

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS**  
**NATURALES**



**“APLICACIÓN DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA  
ANALIZAR SEQUÍAS EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO,  
EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHILI AREQUIPA 2020-2050”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES**

**AUTORES:**

**Bach. MARIO FABRIZIO GARAY VALDIVIA**

**Bach. LUZ CONSUELO HUANCA DIAZ**

**ASESOR:**

**Mtro. DAN SKIPPER ANARCAYA TORRES**

**Callao, 2022**

**PERÚ**





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES**  
(Resolución N° 019-2021-CU del 20 de enero de 2021)



II CICLO TALLER DE TESIS

ANEXO 3

ACTA N° 004-2022 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

LIBRO 01 FOLIO No. 30 ACTA N°004-2022 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

A los 16 días del mes de julio del año 2022, siendo las 11:14 horas, se reunieron, en la sala meet <https://meet.google.com/pdz-juqr-pbo>, el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS para la obtención del TÍTULO profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Mg.	Edgar Zárate Sarapura	: Presidente
MSc.	María Antonieta Gutiérrez Díaz	: Secretaria
Ing.	Godofredo Teodoro León Ramírez	: Vocal
Mtro.	Dan Skipper Anarcaya Torres	: Asesor

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los Bachilleres Luz Consuelo Huanca Díaz y Mario Fabrizzio Garay Valdivia, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, sustentan la tesis titulada: "APLICACIÓN DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA ANALIZAR SEQUÍAS EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO, EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHILI AREQUIPA 2020-2050", cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid19, a través del D.S. N° 044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N°039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario";

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por Aprobado con la escala de calificación cualitativa Muy bueno y calificación cuantitativa 17 la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099-2021-CU del 30 de junio de 2021.

Se dio por cerrada la Sesión a las 12:06 horas del día sábado 16 de julio del año en curso.

Presidente

Secretaria

Vocal

Asesor

## **DEDICATORIA**

A Dios por guiarnos por el buen camino, a nuestros padres que honramos con cada logro profesional y a nuestra familia que nos impulsan a mejorar

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestro asesor el Maestro Dan Skipper Anarcaya Torres el más sincero agradecimiento por su apoyo, sus comentarios y observaciones, lo que permitió realizar la presente investigación.

## ÍNDICE

RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1. Descripción de la Realidad Problemática	15
1.2. Formulación del problema	16
1.2.1. Problema General	16
1.2.2. Problemas Específicos	16
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo General	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
1.4. Limitantes de la Investigación	17
1.4.1. Teórico	17
1.4.2. Temporal	17
1.4.3. Espacial	17
II. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Antecedentes:	18
2.1.1. Internacional	18
2.1.2. Nacional	21
2.2. Bases Teóricas	25
2.2.1. Sequías	25
2.2.2. Modelo Hidrológico	28
2.3. Base Conceptual	31
2.3.1. Sequías	31
2.3.2. Modelo Hidrológico	38
2.4. Definición de Términos Básicos	66
2.4.1. Calibración	66
2.4.2. Clima	66

2.4.3. Escenario de Cambio Climático	67
2.4.4. Métricas de Desempeño	67
2.4.5. Modelo Hidrológico	67
2.4.6. Precipitación	67
2.4.7. Proyecciones Climáticas	67
2.4.8. RCP	67
2.4.9. Sequía	67
III. HIPOTESIS Y VARIABLES	68
3.1. Hipótesis	68
3.1.1. Hipótesis General	68
3.1.2. Hipótesis Específicas	68
3.2. Definición Conceptual de Variables	68
3.2.1. Operacionalización de Variables	69
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	70
4.1. Tipo y Diseño de Investigación	70
4.1.1. Tipo de Investigación	70
4.1.2. Diseño de la Investigación	71
4.2. Método de Investigación	73
4.3. Población y Muestra	73
4.3.1. Población	73
4.3.2. Muestra	73
4.4. Lugar de Estudio y Periodo Desarrollado	73
4.5. Técnicas e Instrumentos para la Recolección de la Información	74
4.6. Análisis y Procesamiento de Datos	75
4.6.1. Representación Hidrológica de la Cuenca	76
4.6.2. Variables de Entrada del Modelo Swat	76
4.6.3. Unidades de Respuestas Hidrológicas (HRU)	77
4.6.4. Análisis de Incertidumbre	77
4.6.5. Proyecciones Climáticas	81
4.6.6. Índices Estandarizados Meteorológicos e Hidrológicos	89

V.	RESULTADOS	92
5.1.	Resultados Descriptivos	92
5.1.1.	Representación Hidrológica de la Cuenca	92
5.2.	Resultados Inferenciales	100
5.2.1.	Representación Hidrológica de la Cuenca	100
5.2.2.	Comportamiento de Sequías Bajo Proyecciones Climáticas	107
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	126
6.1.	Contrastación y Demostración de la Hipótesis con los Resultados	126
6.2.	Contrastación de los Resultados con otros Estudios Similares	127
6.3.	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	128
VII.	CONCLUSIONES	129
VIII.	RECOMENDACIONES	131
VII.	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	132
VIII.	ANEXOS	142

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Distribución normal de precipitación estandarizada SPI .....	34
Figura 2 Esquema de validación del modelo SWAT .....	46
Figura 3 Validación espacial del modelo hidrológico diario mediante índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe de 0,72 .....	55
Figura 4 Aplicación de la función objetivo para definir la calidad de ajuste del modelo.....	58
Figura 5 Calibración y validación del método nash sutcliffe efficiencies .....	59
Figura 6 Esquema incertidumbre usando SUFI – 2 .....	63
Figura 7 Análisis de sensibilidad con SUFI – 2 en SWAT – CUP .....	64
Figura 8 Perfil del esquema Lin (Purdue).....	65
Figura 9 Flujo de humedad integrado verticalmente y su divergencia para el esquema Lin (Purdue) .....	66
Figura 10 Ruta metodológica de la investigación.....	72
Figura 11 Mapa de ubicación de la subcuenca del río Chili .....	74
Figura 12 NEX-GDDP .....	82
Figura 13 Plataforma de Google Earth Engine para descarga de datos .....	82
Figura 14 Scripts para descarga de información en lenguaje JavaScript.....	83
Figura 15 Data histórica vs data climática, formato línea .....	84
Figura 16 Data observada vs data climática, formato punto .....	85
Figura 17 CFD de la data observada vs data climática.....	86
Figura 18 Data observada vs data climática vs data desescalada, formato línea .....	87
Figura 19 Data observada vs data climática vs data desescalada, formato punto .....	88
Figura 20 CFD de la data observada vs climática vs desescalada .....	89
Figura 21 Importación de la información para el cálculo del SPI.....	90
Figura 22 Ejecución del paquete SPEI.....	91
Figura 23 Mapa de acumulación de flujo subcuenca del río Chili .....	92
Figura 24 Mapa de dirección de flujo subcuenca del río Chili .....	93
Figura 25 Mapa de cobertura vegetal subcuenca del río Chili .....	94

Figura 26 Mapa de tipo de suelo de la subcuenca del río Chili .....	96
Figura 27 Mapa de pendientes subcuenca del río Chili .....	97
Figura 28 Estaciones meteorológicas .....	98
Figura 29 Unidades de respuesta hidrológica de la subcuenca del río Chili ..	100
Figura 30 Análisis de sensibilidad .....	101
Figura 31 Calibración del modelo subcuenca del río Chili .....	104
Figura 32 Validación del modelo subcuenca del río Chili.....	106
Figura 33 Precipitación mensual proyectada hasta el 2050 .....	108
Figura 34 Temperatura mensual proyectada hasta el 2050 .....	108
Figura 35 Índice de precipitación estándar (SPI) en el periodo histórico .....	111
Figura 36 Índice de precipitación estándar (SPI) en el periodo proyectado ...	112
Figura 37 Caracterización espacial del SPI 3, en diferentes periodos estacionales.....	113
Figura 38 Caracterización espacial del SPI 6, en diferentes periodos estacionales.....	114
Figura 39 Caracterización espacial del SPI9, en diferentes periodos estacionales.....	115
Figura 40 Caracterización espacial del SPI 12, en diferentes periodos estacionales.....	116
Figura 41 Índice de caudal estandarizado/SSI) en el periodo histórico.....	119
Figura 42 Índice de caudal estandarizado/SSI) en el periodo proyectado .....	120
Figura 43 Caracterización espacial del SSI 3, en diferentes periodos estacionales.....	122
Figura 44 Caracterización espacial del SSI 6, en diferentes periodos estacionales.....	123
Figura 45 Caracterización espacial del SSI 9, en diferentes periodos estacionales.....	124
Figura 46 Caracterización espacial del SSI 12, en diferentes periodos estacionales.....	125

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Definición de los estados de la sequía hidrológica mediante el SSI ..	36
Tabla 2	Descripción de los 21 modelos de circulación global .....	41
Tabla 3	Trayectorias de concentración representativas RCPs – escenarios actuales .....	44
Tabla 4	Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad .....	61
Tabla 5	Matriz de operacionalización de variables.....	69
Tabla 6	Plataformas de descarga .....	75
Tabla 7	Parámetros de sensibilidad.....	78
Tabla 8	Códigos de identificadores de parámetros .....	79
Tabla 9	Clases de cobertura vegetal.....	95
Tabla 10	Tipo de suelo.....	96
Tabla 11	Clasificación de pendientes (%) .....	97
Tabla 12	Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas (PURDUE) .....	99
Tabla 13	Ranking de parámetros según análisis de sensibilidad para caudales .....	102
Tabla 14	Parámetros calibrados .....	105
Tabla 15	Índices de eficiencia del modelo .....	107
Tabla 16	Características de las sequías meteorológicas .....	109
Tabla 17	Características de las sequías hidrológicas .....	117
Tabla 18	Matriz de consistencia.....	142

## RESUMEN

La Autoridad Nacional del Agua indica que la subcuenca del río Chili sería vulnerable al cambio climático, lo que podría aumentar la frecuencia y severidad de las sequías (ANA, 2015). Es por ello que la investigación tuvo como objetivo aplicar la modelación hidrológica para analizar sequías en escenarios de cambio climático, en la subcuenca del río Chili, Arequipa para los años 2020 - 2050. De manera que se estableció un diseño de tipo no experimental y longitudinal, donde en primer lugar se representó la subcuenca utilizando el modelo hidrológico SWAT, y calculando los índices de performance de este modelo (NASH, PBAIS y  $R^2$ ). Luego se descargó información climática proyectada hasta el 2050, y con ayuda del método estadístico downscaling se redujo el sesgo de esta data, para posteriormente ingresarlos al modelo y calcular caudales proyectados. Finalmente se analizó el comportamiento de las sequías bajo proyecciones climáticas mediante el índice de precipitación estandarizado (SPI) e índice de estandarizado de caudal (SSI). Los resultados evidenciaron buenos valores de los índices de performance en la calibración y validación. Asimismo, se observó variaciones en la frecuencia y severidad de las diferentes categorías de sequías hidrológicas y meteorológicas, cuando fueron proyectadas hasta el 2050 bajo el escenario RCP 4.5. Por lo tanto, se concluye que el proceso de calibración y validación brinda la confiabilidad de representar los procesos hidrológicos de la subcuenca del río Chili a través de la modelación hidrológica, lo que permitió determinar variaciones en frecuencia y severidad de sequias bajo proyecciones climáticas.

### **Palabras clave**

Modelación hidrológica, SWAT, escenarios climáticos, sequías, microcuenca, subcuenca, cuenca.

## **ABSTRACT**

The National Water Authority indicates that the Chili River sub-basin would be vulnerable to climate change, which could increase the frequency and severity of droughts (ANA, 2015). That is why the research aimed to apply hydrological modeling to analyze droughts in climate change scenarios, in the sub-basin of the Chili River, Arequipa for the years 2020 - 2050. Thus, a non-experimental and longitudinal design was established, where the sub-basin was first represented using the SWAT hydrological model, and calculating the performance indices of this model (NASH, PBAIS and R2). Then projected climatic information was downloaded until 2050, and with the help of the downscaling statistical method, the bias of this data was reduced, to later enter them into the model and calculate projected flows. Finally, the behavior of droughts under climate projections was analyzed using the standardized precipitation index (SPI) and the standardized flow rate index (SSI). The results showed good values of performance indices in calibration and validation. Likewise, variations were observed in the frequency and severity of the different categories of hydrological and meteorological droughts, when they were projected until 2050 under the RCP 4.5 scenario. Therefore, it is concluded that the calibration and validation process provides the reliability of representing the hydrological processes of the Chili River sub-basin through hydrological modeling, which allowed determining variations in frequency and severity of droughts under climate projections.

### ***Keywords***

Hydrological modeling, SWAT, climatic scenarios, droughts, micro-basin, sub-basin, basin.

## INTRODUCCIÓN

La data climática histórica asociada a la subcuenca del río Chili demuestra la concurrencia de sequías severas en su territorio, como por ejemplo la ocurrida en el año 1943, considerada la más grave registrada a nivel nacional y que ocasionó la migración de la población rural hacia las urbes de la costa de Arequipa y Tacna, o como la última sequía ocurrida en el año 2009, donde hubo un déficit hídrico del 20% (Zavala et al., 2022). Así también según la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015), la subcuenca del río Chili sería vulnerable al cambio climático, lo que podría aumentar la frecuencia y severidad de las sequías.

Ante esta incertidumbre, existe la necesidad de evaluar sequías en la subcuenca del río Chili, bajo escenarios de cambio climático, con el fin de obtener información relevante en la toma de decisiones para la conservación de la subcuenca. Los modelos hidrológicos son herramientas adecuadas para la representación del proceso hidrológico de una cuenca e ideal para conocer más acerca de fenómenos como las sequías (Salvadore et al., 2015).

Es por ello que el informe de tesis tuvo como objetivo aplicar la modelación hidrológica para analizar sequías en escenario de cambio climático, en la Subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050; para ello se hace necesario el uso de herramientas de modelación que permiten recopilar y analizar información útil que podrá ser usada por los diferentes actores involucrados en la gestión del recurso hídrico en esta subcuenca.

Como guía para la elaboración de la investigación se optó por un método estadístico, que en primer lugar permitió recopilar información climática y cartográfica obtenidas de plataformas validadas como PISCO - SENAMHI, NEXUS Arequipa Climate, FAO, ALOS PALSAR y otros; para luego ser procesadas en Arcgis, posteriormente se ingresó esta data al modelo hidrológico SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas por sus siglas en inglés) para obtener caudales simulados; en este proceso se realizó un análisis de sensibilidad, calibración y validación con el fin de que los caudales simulados

fueran cercanos a los observados; finalmente se descargó información climática del escenario RCP 4.5 para ingresarla al modelo SWAT, sin previamente desescalarla con el método downscaling estadístico, que ayudo a obtener caudales proyectados hasta el 2050 y evaluar los índices de sequías meteorológicas e hidrológicas.

Como resultado del proceso de calibración y validación de la subcuenca a través del modelo hidrológico SWAT, se obtuvo índices de performance calificados como buenos, que garantiza la representatividad del proceso hidrológico en la subcuenca del río Chili. Por otro lado, los diferentes tipos de índices de precipitación estandarizado(SPI), que mostraban una variación en las diferentes categorías de sequías al momento de la proyección, asumiendo el aumento de las frecuencias de sequías ligeras y la disminución de sequías húmedas; en cuanto a las sequías hidrológicas el índice de estandarizado de caudal(SSI) mostró un aumento de frecuencias en las sequías húmedas, sin embargo, para el SSI del tipo 3 se pudo identificar un aumento en la durabilidad de 11 meses en la categoría extrema proyectada.

Por lo tanto, se concluye que el proceso de calibración y validación da la confiabilidad de representar los procesos hidrológicos de la subcuenca del río Chili a través de la modelación hidrológica y también que si existen variaciones en el comportamiento de sequías de las proyecciones realizadas.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción de la Realidad Problemática

La sequía es un fenómeno natural recurrente que puede producir desastres cuando se combina con condiciones socioeconómicas y ambientales de exposición y vulnerabilidad. Los impactos globales de las sequías estimados por la OMS revelaron que 55 millones de personas por año se ven afectadas por las sequías y la escasez de agua, asociadas a un 40 % de la población mundial, lo que colocaría a unos 700 millones de personas en riesgo de ser desplazadas para el 2030 (Ekundayo et al., 2022).

En el Perú según los balances hídricos estimados a partir de caudales medios, mostraron un déficit hídrico en sectores pertenecientes a la subcuenca Chili como Mollebaya, Quequeña y Yarabamba, en los meses de julio a noviembre debido a que carecen de infraestructura de regulación (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2015). Asimismo, esta subcuenca se encuentra ubicada dentro de la cuenca Quilca - Vitor - Chili que históricamente ha sido afectada por sequías severas, como la ocurrida en el año 1943, considerada la más grave registrada a nivel nacional y que ocasionó la migración de la población rural hacia las urbes de la costa de Arequipa y Tacna, o la última sequía ocurrida en el año 2009 donde hubo un déficit hídrico del 20% (Zavala et al., 2022).

Por otro lado, los escenarios de cambio climático sugieren que la frecuencia de las sequías podría aumentar en el futuro en muchas partes del mundo (Craig et al, 2019), lo cual tiene concordancia con lo descrito por el Autoridad Nacional del Agua, que aduce que en la subcuenca del río Chili existe riesgo de sequías por el cambio climático, cuyos efectos serían la escasez de agua para abastecimiento de riego y de pastos, pérdida de cultivos, mortandad del ganado por falta de forraje, migración de las poblaciones, incremento de precios de los alimentos, desnutrición, etc (ANA, 2015, pp 126).

Es así que la incertidumbre por conocer los impactos del cambio climático en el fenómeno de sequía en la subcuenca del río Chili, se vuelve importante para las organizaciones que administran el recurso hídrico de la subcuenca (ALA Chili,

SENAMHI, INGEMMET); y aunque existen estudios sobre la vulnerabilidad al cambio climático en esta región (Marengo, 2008), no se cuantifican ni se detallan para el nivel requerido en la subcuenca.

En los últimos años, el uso de los modelos hidrológicos ha aumentado drásticamente como resultado de técnicas computacionales mejoradas y la disponibilidad de datos digitales distribuidos espacialmente (Salvadore et al., 2015), es así que la representación mejorada de la dinámica del proceso en los modelos hidrológicos ha permitido proporcionar nuevos conocimientos sobre sistemas hidrológicos complejos como las sequías (Guse et al., 2021). Es por ello que para realizar el análisis de sequías en escenarios de cambio climático se debe utilizar la modelación hidrológica.

## **1.2. Formulación del problema**

### ***1.2.1. Problema General***

¿De qué manera la aplicación de la modelación hidrológica analiza las sequías en escenario de cambio climático, en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050?

### ***1.2.2. Problemas Específicos***

P1: ¿De qué manera la representación del sistema hidrológico permite el análisis de sequías en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050?

P2: ¿Cuál es el comportamiento de las sequías bajo proyecciones climáticas en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050?

## **1.3. Objetivos**

### ***1.3.1. Objetivo General***

Aplicar la modelación hidrológica para analizar sequías en escenario de cambio climático, en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.

### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

O1: Establecer la representación del sistema hidrológico que permita el análisis de sequías en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.

O2: Analizar el comportamiento de las sequías bajo proyecciones climáticas en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.

#### **1.4. Limitantes de la Investigación**

##### ***1.4.1. Teórico***

La revisión de literatura o estado del arte sobre cómo afecta el cambio climático a las sequías en la subcuenca del río Chili es escasa, lo que genera vacíos de conocimientos en la temática referida.

##### ***1.4.2. Temporal***

La proyección de sequías en un escenario de cambio climático es evaluada para los años 2020 a 2050, debido a la información disponible que se tiene de las proyecciones climáticas en la subcuenca del río Chili.

##### ***1.4.3. Espacial***

La subcuenca del río Chili históricamente ha sufrido de severas sequías, se prevé que el cambio climático aumente la severidad y frecuencia de este fenómeno, por ese motivo en la investigación se limita a estudiar espacialmente la subcuenca por su vulnerabilidad al cambio climático.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes:

#### *2.1.1. Internacional*

Quang et al. (2019), en su artículo titulada “Aplicación de índices de sequía meteorológicos e hidrológicos para establecer mapas de clasificación de sequías de la cuenca del río Ba en Vietnam” publicado en la revista Hydrology, tuvo como objetivo principal establecer mapas de clasificación de sequías para simular y calcular la falta de descarga en la cuenca del río Ba en Vietnam. Para ello se establecieron tres índices meteorológicos de sequías; el índice de precipitación estandarizado (SPI), el índice de sequía (J) y el índice Ped, de los cuales el índice de sequía (J) era el más adecuado para el área de estudio. Para el proceso de calibración se empleó la modelación hidrológica con el SWAT – CUP, los cuales funcionan con algoritmos, asimismo para la calibración y validación se utilizó las descargas observadas en dos estaciones hidrológicas, las cuales eran aceptables con la eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE). Los resultados concluyeron que el cálculo de índice de sequía y los mapas de clasificación de sequía mostraron que las áreas más afectadas fueron las comunas de las provincias de Gia La y Dak Lak; además los resultados de simulación y los cálculos coincidían con lo ocurrido en la práctica. Asimismo, los resultados obtenidos sirvieron para crear medidas de mitigación frente a futuras sequías. El artículo permitió validar la investigación, ya que utilizó la misma metodología, es decir el uso del modelo hidrológico SWAT y la evaluación de índices de sequías.

Munévar y Saavedra (2020), en su tesis para optar el grado de ingeniero ambiental de la Universidad Santo Tomás de Bogotá, la cual se tituló “Evaluación de la amenaza por sequía en el sector agrícola de la cuenca del río Prado bajo los escenarios del cambio climático” tuvo como objetivo principal evaluar la amenaza por sequía en el sector agrícola en la cuenca del río Prado en la subcuenca Cunday, a partir de variaciones en la temperatura y precipitación a través del tiempo. Por ese motivo se determinó la producción de

escorrentía y humedad del suelo en la subcuenca con ayuda de la modelación hidrológica SWAT, una vez obtenidos los datos y corregido el sesgo en los resultados se realizó el cálculo de los índices de sequía seleccionados, precipitación estandarizada, escorrentía e índice estandarizado de agua en el suelo. Finalmente se determinó la sequía obteniendo como resultado que el índice de sequía medio (MSDI) es de menor frecuencia para eventos secos en comparación a los escenarios futuros. Por otro lado, el autor mencionó que el definir a la sequía a partir de una sola variable como precipitación, humedad del suelo o escorrentía, puede no ser suficiente para una evaluación de riesgos. El artículo que posee una metodología similar ayudó a validar los resultados de la investigación, además también evaluaron sequias bajo condiciones climáticas.

Sam et al., (2018), en su artículo titulado “Impacto del cambio climático en las sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas en la cuenca baja del río Mekong: un estudio de caso de la cuenca Srepok, Vietnam” publicado en la revista *Water and Environment Journal*. Tuvo como objetivo evaluar los cambios futuros en las sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas bajo el impacto del cambio climático en la cuenca del río Srepok, una subcuenca de la cuenca baja del Mekong, utilizando tres índices de sequía; índice de precipitación estandarizado (SPI), índice de escorrentía estandarizado (SRI) e índice de humedad del suelo estandarizado (SSWI). Para ello se utilizó la herramienta de modelación hidrológica de evaluación de suelos y aguas (SWAT) la cual se calibró y utilizó como herramienta de simulación para estimar las características de las sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas. Los datos climáticos para el período 2016-2040 se obtuvieron de cuatro modelos climáticos regionales diferentes; HadGEM3-RA, SNU-MM5, RegCM4 y YSU-RSM, que están reducidos del HadGEM2-AO GCM. Los resultados indicaron que se prevé que la severidad, duración y frecuencia de las sequías aumenten en el futuro cercano para esta región. La investigación permitió validar el uso del modelo SWAT en la evaluación de sequias bajo escenario de cambio

climático, así mismo este estudio también evalúa sequías meteorológicas e hidrológicas cuyos resultados podrán ser comparables en la investigación.

Lweendo et al., (2017) en su artículo titulado “Caracterización de las sequías en la región subtropical húmeda de la cuenca superior del río Kafue (África del Sur)” publicado en la revista *Water*. Tuvo como objetivo principal evaluar un enfoque integrado que involucra múltiples indicadores estandarizados y modelos hidrológicos (Herramienta de evaluación de suelos y agua, SWAT) para reconstruir y caracterizar las sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas en la cuenca superior del río Kafue de Zambia durante 1984–2013. Para ello se calculó el índice de escorrentía estandarizado (SRI) para ilustrar las sequías hidrológicas. Los datos de entrada para el cálculo de SRI se obtuvieron del modelo hidrológico SWAT que simuló bien la escorrentía diaria y mensual con la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) superiores a 0,65. Los resultados mostraron que: (1) todos los índices pudieron detectar la variabilidad temporal de los principales eventos de sequía en una cuenca subtropical húmeda en el sur de África; (2) SWAT simuló con éxito la escorrentía y la humedad del suelo, aunque la humedad del suelo requiere una mayor calibración para aumentar la precisión; (3) la duración e intensidad promedio de las sequías meteorológicas en una escala de tiempo de tres meses fueron más bajas pero las frecuencias fueron más altas en comparación con las sequías agrícolas e hidrológicas en agregados de 3 y 12 meses; y (4) los eventos de sequía exhibieron una tendencia negativa según lo evaluado por Mann-Kendall en SPEI, lo que indicó un aumento en la severidad de la sequía, y el análisis de correlación entre SPEI y SRI reveló que SPEI a los 9–15 meses tiene un fuerte vínculo con las condiciones hidrológicas. El artículo caracteriza las sequías históricas utilizando el modelo hidrológico SWAT, y brinda soporte y validez para el uso del modelo SWAT en la investigación.

Chattopadhyay et al., (2017) en su artículo titulado “Una evaluación de los impactos del cambio climático en la futura disponibilidad de agua y sequías en la cuenca del río Kentucky” publicado en la revista *Environmental Processes*.

Tuvo como objetivo principal evaluar los impactos potenciales del cambio climático en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Kentucky utilizando la herramienta de modelación hidrológica para la evaluación de suelos y agua (SWAT). Para ello después de la calibración y la validación, se forzó el modelo SWAT con resultados de precipitación y temperatura pronosticados reducidos y corregidos por sesgo de un conjunto de ocho modelos climáticos globales (GCM) CMIP5, correspondientes a dos vías de concentración representativas diferentes (RCP 4.5 y 8.5) para dos períodos de tiempo distintos; 2036–2065 y 2070–2099, denominados mediados de siglo y finales de siglo, respectivamente. Los resultados mostraron que las proyecciones climáticas corregidas indican aumentos modestos en la precipitación anual promedio y con mayores aumentos en la temperatura en relación con el período de referencia (1976-2005). El rendimiento de agua mensual modelado y la escorrentía superficial demostraron tendencias crecientes en primavera y otoño, mientras que los meses de invierno se proyectan con tendencias decrecientes. La evapotranspiración (ET) mostró una tendencia creciente constante en invierno y una tendencia decreciente en verano en todos los escenarios futuros. El análisis espacial indicó aumentos en la producción de agua en toda la cuenca, siendo probable que las porciones norte-central experimenten el aumento más pequeño debido a los aumentos en la ET. Las sequías meteorológicas e hidrológicas se cuantificaron utilizando el índice de sequía de reconocimiento (RDI) y el índice de sequía de flujo (SDI). Los hallazgos generales mostraron cambios modestos en los índices de sequía a lo largo del siglo XXI sobre la base de una cuenca hidrográfica. En el artículo, se evidenció que en un escenario futuro no aumentó la intensidad de las sequías, tanto hidrológicas como meteorológicas, fenómeno que ayudó a contrastar los resultados de la investigación.

### **2.1.2. Nacional**

Del Águila, (2021) en su tesis para optar el grado de doctor de Recursos Hídricos, titulado “Modelamiento de procesos hidrológicos en cuencas de la sierra central del Perú”; tuvo como objetivo modelar los procesos hidrológicos

en las cuencas Anya y Mchique, pertenecientes a la cuenca del río Mantaro, Junín. Para ello se utilizó dos modelos para la generación de escorrentía; el modelo empírico mensual Lutz Scholtz (LS) y el modelo hidrológico semidistribuido diario SWAT. En base a la ecuación de balance hídrico y desempeño de ambos modelos, se planteó una modificación al modelo Lutz Scholtz para el cálculo de la precipitación efectiva mensual, utilizándose la metodología de la curva número con herramientas de los programas ArcGis y HecGeoHms 10.4. El modelo Lutz Sholtz Modificado (LSM) permitió involucrar las características del suelo y cobertura vegetal en la generación de escorrentía a partir de precipitación y por ende mejorar el entendimiento físico del proceso. La bondad de ajuste de los modelos fue analizada mensualmente por métodos gráficos y estadísticos. En Anya, los indicadores de desempeño fueron buenos con los tres modelos probados, verificándose que los estadísticos mejoran con los modelos SWAT y LSM; en Mchique se obtuvo un 66.7% de indicadores aprobatorios en todos los modelos probados. Asimismo, se estudió el efecto espacio temporal del cambio climático en el escurrimiento de las cuencas a través de cinco modelos climáticos globales (Acces, bcc\_csm1, BNU\_ESM, CMCC\_CM y GISS\_E2) y dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y 8.5). La simulación se realizó con SWAT para el período 2070-2100. Los resultados mostraron un incremento de caudales en comparación con el período base 1980-2010 en ambas cuencas; en promedio el caudal en Anya aumentaría en 29.4% y 34.1% y en Mchique 5.4% y 10.8% en RCP 4.5 y 8.5 respectivamente. La investigación permitió demostrar la importancia de los modelos hidrológicos, en especial el modelo SWAT, en la representación de los procesos hidrológicos en una cuenca peruana, por lo que ayudó en la justificación y validez de los resultados de la investigación.

Zúñiga (2021), en su tesis para optar el grado de doctor en ciencias y tecnologías medioambientales de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, titulada "Impactos del cambio climático sobre las sequías en la cuenca río Tambo-Perú, bajo los escenarios RCP 4.5 Y 8.5", tuvo como objetivo principal analizar las sequías meteorológicas utilizando el método de índice de

precipitación estandarizada (SPI) e índice de evapotranspiración de la precipitación estandarizada (SPEI) para la cuenca del río Tambo. Para ello se recopilaron datos de 38 estaciones pluviométricas (22 reales y 16 simuladas) para los periodos de 1981-2005 y 2006 – 2099. Los resultados de la investigación arrojan que el análisis exploratorio se comprueba en alto valor de correlación estadística de los registros de las estaciones virtuales, la caracterización de series de precipitación y temperatura se incrementaron, la evaluación de modelos climáticos mediante la serie de modelo climático entró al proceso para reducir el sesgo de las series simuladas, la distribución de la precipitación y temperatura futuras proyectados para el periodo 2006-2099, presentan alta variabilidad, concluyendo que el índice SPEI tiene quiebres más bruscos que el SPI. La investigación fue un importante precedente para los resultados obtenidos en el estudio, pues comparte el mismo propósito, evaluar sequías bajo escenarios de cambio climático.

Zubieta (2021), en su artículo titulado “Análisis comparativo de los impactos del cambio climático en las sequías meteorológicas, hidrológicas y agrícolas en la cuenca del lago Titicaca” publicado en la revista peligros hidrometeorológicos en el marco del cambio climático, tuvo como objetivo principal evaluar los impactos del cambio climático en las sequías de las cuencas del lago Titicaca, el río desaguadero y el lago Poopó, utilizando proyecciones climáticas mensuales con sesgo de quinta fase RCP 8.5. Para ello se evaluaron 31 resultados de modelos de circulación global (GCM) de la fase 5 de la CMIP5 bajo los escenarios de emisión de la ruta de concentración representativa 8.5 (RCP8.5). Los resultados de GCM se combinaron con el modelo GR2M para estimar los cambios en las variables que eran relevantes para la gestión de los recursos hídricos en el Titicaca - Desaguadero - Poopó - Salar de Coipasa (TDPS), a su vez las sequías meteorológicas, agrícolas e hidrológicas se analizaron a partir de los índices de precipitación estandarizada (SPI), humedad del suelo y escurrimiento estandarizados (SRI). Los resultados mostraron un aumento en la severidad de la sequía en la mayor parte de la región del altiplano. El impacto de las sequías es más evidente entre septiembre y

noviembre. En particular, el aumento significativo en la frecuencia mensual de las sequías agrícolas e hidrológicas podría estar asociado a la reducción esperada de las lluvias en esos meses (inicio de la temporada de lluvias). La pertinencia del artículo se caracteriza porque se analizó sequías en la cuenca del Lago Titicaca, una cuenca cercana a la subcuenca del río Chili.

Sardon (2021), en su tesis para optar el grado de ingeniero agrícola de la Universidad Nacional del Altiplano, titulada “Análisis de sequías con perspectivas de cambio climático en la unidad hidrográfica Huancané, en el periodo 2020-2100”. tuvo como objetivo principal analizar las sequías con perspectivas de cambio climático bajo los escenarios históricos y futuros de los periodos 1981-2005 y 2020-2100 respectivamente, en la unidad hidrográfica Huancané. Para ello 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 de la investigación 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 presentaron 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 periodos 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). El artículo permitió complementar el análisis de sequías de la subcuenca del río Chili, debido a que la cuenca Huancané es una cuenca del sur del Perú.

Sarmiento (2016), en su tesis para optar el grado de ingeniero agrícola de la Universidad Nacional Agraria la Molina, titulada “Análisis de sequía hidrológica en el Perú” tuvo como objetivo caracterizar espacial y temporalmente la sequía

hidrológica en veintidós cuencas hidrográficas seleccionadas y distribuidas en las tres vertientes hidrográficas del Perú mediante el índice de sequía de caudales. Para ello este trabajo se centró en la sequía hidrológica definida por el índice de sequía de caudales (SDI por sus siglas en inglés) durante períodos de avenidas, estiaje y el año hidrológico de 22 estaciones hidrométricas distribuidas en las tres vertientes hidrográficas del Perú durante el período 1973-2013. Se evaluaron que las series de volumen del caudal no siguieron la distribución normal, por ello se examinaron las series acumuladas aplicando el logaritmo natural y mediante una prueba de normalidad en la que se produjo el coeficiente de asimetría basado en la condición que este sea una serie normal, se definió la serie que más se ajustó al paso de los datos del caudal. Los resultados del análisis de sequía hidrológica basado en el SDI mostraron que casi todas las estaciones sufrieron sequías hidrológicas durante el período de estudio. Además, se detectó que las sequías extremas ocurrieron con mayor frecuencia entre 1989-1992. Posteriormente se encontró una incidencia de riesgo de sequía hidrológica en episodios de El Niño - Oscilación del Sur (ENOS). La tesis es un precedente para los resultados del estudio, ya que analiza temporal y espacialmente sequias.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Sequías**

Según Faiz et al., (2022) la sequía es un peligro natural progresivo complejo y mal entendido que causa daños sustanciales al medio ambiente, la sociedad y la economía, las cuales se han clasificado ampliamente en cuatro clases, como sequías meteorológicas, hidrológicas, agrícolas y socioeconómicas.

Por otro lado, las sequías pueden ser descritas como periodos en los cuales la tierra experimenta resequedad. Las sequías se presentan en los ciclos climáticos naturales, se caracterizan porque son causadas por la escasez de precipitaciones pluviales y de caudal en los ríos. Se origina en la atmósfera, donde la humedad es deficiente. En otras palabras, las sequías se consideran la insuficiente disponibilidad de agua por un periodo prolongado en una región,

Centro de Estudios y Prevención de Desastres [Predes], (2017) y Valiente, (2001).

Asimismo, la sequía es definida como un fenómeno natural que representa un riesgo climático con notables repercusiones sobre los sistemas de abastecimiento de agua. Este es un fenómeno recurrente de evolución lenta y progresiva, y sus impactos se acrecientan amenazando los recursos hídricos de un territorio (Morote, 2019).

Predes (2017), define sequía como aquellos períodos secos prolongados que existen en los ciclos climáticos naturales ocasionados por la falta de precipitaciones pluviales y de caudal en los ríos. Asimismo, señala que los factores condicionantes y determinantes para la ocurrencia de una sequía depende de la evapotranspiración y el déficit de precipitación.

Finalmente, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [Senamhi] (2016), define sequía como la ocurrencia de disponibilidad de agua por debajo del promedio natural de manera sostenida y a escala regional, considerada a su vez como componente natural del clima. Se encuentra generalmente asociada a precipitaciones escasas continuas, baja humedad del suelo o disponibilidad de agua, en relación a los niveles normales en una determinada localidad.

La definición de sequías establecida por Faiz et al., (2022) nos permite conceptualizar a las sequías como un peligro que debe ser abordado y un fenómeno complejo que debe ser estudiado más aún en un escenario de cambio climático. El autor categoriza de manera concreta los diferentes tipos de sequía, sin embargo, en la investigación se analizó dos tipos de sequía la hidrológica y meteorológica (dimensiones de la investigación), debido a la disponibilidad de datos.

### **i. Sequía Meteorológica**

Este tipo de sequía involucra una reducción en la precipitación en algún periodo (día, mes, temporada, año) por debajo de una cantidad determinada, definida como alguna proporción del promedio a largo plazo para un período

de tiempo específico (Predes, 2017). La principal causa de esta sequía es el déficit de precipitación sobre un área extensa, este déficit se encuentra expresado como un valor relativo respecto a las condiciones normales (Senamhi, 2016).

El indicador a conceptualizar es el siguiente:

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

El índice de precipitación estándar (SPI) por sus siglas en inglés, es un índice de probabilidad que brinda una representación de los periodos secos y húmedos anormales, cuantificando el déficit de precipitación a distintas escalas de tiempo. El SPI está basado únicamente en la precipitación y provee una medida de la precipitación de agua mas no considera la evapotranspiración. Aun así, la Organización Meteorológica Mundial, recomienda que todos los servicios meteorológicos e hidrológicos deben de utilizar el índice de Precipitación Estandarizado para el monitoreo de sequía a nivel nacional. Además; el índice SPI permite determinar la intensidad del evento de sequía y los periodos de retorno del mismo (Senamhi, 2016).

**ii. Sequía Hidrológica**

Este tipo de sequía hace referencia a una reducción en los recursos acuáticos por debajo de un nivel determinado para un periodo dado de tiempo. Solo representa datos de disponibilidad y tasas de consumo basadas en el suministro normal del sistema, es decir; uso doméstico, industrial y agrícola (Predes, 2017).

Según el Ministerio de Defensa Bolivia (2012), la sequía hidrológica es la deficiencia del caudal o volumen de agua superficial o subterránea. Este tipo de sequía es precedida por la sequía meteorológica.

El indicador a conceptualizar es el siguiente:

**a. Índice de Estandarizado de Caudal (SSI)**

Este índice es también conocido como Índice de sequía hidrológica de caudal y su metodología es la misma que se usa en el SPI (Índice de

precipitación estándar), siendo su primer paso la conversión a una escala mensual promedio (mm/mes) (Senamhi, 2016).

### **2.2.2. Modelo Hidrológico**

Según Hagen et al., (2021) los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas del ciclo hidrológico terrestre y juegan un papel importante en muchas áreas de la hidrología, como la alerta y la gestión de inundaciones, la agricultura, el diseño de represas, los estudios de impacto del cambio climático, etc. Los modelos hidrológicos generalmente tienen dos propósitos: (1) permitir el razonamiento, es decir, formalizar nuestra comprensión científica de un sistema hidrológico y/o (2) proporcionar predicciones climáticas (generalmente fuera de nuestro rango de observaciones, a corto plazo frente a largo plazo, o para simular variables adicionales).

Por otro lado, también se define al modelo hidrológico como una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo una fórmula física o matemática. Este sistema se encuentra representado por una expresión analítica y consta a su vez, de un conjunto de parámetros que permiten su ajuste y de un conjunto de constantes y condiciones iniciales específicas. El modelo hidrológico representa la cuenca hidrográfica y cada uno de sus componentes, haciendo uso del modelo matemático, el cual ayuda a la toma de decisiones en materia de hidrología (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2014).

De la misma forma; Shen et al., (2022) define modelos hidrológicos como las representaciones conceptuales de procesos hidrológicos que varían espacial y temporalmente.

En base a lo descrito por Hagen et al., (2021) resalta la utilidad de los modelos hidrológicos en la ciencia, en especial hidrología, ya que según el autor el modelado hidrológico permite comprender los procesos del ciclo hidrológico de la cuenca. Esta comprensión será a través de la representación del sistema hidrológico de una cuenca lo que permitiría incluso analizar los procesos hidrológicos bajo proyecciones climáticas; razón por la cual estas dos funciones

del modelo hidrológico se configuran como las dimensiones en esta investigación:

### **i. Representación del Sistema Hidrológico:**

Es la representación del ciclo hidrológico de una cuenca, en función a los procesos de lluvia-escorrentía, evaporación, infiltración, etc; esta representación se puede llevar a cabo a través de un modelo que requiere datos atmosféricos (por ejemplo, lluvia y temperatura), mientras que la parametrización del modelo incluye características de la cuenca hidrográfica como el relieve topográfico, la geomorfología, el lecho rocoso, el suelo y las propiedades de la vegetación (es decir, modelos basados en conceptos físicos). (Mokrane, 2019).

Es por ello que los indicadores a conceptualizar son los siguientes:

#### **a. Precipitación**

El término precipitación se utiliza en meteorología para referirse a todos los fenómenos de la caída de agua del cielo en cualquier forma: lluvia, granizo, nieve. La lluvia (P) que cae sobre la superficie se reparte entre la evaporación (E) y la escorrentía (R) con cambios en la humedad del suelo (S) y la masa de nieve (N) (Pitman, 2012).

#### **b. Temperatura**

La temperatura es un índice indicativo del calentamiento o enfriamiento del aire que resulta del intercambio de calor entre la atmósfera y la tierra.

#### **c. Modelo de Digital de Elevación (DEM)**

DEM es una herramienta valiosa para la parametrización topográfica (Pandey 2016).

#### **d. Tipo de Suelo**

Generalizaciones útiles acerca de la pedogénesis de suelos en relación con las interacciones de los factores principales formadores del suelo (FAO).

### **e. Tipo de Cobertura Vegetal**

La cobertura vegetal es una práctica importante en el manejo agronómico de cualquier cultivo, especialmente de hortalizas, ya que normalmente son áreas pequeñas establecidas en suelos áridos, arenosos y con problemas de escasez de agua.

## **ii. Proyecciones Climáticas**

Son tendencias climáticas futuras, las cuales se representan a través de modelos climáticos globales Caprario et al., (2022).

Los escenarios globales o proyecciones climáticas han respaldado la investigación y la evaluación del cambio climático global en las últimas décadas. Estos han sido el componente clave de la investigación del cambio global (O'Neill et al., 2020). Según United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2012), los escenarios del cambio climático son herramientas que sirven para ayudar a visualizar el posible cambio que pueden tener los climas regionales frente al incremento de las altas concentraciones de gases de efecto invernadero asimismo entender y evaluar la afección que pueden padecer los sistemas sensibles por el cambio climático inducido por el hombre, para establecer medidas de mitigación y adaptación.

El indicador a conceptualizar es el siguiente:

### **a. Modelos Climáticos Globales**

Son herramientas apropiadas para simular cambios en la circulación atmosférica y comprender cómo podría ser el clima en el futuro (Birara et al., 2020)

Los modelos climáticos globales (GCM) o modelos de circulación global (GCM) son herramientas necesarias para determinar el comportamiento climático a diferentes escalas temporales, además de conocer el grado en el que se perciben (Ramos, 2014). Los modelos se emplean comúnmente para determinar la relación futura entre la temperatura y la precipitación (Pons et al., 2018).

Pons et al. (2018), menciona que los modelos de circulación general poseen una base científica y computacional que permiten integrar la mayoría de los componentes climáticos. De acuerdo a Ruíz et al. (2018) los modelos climáticos son básicamente simulaciones, las cuales permiten predecir, determinar e identificar diversos cambios del sistema climático a partir de observaciones de la superficie o desde un satélite.

## **2.3. Base Conceptual**

### **2.3.1. Sequías**

#### **i. Teoría**

Las sequías al ser un proceso del ciclo hidrológico se estudian en base a un enfoque interdisciplinar porque en el análisis de sequías intervienen ciencias como la geomorfología, la hidrología, meteorología y ciencias de la tierra. Además, tienen un enfoque holístico ya que las sequías son parte de un proceso global que es el ciclo hidrológico.

#### **ii. Tipos de Sequías**

##### **a. Sequía Hidrológica**

Hace referencia a una reducción en los recursos acuáticos por debajo de un nivel determinado para un periodo dado de tiempo. Solo representa datos de disponibilidad y tasas de consumo basadas en el suministro normal del sistema, es decir; uso doméstico, industrial y agrícola (Predes, 2017). Según el Ministerio de Defensa Bolivia (2012), la sequía hidrológica es la deficiencia del caudal o volumen de agua superficial o subterránea.

##### **b. Sequía Agrícola**

Es un periodo con disminución en la humedad del suelo siendo insuficiente para mantener los cultivos adecuadamente. Debido a la incertidumbre de la cantidad de agua necesaria para un cultivo, ya que es variable, no es posible establecer umbrales de sequía agrícola (Senamhi, 2016).

### **c. Sequía Socioeconómica**

Se le denomina sequía socioeconómica debido a que al disminuir el agua se generan daños económicos o personales en la zona afectada (Ministerio de Defensa Bolivia, 2012). No es necesario que se produzcan restricciones en el suministro del agua para denominarse sequía socioeconómica, basta con la afección de algún sector económico, por la escasez hídrica con consecuencias económicas desfavorables.

### **d. Sequía Meteorológica**

Este tipo de sequía involucra una reducción en la precipitación en algún periodo (día, mes, temporada, año) por debajo de una cantidad determinada, definida como alguna proporción del promedio a largo plazo para un período el tiempo específico (Predes, 2017). La principal causa de esta sequía es el déficit de precipitación sobre un área extensa, este déficit se encuentra expresado como un valor relativo respecto a las condiciones normales (Senamhi, 2016).

### **iii. Índices de Sequías**

La Organización Meteorológica Mundial [OMM] y Asociación Mundial para el Agua (2016), menciona la importancia de definir las diferencias entre indicadores e índices de sequía, que se definen a continuación:

**Indicadores:** son variables o parámetros utilizados que se emplean para describir las condiciones de las sequías.

**Índices:** son representaciones numéricas que informan de la gravedad de las sequías, las cuales son determinadas mediante datos climáticos o hidrometeorológicos. Vigila el clima en diversas escalas temporales y facilita reconocer los periodos húmedos de corta duración dentro del proceso de las sequías de larga duración o los períodos secos de corta duración.

No existe un índice o indicador que pueda atribuirse y ser aplicado a todos los tipos de sequías, regímenes climáticos y sectores afectados por las sequías. Por lo tanto, es necesario identificar qué tipo de sequía y elemento

desencadenante es el más adecuado para una determinada necesidad, ya que afectan muchos factores.

El índice más sencillo de utilizar suele ser aquel que ya se produce de manera operativa y es de libre utilización, pero no necesariamente el más idóneo. La decisión de qué indicador se debe emplear es tomada por los usuarios a las escalas regionales, nacionales o locales.

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

El índice de Precipitación Estándar (SPI), es un índice de probabilidad que brinda una representación de los periodos secos y húmedos anormales, cuantificando el déficit de precipitación a distintas escalas de tiempo. El SPI está basado únicamente en la precipitación y provee una medida de la precipitación de agua sin considerar la evapotranspiración. Aun así, la Organización Meteorológica Mundial, recomienda que todos los servicios meteorológicos e hidrológicos deben de utilizar el índice de precipitación estandarizado para el monitoreo de sequías a nivel nacional. Además; el índice SPI permite determinar la intensidad del evento de sequía y los periodos de retorno del mismo (Senamhi, 2016).

Función de Densidad de Probabilidad  $g(x)$  se expresa de la siguiente forma:

$$g[x] = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}, x > 0 \quad ; \quad \Gamma(x) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-t} e^{-x} dx$$

Donde:

$x$  = Precipitación acumulada.

$\Gamma(x)$  = Función gamma.

$\alpha$  y  $\beta$  = parámetros de forma y escala respectivamente, estimados por el método de máxima verosimilitud, expresados a continuación:

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A}, \quad \beta = \frac{x}{a} \quad A = \ln \ln (\underline{x}) + \frac{\sum \ln \ln (x)}{n}$$

**Donde:**

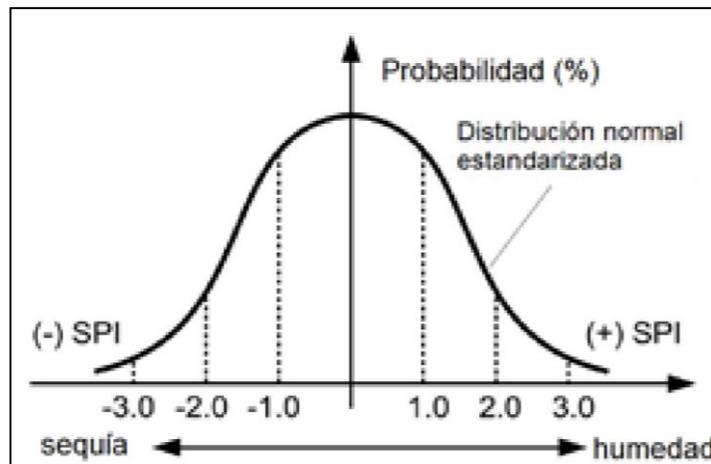
$n$  = Longitud de la serie de tiempo (meses).

La probabilidad acumulada de precipitación “ $x$ ” en la escala de tiempo dada es expresada a continuación:

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

**Figura 1**

*Distribución normal de precipitación estandarizada SPI*



*Nota.* distribución normal similar a la campana de gauss.

Si  $t = x / \beta$ , la ecuación inicial  $g(x)$ , se transforma en una función gamma incompleta:

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

La ecuación anterior muestra la situación extrema donde la precipitación mensual acumulada  $x = 0$ . Como resultado, es modificada como  $H(x)$ :

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

**Donde:**

$q$  = probabilidad de  $x=0$

El índice de precipitación estandarizada (SPI) se expresa como:

$$SPI = \left\{ - \left( t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \quad t = \sqrt{\ln \ln \left( \frac{1}{H_{(x)}^2} \right)}, \right.$$

$$0 < H_{(x)} < 0.5 \quad t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3},$$

$$t = \sqrt{\ln \ln \left( \frac{1}{(1 - H_{(x)}^2)} \right)}, \quad 0.5 < H_{(x)} \leq 1$$

Donde:

$$c_0 = 2.515517$$

$$c_1 = 0.802853$$

$$c_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788$$

$$d_2 = 0.189269$$

$$d_3 = 0.001308$$

### **b. Índice de Estandarizado de Caudal (SSI)**

El estudio de la sequía hidrológica mediante el índice de estandarizado de caudal o escurrimientos (SSI), fue desarrollado por Nalbantis y Tsakiris (2009); que permite determinar un evento seco a partir de los datos de caudal o escurrimiento; utilizando como base la metodología y los cálculos del índice SPI (OMM, 2016). Cabe mencionar que ambos índices pueden ser ejecutados en lenguajes de programación como Matlab o R Studio. Donde el último tiene una librería llamada "SPI", que tiene incluida toda la metodología estadística. Las escalas que arroja como salida son de 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24 y 48 meses,

Para estimar este índice, requiere contar con una serie de escurrimiento o caudal mensual con registros continuos de 20 a 25 años para que el análisis sea estable (OMM, 2016). El SSI se define como:

$$SSI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - V_k}{S_K}$$

Donde  $V_{i,k}$  es el volumen de escurrimiento acumulado en el año  $i$  trimestre  $k$ , es la media observada para el trimestre acumulado  $k$  y  $S_k$  Es la desviación estándar en el periodo  $k$ .

Los valores que definen los estados de la sequía hidrológica mediante el uso del índice SSI se muestran en la tabla 1. En donde podemos observar que estos estados están asociados a una probabilidad y un periodo de retorno.

**Tabla 1**

*Definición de los estados de la sequía hidrológica mediante el SSI*

<b>Estado</b>	<b>Descripción</b>	<b>Criterio</b>	<b>Probabilidad (%)</b>	<b>Tr (años)</b>
0	Sin sequía	$SSI \geq 0.0$	50.0	2.0
1	Sequía suave	$-1.0 \leq SSI < 0.0$	34.1	2.9
2	Sequía moderada	$-1.5 \leq SSI < -1.0$	9.2	10.7
3	Sequía severa	$-2.0 \leq SSI < -1.5$	4.4	22.7
4	Sequía extrema	$SSI < -2.0$	2.3	43.5

*Nota.* Tomado de López et al., (2016).

#### **iv. Clima y Cambio Climático**

##### **a. Clima**

El clima junto al relieve es uno de los elementos principales del medio físico en la configuración de los espacios geográficos. Además, es considerado un componente fundamental para la conformación de los paisajes vegetales, ecosistemas animales y la vida de los seres humanos en la tierra. Al mismo tiempo, los climas tienen un componente salúfero, el cual varía

constantemente, haciendo más confortable la estancia en los territorios (Olcina, 2020; Karnataka, 2014).

## **b. Cambio Climático**

El cambio climático es la variabilidad del sistema climático que incluye la atmósfera, los ciclos biogeoquímicos, la superficie terrestre, el hielo y los componentes bióticos y abióticos del planeta tierra. El impacto del cambio climático se manifiesta con el incremento de la temperatura, el cual pasa a formar el Calentamiento Global (Mukhtar, 2020).

El cambio climático viene siendo tema de interés en el campo de las ciencias sociales y ciencias aplicadas. Debido a los recientes eventos climáticos extremos, que incluyen olas de calor y cambios en los patrones de lluvia; los ciclos climáticos globales y los sistemas mundiales de producción de alimentos están siendo amenazados (Mukhtar, 2020), colocando así al cambio climático actual como parte de los temas principales de investigación en el mundo por los efectos que ejerce en los elementos atmosféricos. Además de ellos el cambio climático producto del efecto invernadero, ha abierto enormes posibilidades de investigación que se han unido a la labor habitual de descripción de fenómenos y elementos del clima en el espacio geográfico (Olcina, 2020).

Los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) han mostrado evidencias sobre el incremento de eventos meteorológicos extremos y cambios abruptos del clima, estos son altamente inusuales provocando que grandes inundaciones y fuertes sequías sin dar tiempo a una posible adaptación al incremento de la frecuencia de los eventos extremos (Havrylenko, 2014).

## **v. Normativa Legal**

La ley N.º 30754 Ley Marco sobre el Cambio Climático promulgada en el 2018 tiene como objetivo establecer los principios, enfoques y disposiciones generales para coordinar, articular, diseñar, ejecutar, reportar, monitorear, evaluar y difundir las políticas públicas para la gestión integral, participativa y

transparente de las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático, a fin de reducir la vulnerabilidad del país al cambio climático, aprovechar las oportunidades del crecimiento bajo en carbono y cumplir con los compromisos internacionales asumidos por el estado ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, con enfoque intergeneracional.

Así mismo el principio de transparencia, se establece que el estado debe disponer públicamente toda la información relacionada al cambio climático.

Por otro lado, en el artículo 66; la Autoridad Nacional, en este caso el Ministerio del Ambiente es responsable de promover y realizar investigación científica y desarrollo tecnológico para la mitigación y adaptación al cambio climático, a través de sus entidades adscritas y especializadas, considerando los conocimientos tradicionales de los pueblos indígenas u originarios.

De la misma forma, la Ley N° 29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), en su artículo 1; establece que la finalidad de dicha ley es identificar y reducir los riesgos asociados a peligros o minimizar sus efectos, así como evitar la generación de nuevos riesgos, y preparación y atención ante situaciones de desastre mediante el establecimiento de principios, lineamientos de política, componentes, procesos e instrumentos de la gestión del riesgo de desastres.

Finalmente, según la Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos, en el Eje de Política 5, denominado adaptación al cambio climático y eventos extremos; ante los impactos actuales y futuros del cambio climático en los recursos hídricos, tiene como finalidad reducir la vulnerabilidad de la población, actividades económicas y ecosistemas, bajo el enfoque de la gestión integrada de los recursos hídricos y gestión de riesgos de desastres.

### **2.3.2. Modelo Hidrológico**

#### **i. Teoría**

El modelo hidrológico tiene como función la representación de una cuenca, esta representación se basa en un enfoque sistémico, el cual tiene entradas y salidas, para el caso del ciclo hidrológico representado en un modelo, las

entradas son los datos climáticos, hidrológicos y cartográficos; y las salidas son los caudales.

## **ii. Modelos Climático Global**

Mukhtar (2020), menciona que la opción de mitigación de efectos del cambio climático incluye comprender los componentes presentes y futuros del sistema climático y la interacción entre ellos a través del sistema de modelado acoplado, es decir, el Modelo de Circulación Global (GCM).

Los Modelos Climáticos Globales (GCM) son herramientas necesarias para determinar el comportamiento climático a diferentes escalas temporales, además de conocer el grado en el que se perciben (Ramos, 2014). Estos modelos se emplean comúnmente para determinar la relación futura entre la temperatura y la precipitación (Pons et al., 2018).

Pons et al. (2018), menciona que los modelos de circulación general poseen una base científica y computacional que permite integrar la mayoría de los componentes climáticos. De acuerdo a Ruíz et al. (2018) los modelos climáticos son básicamente simulaciones, las cuales permiten predecir, determinar e identificar diversos cambios del sistema climático a partir de observaciones de la superficie o desde un satélite.

Según Pérez et al. (2016), los GCM son capaces de simular la variabilidad climática por lo que se considera que pueden responder mejor a las condiciones cambiantes; además pueden ser usados para conectar predicciones de gran escala, mediante el método de regionalización.

### **a. CMIP5**

La quinta fase del Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5 por sus siglas en inglés) se desarrolló en continuación a ediciones anteriores de modelos climáticos con el objetivo de intentar comprender los mecanismos que causan diferencias entre los modelos forzados, en especial el mecanismo de retroalimentación del ciclo del carbono y la simulación de las nubes. El CMIP5 es considerado a diferencia de otros modelos como el CMIP3

como uno de los menores, ya que presenta una ligera mejoría al simular ciertas propiedades de las nubes (Enríquez, 2016)

Los datos de proyecciones de escala reducida diarias globales de NASA Earth Exchange (NEX-GDDP) incluyen proyecciones reducidas para dos de los cuatro escenarios de emisiones de GEI, conocidos como vías de concentración representativas RCP 4.5 y RCP 8.5 de los 21 modelos para los que se desarrollaron y distribuyeron en escenarios diarios bajo el modelo acoplado perteneciente a la quinta fase CMIP5. Estos datos se componen de escenarios climáticos a escala reducida mundialmente derivadas de las ejecuciones del modelo de circulación global (GCM) realizadas bajo el modelo CMIP5. En la **Tabla 2** se muestran los 21 GCM del CMIP5.

**Tabla 2***Descripción de los 21 modelos de circulación global*

---

<b>Modelos</b>	<b>Organización</b>
ACCESS1.0	Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth de Australia
BNU-ESM	Universidad Normal de Beijing de China
CCSM4	Centro Nacional de Investigación Atmosférica de EE. UU.
CESM1-BGC	Centro Nacional de Investigación Atmosférica de EE. UU.
CNRM-CM5	Formación Avanzada en Computación Científica de Francia
CSIRO-Mk3.6	Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth de Australia
CanESM2	Centro Canadiense de Análisis y Modelización del Clima de Canadá
GFDL-CM3	Laboratorio de dinámica de fluidos geofísica de EE. UU.
GFDL-ESM2G	Laboratorio de dinámica de fluidos geofísica de EE. UU.
GFDL-ESM2M	Laboratorio de dinámica de fluidos geofísica de EE. UU.
IPSL-CM5A- LR	Instituto Pierre Simon Laplace de Francia
IPSL-CM5A- MR	Instituto Pierre Simon Laplace de Francia
MIROC-ESM CHEM	Instituto de Investigación Atmosférica y Oceánica (Universidad de Tokio) de Japón
MIROC-ESM	Instituto de Investigación Atmosférica y

---

<b>Modelos</b>	<b>Organización</b>
	Oceánica (Universidad de Tokio) de Japón
MIROC5	Instituto de Investigación Atmosférica y Oceánica (Universidad de Tokio) de Japón
MPI-ESM-LR	Instituto de Investigación Atmosférica y Oceánica (Universidad de Tokio) de Japón
MPI-ESM-MR	Instituto Max Planck de Meteorología de Alemania
MRI-CGCM3	Instituto Max Planck de Meteorología de Alemania
NorESM1-M	Instituto de Investigaciones Meteorológicas de Japón
bcc-csm1-1	Centro Bjerknes para la Investigación del Clima, Instituto Meteorológico de Noruega
inmcm4	Academia de Ciencias de Rusia, Instituto de Matemáticas Numéricas de Rusia

*Nota.* La tabla muestra los 21 modelos climáticos globales que tiene el CMIP5 con sus respectivas organizaciones. Adaptado de “Projection of China’s Near- and Long-Term Climate in a New High-Resolution Daily Downscaled Dataset NEX-GDDP” (p.15) por Bao y Wen (2017).

### **b. Escenarios de Cambio Climático**

Los escenarios globales han respaldado la investigación y la evaluación del cambio climático global en las últimas décadas. Estos han sido el componente clave de la investigación del cambio climático global (O'Neill et al., 2020).

Según United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (2012), los escenarios del cambio climático son herramientas que sirven para ayudar a visualizar el posible cambio que pueden tener los climas

regionales frente al incremento de las altas concentraciones de gases de efecto invernadero, asimismo entender y evaluar la afección que pueden padecer los sistemas sensibles por el cambio climático inducido por el hombre, para establecer medidas de mitigación y adaptación.

### **c. Trayectorias de Concentración Representativas**

Cada Modelo de Concentración Global (MCG) cuenta con dos diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero denominadas trayectorias o rutas de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés) para las proyecciones a mediados de siglo: RCP 4.5 (proyección de emisión media) y RCP 8.5 (proyección de emisión alta) (Wilsey, y otros, 2019).

Según Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2014), las denominadas trayectorias de concentración representativas (RCP), se caracterizan por su comportamiento radiativo (FR), con un total para el año 2100 que oscilan entre 2.6 y 8.5 W/m<sup>2</sup>.

Las trayectorias de concentración representativas (RCP), se establecieron con el fin de representar cuatro escenarios de desarrollo futuro de acuerdo a emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero, uso del suelo y forzamiento radiativo atmosférico (Munévar y Saavedra, 2020), ver Tabla 3.

**Tabla 3***Trayectorias de concentración representativas RCPs – escenarios actuales*

<b>Escenario</b>	<b>FR</b>	<b>Tendencia del FR</b>	<b>[CO<sub>2</sub>] en 2100</b>
RCP 2.6	2.6 W/m <sup>2</sup>	decreciente en 2100	421 ppm
RCP 4.5	4.5 W/m <sup>2</sup>	estable en 2100	538 ppm
RCP 6.0	6.0 W/m <sup>2</sup>	creciente	670 ppm
RCP 8.5	8.5 W/m <sup>2</sup>	creciente	936 ppm

*Nota.* Adaptado de “Nuevos Escenarios de Emisión:RCPs” por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España (2021).

#### **d. Reducción de Escala o Downscaling**

Según Muévar y Saavedra (2020), los Modelos de Circulación Global a pesar de ser herramientas valiosas de predicción del clima en el futuro no predicen las diferencias de la variabilidad climática, ya que sus resoluciones espaciales se encuentran oscilando entre 100 a 500 km. Si se deseara utilizar esta variable como dato de entrada para un modelo de impacto, los resultados serían ineficaces, debido a que la información que brinda del clima no es precisa. Si bien es posible basar la información climática a pequeña escala, en el supuesto de que el clima local está condicionado por interacciones entre condiciones atmosféricas a gran escala y características locales, la modelación de esta correlación entre el clima actual y las condiciones atmosféricas a gran escala, sólo resultaría posible a través de la reducción de escala (downscaling).

De acuerdo a Ruíz et al. (2018), el downscaling estadístico es considerada una de las técnicas más empleadas en la reducción de escala de los resultados de los MCG, debido a que este modelo se ajusta respecto al clima

actual, aplicando posteriormente para proyectar localmente las simulaciones futuras. Además, esta técnica estadística se encarga de medir todas las variaciones climáticas con proyección hacia el futuro. Esta técnica se caracteriza por establecer relaciones empíricas entre campos de baja resolución llamados predictores y las variables de superficie llamadas predictandos.

Otra de las técnicas de reducción de escala es el downscaling dinámico, que consiste en obtener campos de alta resolución a partir de un modelo climático regional dentro del MCG. A pesar de que ambos modelos han sido usados ampliamente, tiene limitaciones en datos que no pueden ser verificados en el contexto de cambio climático, representando así, incertidumbre manifestada en las simulaciones finales del clima (Munévar y Saavedra, 2020).

#### ● **Mapeo Cuartil Estándar**

Guanuchi (2015) define el mapeo cuartil estándar como una técnica de reducción al igual que el downscaling estadístico que a diferencia del último, permite aplicar una función a los resultados obtenidos del downscaling, que a su vez es determinada previamente generando una corrección de su distribución haciéndola más precisa y semejante a los datos observados. El método implementa transformaciones estadísticas de post procesamiento, es capaz de transformar funciones de distribución de las variables modeladas en la observación, a través de una ecuación matemática (Enayat et al., 2021). Además, es utilizada generalmente para corregir sesgos sistemáticos de simulaciones de modelos climáticos y para reducir la escala de las variables de salida de los MCG (Munévar y Saavedra, 2020).

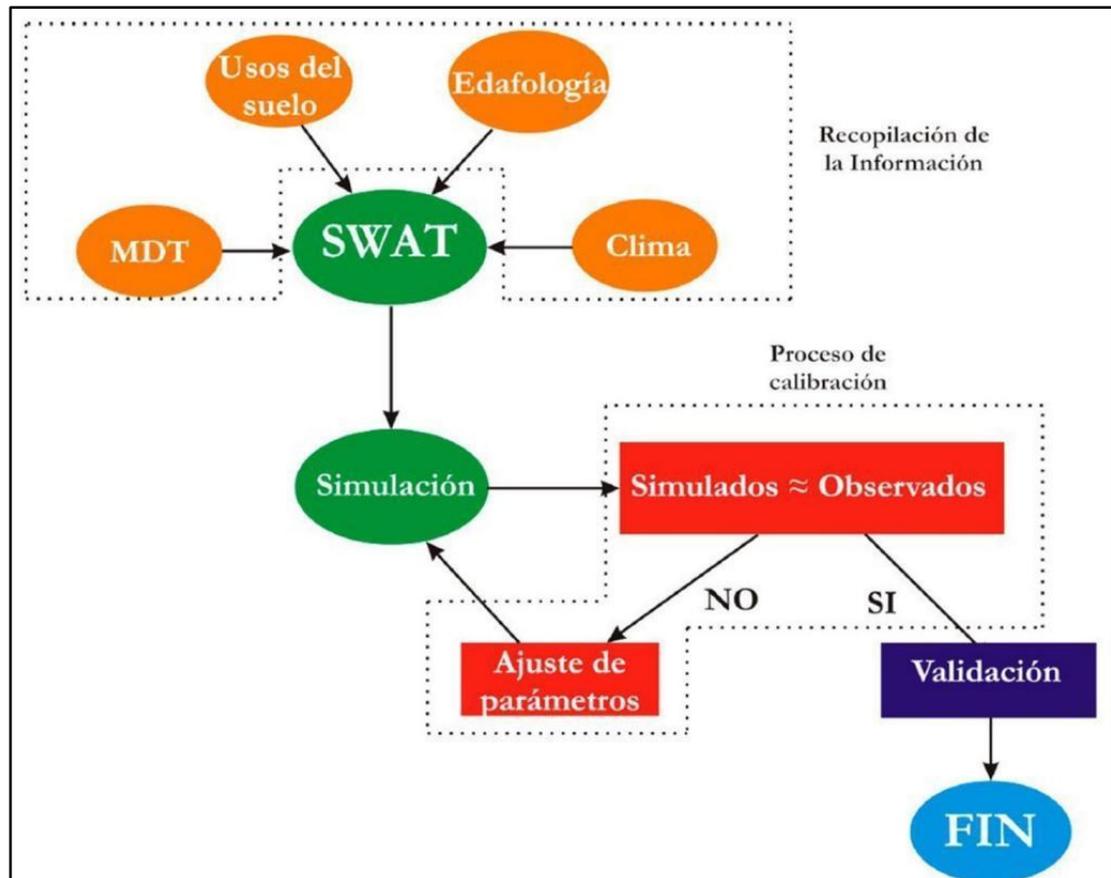
### **iii. Modelo Hidrológico SWAT**

El modelo hidrológico SWAT es un modelo gratuito desarrollado conjuntamente por el Servicio de Investigación Agrícola (USDA-ARS) y la Universidad de Texas (Martínez, 2014). Este modelo incorpora características

de varios modelos hidrológicos y ha sido aplicado y validado en diversas cuencas hidrológicas. (Havrylenko, 2014).

**Figura 2**

*Esquema de validación del modelo SWAT*



*Nota.* Tomado de “Utilización del programa swat para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas” p. 12 por De Villarán, (2017).

El modelo se encuentra basado en la siguiente ecuación general de balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t-1}^t (R_{day} - Q_{surt} - E_a - w_{seep} - Q_{qw})$$

**Donde:**

SW<sub>t</sub> = Contenido final de agua en el suelo (mmH<sub>2</sub>O).

SW<sub>0</sub> = Contenido de agua inicial en el día i (mmH<sub>2</sub>O); tes el tiempo (día);

Rday= Cantidad de precipitación en el día i (mmH<sub>2</sub>O).

Qsurf= Cantidad de escorrentía superficial por día (mmH<sub>2</sub>O).

Wseep= Cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mmI-120).

Qgw= cantidad de flujo de retomo en el día i (mmI-120).

### **a. Características del Modelo Hidrológico**

El modelo hidrológico cuenta con las siguientes características:

- El modelo se encuentra basado en la incorporación de ecuaciones de regresión entre las variables de la data de entrada y de salida, es necesaria la información específica del clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación y manejo de prácticas del suelo
- Es computacionalmente eficiente.
- Tiene entre sus beneficios modelar grandes cuencas que no cuentan con data de monitoreo o histórica completa.
- Es un modelo de tiempo continuo, no está diseñado para simular eventos singulares.

### **b. Datos de Entrada**

Según Valverde (2018), el modelo hidrológico SWAT requiere información precisa del clima, tiempo, propiedad de los suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de la tierra. La simulación realizada por el modelo hidrológico SWAT a diferencia de otros, no toma mucho tiempo y permite el estudio de impactos a largo plazo. Este tipo de modelo hidrológico ha ayudado a comprender el complejo ecosistémico respecto a la disponibilidad y calidad del agua. Según Uribe (2010), los datos de entrada son los siguientes:

- Modelo digital de elevación (curvas de nivel).
- Cobertura y uso de la tierra.
- Información básica del suelo (mapa de suelos).

- Tabla de localización (puntos de recolección de datos de la lluvia, clima, temperatura o localización de estaciones meteorológicas).
- Atributos del uso del suelo.
- Tabla de datos de precipitaciones.
- Tabla de datos de temperatura.

### c. Métricas de Desempeño

Las métricas de desempeño conocidos como criterios de desempeño cuentan con la capacidad para representar adecuadamente la realidad y son usados en diferentes fases de la modelación, como calibración, validación, optimización y evaluación de incertidumbre. Los resultados obtenidos manifiestan el grado de fiabilidad y la precisión del modelo utilizado.

Existe una gran gama de estas métricas, algunas ampliamente conocidas como el error cuadrático medio (RMSE) y el índice Nash-Sutcliffe.

Según Abbaspour (2015), actualmente se encuentran permitidas diez funciones:

#### Función 1:

$$g = \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{n_Q} \times \frac{\sum_i (S_m - S_s)_i^2}{n_S} \times \frac{\sum_i (N_m - N_s)_i^2}{n_N} \times \dots$$

Esta es una forma multiplicativa del error cuadrático.

**Donde:**

**n=** Es el número de observaciones.

**Q, S y N=** Variables.

**“m y s”** = Representan medidas y simulaciones las que se dividen por 1000 para mantener el valor de “g” pequeño.

$$g = w_1 \sum_{i=1}^{n_1} (Q_m - Q_s)_i^2 + w_2 \sum_{i=1}^{n_2} (S_m - S_s)_i^2 + w_2 \sum_{i=1}^{n_2} (S_m - S_s)_i^2 + w_2 \sum_{i=1}^{n_2} (N_m - N_s)_i^2 + \dots$$

**Donde:**

**W=** Pesos.

**n=** Es el número de observaciones.

**Q, S y N=** Variables.

**“m y s”** = Representan medidas y simulaciones.

Los pesos se calculan de la siguiente forma:

$$i) \omega_j = \frac{1}{n_j \sigma_j^2}$$

**Donde:**

$\sigma$  = Es la varianza de la j.

$$\omega_1 = 1 \quad ; \quad \omega_2 = \underline{Qm} / \underline{Sm} \quad ; \quad \omega_3 = \underline{Qm} / \underline{Nm}$$

**Función 2:**

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_i (Q_{m,i} - \underline{Qm})(Q_{s,i} - \underline{Qs}) \right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \underline{Qm})^2 \sum_i (Q_{s,i} - \underline{Qs})^2}$$

Coefficiente de determinación  $R^2$  donde:

**Q** = Variable (por ejemplo, descarga).

**“m y s”** = Significan medidos y simulados.

**i** = lésimo dato medido o simulado.

Si hay más de una variable, entonces la función objetivo se define como:

$$g = \sum_j \omega_j R_j^2$$

**Donde:**

**W<sub>j</sub>** = Peso de la variable j.

**Función 3:**

$$X^2 = \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sigma_m^2}$$

**Donde:**

**Q** = Variable (p. ej., descarga).

**“m y s”** = Representan medidos y simulados respectivamente.

$\sigma_m^2$  = Varianza de los datos medidos.

Si hay más de una variable, entonces la función objetivo se calcula como:

$$g = \sum_j \omega_j X_j^2$$

**Donde:**

**W** = Es el peso de j.

**Función 4:**

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}$$

**Donde:**

**Q** = Variable (p. Ej., Descarga).

**m y s** = Representan medido y simulado, respectivamente, y la barra representa el promedio.

Si hay más de una variable, entonces la función objetivo se define como:

$$g = \sum_j \omega_j NS_j$$

**Donde:**

**W** = Peso de j.

**Función 5:**

$$\phi = \{ |b|R^2 \quad \text{si } |b| \leq 1 \quad |b|^{-1} R^2 \quad \text{si } |b| > 1$$

**Donde:**

**R2** = Coeficiente de determinación, este se multiplica por el coeficiente de la línea de regresión entre los datos medidos y simulados.

**b** = Esta función permite tener en cuenta la discrepancia en la magnitud de dos señales (representada por b) así como su dinámica (representada por R2).

Si hay más de una variable, la función objetiva se expresa como en el caso de múltiples variables. Por lo que g se define como:

$$g = \sum_j w_j \Phi_j \cdot$$

**Donde:**

$w_j$  = Peso de la variable j.

**Función 6:**

$$SSQR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_{i,m} - Q_{i,s}]^2$$

**Donde:**

**Q** = Es una variable (por ejemplo, descarga).

**“m y s”** = Representan medido y simulado, respectivamente.

En el caso de múltiples variables, g se define como:

$$g = \sum_j w_j SSQR_j$$

**Donde:**

**W<sub>j</sub>** = Peso de la variable j

**Función 7:**

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^n Q_{m,i}}$$

**Donde:**

**Q** = Es una variable

“**m y s**” = Representan medido y simulado, respectivamente.

El sesgo porcentual mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o más pequeños que los datos observados. El valor óptimo es cero, donde los valores de magnitud baja, indican mejores simulaciones; los valores positivos indican una subestimación del modelo y los valores negativos indican una sobreestimación del modelo. En el caso de múltiples variables, g se define como:

$$g = \sum_j w_j PBIAs_j$$

**Donde:**

**W<sub>j</sub>** = Peso de la variable j

**Función 8:**

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

**Donde:**

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_m}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_m}$$

**r** = Coeficiente de regresión lineal entre la variable simulada y medida.

**μ<sub>s</sub> y μ<sub>m</sub>** = Medias de los datos simulados y medidos.

**σ<sub>s</sub> y σ<sub>m</sub>** = Desviación estándar de los datos simulados y medidos.

En el caso de múltiples variables, g se define como:

$$g = \sum_j w_j KGE_j$$

**Donde:**

**W<sub>j</sub>** = Peso de la variable j.

### **Función 9:**

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \underline{Q}_m)^2}}$$

**Donde:**

**Q** = Variable (por ejemplo, descarga).

**“m y s”** = Representan medido y simulado, respectivamente.

**RSR** = Estandariza el RMSE utilizando la desviación estándar de observación.

RSR es bastante similar a Chi en 4. Varía de 0 a valores positivos grandes.

Cuanto menor sea el RSR, mejor será el ajuste del modelo.

En el caso de múltiples variables, g se define como:

$$g = \sum_j w_j RSR_j$$

**Donde:**

**W<sub>j</sub>** = Peso de la variable j.

### **Función 9:**

$$NS = 1 - \frac{\sum_i |Q_m - Q_s|_i^p}{\sum_i |Q_{m,i} - \underline{Q}_m|_i^p}$$

**Donde:**

**NS** = Factor de eficiencia de Nash - Sutcliffe modificado.

Si p = 2, entonces esto es simplemente NS como mayor de 5.

Si p = 1, la sobreestimación de un pico se reduce significativamente.

Se informa que la forma modificada es más sensible a una predicción excesiva o insuficiente significativa que la forma cuadrada. Aumentar el valor de p más

allá de 2 da como resultado un aumento en la sensibilidad a los caudales altos y podría usarse cuando solo los caudales altos son de interés, por ejemplo, para la predicción de inundaciones.

- **Índice de Nash – Sutcliffe**

El coeficiente o índice de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) se encarga de medir cuánto de la variabilidad de las observaciones se encuentra siendo explicado por la simulación. Uno de los usos más comunes del Índice de Nash Sutcliffe (NSE) es el análisis de la capacidad de predicción que tienen los modelos hidrológicos (Cabrera, 2012; Guanuchi, 2015).

El índice de Nash-Sutcliffe, como una forma de estandarizar la función objetivo de mínimos cuadrados. Un ajuste perfecto de este criterio viene por la unidad; mientras más cerca a uno sea este criterio mejor será su ajuste (Albuja & Tenelanda, 2014; Cabrera, 2012; Munévar & Saavedra 2020).

De acuerdo a (Sproles, 2019) para evaluar la eficiencia del método se utilizan los siguientes criterios:

- NSE=-1, el ajuste es negativo, lo cual indica que este modelo es pobre y no se ajusta a los datos observados,
- NSE=0, el ajuste es igual al promedio de los datos
- NSE= (1), el promedio es mejor predictor
- El criterio de error de Nash-Sutcliffe, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

**Ecuación 1:**

*Índice de Nash-Sutcliffe – adoptado de la propuesta de Molnar (2011)*

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \underline{Q})^2}$$

**Donde:**

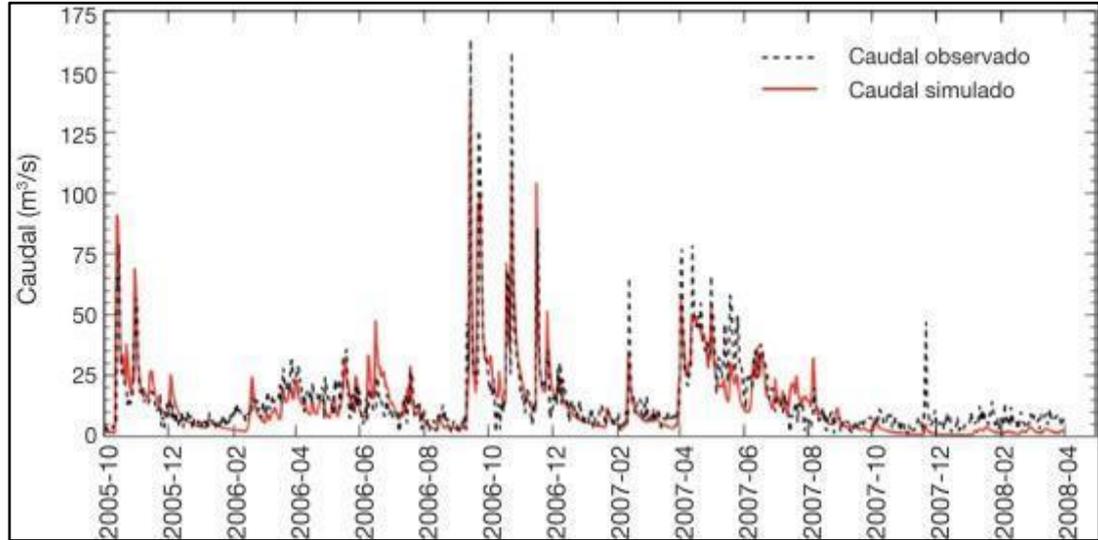
**Qo:** Caudal observados.

**Qs:** Caudal simulado.

$\bar{Q}$ : Promedio del caudal observado sobre el período de datos.

### Figura 3

Validación espacial del modelo hidrológico diario mediante índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe de 0,72



*Nota.* Imagen tomada de “Análisis del Impacto del Cambio Climático en el Ciclo de Sedimentos de la Cuenca del río Ésera (España) Mediante un Modelo Hidrológico Distribuido” por Francés y Bussi (2014).

Con el objetivo de reducir el problema que conllevan las diferencias cuadráticas junto a la sensibilidad resultante en valores extremos por el NSE se calculó el coeficiente o índice de Nash – Sutcliffe, empleando valores logarítmicos del caudal observado y del caudal simulado, como resultado la influencia de caudales bajos incrementa los errores y hace más sensible a la medida del criterio estadístico (Albuja & Tenelanda, 2014).

Se encuentra expresado en la siguiente expresión:

$$\log NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{oi}) - \log(Q_{si}))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{oi}) - \log(\bar{Q}))^2}$$

#### d. Calibración

Cabrera (2012) y Munévar y Saavedra (2020), definen como calibración al proceso de identificación y ajuste de los valores de los parámetros del modelo,

de la serie de datos simulados a la serie de datos observados. La evaluación de ajuste requiere de la “función objetivo”.

Este proceso puede llevarse a cabo de dos formas:

- **Prueba y error:** Es el más recomendado, requiere un ajuste manual de los parámetros basados en el criterio del investigador, es lento y subjetivo.
- **Automática:** Optimiza los valores de los parámetros a partir de técnicas numéricas. A pesar de que el método es más rápido y complejo, este suele presentar problemas de errores en la captura de valores mínimos locales.

Se recomienda utilizar el método “prueba y error”, hasta conseguir una aproximación para luego optimizarla con la calibración automática.

### **Función Objetivo**

Es lo primero a estimar para realizar el proceso de calibración, la cual permite estimar la incertidumbre de las series de caudales simulados respecto a los observados. Esta función es una medida de bondad de ajuste; como error de balance de masas, coeficiente de correlación, eficiencia de Nash – Sutcliffe, entre otras; también puede convertirse en una función Multiobjetivo, si logra combinar estas medidas de bondad de ajuste.

Según Elizondo Cordero, 2018 la Función Objetivo de Error Medio Cuadrático (RMSE) se expresa de la siguiente forma:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (X_C(t) - X_o(t))^2}{n}}$$

**Donde:**

**Xc(t) y Xo(t)** = Coordenadas del hidrograma computado y observado respectivamente.

**n** = Número de ordenadas.

La función multiobjetivo (G), suele tener la siguiente expresión:

$$G = \sum_{i=1}^n w_i F_i \qquad G = \sum_{i=1}^n w_i |F_i| \qquad G = \sum_{i=1}^n w_i F_i^2$$

La fórmula de optimización de la función objetivo es la siguiente:

$$\frac{\partial G}{\partial X} = 0$$

Donde:

**G**= Función multiobjetivo.

**X**= Vector de parámetros  $\theta$  (parámetros de los que depende la función objetivo).

La función multi objetivo permite realizar el análisis de sensibilidad, a partir de la siguiente expresión:

$$s_i = \frac{\partial G}{\partial \theta_i}$$

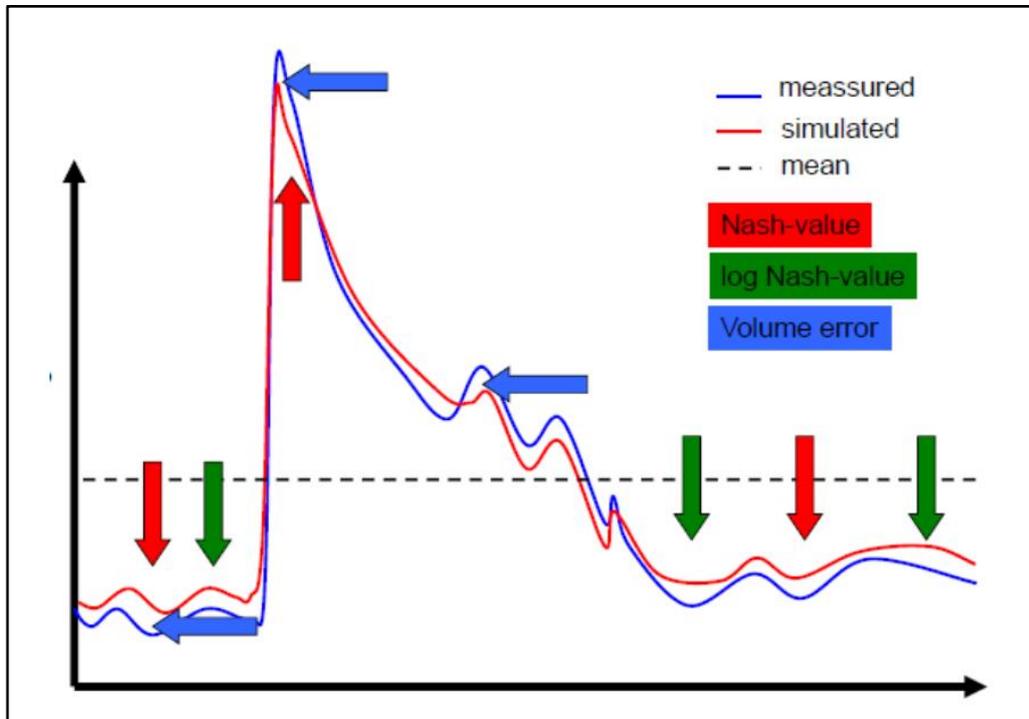
Donde:

**S** = Sensibilidad.

$\theta_i$  = Parámetro en evaluación.

**Figura 4**

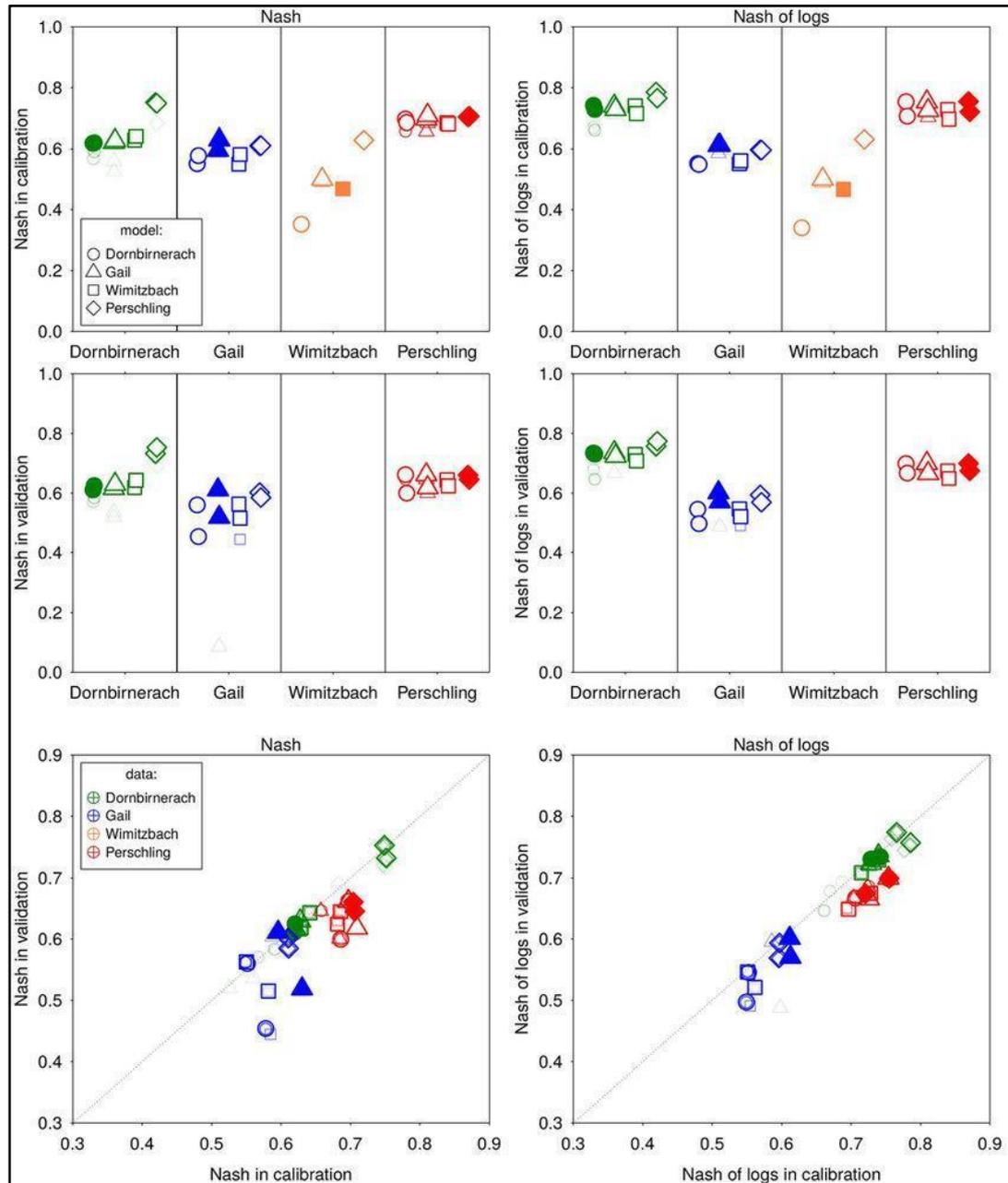
*Aplicación de la función objetivo para definir la calidad de ajuste del modelo*



*Nota.* La imagen muestra los efectos de las medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo. Tomado de *“Calibración de modelos hidrológicos”* p.4, por Cabrera (2012).

**Figura 5**

*Calibración y validación del método nash sutcliffe eficiencias*



*Nota.* Tomado de “conceptual model building inspired by field-mapped runoff generation mechanisms” p. 13, por Viglione et al. (2018).

- **Calibración en SWAT – CUP**

El programa SWAT – CUP se emplea para la calibración, validación, análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbre, que se vinculan los algoritmos SUFI2, GLUE, ParaSol, MCMC y PSO a SWAT, estos procedimientos son útiles para realizar la calibración y análisis de incertidumbre del modelo SWAT. El programa presenta módulos gráficos para observar resultados de simulación, rango de incertidumbre, gráficos de sensibilidad, visualización de cuencas hidrográficas utilizando el mapa Bing e informes estadísticos y teniendo en cuenta parámetros hidrológicos (2W2E GmbH, 2019). Los valores de flujo de corriente estimados del programa SWAT podrían usarse para determinar la tasa de flujo estándar en la aplicación TMDL (carga máxima diaria), en una cuenca (Ryu et al., 2012).

De acuerdo a Munévar y Saavedra (2020), los parámetros del modelo se cambian sistemáticamente para ejecutar la calibración automática del modelo, ejecutando bajo parametrizaciones y salidas requeridas los datos observados en un determinado número de iteraciones, de esa manera se busca encontrar el mejor conjunto de parámetros que representen la realidad evaluada, como los caudales.

- ✓ **Algoritmo de Calibración SUFI – 2**

Montecelos (2018) menciona que SUFI – 2 es un algoritmo de calibración de ajuste de incertidumbre secuencial que se encuentra dentro del programa de SWAT – CUP, desarrollado por Abbaspour. Valladares (2017), afirma que este algoritmo puede evaluar los parámetros de caudales y sedimentos, ya que es un algoritmo de optimización y un parámetro de sensibilidad.

De acuerdo a Senamhi (2016), SUFI – 2 es el algoritmo más adecuado para tratar el análisis de incertidumbre en el modelamiento hidrológico SWAT. Utilizando el procedimiento dentro del SWAT – CUP, se encuentran optimizados los parámetros más sensibles.

El algoritmo SUFI – 2, realiza el análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo a partir de los resultados de la calibración y un contraste t – Student, para evaluar el efecto de los resultados en función del cambio de

un parámetro dado sobre el resto del modelo (Universidad Católica de Murcia, 2019).

En la tabla 4, se muestran los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad llevado a cabo con el algoritmo SUFI – 2.

**Tabla 4**

*Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad*

<b>PARÁMETROS</b>	<b>DEFINICIÓN</b>
CN2	Número de curva inicial para la condición de humedad II.
GW_DELAY	Tiempo de retardo del flujo subterráneo.
GWQMN	Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial para que ocurra flujo de retorno.
RCHRG_DP	Coefficiente de percolación al acuífero profundo.
HRU_slp	Es la pendiente o inclinación del canal dado.
GW_REVAP	Coefficiente de evaporación del agua subterránea.
REVAPMN	Profundidad umbral del acuífero superficial requerida para que ocurra percolación en el acuífero inferior.
ESCO	Factor de compensación para la evaporación del suelo.
CANMX	Es el máximo almacenamiento por retención, debido a la cobertura vegetal.
EPCO	Factor de compensación para la cantidad de agua captada por las plantas.
CH_K2	Conductividad hidráulica del canal principal.
CH_N2	Coefficiente de rugosidad de Manning para el canal.
SURLAG	Coefficiente de retraso del agua lluvia en la superficie.
SOL_AWC	Capacidad de cada capa del suelo para almacenar agua.
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada.

<b>PARÁMETROS</b>	<b>DEFINICIÓN</b>
ALPHA_BF	Es una constante de recesión del caudal base.
SOL_BD	Densidad aparente del suelo.
ADJ_PKR	Factor de ajuste a la tasa pico del enrutamiento de sedimentos en la subcuenca.
SPCON	Parámetro lineal para calcular la máxima cantidad de sedimentos que puede ser reencausada en el enrutamiento de sedimentos del flujo.
USLE_K	Factor de erodabilidad del suelo.
USLE_P	Predice la erosión en función de la energía de la precipitación
SPEXP	Exponente del parámetro que calcula la cantidad de sedimentos reencausados en el enrutamiento de sedimentos de caudal.
CH_COV	Factor de cubrimiento del factor se define como el radio entre la degradación de un canal con cierta cobertura vegetal y un canal sin ninguna cobertura vegetal.

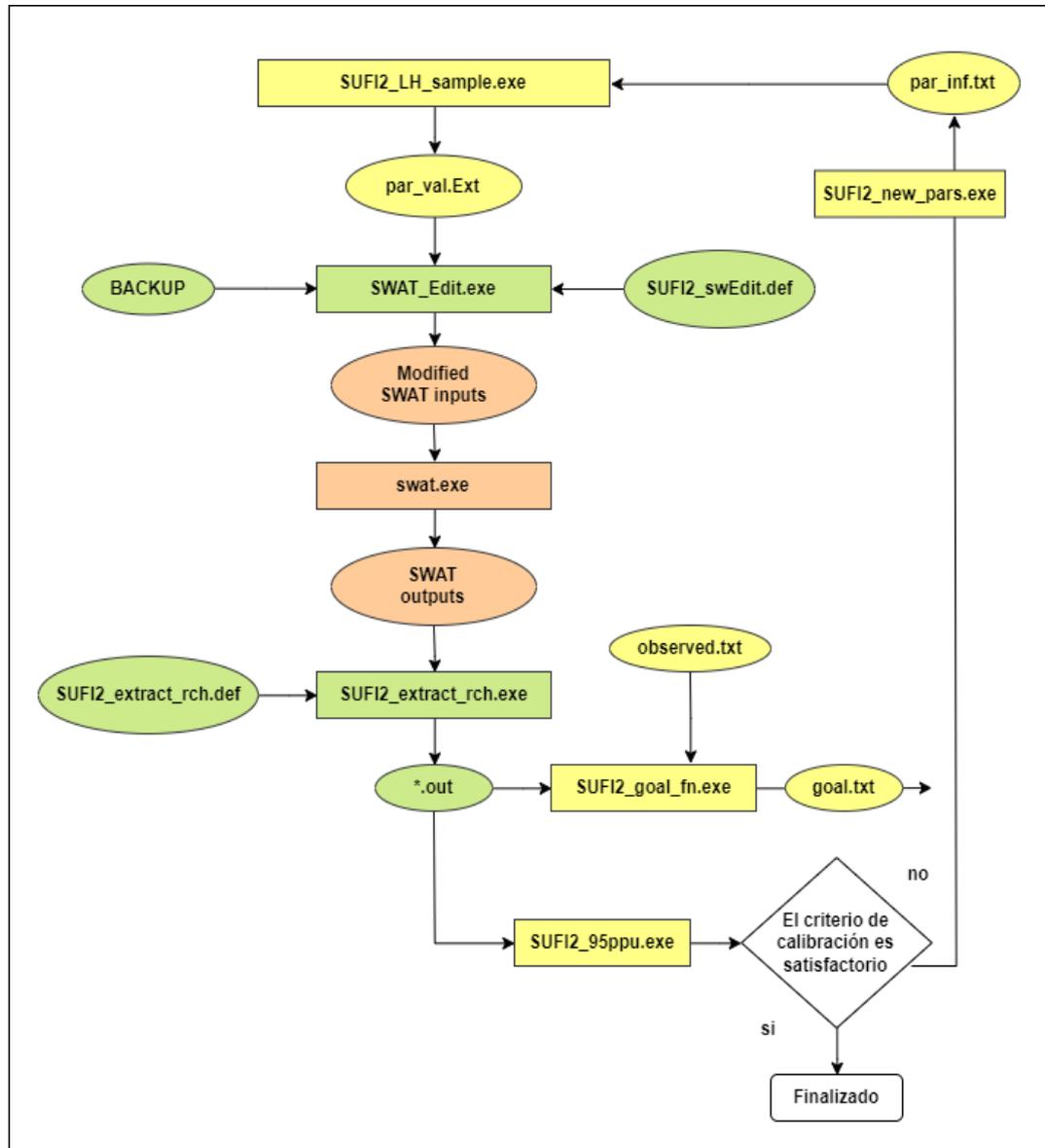
*Nota.* Tomado de “Respuesta hidrológica de la cuenca del río Santa en condiciones de cambio climático” pp.105 por Valladares (2017).

El proceso de calibración para ajustar los valores de los parámetros, en ocho pasos:

- Definir la función objetivo.
- Definir el rango inicial de los parámetros.
- Realizar el análisis de sensibilidad.
- Emplear el método Latin Hipercube de los parámetros, el número común de combinaciones de parámetros es  $N = 500-1000$ .
- Ejecutar las simulaciones  $N$  veces y guardar las variables de salida simuladas.
- Calcular la función objetivo.
- Calcular las métricas a finales de incertidumbre.
- Ajustar el rango de los parámetros y repetir desde el paso " 1".

**Figura 6**

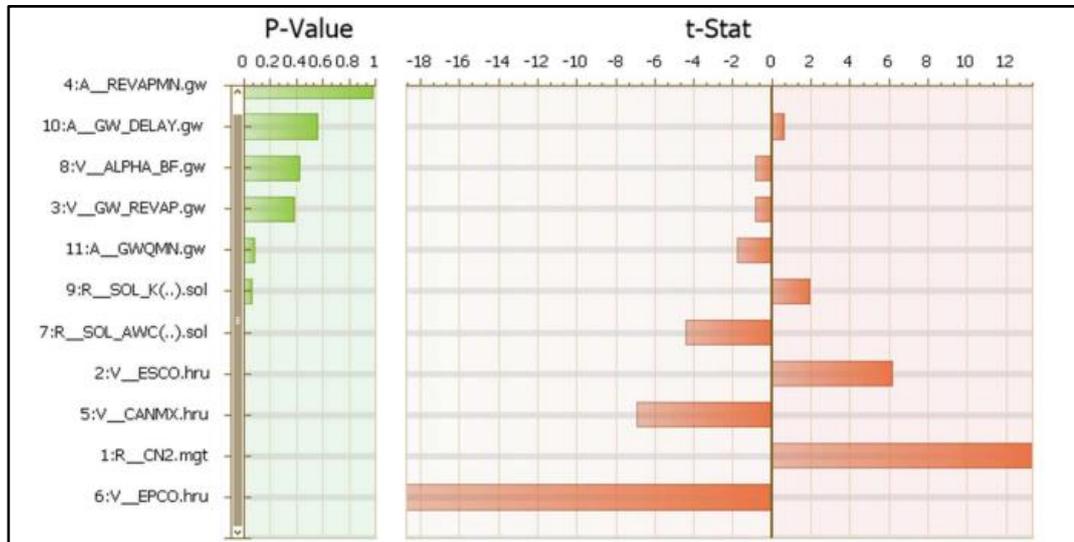
*Esquema incertidumbre usando SUFI – 2*



*Nota.* Adaptado de “SWAT model calibration / validation using SWAT-CUP III: multi - site and multi - variable model analysis” p. 16, por Younghyuna (2020).

**Figura 7**

*Análisis de sensibilidad con SUFI – 2 en SWAT – CUP*



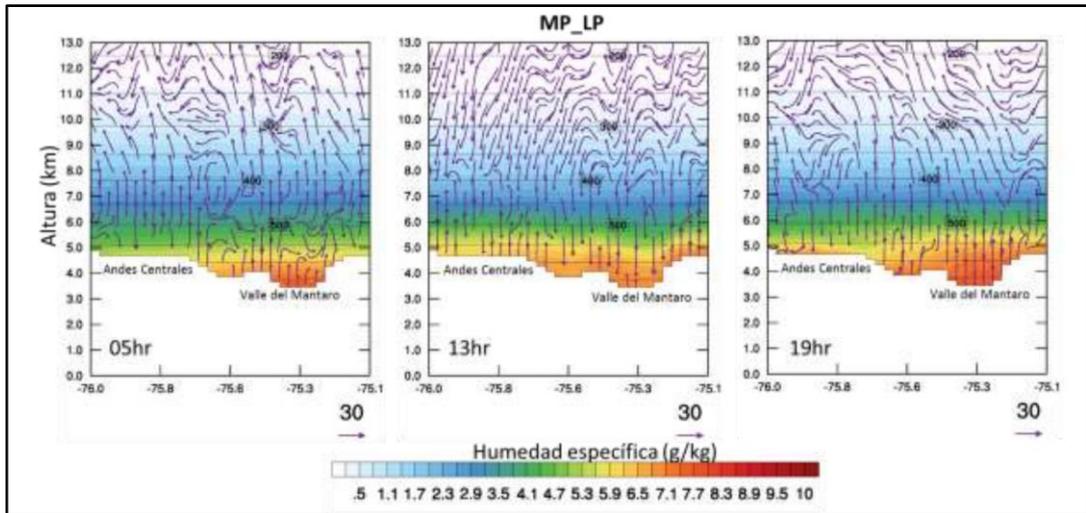
*Nota.* Tomada de “Modelización hidrológica distribuida de la cuenca de la rambla del albuñón mediante el uso de datos de teledetección” pp.27 por Universidad Católica de Murcia (2019).

#### **iv. Precipitación Grillada Purdue**

Según García (2017), la precipitación Grillada de Purdue o esquema de Lin (Purdue), es un esquema de microfísica, que ejerce un mejor control sobre la formación de precipitación cuando interactúa con un esquema de cúmulos del esquema Thompson.

**Figura 8**

*Perfil del esquema Lin (Purdue)*

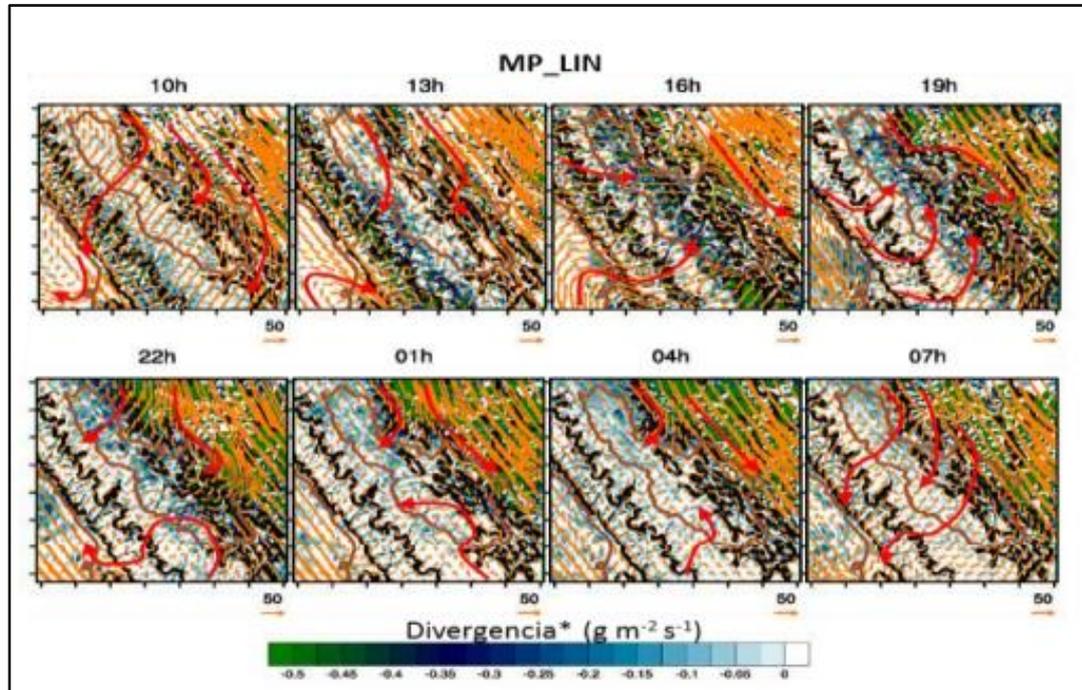


*Nota.* Plano vertical promedio del viento y humedad específica. Tomado del “Estudio de la precipitación usando el modelo Weather Research And Forecasting (Wrf) en la cuenca del río Mantaro” p. 165, por (García, 2017).

El modelo generado por la Universidad de Purdue posee seis clases de hidrometeoros (vapor de agua, agua de la nube, lluvia, hielo en la nube, nieve y granizo blando). Están incluidas la presión no hidrostática, una microfísica más sofisticada, arrastre, mezcla lateral de remolinos, mezcla vertical de remolinos. Por lo que el esquema de microfísica Lin (Purdue) es el más adecuado para la simulación de precipitación sobre una cuenca.

## Figura 9

*Flujo de humedad integrado verticalmente y su divergencia para el esquema Lin (Purdue)*



*Nota.* Tomado del “Estudio de la precipitación usando el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) En la cuenca del río mantaro” p. 165, por (García, 2017).

## 2.4. Definición de Términos Básicos

### 2.4.1. Calibración

Es el proceso de utilizar un estándar de medición para determinar la relación entre el valor mostrado y el verdadero. El término hace referencia al ajuste de un modelo hidrológico (Cabrera, 2012; Keyence, 2021).

### 2.4.2. Clima

Conjunto de condiciones atmosféricas propias a una región, no debe de confundirse con clímax (Real Academia Española [RAE], 2020).

### **2.4.3. Escenario de Cambio Climático**

Son una representación simplificada del clima futuro, se encuentran basados en un conjunto internamente coherente de relación climatológicas construidas para ser utilizados de forma explícita en la investigación de impacto del cambio climático (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2017).

### **2.4.4. Métricas de Desempeño**

Son criterios que cuentan con la capacidad del modelo para representar adecuadamente la realidad y son usados en diferentes fases de la modelación.

### **2.4.5. Modelo Hidrológico**

Sirven para evaluar el estado de los recursos hídricos y predicción de inundaciones y sequías (Cavero, 2013).

### **2.4.6. Precipitación**

El término hace referencia a los fenómenos de caída de agua en forma de lluvia, granizo, nieve, etc. (Netamo, 2021).

### **2.4.7. Proyecciones Climáticas**

Son simulaciones técnicas de la evolución del clima durante el último siglo (Gencat, 2021).

### **2.4.8. RCP**

Son Trayectorias de Concentración Representativas, que se encuentran representando cuatro escenarios de desarrollo futuro de acuerdo a emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero, uso del suelo y forzamiento radiativo atmosféricos (Muévar & Saavedra, 2020).

### **2.4.9. Sequía**

Insuficiencia de agua en una determinada zona por periodos prolongados de tiempo (Predes, 2017).

### **III. HIPOTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1. Hipótesis**

##### **3.1.1. Hipótesis General**

La aplicación de la modelación hidrológica permite analizar positivamente las sequías en escenario de cambio climático, en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.

##### **3.1.2. Hipótesis Específicas**

H1: La representación del sistema hidrológico permite analizar eficazmente las sequías en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.

H2: El comportamiento de sequías varían en frecuencia e intensidad con las proyecciones climática en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.

#### **3.2. Definición Conceptual de Variables**

Variable a predecir: Sequías

La sequía es un peligro natural progresivo complejo que causa daños sustanciales al medio ambiente, la sociedad y la economía, las cuales se han clasificado ampliamente en cuatro clases, como sequías meteorológicas, hidrológicas, agrícolas y socioeconómicas (Faiz et al., 2022).

Variable predictora: Modelos Hidrológicos

Los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas del ciclo hidrológico terrestre y juegan un papel importante en muchas áreas de la hidrología, como la alerta y la gestión de inundaciones, la agricultura, el diseño de represas, los estudios de impacto del cambio climático, etc. Los modelos hidrológicos generalmente tienen dos propósitos: (1) permitir el razonamiento, es decir, formalizar nuestra comprensión científica de un sistema hidrológico y/o (2) proporcionar predicciones climáticas (generalmente fuera de nuestro rango de observaciones, a corto plazo frente a largo plazo, o para simular variables adicionales). (Hagen et al., 2021)

### 3.2.1. Operacionalización de Variables

**Tabla 5**

*Matriz de operacionalización de variables*

Variable	Dimensiones	Indicador	Índice	Método	Técnica
Variable a predecir: Sequías	Sequías hidrológicas	Índice de Estandarizado de caudal (SSI)	SSI 3, SSI 6, SSI 9, SSI 12	Ecuaciones de análisis de sequías	Documental
	Sequía meteorológica	Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)	SPI 3, SPI 6, SPI 9, SPI 12	Función de densidad de probabilidad	Documental
Variable predictora: Modelos Hidrológicos	Representación del sistema hidrológico	Precipitación	mm	Pluviometría	Documental
		Temperatura	°C	Estación meteorológica	Documental
		Modelo de Digital de elevación	0-12.5%, 12.5-25%, 25-50%, 50-75%,	Batimetría	Documental
		Tipo de suelo	Litosol Andosol vítricos, Andosoles Acrisol, Glaciar	Granulometría	Documental
		Tipo de cobertura vegetal	WATR, SWRN, RNGB, PAST, FRST, WETL	Fotogrametría	Documental
		Proyecciones Climáticas	Modelos Climáticos Globales	RCP 4.5	Simulación de una serie temporal de datos

*Nota:* Elaboración propia

## IV. DISEÑO METODOLÓGICO

### 4.1. Tipo y Diseño de Investigación

#### 4.1.1. Tipo de Investigación

Para Álvarez-Risco, (2020) el tipo de investigación pura o básica se refiere a la investigación orientada a descubrir o proveer un conocimiento nuevo de forma sistemática, con el objetivo de incrementar el conocimiento de un fenómeno (realidad concreta)

Asimismo, según Nieto, (2018) la investigación básica comprende a los siguientes estudios: investigación exploratoria, descriptiva, explicativa y predictiva.

Bajo este fundamento la investigación se apoyó dentro de las teorías que explican los procesos del ciclo hidrológico, cuyo fin es desarrollar o demostrar teorías que evidencian el efecto del cambio climático en las sequías de la subcuenca de estudio.

Por otro lado, la investigación tiene el siguiente enfoque y nivel de investigación:

#### a) Nivel de Investigación

Para Supo (2014) el nivel o alcance de investigación predictivo *“constituye una investigación orientada a la exploración del porvenir con el objetivo de proporcionar información relevante, en una perspectiva a muy largo plazo que permita apoyar la toma de decisiones”*. Asimismo, considera en este nivel de investigación a las variables endógenas como la variable a predecir y variables exógenas como predictoras.

En la investigación se estudió un evento (sequías) en un escenario futuro (escenarios de cambio climático), por lo cual la investigación es de nivel predictivo.

#### b) Enfoque de la Investigación

Según Cárdenas, (2018) sostiene que *“cuando la información son números (o bien la información recolectada es transformada en escalas numéricas)*

*estamos ante una investigación con datos cuantitativos, por ello el tipo de investigación es cuantitativa*". En la investigación los datos se pudieron cuantificar de manera objetiva, como la precipitación, la temperatura y la pendiente; cabe mencionar que los datos proyectados a pesar de ser simulados se basaron en información observada de la realidad. Por ello se justifica el enfoque de investigación cuantitativa.

#### **4.1.2. Diseño de la Investigación**

Para Álvarez-Risco, (2020) un diseño no experimental longitudinal es aquel donde no existe manipulación de las variables por parte del investigador y que mide en dos o más ocasiones las variables estudiadas.

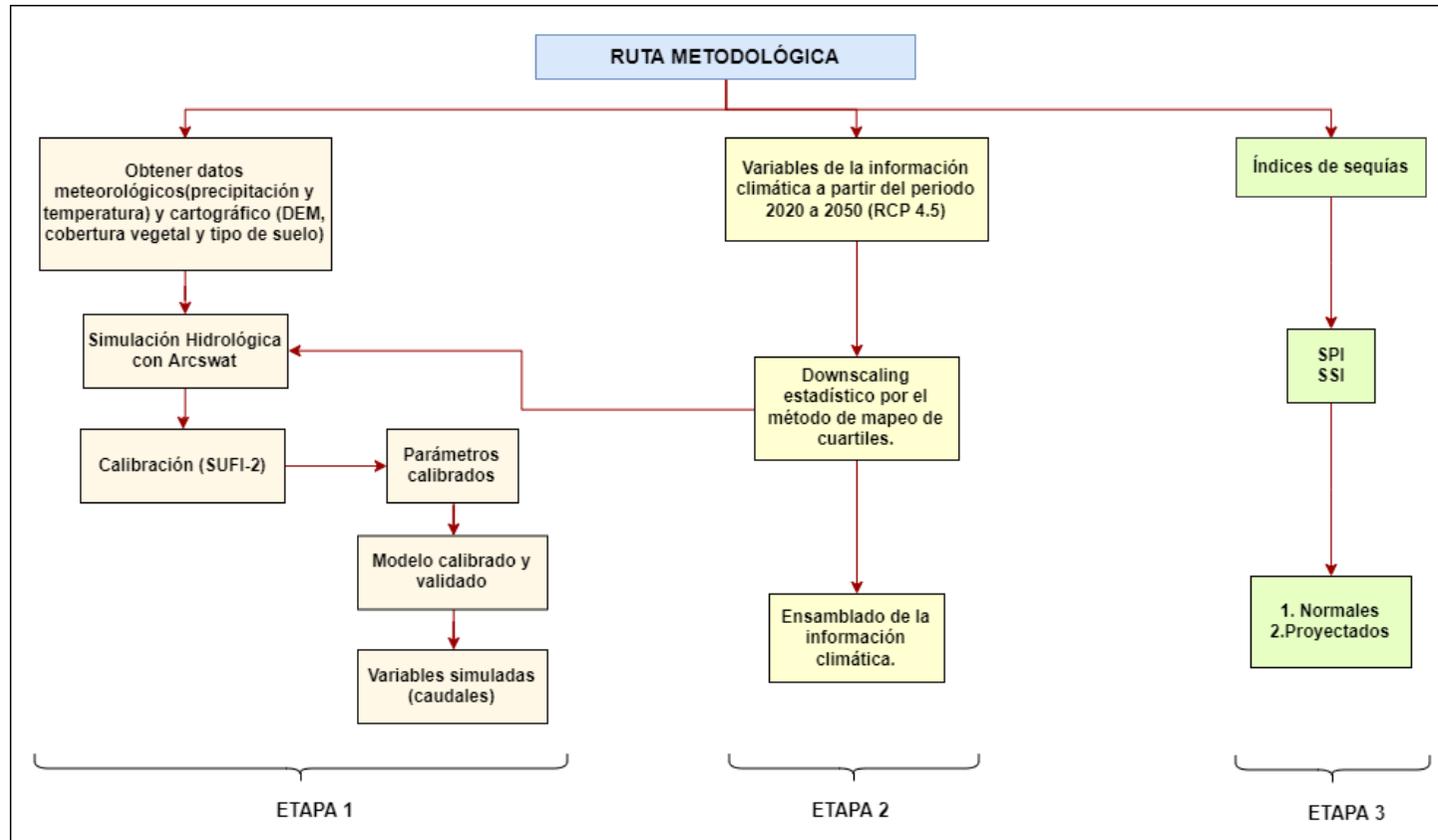
En la investigación no se manipularon variables o se modificó la realidad, así también se midieron los valores de los parámetros en diferentes ocasiones en el tiempo, por lo que se asumió un diseño no experimental - longitudinal. Asimismo, la ruta metodológica de la investigación contó con 3 etapas, partiendo desde la construcción de un modelo determinístico con un enfoque de representación espacial semidistribuido, con la finalidad de representar el comportamiento hidrológico de la subcuenca en estudio; en esta primera etapa se calibro la subcuenca, la cual ayudó a cuantificar el desempeño del modelo mediante índices estadísticos de performance.

Luego la segunda etapa tuvo como finalidad de obtener caudales proyectados hasta el 2050, mediante la incorporación al modelo hidrológico de data climática (precipitación y temperatura) descargada de los modelos climáticos globales bajo el escenario de emisión RCP 4.5, cabe resaltar que estos datos de entrada fueron ensamblados con ayuda del método downscaling estadístico con el fin de disminuir los sesgos para mayor confiabilidad en la tendencia a futuro.

Finalmente se cuantificó la sequía mediante los índices SPI y SSI con la información actual observada y la proyectada calculada hasta el 2050. Cabe detallar que se usó la librería "SPI" del lenguaje de programación R, debido a que tiene incluida la metodología estadística que se utilizó en la investigación, ver Figura 10.

**Figura 10**

*Ruta metodológica de la investigación*



*Nota. Elaboración propia*

## **4.2. Método de Investigación**

El método de la investigación es el método estadístico, el cual consiste en una secuencia de procedimientos para el manejo de los datos cuantitativos de la investigación (Pascual et. al., 2021), en este estudio se recopiló datos que luego fueron procesados con paquetes de software estadísticos (Rstudio), para luego ser visualizados en gráficos, tablas y figuras de manera rápida y precisa.

## **4.3. Población y Muestra**

### ***4.3.1. Población***

La población de estudio es la subcuenca del río Chili, que se encuentra ubicada en el departamento de Arequipa en el sur del Perú, la cual tiene un área de 1030 km<sup>2</sup>.

### ***4.3.2. Muestra***

En el estudio la muestra es igual a la población, por lo cual la muestra es la subcuenca del río Chili.

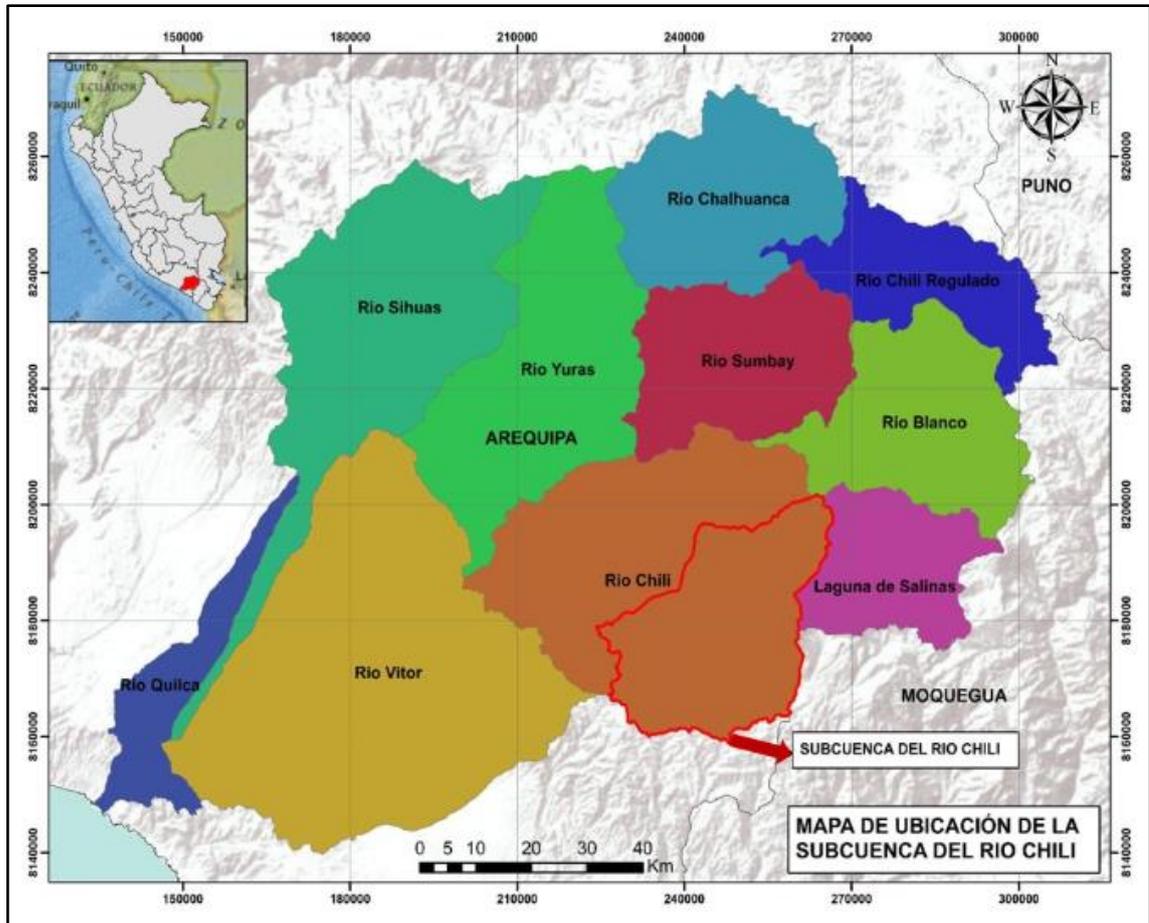
## **4.4. Lugar de Estudio y Periodo Desarrollado**

El estudio se desarrolló en la subcuenca del río Chili, que está dentro de la cuenca Quilca Victor Chili, en el departamento de Arequipa en Perú. La cual está conformada por los ríos Andamayo, Mollebaya, Yarabamba y Chili propiamente dicho. Las subcuencas Andamayo, Mollebaya y Yarabamba, con un área de drenaje de 1030 km<sup>2</sup>, están distribuidas en 509.6, 154.5 y 365.9 km<sup>2</sup>, respectivamente. Involucra los distritos de Chihuata, Paucarpata, Sabandía, Hunter, Pocsi, Mollebaya, Characato, Polobaya, Quequeña, Yarabamba y la ciudad de Arequipa (Zavala et al., 2022).

Por otro lado, se consideró el periodo desde el año 1983 hasta 2016 para la recopilación de datos meteorológicos de la subcuenca del río Chili.

**Figura 11**

*Mapa de ubicación de la subcuenca del río Chili*



*Nota.* Elaboración propia

#### **4.5. Técnicas e Instrumentos para la Recolección de la Información**

La técnica utilizada fue la recopilación bibliográfica (tesis, artículos, manuales y libros), en la cual se adquiere información sobre criterios, metodologías y procesos para el desarrollo de la investigación.

Para la investigación se recopilaron datos como información meteorológica a través de plataforma de Purdue Arequipa, asimismo para la información cartográfica, se usó modelos digitales de elevación y mapas de cobertura vegetal en formato ráster con una resolución de 30m y 20 m respectivamente. Las fuentes de donde se recopiló la información se detallan en la Tabla 6.

**Tabla 6***Plataformas de descarga*

PARÁMETRO	FUENTE	TÉCNICA
Precipitación y Temperatura	Nexus Arequipa Climate (Formato csv) / PISCO-SENAMHI (Formato csv)	Documental
Modelo digital de elevación	Alos Palsar (Formato Raster de 30 m)	Documental
Cobertura Vegetal	Land viewer (Formato Raster de 20 m)	Documental
Tipo de Suelo	FAO (Formato Shp).	Documental
Data climática proyectada (P y T)	NASA NEX (Formato csv)	Documental

*Nota.* Formato csv: son archivos de texto con un formato específico que permite que los datos se guarden en un formato con estructura de tabla; Formato Shp: archivo principal que almacena la información geométrica de los elementos de la capa del tipo de suelo en formato vectorial.

#### **4.6. Análisis y Procesamiento de Datos**

El procesamiento de datos se desarrolló mediante el sistema de información geográfica (ArcGIS), el cual procesó la información cartográfica descargada por el satélite Alaska (Alos Palsar). Luego con el modelo hidrológico SWAT, se procesó la data hidrometeorológica descargada junto con la información cartográfica con el fin de obtener las unidades de respuestas hidrológicas (HRU) en la subcuenca del río Chili. Finalmente, con ayuda del lenguaje de

programación (Rstudio), se procesó la información climática descargada de la plataforma Google Earth Engine, y luego se aplicó el desescalado por el método de mapeo de cuartiles y se calculó los índices según la metodología del SPI y SSI.

#### ***4.6.1. Representación Hidrológica de la Subcuenca***

La representación de los procesos hidrológicos de la subcuenca hidrográfica, se representó mediante una modelación numérica aplicada a la hidrología, donde existieron diferentes enfoques de representación espacial según el modelo. En la investigación se usó el modelo semidistribuido SWAT, para lo cual fue necesario entender los componentes de entrada que necesitó el modelo, tales como las variables cartográficas y meteorológicas.

#### ***4.6.2. Variables de Entrada del Modelo SWAT***

La información cartográfica está compuesta por diversos archivos en formatos Gis como del tipo vectorial (Shapefile) y raster. Para el caso del tipo de suelo, descargado de la FAO, el formato fue del tipo vectorial, mientras que, para la cobertura vegetal, descargada de la plataforma Land viewer, el formato fue raster. Ambos se descargaron de plataformas internacionales validadas y luego se acopló su nomenclatura a las requeridas por el modelo SWAT. Asimismo, se descargó el modelo digital de elevación (DEM) de la plataforma ALOS PALSAR, del modelo se procesaron las pendientes clasificándose en porcentajes.

Por otro lado, el modelo requirió variables diarias de precipitación, temperatura, humedad relativa, energía solar y velocidad del viento. Para el caso de la precipitación diaria la descarga se realizó del producto Nexus Arequipa Climate (en formato csv), con data disponible desde el año 1983 hasta el año 2016; asimismo para la temperatura diaria la descarga fue posible a través del producto grillado Pisco - SENAMHI, con datos disponibles desde el año 1981 hasta el año 2016.

Cabe resaltar que el software SWAT tiene una herramienta generadora de tiempo que ayudó a rellenar los datos faltantes en ciertos periodos. Esta

herramienta también permitió calcular la humedad relativa, la energía solar y la velocidad del viento.

#### **4.6.3. Unidades de Respuestas Hidrológicas (HRU)**

Las unidades de respuestas hidrológicas, fueron obtenidas mediante una clasificación, que depende de la similitud de las tres variables cartográficas mencionadas anteriormente (cobertura vegetal, tipo de suelo y pendientes).

Posterior a la definición de las HRU, se introdujeron en el modelo todas las variables climáticas necesarias, como las precipitaciones, la temperatura mínima y máxima, la humedad relativa, la velocidad media del viento y la radiación solar.

El proceso de escorrentía de las precipitaciones se estableció para ser estimado por el número de curva (método CN), la evapotranspiración potencial se estimó mediante la ecuación Penman Monteith. Una vez completados todos los procesos anteriores, se activó la simulación SWAT.

Las estaciones escogidas que se encuentran dentro y cerca de la subcuenca de estudio se ingresaron en el componente de la "Weather stations del modelo Hidrológico SWAT, y posterior a ella se realizó las configuraciones para la pre simulación donde los caudales obtenidos en la simulación no se aproximan a los caudales observados en la estación Tingo grande es por ello que se realizó un análisis de incertidumbre.

#### **4.6.4. Análisis de Incertidumbre**

Como primer paso, fue necesario establecer un análisis de sensibilidad sobre los 19 parámetros listados en la Tabla 7, con el fin de tomar solo en cuenta los parámetros más relevantes en la simulación; esta tarea se realizó mediante el análisis de sensibilidad global.

**Tabla 7***Parámetros de sensibilidad*

<b>Parámetros</b>	<b>Definición</b>
r__CN2.mgt	Número de curva de escorrentía SCS
v__SURLAG.bsn	Tiempo de retraso de escorrentía superficial
v__OV_N.hru	El valor de Manning para el flujo terrestre
r__SLSUBBSN.hru	Longitud media de la pendiente
v__ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo
r__HRU_SLP.hru	Pendiente o inclinación del canal dado
v__EPCO.hru	Factor de compensación de la absorción de la planta
v__CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva en canal principal.
v__ALPHA_BF.gw	Factor alfa de flujo base (días)
v__GW_DELAY.gw	Retraso del agua subterránea
v__GWQMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo (mm).
v__GW_REVAP.gw	Coeficiente de "revaporización" del agua subterránea
v__REVAPMN.gw	Umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo
v__RCHRG_DP.gw	Fracción de percolación del acuífero profundo.
v__USLE_K().sol	Conductividad eléctrica
v__SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo
v__SOL_K(..).sol	Conductividad hidráulica saturada
v__LAT_TTIME.hru	Tiempo de recorrido de flujo lateral
r__SOL_Z(..).sol	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa

*Nota:* Parámetros obtenidos del manual de SWAT-CUP.

Los códigos identificadores v y r, visualizados en la tabla anterior, sirven para aplicar el tipo de cambio a los parámetros de sensibilidad, estos códigos se describen en la Tabla 8.

**Tabla 8***Códigos de identificadores de parámetros*

Código	Definición
v	Significa que el valor del parámetro existente debe ser reemplazado por un valor dado.
r	Significa que el valor de un parámetro existente se multiplica por (1 + un valor dado)

*Nota.* Códigos obtenidos de manual de SWAT-CUP

El análisis de sensibilidad global se estableció después de una iteración y aplicando un sistema de regresión múltiple. La regresión se realiza entre el conjunto de parámetros generados por el método hipercubo latino de la iteración vigente “bi” y los valores de la función objetivo, descritos en la siguiente ecuación.

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i$$

Para identificar la significancia relativa de cada parámetro  $b_i$ , el programa aplicó el *test t de student*. El grado de sensibilidad de cada uno se estimó a partir de la media de las variaciones de la función objetivo.

Estas variaciones son el resultado del cambio sufrido por cada parámetro cuando todos los parámetros cambian simultáneamente. Por lo tanto, el *test t de student* aportó una sensibilidad relativa basada en aproximaciones lineales, de manera que sólo se obtuvo información parcial sobre la sensibilidad de la función objetivo hacia los parámetros.

Además, las sensibilidades relativas de los diferentes parámetros, como se indica con el *test t*, dependen de los intervalos de los parámetros. Por lo tanto, el rango de parámetros sensibles puede ir cambiando en cada iteración.

El análisis de sensibilidad del proyecto fue trabajado con el programa SWAT-CUP, el cual es un programa que dispone de diferentes aplicaciones para el análisis de sensibilidad, calibración, validación y análisis de incertidumbre, e incluye cinco algoritmos: ajuste de Incertidumbre secuencial (SUFI-2), probabilidad de Incertidumbre generalizada (GLUE), solución de parámetros (ParaSol) y los métodos de Inferencia Bayesiana (MCMC) (Abbaspour, 2008).

Se hizo uso del algoritmo SUFI-2 del programa, realizando 500 iteraciones, para lo cual se empleó la información observada de caudales a nivel diaria correspondiente al periodo 1988 – 2010.

El SUFI-2 permitió definir los parámetros y los rangos de las variables que el modelador considera necesarias para evaluar su sensibilidad a través de los coeficientes t-Stat y P-Valor, los cuales están íntimamente relacionados. Primero se calculó el error estándar y luego se determinó la significancia del parámetro evaluado a partir del análisis de probabilidad de la variable escogida para determinar si tiene algún efecto en el criterio de desempeño escogido.

Donde se analizó gráficamente el comportamiento de ambos coeficientes, los resultados del análisis de P-Value para aquellos parámetros con valores más cercanos al cero indica que fueron los más sensitivos, así mismo, t-Stat indicó que los parámetros más sensibles fueron aquellos con mayor valor absoluto. Comparada con otras técnicas de análisis de incertidumbre, SWAT-CUP necesita una menor cantidad de ejecuciones del modelo para lograr una solución satisfactoria (Ficklin et al, 2012; Yang et al, 2008).

La calibración de un modelo se alcanza mediante la optimización de los parámetros envueltos en su estructura matemática, comparando cualitativa y cuantitativamente la respuesta del modelo con una serie de mediciones de campo u observaciones, razón por la cual se le denomina un proceso inverso (Gupta and Sorooshian, 1985).

Los criterios utilizados para evaluar el ajuste hidrológico fue el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash y Sutcliffe 1970), coeficiente PBIAS y

el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) (Andrade et al, 2013a, Liew et al, 2007) y (Santhi et., 2001).

Para asegurar que el modelo calibrado fuera lo más realista posible, se utilizaron rangos de calibración en los que el valor mínimo y máximo para cada parámetro estaban limitados a valores realistas para la zona, y a pesar de que SWAT-CUP sugería valores fuera de esos rangos, se limitaron los valores extremos para garantizar que el modelo fuera lo más realista posible.

El período de calibración se extendió del 1 de enero de 1988 al 31 de diciembre de 2010 y se realizó la validación desde el 1 de enero de 2011 hasta el 31 de diciembre del 2016. Del rango de tiempo de los datos observados se toman 2/3 del tiempo para la calibración y 1/3 para la validación. Cabe mencionar que se consideró 5 años de calentamiento al modelo para mayor estabilidad (1983-1987).

La zona de estudio es una subcuenca aforada y, en consecuencia, se usará la estación hidrométrica Tingo Grande para la consideración en el análisis de sensibilidad, calibración y validación. Esta estación seleccionada, tiene mayor cantidad de información en su registro histórico.

Teniendo en cuenta que un modelo que haya pasado por un proceso de calibración genera mayor confiabilidad en las proyecciones que se desea estimar.

#### **4.6.5. Proyecciones Climáticas**

La data climática se descargó de un producto llamado “NEX-GDDP: NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections”. La cual se encuentra en línea en el siguiente enlace: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA\\_NEX-GDDP](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_NEX-GDDP) (ver figura 12). Luego se direccionó a la plataforma de descarga del Google Earth Engine, puesto que, para descargarlo es necesario un script en un formato de lenguaje de programación “JavaScript” (ver Figura 13).

**Figura 12**  
**NEX-GDDP**

NEX-GDDP: NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections

**Dataset Availability**  
1950-01-01T00:00:00Z–2100-12-31T00:00:00

**Dataset Provider**  
NASA / CSU

**Earth Engine Snippet**  
`ee.ImageCollection("NASA/NEX-GDDP")`

**Tags**  
climate cmip5 csu gddp geophysical nasa nex precipitation temperature

**Bands**

Name	Units	Min	Max	Description
pr	kg/(m <sup>2</sup> s)	0*	0.42*	Daily mean of precipitation at surface; includes both liquid and solid phases from all types of clouds (both large-scale and convective)

*Nota.* Extraído del catálogo NEX-GDDP.

**Figura 13**  
**Plataforma de Google Earth Engine para descarga de datos**

```
1 var dataset = ee.ImageCollection('NASA/NEX-GDDP')
2   .filter(ee.Filter.date('2018-07-01', '2018-07-02'));
3 var minimumAirTemperature = dataset.select('tasmin');
4 var minimumAirTemperatureVis = {
5   min: 240.0,
6   max: 300.0,
7   palette: ['blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red'],
8 };
9 Map.setCenter(71.72, 52.48, 3.0);
10 Map.addLayer(
11   minimumAirTemperature, minimumAirTemperatureVis, 'Minimum Air Temperature');
```

*Nota.* Extraído de la plataforma de Google Earth Engine.

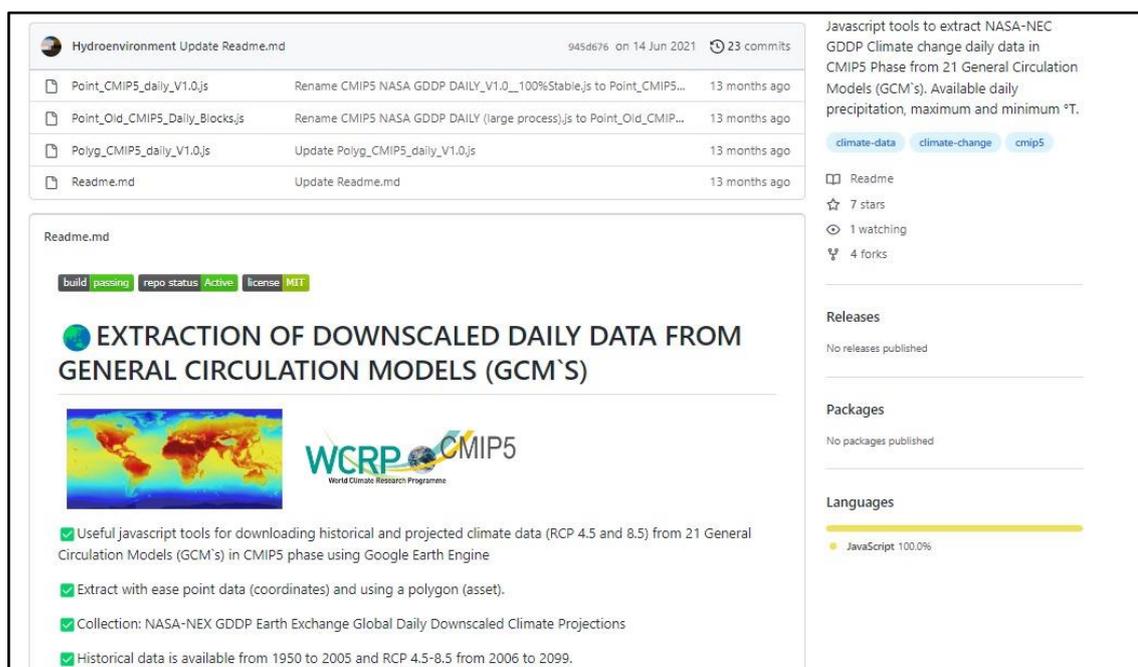
El script se encontró en la siguiente dirección:  
<https://github.com/Hydroenvironment/CMIP5-and-Google-Earth-Engine>.

(Montenegro, 2021). En la cual está detallada la descripción teórica de su

funcionamiento y diferentes metodologías de descarga, como formato punto o poligonal (ver Figura 14).

## Figura 14

### *Scripts para descarga de información en lenguaje JavaScript*



The screenshot shows a GitHub repository page for 'Hydroenvironment'. The repository has 945d676 on 14 Jun 2021 and 23 commits. The commit history table is as follows:

File	Commit Message	Time
Point_CMIP5_daily_V1.0.js	Rename CMIP5 NASA GDDP DAILY_V1.0_100%Stable.js to Point_CMIP5...	13 months ago
Point_Old_CMIP5_Daily_Blocks.js	Rename CMIP5 NASA GDDP DAILY (large process).js to Point_Old_CMIP...	13 months ago
Polyg_CMIP5_daily_V1.0.js	Update Polyg_CMIP5_daily_V1.0.js	13 months ago
Readme.md	Update Readme.md	13 months ago

The README file content is as follows:

**EXTRACTION OF DOWNSCALED DAILY DATA FROM GENERAL CIRCULATION MODELS (GCM'S)**

Useful javascript tools for downloading historical and projected climate data (RCP 4.5 and 8.5) from 21 General Circulation Models (GCM's) in CMIP5 phase using Google Earth Engine

- Extract with ease point data (coordinates) and using a polygon (asset).
- Collection: NASA-NEX GDDP Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections
- Historical data is available from 1950 to 2005 and RCP 4.5-8.5 from 2006 to 2099.

*Nota.* Extraído de la plataforma de GITHUB.

La información climática descargada, tiene consigo una resolución alta y por ende podría existir sesgos mayores al 5% en relación con la información histórica meteorológica. Para reducir el sesgo de las variables temperatura y precipitación se usó el método estadístico downscaling, la cual trabaja con la técnica de mapeo de cuartiles. Se detalla que la precipitación mantendrá un porcentaje de error más pronunciado en comparación con la temperatura, debido que su elaboración fue dada por parametrización y no por procesos termodinámicos.

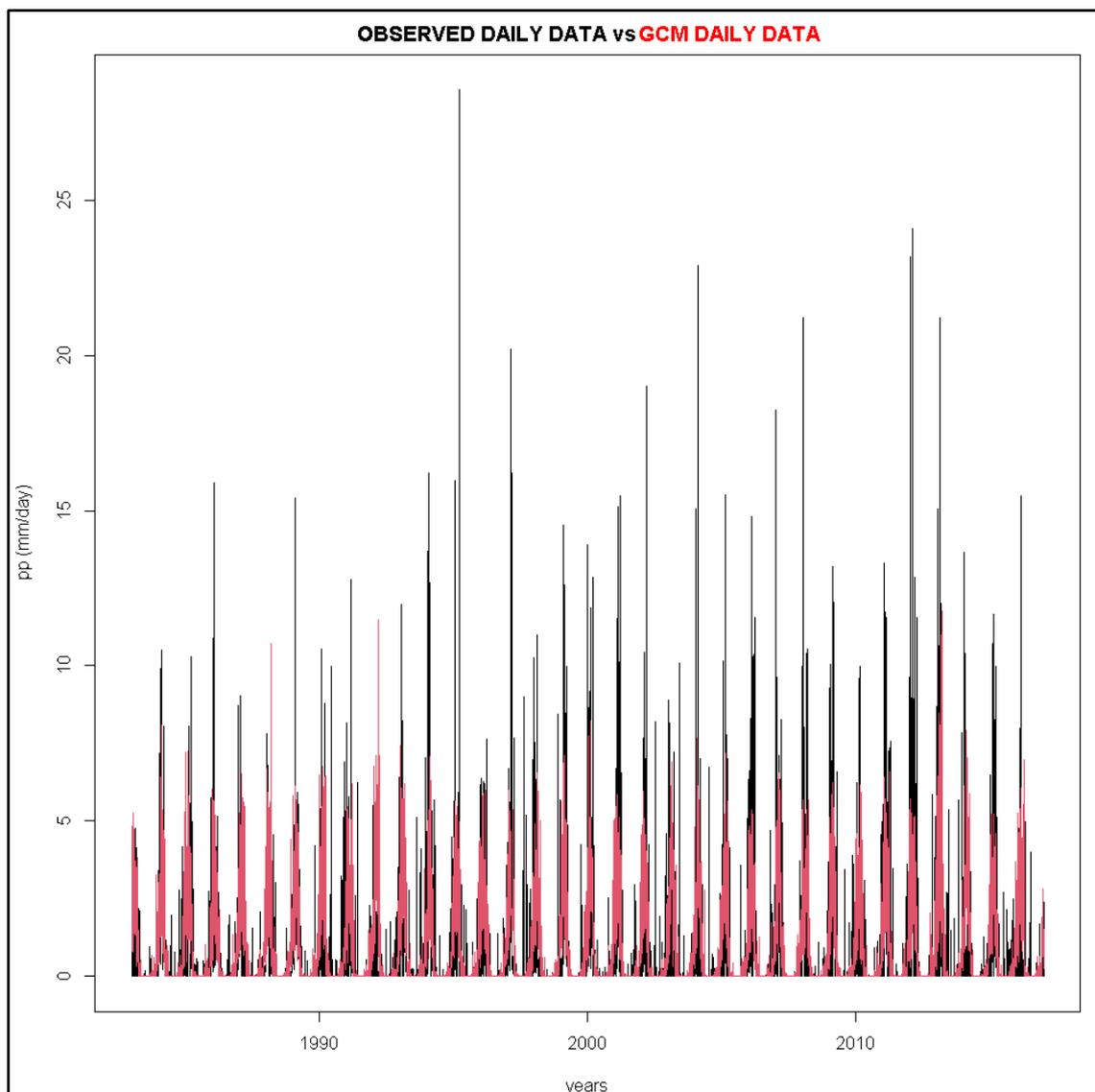
Con la finalidad de disminuir el tiempo de cálculo y procesamiento computacional se utilizó scripts o algoritmos, que ayudaron a utilizar este método estadístico en un lenguaje de programación. Los scripts se encontraron en línea, en el siguiente enlace: (<https://github.com/Hydroenvironment/Statdownscaling>).

Se realizó una comparación de la data observada (color negro) con la climática (color rojo) (en la figura 15) y se visualizó que en los puntos más bajos

(precipitaciones en temporada seca), se encuentra sobreestimándose respecto a la observada; mientras en los puntos más alto (temporada de lluvia), existe una subestimación y se puede visualizar en la figura 16, con el tipo de grafica de puntos.

### Figura 15

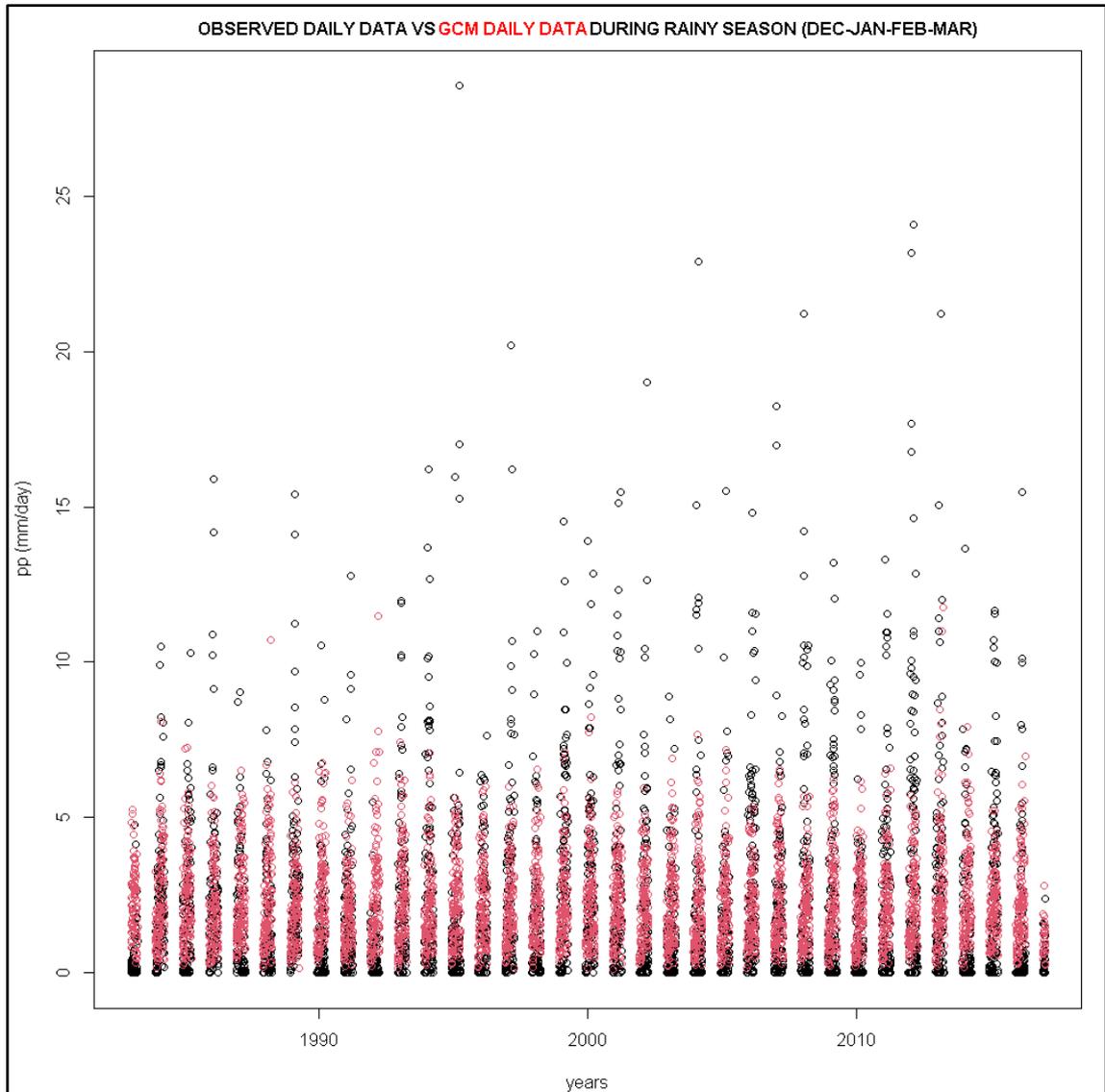
*Data histórica vs data climática, formato línea*



*Nota.* Extraído de RStudio.

**Figura 16**

*Data observada vs data climática, formato punto*

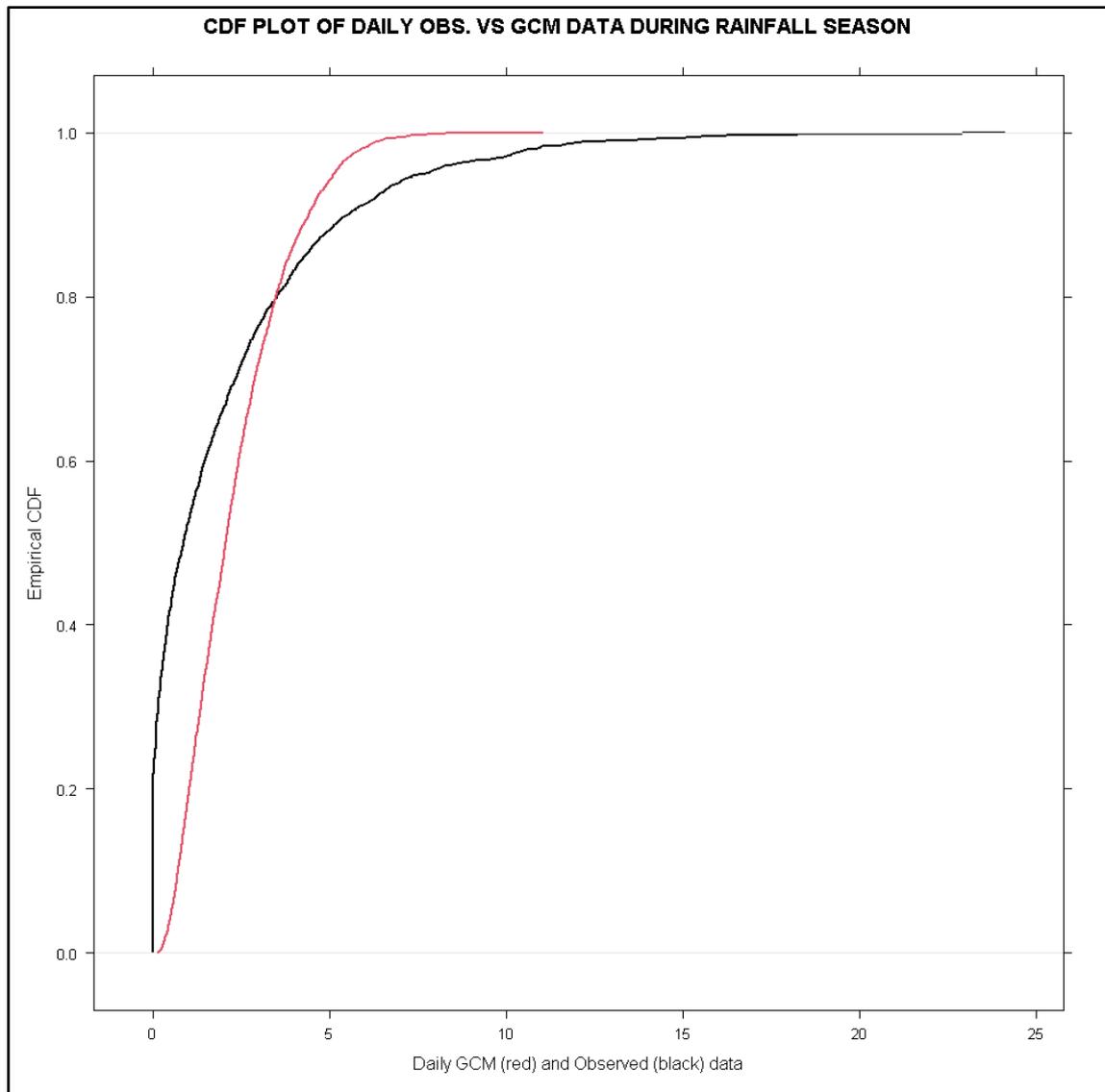


*Nota.* Extraído de RStudio.

En la figura 17, se utilizó la curva de la distribución acumulativa (CFD) y se visualizó que las curvas históricas con la climática, no se llegan a ensamblar y por lo cual se utilizó el método de mapeo de cuartiles del Downscaling.

**Figura 17**

*CFD de la data observada vs data climática*



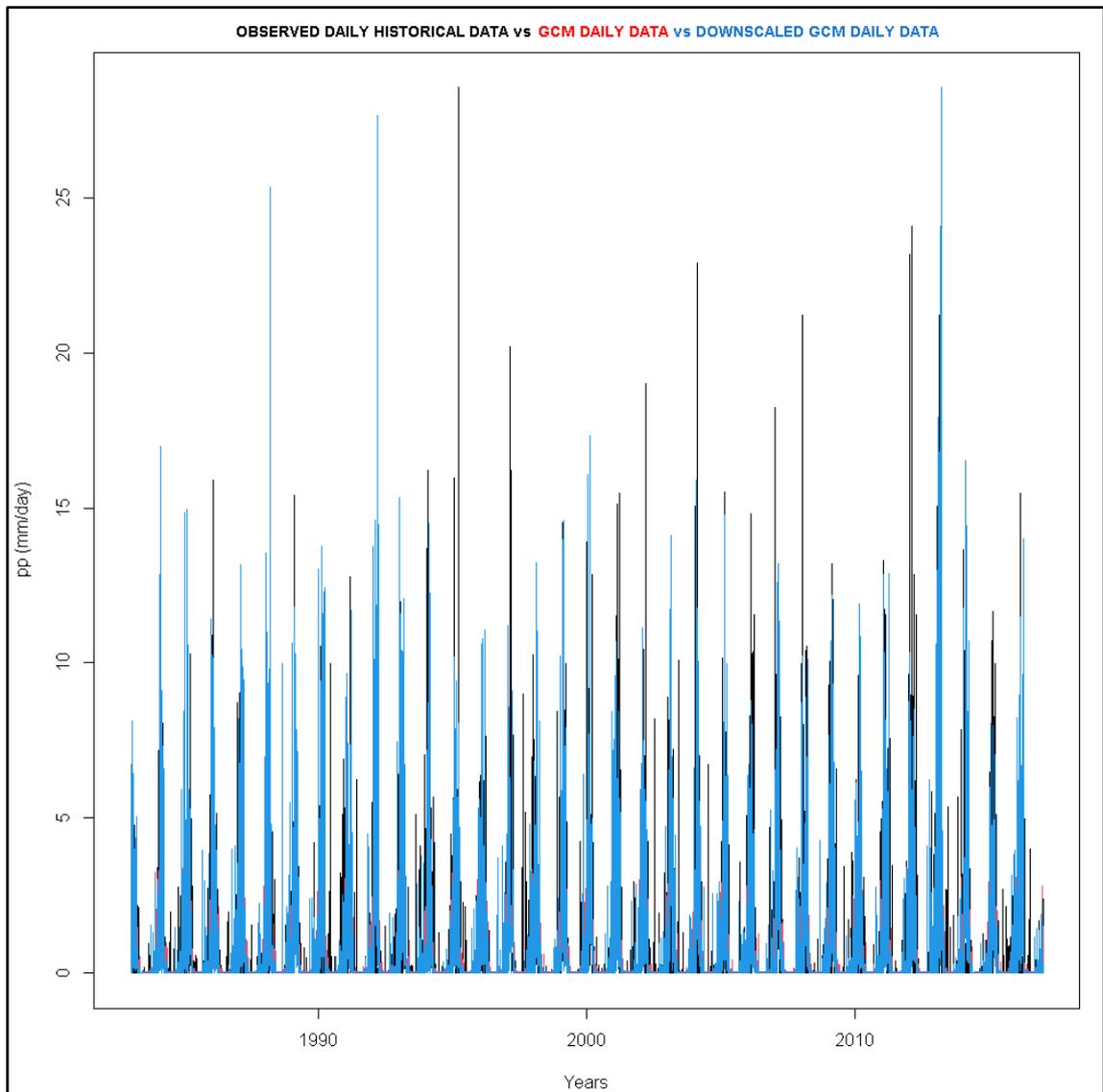
*Nota.* Extraído de R Studio.

Luego se procedió a ejecutar y se obtuvo un registro con una reducción de sesgo, llamado “desescalada”.

En la figura 18, se visualiza el registro de precipitación desescalada (color azul), climática (color rojo) y la observada (color negro). Obteniendo una mejor aproximación a la data observada y se visualizó con la data desescalada mejores resultados en las temporadas secas y de lluvia (figura 19).

**Figura 18**

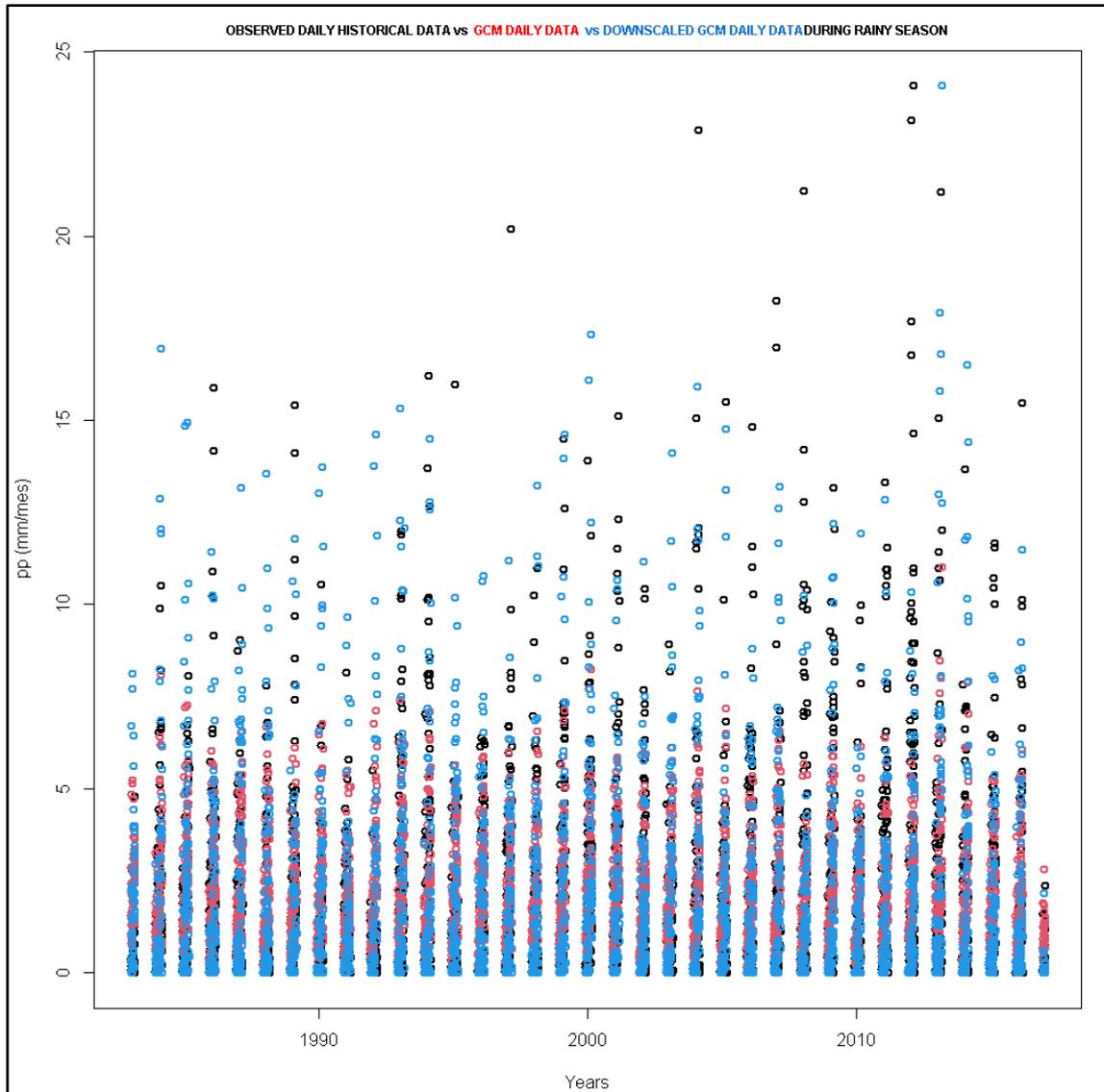
*Data observada vs data climática vs data desescalada, formato línea*



*Nota.* Extraído de RStudio.

**Figura 19**

*Data observada vs data climática vs data desescalada, formato punto*

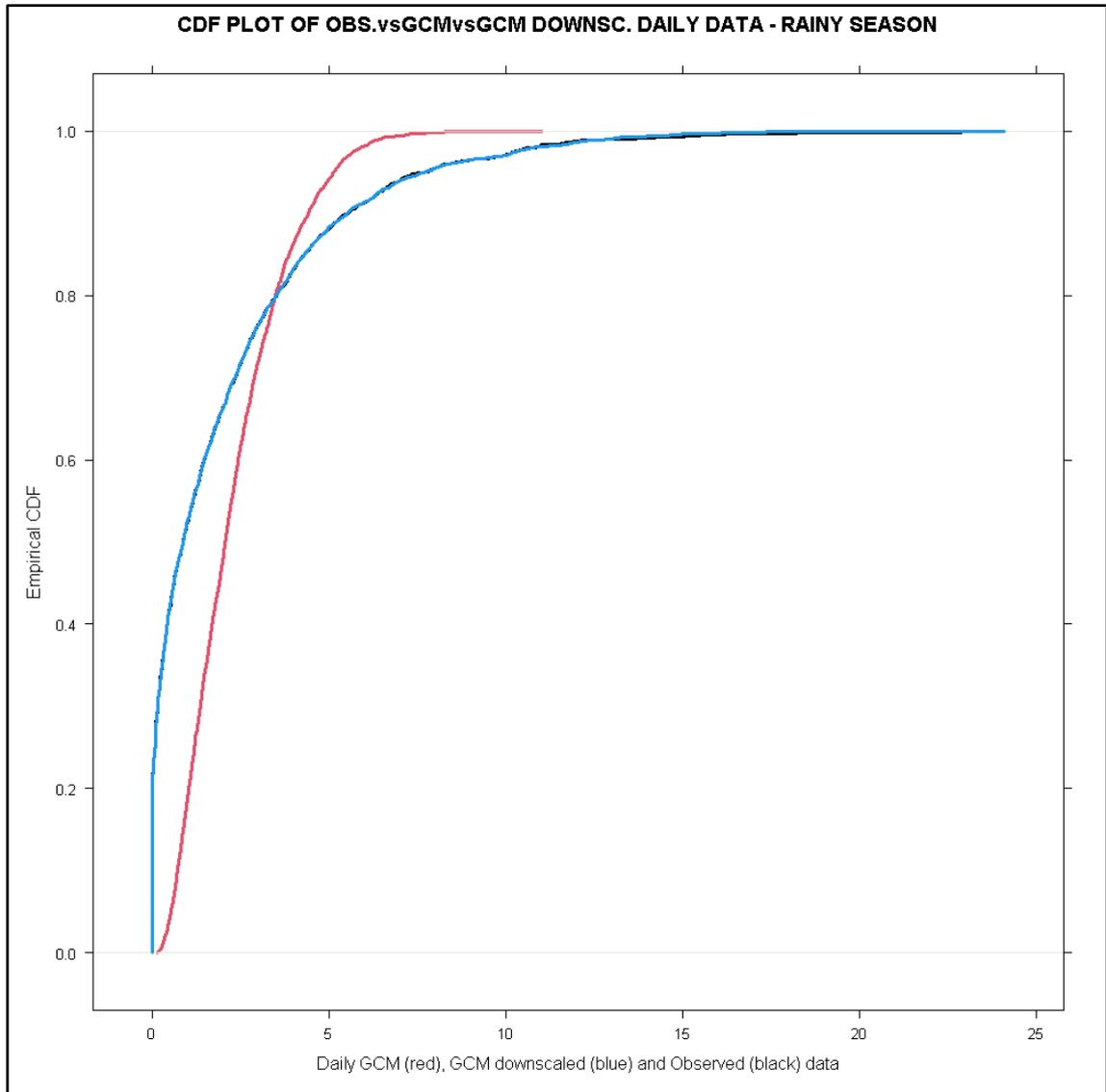


*Nota.* Extraído de RStudio.

En la figura 20, se utilizó nuevamente la curva de la distribución acumulativa (CFD) y se visualizó que las curvas históricas con la desescalada se llegan a ensamblar adecuadamente (color azul encima del color negro), y es por eso que se concluye que este método si es efectivo para la reducción de sesgo de la información climática.

**Figura 20**

*CFD de la data observada vs climática vs desescalada*



*Nota.* Extraído de RStudio.

#### **4.6.6. Índices Estandarizados Meteorológicos e Hidrológicos**

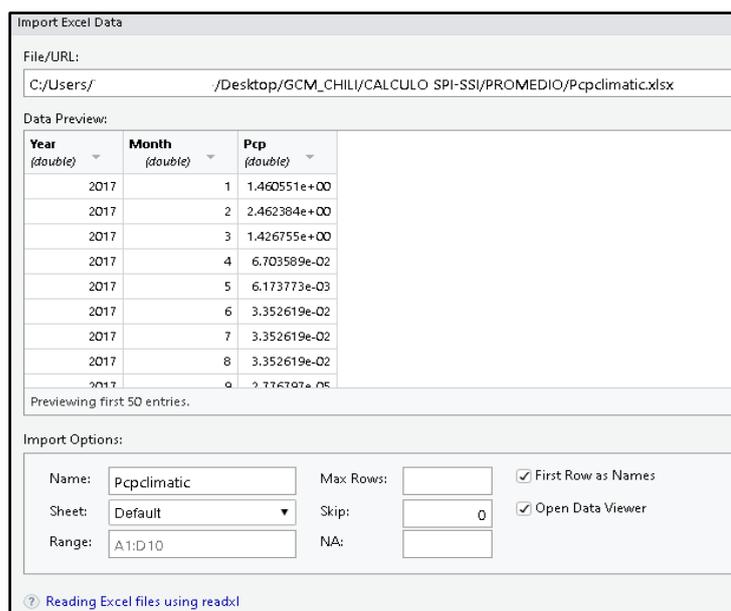
Los Índices de estandarización, ayudan a evaluar el impacto que podría tener una variable a futuro, mediante magnitud y frecuencia. La cual se desarrolla con el número de desviaciones estándar que la variable acumulativa se desvía en su promedio climatológico (McKee et.al., 1993).

En la investigación, se utilizó la librería “SPEI”, la cual es aplicable para todos los índices de estandarización como la precipitación (SPI), caudal (SSI o Qz), entre otros. Esta librería es usada en el lenguaje de programación “R”, donde la mayor información se encuentra en línea: <https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf>. Con este paquete, se obtuvieron los índices de las variables hidrometeorológicas y las gráficas estadísticas.

Se importó un Excel con la información organizada en tres columnas. La columna de años, meses (en número) y registro de la lluvia promedio por cada mes (figura 21). Posteriormente se ejecutó la librería “SPEI”, con la cual también se obtienen gráficos para exportar.

### Figura 21

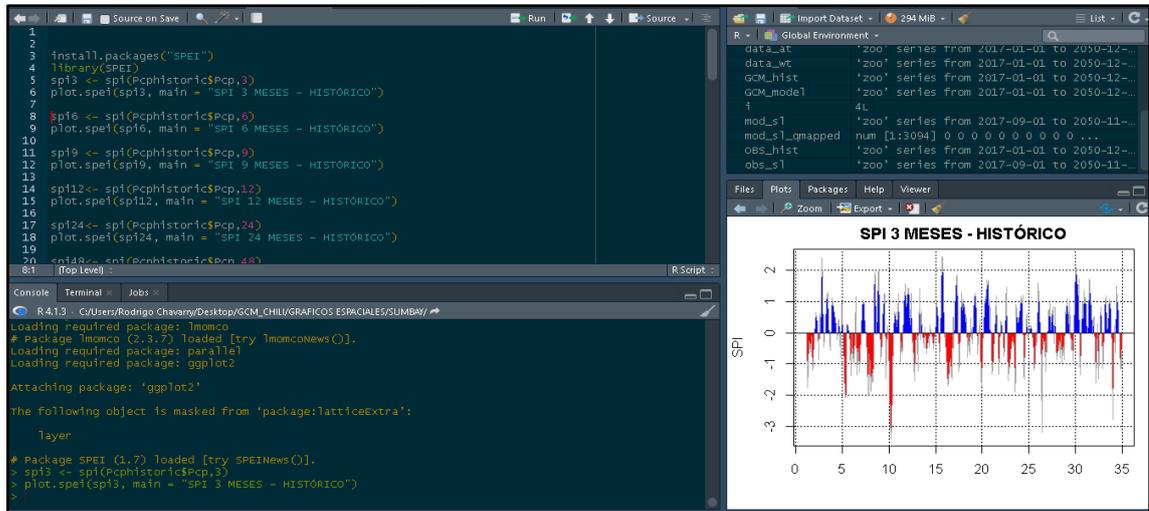
*Importación de la información para el cálculo del SPI*



*Nota.* Extraído de RStudio.

## Figura 22

### Ejecución del paquete SPEI



Nota. Extraído de RStudio.

## V. RESULTADOS

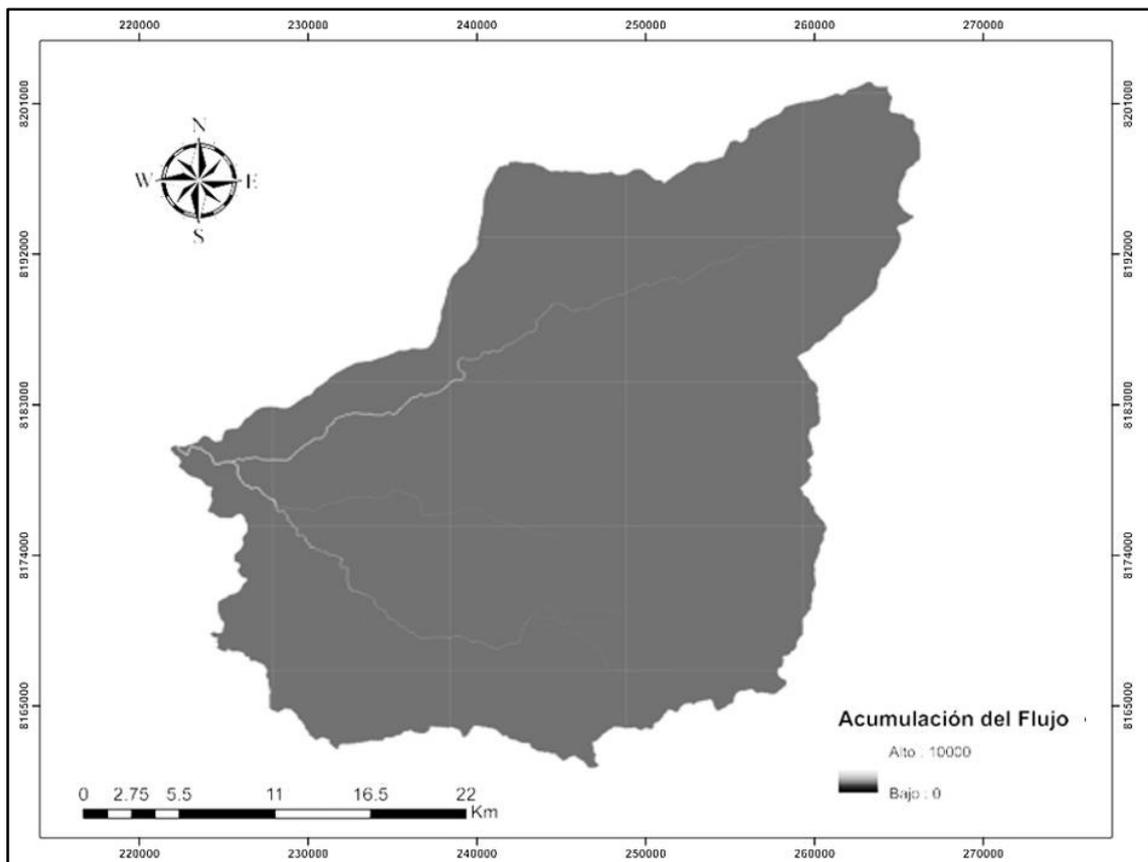
### 5.1. Resultados Descriptivos

#### 5.1.1. Representación Hidrológica de la Subcuenca.

Se adquirió información de tipo ráster del radar ALOS PALSAR de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA)- para la delimitación del área de la subcuenca del río Chili, la cual tuvo una resolución de 30.00 metros, luego mediante archivo vectorial se completó la delimitación de la subcuenca. Por otro lado, la hidrografía de la subcuenca delimitada se basó en el flujo acumulado (Figura 23) y flujo direccional (Figura 24). Obteniéndose la red de drenaje.

**Figura 23**

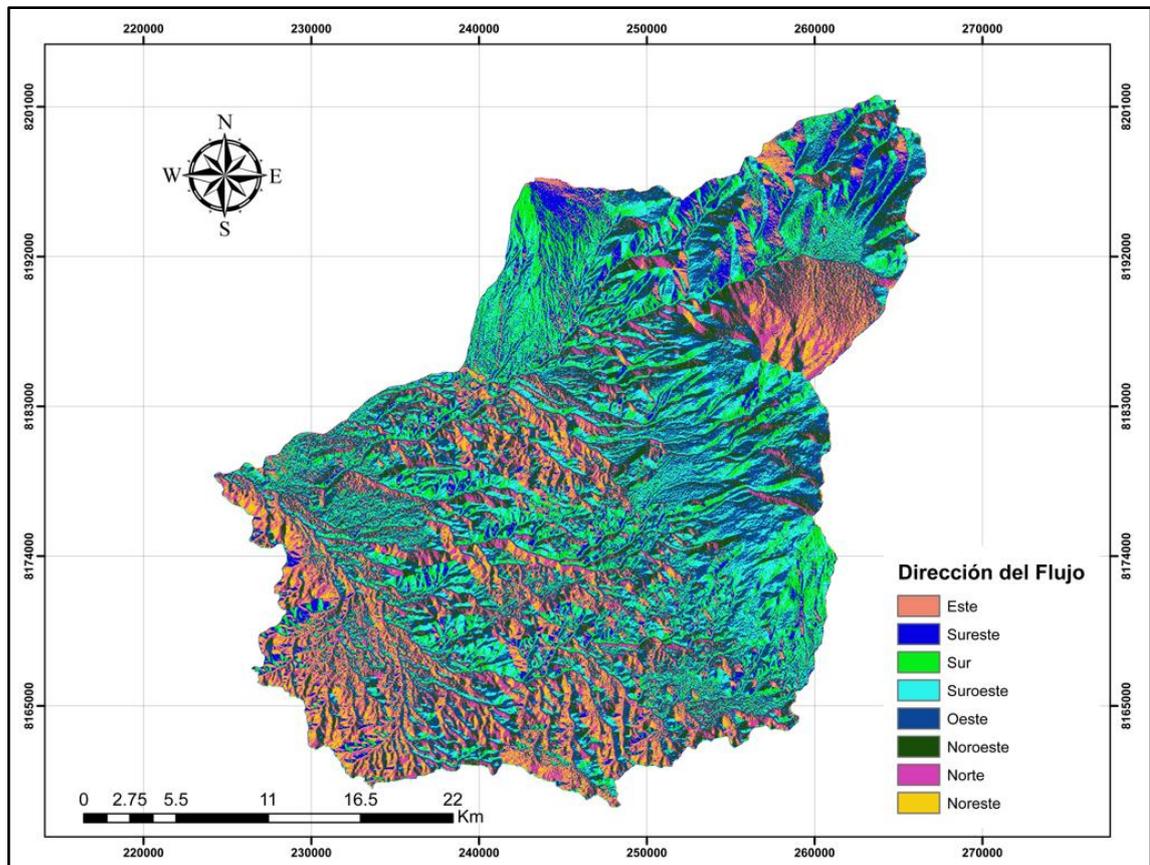
*Mapa de acumulación de flujo subcuenca del río Chili*



*Nota.* Elaborado en ArcSwat.

**Figura 24**

*Mapa de dirección de flujo subcuena del río Chili*

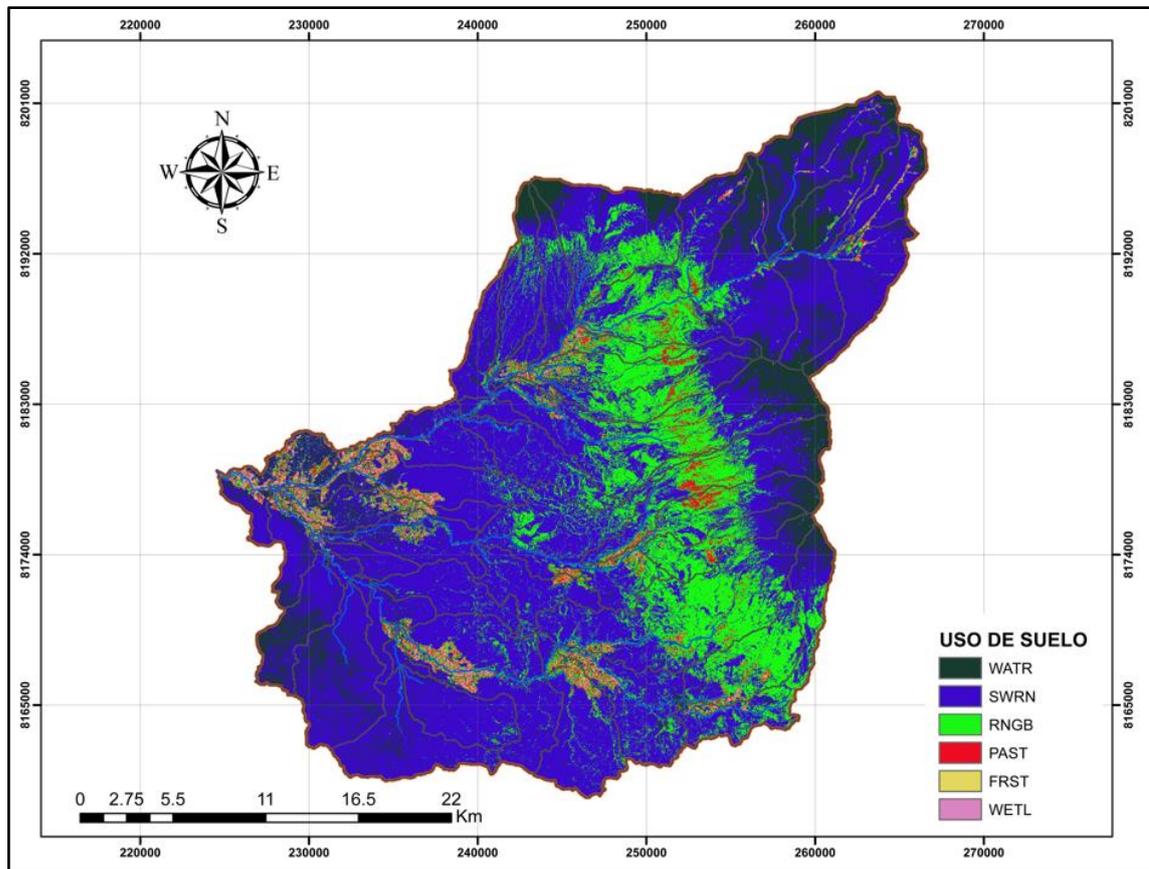


*Nota.* Elaborado en ArcSwat.

Para el estudio se utilizó el marco de cobertura vegetal de LandViewer, la cual se trata de una plataforma de imágenes de satélite que permite buscar, procesar y obtener información valiosa de los datos de satélite, que ayuda abordar soluciones de problemas relacionado a los recursos hídricos.

**Figura 25**

*Mapa de cobertura vegetal subcuena del río Chili*



*Nota:* Elaborado en ArcSwat.

Clasificando la cobertura vegetal de la subcuena del río Chili en 6 clases (ver Tabla 9).

**Tabla 9***Clases de cobertura vegetal*

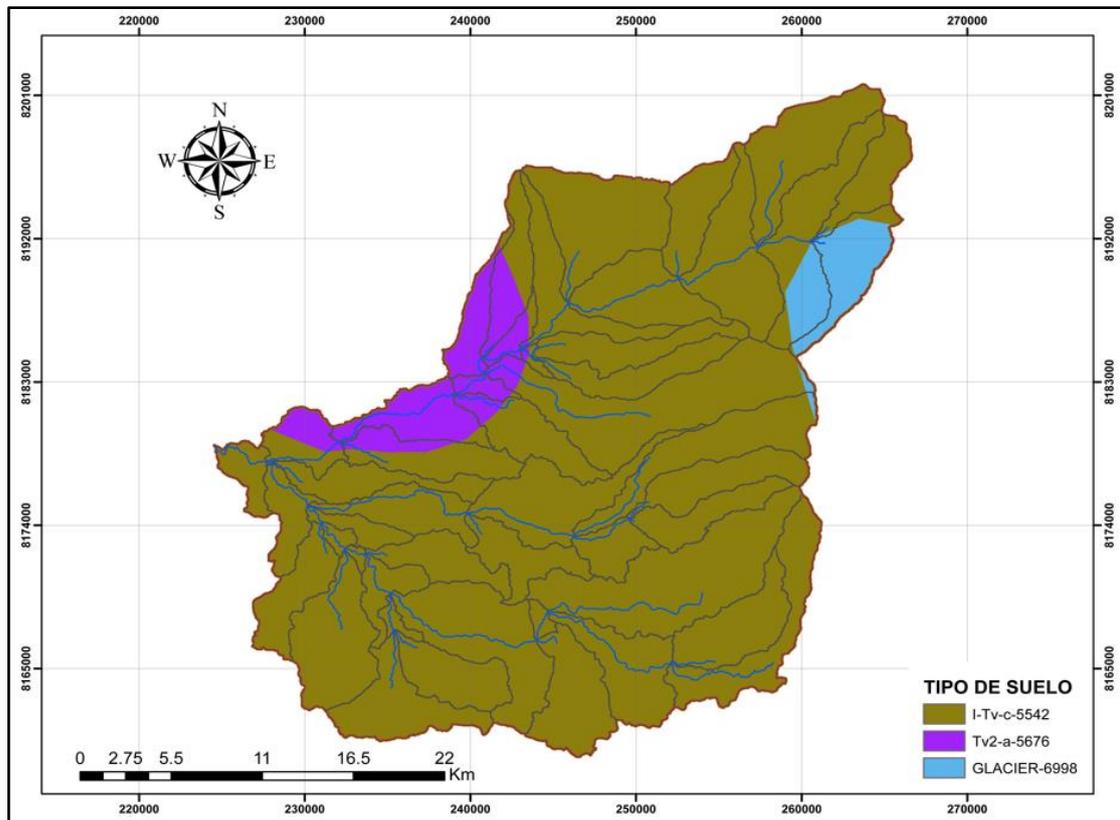
<b>Cobertura vegetal</b>	<b>Código</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>% Área</b>
Agua	WATR	135.22	12.84
Tierras mixtas	SWRN	651.15	61.83
Matorral	RNGB	216.84	20.59
Pasto Natural	PAST	32.96	3.13
Bosques	FRST	8.53	0.81
Humedales	WETL	8.42	0.80

*Nota:* Obtenido de ArcSwat

Para el tipo de suelo se usó la base de datos de suelo de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación), donde se obtuvo en formato vectorial los diferentes tipos de suelo de América Latina. Clasificando la subcuenca del río Chili en 3 tipos diferentes de suelos, ver Figura 26.

**Figura 26**

*Mapa de tipo de suelo de la subcuenca del río Chili*



*Nota.* Elaborado en ArcSwat.

**Tabla 10**

*Tipo de suelo*

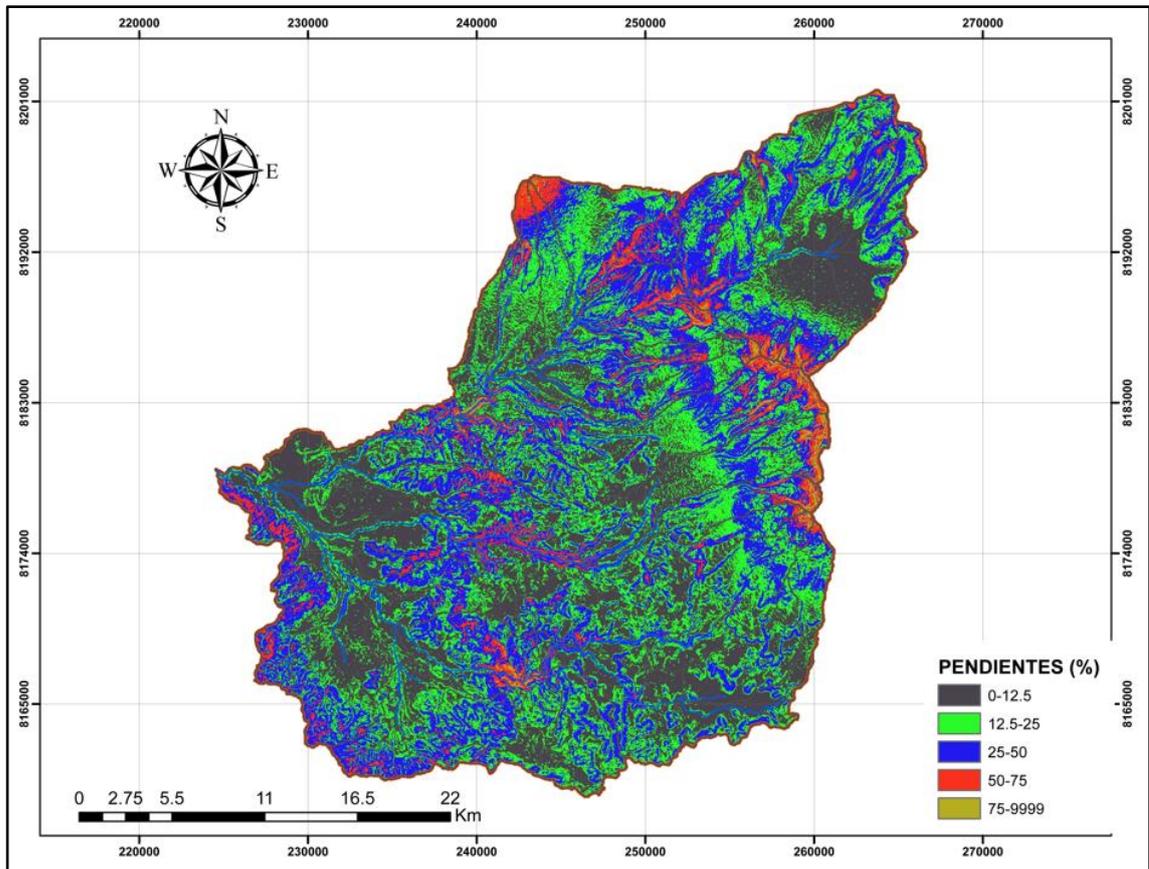
Tipo Suelo	Código	Área	% Área
Litosol Andosol vítricos	I-Tv-c-5542	950.97	90.30
Andosoles acrisol	Tv2-a-5676	68.97	6.55
Glaciar	GLACIER-6998	33.18	3.15

*Nota:* Obtenido de ArcSwat.

Para el estudio, se generaron 5 clases de pendientes, ver Tabla 11; las cuales se distribuyeron en la subcuenca del río Chili, ver Figura 27.

**Figura 27**

*Mapa de pendientes subcuenca del río Chili*



*Nota:* Elaborado en ArcSwat.

**Tabla 11**

*Clasificación de pendientes (%)*

Clase	Mínimo	Máximo
1	0.00	12.50
2	12.50	25.00
3	25.00	50.00
4	50.00	75.00
5	75.00	Limite

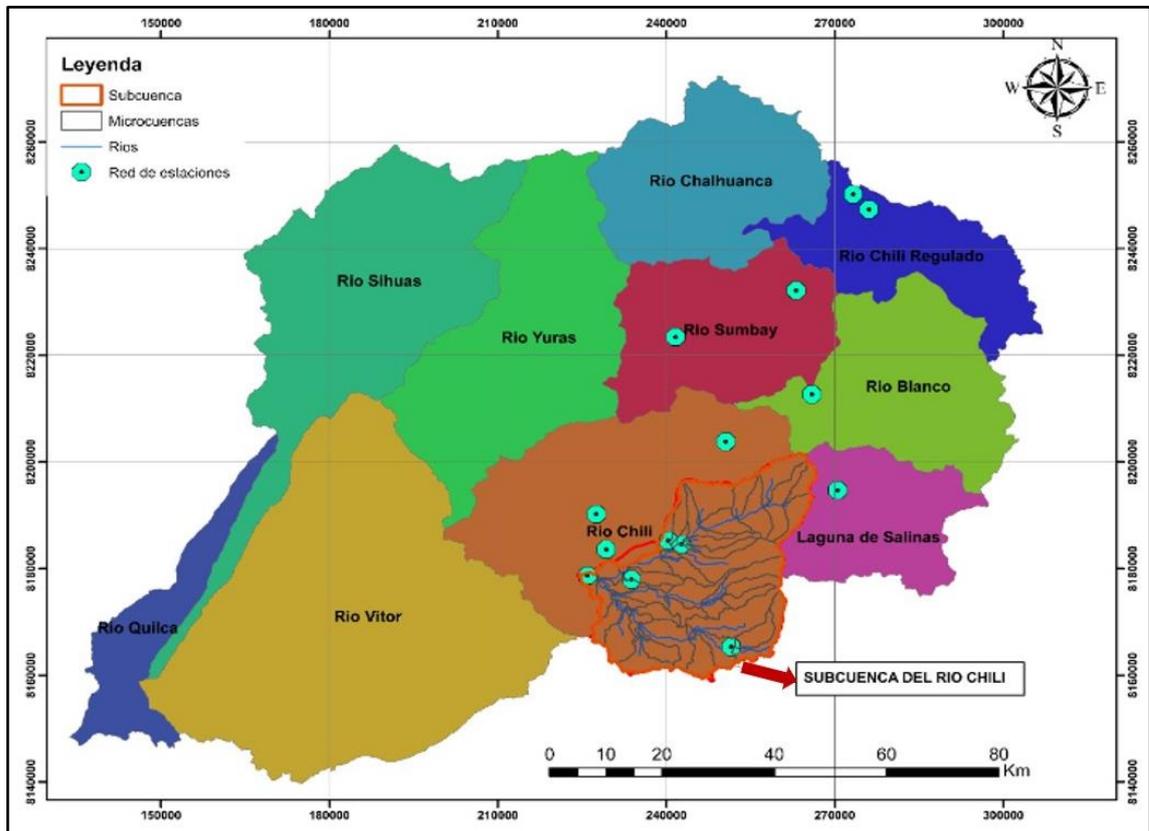
*Nota:* Obtenido de ArcSwat.

El estudio se basó en 14 estaciones meteorológicas situadas en el interior y en las proximidades de la subcuenca de estudio (figura 28 y tabla 12). La

información usada es bajo el producto de Purdue para precipitación y para temperatura el producto grillado elaborado por Senamhi llamado PISCO.

**Figura 28**

*Estaciones meteorológicas*



*Nota.* Elaborado en ArcSwat.

**Tabla 12***Ubicación geográfica de estaciones meteorológicas (PURDUE)*

<b>ID</b>	<b>Nombre</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>
1	Aguada blanca	250586.60	8203834.70	3671
2	Antiquilla	240319.80	8185261.70	2182
3	Arequipa	227537.90	8190216.70	2525
4	Characato	233799.30	8177957.20	2454
5	Chiguata	242679.00	8184576.00	2902
6	Frayle	265917.20	8212694.60	4131
7	Huasacache	225978.00	8178691.00	2206
8	Imata	276104.90	8247353.60	4475
9	Pampilla	229317.00	8183599.00	2326
10	Patahuasi	241642.30	8223428.30	4035
11	Pillones	263116.50	8232170.60	4455
12	Salinas	270497.00	8194704.00	2902
13	San José de Uzuña	251560.00	8165351.70	3276
14	Sumbay	273284.95	8250202.04	4403

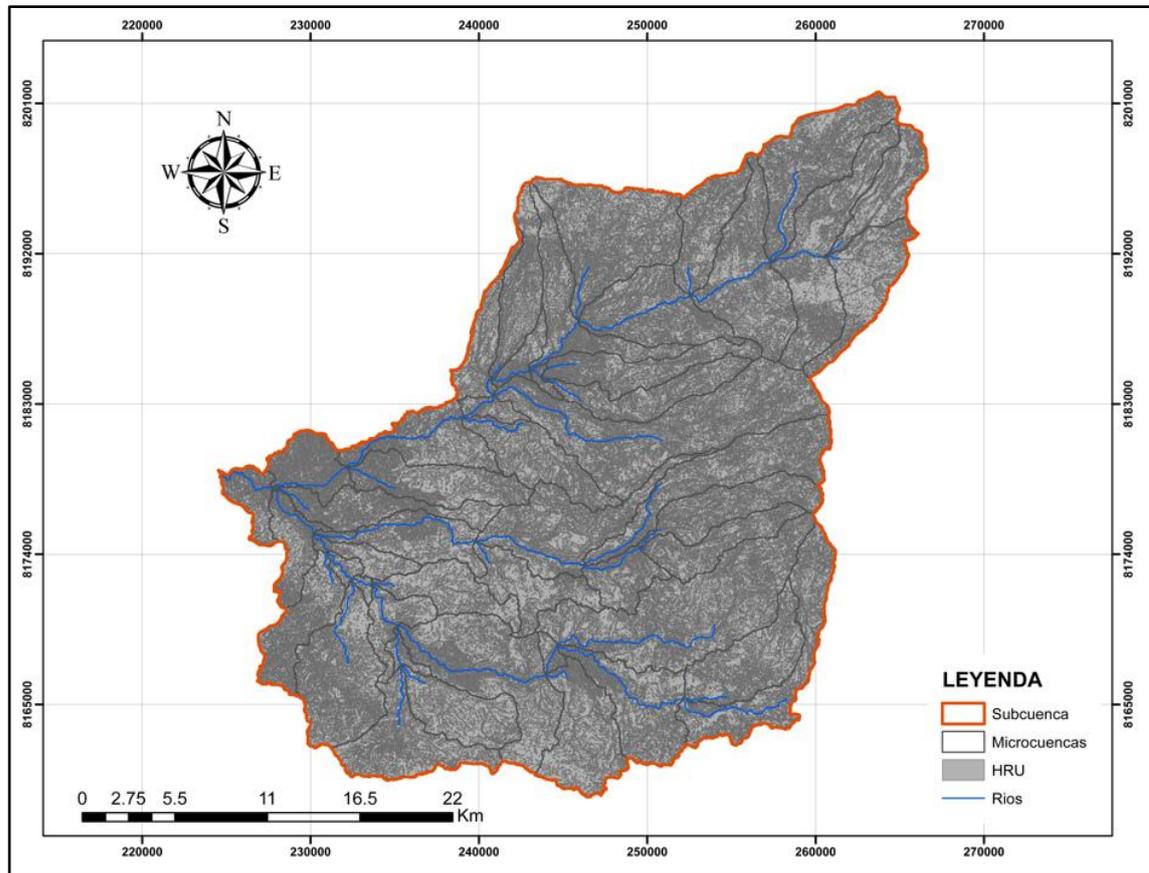
*Nota.* Extraído de Senahmi

Una vez finalizado el proceso de delimitación de la subcuenca, se continuó con la definición de las HRU.

La definición de las HRU se realizó en la interfaz de SWAT, introduciendo tres conjuntos de datos espaciales (DEM, cobertura vegetal y tipo de suelo), dando consigo 1294 Unidades de respuestas hidrológicas (Ver figura 29).

**Figura 29**

*Unidades de respuesta hidrológica de la subcuenca del río Chili*



*Nota.* Elaborado en ArcSwat.

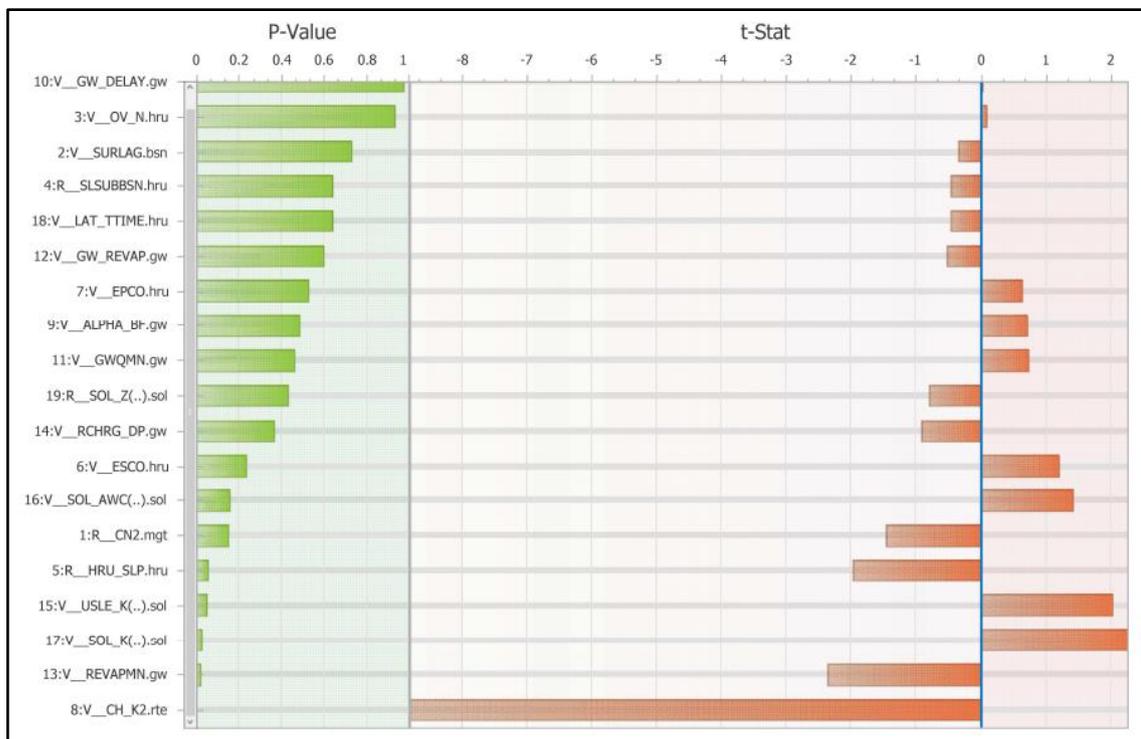
## **5.2. Resultados Inferenciales**

### **5.2.1. Representación Hidrológica de la Subcuenca.**

La lista de parámetros sensibles se encuentra detallada en la tabla 7. Los parámetros se enumeran en función de sus niveles de sensibilidad analizados por SWAT-CUP con la opción de sensibilidad global. Muestra que los diecinueve primeros parámetros fueron sensibles y se consideraron para la calibración, de los cuales los tres primeros (Conductividad hidráulica efectiva en canal principal, umbral de profundidad del agua en el acuífero y conductividad hidráulica saturada), tienen mayor grado de sensibilidad.

**Figura 30**

*Análisis de sensibilidad*



*Nota.* Extraído de SWATCUP.

**Tabla 13***Ranking de parámetros según análisis de sensibilidad para caudales*

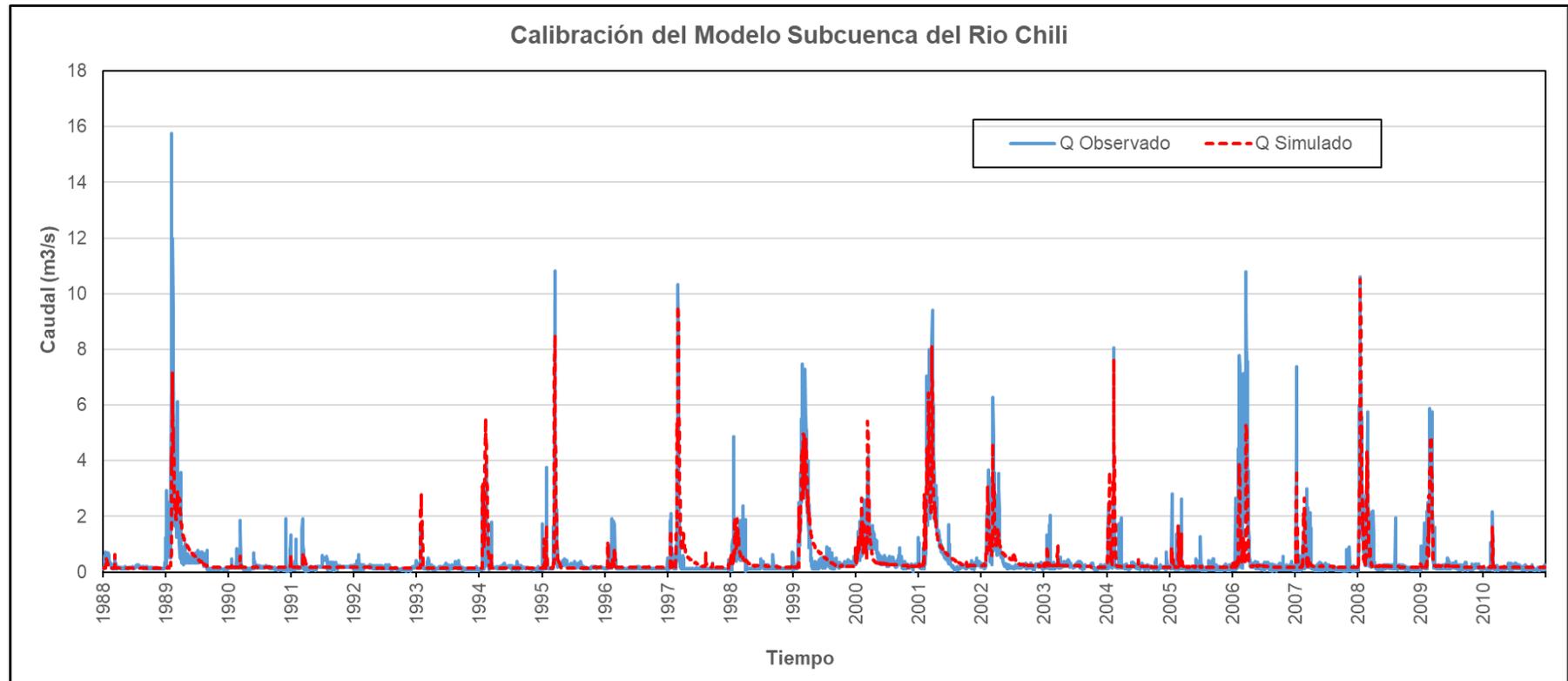
<b>Ranking</b>	<b>Nombre del Parámetro</b>	<b>t-Stat</b>	<b>P-Value</b>
1	CH_K2	-8.795	0.000
2	REVAPMN	-2.367	0.020
3	SOL_K(..)	2.259	0.027
4	USLE_K(..)	2.020	0.047
5	HRU_SLP	-1.967	0.053
6	CN2	-1.452	0.150
7	SOL_AWC(..)	1.428	0.157
8	ESCO	1.203	0.233
9	RCHRG_DP	-0.911	0.365
10	SOL_Z(..)	-0.794	0.430
11	GWQMN	0.743	0.460
12	ALPHA_BF	0.706	0.482
13	EPCO	0.631	0.530
14	GW_REVAP	-0.527	0.600
15	LAT_TTIME	-0.468	0.641
16	SLSUBBSN	-0.467	0.642
17	SURLAG	-0.343	0.732
18	OV_N	0.079	0.937
19	GW_DELAY	0.028	0.978

*Nota:* Extraído de SWATCUP.

El período de calibración se extendió de 1988 hasta fines del 2010 y se obtuvo los valores reales de los parámetros de la subcuenca del río Chili, ver Tabla 14. Donde la similitud de la respuesta hidrológica de los caudales simulados respecto a los observados se cuantifica con métricas de desempeño, ver Tabla 15; y gráficamente se visualizó los dos periodos de evaluación: calibración y validación ver Figura 31 y 32 respectivamente.

**Figura 31**

*Calibración del modelo subcuenca del río Chili*



*Nota:* Extraído de SWATCUP.

En la tabla 14 se presentan los valores obtenidos de la calibración de parámetros.

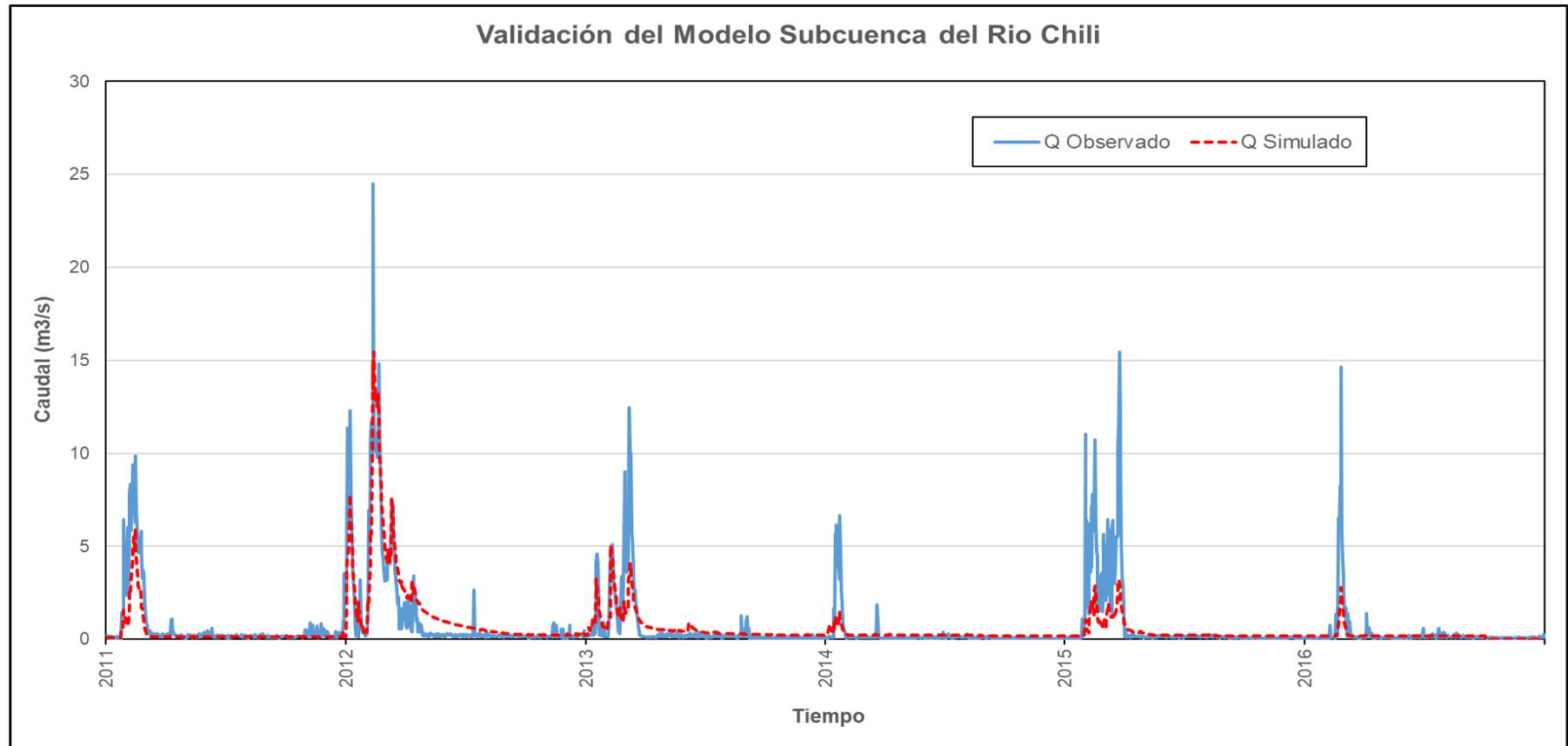
**Tabla 14***Parámetros calibrados*

<b>Parámetros</b>	<b>Valor ajustado</b>
r__CN2.mgt	-0.40
v__SURLAG.bsn	22.41
v__OV_N.hru	27.03
r__SLSUBBSN.hru	0.09
v__ESCO.hru	0.96
v__EPCO.hru	0.09
r__HRU_SLP.hru	0.114
v__CH_K2.rte	1.75
v__ALPHA_BF.gw	0.004
v__GW_DELAY.gw	3.57
v__GWQMN.gw	4254
v__GW_REVAP.gw	0.08
v__REVAPMN.gw	323.33
v__RCHRG_DP.gw	0.76
v__USLE_K(..).sol	0.34
v__SOL_AWC(..).sol	0.19
v__SOL_K(..).sol	18.51
v__LAT_TTIME.hru	8.18
r__SOL_Z(..).sol	0.26

*Nota:* Extraído de SWATCUP.

**Figura 32**

*Validación del modelo subcuena del río Chili*



*Nota:* Extraído de SWATCUP.

Los índices de eficiencia del modelo para la subcuenca del río Chili se muestran en la tabla 15. Según el NSE (0.669) los resultados del modelo calibrado fueron "Bueno" y para el periodo de validación (0.614) también resultó "Bueno".

Los valores de PBIAS para la descarga fueron -2.16% para la calibración y 15.04% para la validación, correspondientes a las calificaciones de desempeño del modelo de "Muy bueno". Los valores de R2 para la descarga fueron 0.67 para la calibración y 0.63 para la validación, correspondientes a las calificaciones de desempeño del modelo de "buenos". Cabe mencionar que se consideró 5 años de calentamiento al modelo para mayor estabilidad (1983-1987).

**Tabla 15**

*Índices de eficiencia del modelo*

Índices de eficiencia	Calibración (1988-2010)	Validación (2011-2016)
NSE	0.67	0.61
R2	0.67	0.63
PBIAS	-2.16	14.98

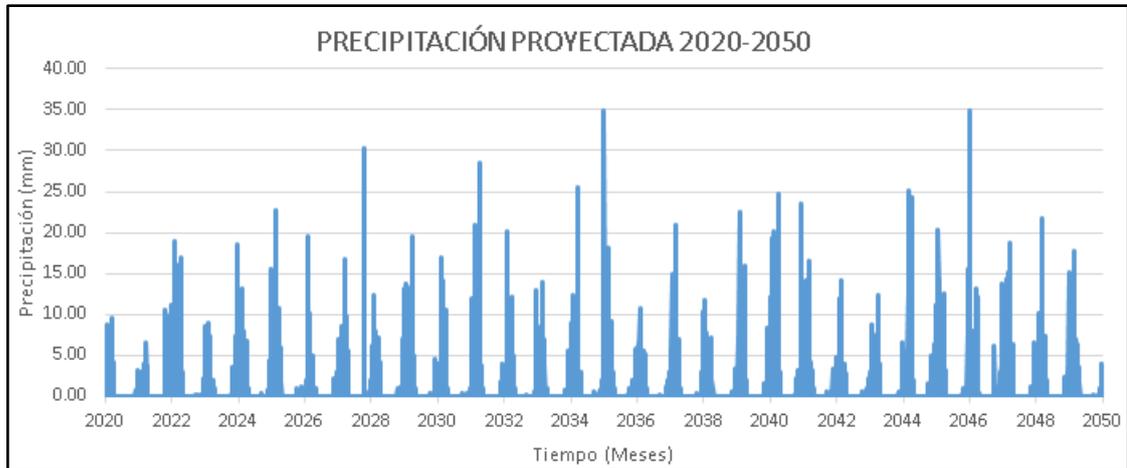
*Nota:* Extraído de SWATCUP.

### **5.2.2. Comportamiento de Sequías Bajo Proyecciones Climáticas**

Posterior a la desescalada de la información meteorológica, mediante el método estadístico downscaling, se obtuvieron los resultados proyectados hasta el 2050 para precipitación diaria y temperatura en la Figura 33 y 34 respectivamente.

**Figura 33**

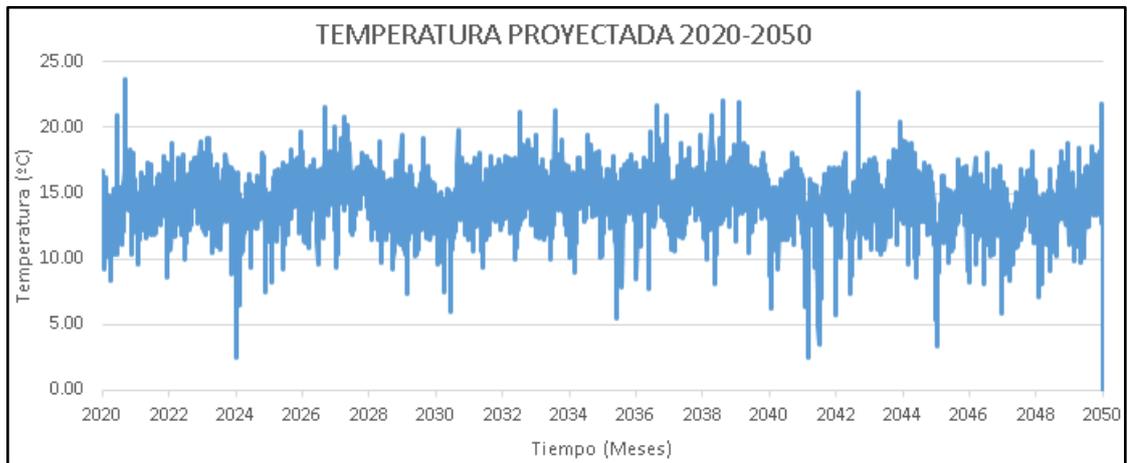
*Precipitación mensual proyectada hasta el 2050*



*Nota:* Elaboración en Excel.

**Figura 34**

*Temperatura mensual proyectada hasta el 2050*



*Nota:* Elaboración en Excel.

Posterior a ello, se utilizó la librería SPEI, del lenguaje de programación R y se obtuvo como resultados el índice para diferentes escalas (3,6,9,12 meses), visualizando su frecuencia en la Tabla 16 y su cambio en el tiempo en la Figura 35 y Figura 36, para el caso de la histórica y proyectada respectivamente.

**Tabla 16**

*Características de las sequías meteorológicas*

Índice de sequía		SPI_3		SPI_6		SPI_9		SPI_12	
Registro de valores	Designación	Histórica	Proyectada	Histórica	Proyectada	Histórica	Proyectada	Histórica	Proyectada
<b>&gt; 0</b>	<b>Húmedo</b>	<b>206</b>	<b>200</b>	<b>207</b>	<b>159</b>	<b>204</b>	<b>170</b>	<b>209</b>	<b>174</b>
Frecuencia		0.50	0.49	0.51	0.45	0.51	0.48	0.53	0.50
<b>De -0.999 a 0</b>	<b>Sequía ligera (SL)</b>	<b>141</b>	<b>147</b>	<b>132</b>	<b>150</b>	<b>141</b>	<b>129</b>	<b>130</b>	<b>121</b>
Frecuencia		0.35	0.36	0.33	0.42	0.35	0.37	0.33	0.35
<b>De -1.499 a -1.00</b>	<b>Sequía moderada (SM)</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>35</b>	<b>32</b>	<b>27</b>	<b>34</b>	<b>33</b>	<b>33</b>
Frecuencia		0.09	0.09	0.09	0.09	0.07	0.10	0.08	0.09
<b>De -1.999 a -1.50</b>	<b>Sequía severa (SS)</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>19</b>
Frecuencia		0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.05
<b>&lt; -2.00</b>	<b>Sequía extrema (SE)</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>14</b>	<b>2</b>
Frecuencia		0.03	0.03	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01

Nota: Elaboración en Excel.

Gráficamente, se puede visualizar el índice de precipitación estándar promedio de todas las estaciones para los periodos históricos y proyectados, en diferentes escalas de tiempo.

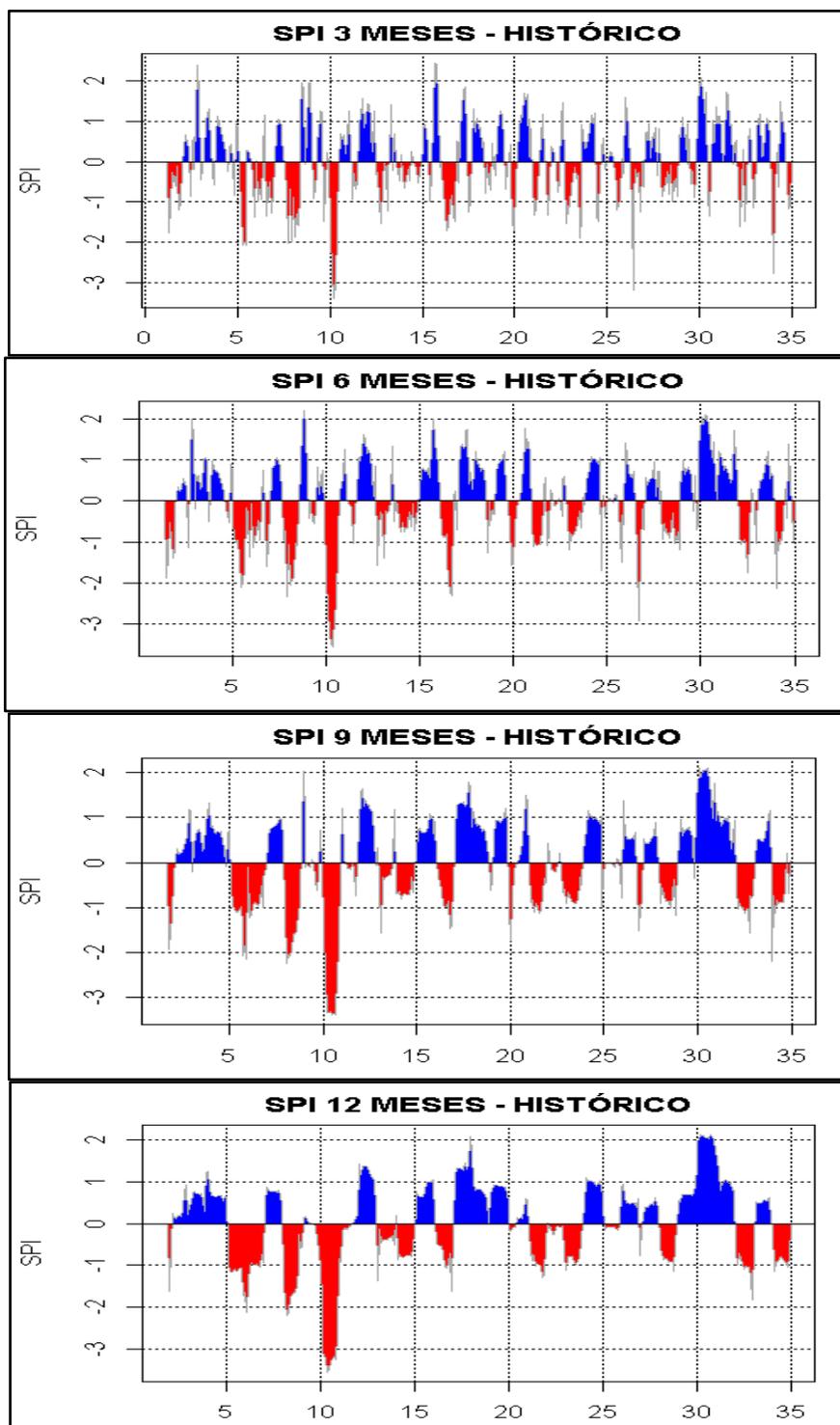
En la figura 35 y 36 se mostraron los resultados del análisis de caracterización del SPI3-SPI6-SPI9-SPI12 para el área de estudio. Donde se observó que existen fluctuaciones en un rango de -3.0 a 2.0 para el periodo histórico (1983 - 2016).

En la información promedio de las estaciones meteorológicas, se presentaron fluctuaciones negativas de 141 valores máximos en sequías ligeras, asimismo 36 valores máximos en sequías moderadamente secas en el SPI3, también se encontraron 14 y 12 valores en sequías severamente secas en el SPI6 y SPI9 respectivamente, además de encontrarse 16 valores en sequías extremadamente secas considerando predominante al SPI-9.

En el periodo de proyección, se muestra una disminución en la frecuencia de sequías húmedas a seca, dando consigo valores negativos. Por lo tanto, se muestra que a futuro podría haber un aumento de sequías con un impacto negativo, a un nivel ligero y/o moderado, pero una disminución en sequías extremas, manteniéndose las sequías severas.

**Figura 35**

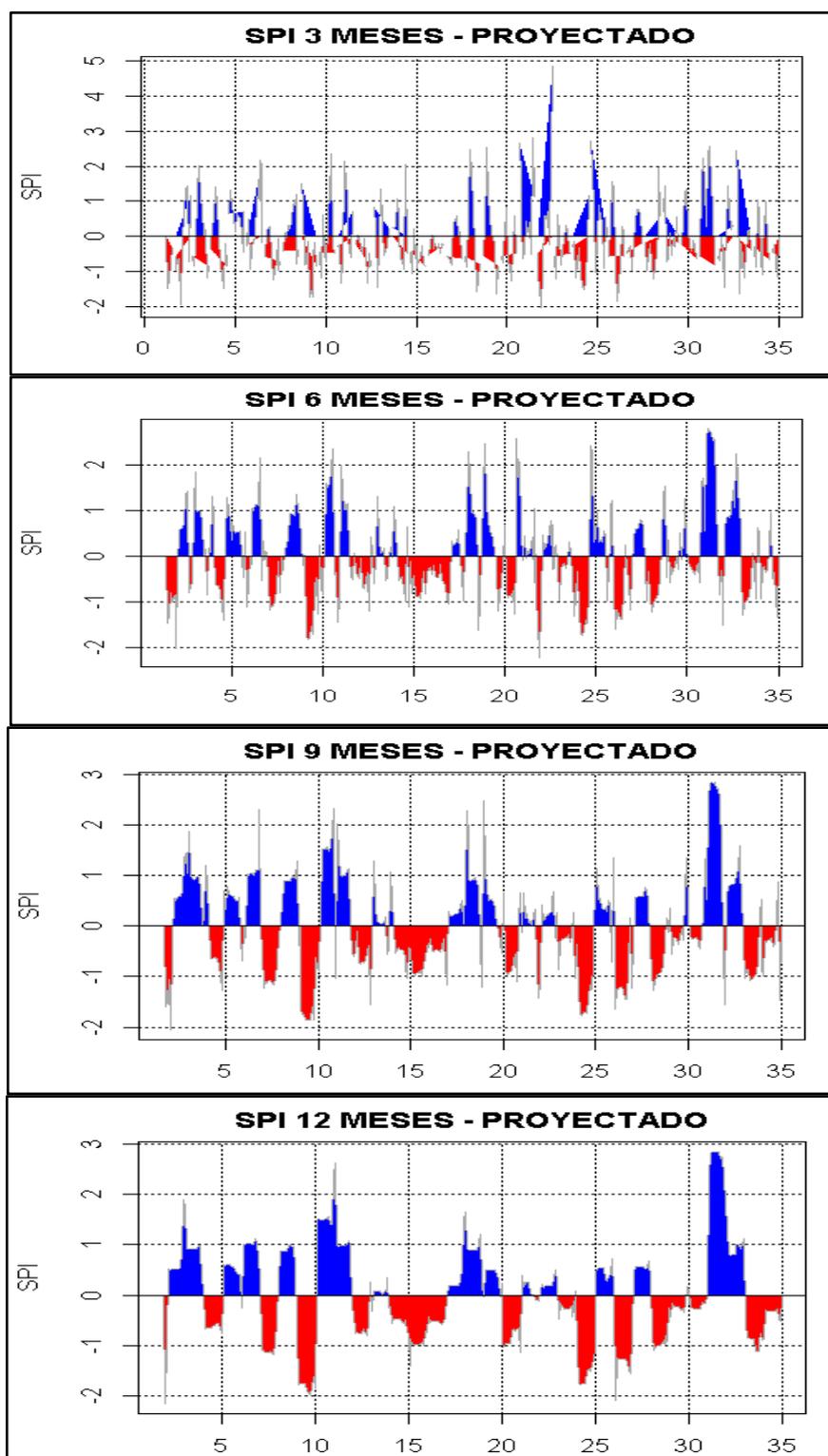
*Índice de precipitación estándar (SPI) en el periodo histórico*



*Nota.* Elaboración en RStudio.

**Figura 36**

*Índice de precipitación estándar (SPI) en el periodo proyectado*



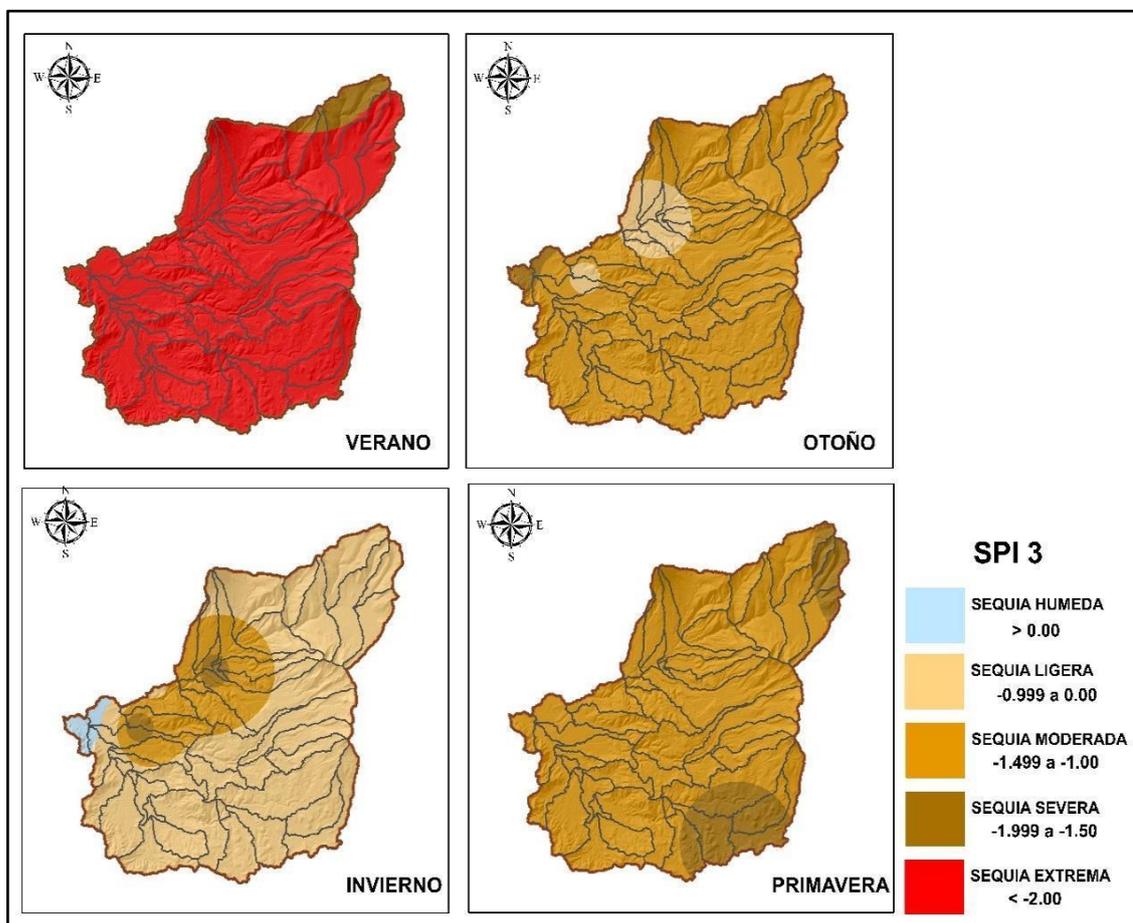
*Nota:* Elaboración en RStudio.

En las figuras 37 al 40, se visualiza que las sequías extremas pueden darse en diferente tiempo estacional. En el caso del SPI 3 se da en la estación del verano, SPI 6 en otoño, SPI 9 en invierno y por último el SPI 12 se registra en primavera. Podemos mencionar que las sequías moderadas predominan la mayor parte del área de la subcuenca en sus diferentes tiempos estacionales.

Tenemos 49 microcuencas en la subcuenca de estudio, y su descripción real en porcentaje de sequía que más predomina, es del tipo moderada.

### Figura 37

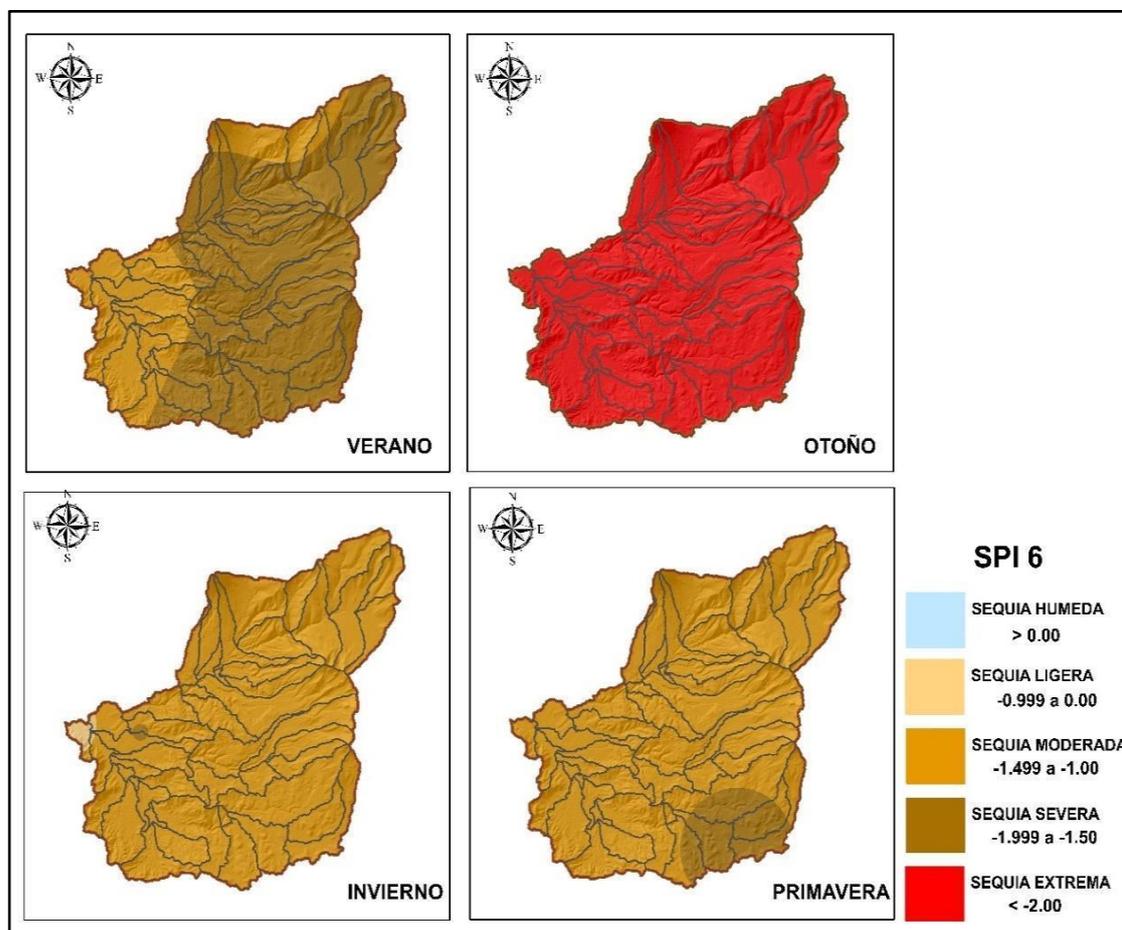
*Caracterización espacial del SPI 3, en diferentes periodos estacionales*



*Nota:* Elaborado en ArcGIS.

**Figura 38**

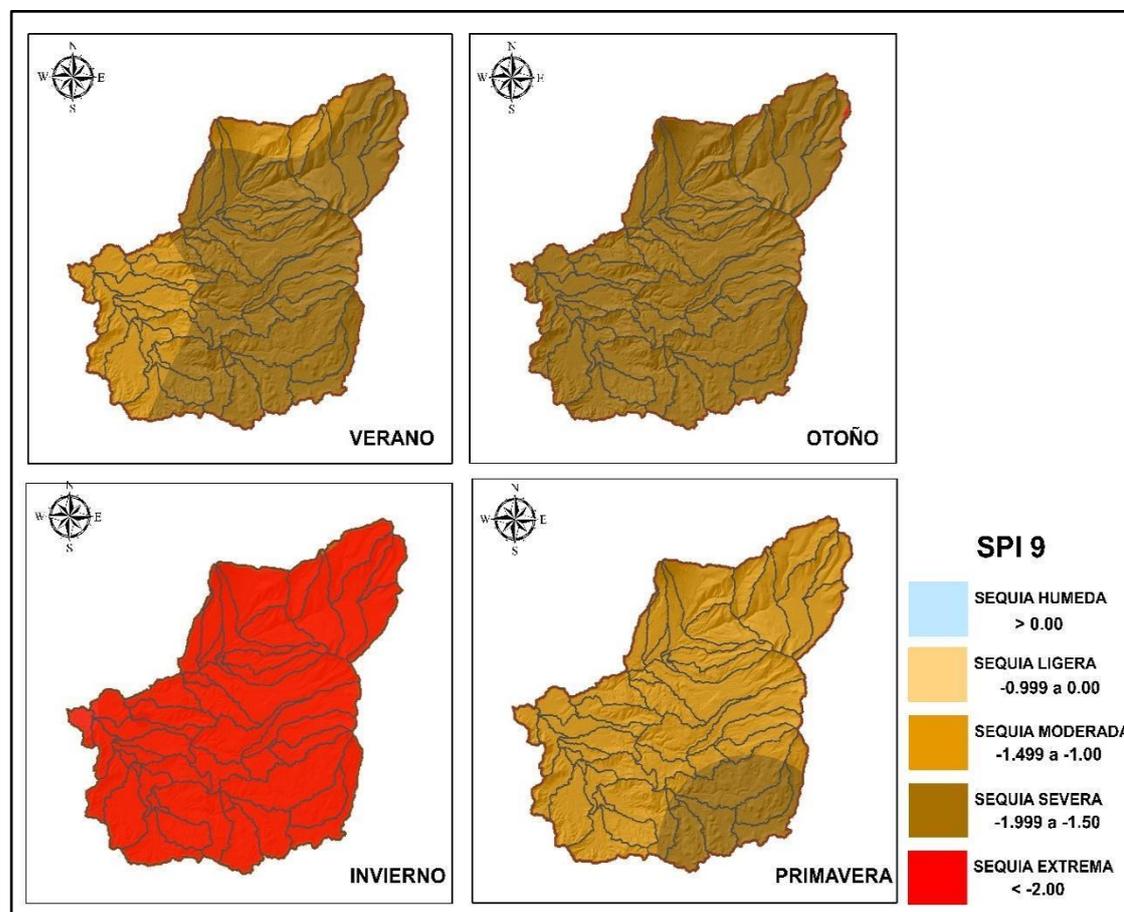
*Caracterización espacial del SPI 6, en diferentes periodos estacionales*



*Nota:* Elaborado en ArcGIS.

**Figura 39**

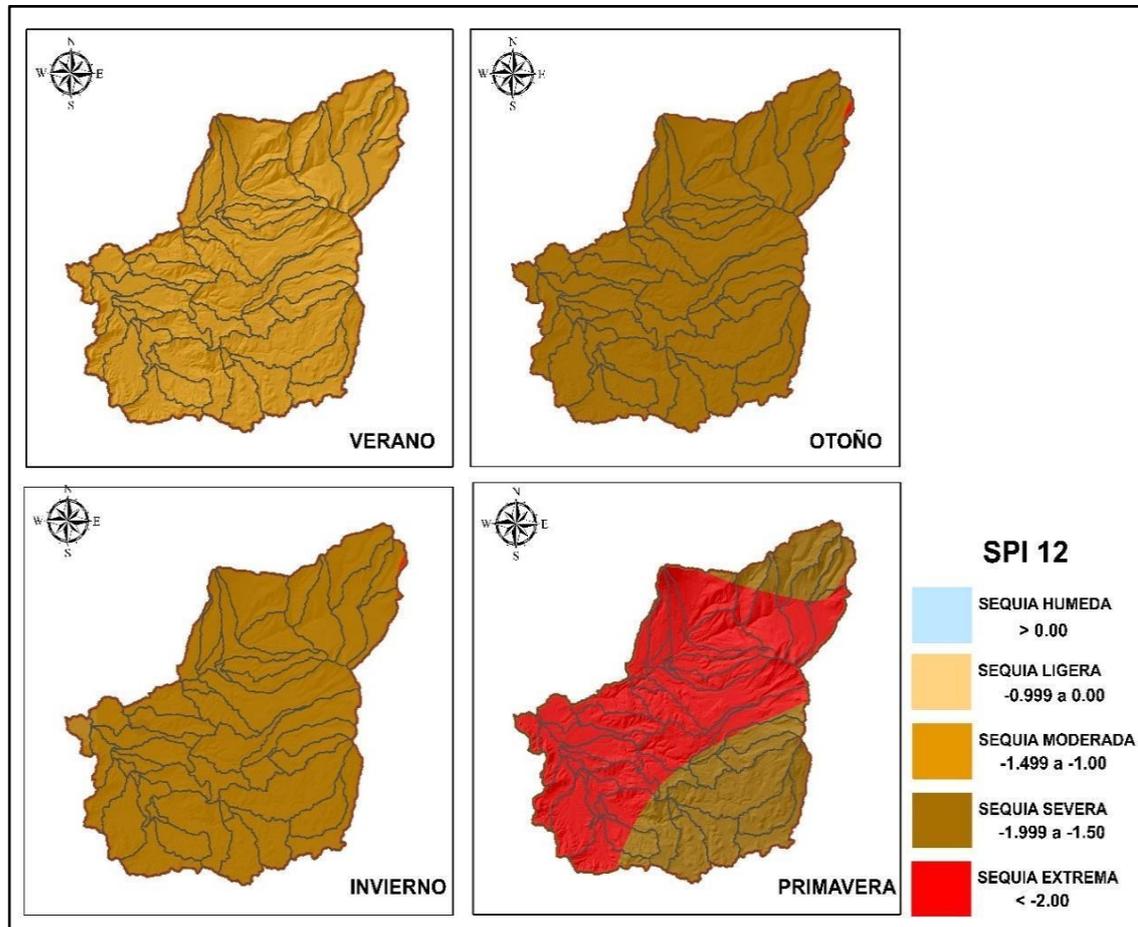
*Caracterización espacial del SPI9, en diferentes periodos estacionales*



Nota: Elaborado en ArcGIS.

**Figura 40**

*Caracterización espacial del SPI 12, en diferentes periodos estacionales*



*Nota:* Elaborado en ArcGIS.

Para el índice de caudales estandarizados, también se evaluó de manera temporal y espacial para diferentes escalas (3,6,9,12 meses). Donde podemos visualizar su frecuencia en la Tabla 17 y su cambio en el tiempo en la Figura 41 y Figura 42, para el caso de la histórica y proyectada respectivamente.

**Tabla 17**

*Características de las sequías hidrológicas*

Índice de sequía		SSI_3		SSI_6		SSI_9		SSI_12	
Registro de valores	Designación	Histórica	Proyectada	Histórica	Proyectada	Histórica	Proyectada	Histórica	Proyectada
<b>&gt; 0</b>	<b>Húmedo</b>	<b>153</b>	<b>200</b>	<b>159</b>	<b>161</b>	<b>169</b>	<b>162</b>	<b>180</b>	<b>151</b>
Frecuencia		0.38	0.49	0.39	0.45	0.42	0.46	0.45	0.43
<b>De -0.999 a 0</b>	<b>Sequía ligera (SL)</b>	<b>236</b>	<b>147</b>	<b>219</b>	<b>143</b>	<b>204</b>	<b>143</b>	<b>173</b>	<b>152</b>
Frecuencia		0.58	0.36	0.54	0.40	0.51	0.41	0.43	0.44
<b>De -1.499 a -1.00</b>	<b>Sequía moderada (SM)</b>	<b>17</b>	<b>36</b>	<b>24</b>	<b>32</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>43</b>	<b>31</b>
Frecuencia		0.04	0.09	0.06	0.09	0.07	0.09	0.11	0.09
<b>De -1.999 a -1.50</b>	<b>Sequía severa (SS)</b>	<b>0</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>18</b>	<b>0</b>	<b>17</b>	<b>1</b>	<b>15</b>
Frecuencia		0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00	0.04
<b>&lt; -2.00</b>	<b>Sequía extrema (SE)</b>	<b>0</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Frecuencia		0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00

Nota. Elaboración en Excel.

Donde gráficamente, se visualiza el índice de caudales estandarizados para los periodos históricos y proyectados para el promedio de todas las estaciones, en diferentes escalas de tiempo.

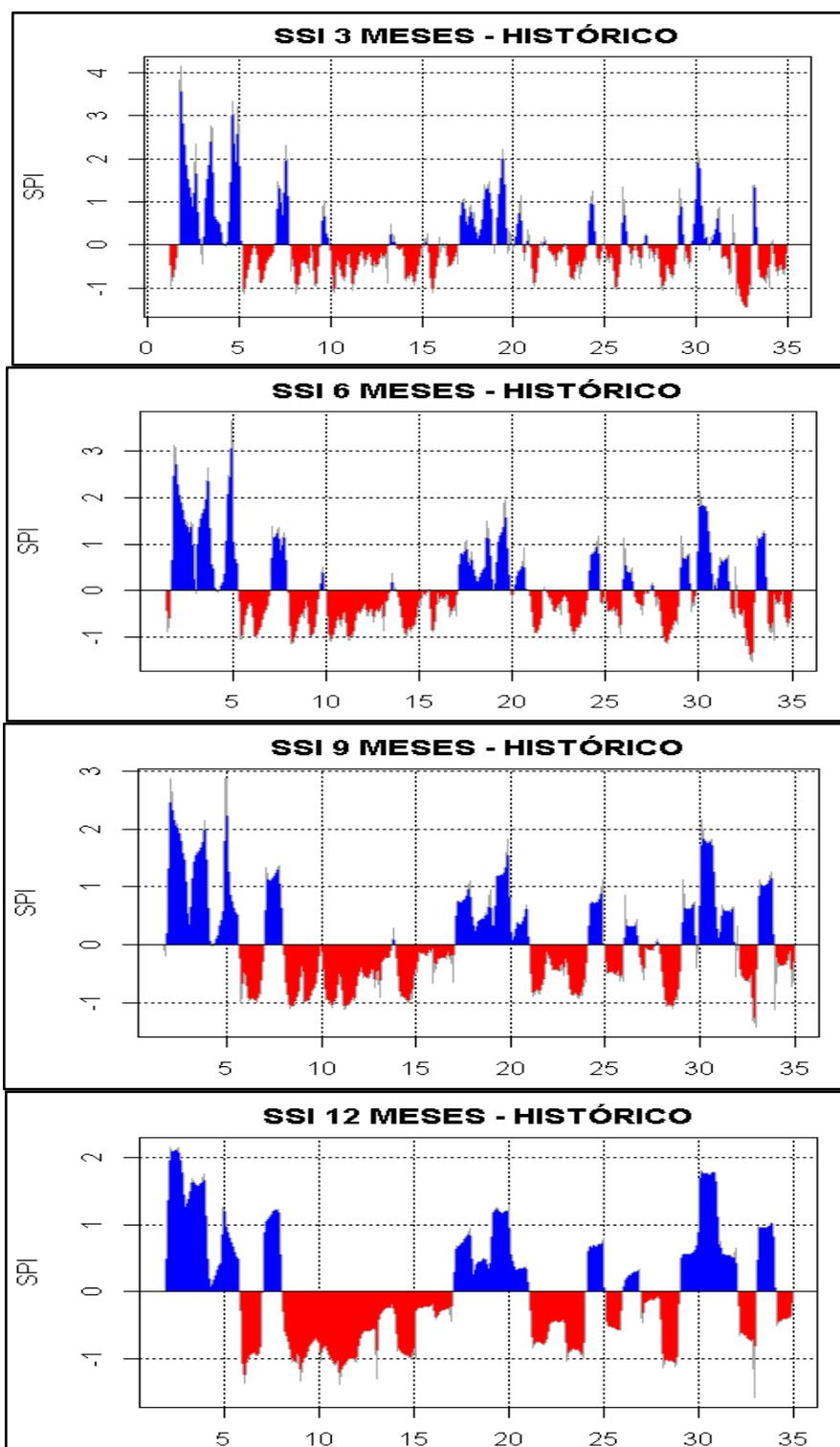
En la figura 41 y 42, se muestran los resultados del análisis de caracterización del SSI 3-SSI 6-SSI 9-SSI 12 para el área de estudio. Donde se observa que existe fluctuaciones en un rango de -2.0 a 4.0 para el periodo histórico (1983 - 2016). En caso de la proyectada (2017 al 2050), se dan fluctuaciones en -2.00 a 3.00.

En la información del punto de aforo de la subcuenca, ver Tabla 17, se presentaron fluctuaciones negativas de 236 valores máximos en sequías ligeras, asimismo 43 valores máximos en sequías moderadamente secas en el SSI 12, también se encontró un solo valor en sequías severamente secas en el SSI 6 y SSI 12, además de no encontrarse valores en sequías extremadamente secas.

En su mismo periodo de proyección para el SSI 12, se muestra una disminución en la frecuencia de sequías húmedas a secas. Pero a su vez un aumento de sequías moderadas y descenso en las sequías ligeras. Generando solamente 11 meses de sequía extrema para una sequía hidrológica tipo 3.

**Figura 41**

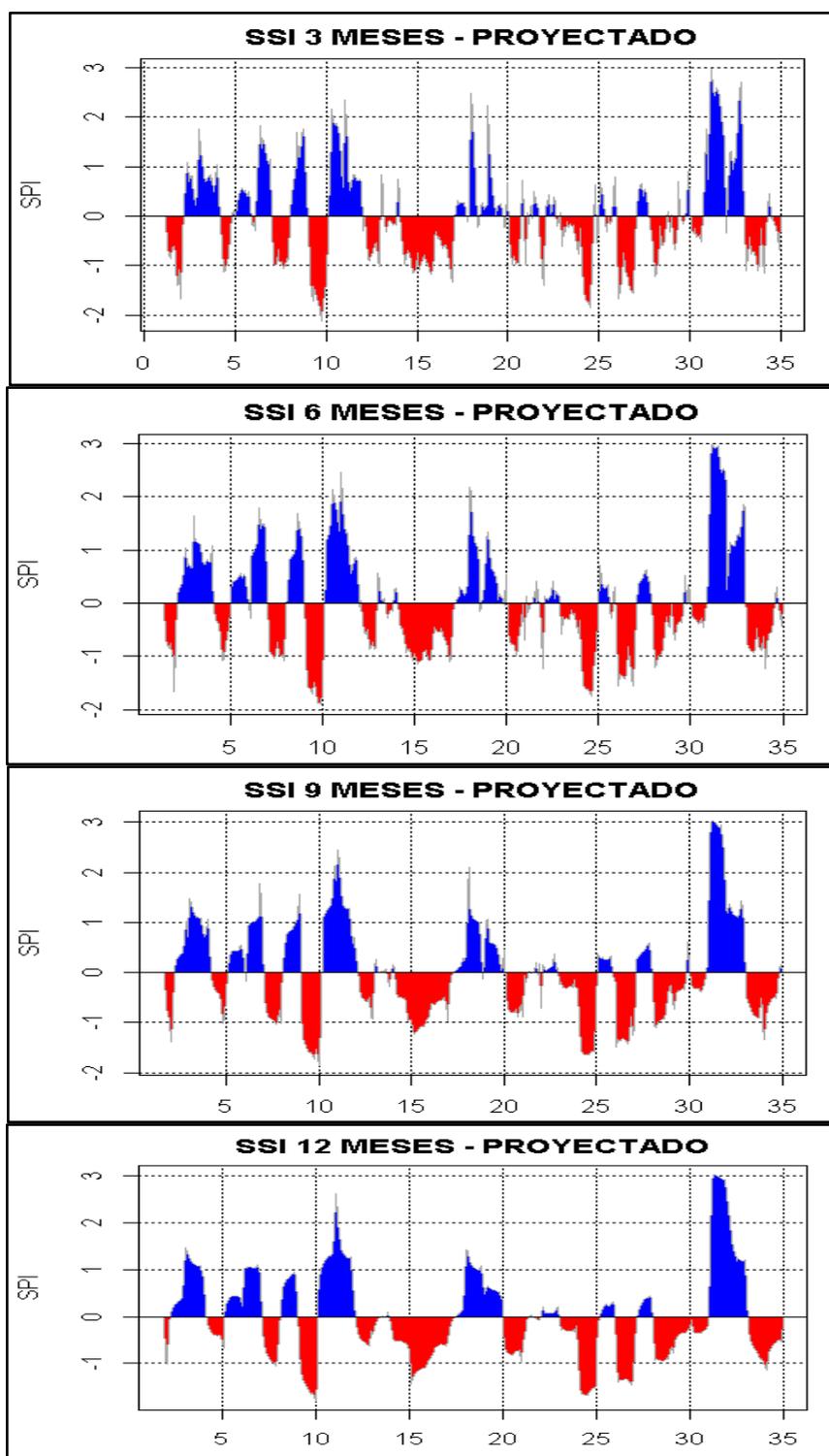
*Índice de caudal estandarizado/SSI) en el periodo histórico*



*Nota:* Elaboración propia.

**Figura 42**

*Índice de caudal estandarizado/SSI) en el periodo proyectado*



*Nota:* Elaboración en RStudio.

En el enfoque espacial, desde las Figuras 42 al 45. En SSI-3, se visualiza un 97.96% predominante en una descripción de tipo sequía moderada en la estación de verano. Un 63.27% en sequía moderada, acompañada del 30.61% en una descripción ligera, para el caso de la estación de otoño.

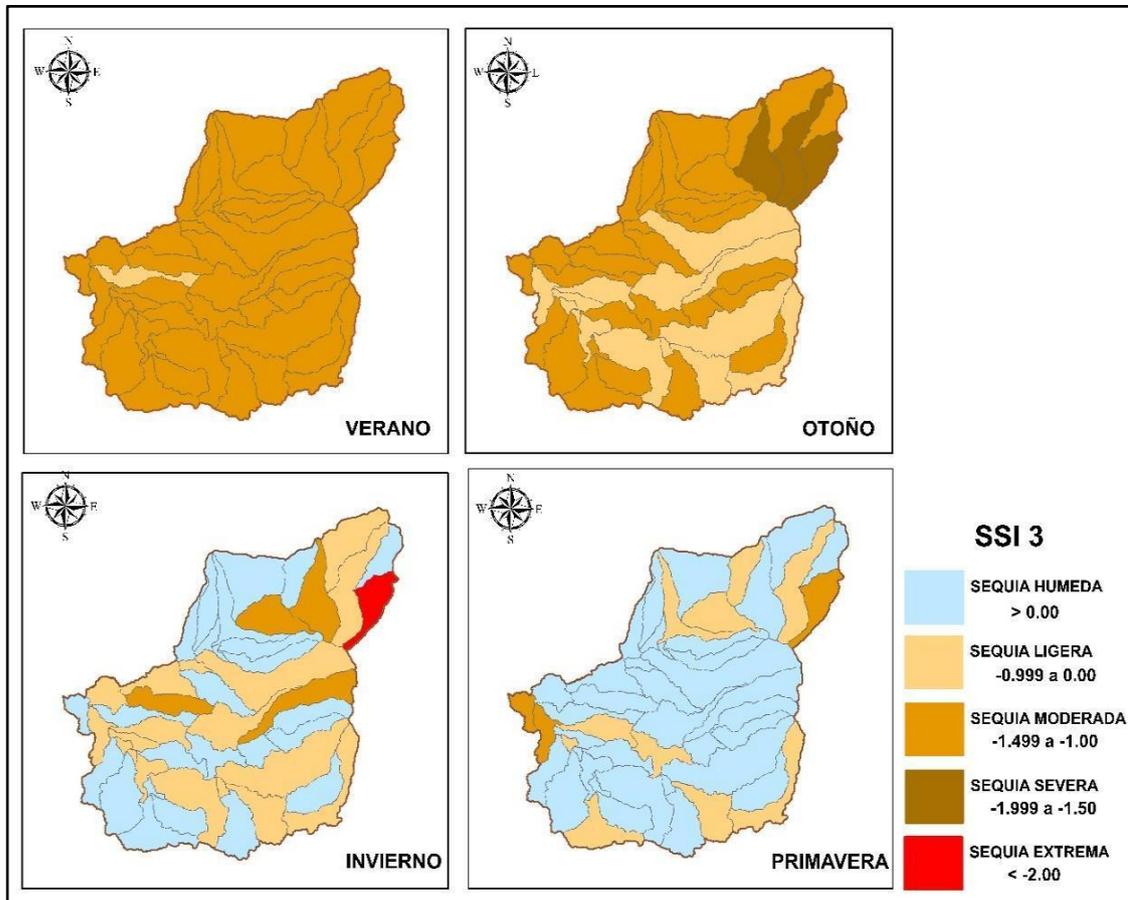
En la estación de invierno, el 51.02% de las microcuencas se encuentran en sequía humedad o más conocida como sequía falsa, mientras en primavera se incrementa a un 67.35% de las microcuencas no afectadas por la sequía.

Se observa unos porcentajes significativos para la estación de verano en los SSI-6, SSI-9 Y SSI-12, teniendo consigo mayores al 95.91% en sequías de tipo moderada de todas las microcuencas (aproximadamente 47 de ellas afectadas). También predomina este tipo de sequía, en las estaciones de otoño e invierno, para las mismas escalas temporales mencionadas.

Para el caso de primavera, existe una reducción en las microcuencas no afectadas en los diferentes SSI. Empezando con 33 microcuencas que no han sido afectadas (67.35%), luego se redujo a unas 29 microcuencas en el SSI-6 y posteriormente hasta un 0% de microcuencas para el SSI-9 Y SSI-12. Concluyendo que, si se aumenta la escala temporal de sequías de caudales, comienza a incrementarse las microcuencas afectadas y es por ello la necesidad de considerar las diferentes escalas temporales de este evento extremo.

**Figura 43**

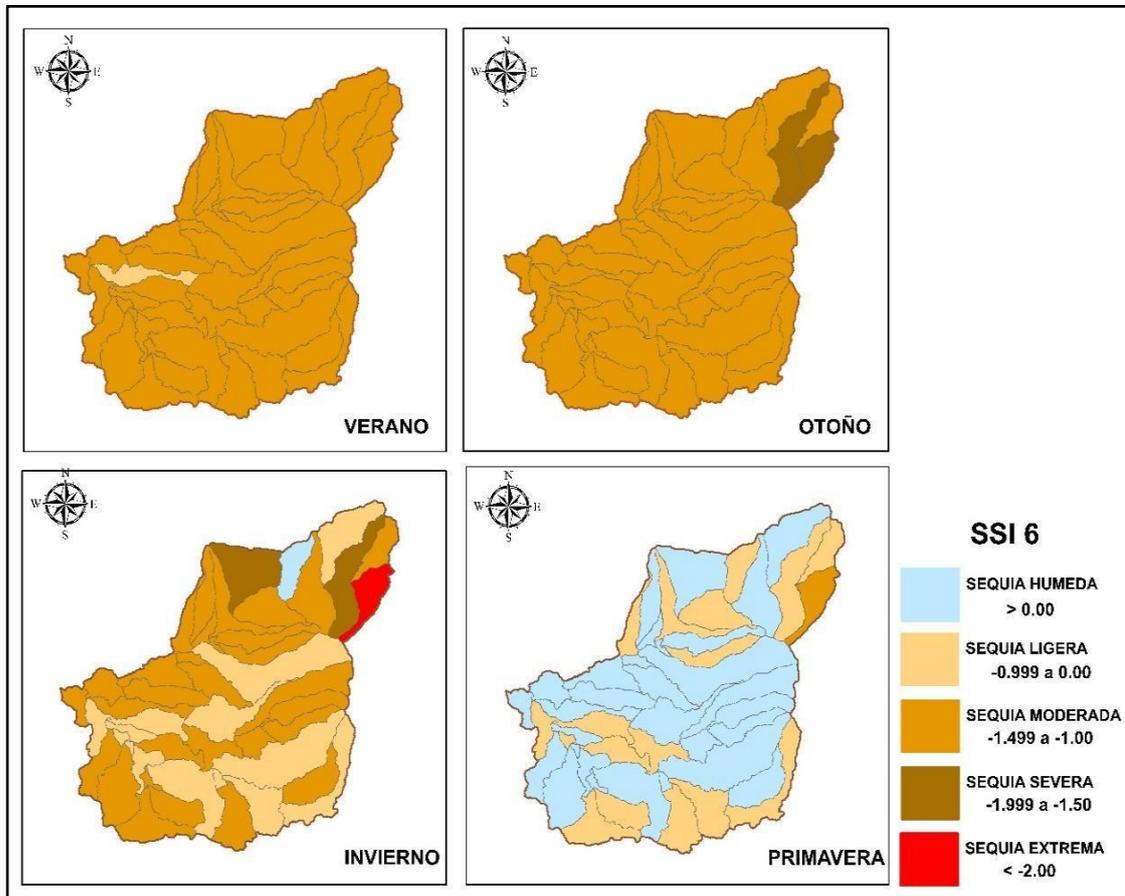
*Caracterización espacial del SSI 3, en diferentes periodos estacionales*



*Nota:* Elaborado en ArcGIS.

**Figura 44**

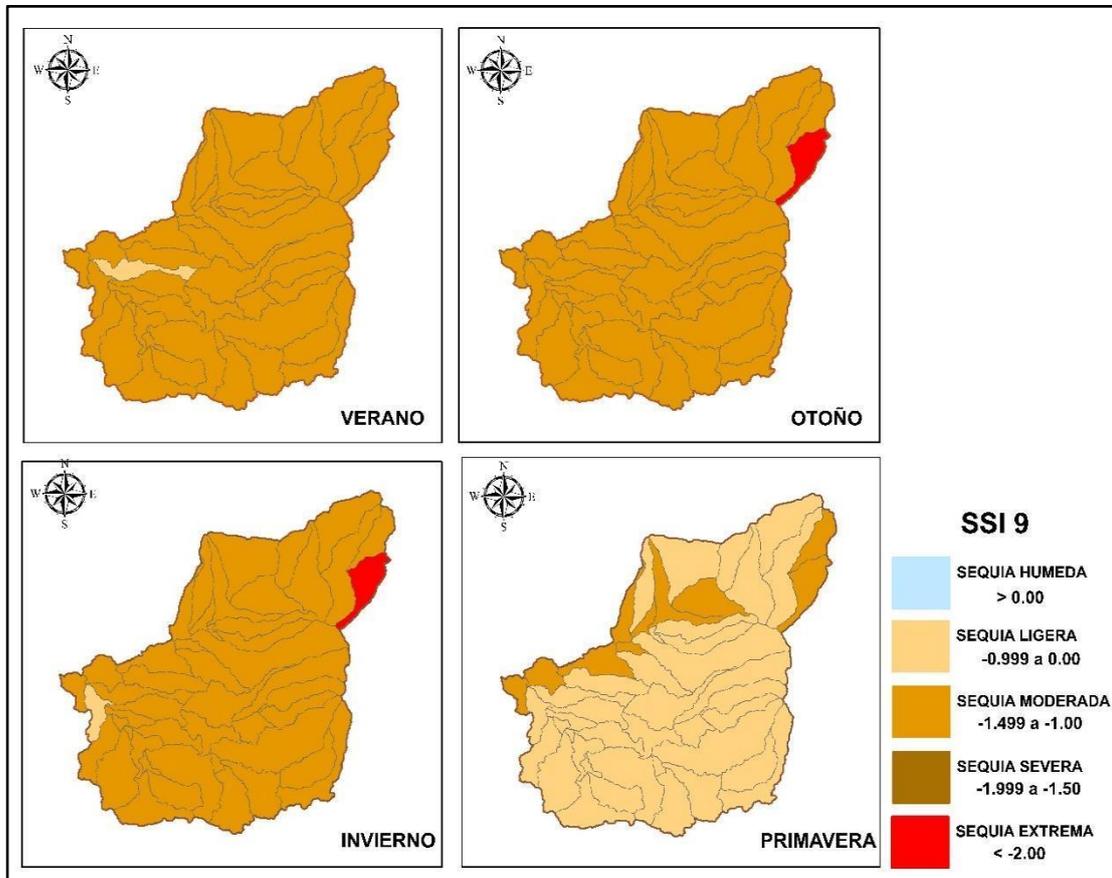
*Caracterización espacial del SSI 6, en diferentes periodos estacionales*



*Nota:* Elaborado en ArcGIS.

**Figura 45**

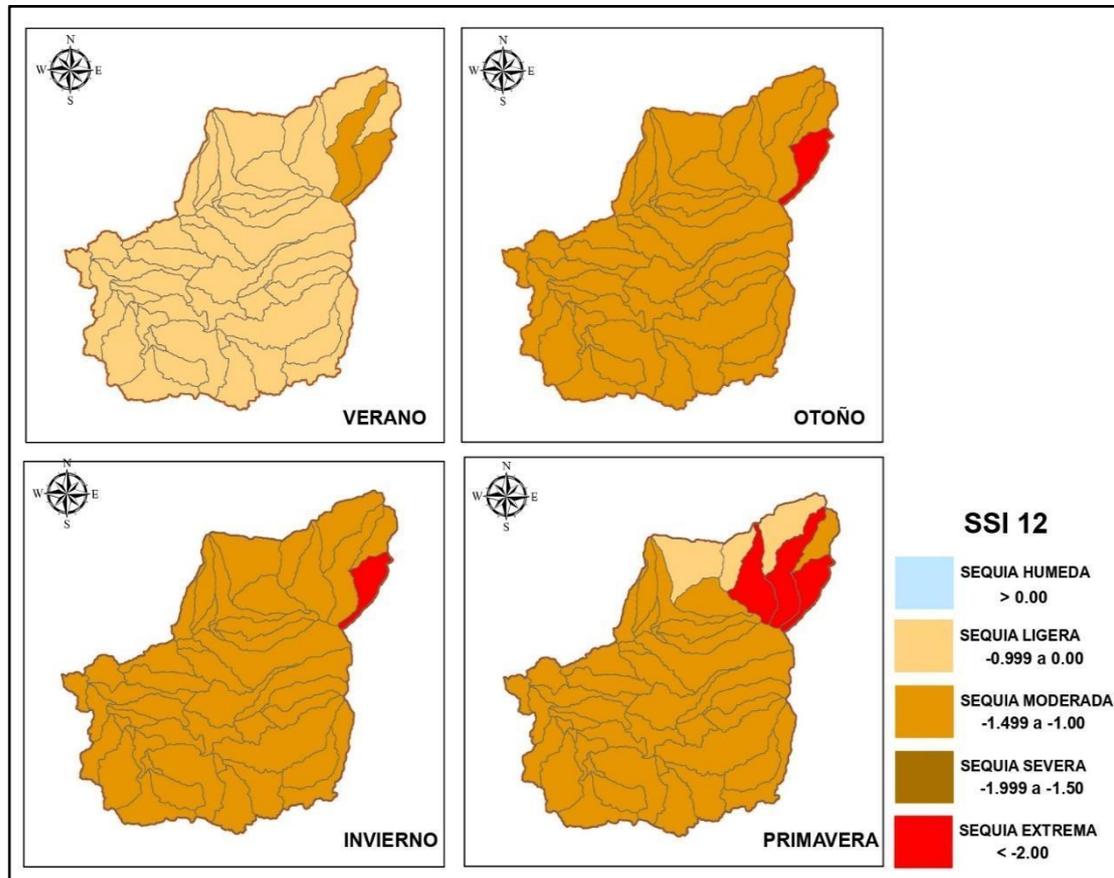
*Caracterización espacial del SSI 9, en diferentes periodos estacionales*



*Nota:* Elaborado en ArcGIS.

**Figura 46**

*Caracterización espacial del SSI 12, en diferentes periodos estacionales*



*Nota:* Elaborado en ArcGIS.

La subcuenca del río Chili no cuenta con otros estudios que realicen un análisis de sequías en escenarios de cambio climático que señalen un probable incremento y duración de las secuencias de sequías meteorológicas e hidrológicas, lo que implica que no se tengan indicadores adecuados como los índices de precipitación estandarizada (SPI) e índice de escorrentía estandarizado (SSI), índices que analizan la severidad de sequías de forma temporal y espacial.

La investigación resultará útil como materia de estudio para futuras investigaciones y a su vez para tomar decisiones que ayudarán a reducir o mitigar el daño que las sequías producen.

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Contrastación y Demostración de la Hipótesis con los Resultados

*H1: La representación del sistema hidrológico permite analizar eficazmente las sequías en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.*

Los valores de los índices de performance (NSE, PBIAS Y R2), obtenidas en el proceso de calibración y validación, se califican como bueno, esto brinda la confiabilidad de representar los procesos hidrológicos de una cuenca a través de un modelo numérico, y con ello tener proyecciones de sequías aproximadas a una realidad que pueda suceder en un determinado tiempo. Con ello se acepta la hipótesis, que la representación del sistema hidrológico permite analizar eficazmente las sequías en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.

*H2: El comportamiento de sequías varían en frecuencia e intensidad con las proyecciones climáticas en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.*

En cuanto a las sequías meteorológicas, se pudo observar una variación en la frecuencia de las diferentes categorías desde la histórica hacia la proyectada, dando consigo un aumento de las sequías ligeras al momento de la proyección con respecto a las sequías húmedas predominantes en el periodo histórico, y aunque para las proyecciones la frecuencia de sequías moderadas y extremas son constantes, se puede asumir que las sequías meteorológicas varían o aumentan con las proyecciones climáticas. De la misma forma para las sequías hidrológicas, se observó aumento considerable de sequías húmedas proyectadas, sin embargo, en la sequía hidrológicas del tipo 3 se observó un aumento de 11 meses de sequía extrema, con lo cual se puede inferir que existe un aumento las sequías hidrológicas bajo proyecciones climáticas. Los resultados mostraron una variación en intensidad y frecuencia tanto para sequias meteorológicas e hidrológicas, por ello se acepta la segunda hipótesis planteada, afirmado que el comportamiento de sequías varía en frecuencia e intensidad con las proyecciones climáticas en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.

## **6.2. Contratación de los Resultados con otros Estudios Similares**

Quang et al., (2019), concluye que las categorías de sequía leve a extrema, se obtuvo con una frecuencia mayor al 0.60, mientras en el informe se obtuvo frecuencias promedio de 0.46 y 0.53, para los periodos histórico y proyectado respectivamente. Llegando a aceptar la hipótesis planteada, debido a que los meses afectados son de enero hasta abril, y en la investigación desde mayo hasta octubre. Fechas con una precipitación inferior a los 5 milímetros.

Zubieta, (2021), menciona en sus resultados un incremento de la duración y severidad de las sequías, por el efecto de la reducción de las precipitaciones, asimismo Munévar y Saavedra (2020), concluyen una mayor frecuencia de sequías para escenarios futuros, al igual que Sam et al., (2018) y Sardon (2021), quienes también prevén que la severidad, duración y frecuencia de las sequías aumenten en el futuro en sus cuencas de estudio. En el informe, la disminución de precipitación nos ha causado un aumento promedio del 7% de sequías existentes (en sus escalas diferentes de estudio), donde la categoría predominante es la “leve”. Asumiendo resultados similares a los autores mencionados anteriormente.

Los resultados de la simulación del modelo SWAT proporcionarán y suministrarán completamente los datos necesarios para calcular el índice de sequía de la zona de estudio (Quang et al.,2019). Donde se recomienda generar resultados satisfactorios de acuerdo a la métrica del NSE, mayores a 0.50 para representar la hidrología de la zona de estudio (Munévar & Saavedra, 2020). Asimismo, se pudo observar que los valores de las métricas del desempeño del índice NSE del proyecto, son mayores a 0.60 y se encuentra en una calificación como “buena” apoyando lo descrito por los autores mencionados anteriormente y siendo sustento para aceptar la hipótesis que se planteó sobre la representación hidráulica para proyecciones futuras. Cabe mencionar que los parámetros obtenidos en el análisis de sensibilidad tienen mucha similitud a investigaciones realizadas anteriormente por Chattopadhyay et al., (2017). Por otro lado, un estudio nacional como el realizado por del Águila, (2021),

recomienda el uso de modelo Hidrológico SWAT debido a sus buenos resultados de indicadores de desempeño

### 6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales  
Unidad de Investigación



#### Declaración de autenticidad

Yo, Luz Consuelo Huanca Diaz y Mario Fabrizio Garay Valdivia, estudiantes de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao, declaramos haber elaborado la tesis denominada "APLICACION DE LA MODELACION HIDROLOGICA PARA ANALIZAR SEQUIAS EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMATICO, EN LA SUBCUENCA DEL RIO CHILI AREQUIPA 2020-2050", para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental, es de nuestra autoría.

Por lo que, declaro lo siguiente:

Que, para el presente trabajo de investigación, he utilizado todas las fuentes de datos e información que fueron identificados, referenciados correctamente de acuerdo al protocolo de requerimientos de la Universidad Nacional del Callao en el nivel de pregrado, según normas establecidas para la elaboración de trabajos académicos, no ha sido previamente presentado completa ni parcialmente para la obtención de otro grado académico o título profesional.

De encontrar uso de material intelectual ajeno sin el debido reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determine el procedimiento disciplinario de la Universidad.

Callao, abril del 2022

-----  
Luz Consuelo Huanca Diaz  
DNI: 71547789

-----  
Mario Fabrizio Garay Valdivia  
DNI: 47777131

## VII. CONCLUSIONES

-El modelo hidrológico SWAT, es una herramienta confiable que nos ayuda a representar la hidrología de la subcuenca del río Chili, basándose su confiabilidad en índices de performance o métricas de desempeño, y es por ello que se necesita tener los índices en un nivel alto. En el informe se tuvo valores de NSE de 0.669 y 0.614, para los periodos de calibración y validación respectivamente, encontrándose en una categoría de "Bueno", con ello se concluye que se está representando correctamente la subcuenca de estudio.

- El índice de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE), fue elegido como índice prioritario para la calibración, debido que ayuda a realizar un mejor ajuste en el comportamiento de los caudales simulados, respecto a la observada. Asimismo, existen otros índices que ayudan a validar el desempeño del modelo, los cuales son el PBIAS y el coeficiente de determinación  $R^2$ . Para el PBIAS se obtuvo un valor de -2.16% para la calibración y 15.04% para la validación, correspondientes a las calificaciones de desempeño del modelo de "Muy bueno". Por otro lado, para el  $R^2$  se obtuvo un valor de 0.67 para la calibración y 0.63 para la validación, correspondientes a las calificaciones de "bueno".

-Los índices de estandarización, ayudan a representar la magnitud de la sequía pasadas y futuras. Por ello que, para un análisis de sequías basadas en la lluvia, utilizamos el índice de precipitación estándar (SPI); mientras para el análisis de sequía basada en los caudales, se utilizó el índice de caudales estandarizados. Concluyendo con la caracterización espacial de la subcuenca para diferentes escalas temporales (3, 6, 9 y 12 meses).

-En caso del análisis del SPI con un enfoque espacial, se concluye que las sequías extremas pueden darse en diferentes tiempos estacionales. Evidenciando que en el SPI 3 se da en la estación del verano, SPI 6 en otoño, SPI 9 en invierno y por último el SPI12 se registra en primavera. Además, que las sequías moderadas predominan con una mayor extensión en la subcuenca de estudio, en sus 4 tiempos estacionales (verano a primavera).

-En caso del análisis del SSI con un enfoque espacial, se describe el SSI-3, con una extensión predominante al 97.96% en sequía moderada en verano. Un 63.27% en sequía moderada, acompañada del 30.61% con sequía ligera, para el caso de la estación de otoño. Mientras en invierno, el 51.02% de las microcuencas no son afectadas por las sequías. Culminando en primavera con un incremento de un 67.35% de las microcuencas no afectadas por la sequía.

-En caso del análisis del SSI con un enfoque espacial, se describe el SSI6 – SSI9 y SSI 12, con porcentajes significativos para la estación de verano, teniendo consigo mayores al 95.91% en sequias moderadas, de igual manera predomina este tipo de sequía en otoño e invierno en la subcuenca del río Chili

## VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda a los futuros investigadores y técnicos en el área de la modelación hidrológica, trabajar con información observada de campo de las variables hidrometeorológicas (caudal y precipitación), en caso no se disponga dicha data, se recomienda realizar el método de regionalización basado en un producto grillado, que previamente haya pasado por un proceso de calidad de datos con análisis estadísticos, con el fin de obtener data representativa.

Se recomienda a las autoridades regionales, y locales (Gobierno Regional de Arequipa, Municipalidad Provincial de Arequipa) con jurisdicción en la subcuenca del río Chili, considerar la investigación como referente para la elaboración de un plan de contingencia ante el riesgo de sequías por el cambio climático.

Se recomienda al SENAMHI, ANA, universidades públicas y privadas, así como a otras instituciones de la región, promover la investigación sobre los impactos que tendría el cambio climático sobre la sequias en la subcuenca del rio chili, permitiendo profundizar el análisis y obtener información valiosa para una adecuada gestión de recursos hídricos.

Se recomienda a los futuros investigadores de las diferentes organizaciones públicas y privadas, aplicar el modelo hidrológico SWAT para analizar sequías en escenarios de cambio climático debido a su libre disponibilidad y a su capacidad de representar fenómenos hidrológicos complejos, como los mostrados en el presente estudio.

## VII. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- 2W2E GmbH. (2019). *Ecosistema de Energía del Tiempo del Agua*. Obtenido de COPA SWAT: <https://www.2w2e.com/home/SwatCup>
- Abbaspour, K. C. (2015). SWAT - CUP Swat Calibration and Uncertainty Programs. Suizza: Eawag 2015.
- Ahmed, M. (2020). Introduction to Modern Climate Change. Andrew E. Dessler: *Cambridge University Press*, 2011, 252 pp, ISBN-10: 0521173159.
- Álvarez-Risco, A. (2020). *Clasificación de las Investigaciones*. Universidad de Lima. <https://hdl.handle.net/20.500.12724/10818>
- Albuja Silva, E. C., & Tenelanda Patiño, D. O. (2014). *Desarrollo de un Modelo Conceptual de LLuvia - Escorrentía para Interpretación de Procesos Hidrológicos en la Cuenca Altoandina del Río Zhurucay*. Cuenca - Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2021). *Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca Quilca - Chili*. Lima: ANA.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2015). *Plan de gestión de recursos hídricos de la cuenca Quilca - Chili*. ANA *Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca Quilca - Chili*. Lima: ANA.
- Bao, Y., & Wen, X. (2017). Projection of China's Near- and Long-Term Climate in a New High-Resolution Daily Downscaled Dataset NEX-GDDP. *Journal of Meteorological Research*, 15.
- Birara, H., Pandey, R. P., & Mishra, S. K. (2020). Projections of future rainfall and temperature using statistical downscaling techniques in Tana Basin, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 6(5), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00436-1>
- Cabrera, J. (2012). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Caprario, J., Tasca, F. A., Santana, P. L., Azevedo, L. T. S., & Finotti, A. R. (2022). Framework for incorporating climate projections in the integrated

- planning and management of urban infrastructure. *Urban Climate*, 41, 101060. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101060>
- Cárdenas, J 2018: “*Investigación cuantitativa*”, Material Docente, No. 8, Berlín. Programa de Posgrado en Desarrollo Sostenible y Desigualdades Sociales en la Región Andina. DOI: 10.17169/refubium-216
- Cavero, M. (2013 de septiembre de 23). Gidahatari - Gestión Sostenible del Agua. Obtenido de Modelamiento Hidrológico: <https://gidahatari.com/ih-es/modelamiento-hidrologico>
- Centro de Estudios y Prevención de Desastres [Predes]. (noviembre de 2017). *Predes*. Obtenido de Sequías: <https://predes.org.pe/publicaciones/las-sequias/>
- Chattopadhyay, S., Edwards, D. R., Yu, Y., & Hamidisepehr, A. (2017). An assessment of climate change impacts on future water availability and droughts in the Kentucky River Basin. *Environmental Processes*, 4(3), 477-507. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0259-2>
- Craig, C. A., Feng, S., & Gilbertz, S. (2019). Water crisis, drought, and climate change in the southeast United States. *Land use policy*, 88, 104110. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104110>
- De Villarán San Juan, R. F. (2017). *DOCPLAYER*. Obtenido de utilización del programa “SWAT” para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas: <https://docplayer.es/77842261-Utilizacion-del-programa-swat-para-la-estimacion-de-la-emision-de-sedimentos-en-cuencas.html>
- Del Aguila Ríos, S. (2021). *Modelamiento de procesos hidrológicos en cuencas de la Sierra Central del Perú*. [Tesis Doctoral, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Biblioteca Agrícola Nacional.
- Ekundayo, O. Y., Abiodun, B. J., & Kalumba, A. M. (2022). Global quantitative and qualitative assessment of drought research from 1861 to 2019. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 15, 102770. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102770>
- Elizondo Cordero, G. E. (2018). *Ajuste del número de curva mediante optimización en HEC-HMS en*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

- Enayat, M., Bozorg Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., & Chu, X. (2021). Bias correction capabilities of quantile mapping methods. *Journal of Water and Climate Change for rainfall and temperature variables*, 19.
- Enríquez Alonso, A. (2016). *Evaluación de modelos climáticos: el comportamiento de la variable nubosidad*. España: Universitat de Girona.
- Faiz, M. A., Zhang, Y., Zhang, X., Ma, N., Aryal, S. K., Ha, T. T. V., ... & Naz, F. (2022). A composite drought index developed for detecting large-scale drought characteristics. *Journal of Hydrology*, 605, 127308. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127308>
- Francés, F., & Bussi, G. (2014). Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. RIBAGUA, 12.
- García, J. C., & Martínez, M. R. (1996). El debate investigación cualitativa frente a investigación cuantitativa. *Enfermería clínica*, 6(5), 213.
- García Rosales, A. J. (2017). "ESTUDIO DE LA PRECIPITACIÓN USANDO EL MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF) EN LA CUENCA DEL RIO MANTARO". Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Gencat. (2021). *Gencat*. Obtenido de Cambio Climático: <https://canviclimatic.gencat.cat/es/canvi/projeccions/>
- Guanuchi Quito, J. C. (2015). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOWNSCALING ESTADÍSTICO Y DINÁMICO EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAUTE Y JUBONES*. Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Guse, B., Fatichi, S., Gharari, S., & Melsen, L. A. (2021). Advancing process representation in hydrological models: Integrating new concepts, knowledge, and data. *Water Resources Research*, 57(11), <https://doi.org/10.1029/2021WR030661>
- Hagen, J. S., Leblois, E., Lawrence, D., Solomatine, D., & Sorteberg, A. (2021). Identifying major drivers of daily streamflow from large-scale atmospheric circulation with machine learning. *Journal of Hydrology*, 596, 126086. <https://doi.org/10.3390/w13121696>

- Havrylenko, S. (2014). *Caracterización de sequías en cuencas agrícolas de la región pampeana mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT*. [Tesis de Maestría / Universidad Nacional Del Litoral]. Biblioteca Virtual. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2014). *Ministerio del Ambiente Colombia - GOV.CO*. Obtenido de Modelación Hidrológica: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (10 de julio de 2017). *Gobierno de México*. Obtenido de Escenarios de cambio climático: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/escenarios-de-cambio-climatico-80126#:~:text=Los%20escenarios%20de%20cambio%20clim%C3%A1tico,consecuencias%20potenciales%20del%20cambio%20clim%C3%A1tico>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). *Conceptos del Cambio Climático*. Ginebra: LIMA COP20.
- Jodar Abellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS*, 14.
- Karnataka (2014). *Understanding Weather and Climate*. Bangalore: 22nd National Children's Science Congress 2014.
- Keyence. (2021). *KEYENCE*. Obtenido de El Significado de la Calibración: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/measurement-selection/environment/calibration.jsp>
- Lapinel Pedroso, B., Fonseca Rivera, C., González García, I. T., Boudet Rouco, D., Cutié Cancino |, V., Hernández Sosa, M., . . . González Pedroso, C. (2015). *El Peligro Integrado por Sequía Meteorológica y Agrícola*. Cuba: Revista Cubana de Meteorología.
- López, R., Ortiz T. y Cruz F., (2016). *Análisis de sequías para la subregión hidrológica Lerma-Chapala aplicando el Índice de Escurrimientos Estandarizados (Streamflow Drought Index, SDI) en México*. XXVIII

- Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú, septiembre 2016, pp. 30.
- Lweendo, M. K., Lu, B., Wang, M., Zhang, H., & Xu, W. (2017). Characterization of droughts in humid subtropical region, upper Kafue river basin (southern Africa). *Water*, 9(4), 242. <https://doi.org/10.3390/w9040242>
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kliest, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA. 179-184.
- Marengo, J. A., Obregón, G. O., & Valverde, M. C. (2008). *Cambio climático en Arequipa: impactos, evaluaciones de vulnerabilidad y medidas de adaptación*. Centro de Ciências do Sistema Terrestre-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST/INPE) Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil.
- Martínez Loayza, C. R. (2014). *Impacto del Cambio Climático en la Hidrología de la Cuenca del Río Ica*. Lima: Universidad Agraria La Molina.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2021). *Observatorio de Salud y Cambio Climático*. Obtenido de Nuevos escenarios de emisión:RCPs:  
[http://www.oscc.gob.es/es/general/salud\\_cambio\\_climatico/Nuevos\\_escenarios\\_emision\\_RCPs.htm](http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/Nuevos_escenarios_emision_RCPs.htm)
- Ministerio de Defensa Bolivia. (2012). *Plan Nacional de Contingencias*. Bolivia: Secretaría Técnica del Conarade Viceministerio de Defensa Civil.
- Montecelos Zamora, Y. (2018). *Modelación del Efecto de la Variación Climática en el Balance Hídrico en Dos Cuencas (México y Cuba) Bajo un Escenario de Cambio Climático*. Ensenada: CICESE.
- Morote Seguido, Á. F. (2019). *Galicia, ¿territorio adaptado a la sequía?* Valencia: Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales de la Universidad de Valencia.
- Muévar Guerrero, N., & Saavedra Hincapié, D. (2020). *Evaluación de la amenaza por sequía en el sector agrícola de la cuenca del río Prado bajo los*

- escenarios del cambio climático*. [Tesis de grado/ Universidad Santo Tomas]. Bogotá.
- Nalbantis, I. and Tsakiris, G., (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*. Vol. 23, No. 5, 2009, pp. 881-897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>
- Netamo. (2021). Netamo. Obtenido de Precipitación: <https://www.netatmo.com/es-es/glosario/precipitacion>
- Esteban Nieto, N. (2018). *Tipos de investigación*.
- Olcina, J. (2020). Clima, cambio climático y riesgos climáticos en el litoral mediterráneo. Oportunidades para la geografía. *Universidad de Alicante*, 24. 10.5565/rev/dag.629
- O'Neill, B. C., Carter, T. R., Ebi, K., Harrison, P. A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., . . . Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature Climate Change*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00952-0>
- Organización Meteorológica Mundial [OMM] y Asociación Mundial para el Agua. (2016). *Manual de Indicadores e Índice de Sequía*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua.
- Pandey, A., Himanshu, S. K., Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena*, 147, 595-620. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>
- Pascual, V. A., Burgos-Martínez, R., & Palacios, R. H. (2021). Etapas del método estadístico. *Ciencia Huasteca Boletín Científico de la Escuela Superior de Huejutla*, 9(17), 35-36.
- Pérez García, J., Menéndez García, M., & Méndez Incera, F. J. (2016). Habilidad de los modelos climáticos globales para el desarrollo de proyecciones regionales. *Instituto de Hidráulica Ambiental*.
- Pons, D., Castellanos, E., Brincker, J., Incer, D., & López, A. (2018). Escenarios de aridez para Guatemala para los años 2030, 2050 y 2070 utilizando modelos de cambio climático. *Artículo Científico*, 13.

- Presidencia de la Republica del Perú. (8 de febrero del 2011). Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD). [Ley 29664 del 2011].
- Quang Tri, D., Tho Dat, T., & Duc Truong, D. (2019). Application of meteorological and hydrological drought indices to establish drought classification maps of the Ba River Basin in Vietnam. *Hydrology*, 6(2), 49. <https://doi.org/10.3390/hydrology6020049>
- Ramos Jauregui, L. Y. (2014). *Estimación del Efecto del Cambio Climático en la Precipitación en la Costa Norte del Perú Usando Simulaciones de Modelos Climáticos Globales*. [Tesis de Grado/ Universidad Nacional Agraria La Molina.]. Repositorio Institucional.
- Real Academia Española [RAE]. (2020). *Real Academia Española - Diccionario panhispánico de dudas*. Obtenido de Clima: <https://www.rae.es/dpd/clima>
- Ruíz Álvarez, M., Gomariz Castillo, F., & Alonso Sarría, F. (2018). Análisis espacio-temporal de los cambios previstos en la evapotranspiración de referencia durante el siglo XXI en la Demarcación Hidrográfica del Segura (España) a partir de los modelos climáticos globales MPEH5 y MPEH5C. *Revista de Geografía Norte Grande*, 24. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022018000300035>
- Ryu, J., Kang, H., Choi, J. W., Kong, D. S., Gum, D., Jang, C. H., & Lim, K. J. (2012). Application of SWAT-CUP for Streamflow Auto-calibration at Soyang-gang Dam Watershed. *Korean Society on Water Environment*, 12. Obtenido de <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201219074376245.page>
- Salvadore, E., Bronders, J., & Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of hydrology*, 529, 62-81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.028>
- Sam, T. T., Khoi, D. N., Thao, N. T. T., Nhi, P. T. T., Quan, N. T., Hoan, N. X., & Nguyen, V. T. (2019). Impact of climate change on meteorological, hydrological and agricultural droughts in the Lower Mekong River Basin: a case study of the Srepok Basin, Vietnam. *Water and Environment Journal*, 33(4), 547-559. <https://doi.org/10.1111/wej.12424>

- Sardon Quispe, H. M. (2021). *Análisis de sequías con perspectivas de cambio climático en la Unidad Hidrográfica Huancané, en el período 2020-2100*. (Tesis de Grado / Universidad Nacional del Altiplano). Repositorio Institucional. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/16255>
- Senamhi [Servicio de Meteorología e Hidrología del Perú]. (2016). *Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota*. Lima: Senamhi.
- Senamhi. (21 de febrero de 2019). Obtenido de Situación Hidrológica del Río Chili: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=prensa&n=925>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [Senamhi]. (2016). *Análisis del Riesgo de Sequías en el Sur del Perú*. Lima: Senamhi.
- Shen, Y., Wang, S., Zhang, B., & Zhu, J. (2022). Development of a stochastic hydrological modeling system for improving ensemble streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 127683. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127683>
- Siad, S. M., Iacobellis, V., Zdruli, P., Gioia, A., Stavi, I., & Hoogenboom, G. (2019). A review of coupled hydrologic and crop growth models. *Agricultural Water Management*, 224, 105746. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105746>
- Silva Machaca, I. (11 de diciembre de 2019). CONVOCA. Obtenido de El corazón Vulnerable del Río Chili que es Protegido Frente al Cambio Climático: <https://convoca.pe/agenda-propia/el-corazon-vulnerable-del-rio-chili-que-es-protegido-frente-al-cambio-climatico>
- Sosa Sarmiento, J. D. (2016). *Análisis de la sequía hidrológica en el Perú*. [Tesis de Grado / Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2491>
- Sproles, E. A. (2019). *Cazalac*. Obtenido de Tutoria Modelo Pronostico – Microsoft Excel: <https://www.cazalac.org/publico/>
- Stehr Gesche, A. P. (2008). *Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático, para dos sub - cuencas nival en la zona cordillerana*. Chile: [Tesis de Grado / Universidad de Concepción].

- Supo, J. (2014). *Metodología de la investigación científica para las ciencias de la salud*. Perú: Universitaria.
- United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC]. (2012). *Materiales de formación del CGE - Evaluación de Vulnerabilidad y Adaptación*. Estados Unidos: United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Universidad Católica de Murcia. (2019). *Modelización Hidrológica Distribuida de a Cuenca de la Rambla del Albuñón Mediante el Uso de Datos de Teledetección*. Murcia: UCAM.
- Uribe, N. (2010). *Conceptos Básicos y Guía Rápida para el Usuario - Versión SWAT 2005*. CIAT - WATER & FOOD.
- Valiente, Ó. M. (2001). *Seqüpias: Definiciones, Tipologías y Métodos de Cuantificación*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Valladares Martel, E. A. (2017). *Respuesta Hidrológica de la Cuenca del Río Santa en Condiciones de Cambio Climático*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Valverde Gamboa, E. D. (2018). *Modelación hidrológica para cuantificar la producción de agua y sedimento actual y futuro a partir de cambios de cobertura forestal, sector Prusia, parque nacional volcán Irazú*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Velásquez Fernández, R., & Yaricahua Esteban, D. S. (2020). *Evaluación hidrológica ambiental frente al cambio climático de la cuenca alta del Río Chillón, Nevado Rajuntay – Marcapomacocha, 2020*. Lima: Universidad César Vallejo.
- Velásquez Zapata, J. A., Troin, M., & Dávila Órtiz, R. (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 11.
- Viglione, A., Rogger, M., Pirkl, H., Parajka, j., & Blöschl, G. (2018). Conceptual Model Building Inspired By Field-Mapped Runoff Generation Mechanisms. *Hydrol. Hydromech*, 13.

- Wilsey, C., WU, J., Taylor, L., Voskamp, A., Willis, S., Linares Romero, L. G., . . . Butchart, S. (2019). Proyectando el impacto del cambio climático sobre la avifauna de áreas protegidas: el caso del Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia. *Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático*, 18.
- Younghyuna, C. (2020). SWAT Model Calibration / Validation Using SWAT-CUP III: Multi - Site and Multi - Variable Model Analysis. Korea Water Resour, 16.
- Zavala Carrión, B. L., Núñez Juárez, S., Gómez Cahuaya, E. H., Pari Pinto, W., Peña Laureano, F., & Carpio Fernández, J. (2022). Estudio geoambiental de la cuenca del río Quilca-Vítor-Chili-[Boletín C 91].
- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C., Lavado-Casimiro, W., & Aragon, L. (2017). Hydrological modeling of the Peruvian–Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3543-3555. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017>, 2017
- Zuñiga Medina, S. A. (2021). *Impactos del cambio climático sobre las sequias en la cuenca rio Tambo-Perú, bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5*. Arequipa: [Tesis de grado/Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucion.

## VIII. ANEXOS

**Tabla 18**

*Matriz de consistencia*

Problema General	Objetivo general	Hipótesis general	Variable	Dimensiones	Indicador	Índice	Método	Técnica			
¿De qué manera la aplicación de la modelación hidrológica analiza las sequías en escenario de cambio climático, en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050? <b>Problemas específicos</b> <b>P1:</b> ¿De qué manera la representación del sistema hidrológico permite el análisis de sequías en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050? <b>P2:</b> ¿Cuál es el comportamiento de las sequías bajo proyecciones climáticas en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050?	Aplicar la modelación hidrológica para analizar sequías en escenario de cambio climático, en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050. <b>Objetivos específicos</b> <b>O1:</b> Establecer la representación del sistema hidrológico que permita el análisis de sequías en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050. <b>O2:</b> Analizar el comportamiento de las sequías bajo proyecciones climáticas en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.	La aplicación de la modelación hidrológica permite analizar positivamente las sequías en escenario de cambio climático, en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050. <b>Hipótesis específicas</b> <b>H1:</b> La representación del sistema hidrológico permite analizar eficazmente las sequías en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050. <b>H2:</b> El comportamiento de sequías varían en frecuencia e intensidad con las proyecciones climáticas en la subcuenca del río Chili Arequipa 2020-2050.	Variable predictora Modelos Hidrológicos	Representación del sistema hidrológico	Precipitación	mm	Pluviometría	Documental			
					Temperatura	°C	Estación meteorológica	Documental			
					Modelo de Digital de elevación	0-12.5%, 12.5-25%, 25-50%, 50-75%,	Batimetría	Documental			
					Tipo de suelo	Litosol Andosol vítricos, Andosoles acrisol, Glaciar	Granulometría	Documental			
					Tipo de cobertura vegetal	WATR, SWRN, RNGB, PAST, FRST, WETL	Fotogrametría	Documental			
			Proyecciones Climáticas	Modelos Climáticos Globales	RCP 4.5	Simulación de una serie temporal de datos	Documental: Descarga de plataformas				
			Sequías hidrológicas	Índice de Estandarizado de caudal (SSI)	SSI 3, SSI 6, SSI 9, SSI 12	Ecuaciones de análisis de sequías	Documental				
			Sequía meteorológica	Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)	SPI 3, SPI 6, SPI 9, SPI 12	Función de densidad de probabilidad	Documental				
						Variable a predecir: Sequías					

*Nota.* Elaboración Propia