdo con la serie temporal de datos observados, seleccionamos los datos de 1981 a 2005 para experimentos históricos y los datos de 2020 a 2100 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

La siguiente figura es una versión actualizada del IPCC AR5, donde describe los datos históricos (1986 - 2005) y las proyecciones en un período de referencia (2006 - 2050).



**Figura 5.** Proyecciones de precipitaciones global CMIP5.

**Fuente:** IPCC AR5 (2013).

En la Tabla 6 se muestra la resolución y longitud de los datos para este estudio según en el marco de CMIP5.

**Tabla 6.** Modelos seleccionados para este estudio, en base al CMIP5.

Modelo	Resolución espacial	Longitud de datos		
		Histórico	RCP4.5	RCP8.5
CMCC-CM	0.75° × 0.75°	1948 - 2005	2020-2100	2020-2100
GFDL-CM3	2° × 2.5°	1948 - 2005	2020-2100	2020-2100
MIROC5	1.400° x 1.400°	1948 - 2005	2020-2100	2020-2100

**Fuente:** Zhu, R.; Yang, L.; Liu, T.; Wen, X.; Zhang, L.; Chang, Yet al. (2019).

### 3.3. MATERIALES Y SOFTWARE

En la presente investigación y para lograr la ejecución de la metodología se han utilizado los siguientes equipos de gabinete y programas de cómputo (Software):

a. Equipos de gabinete:

Una laptop personal Core I7 - RAM de 16 GB, dos USB de 16 GB, un disco duro externo de 1TB, una impresora y plotter y materiales de escritorio y otros.

b. Programas de Cómputo:

- **Sistema de información geográfica GIS:** Para la identificación del área de la zona de estudio se ha recopilado la información de sistemas hidrográficos del Perú en formatos de SIG, por lo que se recurrió al banco de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA-PERU).
- **R (lenguaje de programación):** Es un lenguaje de programación sencillo y con entorno de software libre, en la actualidad es ampliamente usado en diversas áreas especialmente desarrollado para el análisis de datos, cálculos estadísticos y representaciones gráficas o visualizaciones.

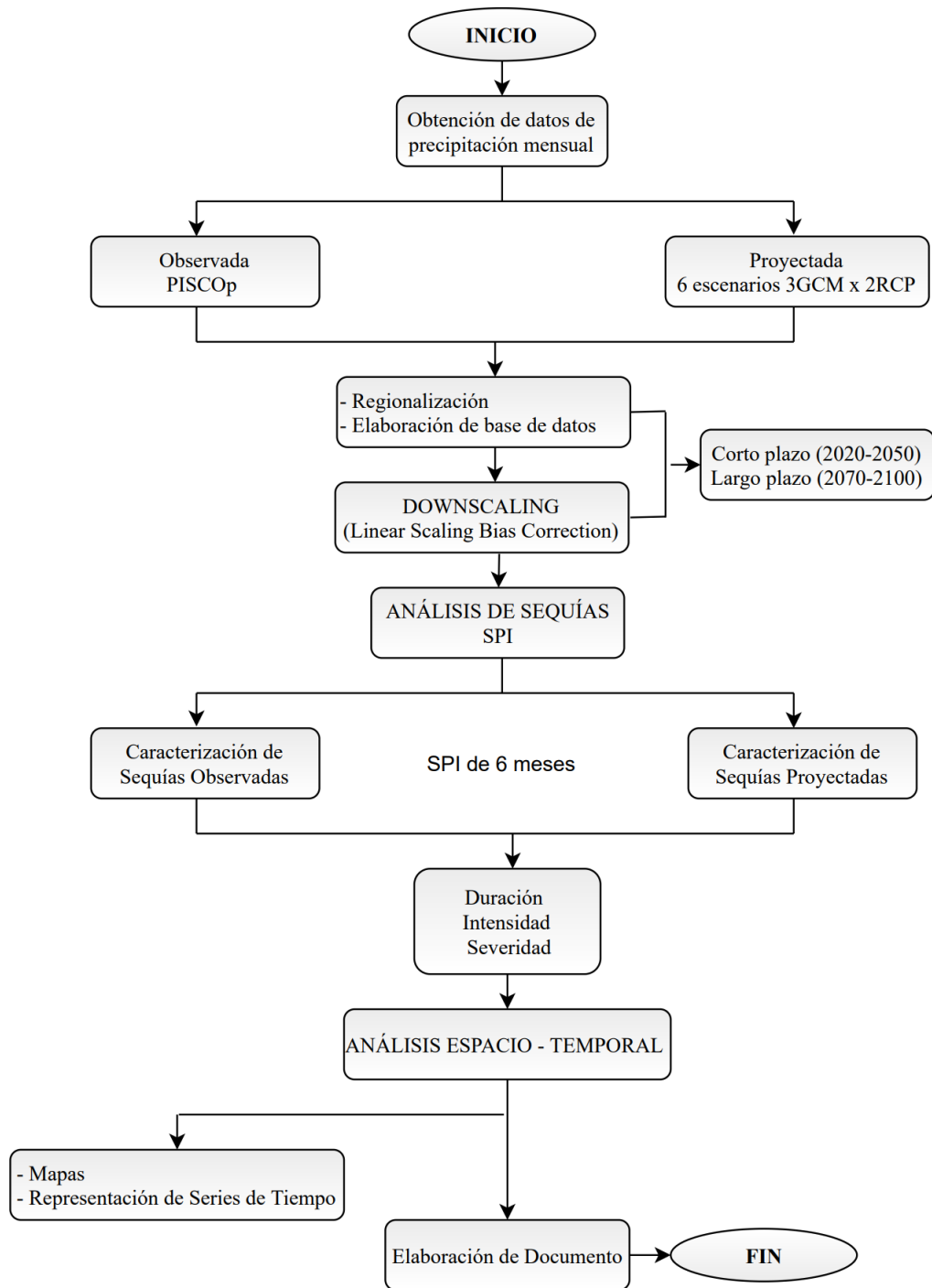




- **QGIS 3.10.5:** Es una aplicación profesional de SIG, de Software Libre y de Código Abierto. QGIS permitió realizar la edición y presentación a través de mapas.

### **3.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

En la Fig. 6 se muestra el diagrama de metodología a seguir para cumplir con los objetivos de esta presente investigación. A continuación, se explica brevemente los procedimientos de cada fase de la metodología.



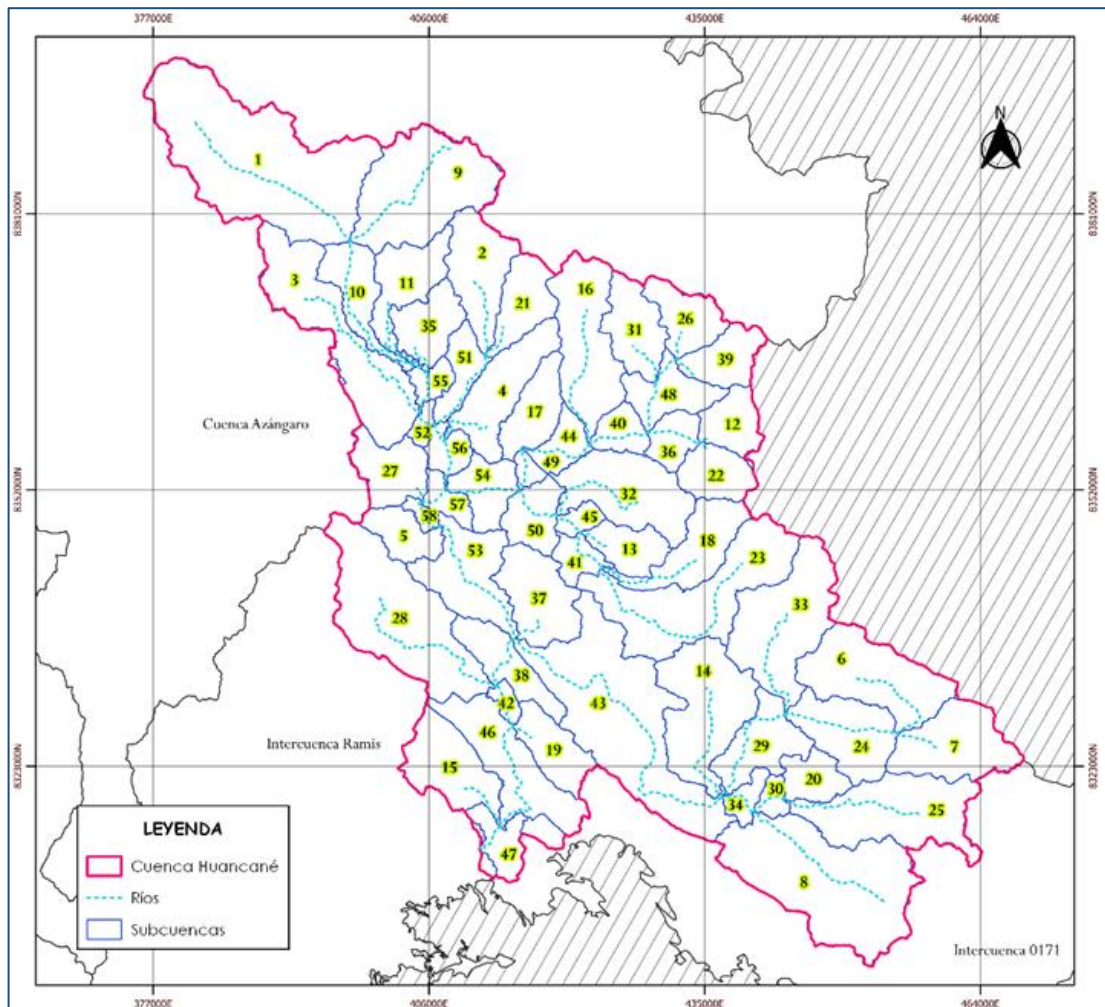
**Figura 6.** Diagrama de la metodología de la presente investigación.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.4.1. Downscaling para los modelos de cambio climático

#### a. Delimitación de la Unidad Hidrográfica Huancané

Para el alcance de este objetivo primeramente se realizó la delimitación de la Unidad Hidrográfica de Huancané, tomando el Modelo Digital de Elevación (DEM), de la base de datos SRTM con resolución espacial de pixel de 30 metros, que permite generar un banco de datos topográfico de alta resolución. A partir del DEM de la zona de estudio, se procedió a delimitar la cuenca y subcuencas (ver Figura 7) para definir la red de drenaje.



**Figura 7.** Delimitación por Taudem en la Unidad Hidrográfica Huancané.

**Fuente:** Elaboración propia.



Para esto se empleó el software libre QGIS en su versión 1.6, complementando la extensión del modelo QSWAT se encuentra la metodología de delimitación de subcuencas TauDEM. En la delimitación de la Unidad Hidrográfica Huancané, se obtuvo una codificación numérica del 01 al 58 para cada subcuenca respectivamente, para realizar el análisis y tener una óptima representatividad de la precipitación por unidad de subcuencas.

#### **b. Obtención de precipitaciones PISCOp y GCM**

Para la precipitación histórica se adquirió del producto PISCOp, donde se tomó la media areal de cada subcuenca delimitada anteriormente, obteniendo una serie temporal 1981-2016, para el caso del análisis de sequías del presente trabajo, se ha considerado el período histórico 1981-2005.

La precipitación proyectada (futura) se obtuvo a partir de 3 GCM, denominados MIROC5, CMCC-CM y GFLD-CM3 y 2 escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5 para tal efecto se seleccionó dos períodos a corto plazo del 2020 - 2050 y largo plazo del 2070 – 2100.

Cada uno de estos modelos tiene su propia física y resuelve sus parametrizaciones bajo diferentes esquemas de cálculo. Es por ello en el presente estudio las proyecciones del clima futuro difieren de un modelo a otro, por lo que se utilizó más de un modelo, con la finalidad de obtener un promedio de los resultados.



**c. Realizar la regionalización de los modelos de cambio climático y sus experimentos correspondientes (RCP 4.5 y RCP 8.5).**

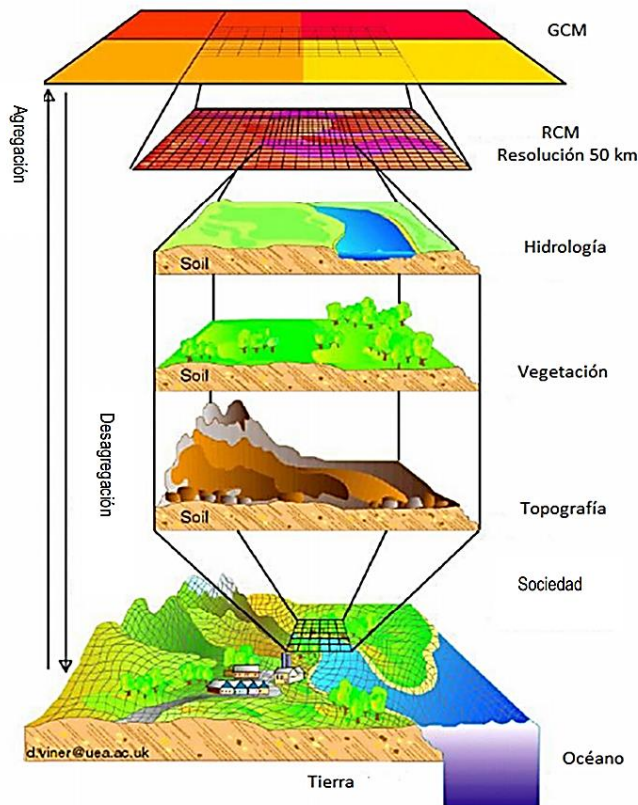
Para el cumplimiento de este objetivo planteado, primeramente, se ha extracción de la base de datos tanto para precipitación histórica y proyectada, utilizando el software R (Lenguaje de Programación) y su interfaz RStudio.

Donde se ha aplicado para este proceso los siguientes paquetes: como primer paquete instalado fue `install.packages("raster")`, `install.packages("ncdf4")`, `install.packages("rgdal")`, `install.packages("rgeos")`, `install.packages("xts")` y finalmente el paquete `install.packages("dplyr")`.

**d. Análisis de Downscaling**

Los GCM son la principal herramienta para la prospección del clima de las próximas décadas, simulan flujos de energía, masa y cantidad de movimiento entre los puntos de una retícula tridimensional que se extiende por la atmosfera, océanos y las capas superiores de la litosfera y criósfera. Sin embargo, la resolución espacial de estos modelos es todavía limitada (~200 km), por lo que los escenarios globales no permiten analizar la magnitud los posibles impactos locales. Por esta razón fue importante para este estudio hacer la reducción de escala (Downscaling), la tarea de regionalizar los escenarios globales de cambio climático nos llevó a una mejor forma del estudio de impacto y adaptación, teniendo en cuenta la variabilidad regional o local de la zona en estudio. Es decir, se proyectó de forma precisa la información disponible a gran escala sobre la escala regional.

Existen dos técnicas de downscaling (o de regionalización o de reducción de escala) que es el downscaling dinámico y el downscaling estadístico. Según Van Der Linden y Mitchell (2009), cuando se necesita información local de muy alta resolución, los métodos estadísticos funcionan mejor que los dinámicos, debido a que la resolución de los modelos dinámicos actuales es todavía demasiado grande. Por esta razón en esta investigación se trabajó con el downscaling estadístico por la metodología de Linear Scaling Bias Correction.



**Figura 8.** Reducción de escala adaptada a los modelos globales.

**Fuente:** Climate Research Unit (2000).

#### e. Aplicación de Linear Scaling Bias Correction

Como se mencionó anteriormente, para la aplicación de la técnica de corrección de sesgo en este estudio presente, se aplicó el downscaling estadístico

por la técnica de Linear Scaling Bias Correction; con que se logró corregir la media, la varianza y/o el quintil de la variable de la serie temporal del modelo utilizando un cierto factor de corrección para que la serie de tiempo corregida del modelo coincida estrechamente con la variable observada.

El downscaling se basa en la diferencia de las series de tiempo observadas y las series de tiempo históricas, estas diferencias se aplican a los datos climáticos simulados para obtener las variables climáticas corregidas de sesgo. Existe la corrección aditiva y corrección multiplicativa, se empleó en este caso la corrección multiplicativa puesto que es preferible para variables como precipitación, radiación solar, presión vapor, etc. Las siguientes ecuaciones se utilizaron para la técnica de Linear Scaling Bias correction:

$$P_{his}(d)^* = P_{his} * [\mu_m\{P_{obs}(d)\}/\mu_m\{P_{his}(d)\}]$$

$$P_{sim}(d)^* = P_{sim} * [\mu_m\{P_{obs}(d)\}/\mu_m\{P_{sim}(d)\}]$$

Donde:

P: Precipitación.

*d*: Representa diariamente.

$\mu_m$ : Es la media mensual a largo plazo.

Obs: Representa datos observados.

Sim: Datos futuros sin procesar.

El asterisco (\*) indica un sesgo corregido, se refiere a datos históricos sin procesar.

### 3.4.2. Determinación de las sequías históricas y proyectadas

Para alcanzar el segundo objetivo específico se eligió utilizar el índice estandarizado de precipitación (SPI), por ser un índice sencillo de calcular y flexible; de hecho, el único parámetro necesario para su cálculo es la precipitación.

#### a. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El SPI que fue creado por Mckee et al. (1993) es un índice tan efectivo para analizar los períodos y ciclos húmedos como los secos y de aplicación extendida en todo el mundo. La precipitación es el único parámetro necesario para el cálculo, pero su principal ventaja del SPI con relación a otros índices es que permite el análisis de los impactos de las sequías en distintas escalas temporales, ofreciendo una alerta temprana de la sequía y ayudar a evaluar su severidad.

El cálculo del SPI se basa en el uso de series de tiempo de precipitación mensual y su correspondiente ajuste a la función de distribución de probabilidad (Gamma en este caso), que posteriormente es transformada en la función normal. Producto del ajuste y la transformación, cada dato de SPI calculado representa el número de desviaciones estándar que un dato está alejado de la media de la serie de tiempo de precipitaciones.

Suponiendo que  $x$  es precipitación mensual acumulada en la escala de tiempo de la investigación (1 mes, 3 meses, 6 meses, 12 meses, etc.), la cual se ajusta a una función de densidad de probabilidad  $g(x)$  como sigue:

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





$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

Dónde:

X: es la precipitación acumulada

$\Gamma(x)$ : es la función gamma

$\alpha$  y  $\beta$ : son los parámetros de forma y escala respectivamente, los cuales pueden ser estimados en base a los estadísticos de las series de precipitación por el método de máxima verosimilitud (Guttman, 1999) como:

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

$$A = \ln(\bar{x}) + \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

Donde:

n: es la longitud de la serie de tiempo (meses).

Luego la probabilidad acumulada de precipitación x en la escala de tiempo dada es expresada como:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx$$

Si  $t=x/\beta$ , la ecuación 19 se transforma en una función gamma incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

La ecuación  $H(x)$  no considera la situación extrema donde la precipitación mensual acumulada  $x=0$ . Como resultado, la ecuación  $G(x)$  es modificada como  $H(x)$ :

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

Dónde:  $q$ : es la probabilidad de  $x=0$ , es decir, la frecuencia de ocurrencia de  $x=0$  en todas las series observadas.

Cuando son transformadas en la función de distribución estandarizada normal, finalmente el SPI se expresa como:

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)}, 0 < H(x) \leq 0.5 \\ t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}, t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1 - H(x))^2}\right)}, 0.5 < H(x) \leq 1 \end{cases}$$

Donde las constantes equivalen a:

$$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269$$

$$\text{y } d_3 = 0.001308.$$

### 3.4.3. Caracterización de las sequías observadas y proyectadas

Para el análisis de las características de las sequías se identificaron los eventos de sequía como los períodos de tiempo consecutivos con valores del SPI que se sitúan por debajo de un cierto nivel de umbral. El nivel del umbral permite además caracterizar un evento de sequía en base a sus propiedades de duración, intensidad, severidad y frecuencia (probabilidad de ocurrencia).



La determinación de la severidad, intensidad y duración de las sequías para cada período de análisis, se utilizó el sistema de clasificación mostrado en la tabla de valores de SPI que figura en (Tabla 1).

La caracterización de las sequías observadas y proyectadas se efectuó para cada microcuenca; en base al cálculo del SPI se identificaron los eventos de sequía definidos como los períodos continuos con valores de SPI menores al umbral (-1.0) y por cada evento se determinaron las características de sequía (severidad, intensidad y duración) McKee (1993) en base a la siguiente definición:

- a. **Severidad:** La severidad de los eventos de sequía se cuantificó como la acumulación de la sucesión de déficits del SPI durante un evento de sequía.
- b. **Intensidad:** Se consideró la estimación de la intensidad como el máximo valor del déficit del SPI ocurrido durante el evento de sequía, es decir:

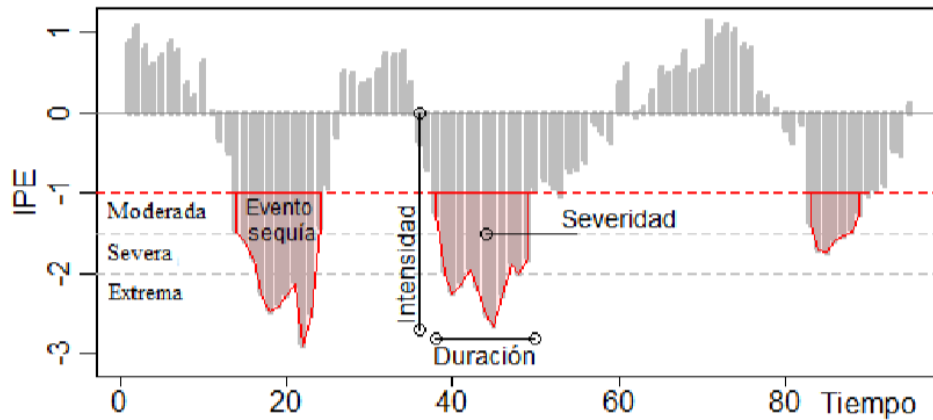
$$I = \frac{S}{D}$$

Dónde: I = Intensidad de la sequía

M = Magnitud de la sequía

D = Duración de la sequía

- c. **Duración (meses):** Estimado como el número de meses consecutivos con valores de SPI por debajo del umbral ( $IPE < -1.0$ ) McKee (1993). Ver Figura 6:



**Figura 9.** Características de las sequías.

**Fuente:** Gálvez, (2007).

Resumiendo, todos los episodios de sequía tienen una duración definida por su comienzo y su final, y la intensidad para cada mes será según los distintos valores de SPI.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. DOWNSCALING DE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA (GCM)

Al realizar la delimitación de las 58 sub cuencas en la unidad hidrográfica de Huancané se consideró las áreas de influencia que existen dentro de la cuenca Huancané y el curso del río principal que nace desde el río Toco Toco-río Ticanirío Puncune-río Pongongoni-río Putina-río Huancané, hasta la desembocadura al lago Titicaca. Cuya longitud del cauce principal es de 142.05 km y tiene una pendiente media de 0.70%. A partir de esta información en la Tabla 7, se indica las áreas de influencia en la cuenca del río Huancané.

**Tabla 7.** Áreas de influencia en la Unidad Hidrográfica Huancané.

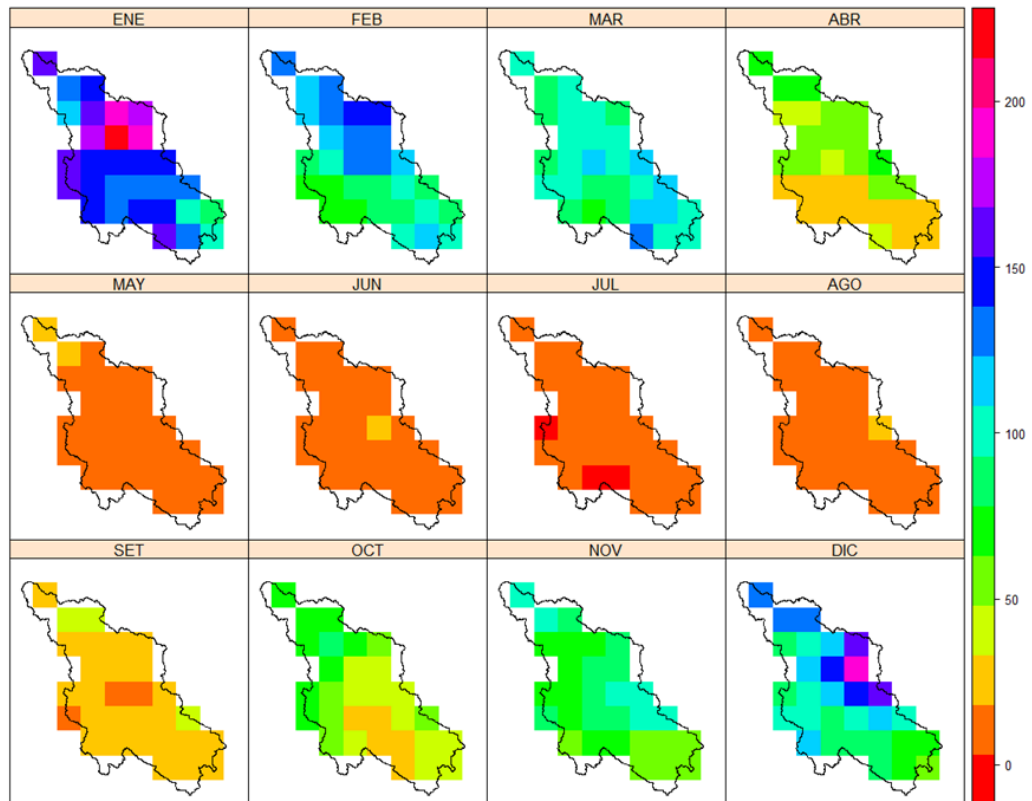
Zona de Influencia	Río Principal	Área km <sup>2</sup>
Bajo Huancané	Tramo río Huancané	246.41
Llache	Río Llache	161.93
Medio bajo Huancané	Tramo río Huancané	47.94
Tuyto	Río Tuyto	1,107.11
Medio Huancané	Río Putina	231.07
Muñani	Río Muñani	889.44
Medio alto Huancané	Río Pongongoni	42.09
Pistune	Río Pistune	380.43
Alto Huancané	Río Puncune	524.77

**Fuente:** Elaboración propia.

Una de las actividades más importantes en la cuenca del río Huancané es la agricultura; en la parte baja, media y alta de la cuenca, las campañas agrícolas son de riego y régimen seco que generalmente depende por las precipitaciones pluviales.

#### 4.1.1. Extracción de datos - precipitación mensual PISCOp

La extracción de PISCOp se hizo desde el año 1981 al 2005 para el período histórico, el proceso de extracción se realizó tomando el promedio de precipitaciones dentro de cada subcuena delimitada.



**Figura 10.** Climatología histórica en base a PISCOp, período 1981-2005.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2. Extracción de precipitación mensual proyectada GCM

El proceso de extracción de datos para el período proyectado se realizó en dos períodos desde el año 1) 2020 al 2050 y 2) 2070 al 2100, La selección de los GCM para los futuros datos de precipitación proyectada, se relaciona con Ahmed et al. (2019), quien indica que el modelo GFDL-CM3 es el mejor entre modelos



para simular la precipitación, seguidos de cerca por otros modelos como CNRM-CM5, HadGEM2-ES, CMCC-CM, GFDL, ESM2M.

Sin embargo, al analizar los resultados de cada GCM, el modelo MIROC5 sobreestima y subestima la precipitación con mayor relevancia, esto se compara con el trabajo de Moya et al. (2015), del cual como resultado de sus proyecciones simuladas hacia 2030, 2070 y 2100, se obtuvo un incremento de las precipitaciones hacia la zona norte del país (27.6 % hacia 2100), que incluye la zona costera y la región de Iquitos, al tiempo que puede esperarse una disminución hacia el sector sur.

#### 4.1.3. Reducción de escala para los GCM

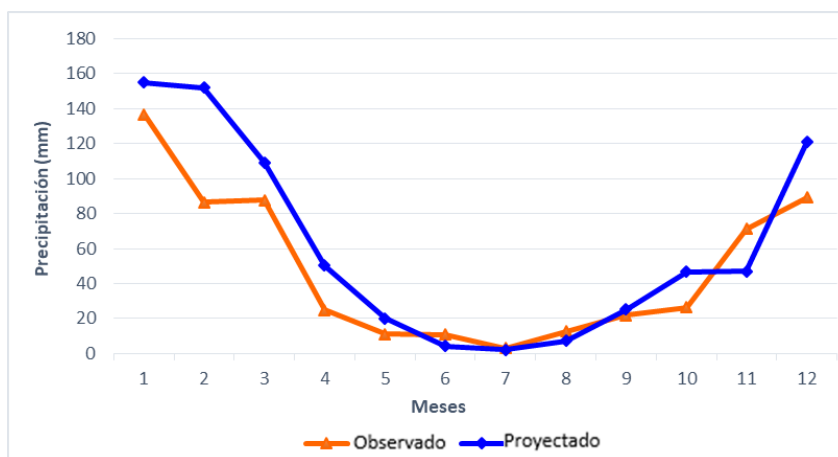
Para regionalización de los GCM se utilizó el método de reducción de escala estadística conocido como corrección de sesgo de exploración lineal. Concretamente este método se centra en la diferencia promedio entre la serie de tiempo observada mensual (PISCOp) y la serie de tiempo de ejecución proyectada de GCM durante el mismo período de la serie observada, como se aprecia en la Tabla 8 uno de los primeros cálculos que es el factor de corrección específicamente para el modelo CMCC – CM con el escenario RCP 8.5 en el período 2070 – 2100.

**Tabla 8.** Cálculo del factor de corrección del modelo CMCC/ RCP 8.5.

Cálculo del factor de corrección			
Meses	Observado	Proyectado	Factor
1	136.91776	154.91506	0.8838247
2	86.372344	152.14994	0.5676791
3	87.712578	109.20407	0.8031988
4	25.016491	50.225518	0.4980833
5	11.055313	19.969222	0.5536176
6	10.854149	4.2446154	2.5571573
7	2.978744	2.1455894	1.3883103
8	12.611946	7.096301	1.7772564
9	21.974454	25.287417	0.8689877
10	26.41002	46.862931	0.5635589
11	71.261488	47.060506	1.5142525
12	89.36048	120.89977	0.7391286

**Fuente:** Elaboración propia.

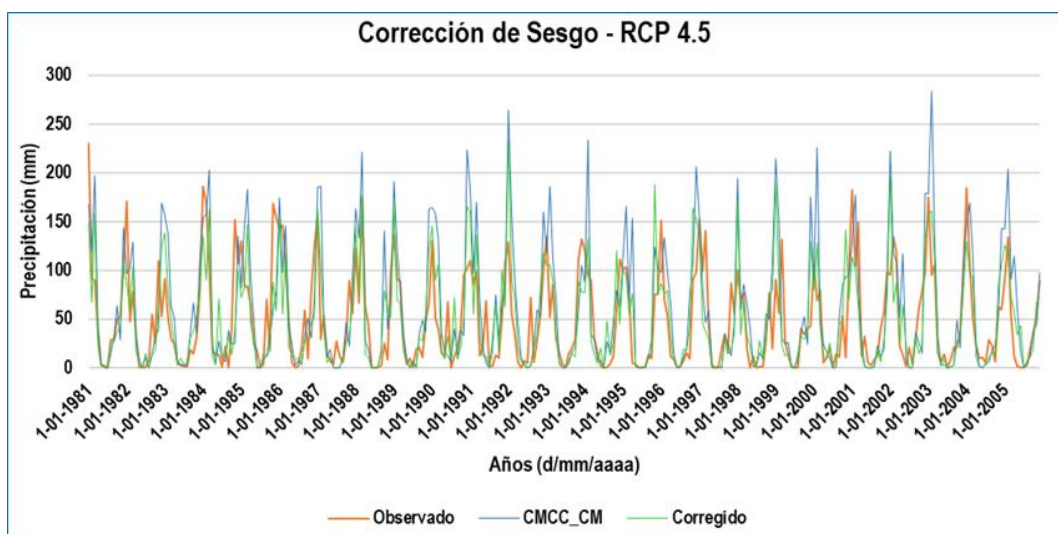
Los resultados de la Tabla 8, nos indican que existe un sesgo entre los datos de la data observada y los GCM, este sesgo se da en valores en la columna 4 de la Tabla 8. Para visualizar el resultado del cálculo de factor de corrección, se observa la Figura 11.



**Figura 11.** Precipitación observada y proyectada sin corrección de sesgo.



Estas diferencias se aplican luego a los datos climáticos simulados (CMCC - CM, GFDL - CM3 y el MIROC5) cada uno con sus respectivos escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5, con la finalidad de obtener las variables climáticas con corrección de sesgo. El trabajo de investigación tiene como variable principal la precipitación por esta razón se consideró la corrección multiplicativa, en referencia a lo descrito anteriormente se representa la siguiente Figura 12, donde se grafica uno de los resultados finales de la corrección de sesgo.



**Figura 12.** Comprobación de la corrección de sesgo del modelo CMCC-CM/ RCP 4.5.

Asimismo, se realizó la misma metodología para cada uno de los modelos con sus respectivos experimentos RCP4.5 y RCP8.5 en el período I (2020 – 2050) y el período II (2070 – 2100), los resultados de cada GCM se detallan en el Anexo C.

Estos resultados, son compatibles con lo expuesto Segovia et al., (2016). Teniendo en cuenta también a Wilby et al. (2004), quién sostiene que la precipitación estimada de cada modelo se ajusta a la observada mediante la reducción de escala.

Tal como menciona Segovia et al. (2016), la resolución espacial de los GCM no es suficiente para tomar decisiones y entender los impactos a nivel regional, nacional y local, especialmente en zonas donde el clima está altamente afectado por la topografía y los usos del suelo. De ahí viene la necesidad de generar proyecciones climáticas usando modelos regionales, esta técnica es llamada como regionalización o “downscaling” y es muy usada en la generación de escenarios futuros de clima con alta resolución espacial.

#### 4.2. ANÁLISIS DE SEQUÍAS OBSERVADAS Y PROYECTADAS EN CAMBIO CLIMÁTICO

Los resultados para este penúltimo objetivo se estableció sucesiones negativas y positivas respecto al valor del umbral -1, correspondiente con el índice de precipitación estandarizado (SPI) que más abajo se describe. En la tabla 9 se establece la categorización según este índice SPI.

**Tabla 9.** Categorías del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).

Valores de SPI	Clasificación	Probabilidad %
Mayor o igual a 2,00	Extremadamente húmedo	2.30
Entre 1.50 y 1.99	Muy húmedo	4.40
Entre 1,00 y 1.49	Moderadamente húmedo	9.20
Entre -0.99 y 0.99	Aproximadamente normal	68.2
Entre -1,00 y -1,49	Moderadamente seco	9.20
Entre -1.50 y -1.99	Severamente seco	4.40
Menor o igual a -2.00	Extremadamente seco	2.30

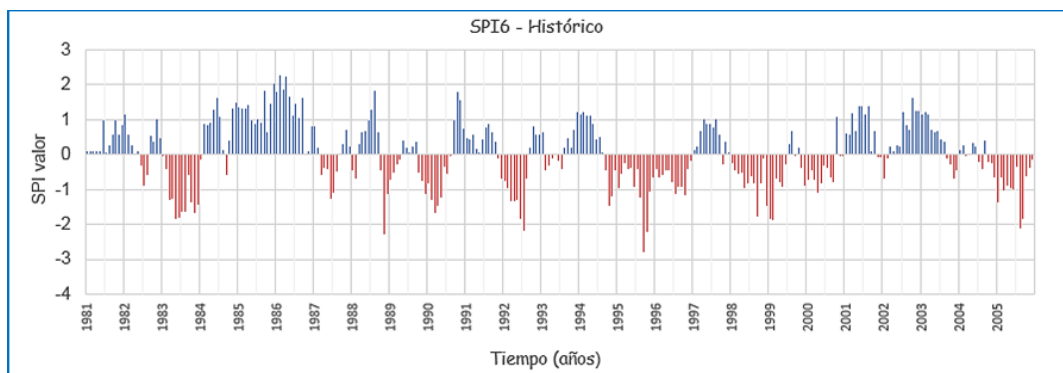
**Fuente:** OMM (2012).

Esta tabla de categorización del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) se consideró para la descripción de cada resultado de análisis de sequías observadas y proyectadas.

#### 4.2.1. Sequías observadas PISCOp (SPI-6)

El análisis de las sequías observadas en la presente investigación se realizó para las 58 subcuencas en el período 1981 al año 2005. Con esta serie de precipitación mensual de cada subcuenca se ha ejecutado la caracterización de las sequías observadas a un plazo de sequías en 6 meses. A tal efecto, el análisis de las sequías en las 58 subcuencas de la Unidad Hidrográfica Huancané permitió caracterizar en términos de duración, intensidad y severidad.

El análisis de las series de SPI-6 se consideró las sequías a nivel decadal para cada subcuenca en el período 1981-2005 (ver Figura 13), donde se logró identificar décadas moderadamente secas en las décadas de los 80's y 90's fueron en la que se presentó el mayor número de meses bajo condiciones de sequía.



**Figura 13.** Series de SPI6 para las 58 subcuencas en el período 1981-2005.

Así, en la Fig. 13 se evidencio notablemente eventos más intensos de sequías en los años 1983, 1992 y 1995. Del mismo modo en la década de los años 2000 se visualiza la reducción significativa de las sequías, en excepción el año 2005 que



tiene meses moderadamente secos y un mes (agosto) extremadamente seco que manifiesta un valor menor que -2.

Según los antecedentes de esta investigación la sequía de 1983 y 1992, la situación más crítica se dio en el Altiplano, en el Departamento de Puno. Estos resultados coinciden con lo que describe Marengo (1987), en la cual menciona que el primer trimestre de 1983 en el Altiplano Peruano la situación fue de extrema sequía, la producción de papa descendió notablemente, en parte debido a que se sembraron menos hectáreas; y se tuvieron bajas, aunque no tan apreciables en maíz; determinaron no solamente daños en el aspecto agrícola sino graves repercusiones en el aspecto socioeconómico.

Según los reportes publicados de Moche et al. (2002) citado por SENAMHI (2019), en su estudio “Caracterización espacio temporal de la sequía en el Perú a escala de departamentos altoandinos, en el periodo 1981 – 2018”, la sequía de 1992, evidencian que los impactos de esta sequía presentaron disminución de la producción y productividad agropecuaria debido a la pérdida de la superficie cultivada, así como, por falta de semillas para la próxima campaña agrícola con pérdidas en el orden de 15 % - 58 % principalmente en la región de Puno. Igualmente, se generó restricciones en el suministro de energía eléctrica y, producto de la contracción de la demanda interna, el PBI durante 1992 decreció en 2.8% respecto de 1991 (Vargas, 2009).

Asimismo, estos resultados son consistentes con la variabilidad espacial de la precipitación encontrada por algunos estudios de sequías históricas en Perú (Espinoza et al., 2009; Fernández-Palomino and Lavado Casimiro, 2016; Lagos et al., 2008; Lavado Casimiro et al., 2012; Molina et al., 2011).



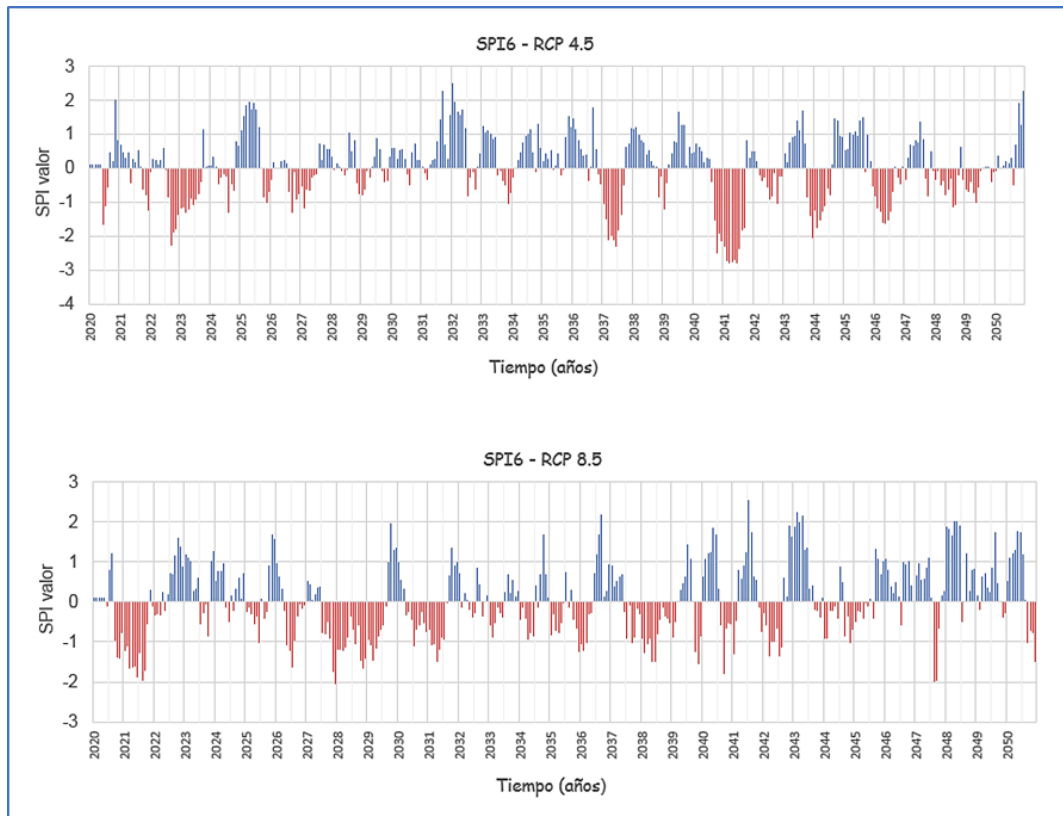
#### 4.2.2. Sequías proyectadas GCM (SPI-6)

Semejante a las sequías observadas, el SPI-6 fue ejecutado para las futuras sequías en dos períodos el primer período del 2020 – 2050 y el segundo período desde 2070 – 2100, como mencionado en la metodología para el propósito de este objetivo se empleó 3 GCM con dos escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5.

El análisis de sequías se simuló para las 58 subcuencas en cada período, modelo y escenario de emisión.

- *Período I (2020 - 2050)*

La Figura 14 nos muestra los resultados posibles de sequías proyectadas para el período I con el modelo CMCC-CM en dos escenarios de emisión (RCP 4.5 y RCP 8.5); donde se evidencia que el escenario moderado (RCP 4.5) da resultados significativos de sequías proyectadas, presentadas en los años 2022 a fines de este año, el año 2037 moderadamente seco y algunos meses extremadamente secos y los años 2040 y 2041 presenta valores menores que -2 donde indica meses extremadamente secos. Respecto al escenario de alta emisiones (RCP 8.5) la mayoría se muestra un período ligeramente seco y moderadamente seco ya que los valores oscilan de -0.5 a -1.5 y algunos años (2021, 2027 y 2047) con picos de -1.5 a -2 que indicarían determinados meses secos.

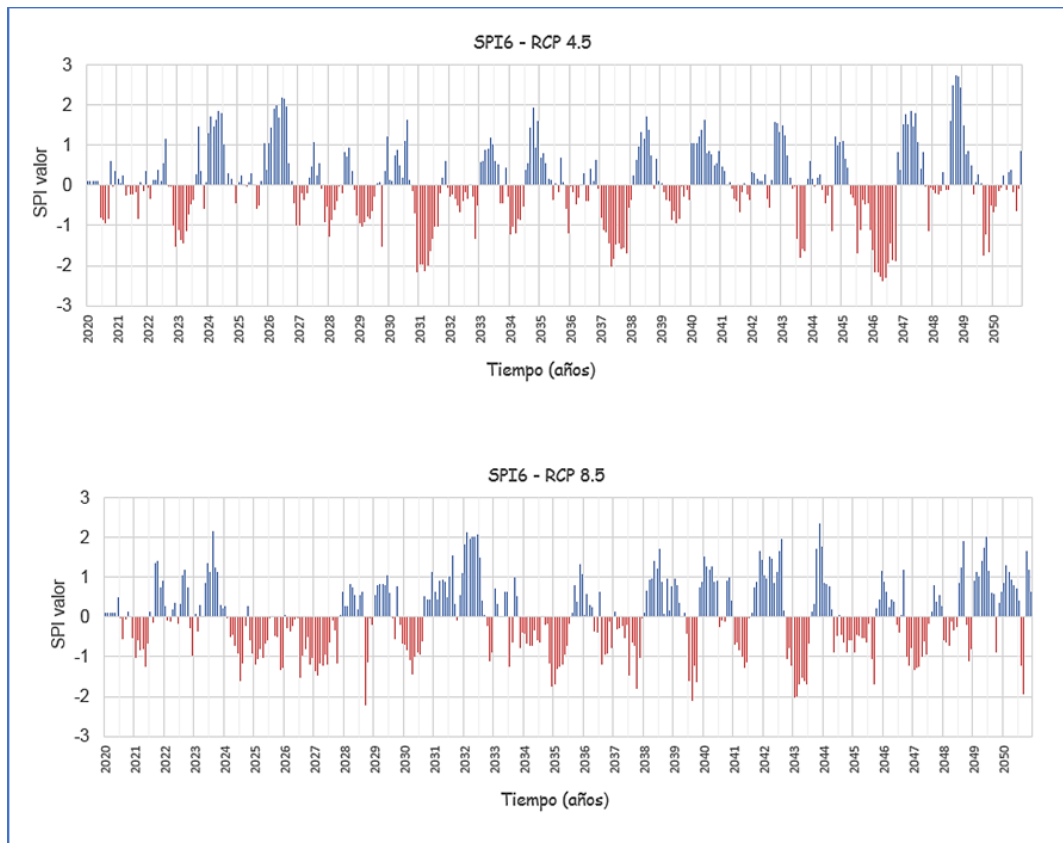


**Figura 14.** Series de SPI6 basado en el modelo CMCC-CM, período 2020-2050.

Como se muestra, los dos escenarios de emisión aplicados para este primer modelo, presentan resultados significativamente distintos en síntesis se observa que el escenario de emisiones altas (RCP 8.5) no tiene valores menores que -2 (períodos extremadamente secos) solo tiene períodos ligeramente secos; en comparación al escenario de emisiones moderadas (RCP 4.5), este sí presenta algunos picos extremadamente secos, pero en general décadas normales a lluviosas.

Así, la Figura 15 presenta los resultados con el Modelo de Circulación Global – GFDL – CM3 con sus respectivos escenarios de emisión. El primer escenario de emisiones moderadas (RCP 4.5) nos da valores -2 en el año 2046 que indicaría un año con picos extremadamente secos, y en los años 2031 y 2037 indican meses secos; los demás años restantes evidencian períodos normales (0 a

-0.5) a ligeramente seco (-0.5 a -1). Mientras que el escenario de emisiones altas (RCP 8.5) evidencia dos picos extremadamente secos en los años 2028 y 2039, los demás años en la mayoría se muestran valores de normal a ligeramente seco.

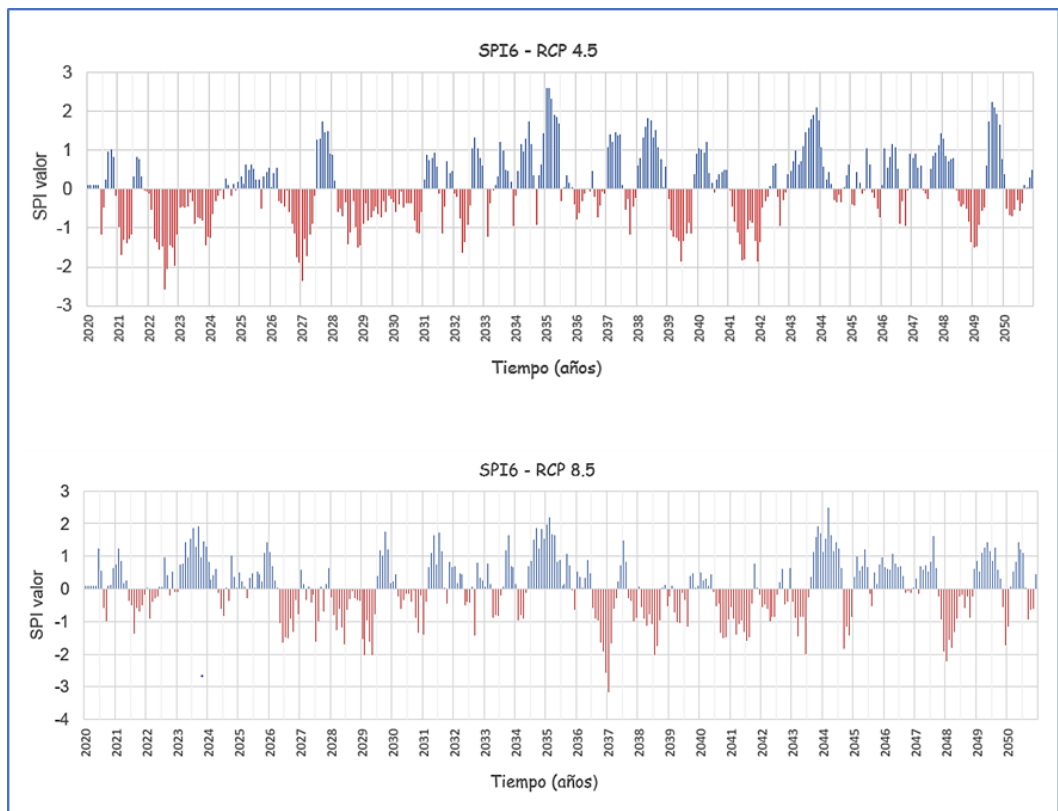


**Figura 15.** Series de SPI6 basado en el modelo GFDL-CM3, período 2020-2050.

En este caso el modelo GFDL – CM3, se observa que en los dos escenarios de emisión tienen picos extremadamente secos (valores menores a -2) siendo estos valores más significantes en el escenario RCP 4.5.

En la Figura 16 se muestran los resultados con el último Modelo de Circulación Global - MIROC5 con sus escenarios de emisiones en el período I. En el escenario de emisiones moderadas RCP 4.5 se evidencia en los años 2021, 2022, 2027, 2028, 2039 y 2041 décadas moderadamente seco y algunos picos

extremadamente secos que estiman valores mayores que  $-2$  en los años 2022 y 2027; en relación al escenario RCP 8.5 la mayoría de valores oscilan entre  $-0.5$  a  $-1.5$  que se clasificaría en sequía moderada y también se observa que el año 2037 tiene un pico menor que  $-2$ , que indicaría una sequía extrema específicamente en el mes de enero del año mencionado.



**Figura 16.** Series de SPI6 basado en el modelo MIROC5, período 2020-2050

Existen variaciones entre las diferentes categorizaciones de sequías para cada escenario de emisiones, pero calendarizando las sequías más extremas se da en el escenario RCP4.5 en dos ocasiones en dos años en el 2022 y 2027; en relación al escenario de emisiones altas (RCP8.5) se observa un solo pico de sequía extrema a inicios del año 2037.

En este período I se identificó como máximo 9 eventos con el modelo MIROC5 bajo ambos escenarios de emisión. Esto se podría relacionar con los



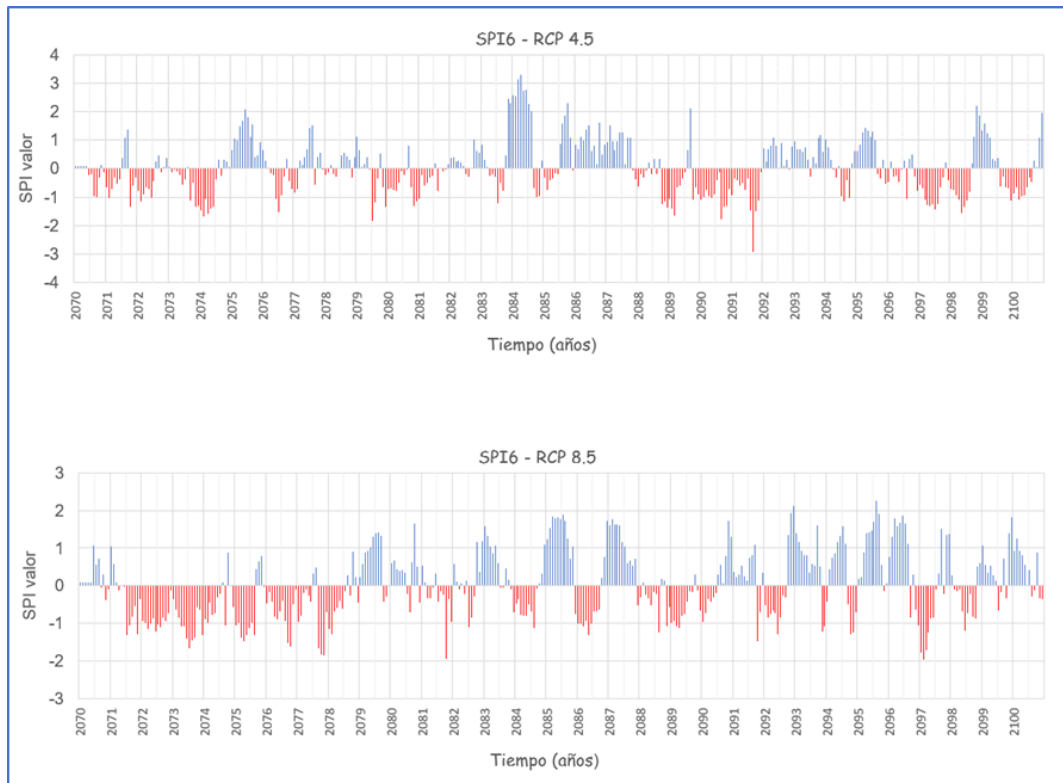
publicados de Moya et al. (2015), que señaló que el modelo MIROC5 subestima la precipitación sobre la zona de la región sur.

Es importante mencionar que los modelos numéricos presentan dificultad en simular la lluvia en los Andes, encontrándose generalmente un error muy grande de sobreestimación o subestimación, debido a la dificultad en parametrizar la topografía. Así como también menciona la Sanabria et al. (2009) que, a pesar de esa limitación, el modelo GFDL – CM3, HadRM3, CMCC – CM entre otros presentan errores menores que los otros modelos, sin embargo, estos modelos aptos para la proyección de precipitación aún presentan inconvenientes en simular la precipitación en la zona de transición (-13.5°S a -14°S) entre los Andes y la Amazonía donde el gradiente topográfico es acentuado.

- *Período II (2070-2100)*

De la misma forma que el período I se realizó el análisis de sequías proyectadas para el período II, con cada GCM y escenario de emisión para las 58 subcuencas.

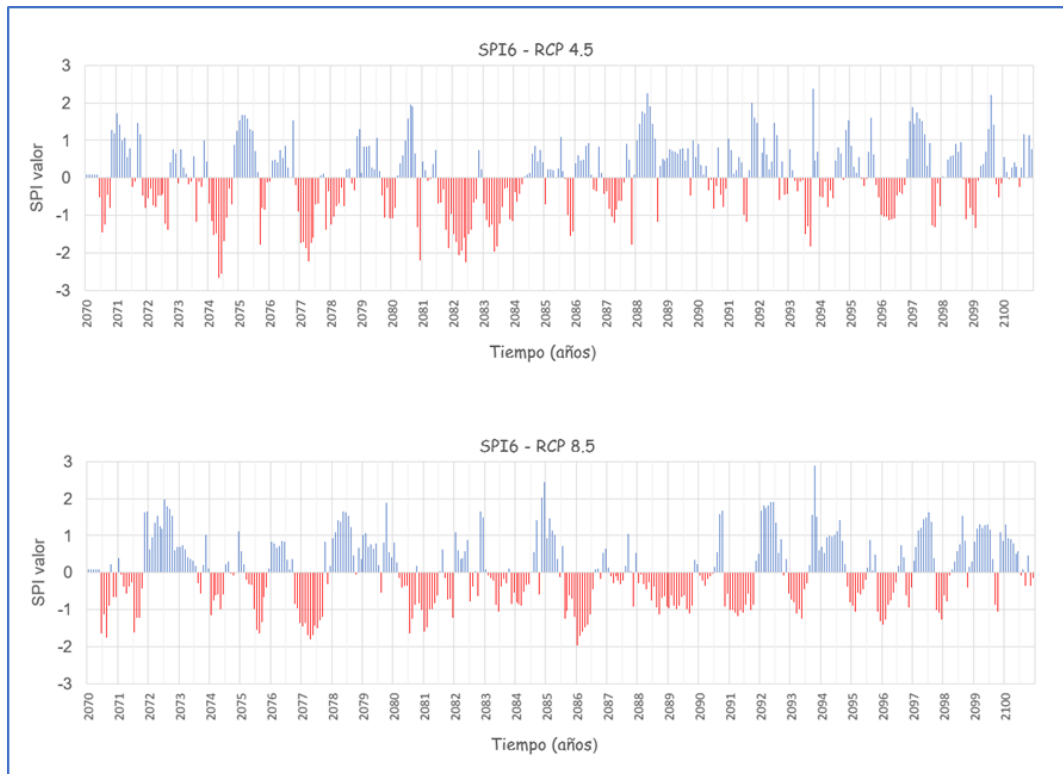
Así la Figura 17 muestra las sequías proyectadas para el período II (2070 – 2100) con el CMCC-CM, en el escenario de emisión RCP 4.5 se observó sequías ligeras cuyos valores oscilan de -0.5 a -1 en los años 2072, 2074, 2089, 2090, 2091, 2097, 2098 y 2100.



**Figura 17.** Series de SPI6 basado en el modelo CMCC-CM, período 2070-2100

En relación al escenario RCP 8.5 se evidencia sequías ligeras en los años del 2071 al 2078 también se observa sequías severas en los años 2077, 2081 y 2097. Se percibe que el escenario de altas emisiones (RCP 8.5) tiene más períodos secos, extendiéndose años consecutivos como se aprecia, sin embargo, no presenta ningún pico de sequía extrema como en el escenario RCP 4.5 que presenta un pico de sequía extrema en el año 2091 en el mes de Setiembre teniendo como valor menor que -2 pero es insignificante ya que en la mayoría se observa años ligeramente seco a normal.

La Fig. 18 se muestra los resultados del segundo modelo GFDL – CM3 donde se aprecia en el escenario RCP 4.5 hay presencia de épocas ligeramente secas a sequías suaves en los años 2074, 2077, 2082, 2083 y 2096 teniendo valores que varían de -0.5 a -1 y algunos picos de sequía extrema que tienen valores menores que -2.



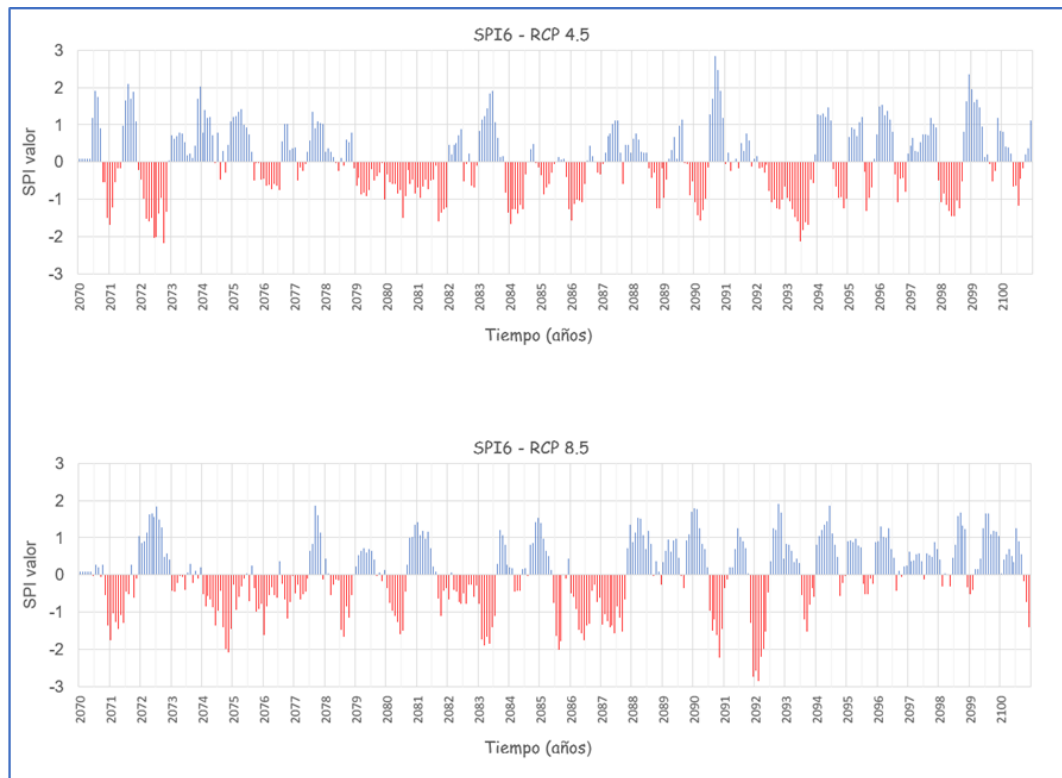
**Figura 18.** Series de SPI6 basado en el modelo GFDL-CM3, período 2070-2100

Mientras que el escenario RCP 8.5 muestra períodos normales a ligeramente secos y no presenta picos menores a -2. Se visualiza que los dos escenarios presentan sequías, pero en particular con más frecuencia en el escenario RCP 4.5 se da sequías numerosas en cambio el escenario RCP 8.5 se identifica épocas normales a sequías ligeras con variaciones insignificantes.

En la Fig. 19 se aprecia los resultados para el último Modelo de Circulación Global - MIROC5, donde el escenario RCP 4.5 presenta sequías significativas en los años 2072, 2079, 2080, 2081, 2084, 2086, 2092, 2093 y 2098 en la mayoría teniendo valores que oscilan de -0.5 a -1.5 categorizándose en sequías moderadas; en relación al escenario de emisiones altas RCP 8.5 se visualiza que el año 2092 manifiesta una sequía extrema tomando valores menores a -2 y también se observa que los años 2074, 2075, 2076, 2078, 2080, 2082, 2083,

2086 y 2087 tienen valores desde -0.5 a -2 que indicarían años con sequía moderada a sequía severa.

En este último experimento se logra identificar que los dos escenarios de emisión actúan con similitud en sus resultados, manifestando años consecutivos de sequías y en algunos casos mostrando los mismos años en cada escenario de emisión. Entre los dos escenarios destaca el año 2092 con el RCP 8.5, quien expresa valores menores a -2.



**Figura 19.** Series de SPI6 basado en el modelo MIROC5, período 2070-2100

Luego de analizar los resultados de cada modelo con sus respectivos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5) en los cuales los años que tuvieron mayor impacto de sequías pronosticadas sobre la unidad hidrográfica Huancané, se puede afirmar que en el Período I (2020 - 2050) los años tales como 2026, 2028, 2037 y 2041 serán los más afectados por este fenómeno climático extremo; las evidencias se



muestran en cada modelo (CMCC - CM, GFDL - CM3 y MIROC5) ya que estos años mencionados presentan un buen porcentaje de deficiencias de lluvias. Analizando el Período II (2070 - 2100) en general presenta mayor porcentaje de deficiencias de lluvias en los años 2071, 2072, 2074, 2075, 2077, 2084 y 2086, es evidente que en este período existe más eventos de sequías que en el período I, mostradas ocurrentemente en los tres modelos aplicados.

Cabe mencionar que los resultados de este estudio son consistentes con los de Campozano et al. (2020) y Shrestha et al. (2016), donde argumenta que los modelos climáticos globales (GCM) se utilizan generalmente para pronosticar el tiempo, comprender el clima actual y proyectar el cambio climático. Sin embargo, el clima implica naturalmente interacciones complejas que son difíciles de inferir y, por lo tanto, difíciles de evaluar.

Adicionalmente, los impactos del cambio climático sobre la sequía se evaluaron comparando la sequía en un corto plazo y sequía en un largo plazo, donde notoriamente los resultados muestran que se prevé un aumento de sequías más severas en el futuro de largo plazo (2070-2100) para el área de estudio, incluso a una escala de seis meses, lo que se explica por la generación de altas presiones a altos niveles de la atmósfera y coincide con lo encontrado por Vicente-Serrano et al. (2016), en los Andes del Ecuador.

#### **4.3. CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS EN TÉRMINOS DE SU DURACIÓN, INTENSIDAD Y SEVERIDAD**

Para este objetivo se utilizó los dos escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5 en base a los tres modelos (CMCC – CM, GFDL – CM3 y MIROC5). En necesario enfatizar que el SPI-6 fueron evaluados independientemente para cada



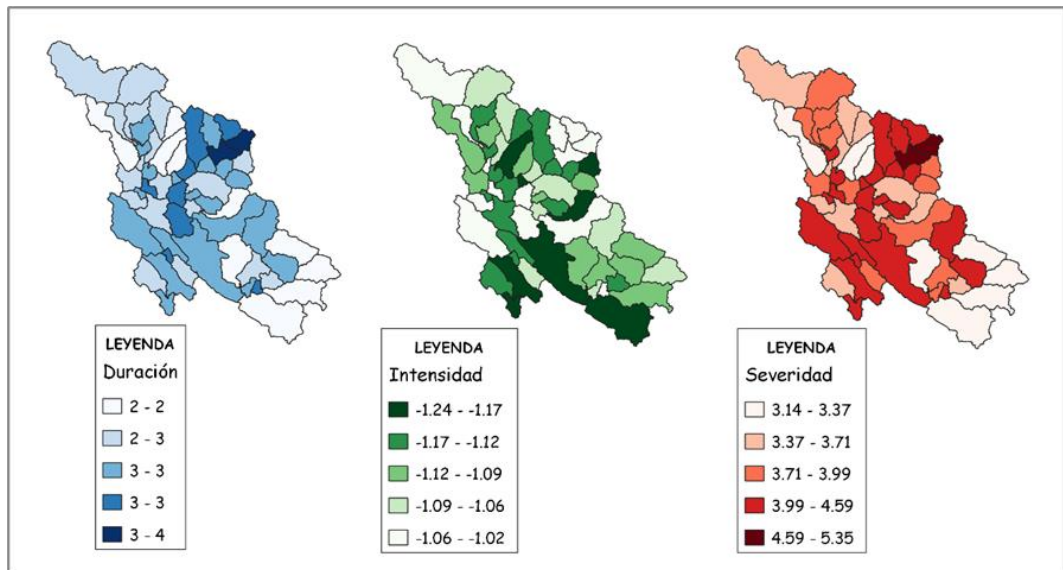
subcuenca, GCM y escenario de emisión, los resultados de cada uno se muestran en el Anexo E. Posteriormente estos resultados fueron reducidos realizando promedios entre los tres modelos de circulación global con su respectivo escenario de emisión para caracterizar estadísticamente las sequías proyectadas cada las 58 subcuencas en la unidad hidrográfica Huancané.

#### 4.3.1. Características de las sequías observadas (1981 – 2005)

Empleando el SPI-6 para cada subcuenca (1981 - 2005) se logró alcanzar la caracterización de las sequías, el cual se muestra en la Figura 20. En particular, se observa que la duración del SPI-6 en la zona baja se presenta una duración mínima que oscila entre 2.28 a 2.43 que equivale a 2 meses y una duración máxima de 3.93 que es equivalente a 4 meses que se encuentra en zona alta media de la cuenca; la intensidad y severidad según el análisis de sequías existe una variación de períodos húmedos y secos.

En este sentido se analiza que las intensidades mínimas son -1.02 y la máxima intensidad es -1.24 que indicarían una época moderadamente seca. En relación a la severidad en la cuenca Huancané presenta un promedio de 3.99 donde se considera una menor severidad.

En base a estos resultados solo se logra apreciar en forma espacial la cuenca Huancané, nombrando parte alta, media y baja.



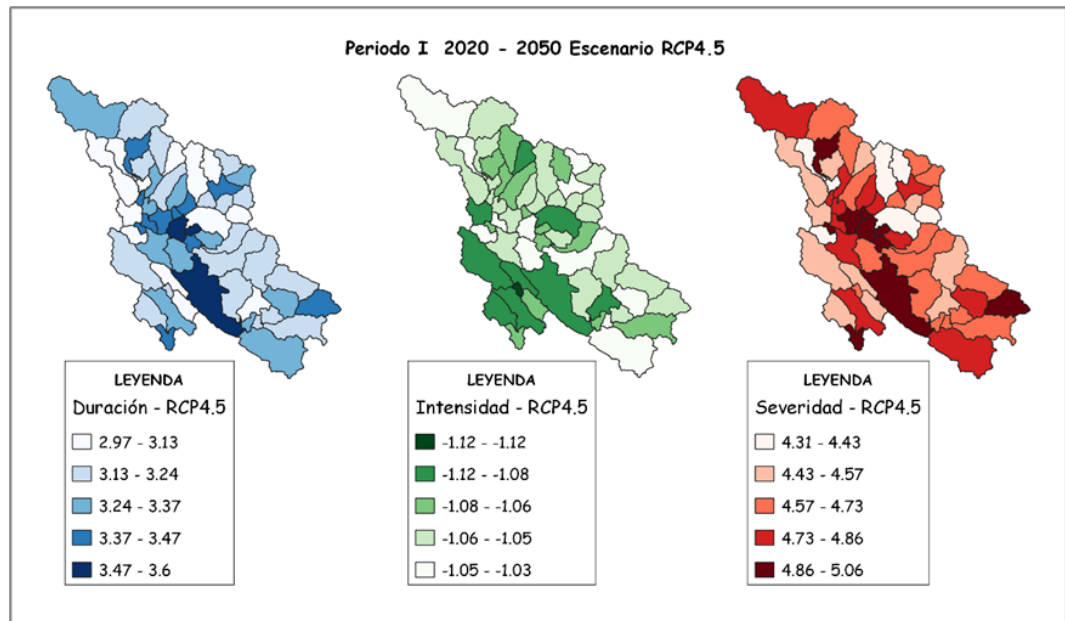
**Figura 20.** Mapas de duración, intensidad y severidad en el período (1981-2005).

Los resultados en relación a la intensidad de los eventos de sequía, muestran las mayores intensidades máximas durante el evento 1982 - 1983, relacionándose con las sequías asociadas a la ocurrencia del ENSO (Lagos et al. 2008), y en relación a duración fueron en promedio alrededor de 2-4 meses máximo, cantidad comparable con el promedio de la duración de las sequías reportadas en el trabajo de investigación por Vicente-Serrano et al. (2016), pero más cortas que las duraciones reportadas por Zuluaga-López, (2009), en su estudio de Análisis de la Variabilidad espacio-temporal de la sequía. Adicionalmente estos resultados concuerdan con las diferencias en duración de las sequías encontrado por (Vicente-Serrano et al. 2015), entre la región Amazónica y el Altiplano en Bolivia.

#### 4.3.2. Características de las sequías proyectadas período I (2020 – 2050)

Los resultados de la caracterización de sequías para este período se muestran en las Fig. 21 y 22, donde se evaluó para cada subcuenca el análisis de sequías en SPI-6 futuros en el período I (2020 – 2050) con los modelos (CMCC - CM, GFDL - CM3 y MIROC5) y sus respectivos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

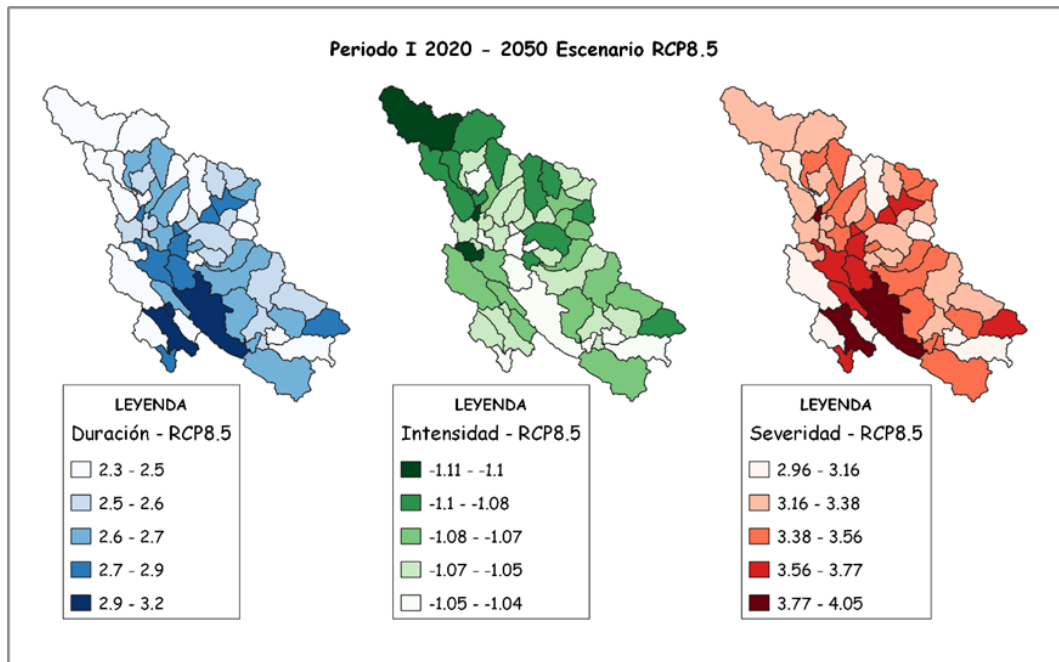
En la Fig. 21 se percibe que la duración mínima es 2.97 y la duración máxima 3.6 meses. En relación a la intensidad se refleja las zonas moderadamente secas según los valores que están en un rango de -1.03 a -1.12. En relación a la severidad presentaron valores promedios de 4.31 a 5.06 lo cual señala que son similares en toda la cuenca, sin variabilidad significativa.



**Figura 21.** Mapas de duración, intensidad y severidad en el período I (2020-2050)- RCP4.5.

Los resultados para el escenario 8.5 en el período I, se detalla en la figura 22 dónde se observa que la duración máxima en meses entre las 58 subcuencas está entre 2 a 3 meses; las intensidades máximas se encuentran en la parte alta de la cuenca y las intensidades mínimas están en la parte baja de la cuenca; las severidades van entre 2.96 y 4.05.





**Figura 22.** Mapas de duración, intensidad y severidad en el período I (2020-2050) RCP8.5.

Aparte de ello, para observar mejor la caracterización (duración, intensidad y severidad) de las sequías del período I (2020-2050) en la Unidad Hidrográfica Huancané, se resume en la Tabla 10 los resultados para cada uno de los escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5), en términos generales no se observa diferencias significativas en relación a duración e intensidad, lo cual demuestra que tienen similares valores. Sin embargo, se observa que el escenario RCP4.5 en relación a severidad presenta mayores valores de severidad que el escenario RCP8.5.

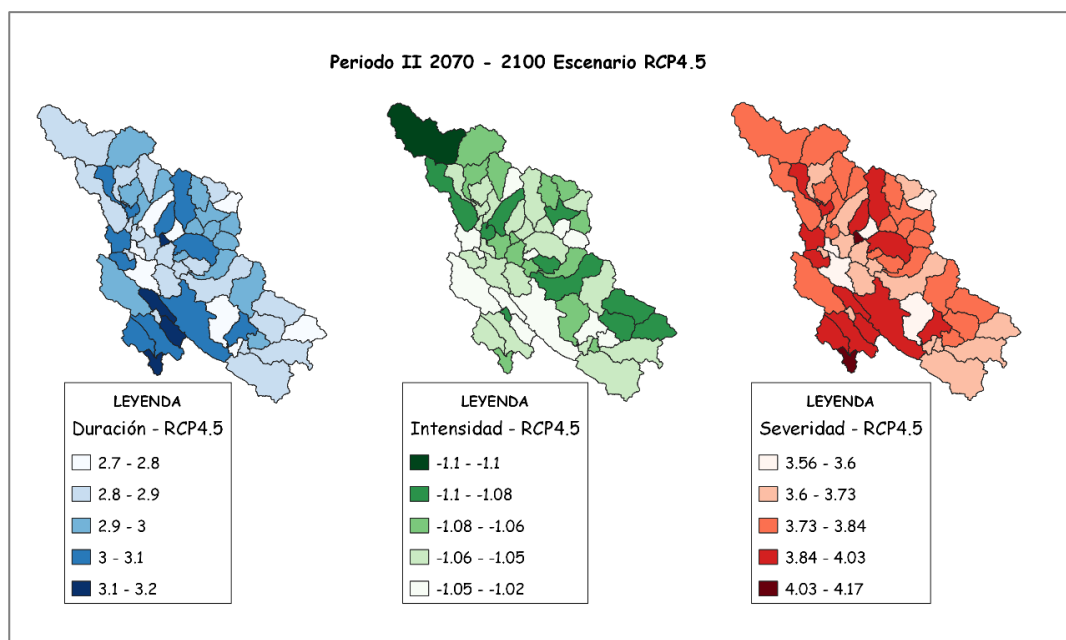
**Tabla 10.** Características de las sequías proyectadas (SPI-6) - período (2020-2050)

Período	Escenario de Emisión	Duración máxima	Intensidad máxima	Severidad Máxima
2020 - 2050	RCP4.5	3.6	- 1.12	5.06
2020-2050	RCP8.5	3.2	-1.11	4.05

**Fuente:** Elaboración propia.

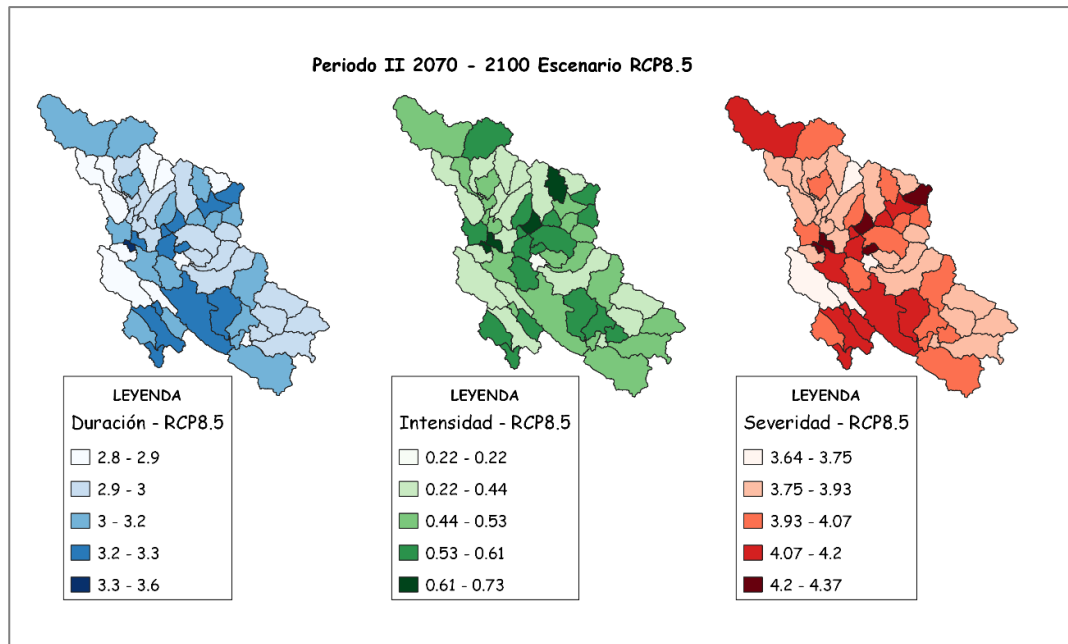
#### 4.3.3. Características de las sequías proyectadas período II (2070 – 2100)

Idéntico al período I anteriormente mostrado, se ha compuesto las series de SPI-6 futuras para las 58 subcuena en el período II (2070-2100) con sus correspondientes modelos y para cada uno de los escenarios (RCP4.5 y RCP8.5). Siendo así, la Fig. 23 se observa que la duración máxima es 3 meses; en intensidad varía entre -1.02 y -1.1, donde se marca que las intensidades máximas se encuentran en la parte alta de la cuenca y en relación a severidad se manifiesta un valor uniforme en toda la cuenca, esto es corroborado por Belizario et al., (2013).



**Figura 23.** Mapas de duración, intensidad y severidad en el período II (2070-2100)-RCP4.5.

En la Fig. 24 se observa que la duración varía de 2.8 a 3.6 meses; las intensidades máximas van de 0.22 a 0.73 donde se puede afirmar que se trataría de un período aproximadamente normal a húmedo y en relación a severidad máxima se tiene 4.37 y severidad mínima 3.64.



**Figura 24.** Mapas de duración, intensidad y severidad en el período II (2070-2100)-RCP8.5.

Para mayor claridad de las diferencias de los escenarios en el período II, se presenta el resumen en la Tabla 11 donde se muestra la duración máxima, intensidad máxima, la severidad máxima de las sequías y escenario de emisión. Se logra identificar que en duración y severidad no existe una significativa diferencia, pero en relación a intensidad se manifiesta diferencias significativas entre los dos escenarios (Belizario, 2014).

**Tabla 11.** Características de las sequías proyectadas (SPI-6) - período (2070-2100).

Período	Escenario de Emisión	Duración máxima	Intensidad máxima	Severidad Máxima
2070-2100	RCP4.5	3.2	-1.1	4.17
2070-2100	RCP8.5	3.6	0.73	4.37

**Fuente:** Elaboración propia.

Es muy difícil evaluar los cambios en las características de la sequía bajo el cambio climático, debido por la gran incertidumbre de las escalas temporal y



regional. Se sabe que la sensibilidad del calentamiento global depende mucho del modelo en múltiples análisis, lo que significa que diferentes modelos tales como los empleados en esta investigación (CMCC - CM, GFDL – CM3 y MIROC5) dieron resultados próximos en respuesta al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y RCP 8.5).

El calentamiento global observado en las últimas décadas está asociado a variaciones en ciertos componentes del ciclo hidrológico. Estas variaciones, que se recogen en el estudio “El cambio climático y el agua” realizado por el Grupo de Trabajo II del IPCC incluyen cambios en las pautas, intensidades y valores extremos de precipitación; en la fusión generalizada de la nieve y del hielo; en el aumento del vapor de agua atmosférico y aumento de la evaporación y en las variaciones de la humedad del suelo y de la escorrentía (Belizario, 2015).

Así, de esta manera los resultados del análisis de sequías en la Unidad Hidrográfica con perspectiva al cambio climático; se espera un incremento en intensidad y severidad según el período II (2070 - 2100) estimándose 14 eventos de sequía bajo el escenario RCP 4.5, por el contrario, el escenario RCP 8.5 solo se espera incremento de severidad. A diferencia del período I (2020 - 2050) presento 9 posibles eventos de sequía bajo ambos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 donde se identificó un incremento en relación a intensidad y severidad.

Estos resultados próximos se relaciona con los resultados de Hervías et al. (2017), donde afirma que el cambio climático intensifique el estrés actualmente padecido por los recursos hídricos debido al crecimiento de la población, al cambio económico y de los usos de la tierra y, en particular, a la urbanización.



## V. CONCLUSIONES

Dada las importantes repercusiones de la sequía, más aún en una zona de alta actividad agropecuaria, el índice de sequía (SPI6), permite una identificación de los eventos de sequía, logrando ayudar a la monitorización y predicción de la misma. Por otro lado, esta información obtenida es una primera aproximación del cambio climático futuro en el Altiplano, que puede ser utilizada para estudios de impacto de cambio climático. También está la perspectiva de entender mejor la variabilidad climática actual del Altiplano y proyectarlo hacia el futuro, implementando mejores estrategias de manejo de los recursos hídricos y prevenir a corto plazo riesgos en las actividades agrícolas.

Los GCM generan datos que no se pueden aplicar directamente a regiones específicas, por lo que necesariamente éstos se tienen que regionalizar (Downscaling). Por lo tanto, se aplicó el método de corrección de sesgo paramétrica (Bias Correction), teniendo en cuenta que si no se ejecuta de forma adecuada afecta directamente la precisión de las estimaciones futuras.

El SPI, proporcionó los medios para analizar la sequía en una escala de 6 meses considerando la relación entre la sequía y el cambio climático. En la serie de (1981-2005) se identificaron en total 6 episodios de sequías más severas en los años 1983, 1992, 1995, 1996, 1998 y 2005; alcanzaron categorías de intensidad moderada a extrema. La situación de extrema sequía fue en los años 1983 y 1992. En el (SPI6) aplicada en el período I (2020-2050) se identificó como máximo 9 eventos con el modelo MIROC5 bajo ambos escenarios de emisión. Para el período II (2070-100), los modelos proyectaron más eventos de sequías bajo ambos escenarios de emisiones (RCP4.5 y RCP8.5) identificando hasta 14 eventos.



En base a los resultados de la caracterización de las sequías históricas en el período (1981-2005), concluimos que la duración de estos eventos de sequías va entre 2 a 4 meses, en cuanto al evento más fuerte de sequía en relación a severidad y intensidad, se encuentran en la parte media y baja de la cuenca Huancané coincidiendo con el período más seco de 1983 y 1992. Y las sequías proyectadas para el período I (2020-2050) y el período II (2070-2100) se puede concluir que se presentarán más eventos de sequías en el futuro, la duración de las sequías proyectadas sería mayores a los históricos. Mientras tanto, las intensidades y severidades máximas de las sequías proyectadas serán menos intensos y severos que los históricos, excepto para el escenario RCP 4.5 donde se presentaría sequías más intensos y más severos.



## VI. RECOMENDACIONES

En relación a las conclusiones obtenidas en el presente estudio de investigación, se propone algunas recomendaciones y sugerencias para futuras investigaciones.

- a. Se recomienda mayor uso a la metodología de la extracción de datos del producto PISCO-p que es una herramienta útil en múltiples estudios como son las caracterizaciones hidroclimatológicas, riesgos (inundaciones y sequías). Siendo su metodología 100 % transparente, con cobertura a nivel nacional y mejoras permanentes, soportado por una institución nacional.
- b. Los datos de precipitación proyectada fueron a partir de los GCM, donde se evidenció que posee limitaciones entre ellas que no todos los modelos actuales fueron diseñados para estimar el comportamiento de algunas variables del ciclo hidrológico bajo condiciones de cambio climático, es por ello utilizar más de un modelo considerando que las incertidumbres muchas veces provienen al seleccionar los GCM y RCP.
- c. Se recomienda desarrollar investigaciones de análisis de sequías futuras en otras cuencas altoandinas con mayor impacto socioeconómico lo cual sumado a una agricultura en secano con escasa tecnificación hacen una zona vulnerable ante las sequías, con la finalidad que ayuden a prever los impactos y entender la variabilidad espacio-temporal de las sequías bajo diferentes condiciones climáticas.
- d. Se sugiere trabajos de investigación que alerten futuras sequías bajo escenarios de cambio climático para una mejor toma de decisión a futuro en el proceso de aprovechamiento, manejo, operación y control de los recursos hídricos.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarón, A., (2016). *Evaluación de modelos climáticos: el comportamiento de la variable nubosidad* (Tesis Doctoral). Universitat de Girona. Departament de Física. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10803/392164>.
- AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A., Anjileli, H., Azarderakhsh, M., Chiang, F., Hassanzadeh, E., Huning, L. S., Mallakpour, I., Martinez, A., Mazdiyasn, O., Moftakhari, H., Norouzi, H., Sadegh, M., Sadeqi, D., Van Loon, A. F., & Wanders, N. (2021). *Anthropogenic Drought: Definition, Challenges and Opportunities*. *Reviews of Geophysics*, 59 (e2019RG000683). <https://doi.org/10.1029/2019RG000683>.
- Ahmed, K., Shahid, S., Sachindra, D. A., Nawaz, N., & Chung, E. S. (2019). *Fidelity assessment of general circulation model simulated precipitation and temperature over Pakistan using a feature selection method*. *Journal of hydrology*, 573, 281-298.
- Alzate, D., Rojas, E., Mosquera, J. & Ramón, J. (2015). *Cambio climático y variabilidad climática para el período 1981-2010 en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, Norte de Santander – Colombia*. *Revista Luna Azul*, 39, 127-153.
- Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). *Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico*. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú.
- Belizario, G. (2014). *Impactos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú* [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/256>





- Belizario, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú. *Rev. Investig. Altoandin.*, 17(1), 47–52.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2015.77>
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013a). Efectos del cambio climático en la temperatura y precipitación - Capachica, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 15(4), 15–24.
- Belizario, G., Huaquisto, E., & Chirinos, T. (2013b). Influencia del cambio climático en los elementos climáticos de la cuenca del río Coata-Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 15(1), 35–54.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5607224>
- Callata, W., (2015). *Evaluación de las sequías a través del método índice de precipitación estandarizada en la provincia de Azángaro*. Universidad Nacional del Altiplano, Tesis para optar título de Ingeniero Agrícola. Perú.
- Campozano, L., Ballari, D., Montenegro, M., & Avilés, A. (2020). *Future Meteorological Droughts in Ecuador: Decreasing Trends and Associated Spatio-Temporal Features Derived From CMIP5 Models* . In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 8, pp. 17). <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2020.00017>.
- CEPES (2015). Los suelos en el Perú. *La Revista Agraria*, 170(15),1-16.
- Curi-Tapahuasco, S., (2017). *Caracterización de las sequías hidrológicas en la vertiente peruana del océano pacífico*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Consejo Nacional del Ambiente (2006). Plan de Acción para el fortalecimiento de capacidades para la aplicación del Convenio de Lucha contra la desertificación y sequía. Lima: CONAM-PNUD, GEF.



- Endara, S., Acuña, J., Vega, F., Febre, C., Correa, K., & Ávalos, G. (2019). *Caracterización espacio temporal de la sequía en los departamentos altoandinos del Perú (1981-2018)*. SENAMHI. Retrieved from <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-78.pdf>.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Dríouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason, and M. Rummukainen. (2013): Evaluation of climate models. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Doschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, Eds. Cambridge University Press, pp. 741-882, doi:10.1017/CBO9781107415324.020.
- Gálvez, P., (2017). *Caracterización de las sequías históricas y proyectadas bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Mantaro* (Tesis de Posgrado). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- GEA, Gran enciclopedia Aragonesa de Geografía, disponible en: [http://www.encyclopedia-aragonesa.com/voz.asp?voz\\_id=1284](http://www.encyclopedia-aragonesa.com/voz.asp?voz_id=1284)
- GCCIP. (1997). *Global Climate Change Information Programme*.
- Gardner-Outlaw, T., y Engelman, R. (1997). *Sustaining Water, Easing. Scarcity: A Second Update*. Washington DC, Population Action International.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N. y Widhalm, M. (2011). Declaración de Lincoln sobre índices de sequía: índice de sequía meteorológico universal recomendado. *Boletín de la Sociedad Meteorológica Estadounidense*, 92 (4), 485-488.



- Hernández M. E., Carrasco G. y Alfaro G. (2007). “Mitos y realidades de la sequía en México”. *Temas Selectos de Geografía de México*. Instituto de Geografía, UNAM. ISBN: 978-970-32-4692-2, México.
- Hervías, M., (2017). *Cambio Climático y sus implicaciones sobre la salud*. Universidad Complutense.
- IDEAM – UNAL. (2018). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*, Bogotá, D.C.,
- IPCC. <http://www.ipcc-data.org/>
- IPCC. (2014). Anexo II: Glosario [Mach, K.J., S. Planton y C. von Stechow (eds.)]. En: *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, págs. 127-141.
- IPCC. (2007). *Climate Change The Physical Science Basis*. Geneva.
- IPCC. (2013). *Cambio climático 2013: Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Pág. 1-34.
- Kamali, B., Houshmand Kouchi, D., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2017). *Multilevel drought hazard assessment under climate change scenarios in semi-arid regions—A case study of the Karkheh river basin in Iran*. *Water*, 9(4), 241.
- Lagos, P., Silva, Y., Nick, E., & Mosquera, K. (2008). *Variabilidad de la precipitación relacionada con El Fenómeno del Niño en Perú*. Instituto Geofísico del Perú, Lima- Perú.
- Lavado-Casimiro, W., Espinoza, J.C., (2014). *Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007)*. Perú.



- Lavado, W., Obando, O. F., Endara, S., Fernández, C., Vega, F., & Sosa, J. (2016). *Reporte extraordinario de condiciones de sequía a enero del 2016*. Senamhi. Retrieved from <http://www.senamhi.gob.pe/load/file/02662SENA-1.pdf>.
- Liu, L., Hong, Y., Bednarczyk, C.N., Yong, B., Shafer, M.A., Riley, R., Hocker, J.E. (2012) *Hydro-climatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: A case study in Blue river basin, Oklahoma*. *Water Resour. Manag*, 26, 2761–2779.
- Lorenzo, J., (2012). *Las sequías hidrológicas en la Península Ibérica: Análisis y caracterización espacio temporal, influencias climáticas y el efecto de la gestión hidrológica en un contexto de cambio global*. Universidad de Zaragoza.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., González-Hidalgo, J. C., López-Moreno, J. I., & Cortesi, N. (2013). Hydrological drought response to meteorological drought in the Iberian Peninsula. *Clim Res*, 58(2), 117-131.
- Marengo. (1987). *Impacto de la sequía de 1982-1983 en la agricultura del Altiplano peruano, estudios agroclimatológicos*. <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1008/doc1008.htm>
- McKee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Anaheim, CA, USA, 17–22 January; pp. 179–184.
- McSweeney, C.F., Jones, R.G., Lee, R.W. et al., (2015). *Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions*. *Clim Dyn* 44, 3237–3260. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2418-8>
- MINAG. *Taller Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Exposición de Manuel Leiva – MINAG sobre los Avances del sector agrícola en la adaptación al cambio climático.



- MINAM. (2016). *Lucha contra la desertificación y la sequía 2016-2030*.
- Ministerio de Agricultura, MINAG-FAO, *Plan de Gestión de Riesgo y Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agrario período 2012 2021- PLANGRACC*, 2010-2011).
- MITECO (s/f.). Ministerio para la Transición Ecológica y el reto Demográfico, disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/>
- Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K. et al (2010). *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. Nature 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Moral, F. J., Rebollo, F. J., Paniagua, L. L., García-Martín, A., & Honorio, F. (2016). Spatial distribution and comparison of aridity indices in Extremadura, southwestern Spain. *Theoretical and Applied Climatology*, 126(3), 801-814.
- Moya, A., Ortega, J., Jurado, X. (2015). *MIROC5 Global Climate Model evaluation, temperature estimations and precipitations for Peru's southern and northern*. Apunt. cienc. soc. Vol. 5 Núm. (2). <https://doi.org/10.18259/acs.2015028>.
- Nalbantis, I. (2008). *Evaluation of a Hydrological Drought Index*. Vol. 23.
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación (OMM-Nº 1090)* (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood), Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (2006). “Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros”. OMM Nº 1006. 28 p.
- Pilares-Hualpa, I. A., Mejia, A., Guevara-Perez, E., Fano, G., & Alfaro, R. (2018). *Evaluation of water availability in the Cabanillas river basin of the Peruvian Altiplano under regionalized climatic scenarios*. Ingeniería UC, 25(2), 307–319.



- Pinazo, R. (2016). *Determinación de frecuencias de sequía en la provincia de Puno con fines de planeamiento del uso de recursos hídricos* (Tesis de posgrado). Universidad Nacional del Altiplano, Perú.
- Pita López, M. F. (1989). La sequía como desastre natural: Su incidencia en el ámbito español. *Norba: revista de geografía*, 6-7, p. 31-62.
- Real-Rangel, Roberto A.; Pedrozo-Acuña, Adrián; Breña-Naranjo, J. Agustín; Alcocer-Yamanaka, Víctor H. (2020). *Journal of Hydroinformatics* 22 (1): 170–185. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.020>.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V. et al. (2011). *RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. Climatic Change* 109, 33. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Rodríguez, N. L. (2013). El estudio de la sequía hidrológica en el Mediterráneo español: propuesta de aplicación del índice estandarizado de sequía pluviométrica a las aportaciones hídricas (Doctoral dissertation, Universidad de Sevilla).
- Sanabria, J., Marengo, J., & Valverde, M. (2019). Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno). *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA* (1), 134-149.
- Segovia, K. (2016). *Precipitación estimada y sequía meteorológica futura en la Cuenca del Río Grande mediante el Modelo de Circulación Global MRI*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Tesis para optar título de Ingeniero Agrícola. Perú
- SENAMHI. (2007). *Escenarios de cambio climático en la cuenca de los ríos Mantaro y Urubamba para el año 2100*; Proyecto Regional Andino de Adaptación – PRAA. Autores Rosas G., Avalos G., Díaz A., Oria C., Acuña D., Metzger L. y Miguel R. Eds. SENAMHI – MINAM, Perú, 124 pp.



- SENAMHI. (2014). *Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en Perú*, 1ra ed. Lima, Perú.
- SENAMHI. (2009). *Escenarios climáticos en la cuenca del río Santa para el año 2030*.
- Shrestha M. (2015). *Data analysis relied on Linear Scaling bias correction (V.1.0)*  
*Microsoft Excel file*.
- Shrestha, S., Shrestha, M., Babel, M.S. (2016). *Modelling the potential impacts of climate change on hydrology of Indrawati River Basin in Nepal*. Environmental Earth Science.
- Solomon, S., Qin, Dawei., Manning, M., Chen, Z. (2007). *Cambio climático 2007: la base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*. Editorial: Cambridge University Press.
- Ta, Z., Yu, Y., Sun, L., Chen, X., Mu, G., & Yu, R. (2018). *Assessment of precipitation simulations in Central Asia by CMIP5 climate models*. Water, 10(11), 1516.
- Teutschbein, C., and Seibert, J. (2012). *Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods*. Journal of Hydrology, 456-457, 12-29. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
- Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J. et al. (2011). *RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100*. Climatic Change 109, 77. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
- Tsakiris, G., Pangalou, D. y Vangelis, H. (2007). *Evaluación regional de sequía basada en el índice de reconocimiento de sequía (RDI)*. Water Resour Manage 21, 821–833. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9105-4>
- Tschöke, G., Kruk, N., Braga de Queiroz, P., Chan Chou, S. (2015). *Comparación de dos métodos de corrección de sesgo para la precipitación simulados con un modelo*



- climático regional*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, São Paulo, Brazil.
- Tyndall Centre for Climate Change Research. (2004). Adger, W. N., Brooks, N., Bentham, G., Agnew, M., Eriksen, S. New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity. Tyndall Project IT1.11. Technical Report 7. Reino Unido: Tyndal Centre.
- Traverso, K., Mamani, J. A., & Alfaro, R. (2019). Generation of monthly average flow rates from the hydrological characteristics in the Huancane river basin. *38th IAHR World Congress*, 5847–5856. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-1617>.
- Valiente, Ó. M. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas (España)*, (26), 59-80.
- Valverde, M., Marengo, J. A. (2007). *Change in the atmospheric circulation pattern over south America by climate future scenarios from models of IPCC AR4 climate simulations*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.1, 125 – 145.
- Van Vuuren, D.P., et al. (2011). *The representative concentration pathways: an overview*, *Climatic Change* 109, 5-31.
- Vargas, Paola. (2009). *El Cambio Climático y sus Efectos en el Perú*. BCRP - Documento de Trabajo N° 2009-14.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. y López-Moreno, J. I. (2009). *A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*. *Journal of climate* 23: 1696-1718.
- Vicente - Serrano, S.M., Chura, O., López - Moreno, J.I., Azorin - Molina, C., Sanchez - Lorenzo, A., Aguilar, E., y Nieto, J.J. (2015). Variabilidad espacio-temporal de las sequías en Bolivia: 1955-2012. *Revista Internacional de Climatología*, 35 (10), 3024-3040.

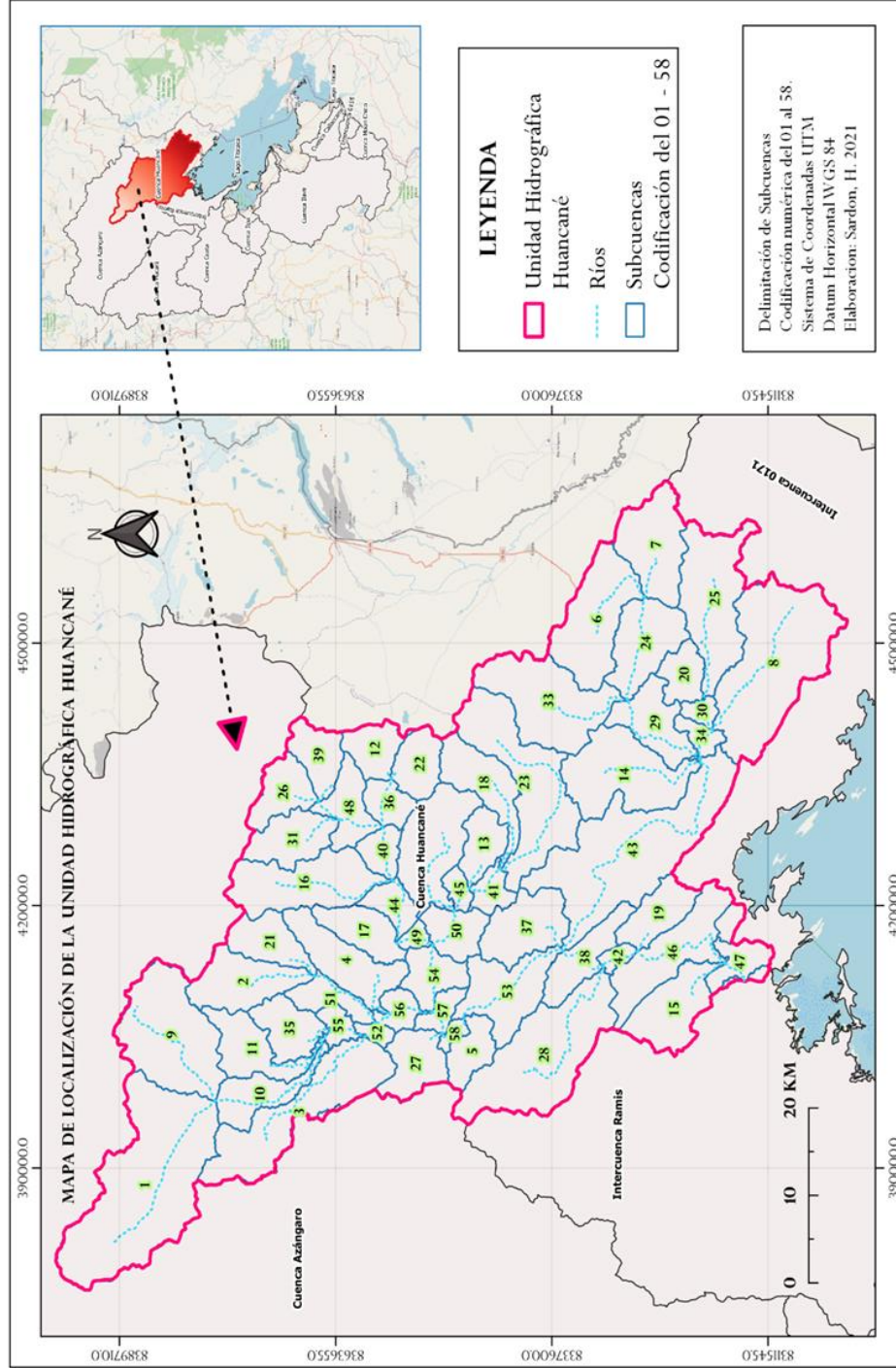




- Vicente-Serrano, S.M., Aguilar, E., Martínez, R., Martín-Hernández, N., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., El Kenawy, A., Tomás-Burguera, M., Moran-Tejeda, E., LópezMoreno, J.I., Revuelto, J., Beguería, S., Nieto, J.J., Drumond, A., Gimeno, L., Nieto, R. (2016). *The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador*. *Clim. Dyn.* 1–23. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3082-y>
- Van der Linden, P., y Mitchell, J.F.B. (2009): *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.
- Van Loon, A. (2013). *On the propagation of drought. How climate and catchment characteristics influence hydrological drought development and recovery*. Tesis para: Doctorado. Vrije Universiteit Amsterdam.
- Von Storch, H., Zorita, E. y Ulrich Cubasch, U. (1993). *Reducción de las estimaciones globales sobre el cambio climático a escala regional: una aplicación a las precipitaciones ibéricas en invierno*.
- Wilby, R., Charles, S., Zorita, E. y Timbal, B. (2004). *Directrices para el uso de escenarios climáticos desarrollados a partir de métodos estadísticos de downscaling*.
- Zhu, Rui; Yang, Linshan; Liu, Tao; Wen, Xiaohu; Zhang, Liming; Chang, Yabin. (2019). *"Hydrological Responses to the Future Climate Change in a Data Scarce Region, Northwest China: Application of Machine Learning Models"* *Water* 11, no. 8: 1588. <https://doi.org/10.3390/w11081588>.
- Zuluaga-López, J. (2009). *Análisis de la Variabilidad espacio-temporal de la sequía en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.

## ANEXOS

**Anexo A: Unidad Hidrográfica Huancané y sus 58 subcuencas.**



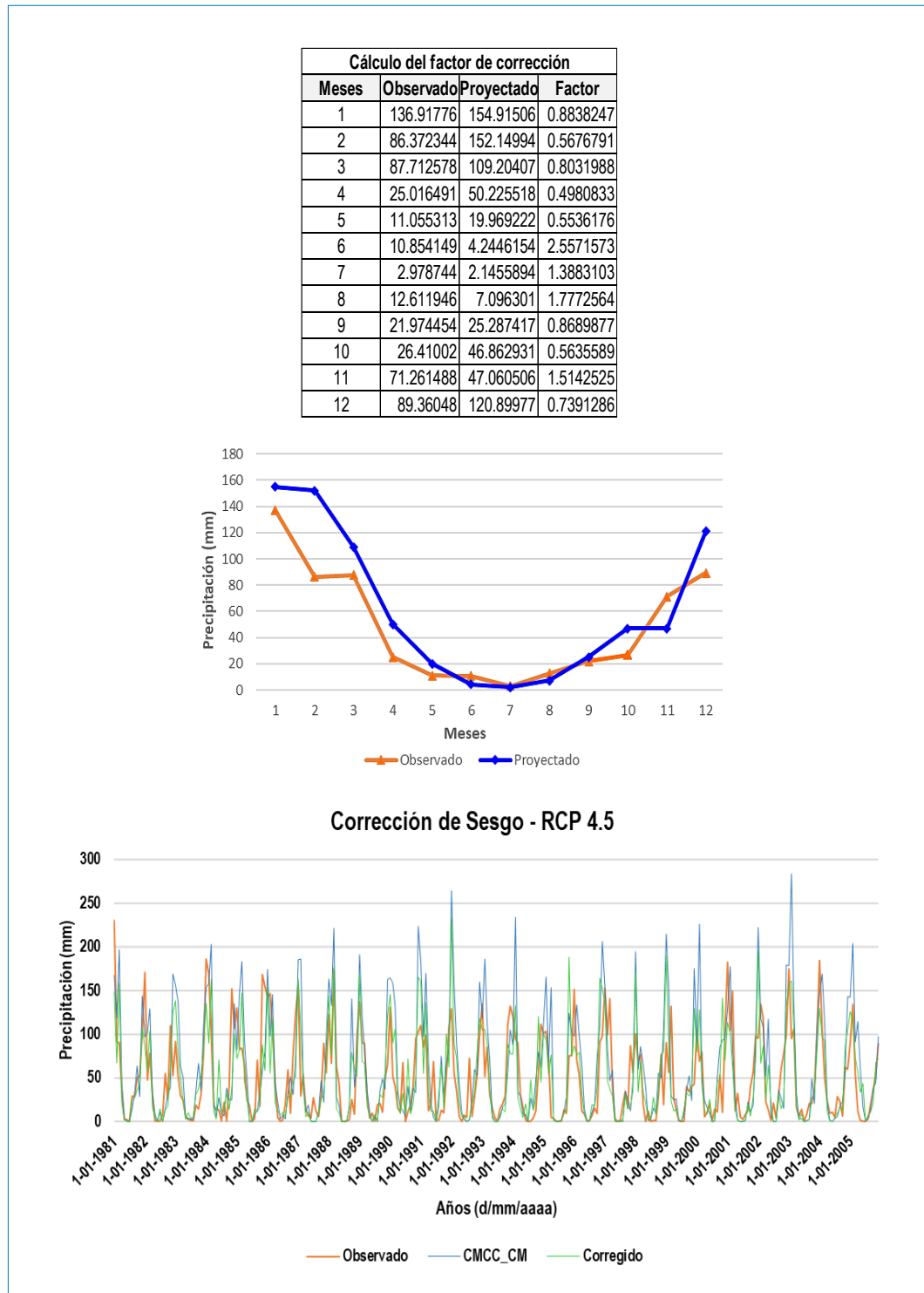
## Anexo B: Código para leer la información de la base de datos PISCO en RStudio.

```
# *****  
# Extraer datos promedio de la precipitacion  
# de la informacion grillada PISCO  
  
# @adaptado por: Heidi Sardon Q.  
# email: heidisardon@gmail.com  
# *****  
  
# Instalar las librerias necesarias -----  
  
install.packages("ncdf4")  
install.packages("raster")  
install.packages("dplyr")  
install.packages("rgeos")  
install.packages("rgdal")  
  
# Cargar las librerias -----  
  
library(ncdf4)  
library(raster)  
library(dplyr)  
library(rgeos)  
library(rgdal)  
  
# Ingresar informacion y procesar -----  
  
# 1.- Se ingresara PISCO-PRECIPITACIONES (archivo *.nc)  
# el codigo permite extraer la informacion diaria como mensual  
pisco_pp <- raster::brick("")  
  
# 2.- Se ingresara el shape de subcuencas (archivo *.shp)  
# el shp. debe estar en coordenadas UTM  
shp <- raster::shapefile("Shape Huancane/Cuencahuancane.shp")  
  
# 3.- Se considerara el centroide de cada subcuenca como un punto de estacion  
cent <- rgeos::gCentroid(shp, byid = TRUE)  
  
# Visualizacion -----  
  
# 1.- Realizamos el plot del shape  
plot(shp)  
# 2.- Agregamos el grafico de estaciones (centroides)  
plot(cent, col = "red", pch = 16, add = TRUE)  
  
# Extraer la informacion de precipitaciones -----
```

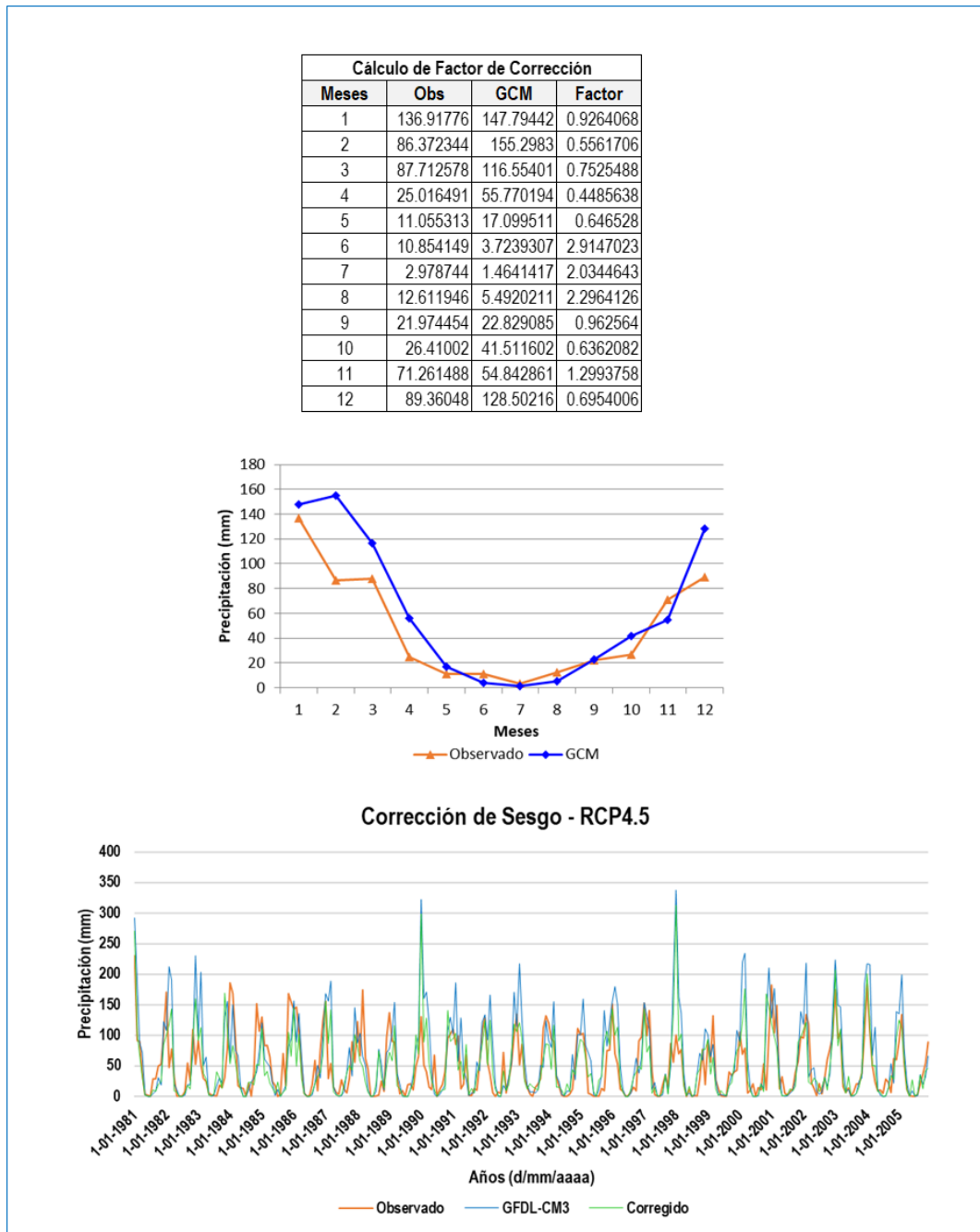


```
# Extraer la informacion de precipitaciones -----  
  
# Funcion  
generate_mask_geom <- function(cov,geom){  
  specialcov = cov  
  specialcov[] = 1:ncell(cov)  
  Position_rowcol <- function(i){  
    quad1 <- unlist(raster::extract(specialcov, geom[i,], small=TRUE))  
  }  
  position<-lapply(1:length(geom), Position_rowcol)  
  return(position)  
}  
  
# Funcion  
mask_fast_extract <- function(cov, positionP, fun = mean, na.rm = TRUE){  
  matrix_R <- t(as.matrix(cov))  
  sapply(1:length(positionP), function(i){  
    Value <- matrix_R[positionP[[i]]]  
    fun(Value,na.rm=T)  
  })  
}  
  
gmask_pisco <- generate_mask_geom(cov = pisco_pp[[1]], geom = shp)  
  
# Extraer la informacion de precipitaciones  
serie_pp <- mapply(function(i) mask_fast_extract(pisco_pp[[i]], gmask_pisco),  
  i=1:nlayers(pisco_pp))  
  
# Ver y guardar informacion -----  
# 1.- ver tabla  
serie_pp <- t(serie_pp)  
head(serie_pp)  
  
# 2.- Graficar informacion de una subcuenca en especifico  
plot(serie_pp[,3], type = "l",col = "blue", ylab = "PP[mm]")  
  
# 3.- Guardar los datos  
write.csv(serie_pp, file = "Series_precipitacion.csv",  
  quote = FALSE)
```

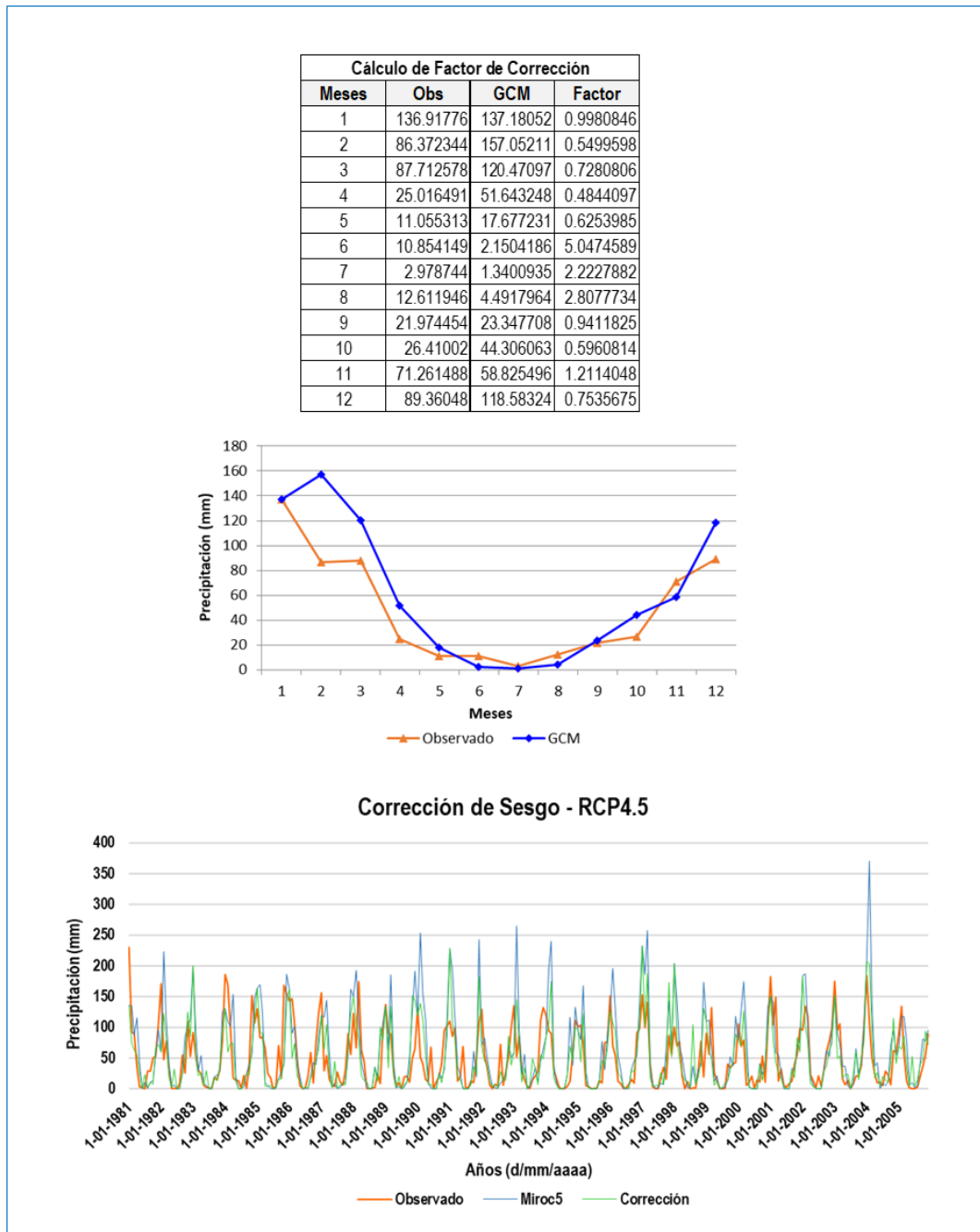
### Anexo C: Downscaling por Linear Scaling Bias Correction



**Figura 25.** Downscaling por Linear Scaling Bias Correction en el modelo CMCC-CM.



**Figura 26.** Downscaling por Linear Scaling Bias Correction en el modelo GFDL-CM3.



**Figura 27.** Downscaling por Linear Scaling Bias Correction en el modelo MIROC5.

**Anexo D:** Sequías históricas y proyectadas – SPI6

**Tabla 12.** Caracterización temporal de la sequía histórica en el período 1981 – 2005

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1981	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.97	0.06	0.25	0.58	0.98	0.56	0.83
1982	1.13	0.56	0.27	0.02	0.10	-0.30	-0.91	-0.60	0.53	0.37	1.02	0.48
1983	-0.02	-0.40	-1.29	-1.27	-1.84	-1.82	-1.63	-1.65	-0.59	-1.37	-1.69	-1.42
1984	-0.14	0.87	0.83	0.91	1.29	1.61	1.06	0.13	-0.59	0.41	1.33	1.48
1985	1.36	1.33	1.30	1.43	0.97	0.86	1.01	0.92	1.84	0.65	1.45	2.02
1986	1.80	2.27	1.87	2.22	1.67	1.10	1.45	1.04	1.63	0.04	0.11	0.80
1987	0.81	0.19	-0.59	-0.37	-0.43	-1.26	-1.11	-0.48	0.03	0.31	0.69	0.22
1988	-0.45	-0.67	0.29	0.65	0.65	0.96	1.27	1.83	0.64	-0.44	-2.27	-1.12
1989	-0.72	-0.53	-0.26	-0.13	0.39	0.21	0.07	0.21	0.36	-0.52	-0.74	-1.12
1990	-0.83	-1.30	-1.66	-1.48	-1.24	-0.35	-0.54	-0.05	0.97	1.79	1.54	0.72
1991	0.47	0.45	0.56	0.16	0.06	0.42	0.78	0.86	0.65	0.37	-0.11	-0.68
1992	-0.74	-0.97	-1.32	-1.33	-1.31	-1.83	-2.18	-0.70	0.18	0.79	0.57	0.57
1993	0.64	-0.44	-0.31	-0.12	0.02	-0.18	-0.42	0.21	0.45	0.20	0.71	1.21
1994	1.13	1.22	1.10	1.12	0.87	0.44	0.51	0.07	-0.44	-1.48	-1.19	-0.47
1995	-0.96	-0.55	-0.26	-0.41	-0.37	-0.92	-0.43	-1.23	-2.79	-2.22	-1.07	-0.65
1996	-0.43	-0.67	-0.59	-0.47	-0.46	-0.80	-1.14	-0.91	-0.93	-1.16	-0.43	-0.18
1997	0.11	0.24	0.66	1.01	0.88	0.88	0.78	1.01	0.56	-0.27	0.38	0.06
1998	-0.25	-0.45	-0.55	-0.51	-0.96	-0.82	-0.61	-0.84	-1.76	-0.82	-0.12	-1.48
1999	-1.85	-1.89	-0.70	-0.79	-0.93	-0.26	0.31	0.68	-0.01	0.20	-0.39	-0.91
2000	-0.74	-0.44	-0.71	-1.09	-0.84	-0.31	-0.39	-0.66	-0.77	1.09	-0.03	-0.05
2001	0.61	0.56	1.18	0.66	1.38	1.40	1.14	1.37	0.09	0.67	-0.07	-0.09
2002	-0.68	-0.11	0.24	0.11	0.25	0.24	1.20	0.84	0.69	1.62	1.23	1.25
2003	1.16	1.22	1.15	0.69	0.63	0.67	0.43	0.38	-0.12	-0.28	-0.70	-0.46
2004	0.13	0.28	-0.03	0.02	0.34	0.22	-0.22	-0.43	0.39	-0.22	-0.25	-0.67
2005	-1.38	-0.66	-1.01	-0.89	-0.95	-0.98	-0.35	-2.12	-1.85	-0.61	-0.38	-0.13



**Tabla 13.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo CMCC-CM en el escenario RCP 4.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2020	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-1.66	-1.12	-0.56	0.46	0.2	2.03	0.82
2021	0.7	0.46	0.3	0.45	-0.43	0.29	0.19	0.53	0.03	-0.63	-0.8	-1.25
2022	-0.1	0.27	0.23	0.12	0.23	0.59	-0.04	-0.85	-2.29	-1.89	-1.8	-1.39
2023	-1.2	-1.16	-1.32	-1.21	-0.9	-1.09	-0.94	-0.76	-0.39	1.15	0.05	0.08
2024	0.09	0.33	0.03	-0.47	-0.26	-0.16	-0.23	-1.33	-0.46	-0.67	0.8	0.67
2025	1.11	1.53	1.84	1.95	1.75	1.92	1.72	1.21	-0.01	-0.87	-1.01	-0.71
2026	-0.33	0.19	0	0	0.2	0.26	0.15	-0.7	-1.3	-0.11	-0.91	-0.77
2027	-0.55	-1.17	-0.64	-0.67	-0.26	-0.21	-0.18	0.71	0.24	0.69	0.58	0.58
2028	0.33	-0.04	0.15	0.02	-0.08	-0.21	-0.04	1.06	0.51	0.81	-0.44	-0.76
2029	-0.81	-0.65	-0.08	-0.29	0.04	0.35	0.87	0.56	-0.08	-0.39	-0.36	0.34
2030	0.58	0.59	0.28	0.52	0.57	0.28	-0.17	-0.49	0.46	0.74	0.25	0.25
2031	0.06	-0.16	-0.33	0.11	0.24	0.26	0.79	1.43	2.27	0.71	0.05	1.58
2032	2.5	1.95	1.65	1.56	1.73	1.17	-0.84	-0.26	-0.11	-0.64	0.05	0.42
2033	1.26	1.05	1.11	1	0.87	0.91	-0.2	-0.09	-0.37	-0.51	-1.04	-0.73
2034	-0.27	0	0.25	0.48	0.75	0.96	1.02	1.14	0.48	-0.12	1.3	0.59
2035	0.22	0.44	0.29	0.54	-0.05	0.08	0.42	-0.2	-0.05	0.92	1.52	1.2
2036	1.48	1.13	0.83	0.56	0.38	0.4	-0.36	0.05	1.78	0.58	-0.17	-0.47
2037	-1.04	-1.51	-2.13	-2	-2.12	-2.31	-1.83	-1.39	-0.51	0.63	0.71	1.18
2038	1.14	1.22	0.99	0.83	0.77	0.4	0.53	0.21	0.07	0.01	-0.86	-0.23
2039	-1.23	-0.43	0.1	0.44	0.8	0.75	1.66	1.28	1.28	0.07	0.64	0.45
2040	0.46	0.74	0.63	0.49	0.19	0.31	0.28	-0.4	-1.54	-2.51	-1.94	-2.15
2041	-2.33	-2.72	-2.81	-2.75	-2.7	-2.81	-2.37	-1.84	-1.77	0.81	0.29	0.49
2042	0.51	0.19	-0.2	-0.39	-0.27	-0.56	-0.94	-0.81	-0.14	-1.05	-0.25	-0.24
2043	0.45	0.16	0.76	0.91	0.95	1.41	1.12	1.71	0.72	-0.87	-1.41	-2.06
2044	-1.26	-1.76	-1.55	-1.29	-1.13	-0.6	-0.78	0.12	1.46	1.4	0.96	0.93
2045	0.52	0.57	1.05	0.99	1.09	0.95	1.39	1.51	-0.12	1	0.21	-0.53
2046	-0.84	-1.19	-1.29	-1.59	-1.63	-1.55	-1.27	-0.7	0.04	-0.28	-0.46	0.06
2047	-0.33	0.31	0.69	0.65	0.82	0.75	1.38	0.87	-0.3	-0.84	0.5	-0.09
2048	-0.33	-0.09	-0.52	-0.38	-0.8	-0.62	-0.31	-1.14	-1.09	-0.22	0.64	-0.35
2049	-0.64	-0.68	-0.41	-0.74	-1.01	-0.58	-0.09	-0.03	0.04	0.01	-0.41	-0.11
2050	-0.07	0.37	-0.03	0.07	0.22	0.16	0.3	-0.5	0.69	1.94	1.27	2.28

**Tabla 14.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo CMCC-CM en el escenario RCP 8.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2020	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.12	0.8	1.21	-0.97	-1.39	-1.42	-0.79
2021	-1.24	-1.1	-1.66	-1.65	-1.62	-1.88	-1.29	-1.96	-1.71	-0.57	0.31	-0.12
2022	-0.33	-0.32	-0.34	0.25	-0.23	0.18	0.73	0.7	1.16	1.61	1.38	0.89
2023	1.19	1.11	1.02	0.27	0.32	0.6	-0.54	-0.27	-0.06	-0.85	1.01	1.28
2024	0.54	0.78	0.77	0.95	-0.14	-0.49	0.16	-0.23	0.34	0.61	0.07	0.72
2025	-0.25	-0.14	-0.3	-0.56	-0.38	-1.04	0.07	-0.41	-0.26	0.93	1.7	1.57
2026	0.97	0.62	0.32	-0.22	-1.08	-1.21	-1.64	-0.98	-0.36	-0.06	-0.17	-0.09
2027	0.53	0.44	0.06	0.18	0.35	0.37	-0.78	-0.81	-0.49	-0.93	-1.74	-2.05
2028	-1.2	-1.19	-1.22	-1.15	-0.89	-0.36	-0.69	-1.06	-0.58	-1.49	-1.67	-1.42
2029	-0.95	-1.08	-1.48	-1.18	-0.87	-0.7	-0.59	-0.11	1	1.97	1.3	1.35
2030	1	0.55	0.33	-0.34	-0.24	-0.44	-1.12	-0.69	-0.57	-0.25	-0.54	-0.76
2031	-0.68	-1.08	-1.05	-1.49	-1.18	-0.88	-0.96	-0.01	0.68	1.35	0.91	1.01
2032	0.71	-0.13	0.22	0.04	-0.19	-0.39	-0.28	0.87	0.43	-0.37	0.03	0.17
2033	-0.59	-0.9	-0.54	-0.15	-0.28	-0.38	0.25	0.68	0.23	0.56	0.14	0.28
2034	-0.45	-0.15	-0.42	-0.94	-0.77	-0.85	0.42	-0.15	0.7	1.68	0.69	0.1
2035	-0.82	-0.3	-0.72	-0.79	-0.53	-0.04	0.76	-0.15	0.31	-0.44	-0.66	-1.26
2036	-1.06	-1.23	-1.03	-0.31	-0.29	0.73	1.19	1.68	2.19	0.12	0.29	0.94
2037	0.9	0.39	0.52	0.65	0.7	-0.26	-0.91	-0.08	-1.03	-0.88	-0.16	-0.3
2038	-0.91	-1.27	-1.05	-0.93	-1.5	-1.5	-0.81	-0.46	-0.15	-0.35	-0.41	-0.53
2039	-0.89	-0.51	0.02	0.31	0.48	0.62	1.44	1.08	0.02	-1.25	-1.55	-0.88
2040	0.63	1.07	1.22	1.25	1.86	1.69	0.34	-0.57	-1.82	-0.68	-0.54	-0.57
2041	-1.31	-0.47	0.81	0.58	0.91	1.24	2.55	1.74	0.62	0.56	-0.13	-0.75
2042	-0.28	-0.58	-1.36	-1.01	-1.01	-0.67	-1.36	-1.14	0.6	0.13	1.91	1.64
2043	1.89	2.24	1.99	2.17	1.31	1.35	0.34	0.42	-0.19	-0.23	-0.38	0.11
2044	-0.93	-0.92	-0.22	-0.23	-0.12	-0.42	0.89	0.5	-0.87	-0.36	-1.04	-0.68
2045	-0.51	-0.21	-0.25	-0.42	-0.03	-0.13	0.09	-0.42	1.32	1.08	0.7	1.04
2046	1.08	0.8	0.39	0.23	0.5	0.15	-0.59	0.99	0.94	1.02	0.42	0
2047	0.65	0.97	0.57	0.59	0.86	1.11	0.11	-1.99	-1.98	-0.67	0.17	0.26
2048	1.87	1.84	1.66	2.01	2.01	1.9	-0.5	0.01	1.22	0.29	0.81	0.84
2049	0.17	-0.19	0.64	0.73	0.36	0.25	0.87	1.74	0.46	0.04	-0.38	-0.29
2050	0.52	1.11	1.23	1.29	1.78	1.74	1.2	0.06	-1.02	-0.74	-0.78	-1.5

**Tabla 15.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo GFDL - CM3 en el escenario RCP 4.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2020	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.82	-0.87	-0.94	-0.84	0.6	0	0.35
2021	0.17	0.07	0.25	-0.24	-0.03	-0.23	-0.23	-0.17	-0.84	0.09	-0.13	0.35
2022	-0.05	-0.33	0.13	0.13	0.39	0.12	0.54	1.16	-0.01	0	-0.99	-1.53
2023	-1.12	-1.36	-1.44	-1.14	-0.72	-0.48	-0.36	0.27	1.48	0.36	-0.58	0.08
2024	1.3	1.72	1.47	1.64	1.87	1.79	1.03	0.02	0.32	0.16	0.03	-0.46
2025	0.07	0.24	0.03	-0.03	0.07	0.3	0.02	-0.58	-0.51	0.12	1.05	0.37
2026	1.05	1.45	1.92	1.99	1.68	2.18	2.17	1.98	0.55	0.12	-0.45	-1
2027	-0.99	-0.18	-0.36	-0.18	0.2	0.47	1.08	0.25	0.54	-0.09	-0.9	-0.53
2028	-1.27	-0.86	-0.62	-0.38	-0.03	-0.2	0.82	0.73	0.93	0.36	-0.12	-0.75
2029	-0.95	-1.02	-0.93	-0.77	-0.84	-0.63	-0.27	0.04	0.09	-1.51	0.35	1.21
2030	0.14	0.12	0.76	0.87	0.49	0.18	1.12	1.64	0.15	-0.13	-0.69	-2.16
2031	-1.97	-1.97	-2.15	-2	-1.65	-1.32	-1.02	-1.03	-0.19	0.18	0.6	-0.05
2032	-0.27	-0.23	-0.33	-0.5	-0.68	-0.38	-0.18	-0.32	0.02	-0.27	-1.33	-0.49
2033	0.57	0.62	0.88	0.92	1.18	1.03	0.6	0.53	-0.45	-0.44	0.45	-0.27
2034	-1.23	-1.02	-1.2	-0.83	-0.86	-0.54	0.39	0.55	1.44	1.95	0.95	1.6
2035	0.7	0.81	0.56	0.18	0.13	-0.37	0.05	-0.18	0.7	0.08	-0.6	-1.19
2036	-0.01	-0.16	-0.47	-0.3	0.02	0.32	-0.4	-0.4	0.41	0.12	0.64	-0.07
2037	-0.8	-1.1	-1.18	-1.44	-2.02	-1.83	-1.47	-1.45	-1.58	-1.57	-1.7	-0.55
2038	-0.38	0.24	0.63	0.97	1.33	1.15	1.72	1.39	0.74	-0.09	0.65	0.12
2039	0.04	-0.16	-0.35	-0.4	-0.86	-0.65	-0.95	-0.83	-0.02	-0.27	-0.11	-0.38
2040	1.05	1.05	1.06	1.22	1.38	1.63	0.81	0.86	0.78	0.5	0.57	0.85
2041	0.48	0.37	0.02	0.08	-0.09	-0.35	-0.39	-0.66	-0.17	0.06	-0.23	-0.35
2042	0.32	0.29	0.18	0.11	0.1	0.26	-0.33	-0.55	0.13	1.58	1.56	1.32
2043	1.5	1.25	0.74	0.18	-0.08	-0.02	-1.34	-1.81	-1.57	-1.65	0.15	0.62
2044	0.16	-0.03	0.18	0.28	-0.12	-0.46	-0.26	-0.03	-1.15	1.23	1	1.07
2045	1.11	0.67	0.44	-0.22	-0.31	-0.49	-1.7	-1.12	-0.36	-0.47	-0.44	-1.1
2046	-1.62	-2.15	-2.16	-2.29	-2.38	-2.31	-1.94	-1.44	-1.87	-1.9	0.82	0.38
2047	1.53	1.78	1.53	1.86	1.46	1.8	1.08	0.41	0.84	-0.02	-1.15	-0.05
2048	-0.11	-0.2	-0.22	-0.13	0.33	-0.12	-0.12	1.6	2.49	2.74	2.72	2.43
2049	1.49	0.78	0.86	0.5	-0.23	0.09	0.28	0.04	-1.75	-1.24	-1.67	-0.51
2050	-0.67	-0.54	-0.14	-0.07	0.25	-0.1	0.34	0.4	-0.16	-0.63	-0.09	0.87

**Tabla 16.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo GFDL – CM3 en el escenario RCP 8.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2020	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.49	-0.01	-0.56	-0.05	0.14	0.03	-0.54
2021	-1.02	-0.59	-0.84	-0.80	-1.25	-0.68	0.15	-0.14	1.34	1.42	0.76	0.91
2022	0.28	-0.09	-0.12	0.19	0.37	-0.16	0.33	1.05	1.19	0.76	-0.28	-0.96
2023	0.09	-0.36	0.31	0.03	0.85	1.35	1.13	2.16	1.24	1.13	0.31	0.23
2024	0.26	-0.04	-0.49	-0.45	-0.73	-0.93	-1.61	-1.18	-0.23	0.27	-0.57	-0.91
2025	-1.21	-1.06	-0.81	-1.03	-0.67	-0.57	-0.04	0.04	-0.46	-0.49	-1.35	-1.29
2026	0.06	-0.28	-0.36	-0.21	-0.06	-0.01	-1.54	-0.97	-0.81	-0.51	-1.19	-1.04
2027	-1.37	-1.48	-1.17	-1.23	-0.95	-1.19	-0.65	-0.09	-0.33	-1.18	0.05	0.64
2028	0.28	0.26	0.83	0.74	0.54	0.19	0.54	0.62	-2.22	-1.15	0.00	-0.20
2029	0.56	0.80	0.82	0.84	0.80	1.05	0.60	-0.01	-0.55	0.78	-0.19	-0.67
2030	-0.69	-0.83	-1.09	-1.45	-1.00	-0.89	-0.95	-0.60	0.52	0.45	0.44	1.13
2031	0.65	0.43	0.92	0.94	0.89	0.50	1.03	1.56	0.32	-0.08	0.56	1.12
2032	1.83	2.15	1.96	2.02	2.04	2.09	1.51	0.42	0.05	-0.21	-1.12	-0.88
2033	0.72	0.33	0.00	0.04	0.62	0.64	-1.25	-0.65	0.99	0.52	-0.78	-0.40
2034	-0.42	-0.67	-0.72	-0.71	-0.35	-0.60	-0.63	0.00	-0.20	-0.17	-1.17	-1.75
2035	-1.68	-1.30	-1.25	-1.21	-0.96	-0.72	-0.18	0.12	0.80	0.38	1.33	1.07
2036	0.05	0.57	0.29	0.26	-0.36	-0.38	0.63	-1.19	-0.96	-0.91	-0.11	-0.79
2037	0.13	-0.30	-0.29	-0.23	-0.52	-0.20	-1.47	-0.64	-0.72	-1.79	-1.02	-0.01
2038	0.11	0.66	0.93	0.96	1.41	1.21	1.71	0.88	0.07	0.96	0.16	0.78
2039	0.96	0.81	0.36	0.04	0.12	-0.42	-1.61	-2.11	-1.22	-1.64	0.74	0.89
2040	1.52	1.27	1.19	1.26	0.89	0.90	-0.25	-0.09	-0.12	0.92	1.00	0.41
2041	-0.70	-0.63	-0.82	-1.00	-1.29	-1.14	-0.01	0.10	0.75	0.88	1.66	1.45
2042	1.07	0.95	1.53	1.46	0.86	1.13	1.66	1.98	0.16	-1.06	-0.79	-1.23
2043	-2.04	-2.01	-1.69	-1.54	-1.62	-1.68	-0.67	0.14	0.33	1.71	2.35	1.77
2044	0.87	0.84	0.78	0.20	-0.89	-0.48	0.07	-0.44	-0.64	-0.88	-0.59	-0.58
2045	-0.88	-0.43	-0.48	-0.52	-0.53	-0.65	-0.17	-1.06	-1.69	0.22	0.43	1.17
2046	0.87	0.64	0.24	0.43	0.40	-0.19	-0.39	0.06	1.20	-1.00	-1.22	-0.78
2047	-1.34	-1.28	-1.25	-1.01	-0.61	-0.96	-0.17	0.14	0.79	0.39	0.57	0.28
2048	-0.57	-0.64	-0.73	-0.12	-0.33	-0.25	0.85	1.25	1.92	-0.19	-1.10	-0.82
2049	0.91	1.14	1.02	1.40	1.75	2.02	1.15	0.60	0.58	-0.90	0.36	0.63
2050	0.86	1.30	1.14	0.95	0.80	0.73	0.43	-1.23	-1.95	1.66	1.19	0.64

**Tabla 17.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2020	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	-1.16	-0.47	0.26	0.96	1.01	0.82	-0.17
2021	-0.98	-1.69	-1.31	-1.40	-1.28	-1.18	0.32	0.84	0.78	0.34	-0.01	-0.06
2022	-0.12	-0.53	-1.28	-1.35	-1.56	-1.48	-2.58	-2.05	-1.45	-1.50	-1.98	-1.17
2023	-0.47	-0.44	-0.48	-0.44	-0.08	-0.30	-0.90	-0.72	-0.75	-0.80	-1.46	-1.21
2024	-1.24	-0.64	-0.31	-0.17	-0.01	-0.25	0.28	0.10	-0.16	0.13	-0.02	0.19
2025	0.33	0.14	0.64	0.50	0.65	0.53	0.25	0.24	-0.50	0.34	0.45	0.55
2026	0.05	0.42	0.54	-0.30	-0.37	-0.43	-0.01	-0.58	-0.90	-1.13	-1.75	-1.90
2027	-2.36	-1.27	-1.72	-1.17	-0.88	-0.17	1.28	1.31	1.75	1.47	1.50	0.92
2028	0.87	0.22	-0.58	-0.50	-0.70	-0.34	-1.42	-1.11	-0.32	-0.97	-1.50	-1.44
2029	-0.88	-0.36	-0.81	-0.73	-0.55	-0.45	-0.63	-0.71	-0.30	-0.57	-0.17	-0.24
2030	-0.33	-0.59	-0.40	-0.07	-0.48	-0.37	-0.37	-0.36	-0.82	-1.12	-1.15	-0.58
2031	0.24	0.88	0.75	0.81	0.94	0.57	-0.11	-1.13	-0.45	0.71	0.41	0.48
2032	-0.10	-0.20	-0.74	-1.64	-1.37	-0.91	-0.40	1.04	1.32	1.04	0.81	0.61
2033	0.03	-1.22	-0.36	-0.02	0.11	0.33	1.21	1.00	0.49	0.48	0.20	-0.96
2034	-0.16	0.48	1.16	0.97	1.29	1.73	1.18	0.36	-0.92	0.35	0.63	1.44
2035	2.60	2.62	2.34	1.92	1.86	1.69	-0.31	0.06	0.36	0.17	0.06	-0.40
2036	-0.78	-0.61	-0.29	-0.10	0.03	-0.07	0.48	-0.20	-0.72	-0.42	-0.05	-0.12
2037	1.09	1.40	1.23	1.46	1.37	1.40	0.11	-0.54	-0.24	-1.17	-0.44	-0.22
2038	0.60	0.81	1.33	1.62	1.84	1.76	1.33	1.52	1.09	0.76	0.06	0.57
2039	-0.26	-1.06	-1.22	-1.26	-1.34	-1.87	-1.33	-1.14	-0.86	-1.14	0.39	0.90
2040	1.05	1.01	0.95	1.21	0.42	0.17	-0.08	0.25	0.39	0.45	0.48	0.48
2041	0.00	-0.45	-0.83	-1.11	-1.43	-1.84	-1.80	-1.02	-0.82	-0.86	-1.34	-1.87
2042	-1.35	-0.48	-0.30	-0.20	0.07	0.61	0.67	-0.19	-0.95	-0.28	-0.09	0.38
2043	0.46	0.73	0.99	0.62	0.71	1.11	1.48	1.58	1.81	1.91	2.11	1.76
2044	1.08	0.58	0.25	0.43	0.12	-0.28	-0.34	-0.13	-0.33	0.06	0.37	0.64
2045	-0.38	-0.43	0.44	0.16	-0.13	0.00	1.06	0.63	-0.08	-0.22	-0.49	-0.74
2046	0.10	1.04	0.54	0.83	1.15	1.08	0.53	-0.89	-0.30	-0.95	-0.03	0.90
2047	0.79	0.91	0.55	0.60	-0.01	-0.11	-0.26	0.52	0.85	0.94	1.14	1.45
2048	1.31	0.85	0.72	0.77	0.79	-0.01	-0.30	-0.44	-0.40	-0.49	-0.84	-1.36
2049	-1.51	-1.46	-0.93	-0.55	-0.48	0.62	1.74	2.25	2.10	1.93	1.66	0.78
2050	0.40	-0.51	-0.68	-0.70	-0.52	-0.27	-0.55	-0.37	0.12	0.06	0.32	0.51

**Tabla 18.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2020 - 2050) con el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2020	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	1.23	0.56	-0.58	-1.00	0.09	0.13	0.65
2021	0.73	1.23	0.86	0.18	0.27	-0.38	-0.49	-1.38	-0.59	-0.69	-0.51	-0.18
2022	0.01	-0.91	-0.39	-0.29	-0.23	0.07	0.07	0.96	0.41	-0.20	0.53	-0.10
2023	-0.08	0.76	0.77	1.43	0.96	1.55	1.87	1.28	1.90	0.97	1.47	1.28
2024	0.82	0.29	0.42	0.62	-0.11	-0.61	-0.84	0.00	-0.36	1.02	0.36	0.03
2025	0.51	0.22	0.06	-0.28	0.33	0.47	0.03	0.53	0.44	0.24	1.09	1.42
2026	1.14	0.70	0.26	0.01	-1.06	-1.64	-1.48	-1.51	-0.92	-1.32	-0.35	-0.76
2027	0.59	0.16	-0.34	0.07	-0.41	-0.18	-1.62	-1.00	0.07	-0.69	0.15	0.63
2028	-0.27	-0.82	-1.25	-0.61	-1.17	-1.71	-0.64	-0.30	-0.07	-0.28	-0.35	-0.38
2029	-1.55	-2.03	-0.96	-1.61	-2.03	-0.78	0.39	1.19	1.01	1.76	1.22	0.18
2030	0.22	0.46	-0.22	-0.61	-0.35	-0.16	-0.15	-0.38	-0.02	-0.89	-1.34	-0.19
2031	-1.39	-0.39	0.65	1.10	1.64	0.73	1.73	1.17	0.04	-0.45	0.82	0.67
2032	0.68	0.19	0.49	0.46	-0.50	-0.40	-0.42	0.08	-1.42	0.81	0.33	0.27
2033	0.07	0.77	0.16	-0.89	-0.79	-0.83	-0.20	0.06	1.19	1.64	0.70	0.67
2034	0.15	-0.98	-0.81	-0.91	-0.13	0.68	0.87	1.50	1.87	1.24	1.82	1.53
2035	1.98	2.20	1.66	1.64	0.84	0.89	0.09	0.16	1.08	0.73	-0.05	-0.63
2036	0.53	0.37	0.03	0.35	0.87	0.46	-0.59	-0.91	-0.98	-1.64	-1.92	-2.57
2037	-3.17	-1.67	-0.62	-0.29	0.22	0.73	1.49	0.83	-0.28	-0.35	-0.98	-0.87
2038	0.07	-0.55	-0.92	-1.14	-0.77	-1.06	-2.01	-1.74	-0.98	0.04	0.13	-0.53
2039	-0.23	0.09	-0.71	-1.02	-1.06	-0.11	-0.34	-1.15	0.39	0.46	0.01	0.09
2040	0.49	0.26	0.31	0.09	0.46	-0.10	-0.54	-0.44	-1.34	-1.51	-1.48	-0.93
2041	-0.56	-0.91	-1.41	-1.08	-0.96	-1.32	-1.58	-1.49	-0.44	0.77	0.02	-0.18
2042	-0.55	-0.49	-0.60	-0.99	-0.87	-0.87	-0.17	0.21	0.61	-0.48	-0.38	0.63
2043	-0.38	-0.89	-1.46	-0.85	-0.85	-1.99	-0.25	0.35	1.12	1.60	1.93	1.69
2044	1.12	1.53	2.48	1.63	1.16	1.44	1.23	0.64	-1.84	-1.14	-1.43	-0.86
2045	0.38	1.00	0.54	0.69	1.22	0.65	-0.15	-0.54	0.49	0.16	0.75	0.96
2046	0.67	0.62	0.57	1.07	0.79	0.67	0.68	0.40	-0.13	-0.07	-0.12	0.05
2047	0.30	-0.14	0.68	0.59	0.71	0.52	0.83	1.62	0.63	-0.23	-0.94	-1.92
2048	-2.21	-1.56	-1.81	-1.32	-0.91	-0.24	-0.16	-0.60	-0.24	-0.89	-0.23	0.62
2049	0.86	0.52	1.11	1.26	1.43	1.16	0.86	1.26	0.60	0.30	-0.56	-1.71
2050	-1.15	0.06	0.54	0.84	1.43	1.22	1.10	0.05	-0.95	-0.63	-0.60	0.45

**Tabla 19.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo CMCC-CM en el escenario RCP 4.5.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	-0.22	-0.18	-0.97	-1.01	-0.31	0.12	-0.12
2071	-0.64	-1.03	-0.73	-0.32	-0.52	-0.37	0.35	1.07	1.36	-1.33	-0.58	-0.32
2072	-0.78	-1.14	-0.92	-0.66	-0.71	-1.03	-0.44	0.23	0.45	-0.13	0.05	0.37
2073	0.04	-0.13	-0.01	-0.09	-0.22	-0.56	-0.37	0.05	-1.14	-0.49	-1.33	-1.32
2074	-1.47	-1.67	-1.05	-1.60	-1.39	-1.33	-0.37	0.29	-0.26	0.32	0.23	0.06
2075	0.63	1.07	0.98	1.50	1.67	2.07	1.80	1.12	1.53	0.40	0.47	0.91
2076	0.65	0.27	0.04	-0.17	-0.23	-1.07	-1.54	-0.93	-0.27	0.35	-0.44	-0.70
2077	-0.86	-0.72	0.28	0.12	0.39	0.67	1.44	1.53	-0.56	0.41	0.57	-0.01
2078	-0.23	-0.14	0.11	-0.20	-0.27	0.02	0.47	0.55	0.42	0.30	-0.31	0.39
2079	1.13	0.65	0.05	0.15	0.39	-0.01	-1.82	-1.19	-0.35	0.51	-0.64	-1.33
2080	-0.71	-0.70	-0.74	-0.79	-0.49	-0.11	-0.21	-0.02	0.79	-0.66	-1.32	-1.14
2081	-1.07	-0.23	-0.59	-0.51	-0.32	-0.26	0.18	-0.77	0.01	-0.11	-0.01	0.15
2082	0.38	0.40	0.23	0.26	0.21	0.10	-0.20	-0.28	0.03	1.02	0.62	0.56
2083	0.84	0.32	0.06	-0.24	-0.20	-0.29	-1.21	-0.50	-0.79	0.45	2.44	2.29
2084	2.58	2.53	3.14	3.27	2.73	2.78	2.27	2.01	-0.70	-0.99	-0.98	0.27
2085	-0.32	-0.75	-0.42	-0.34	-0.17	-0.19	0.86	1.57	1.85	2.30	1.07	-0.07
2086	0.84	0.67	1.11	0.99	1.35	1.50	0.60	0.81	0.15	1.60	0.50	0.83
2087	0.92	1.50	0.95	0.65	0.95	1.26	1.27	0.15	1.07	1.09	-0.08	-0.37
2088	-0.62	-0.18	-0.31	-0.07	0.20	-0.19	0.32	-0.18	0.33	-1.26	-1.17	-1.38
2089	-1.07	-1.40	-1.65	-0.65	-0.59	-0.36	-0.13	0.63	2.09	-1.09	-0.67	-0.90
2090	-1.08	-1.01	-0.76	-0.97	-1.03	-0.92	-0.42	-0.14	-1.79	-1.35	-1.30	-0.73
2091	-0.93	-0.34	-0.40	-0.59	-0.51	-0.75	-0.34	-1.46	-2.93	-1.49	-1.11	-0.13
2092	0.70	0.25	0.67	0.82	1.07	0.80	0.02	0.88	0.09	0.31	-0.04	0.78
2093	0.97	0.67	0.66	0.57	0.74	0.30	-0.28	0.39	0.19	1.08	1.19	0.57
2094	1.03	0.75	0.30	-0.01	-0.32	0.09	-0.98	-1.16	-0.40	-1.03	0.19	0.61
2095	0.61	0.84	1.26	1.41	1.33	1.13	1.31	1.00	-0.19	-0.33	0.30	-0.52
2096	-0.47	0.25	-0.28	-0.24	-0.46	0.00	0.27	-1.05	0.34	0.50	-0.27	-0.77
2097	-0.57	-0.67	-1.10	-1.28	-1.30	-1.24	-1.43	-1.25	-0.65	-0.31	0.21	-0.41
2098	-0.72	-0.74	-0.92	-1.09	-1.57	-1.34	-1.13	-0.82	0.19	1.13	2.20	1.86
2099	1.33	1.57	1.25	1.08	0.33	0.28	0.38	-0.63	-0.29	-0.66	-0.69	-1.12
2100	-0.87	-0.65	-1.11	-0.97	-0.94	-0.66	-0.32	-0.48	0.26	0.05	1.10	1.94

**Tabla 20.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo CMCC-CM en el escenario RCP 8.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	1.07	0.55	0.71	-0.06	0.29	-0.38	-0.09
2071	1.05	0.59	0.10	-0.13	0.01	-0.03	-1.31	-1.06	-0.83	-0.55	-1.29	-0.36
2072	-0.93	-0.98	-1.15	-1.02	-0.86	-1.21	-1.02	-1.09	-0.85	-0.92	-0.71	-0.13
2073	-0.35	-0.64	-0.83	-1.07	-1.09	-1.40	-1.65	-1.46	-1.38	-0.56	-0.62	-1.32
2074	-0.88	-0.98	-0.43	-0.77	-0.72	-0.32	-0.22	0.08	-1.05	0.88	0.01	-0.57
2075	-1.06	-0.97	-1.38	-1.48	-1.32	-1.12	-0.98	-1.31	0.44	0.64	0.78	-0.01
2076	-0.46	-0.16	-0.41	-0.83	-0.90	-0.67	-0.41	-0.93	-1.52	-1.60	-0.49	-0.09
2077	-0.95	-0.79	-0.19	-0.11	-0.27	-0.41	0.33	0.50	-1.65	-1.81	-1.83	-0.70
2078	-1.15	-1.27	-0.68	-0.59	-0.40	-0.61	-0.13	0.27	-0.26	0.90	0.23	-0.45
2079	0.23	0.59	0.88	0.93	1.02	1.30	1.39	1.41	1.33	-0.42	-0.28	0.01
2080	0.60	0.67	0.43	0.38	0.41	0.35	-0.21	-0.71	0.62	1.66	0.52	-0.44
2081	0.54	0.09	-0.32	-0.33	-0.05	0.33	-0.41	-0.14	-0.24	-1.93	-0.35	-0.96
2082	0.58	0.11	-0.09	0.05	-0.20	0.15	-1.10	-0.83	-0.29	1.17	0.37	1.19
2083	1.57	1.32	1.03	0.85	1.07	0.61	-0.05	-0.06	0.45	0.16	-0.11	-0.70
2084	-0.46	-0.35	-0.77	-0.80	-0.80	-0.50	-0.68	-1.11	-0.07	0.08	0.31	1.08
2085	1.24	1.53	1.83	1.78	1.82	1.76	1.87	1.72	1.25	0.72	1.04	-0.76
2086	-0.99	-1.02	-1.08	-0.94	-1.31	-1.00	-0.67	-0.68	-0.62	0.20	0.76	1.72
2087	1.60	1.78	1.64	1.63	1.61	1.17	1.04	0.61	0.68	0.53	0.73	-0.51
2088	-0.31	0.09	-0.25	-0.34	-0.53	-0.17	-0.22	-1.23	0.19	0.14	-1.07	-0.57
2089	-0.98	-0.93	-1.09	-1.12	-0.80	-0.74	-0.42	-0.14	-0.17	0.31	-0.12	-0.64
2090	-0.96	-0.73	-0.35	-0.42	-0.31	-0.20	0.29	0.56	0.06	0.78	1.73	1.31
2091	0.37	0.23	0.31	0.54	0.25	0.13	0.74	0.81	1.08	-1.48	-0.69	0.34
2092	-0.52	-0.84	-0.75	-0.65	-0.72	-1.28	-0.85	-0.25	-0.30	1.35	1.93	2.12
2093	1.38	1.16	0.94	0.81	0.82	0.36	0.59	0.53	1.61	0.50	-1.22	-1.08
2094	-0.43	0.45	0.75	0.87	1.15	1.32	1.57	1.12	-0.49	-1.28	-1.24	-0.69
2095	0.19	0.22	0.87	1.40	1.42	1.46	1.71	2.25	1.91	0.55	-0.15	0.07
2096	0.77	1.29	1.80	1.58	1.68	1.85	1.65	1.11	-0.85	0.31	-0.63	-1.06
2097	-1.77	-1.96	-1.71	-1.25	-0.87	-0.84	-0.11	0.32	1.51	-0.20	1.34	1.37
2098	0.28	-0.09	-0.15	-0.09	-0.69	-1.20	-0.72	-0.22	-0.82	-0.86	0.51	0.60
2099	1.08	0.57	0.35	0.53	0.27	0.13	-0.65	-0.16	0.71	-0.32	1.40	1.82
2100	0.93	1.25	0.93	0.81	0.55	0.03	0.42	-0.28	-0.13	0.88	-0.32	-0.35



**Tabla 21.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo GFDL – CM3 en el escenario RCP 4.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	-0.52	-1.46	-1.23	-0.45	-0.80	1.28	1.18
2071	1.72	1.43	1.00	1.07	0.56	0.80	-0.23	-0.10	1.47	1.17	-0.48	-0.80
2072	-0.55	-0.29	-0.72	-0.78	-0.47	-0.47	-0.42	-1.20	-1.38	0.41	0.76	0.65
2073	-0.15	0.76	0.29	0.11	-0.16	-0.09	0.58	-1.17	-0.09	-0.24	1.00	0.45
2074	-0.68	-1.15	-1.53	-1.47	-2.67	-2.54	-1.68	-1.06	-0.29	-0.70	0.88	1.26
2075	1.54	1.68	1.67	1.58	1.30	1.25	0.72	0.15	-1.77	-0.79	-0.85	-0.11
2076	-0.09	0.46	0.49	0.42	0.75	0.54	0.85	0.28	0.00	1.54	-0.20	-0.90
2077	-1.74	-1.70	-1.87	-2.22	-1.73	-1.58	-0.70	-0.68	0.08	0.11	-1.39	-0.36
2078	-1.24	-1.04	-0.75	-0.68	-0.26	-0.75	0.22	0.26	-0.13	-0.34	1.11	1.30
2079	0.14	0.84	0.83	0.87	0.28	0.23	1.06	0.19	-0.46	-1.05	-0.27	-1.08
2080	-1.08	-0.79	0.06	0.38	0.61	0.99	1.58	1.95	1.91	0.65	-1.32	-2.19
2081	0.44	0.21	-0.08	-0.03	0.37	0.75	-0.67	-0.66	-0.30	-1.38	-1.87	-0.97
2082	-1.48	-1.71	-2.05	-1.93	-1.58	-2.24	-1.49	-1.39	-0.66	-0.56	0.73	0.23
2083	-0.69	-1.11	-1.30	-1.24	-1.97	-1.83	-1.21	-0.78	-0.29	-0.25	-1.10	-1.15
2084	-0.37	-0.63	-0.42	-0.17	0.05	0.08	0.14	0.65	0.86	0.44	0.75	0.42
2085	-0.71	0.23	0.23	0.22	0.01	0.26	1.08	0.18	-0.03	-0.99	-1.54	-1.43
2086	0.39	0.60	0.45	0.48	0.85	0.93	0.09	-0.32	-0.36	0.84	0.14	-0.42
2087	-0.35	-0.81	-1.04	-1.20	-0.83	-0.61	-0.61	-0.11	0.90	0.48	-1.78	0.08
2088	1.00	1.43	1.77	1.72	2.25	1.91	1.44	1.05	-1.18	0.33	0.52	0.46
2089	0.52	0.76	0.71	0.69	0.65	0.77	0.78	0.46	0.79	-0.47	0.99	0.55
2090	0.90	0.35	0.09	0.33	-0.32	-0.06	-0.82	-0.21	0.81	-0.45	-0.77	-0.28
2091	1.03	0.74	0.12	0.20	0.56	0.42	-0.99	-1.17	0.21	2.00	1.60	1.46
2092	0.02	0.68	1.08	0.63	0.23	0.43	1.48	1.14	-0.58	0.44	-0.44	-0.43
2093	0.77	0.21	-0.08	-0.35	-0.08	-0.05	-1.48	-1.28	-1.82	2.38	0.46	0.70
2094	-0.50	-0.52	-0.10	-0.77	-0.33	-0.54	0.47	0.82	0.64	-0.05	1.28	1.54
2095	0.87	0.31	0.13	0.55	-0.03	-0.20	-0.03	0.70	1.60	0.62	-0.20	-0.53
2096	-0.99	-1.04	-1.02	-1.12	-1.10	-1.07	-0.46	-0.38	-0.42	-0.18	0.52	1.52
2097	1.89	1.43	1.74	1.58	1.51	1.15	0.33	0.93	-1.26	-1.31	-0.15	-0.74
2098	0.05	0.02	0.47	0.59	0.60	0.90	0.69	0.95	-0.03	-1.09	-0.13	-0.80
2099	-0.98	-1.34	-0.07	0.31	0.36	0.69	1.31	2.22	1.41	-0.17	-0.52	-0.15
2100	0.56	0.16	-0.01	0.27	0.41	0.30	-0.23	0.28	1.15	0.03	1.14	0.78

**Tabla 22.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo GFDL - CM3 en el escenario RCP 8.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	-1.64	-1.12	-1.75	-0.90	0.22	-0.66	-0.64
2071	0.40	-0.04	-0.37	-0.56	-0.37	-0.25	-1.62	-1.21	-1.21	-0.43	1.62	1.64
2072	0.63	0.94	1.34	1.53	1.25	1.17	1.98	1.78	1.72	1.54	0.59	0.70
2073	0.69	0.75	0.62	0.42	0.37	0.32	0.19	-0.29	-0.57	0.21	1.03	0.11
2074	-1.14	-0.74	-0.60	-0.59	-0.98	-0.59	0.24	0.31	-0.01	-0.08	0.00	1.11
2075	0.59	0.23	-0.20	-0.31	-0.33	-0.98	-1.55	-1.63	-1.32	-0.67	-0.39	0.11
2076	0.84	0.80	0.68	0.73	0.87	0.84	0.34	0.09	0.38	-0.83	-0.96	-1.36
2077	-1.44	-1.36	-1.68	-1.81	-1.68	-1.43	-1.50	-1.28	-1.19	0.83	-0.30	0.18
2078	0.92	1.09	1.42	1.36	1.64	1.62	1.53	1.23	0.46	-0.05	0.67	0.36
2079	1.02	1.07	0.70	0.76	0.64	0.80	0.20	-0.54	0.81	1.89	0.56	0.41
2080	0.81	0.28	-0.14	-0.41	-0.34	-0.36	-1.64	-1.23	-0.87	0.19	-0.82	-1.02
2081	-1.59	-1.47	-0.98	-0.97	-0.83	-0.60	0.03	0.64	-0.13	-0.72	-0.69	-1.21
2082	1.10	0.61	0.38	0.39	0.58	0.88	-0.76	-0.39	0.05	-0.64	1.65	1.48
2083	0.08	-0.07	-0.15	-0.22	-0.87	-1.05	-0.38	-0.16	-0.27	0.11	-0.85	-0.53
2084	-0.80	-0.83	-0.88	-0.51	-0.34	-0.30	0.03	0.55	1.42	-0.58	2.03	2.45
2085	0.93	1.46	1.13	1.01	0.37	-0.11	0.72	-1.24	-1.03	-0.61	-0.71	-1.20
2086	-1.95	-1.72	-1.60	-1.48	-1.41	-1.12	-0.44	0.08	0.11	-0.16	0.53	0.66
2087	0.14	-0.09	-0.28	-0.10	-0.21	-0.31	-0.21	0.18	1.04	0.04	-0.91	0.53
2088	-0.29	-0.04	-0.30	-0.44	-0.25	-0.75	-0.38	-0.94	-1.13	-0.68	-0.64	-0.91
2089	-0.95	-0.62	-0.88	-0.98	-0.88	-0.67	-0.61	-0.99	-1.09	-0.88	0.35	0.24
2090	-0.08	-0.22	-0.34	-0.17	-0.09	-0.03	0.15	0.56	1.59	1.68	-0.92	-0.55
2091	-1.01	-1.00	-1.08	-1.16	-1.01	-1.06	-0.87	-0.55	-1.01	-0.87	0.32	0.52
2092	1.69	1.82	1.76	1.82	1.90	1.90	1.34	0.53	0.90	-0.08	0.37	-0.55
2093	-0.72	-0.80	-1.09	-0.99	-1.23	-0.43	-0.29	0.22	1.55	2.88	1.52	0.61
2094	0.68	0.53	0.96	0.99	0.97	1.03	1.11	1.43	0.86	0.23	-0.37	-0.79
2095	-0.89	-1.06	-0.54	-0.57	-0.44	-0.19	0.13	0.88	0.07	0.49	-1.05	-1.31
2096	-1.39	-1.27	-0.87	-0.74	-0.54	-0.27	0.19	0.74	0.41	-0.60	-0.93	-0.40
2097	0.32	0.69	1.15	1.20	1.44	1.50	1.62	1.38	0.38	-1.01	-1.08	-1.27
2098	-0.60	-0.77	-0.08	0.09	0.31	0.57	0.77	1.53	0.86	-0.39	0.17	0.29
2099	0.84	1.19	1.31	1.22	1.28	1.31	1.16	0.36	-0.86	-1.06	1.10	0.86
2100	1.31	0.93	0.91	0.80	0.51	0.57	-0.06	0.09	-0.35	0.46	-0.34	-0.13

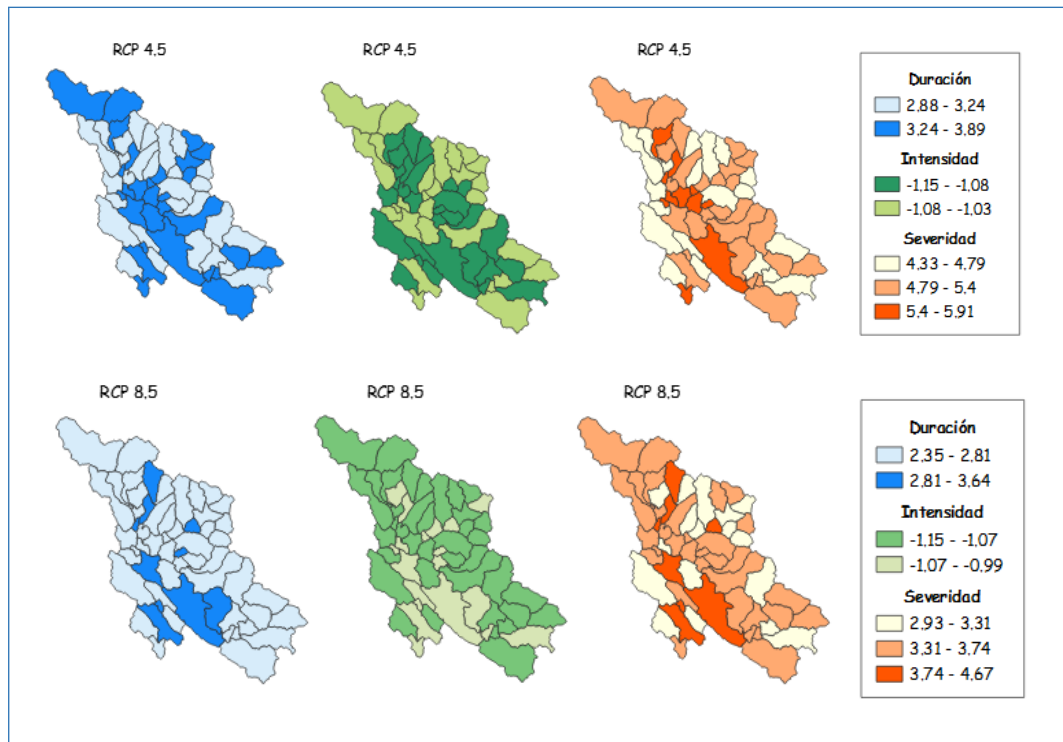
**Tabla 23.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	1.18	1.91	1.75	0.90	-0.54	-0.54	-1.49
2071	-1.69	-1.21	-0.54	-0.17	-0.16	0.99	1.66	2.09	1.69	1.89	1.09	-0.20
2072	-0.48	-0.99	-1.52	-1.58	-1.49	-2.03	-2.00	-1.37	-0.97	-2.16	-1.34	0.05
2073	0.73	0.62	0.70	0.78	0.76	0.52	0.19	0.24	0.11	0.44	1.70	2.03
2074	0.80	1.39	1.19	1.22	0.72	-0.02	0.80	-0.47	0.29	-0.27	0.46	1.09
2075	1.22	1.22	1.34	1.42	1.00	0.93	0.75	0.28	-0.48	-0.03	-0.03	-0.46
2076	-0.45	-0.62	-0.62	-0.72	-0.57	-0.63	-0.76	0.55	1.02	1.03	0.33	0.36
2077	0.40	-0.48	-0.14	-0.23	-0.04	0.28	0.57	1.34	0.90	1.09	1.04	1.02
2078	0.27	0.36	0.28	0.13	-0.03	-0.23	0.11	-0.10	0.61	0.52	0.78	-0.16
2079	-0.63	-0.41	-0.86	-0.82	-0.92	-0.75	-0.18	-0.50	-0.37	-0.28	-0.01	-1.00
2080	-0.33	-0.53	-0.58	-0.58	-0.85	-0.75	-1.48	-0.92	-0.22	-0.58	-0.46	-0.85
2081	-0.67	-0.95	-0.65	-0.46	-0.72	-0.50	-0.47	-0.11	-1.58	-1.34	-1.27	-1.21
2082	0.47	0.21	0.46	0.51	0.72	0.88	-0.51	-0.05	0.22	-0.63	-0.67	-0.08
2083	0.84	1.14	1.23	1.44	1.84	1.92	1.06	0.66	0.15	0.17	-0.81	-1.35
2084	-1.66	-1.26	-1.25	-1.37	-1.15	-1.26	-0.32	0.02	0.34	0.48	-0.01	-0.14
2085	-0.34	-0.87	-0.68	-0.59	-0.28	-0.04	0.01	0.14	0.07	0.10	-0.40	-1.27
2086	-1.56	-1.12	-1.00	-1.04	-1.08	-0.59	0.04	0.43	0.17	0.01	-0.29	-0.34
2087	-0.06	0.26	0.69	0.77	1.02	1.11	1.11	0.25	-0.59	0.47	0.47	0.25
2088	0.63	0.77	0.61	0.27	0.26	0.26	-0.16	-0.41	-0.29	-1.24	-1.23	-0.17
2089	-0.97	-0.48	0.09	0.31	0.68	0.08	0.97	1.13	-0.03	-0.05	-0.88	-0.51
2090	-1.07	-1.43	-1.55	-1.29	-0.99	-0.14	1.28	1.70	2.84	2.48	1.92	1.20
2091	-0.05	0.26	-0.23	0.01	0.09	-0.16	0.51	0.30	0.76	0.58	-0.11	0.09
2092	0.17	-0.16	-0.13	-0.28	-0.06	-0.78	-1.08	-1.01	-1.23	-1.25	-1.00	-0.65
2093	-0.96	-1.04	-1.26	-1.48	-1.60	-2.11	-1.83	-1.62	-1.67	-0.48	-0.56	0.20
2094	1.27	1.26	1.29	1.22	1.47	1.12	-0.20	-0.65	-0.96	-0.93	-1.23	-0.97
2095	0.68	0.94	0.89	0.69	1.06	1.21	-0.26	-1.31	-0.96	-0.68	0.08	0.75
2096	1.49	1.52	1.25	1.37	1.14	0.80	-0.32	-1.07	-0.44	-0.42	-0.79	0.23
2097	0.44	0.65	0.29	0.29	0.53	0.75	0.75	0.71	1.19	1.03	0.93	-0.49
2098	-1.06	-0.84	-1.15	-1.31	-1.44	-1.44	-1.04	-1.24	-0.51	0.82	1.62	2.34
2099	1.95	1.60	1.67	1.47	0.96	0.13	0.20	-0.05	-0.51	-0.25	1.18	0.83
2100	0.82	0.42	0.39	0.23	-0.65	-0.64	-1.16	-0.45	-0.18	0.20	0.37	1.12

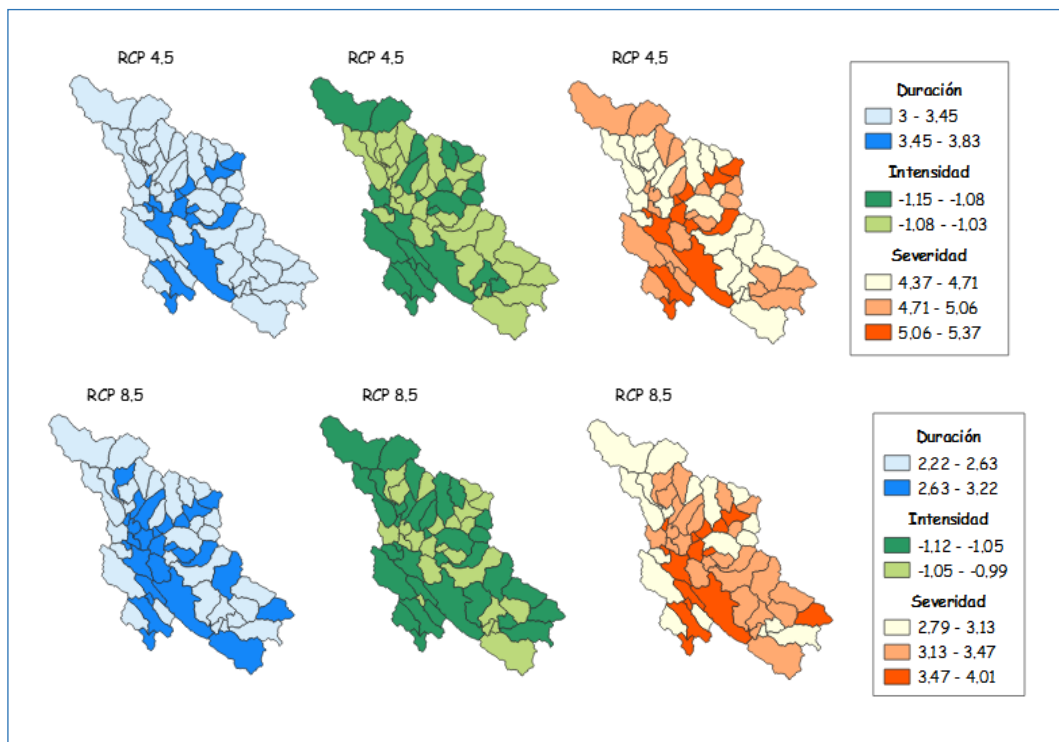
**Tabla 24.** Caracterización temporal de la sequía proyectada (2070 - 2100) con el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.28	0.20	-0.04	0.29	-0.55	-1.35
2071	-1.74	-1.03	-1.27	-1.45	-1.08	-1.28	-0.45	-0.51	0.27	-0.60	-0.10	1.05
2072	0.86	0.90	1.13	1.63	1.65	1.56	1.84	1.49	1.28	0.47	0.58	0.42
2073	-0.43	-0.46	-0.22	-0.02	-0.06	-0.40	0.07	0.29	-0.21	0.12	-0.10	0.20
2074	-0.52	-0.85	-0.56	-0.66	-0.86	-1.36	-0.96	-0.43	-1.40	-1.99	-2.08	-1.45
2075	-0.26	-0.93	-0.59	-0.31	-0.09	0.04	-0.70	0.24	-0.36	-0.98	-0.91	-0.78
2076	-1.60	-0.85	-0.54	-0.34	-0.53	-0.62	0.38	-0.24	-0.65	-1.17	-0.73	-0.01
2077	-0.50	-0.26	-0.65	-0.51	-0.45	-0.10	0.65	0.82	1.87	1.60	1.13	-0.13
2078	0.44	0.05	-0.54	-0.26	-0.13	-0.15	-1.46	-1.65	-0.84	-1.14	-0.53	0.01
2079	0.23	0.52	0.65	0.73	0.59	0.70	0.64	0.42	-0.01	0.06	-0.16	0.13
2080	-0.36	-0.76	-0.97	-1.10	-1.26	-1.59	-1.50	-0.45	0.27	0.99	1.03	1.34
2081	1.41	1.06	1.19	0.97	1.17	0.72	0.22	0.10	-0.62	-1.11	-0.43	-0.36
2082	-0.65	0.06	-0.41	-0.43	-0.74	-0.76	-0.50	-0.77	-0.26	-0.26	-0.59	-0.28
2083	-0.77	-1.72	-1.89	-1.66	-1.84	-1.41	-1.10	0.30	1.21	1.06	0.82	0.27
2084	0.22	0.18	-0.44	-0.42	-0.43	0.16	0.17	-0.02	0.81	0.85	1.42	1.53
2085	1.39	0.97	0.65	0.52	0.13	-0.75	-1.62	-2.01	-1.77	0.02	-0.09	0.43
2086	-0.50	-0.58	-0.91	-1.48	-1.56	-1.75	-1.35	-1.32	-0.41	-0.26	-0.72	-0.61
2087	-1.34	-1.06	-1.23	-1.40	-1.36	-1.55	-0.84	-1.15	-1.51	-0.66	0.72	1.35
2088	0.89	1.13	1.54	1.52	1.06	0.69	1.19	0.83	-0.02	0.36	0.09	-0.26
2089	0.35	0.64	0.96	0.63	0.92	0.98	0.46	-0.01	-0.34	0.94	1.09	1.69
2090	1.80	1.77	1.26	0.84	0.69	0.21	-0.95	-1.49	-1.20	-1.60	-2.21	-1.45
2091	-0.35	-0.12	0.20	0.21	0.69	1.25	1.02	0.91	0.72	0.05	-1.28	-2.73
2092	-2.56	-2.85	-2.19	-1.98	-1.51	-0.48	0.36	1.26	1.20	1.92	1.68	0.45
2093	0.83	0.82	0.65	0.34	0.44	0.32	-0.55	-1.19	-1.53	-0.79	-0.36	-0.58
2094	0.82	1.05	1.20	1.34	1.44	1.86	1.11	0.82	0.47	-0.56	-0.20	-0.02
2095	0.90	0.93	0.88	0.97	0.80	0.75	-0.23	-0.50	-0.53	-0.09	-0.23	0.87
2096	0.91	1.29	1.02	1.01	1.24	0.69	0.46	-0.42	0.12	-0.04	0.22	0.24
2097	0.62	0.37	0.40	0.56	0.57	0.37	-0.13	0.57	0.54	0.48	0.89	0.69
2098	0.41	-0.30	0.04	0.02	-0.30	0.46	0.82	1.58	1.67	1.33	1.24	-0.32
2099	-0.51	-0.40	0.16	0.17	0.43	1.26	1.66	1.66	1.09	1.18	1.17	1.05
2100	0.03	0.42	0.57	0.70	0.52	0.35	1.25	0.91	0.55	-0.16	-0.72	-1.40

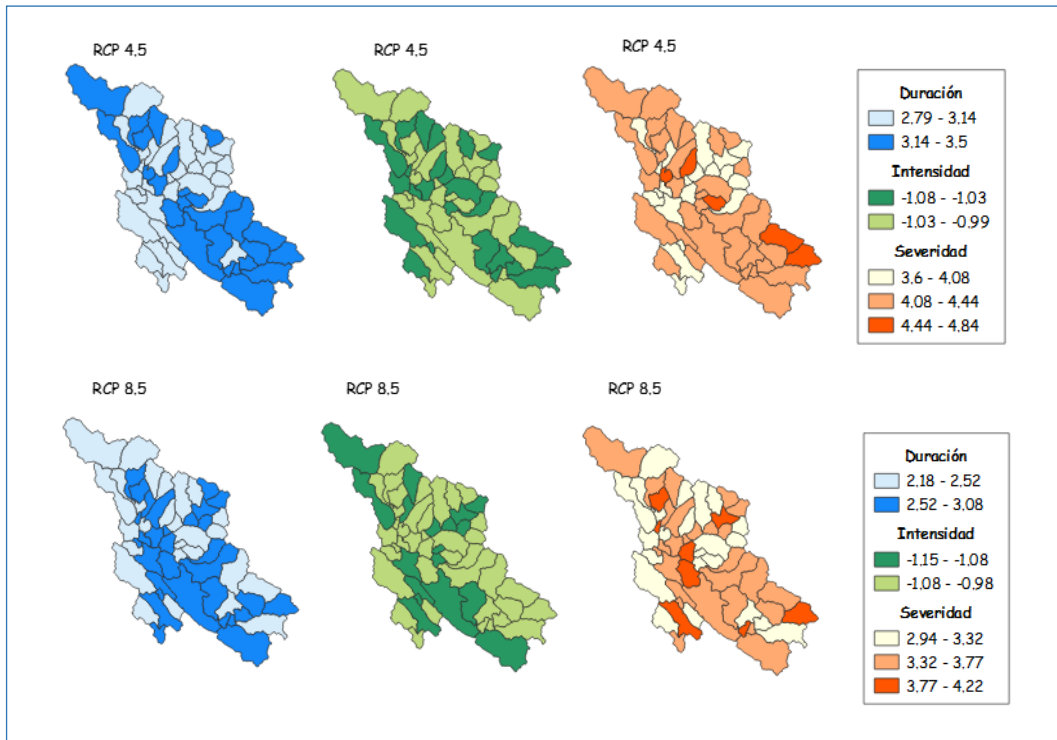
**Anexo E: Caracterización de sequías proyectadas**



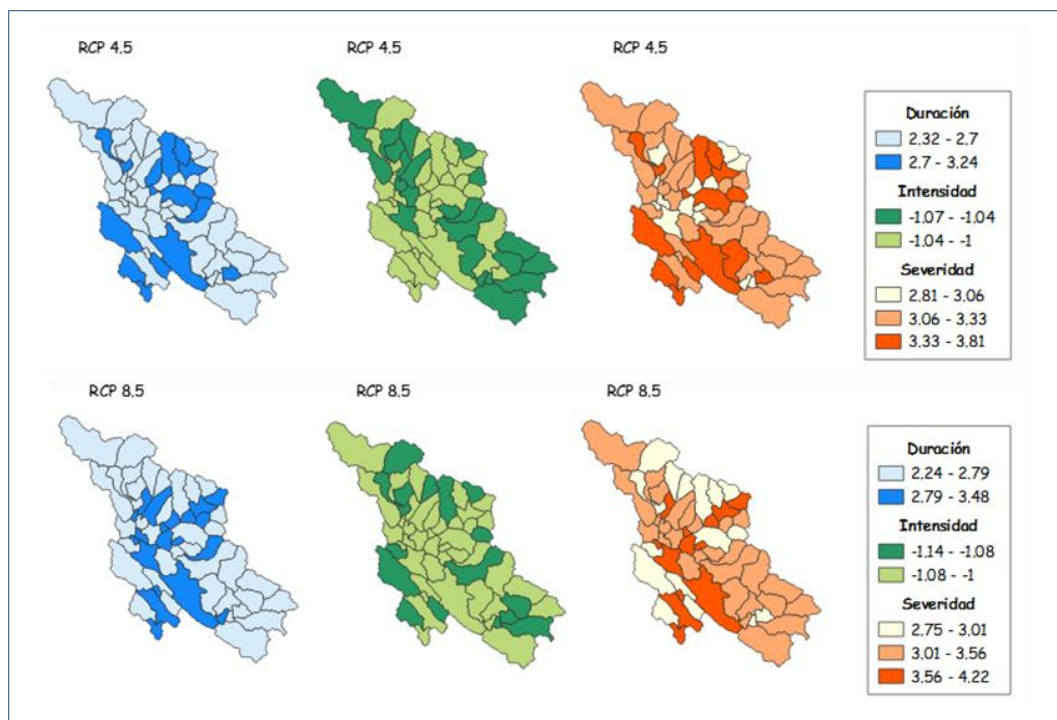
**Figura 28.** Probabilidad de sequías proyectadas (2020 - 2050) en duración, intensidad y severidad con el GCM - CMCC-CM.



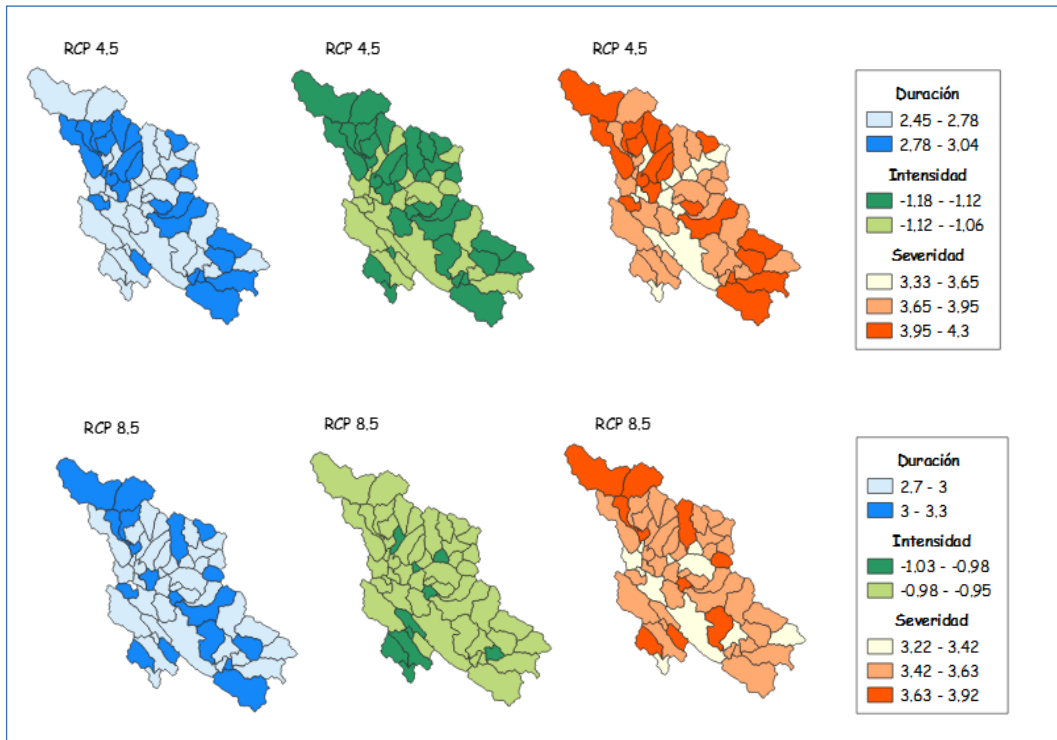
**Figura 29.** Probabilidad de sequías proyectadas (2020 - 2050) en duración, intensidad y severidad con el GCM – GFDL-CM3.



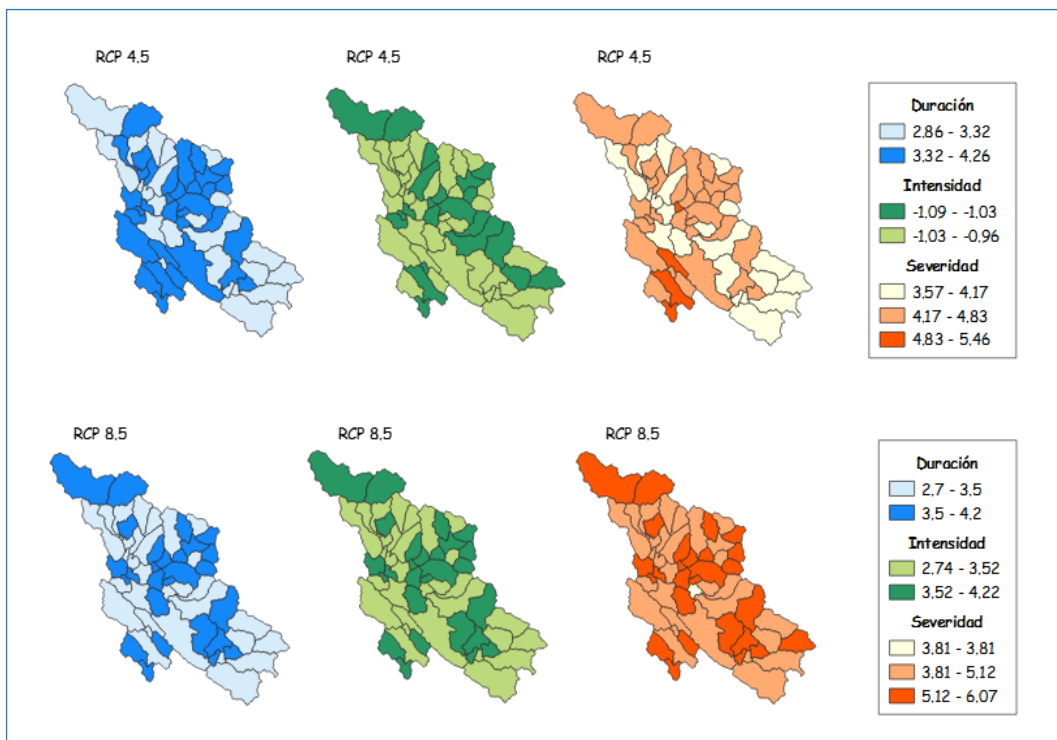
**Figura 30.** Probabilidad de sequías proyectadas (2020 - 2050) en duración, intensidad y severidad con el GCM – MIROC5.



**Figura 31.** Probabilidad de sequías proyectadas (2070 - 2100) en duración, intensidad y severidad con el GCM – CMCC-CM.



**Figura 32.** Probabilidad de sequías proyectadas (2070 - 2100) en duración, intensidad y severidad con el GCM – GFDL-CM3.



**Figura 33.** Probabilidad de sequías proyectadas (2070 - 2100) en duración, intensidad y severidad con el GCM – MIROC5.