ATMIRE

Title	Impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos bajo escenarios CMIP6 usando modelación hidrológica en la Cuenca Tambo
Item Type	https://purl.org/coar/resource_type/c_7a1f
Authors	Ninaquispe Salazar, Oscar Mercedes;Velasquez Castillo, Kevin Luis
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	https://purl.org/coar/access_right/c_abf2
Download date	2026-11-28 01:38:46
Item License	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Link to Item	https://hdl.handle.net/10757/690787

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos bajo escenarios CMIP6 usando modelación hidrológica en la Cuenca Tambo

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Ninaquispe Salazar, Oscar Mercedes	0009-0000-4398-8504
Velasquez Castillo, Kevin Luis	0000-0003-0095-7059

ASESOR(ES)

Jara Garcia, Mitchel Jimmy	0000-0003-4436-2858

Lima, 25 de Junio de 2026

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, por su amor, apoyo incondicional y sacrificio constante a lo largo de mi formación académica. Gracias por brindarme las herramientas y valores necesarios para alcanzar esta meta. A mi familia, por su comprensión y motivación en cada etapa de este proceso quien va dedicada la realización del trabajo.

Kevin Luis Velasquez Castillo

Dedicado a mi Madre Elcina Salazar Bardales, por acompañarme en este proceso con sus acciones, demostrándome su amor, su deseo e ilusión de verme profesional.

A mi Padre Ygnacio Segundo Ninaquispe Castañeda, en el cielo, ya que en vida tuvo la fe y esperanza que algún día seria profesional.

A mis hermanos que con su ejemplo de lucha diaria siguen adelante por bienestar de sus familias.

Oscar Mercedes Ninaquispe Salazar

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expresamos nuestro profundo agradecimiento a Dios, quien nos ha acompañado y fortalecido a lo largo de este proceso. Su guía, sabiduría y apoyo espiritual han sido fundamentales para afrontar cada desafío y avanzar con confianza hacia nuestras metas.

Asimismo, manifestamos nuestro reconocimiento a nuestras familias, especialmente a nuestros padres y hermanos, por su apoyo incondicional, comprensión y sacrificio constante. Su respaldo ha sido una fuente permanente de motivación durante esta etapa de formación.

De igual manera, agradecemos a nuestro asesor, Mitchel Jimmy Jara García, por su orientación, dedicación y valiosos aportes. Su experiencia y conocimientos fueron esenciales para el desarrollo y culminación satisfactoria de este trabajo.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), por brindarnos una formación integral basada en la innovación, la responsabilidad y la búsqueda permanente de la excelencia profesional.

A todos aquellos que contribuyeron de una u otra manera en este proceso, les extendemos nuestro más sincero agradecimiento por acompañarnos en este importante camino académico y profesional.

RESUMEN

La presente investigación evalúa el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Tambo mediante la aplicación del modelo hidrológico WEAP y el uso de escenarios climáticos CMIP6. El estudio se desarrolló a partir de la recopilación y procesamiento de información pluviométrica, hidrométrica y de temperatura proveniente de entidades oficiales como el SENAMHI y la ANA, realizando previamente procesos de control de calidad, análisis de consistencia y completación de datos para garantizar la confiabilidad de las series históricas utilizadas en la modelación.

Como parte del marco metodológico, se efectuó la calibración y validación del modelo hidrológico en WEAP, complementándose con técnicas de downscaling estadístico y corrección de sesgo mediante el método de Mapeo de Cuantiles Empírico (EQM), lo que permitió adaptar las proyecciones de los Modelos de Circulación General (GCM) a las condiciones climáticas de la cuenca. Para ello, se emplearon cuatro modelos climáticos globales: CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6 y MPI-ESM1-2-HR, considerando los escenarios de emisiones SSP2-4.5 y SSP5-8.5, ampliamente utilizados para evaluar los efectos futuros del cambio climático.

Los resultados muestran que la respuesta hidrológica de la cuenca varía según el modelo climático y el escenario analizado. En el escenario SSP5-8.5, el caudal medio podría aumentar de 30.92 m^3/s a 53.33 m^3/s, mientras que en SSP2-4.5 alcanzaría 34.87 m^3/s. Además, algunos modelos, como EC-Earth3, proyectan incrementos significativos en la disponibilidad hídrica hacia finales de siglo, mientras que otros prevén cambios más moderados o ligeras disminuciones en ciertos periodos.

Finalmente, el estudio concluye que el cambio climático modificará el régimen hidrológico de la cuenca del río Tambo durante el siglo XXI, generando cambios en los caudales y en la disponibilidad de agua para actividades agrícolas, poblacionales e industriales. Los resultados obtenidos constituyen una herramienta de apoyo para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos, permitiendo anticipar posibles escenarios futuros y fortalecer las estrategias de adaptación frente a los efectos del cambio climático.

Palabras clave: WEAP; CMIP6; GCM; Cambio climático.

Impact of Climate Change on Water Resource Availability under CMIP6 Scenarios Using Hydrological Modeling in the Tambo River Basin

ABSTRACT

This research evaluates the impact of climate change on water resource availability in the Tambo River basin through the application of the Water Evaluation and Planning (WEAP) model and the use of CMIP6 climate scenarios. The study was developed based on the collection and processing of precipitation, streamflow, and temperature data obtained from official institutions such as the National Service of Meteorology and Hydrology of Peru (SENAMHI) and the National Water Authority (ANA). Prior to the modeling process, quality control, consistency analysis, and data completion procedures were carried out to ensure the reliability of the historical time series used in the study.

As part of the methodological framework, the WEAP hydrological model was calibrated and validated, complemented by statistical downscaling techniques and bias correction using the Empirical Quantile Mapping (EQM) method. This approach enabled the adaptation of General Circulation Model (GCM) projections to the climatic conditions of the basin. Four global climate models were employed: CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, and MPI-ESM1-2-HR, considering the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 emission scenarios, which are widely used to assess the future impacts of climate change.

The results show that the basin's hydrological response varies depending on the climate model and scenario considered. Under the SSP5-8.5 scenario, the mean streamflow could increase from 30.92 m^3/s to 53.33 m^3/s, whereas under SSP2-4.5 it is projected to reach 34.87 m^3/s. In addition, some models, such as EC-Earth3, project substantial increases in water availability toward the end of the century, while others indicate more moderate changes or slight decreases during certain periods.

Finally, the study concludes that climate change will alter the hydrological regime of the Tambo River basin throughout the 21st century, leading to changes in streamflow and water availability for agricultural, domestic, and industrial activities. The results provide a valuable tool for water resource planning and sustainable management, enabling the anticipation of future scenarios and strengthening adaptation strategies to address the impacts of climate change.

Keywords: WEAP; CMIP6; GCM; Climate Change.

Trabajo_44446135.pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	14%	5%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	7%
2	www.frontiersin.org Fuente de Internet	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	1%
5	laccei.org Fuente de Internet	1%
6	www.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1%
7	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.uasb.edu.bo Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1%

12	Submitted to Organismo de Evaluación y Fiscalización Trabajo del estudiante	<1 %
13	bivica.org Fuente de Internet	<1 %
14	revistaig.emnuvens.com.br Fuente de Internet	<1 %
15	nora.nerc.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
17	repository.pauwes-cop.net Fuente de Internet	<1 %
18	Leandro Almonacid, Natalia Pessacg, Boris Gastón Diaz, Pablo Luis Peri. "Caracterización espacio-temporal de las sequías meteorológicas en Santa Cruz en el contexto de cambio climático", Meteorologica, 2024 Publicación	<1 %

Excluir citas	Apagado	Excluir coincidencias	< 20 words
Excluir bibliografía	Activo		

TABLA DE CONTENIDOS

1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO 1

1.1 ANTECEDENTES 1
1.2 ANÁLISIS DEL PROBLEMA 2
1.3 ESTADO DEL ARTE 4
1.4 OBJETIVOS 5
1.4.1 General 5
1.4.2 Específicos 5
1.5 INDICADORES DE LOGRO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 6
1.6 JUSTIFICACIÓN 7
1.7 LIMITACIONES 8

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 9

2.1 MARCO CONCEPTUAL 9
2.1.1 Modelo hidrológico 9
2.1.2 Cuenca 9
2.1.3 Cambio climático 9
2.1.4 Modelo hidrológico WEAP 9
2.1.5 GCM (Modelos de Circulación General) 9
2.1.6 Escenarios Climáticos SSP 10
2.1.7 Dowscaling (Estadístico) 10
2.1.8 Mapeo de Cuantiles Empírico (EQM) 10
Proceso paso a paso: 10
2.2 ESTÁNDARES, MARCOS DE TRABAJO Y BUENAS PRÁCTICAS 10
2.2.1 Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI): 10
2.2.2 Autoridad Nacional del Agua (ANA): 11
2.3 BASES LEGALES Y MARCO NORMATIVO 11

3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO 12

3.1 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN 12
3.1.1 Proceso del desarrollo de la solución 12
3.2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN 14
3.2.1 Datos Pluviométricos. 14

3.2.2 Información de Temperatura 15
3.2.3 Información de Hidrométrica 16
3.2.4 Delimitación de la Cuenca. 16
3.2.5 Regionalización 18
3.2.6 Análisis de consistencia 25
3.2.7 Modelamiento Hidrológico 27
3.3 VALIDACIÓN DEL PROYECTO 28
3.3.1 Calibración 60% y Validación 40% 28
3.3.2 Calibración 70% y Validación 30% 33
3.4 DESCARGA DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS SSPS2-4.5 Y SSPS5-8.5 35
3.5 DOWSCALING DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES (GCM) 39
3.6 SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 43
3.7 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS 45
3.7.1 Cuadro de resumen de caudales proyectados 45
3.7.2 Análisis e Interpretación de resultados 47
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 58
4.1 CONCLUSIONES: 58
4.2 RECOMENDACIONES 59
5 REFERENCIAS 60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Indicadores de logro y resultados 6
Tabla 2 Temperaturas promedio anuales 15
Tabla 3 Parámetros Geomorfológicos de las sub cuencas 17
Tabla 4 Parámetros del vector Regional 1 19
Tabla 5 Parámetros del vector Regional 2 21
Tabla 6 Parámetros del vector Regional 3 23
Tabla 7 Precipitación total mensual de estaciones completadas 26
Tabla 8 Resultados de Caudales para la Cuenca Tambo para el Escenario 2015 – 2100 – SSP 5-8.5 45
Tabla 9 Resultados de Caudales para la Cuenca Tambo para el Escenario 2015 – 2100 – SSP 2-4.5 46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Árbol de Problemas..... 3
Figura 2 Diagrama de flujo del proceso de Investigacion..... 13
Figura 3 Mapa estación hidrométrica y estaciones pluviométricas..... 14
Figura 4 Hidrometereológica de caudales..... 16
Figura 5 Delimitación de Cuenca Tambo..... 17
Figura 6 Precipitación total mensual documentada - Region 1..... 18
Figura 7 Índices anuales del vector y de las estaciones - Region 1..... 19
Figura 8 Índices anuales acumulados de las estaciones - Region 1..... 20
Figura 9 Precipitación total mensual histórica - Region 2..... 21
Figura 10 Índices anuales del vector y de las estaciones - Region 2..... 21
Figura 11 Índices anuales acumulados de las estaciones - Region 2..... 22
Figura 12 Precipitación total mensual histórica – Región 3..... 23
Figura 13 Índices anuales del vector y de las estaciones - Region 3..... 23
Figura 14 Índices anuales acumulados de las estaciones - Region 3..... 24
Figura 15 Histograma de precipitación cronológica de las estaciones y su promedio desde año 1964 al año 2022..... 27
Figura 16 Modelamiento de cuenca tambo en WEAP..... 27
Figura 17 División de la serie de tiempo en periodos de calibración y validación..... 28
Figura 18 Calibración de estación Puente Santa Rosa..... 29
Figura 19 Calibración anual en software WEAP estación Puente Santa Rosa..... 30
Figura 20 Calibración mensual en software estación Puente Santa Rosa..... 30
Figura 21 Validación de estación Puente Santa Rosa..... 31
Figura 22 Validación Anual en software WEAP estación Puente Santa Rosa..... 32
Figura 23 Validación Mensual en Software estación Puente Santa Rosa..... 32
Figura 24 Calibración de estación Puente Santa Rosa..... 33
Figura 25 Validación de estación Puente Santa Rosa..... 34
Figura 26 Precipitación(mm) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP5-8.5..... 35
Figura 27 Temperatura Máxima (K) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP5-8.5..... 36
Figura 28 Temperatura Mínima (K) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP5-8.5..... 37

Figura 29 Precipitación(mm) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP2-4.5 37
Figura 30 Temperatura Máxima (K) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP2-4.5 38
Figura 31 Temperatura Mínima (K) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP2-4.5 38
Figura 32 Precipitación Observada y Modelos de Circulación Global – Sin Corrección del Sesgo..... 39
Figura 33 Parámetro Estadístico PBIAS – Sin Corrección del Sesgo..... 40
Figura 34 Parámetro Estadístico Spearman – Sin Corrección el Sesgo 41
Figura 35 Precipitación Observada y Modelos de Circulación Global – Corregido del Sesgo 41
Figura 36 Parámetro Estadístico PBIAS – Corregido del Sesgo..... 42
Figura 37 Parámetro Estadístico Spearman – Corregido del Sesgo 43
Figura 38 Caudales Simulados – Modelo CNRM-CM6-1 – Escenario SSP5-8.5 44
Figura 39 Caudales Simulados – Modelo CNRM-CM6-1 – Escenario SSP2-4.5 44
Figura 40 Caudales observados vs Caudales proyectados 2015 a 2050– Escenario SSP5-8.5 48
Figura 41 Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 2015 a 2050– Escenario SSP5-8.5 48
Figura 42 Caudales observados vs Caudales proyectados 2051 a 2100– Escenario SSP5-8.5 50
Figura 43 Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 2051 a 2100– Escenario SSP5-8.5 50
Figura 44 Caudales observados vs Caudales proyectados 1965 a 2100– Escenario SSP5-8.5 51
Figura 45 Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 1965 a 2100– Escenario SSP5-8.5 52
Figura 46 Caudales observados vs Caudales proyectados 2015 a 2050– Escenario SSP2-4.5 53
Figura 47 Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 2015 a 2050– Escenario SSP2-4.5 54

Figura 48 Caudales observados vs Caudales proyectados 2051 a 2100– Escenario SSP2-4.5 55
Figura 49 Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 2051 a 2100– Escenario SSP2-4.5 56
Figura 50 Caudales observados vs Caudales proyectados 1965 a 2100– Escenario SSP2-4.5 56
Figura 51 Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 1965 a 2100– Escenario SSP2-4.5 57

1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

El agua es el recurso natural más importante del planeta para la vida humana. Existe una conexión directa entre el estado de hidratación y el buen funcionamiento del organismo. Mantener un consumo adecuado de agua resulta indispensable para preservar la salud, debido a que este elemento forma gran parte de las células y constituye el componente predominante del cuerpo humano, alcanzando aproximadamente entre el 50 % y el 70 % de la masa corporal total. (Perrier ET, 2021)

Vital para sostener el ecosistema del planeta, la vida de todo ser vivo depende de ella, también es fundamental en la gestión y el desarrollo sustentable de todas las actividades relacionadas con el, por ejemplo, los sistemas de riego, la producción de energía hidroeléctrica y cualquier otra actividad de producción natural e industrial para el desarrollo del planeta.

Autoridad Nacional del Agua (ANA) nos indica que El Perú es considerado un país favorecido debido a que posee aproximadamente el 1.89 % en disponibilidad mundial de agua dulce. Asimismo, América del sur se destaca por ser la región con la mayor reserva de agua dulce a nivel global.

El territorio de Perú cuenta con tres importantes vertientes hidrográficas y dispone de alrededor de 2 billones de metros cúbicos de agua anualmente. Sin embargo, a causa de las condiciones geográficas del país, la vertiente del Pacífico, donde reside cerca del 66 % de la población, solo reúne el 2,2 % de los recursos hídricos disponibles.

Las características geográficas del Perú han dado lugar a la formación de 159 cuencas hidrográficas distribuidas en todo el territorio nacional, cada una con particularidades y requerimientos específicos para la administración de sus recursos hídricos. Frente a esta realidad, la Autoridad Nacional del Agua, mediante el Proyecto de Modernización de la Gestión de los Recursos Hídricos, impulsa la conformación, implementación y funcionamiento de consejos de recursos hídricos por cuenca, considerados mecanismos de gestión del agua eficientes y apropiados para las necesidades del país. (Autoridad Nacional del Agua ANA, 2026)

La cuenca del Rio Tambo su demarcación política se distribuye en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Puno, abarcando 7 provincias y 27 distritos, tiene una superficie de

12,744.41 km2 predominando áreas sin vegetación y con una población de 22,000.00 habitantes aproximadamente y están expuestos a la vulnerabilidad. Esta actividad constituye la principal fuente económica de la zona, destacando el cultivo de productos como arroz, ajo, papa y caña de azúcar, destinados tanto al mercado interno como a la agroexportación. La superficie agrícola aprovechada en este valle alcanza las 7764,28 hectáreas, de las cuales 1382,51 hectáreas corresponden a terrenos incorporados mediante el Plan Rehatic en los distritos de Deán Valdivia y Punta de Bombón. Del total, 2641,20 hectáreas pertenecen a Cocachacra, 1972,31 hectáreas a Deán Valdivia y 1768,26 hectáreas a Punta de Bombón.

El Instituto geológico, minero y metalúrgico (INGEMMET), realiza un estudio sobre la Hidrología de la Cuenca del Rio Tambo, la cuenca se localiza en la zona alta de la ciudad de Moquegua, en el área limítrofe con la región Puno y parte del territorio de Arequipa. El río Tambo es considerado uno de los mas relevantes afluentes de la vertiente del Pacífico. La cuenca hidrográfica del río Tambo (1318) está situada en el sector suroccidental del Perú, comprendida entre las coordenadas UTM 8096000–8260000 N y 196000–404000 E, dentro de la zona 19 sur. Desde el punto de vista hidrográfico, limita en el norte con las cuencas de los siguientes ríos, Quilca-Vítor-Chili, Camaná, Coata e Ilpa; hacia el este con la cuenca del río Ilave; y al sur con las cuencas de los ríos Locumba, Moquegua y Honda.

En la cuenca del río Tambo se encuentran acuíferos que destacan por presentar elevados caudales de descarga. Entre ellos se pueden mencionar los manantiales de Incalacaya (150 L/s), ubicado en Pasto Grande; Jatunpujo (90 L/s), en Pacchani; Tipujo (85 L/s), en la zona de Aruntaya; y Pujini (60 L/s). (Josemanuel Carpio Fernández, 2020)

La cuenca del río Tambo se extiende desde la zona costera hasta la Cordillera Occidental de Andes, cubriendo un área aproximada de 13 073.4 km². Su relieve asciende de manera progresiva, formando sistemas montañosos cuyas altitudes alcanzan los 5612 m s. n. m

1.2 Análisis del Problema

A nivel mundial, el cambio en las condiciones climáticas está generando alteraciones significativas en el ciclo hidrológico, modificando los patrones de precipitación, temperatura y evapotranspiración, lo que repercute directamente en la disponibilidad de recursos hídricos. Diversos estudios han evidenciado que el incremento de la temperatura global intensifica la variabilidad climática, provocando eventos extremos más frecuentes, como sequías prolongadas e inundaciones, afectando la seguridad hídrica de múltiples regiones.

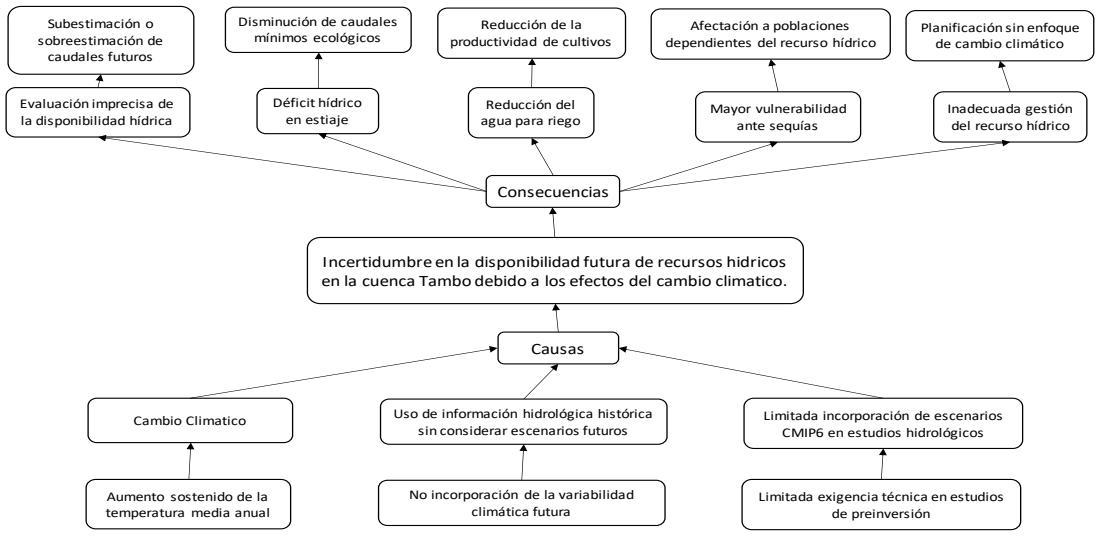
En este contexto, los modelos climáticos globales del proyecto CMIP6 han permitido proyectar escenarios futuros que evidencian reducciones o aumentos significativos en la disponibilidad hídrica en diversas cuencas del mundo, especialmente en zonas vulnerables.

Un caso representativo de las consecuencias se observa en el río Paraná (Brasil), uno de los ríos más grandes de América latina. Es fundamental para la industria pesquera y comercial, además de ser fuente de agua potable para 40 millones de personas. La peor sequía en 91 años en Brasil ha provocado una disminución histórica del caudal del río, afectando su navegabilidad, crucial para las exportaciones agrícolas e industriales, e impactando a quienes dependen de él para su sustento. La sequía afecta a pescadores ribereños, trabajadores fluviales, operadores logísticos, empresarios agroindustriales y, por supuesto, a la población brasileña, víctima del aumento de precios y de una grave crisis energética. Este suceso ilustra los temores sobre lo que depara el futuro, con la aparición del cambio climático y fenómenos meteorológicos más extremos, tal como se predijo en la última edición del informe del IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de la ONU). Debido a la actividad humana, el planeta se está calentando, un hecho que ya está provocando consecuencias alarmantes. En Sudamérica, el aumento de la sequía y la aridez figura entre las predicciones del grupo de científicos de la ONU. (RBRH., 2018).

En la Figura 1 mostramos como se desarrolla el árbol de problemas con las causas que las provocan y las consecuencias que se derivan.

Figura 1

Árbol de Problemas.



El principal problema es la incertidumbre de los recursos hídricos por el cambio climáticos en la cuenca el tambo en escenarios futuros.

1.3 Estado del Arte

El cambio climático genera la incertidumbre que desastres puede generar en planeta ante ello Priscila da Silva TAVARES, Isabel Lópes PILOTTO, Sin Chan CHOU, en su artículo "Agrupación de datos de proyecciones de cambio climático de significativa resolución sobre Sudamérica con corrección de sesgo" del año 2024 realiza el análisis de las proyecciones del clima donde indican la disponibilidad de datos exactos y detallados resulta fundamental para analizar los efectos del cambio climático. En este marco, el estudio presenta un conjunto de datos generado a partir de simulaciones y proyecciones del modelo regional ETA, ajustado mediante corrección de sesgo y vinculado a cuatro modelos climáticos globales pertenecientes al proyecto CMIP5. Dicho conjunto abarca dos intervalos temporales: 1976–2005, considerado como período de referencia, y 2006–2099, correspondiente a las proyecciones climáticas futuras bajo los supuestos RCP4.5 y RCP8.5. La distribución de frecuencia de la evapotranspiración potencial, que antes era más frecuente en valores altos (6-8 mm/día), se aproximó a la distribución observada tras la corrección, con los valores más frecuentes entre 3 y 4 mm/día. La temperatura del aire también mostró un ajuste sustancial, con los valores más frecuentes variando de 24-26 °C a 26-28 °C. pero sobreestimó los eventos extremos, con valores superiores a 17 mm/día. (Priscila da Silva TAVARES, 2024)

Ayala Vizcarra Iván, Castillo Navarro Leonardo, Zúñiga Mendoza Jessica, En el año 2025 en su artículo "Modelización hidrológica-hidráulica con la repercusión del cambio climático e influencia del número de curva (CN) en la cuenca del río Ichu, Huancavelica-Perú." realizan el estudio para medir el aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos hidrometeorológicos extremos, asociado a la variación climática, representa un reto importante para la gestión de los recursos hídricos y la mitigación de inundaciones en zonas vulnerables. En este contexto, la presente investigación analiza los efectos conjuntos del cambio climático y de las características de extracción del suelo sobre los procesos de escorrentía en la cuenca experimental del río Ichu, situada en los Andes centrales del Perú. Para ello, se emplearon modelos hidrológicos e hidráulicos distribuidos implementados en el sistema HEC-RAS, junto con indicadores del Número de Curva (CN) obtenidos a partir de información de alta resolución proveniente de Sentinel-2 y SoilGrid. Los resultados indican que, en condiciones de suelo altamente saturado (CN III), el cambio climático genera

un incremento del 20,1 % en el caudal máximo (Qp) y del 12,9 % en el volumen total de escorrentía. Por otro lado, en escenarios de menor saturación del suelo (CN II), los aumentos relativos alcanzan el 28,7 % y el 22,6 %, respectivamente, aunque los valores absolutos registrados son inferiores. (Ayala Bizarro, Castillo Navarro, & Zúñiga Mendoza, 2025)

También en ámbito mundial M. Sivasakthi, S. Sathiyamurthi, K. Dhanasekara, año 2026, realizan una "Evaluación de la tendencia de cambio climatológico pasado y futuro en la cuenca del río Vellar, India, utilizando CMIP6", detallan que este estudio tiene como objetivo investigar las tendencias climáticas históricas (1951–2024) y futuras proyectadas (2026–2099) y los puntos de cambio en la cuenca del río Vellar bajo las Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP) utilizando observaciones de series temporales y un Modelo Climático Global (GCM) a escala reducida. Los resultados revelaron que la precipitación histórica encontró una tendencia decreciente estacional y anual, con puntos de cambio significativos en 1979, 1981 y 1988. Las proyecciones futuras mostraron una tendencia decreciente en la precipitación, con puntos de cambio notables en 2058, 2067 y 2084. La estación Virudhachalam durante Kharif, Vazhapadi y Karumandurai durante Rabi y el período anual registraron una tendencia decreciente más significativa. El resultado de la proyección de temperatura histórica y futura mostró una tendencia ascendente significativa. Las temperaturas mínimas y máximas históricas aumentaron de 0,44 °C a 0,88 °C y de 1,11 °C a 1,7 °C, respectivamente, con puntos de cambio para la temperatura mínima en 1996 y la temperatura máxima en 1979. Las predicciones futuras de temperatura registraron una tendencia creciente de 1,5 °C, 2,0 °C y 3,0 °C para las temperaturas máximas y de 0,9 °C, 1,2 °C y 1,5 °C para las temperaturas mínimas bajo los escenarios SSP 2.6, SSP 4.5 y SSP 8.5, respectivamente. Se esperan puntos de cambio en la temperatura máxima en las décadas de 2050 y 2060 para SSP 2.6 y SSP 4.5. Mientras que SSP 8.5 anticipa finales de la década de 2080, lo que indica un patrón de calentamiento en dos etapas con un aumento gradual inicial seguido de un rápido aumento hacia finales de siglo. (M. Sivasakthi, 2026)

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Evaluar el impacto del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos mediante modelación hidrológica bajo escenarios CMIP6 en la cuenca del Río Tambo.

1.4.2 Específicos

- Recoger y procesar la información climática e hidrológica.

- Calibrar y validar el modelo hidrológico en el software WEAP.
- Realizar el downscaling de los modelos climáticos globales (GCM)
- Evaluar el funcionamiento hidrológico de la cuenca bajo condiciones proyectadas de cambio climático.

1.5 Indicadores de logro del Trabajo de Suficiencia Profesional

En la Tabla 1, se describe los indicadores que se recopilaran para el desarrollo de la investigación y los resultados de la misma.

Tabla 1

Indicadores de logro y resultados

Indicador	Unidad de medida	Descripción
Precipitación	mm	Agua que se origina en la atmósfera y se deposita sobre la superficie terrestre en forma líquida o sólida.
Temperatura	°C,°F,K	Magnitud física que cuantifica el grado de energía generada por la agitación de las partículas, objeto o en el entorno.
NASH - Sutcliffe (NSE)	Adimensional	El NSE establece una comparación entre una serie de datos observados y datos simulados
Sesgo Porcentual (PBIAS)	Adimensional	El PBIAS cuantifica la propensión media de los datos simulados a ser superiores o inferiores a los datos observados
Caudal	m3/s	Medida del volumen de fluido que pasa por un tramo dado por unidad de tiempo.
Coeficiente de Correlación (r)	Adimensional	El r establece la dependencia lineal entre dos variables, caudales observados y caudales simulados.
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	Adimensional	El RMSE cuantifica la discrepancia entre los datos observados (Qobs) y los simulados (Qsim)

1.6 Justificación

El estudio aborda la problemática hídrica de la cuenca del río Tambo mediante el software WEAP, herramienta que permite determinar el abastecimiento estimado de agua en el futuro considerando las variaciones en el climáticas

En una primera etapa, se realiza el desarrollo y análisis de información pluviométrica e hidrométrica proveniente del SENAMHI, incluyendo el control de calidad, completación de datos y generación de series consistentes de precipitación y temperatura. Esta información comprende la base para la configuración del modelo hidrológico.

Posteriormente, se implementa el modelo en WEAP, representando el comportamiento hidrológico de la cuenca a través del método lluvia–escorrentía. El modelo fue ajustado y verificado con base en datos de caudales observados en estaciones hidrométricas ubicadas en la parte baja de la cuenca, garantizando la confiabilidad de la simulación bajo condiciones actuales.

En una siguiente etapa, se incorporan proyecciones climáticas provenientes de modelos climáticos globales (GCM) del conjunto CMIP6, las cuales son previamente sometidas a procesos de downscaling y corrección de sesgo, con el fin de adaptarlas a la escala local de la cuenca. Estas proyecciones permiten generar series futuras de variables climáticas que son utilizadas como entrada en el modelo hidrológico.

Finalmente, el modelo simula la respuesta hidrológica de la cuenca bajo distintos escenarios climáticos, permitiendo estimar la disponibilidad hídrica futura hasta el horizonte temporal del año 2100. Este enfoque metodológico posibilita analizar la variabilidad de los caudales, identificar posibles condiciones de déficit hídrico y evaluar el impacto del cambio climático en la cuenca.

A diferencia de los enfoques tradicionales basados únicamente en registros históricos, la presente investigación incorpora proyecciones climáticas futuras provenientes del programa CMIP6, considerando trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP), como los supuestos SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Esta integración metodológica constituye una mejora significativa, ya que permite analizar no solo las condiciones actuales, sino también la evolución futura del recurso hídrico, reduciendo la incertidumbre en su estimación y fortaleciendo la toma de decisiones en la gestión del agua.

1.7 Limitaciones

- El uso de múltiples escenarios climáticos provenientes de los modelos globales del conjunto CMIP6 puede generar un volumen considerable de información, lo que incrementa la complejidad en el procesamiento, almacenamiento y análisis de datos. En este sentido, la investigación se limita a la selección de un conjunto representativo de escenarios (como SSP2-4.5 y SSP5-8.5), lo cual permite optimizar el manejo de la información sin comprometer la representatividad de los resultados.
- La estimación de la disponibilidad de recursos hídricos se enfocará únicamente en las aguas superficiales, excluyendo las fuentes subterráneas, lo que podría afectar la exactitud de las proyecciones obtenidas.
- El estudio no incluirá evaluaciones de la condición del agua del río a través de muestreos ni pruebas de laboratorio, por lo que no se determinará la aptitud del recurso hídrico para su uso en actividades de riego agrícola.

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Modelo hidrológico

Singh V.P. (1995), conceptualiza un modelo hidrológico es una herramienta matemática que describe la respuesta de una cuenca hidrográfica ante entradas como la precipitación, mediante ecuaciones que representan procesos físicos.

2.1.2 Cuenca

Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1988), una cuenca hidrográfica se define como una extensión territorial donde las aguas superficiales confluyen y se dirigen hacia un mismo punto de descarga, como un río, lago o reservorio.

2.1.3 Cambio climático

United Nations Framework Convention on Climate Change (1992), indica que el cambio climático corresponde a modificaciones en las condiciones climáticas originadas de manera directa o indirecta por las actividades humanas, las cuales alteran la conformación de la atmósfera a escala global y se añaden a las variaciones naturales del clima registradas a lo largo del tiempo.

2.1.4 Modelo hidrológico WEAP

El modelo WEAP, creado por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI), es considerado una de las herramientas más utilizadas a nivel internacional para el análisis y la administración de los recursos hídricos. Su funcionamiento se basa en el enfoque de presupuesto hídrico, lo que permite aplicarlo en sistemas agrícolas, urbanos y en cuencas hidrográficas de distintas dimensiones, tanto extensas como reducidas

2.1.5 GCM (Modelos de Circulación General)

El Modelo de Circulación General (GCM) constituye una representación matemática del sistema climático terrestre, en la que la atmósfera, los océanos y la superficie continental se subdividen en una red de celdas distribuidas en distintos niveles verticales. En cada punto de esta malla se resuelven ecuaciones que simulan procesos físicos a gran escala, tales como el movimiento del aire y del agua, la transferencia de calor y la distribución de la humedad. Un modelo típico puede contener alrededor de un millón de puntos de cálculo y aproximadamente veinte niveles verticales tanto en la atmósfera como en el océano. Estas ecuaciones se procesan a intervalos cercanos a los diez minutos, permitiendo realizar

simulaciones climáticas que abarcan desde varias décadas hasta cientos o incluso miles de años

2.1.6 Escenarios Climáticos SSP

Sendas representativas de concentración o trayectorias de concentración representativas.

2.1.7 Dowscaling (Estadístico)

Elaborar datos y escenarios climáticos que permitan evaluar el impacto de la variabilidad climática y del cambio climático en sistemas humanos y ambientales que operan a escalas espaciales y temporales más finas que las consideradas por un modelo climático global.

2.1.8 Mapeo de Cuantiles Empírico (EQM)

Producir El Mapeo de Cuantiles Empírico (EQM) es una de las técnicas mas robustas y utilizadas en la reducción de escala estadística (dowscaling) y corrección de sesgo en el modelado climático.

2.1.8.1 Fundamento Matemático: El método utiliza la función de distribución acumulada emperica (FDA). La condición $F_{Corr}(X_{Corr}) = F_{obs}(X_{obs})$ se resuelve buscando el valor corregido atreves de la siguiente relación fundamental:

$$X_{Corr} = F_{obs}^{-1}\left(F_{sim}(X_{sim})\right)$$

Proceso paso a paso:

- Cálculo de la distribución simulada: se construye la función de distribución acumulada para los datos del modelo climático durante el periódico histórico (F_{sim})
- Cálculo de la distribución observada: se construye la misma función para los datos reales o de reanálisis medidos en la misma zona (F_{obs})
- Aplicación: Para cada valor simulado (X_{sim}), se calcula probabilidad acumulada y se busca el valor correspondiente en la distribución observada que tenga exactamente la misma esa misma probabilidad (F_{obs}^{-1})

2.2 Estándares, Marcos de trabajo y buenas prácticas

2.2.1 Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI):

Es la entidad encargada de vigilar y predecir la situación climática y el abastecimiento de los recursos hídricos en el país. Su función es generar información y análisis confiables que resultan fundamentales para el manejo eficiente del agua y elección de medidas vinculadas al clima y a los recursos naturales.

2.2.2 Autoridad Nacional del Agua (ANA):

Administra y supervisa los recursos hídricos a escala nacional. Su principal responsabilidad es formular normas y políticas que promuevan el uso sostenible del agua, garantizando su accesibilidad y preservación en beneficio del país.

2.3 Bases Legales y Marco Normativo

La Ley N.° 29664, denominada Ley de Gestión del Riesgo de Desastres, define un conjunto de políticas y medidas orientadas a la prevención y atención de eventos naturales adversos, como las inundaciones. Asimismo, promueve la adecuada planificación del territorio con el fin de reducir la vulnerabilidad de la población y de las infraestructuras frente a este tipo de fenómenos

3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Diseño de la Solución

Esta investigación tiene un nivel exploratorio porque estamos estudiando un tema que se va proyectar simulaciones mediante modelos matemáticos. (Dr. Roberto Hernández Sampieri, 2014)

3.1.1 Proceso del desarrollo de la solución

El desarrollo del presente proyecto se genera una secuencia metodológica que integra el procesamiento de información hidrometereológica, la modelación hidrológica y la simulación de escenarios de cambio climático, con la finalidad de evaluar el suministro futuro de recursos hídricos en la cuenca del Río Tambo.

En una primera etapa, se realiza la recopilación y procesamiento de información climática e hidrológica, incluyendo datos de precipitación, temperatura y caudales provenientes del SENAMHI. Esta fase comprende el control de calidad de datos, análisis de consistencia, complementación de series faltantes y generación de información homogénea, garantizando la confiabilidad de los datos de entrada.

Posteriormente, se procede la implementación del modelo hidrológico en el software WEAP, donde se representa el comportamiento hidrológico de la cuenca mediante el método lluvia–escorrentía. En esta etapa se definen los parámetros físicos de la cuenca, así como las condiciones iniciales y de frontera necesarias para la simulación.

Una vez establecido lo anterior, el modelo hidrológico fue sometido a un proceso de ajuste y evaluación, empleando mediciones históricas de caudal como referencia principal en estaciones hidrométricas ubicadas en la parte baja de la cuenca. La calibración permite ajustar los parámetros del modelo para reproducir adecuadamente el comportamiento observado, mientras que la validación verifica la capacidad predictiva del modelo bajo condiciones independientes.

En una etapa posterior, se incorporan proyecciones climáticas provenientes de modelos climáticos globales (GCM) del conjunto CMIP6, las cuales son sometidas a procesos de downscaling y corrección de sesgo, con el fin de obtener series climáticas a escala local. Estas proyecciones consideran diferentes trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP), como los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

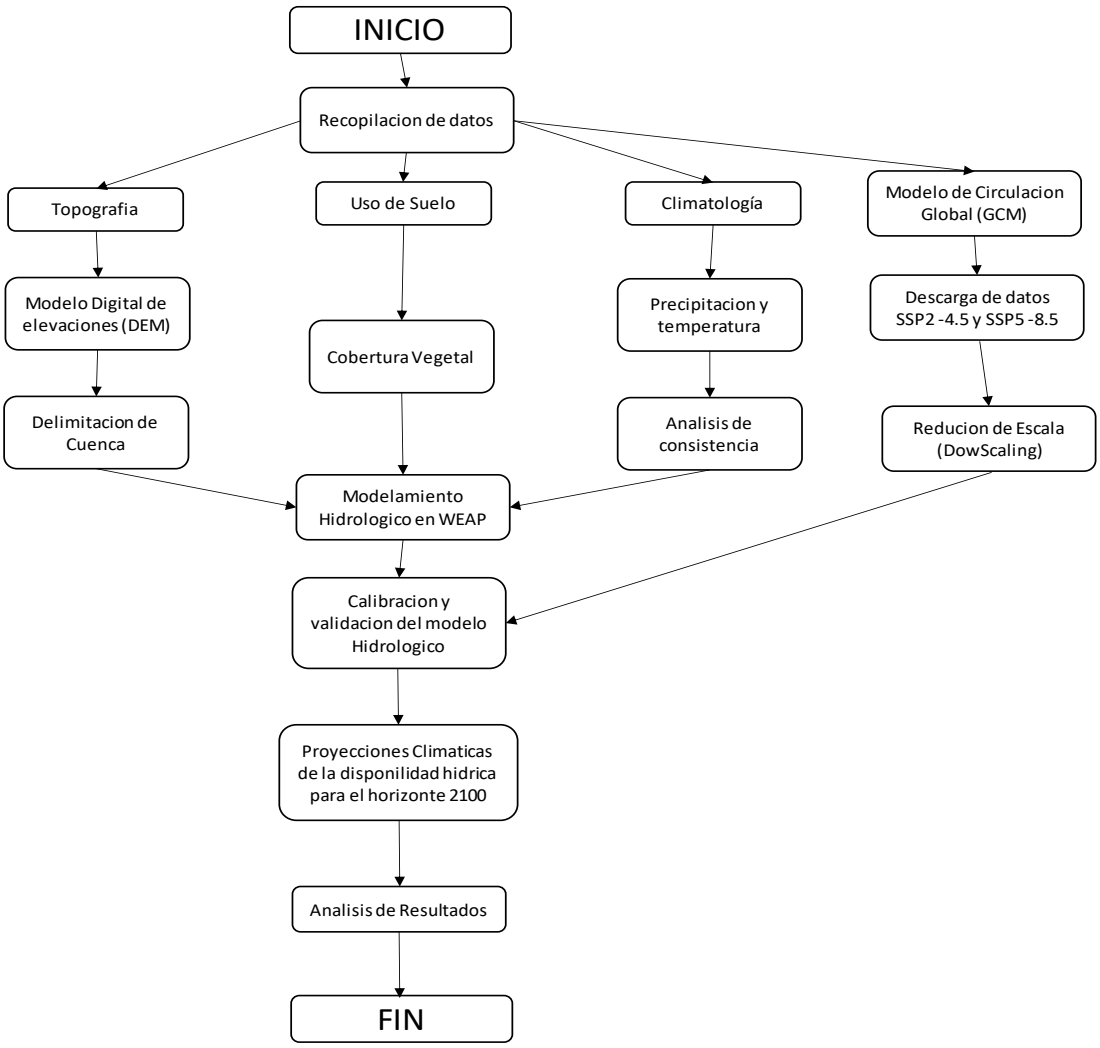
Se ejecutan simulaciones hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, utilizando las series climáticas proyectadas como variables de entrada en el modelo. Esto permite analizar el resultado hidrológico de la cuenca frente a diferentes parámetros climáticos futuras.

Finalmente, se realiza el análisis de la disponibilidad hídrica, evaluando la variabilidad de los caudales, la ocurrencia de periodos de déficit hídrico y las variaciones en el régimen hidrológico hasta el horizonte temporal del año 2100. Los resultados obtenidos permiten identificar tendencias y posibles consecuencias del cambio climático sobre la cuenca, contribuyendo a la gestión sostenible del recurso hídrico.

En la Figura 2, indica el procedimiento de la investigación a desarrollar.

Figura 2

Diagrama de flujo del proceso de Investigacion



3.2 Desarrollo de la Solución

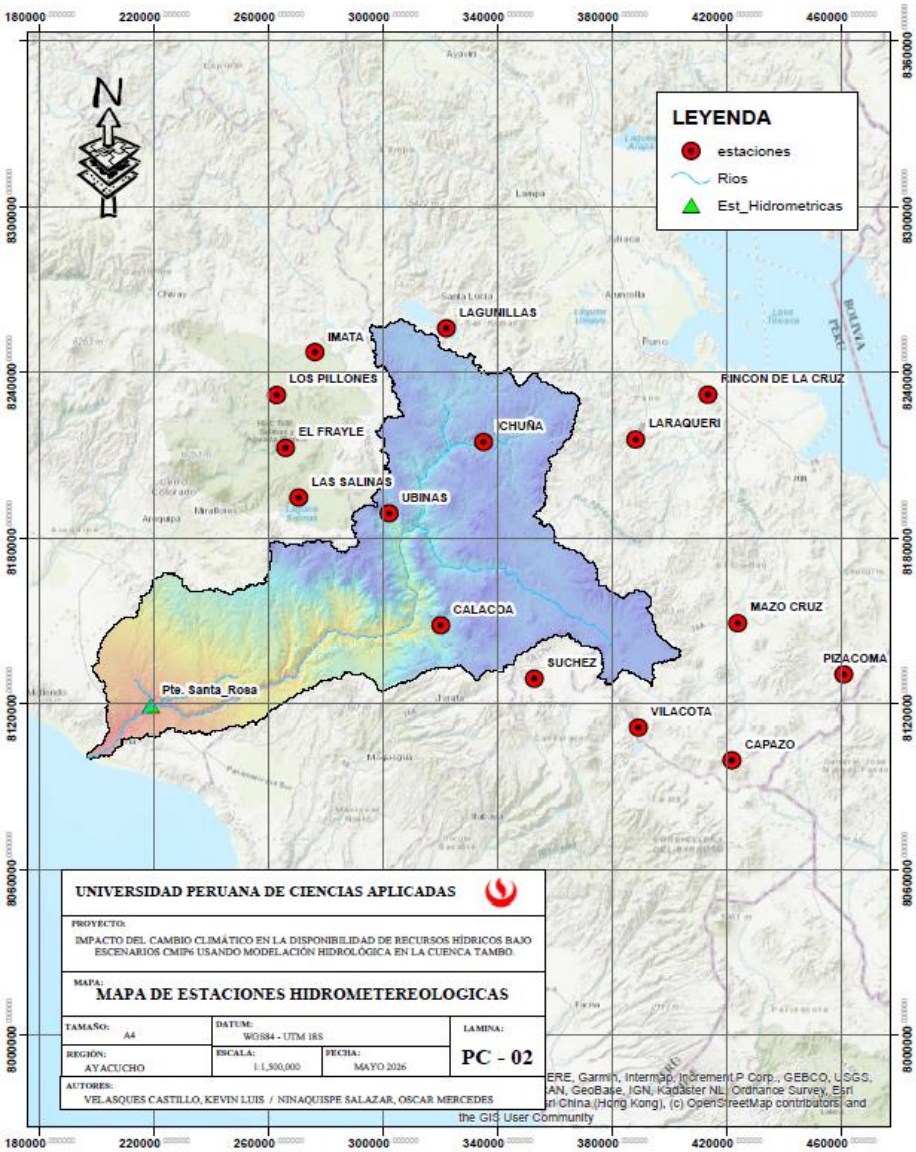
3.2.1 Datos Pluviométricos.

Las instituciones de SENAMHI y ANA en su página web nos brindan la información hidrometeorológica, la cuenca en estudio tiene la estación hidrométrica Santa Rosa y se recopila datos de 15 estaciones pluviales, donde se consiguen los datos de caudal y precipitaciones respectivamente.

En la Figura 3, se observa la ubicación de la estación hidrométrica Puente Santa Rosa y las 15 estaciones Pluviales.

Figura 3

Mapa estación hidrométrica y estaciones pluviométricas



3.2.2 Información de Temperatura

Se recopilo información del SENAMHI de las temperaturas promedio de los puntos de monitoreo cercanos a la zona de estudio.

En la tabla 2 se realiza el resumen de sus temperaturas promedios anuales

Tabla 2

Temperaturas promedio anuales

ESTACION	LAITITUD°	LONGITUD°	ALTITUD msnm	TEMPERATURA °C
Cabanillas	-15.6	-70.3	3885	9.34
Calacoa	-16.7	-70.7	3446	13.04
Capazo	-17.2	-69.7	4530	3.77
Carumas	-16.8	-70.7	3054	12.63
Chiguata	-16.4	-71.4	2902	12.36
Crucero Alto	-15.8	-70.9	4521	4.14
El Frayle	-16.2	-71.2	4131	4.78
Ichuña	-16.1	-70.5	3815	11.05
Imata	-15.8	-71.1	4475	2.24
Laraqueri	-16.1	-70.0	3933	7.67
Las Salinas	-16.3	-71.1	4378	4.40
Los Pillones	-16.0	-71.2	4455	2.22
Mañazo	-15.8	-70.3	3924	9.39
Mazo Cruz	-16.7	-69.7	3975	4.75
Puquina	-16.6	-71.2	3085	14.83
Rinco de la Cruz	-16.0	-69.8	3880	9.01
Santa Lucia	-15.7	-70.6	4034	6.33
Ubinas	-16.4	-70.9	3380	11.15

VILACOTA	-17.1	-70.0	4468	2.85

Observamos que la estación puquina tiene la mayor temperatura promedio de 14.83°C y la temperatura promedio menor la tiene la estación Los Pillones 2.22°C

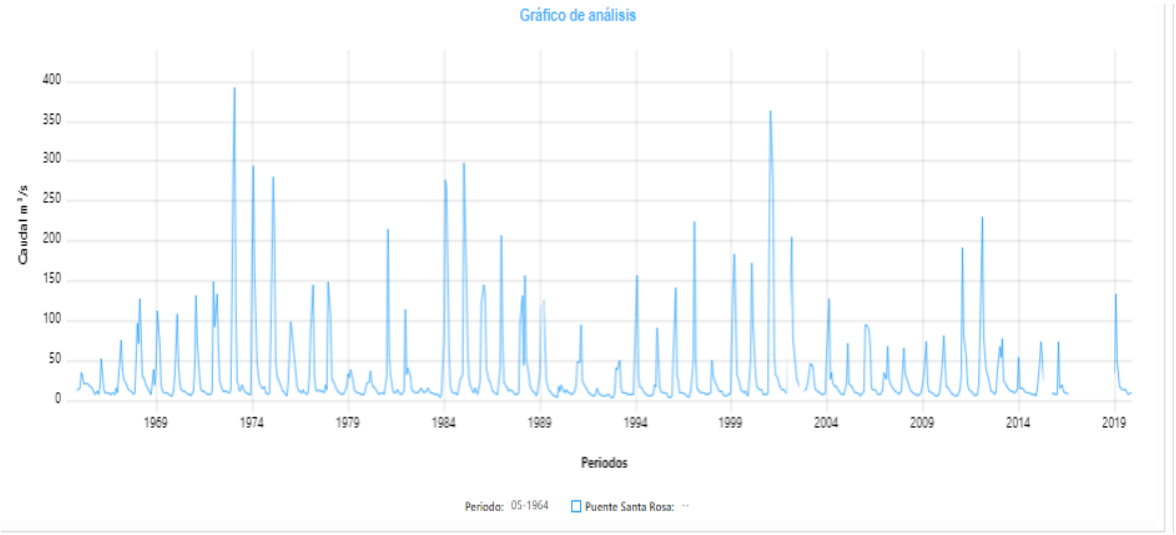
3.2.3 Información de Hidrométrica

Se realizo la descarga de la página de la Evaluación de Datos y Recursos Estadísticos del Agua - ANDREA para la estación hidrométrica Santa Rosa la cual con un registro histórico desde 1965 al 2019.

En la figura 4 se presentan los caudales registrados en la estación hidrométrica Puente Santa Rosa desde el año 1964 hasta 2019 y si tiene que en el año 1985 se obtuvo mayor caudal que fue de 296.34 m3/s y el menor fue para el año 1964 con 11.84 m3/s.

Figura 4

Hidrometereológica de caudales



Nota: Se descarga la figura de la página web de ANDREA

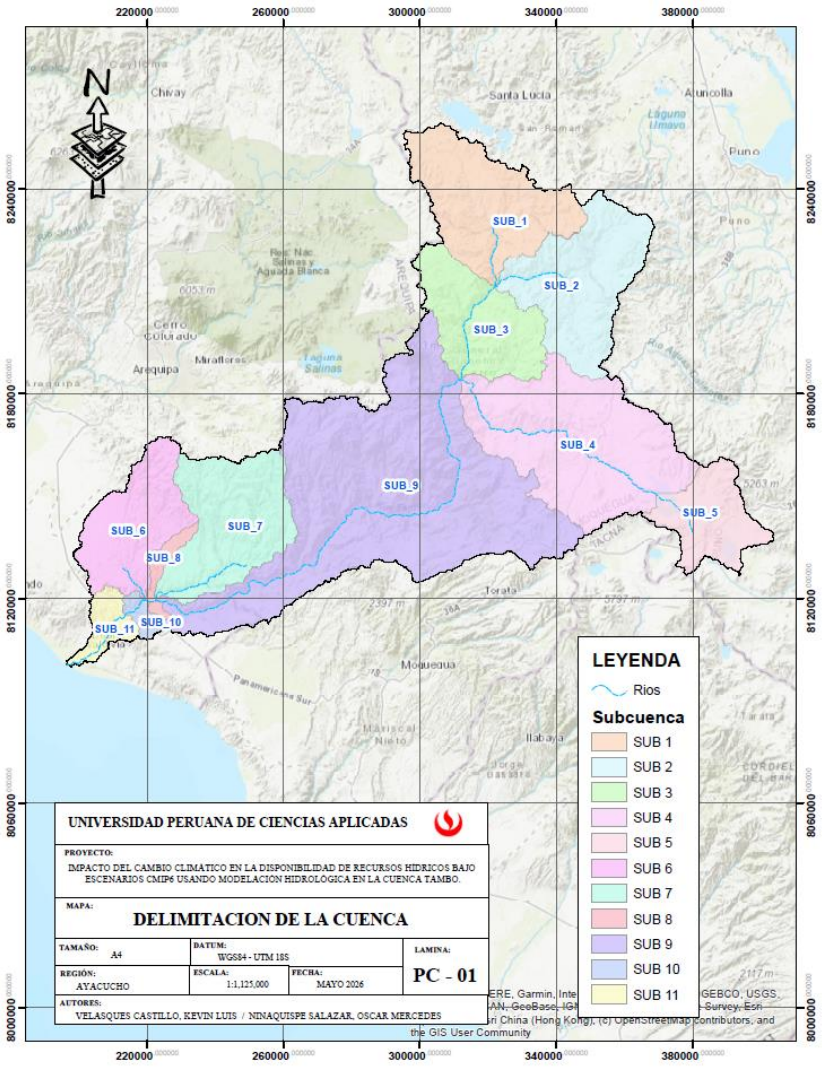
3.2.4 Delimitación de la Cuenca.

Se delimita la cuenca Tambo y internamente se delimita en 11 subcuencas, se realizo recopilando y uniendo imágenes satelitales ALOS PALSAR en resolución 12.5 x 12.5 metros en el software ArcGIS educativo, se complementó con la información hidrométrica y meteorológica obtenidos del Senamhi y ANA.

En la Figura 5, se delimita la cuenca Tambo y las 11 subcuencas en el programa ArcGIS educativo, teniendo en cuenda el Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución de 12.5x12.5m en la que se subdividió a la cuenca en 11 subcuencas representativas.

Figura 5

Delimitación de Cuenca Tambo



En la tabla 3 describimos los parámetros geomorfológicos de las subcuencas, Aquí podemos encontrar las áreas y perímetros de cada sub cuenca y ellas en conjunto forman la cuenca el Tambo.

Tabla 3

Parámetros Geomorfológicos de las sub cuencas

Sub Cuenca	Area (km)	Perimetro (km)	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevacion (msnm)
SUBCUECA 1	129195.83	285.51	-15.95	-70.69	4421.08
SUBCUECA 2	127973.02	278.95	-16.16	-70.43	4597.07
SUBCUECA 3	94420.26	239.65	-16.26	-70.71	4397.06
SUBCUECA 4	208836.48	346.87	-16.59	-70.44	4466.62
SUBCUECA 5	65171.12	200.30	-16.79	-70.08	4739.31
SUBCUECA 6	89582.36	241.80	-16.79	-71.66	1612.27
SUBCUECA 7	119736.25	262.70	-16.79	-71.40	2120.13
SUBCUECA 8	11806.75	128.68	-16.83	-71.52	1010.25
SUBCUECA 9	424289.16	684.33	-16.72	-70.97	3190.60
SUBCUECA 10	9674.15	75.77	-17.03	-71.64	626.45
SUBCUECA 11	21720.35	129.11	-17.06	-71.74	454.58

3.2.5 Regionalización

La cuenca Tambo se divide en 3 regiones

3.2.5.1 Region 1

La Región 1 abarca las estaciones pluviales de Pizacoma, Mazo Cruz, Capazo, Vilacota y Suchez, los años de cada estación son 59. Las dependencias de las estaciones y el vector se encuentran en los rangos 0.727 - 0.829.

Según se observa en las Figuras 6, 7 y 8, y en la Tabla 4, la información procesada refleja coherencia en su tendencia entre ellos y presentan quiebres moderados.

Figura 6

Precipitación total mensual documentada - Region 1

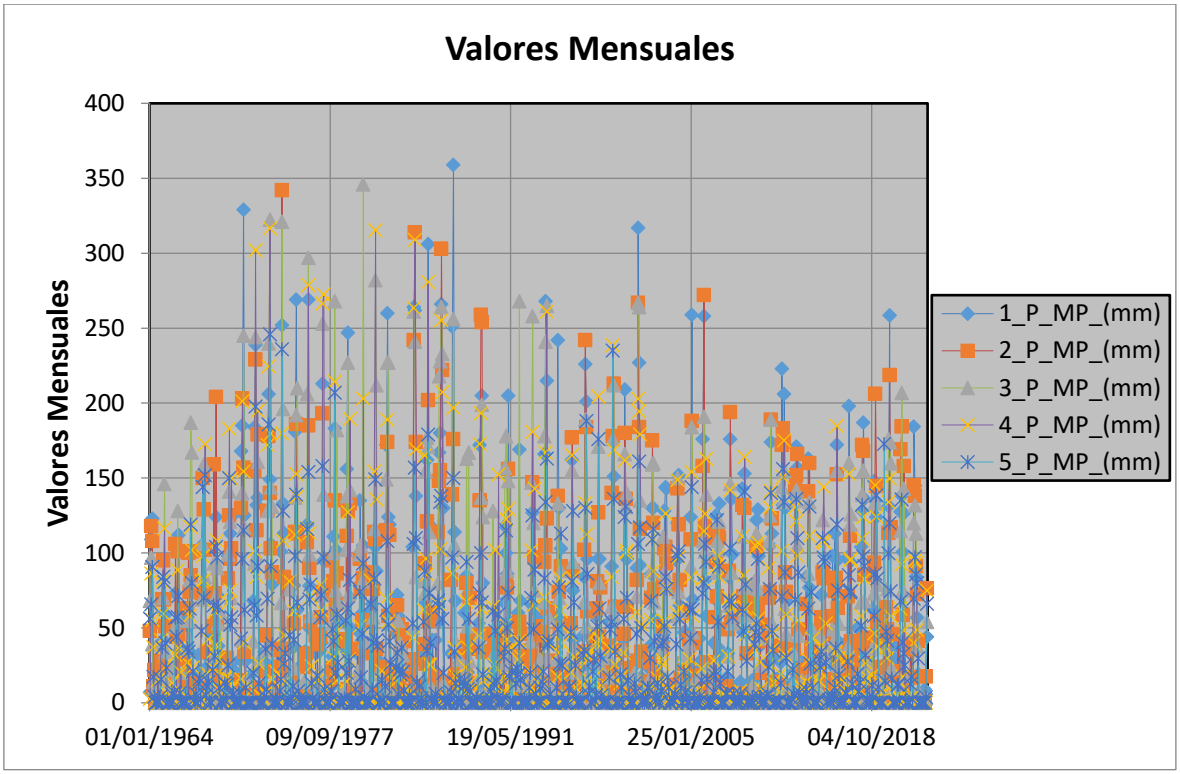


Tabla 4

Parámetros del vector Regional 1

REGION 1	N° AÑOS	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. / Vector
PIZACOMA	59	81.9	0.577	141.8	0.387	0.061	0.779
MAZO CRUZ	59	65.7	0.486	135.2	0.325	0.146	0.807
CAPAZO	59	73.8	0.487	151.4	0.352	0.074	0.77
VILACOTA	59	68.6	0.562	122.1	0.356	0.963	0.829
SUCHEZ	59	47	0.467	100.8	0.411	0.251	0.727

Figura 7

Índices anuales del vector y de las estaciones - Region 1

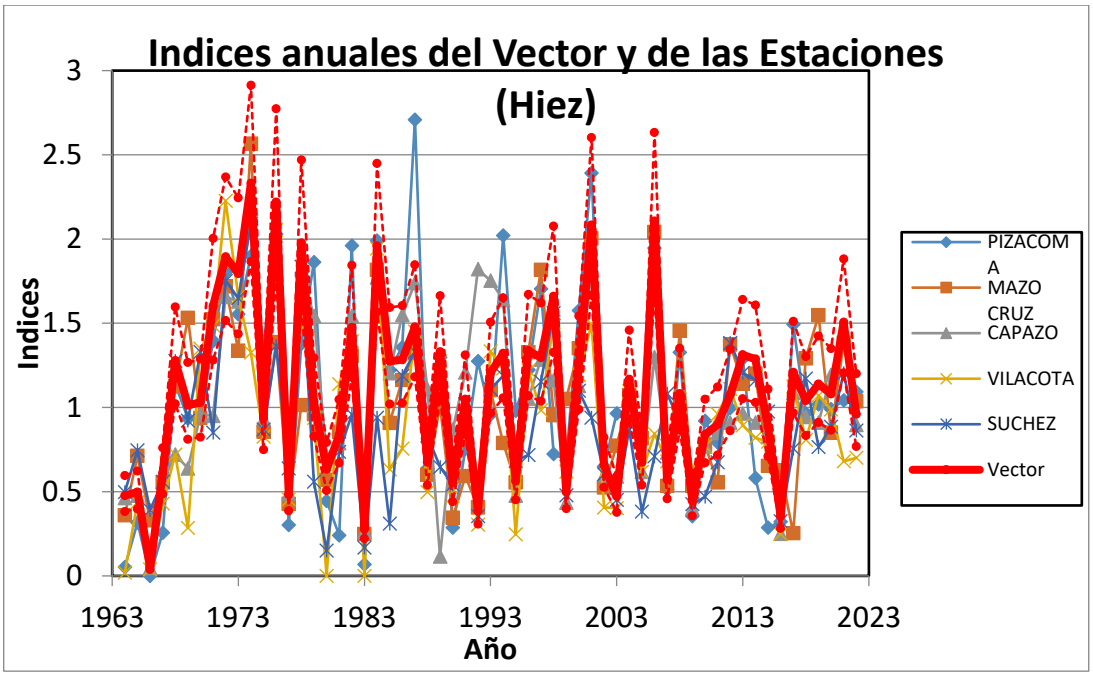
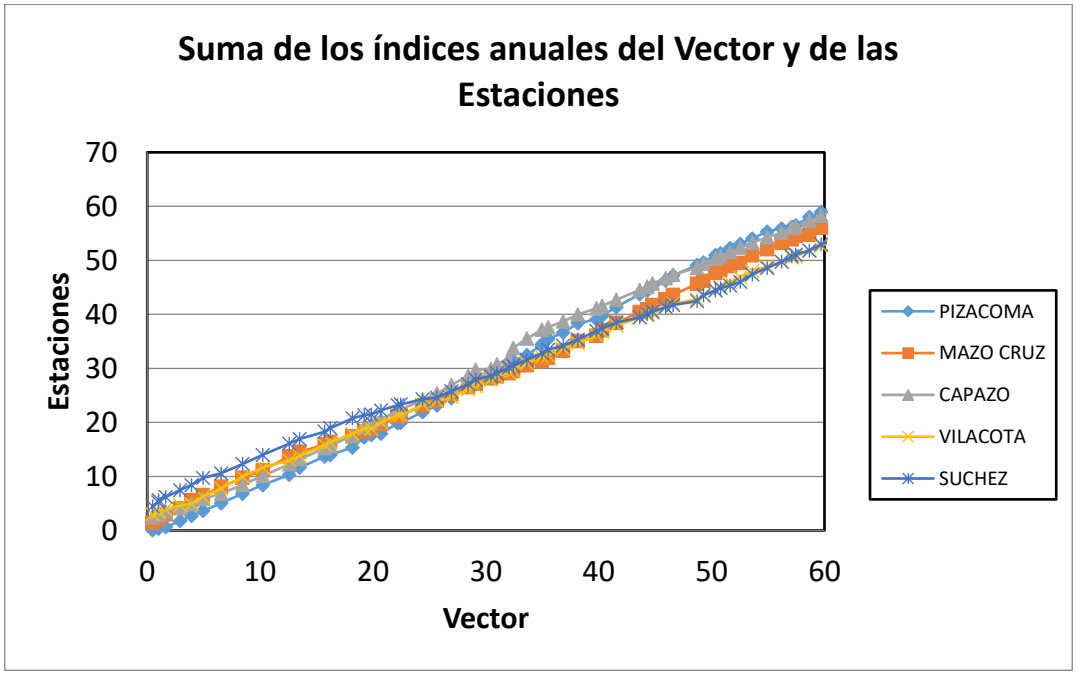


Figura 8

Índices anuales acumulados de las estaciones - Region 1



3.2.5.2 Region 2

La Region 2 abarca las estaciones pluviales de Calacoa, Ubinas, Ichuña, Yanque y Las Salinas, los años de cada estación son 59. Las vinculaciones de las estaciones y el vector se encuentran en los rangos 0.682 - 0.798.

Como se observa en las Figuras 9, 10 y 11, y se sintetiza en la Tabla 5, la información evaluada refleja homogeneidad en su patrón de distribución y presentan quiebres moderados.

Figura 9

Precipitación total mensual histórica - Region 2

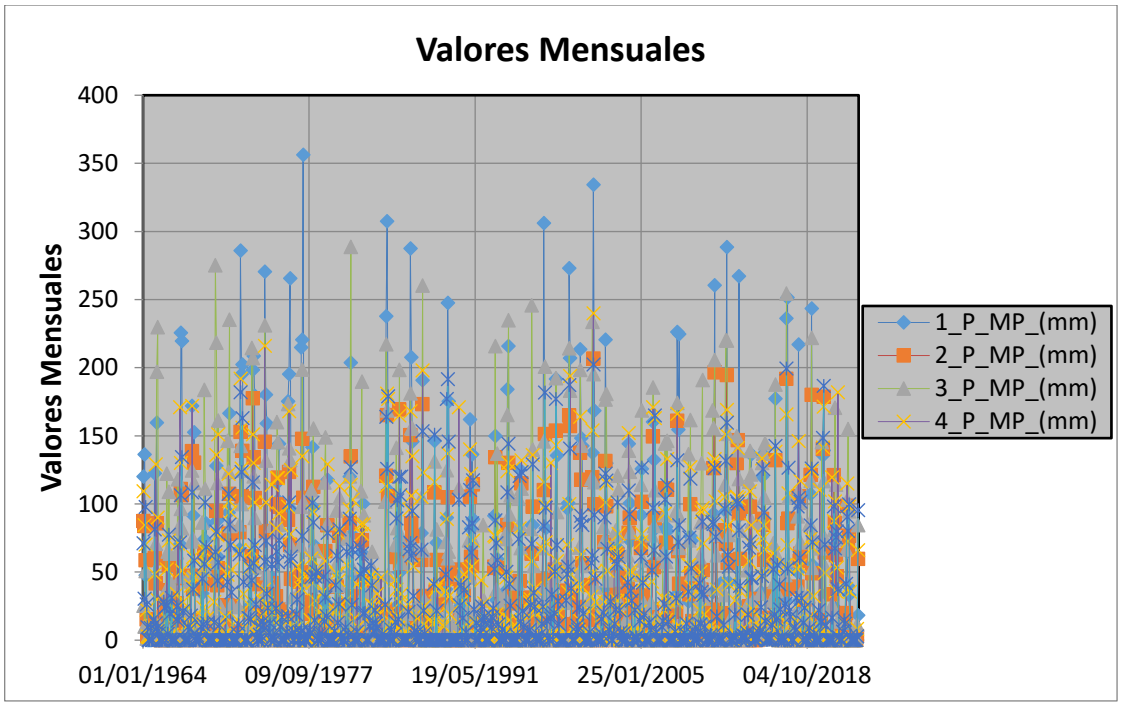


Tabla 5

Parámetros del vector Regional 2

REGION 2	N° AÑOS	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. / Vector
CALACOA	59	78.1	0.65	120.2	0.44	0.035	0.754
UBINAS	59	48.1	0.534	90.1	0.305	0.727	0.89
ICHUÑA	59	61.7	0.453	136.2	0.409	0.112	0.682
YANQUE	59	51.2	0.464	110.4	0.343	0.394	0.798
LAS SALINAS	59	46.7	0.551	84.8	0.399	0.295	0.748

Figura 10

Índices anuales del vector y de las estaciones - Region 2

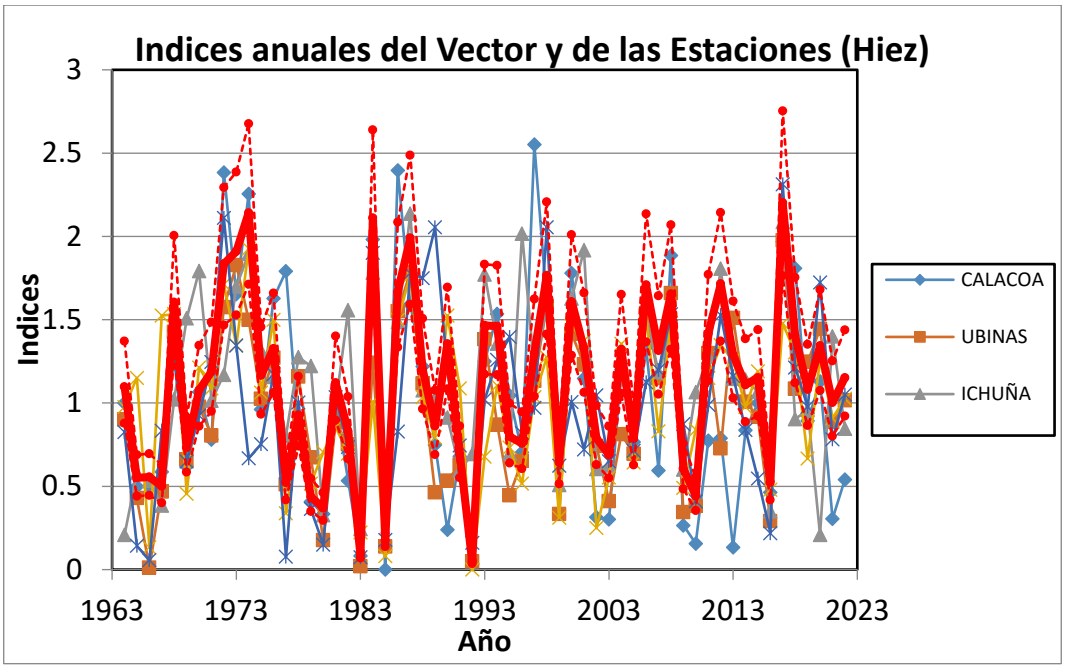
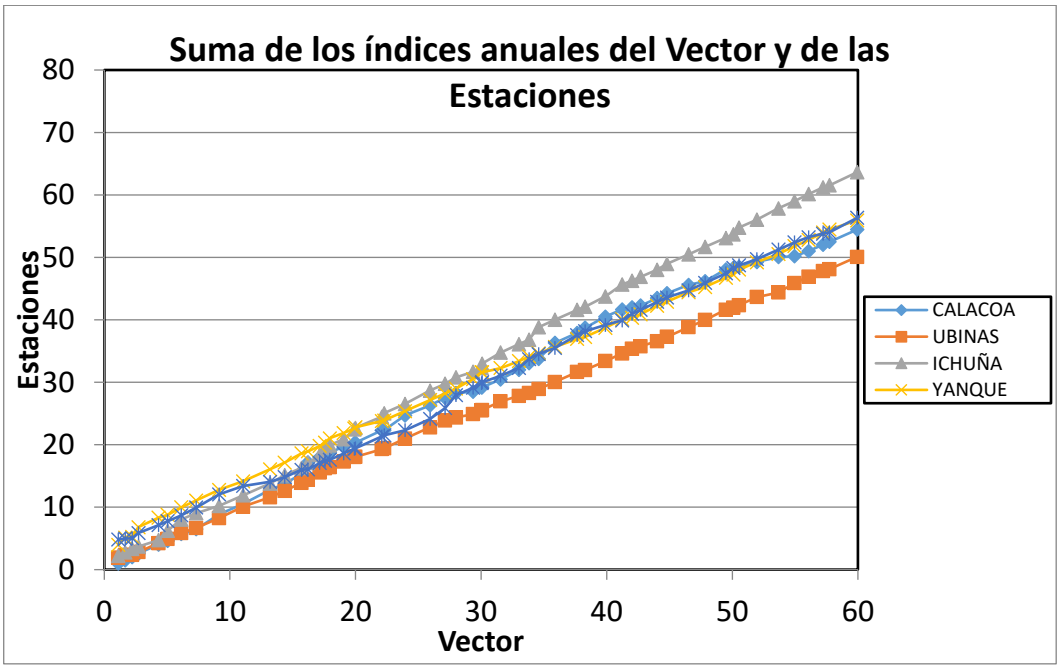


Figura 11

Índices anuales acumulados de las estaciones - Region 2



3.2.5.3 Region 3

La Region 3 abarca las estaciones pluviales de Laraqueri, Rincon de la Cruz, Los Pillones, Imata y Lagunillas, los años de cada estación son 59. Las correlaciones de las estaciones y el vector se sitúan en los rangos 0.73 - 0.865.

Se describen en las Figuras 12, 13 y 14; y en la Tabla 6, los datos en análisis tienen uniformidad en su comportamiento entre ellos y presentan quiebres moderados.

Figura 12

Precipitación total mensual histórica – Región 3

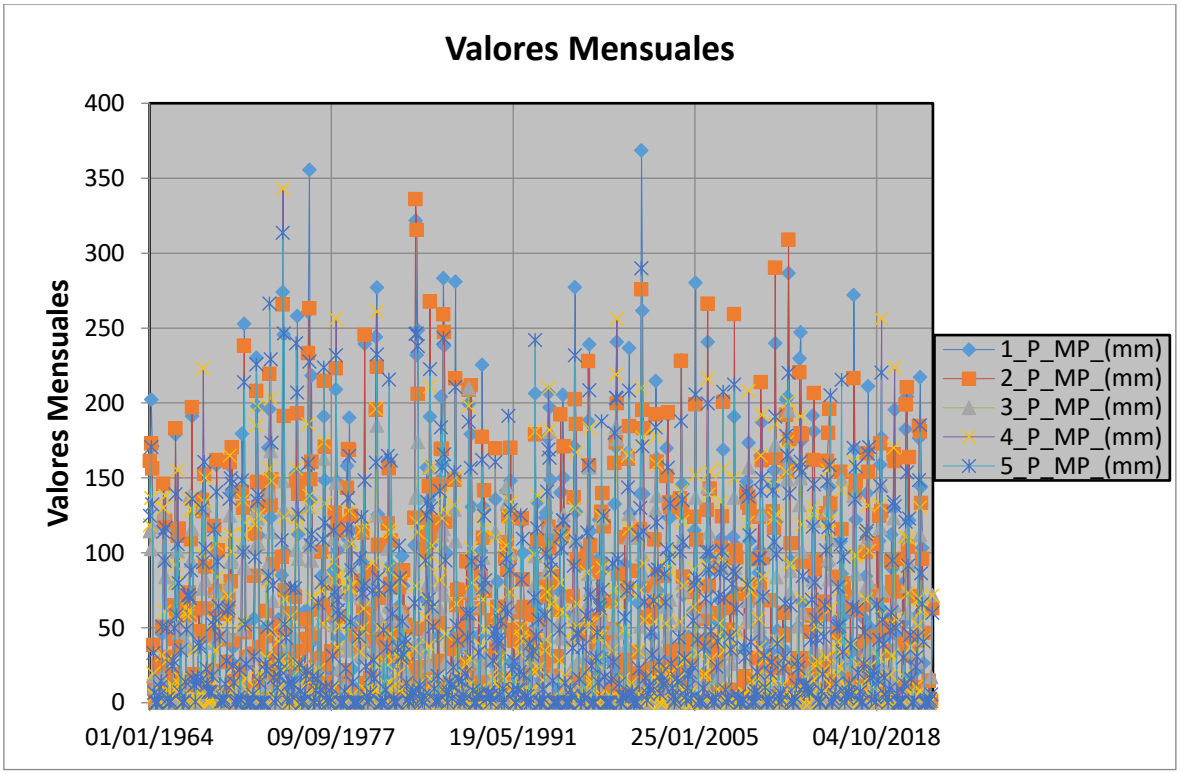


Tabla 6

Parámetros del vector Regional 3

REGION 3	N° AÑOS	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. / Vector
LARAQUERI	59	69.4	0.397	174.8	0.196	0.131	0.865
RINCON DE LA CRUZ	59	56.5	0.332	170.1	0.177	0.19	0.857
LOS PILLONES	59	40.1	0.396	101.4	0.271	0.103	0.73
IMATA	59	57.4	0.429	133.9	0.268	0.102	0.772
LAGUNILLAS	59	59.9	0.382	157	0.202	0.001	0.857

Figura 13

Índices anuales del vector y de las estaciones - Region 3

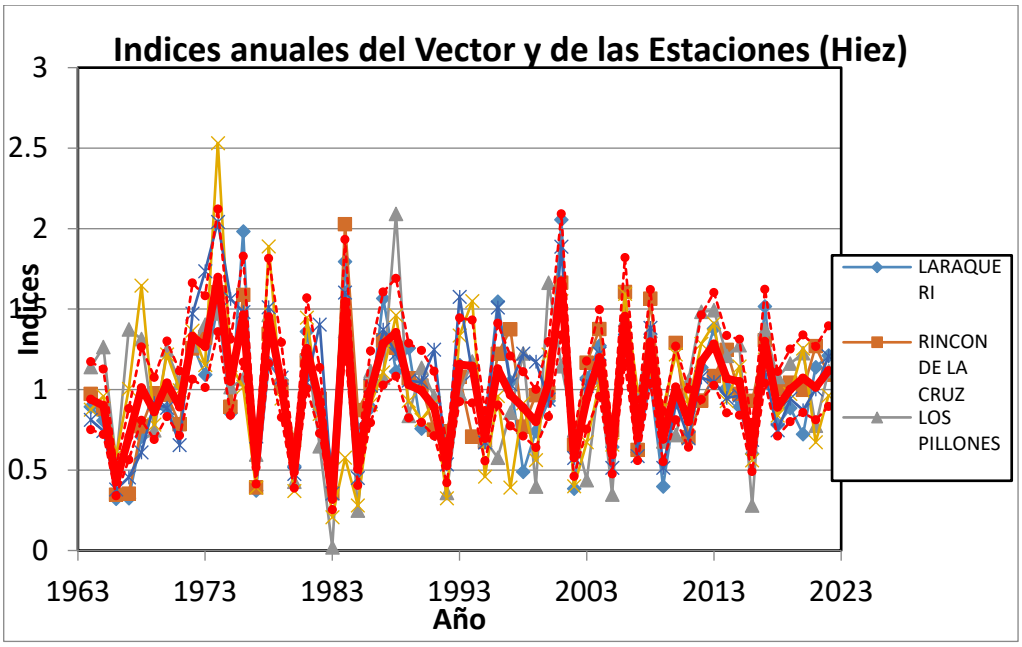
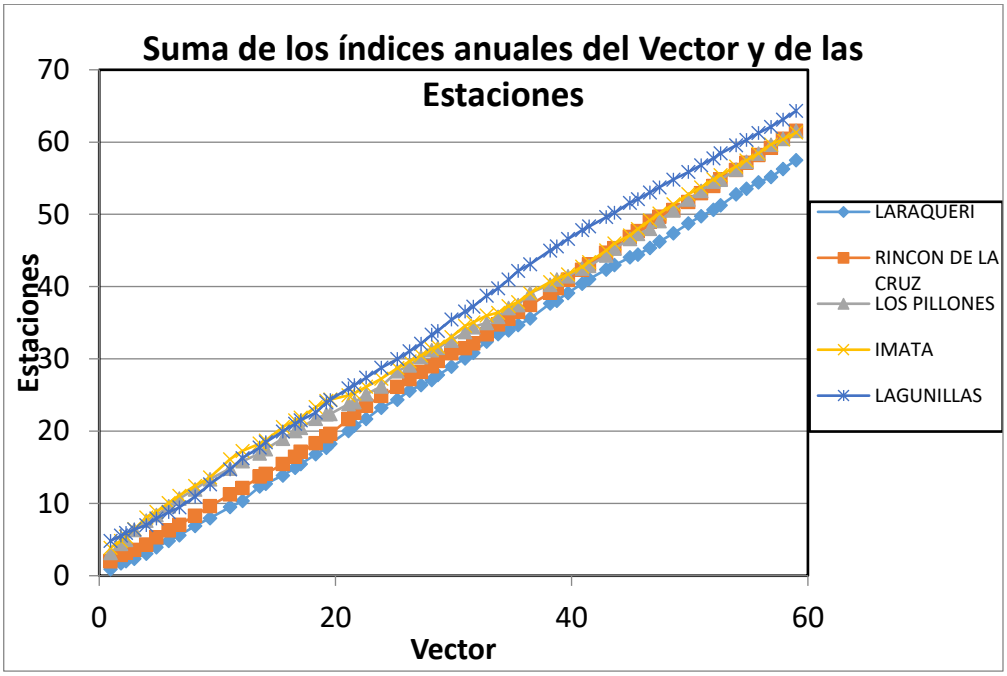


Figura 14

Índices anuales acumulados de las estaciones - Region 3



3.2.6 Análisis de consistencia

Constituye una fase fundamental en la revisión de la integridad de los datos recopilados en las estaciones hidrométricas. Esta etapa implica la revisión de la información con el propósito de identificar errores y valores atípicos que puedan comprometer la calidad y exactitud de los datos.

Se realizo el tratamiento de la precipitación es decir se ejecutó la completación de datos con el software HEC4, luego se utilizó el software TREND y finalmente determinamos que las series son consistentes.

3.2.6.1 Completacion de datos

Mediante el uso del software HEC-4 se completaron los registros de precipitación en aquellas zonas donde la información disponible era insuficiente o presentaba datos faltantes.

En la tabla 7 tenemos el cuadro resumen promedio de precipitaciones completadas de todos los meses desde el año 1964 al año 2022, donde los meses de mayor precipitación son desde diciembre hasta febrero teniendo hasta un promedio de precipitación de 174.79mm máximo en la estación Laraqueri y los meses entre mayo a julio tenemos las precipitaciones promedio mas bajas, observando como la precipitación mínima 1.06mm en la estación Calacoa.

Tabla 7

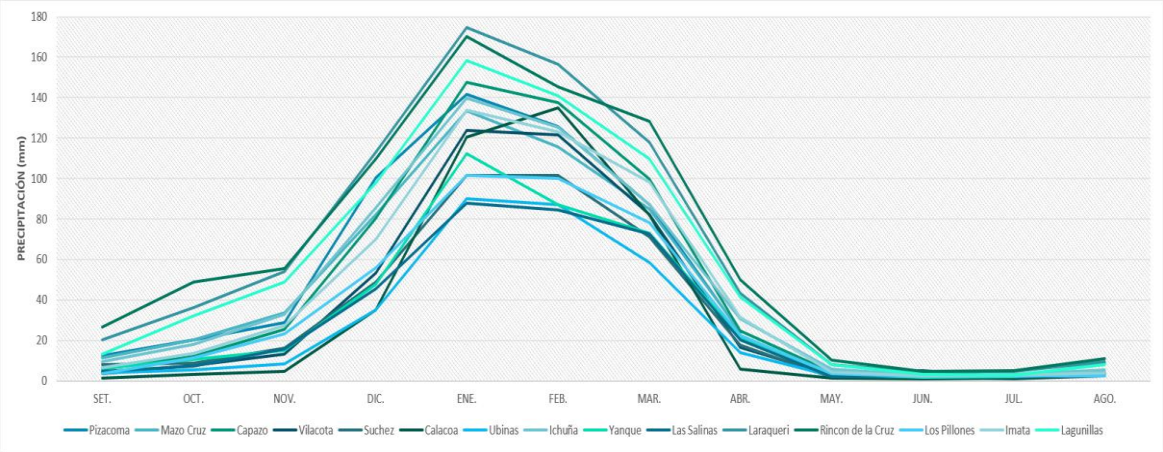
Precipitación total mensual de estaciones completadas

ESTACIÓN	ALTITUD msnm	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.
Pizacoma	3930.0	141.46	125.51	87.22	23.83	4.65	4.99	3.31	9.55	12.64	20.33	28.70	100.44
Mazo Cruz	4003.0	133.35	115.53	84.91	24.50	5.13	2.26	2.24	7.40	11.32	20.41	33.53	82.31
Capazo	4530.0	147.67	137.56	99.61	24.53	4.12	2.82	2.35	3.93	5.63	11.93	25.60	80.36
Vilacota	4468.0	123.74	121.63	82.25	16.36	2.64	5.11	1.80	4.04	3.59	7.75	13.18	53.11
Suchez	4452.0	101.51	101.40	71.15	17.80	1.54	2.11	1.09	2.51	8.04	8.76	16.17	48.68
Calacoa	3260.0	120.30	134.98	81.95	5.62	1.47	1.06	1.17	3.25	1.43	3.20	4.56	35.12
Ubinas	3380.0	89.87	86.95	58.35	13.97	2.33	2.13	1.95	3.29	3.91	5.55	8.40	35.00
Ichuña	3756.0	139.66	125.10	87.11	30.62	5.95	2.62	3.02	5.38	9.48	18.01	32.79	85.64
Yanque	2650.0	112.39	87.04	72.86	21.87	3.42	1.84	2.01	8.57	6.09	10.50	15.02	47.88
Las Salinas	4378.0	87.88	84.47	72.70	20.19	2.07	2.89	2.25	2.98	4.50	7.39	15.95	45.35
Laraqueri	3970.0	174.79	156.51	117.86	43.31	8.05	4.40	4.67	9.55	20.13	36.20	53.86	113.19
Rincon de la Cruz	3835.0	170.14	145.51	128.24	49.98	10.16	4.48	5.15	10.89	26.40	48.79	55.45	109.55
Los Pillones	4455.0	101.38	100.14	78.06	22.51	3.39	2.03	2.37	2.49	3.50	11.28	23.32	55.92
Imata	4475.0	133.93	123.24	98.16	31.26	4.20	2.34	2.77	3.95	6.46	13.63	27.44	70.03
Lagunillas	4200.0	158.42	140.81	109.66	41.43	8.05	3.32	2.86	8.17	13.28	31.98	48.98	97.73

En la figura 15, se presenta en un histograma de las precipitaciones completadas donde se observa que las precipitaciones en los meses de mayo a julio prácticamente son cero.

Figura 15

Histograma de precipitación cronológica de las estaciones y su promedio desde año 1964 al año 2022



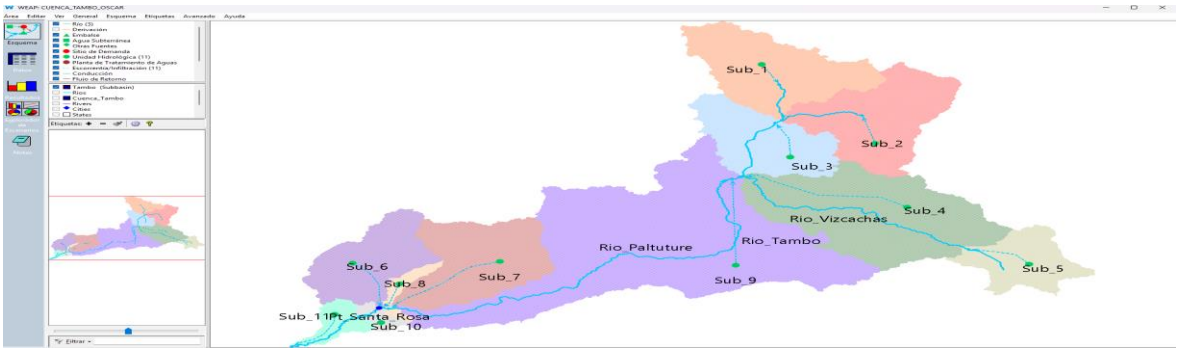
3.2.7 Modelamiento Hidrológico

Se realizó el modelamiento hidrológico en el software en WEAP se utilizó la delimitación de la cuenca, luego se utilizó datos de cobertura de suelo asimismo se insertó datos hidrometereológicos reales en cada subcuenca y finalmente se utilizó la estación hidrométrica Puente Santa Rosa para calibrar y validar el modelo hidrológico.

En la figura 16 se observa el modelamiento en software WEAP según la delimitación con sus 11 subcuencas y se puede observar cada sub cuenca empezando la enumeración desde la más altitud hacia las más baja a nivel del mar.

Figura 16

Modelamiento de cuenca tambo en WEAP



3.3 Validación del Proyecto

3.3.1 Calibración 60% y Validación 40%

Se tiene una serie histórica de caudales de observados desde el año 1965 al 2016 en el centro de monitoreo Puente Santa Rosa para el cual se utilizó el 60% para la calibración y 40% para la validación, se determina los porcentajes por lo establecido en el manual para la elaboración de estudios de hidrología en proyecto de infraestructura hidráulica de riego.

En la figura 17 se observa la división de la serie de tiempo en periodos de calibración y validación publicado en el manual en el año 2025 (MA N° 009-2025-MIDAGRID/DGIHR-DNIHR)

Figura 17

División de la serie de tiempo en periodos de calibración y validación



Nota: Se tomo la figura del manual para la elaboración de estudios de hidrología en proyecto de infraestructura hidráulica de riego (MA N° 009-2025-MIDAGRID/DGIHR-DNIHR)

Para la calibración y validación se tienen los siguientes indicadores que nuestro modelo debe estar dentro los rangos indicados.

El valor ideal de Nash NSE es 1, lo cual indica una perfecta correlación entre los datos simulados y observados. Un valor de 0 indica que las simulaciones no resultan superiores a la utilización del promedio de los datos observados. En términos generales, se considera satisfactorio un modelo hidrológico si el NSE supera los 0.50.

El valor óptimo de PBIAS es 0, indicando una perfecta correlación entre los datos observados y simulados. Los valores positivos de PBIAS indican una subestimación del

modelo, en tanto que los valores negativos señalan una sobreestimación. Se considera satisfactorio un modelo hidrológico si la PBIAS es inferior a ±25 % para los caudales.

El valor ideal de RMSE es 0, lo cual indica una perfecta correlación entre los datos observados y simulados. No establece un límite estándar; sin embargo, a medida que el RMSE se reduce, el ajuste del modelo se optimiza. Las unidades del RMSE se corresponden con las de la variable objeto de evaluación.

El coeficiente de correlación puede tomar valores entre 0<r<1: a mayor valor de r, mejor ajuste.

3.3.1.1 Calibración para validación del proyecto

Se desarrollo en el periodo de 31 años desde 1965 a 1995 como se observa en la figura 18.

En la figura 18 para la calibración se observa que tenemos como resultado los indicadores un Nash año: 0.96, Nash mes: 0.63, PBIAS (mes y año): 1.67%, RMSE (año): 6.49 y un Coeficiente de correlación (r): 0.75.

De acuerdo a nuestros indicadores un Nash ideal es 1 y satisfactorio es 0.50, en nuestro resultado obtenemos 0.96 por tanto estamos muy cerca de lo ideal.

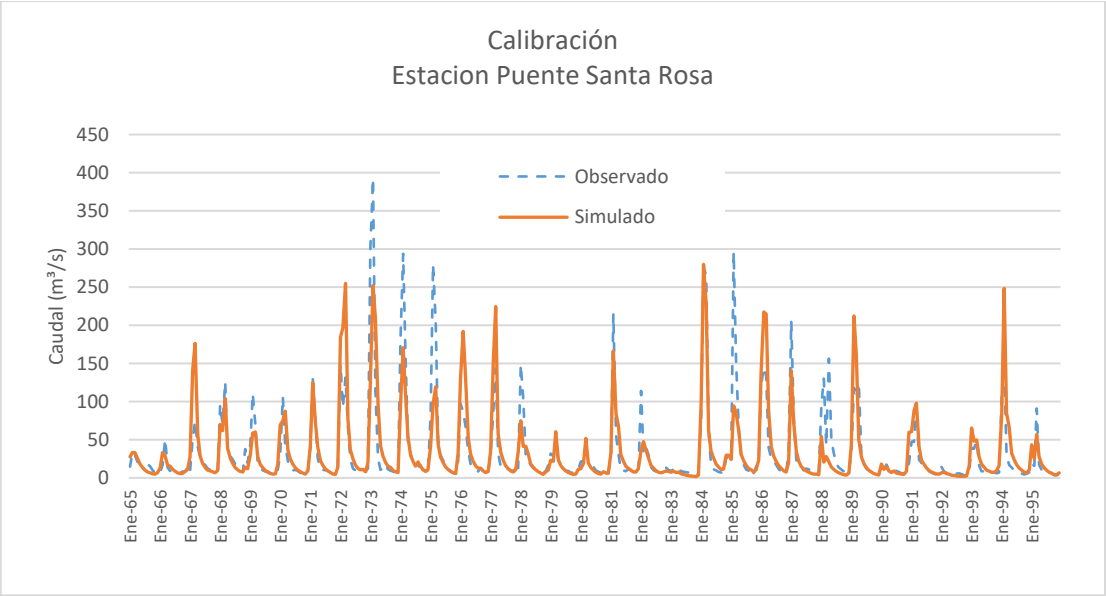
De acuerdo a nuestros indicadores un PBIAS optimo es 0 y satisfactorio +- 25%, en nuestro resultado obtenemos 1.67% por tanto estamos dentro del parámetro permitido.

De acuerdo a nuestros indicadores un RMSE ideal es 0, en nuestro resultado obtenemos 6.49 estando dentro del parámetro permitido.

Según nuestros indicadores El coeficiente de correlación puede tomar valores entre 0<r<1: a mayor valor de r, mejor ajuste, en nuestro estudio obtenemos 0.75 estando en dentro del rango permitido.

Figura 18

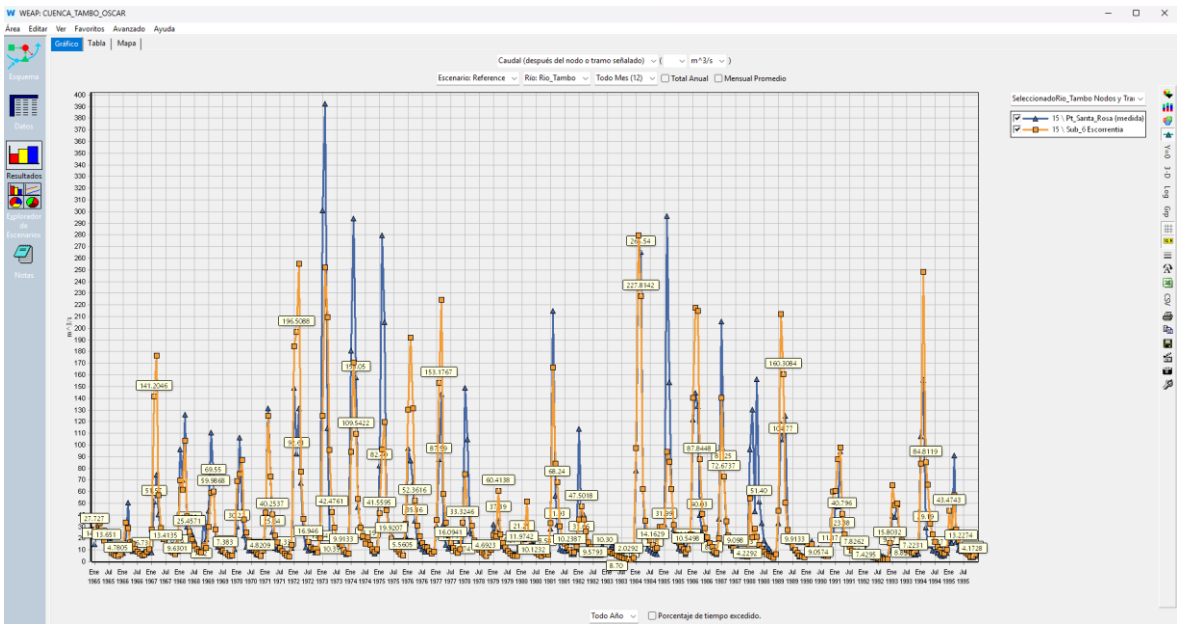
Calibración de estación Puente Santa Rosa



En la figura 19 se observa el diagrama de calibración en software WEAP.

Figura 19

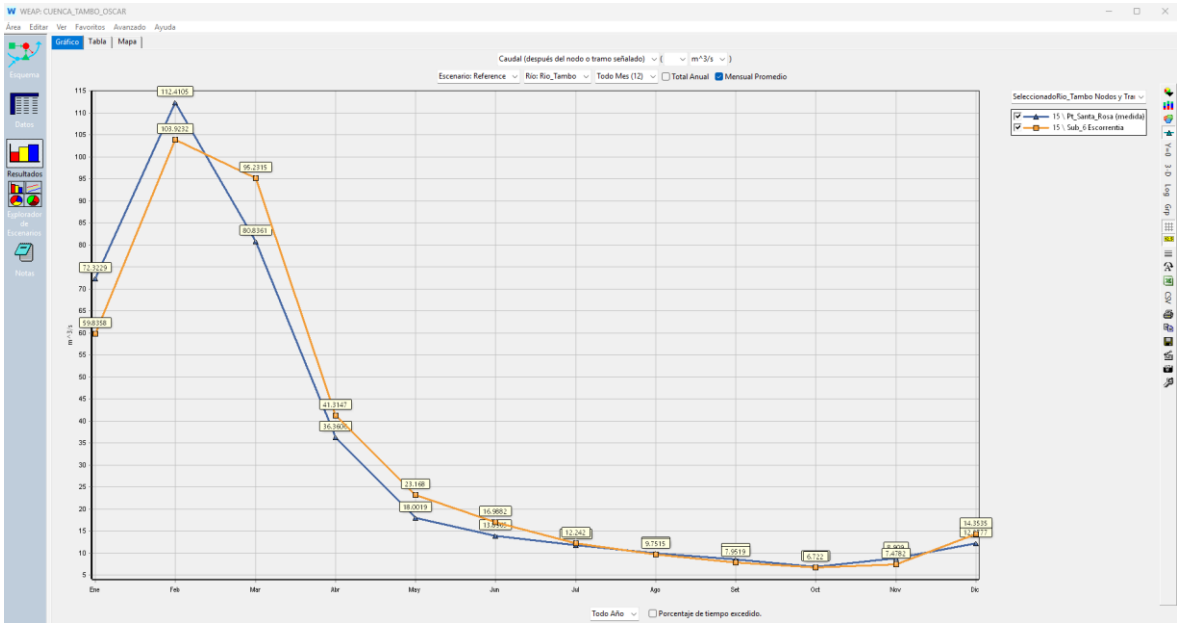
Calibración anual en software WEAP estación Puente Santa Rosa



En la figura 20 se observa el diagrama de calibración mensual en software WEAP.

Figura 20

Calibración mensual en software estación Puente Santa Rosa



3.3.1.2 Validación para validación del proyecto

Se desarrollo en el periodo de 21 años desde 1996 a 2016 como se observa en la figura 21.

En la figura 21 para la validación se observa como resultado los indicadores un Nash año: 0.90, Nash mes: 0.73, PBIAS (mes y año): 19.08%, RMSE (año): 10.15 y un Coeficiente de correlación (r): 0.87.

De acuerdo a nuestros indicadores un Nash ideal es 1 y satisfactorio es 0.50, en nuestro resultado obtenemos 0.90 por tanto estamos muy cerca de lo ideal.

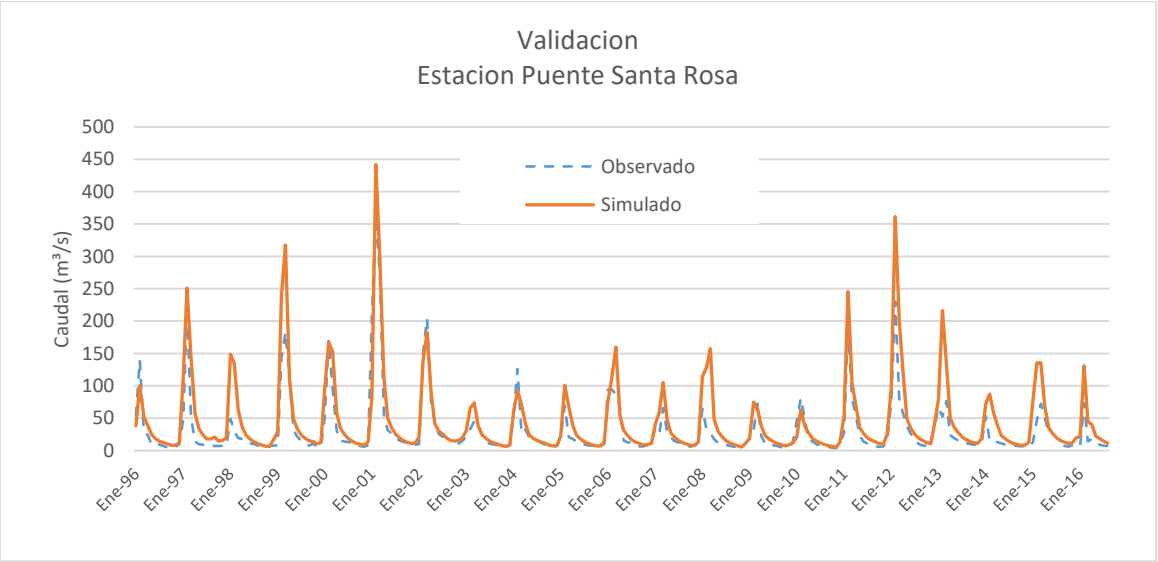
De acuerdo a nuestros indicadores un PBIAS optimo es 0 y satisfactorio +- 25%, en nuestro resultado obtenemos 19.08% por tanto estamos dentro del parámetro permitido.

De acuerdo a nuestros indicadores un RMSE ideal es 0, en nuestro resultado obtenemos 10.15 estando dentro del parámetro permitido.

Según nuestros indicadores El coeficiente de correlación puede tomar valores entre 0<r<1: a mayor valor de r, mejor ajuste, en nuestro estudio obtenemos 0.87 estando en dentro del rango permitido.

Figura 21

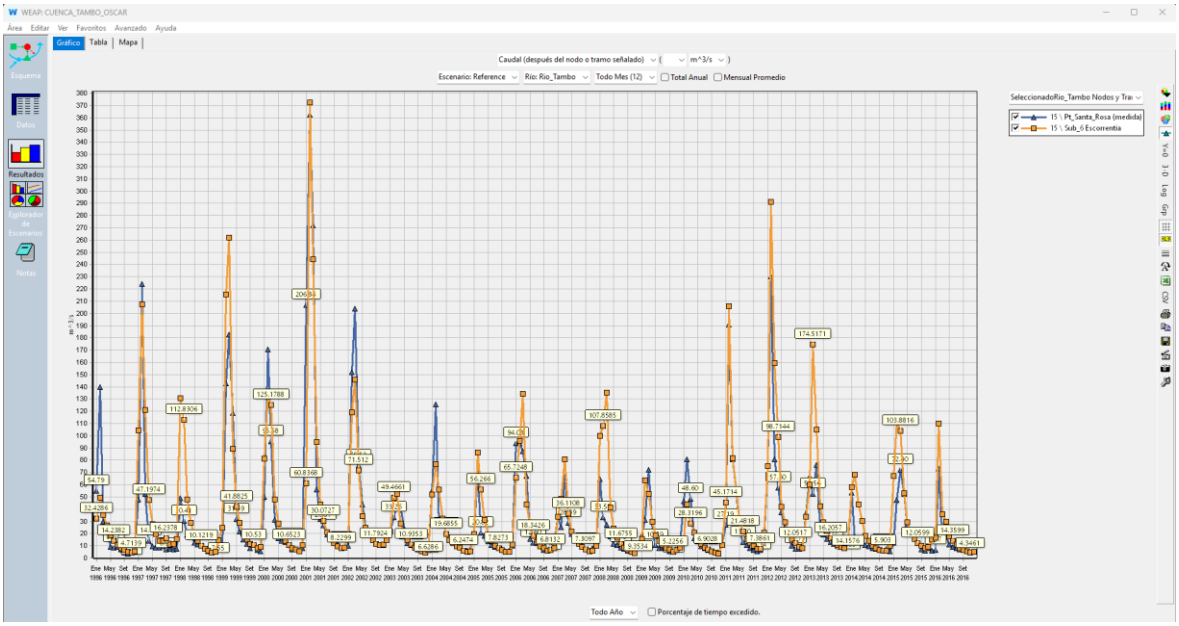
Validación de estación Puente Santa Rosa



En la figura 22 se observa el diagrama de validación en software WEAP.

Figura 22

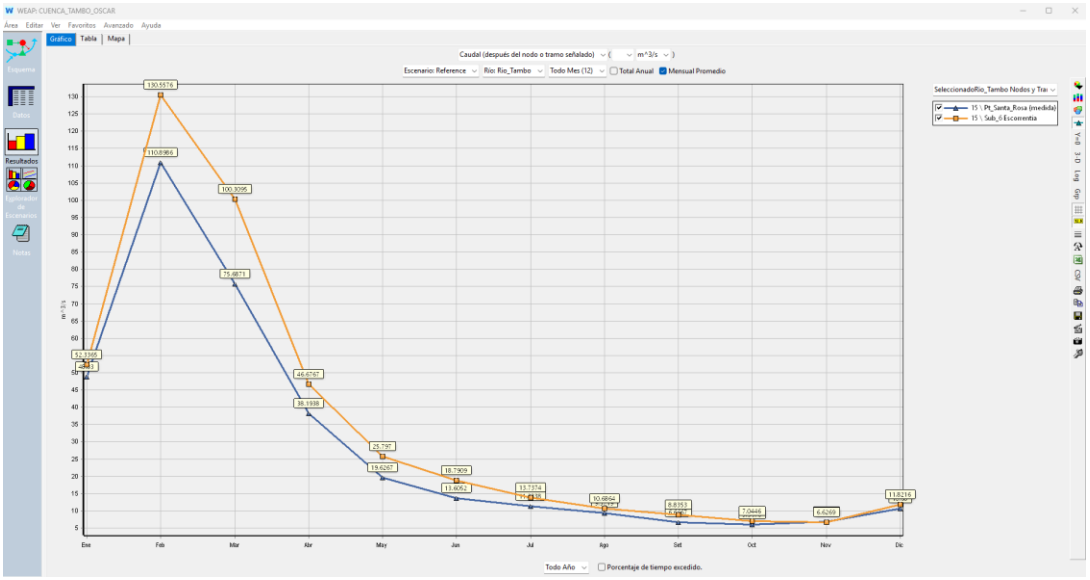
Validación Anual en software WEAP estación Puente Santa Rosa



En la figura 23 se observa el diagrama de validación mensual en software WEAP.

Figura 23

Validación Mensual en Software estación Puente Santa Rosa



3.3.2 Calibración 70% y Validación 30%

Se tiene una serie histórica de caudales de observados desde el año 1965 al 2016 en el centro de monitoreo Puente Santa Rosa para el cual también se realiza los porcentajes del 70% para la calibración y 30% para la validación.

En la figura 24 para la calibración se observa que tenemos como resultado los indicadores un Nash año: 0.96, Nash mes: 0.63, PBIAS (mes y año): 5.86%, RMSE (año): 6.49 y un Coeficiente de correlación (r): 0.75.

De acuerdo a nuestros indicadores un Nash ideal es 1 y satisfactorio es 0.50, en nuestro resultado obtenemos 0.96 por tanto estamos muy cerca de lo ideal.

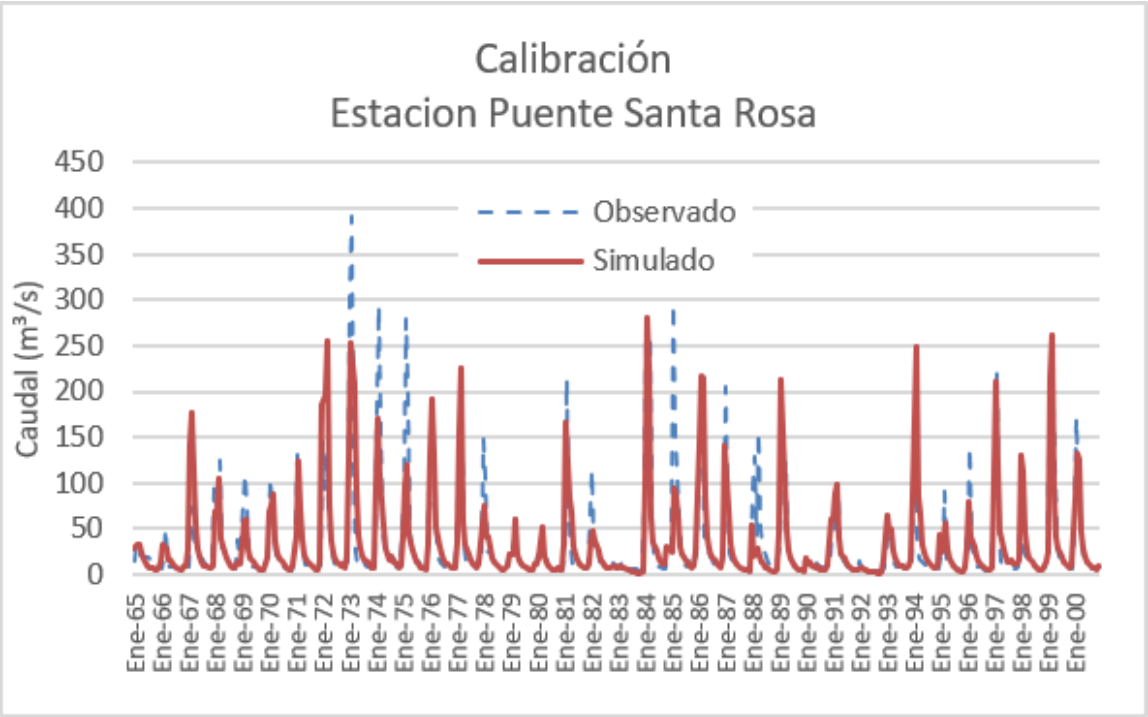
De acuerdo a nuestros indicadores un PBIAS optimo es 0 y satisfactorio +- 25%, en nuestro resultado obtenemos 5.86% por tanto estamos dentro del parámetro permitido.

De acuerdo a nuestros indicadores un RMSE ideal es 0, en nuestro resultado obtenemos 6.49 estando dentro del parámetro permitido.

Según nuestros indicadores El coeficiente de correlación puede tomar valores entre 0<r<1: a mayor valor de r, mejor ajuste, en nuestro estudio obtenemos 0.75 estando en dentro del rango permitido

Figura 24

Calibración de estación Puente Santa Rosa



En la figura 25 para la validación se observa que tenemos como resultado los indicadores un Nash año: 0.89, Nash mes: 0.75, PBIAS (mes y año): 14.59%, RMSE (año): 9.86 y un Coeficiente de correlación (r): 0.87.

De acuerdo a nuestros indicadores un Nash ideal es 1 y satisfactorio es 0.50, en nuestro resultado obtenemos 0.89 por tanto estamos muy cerca de lo ideal.

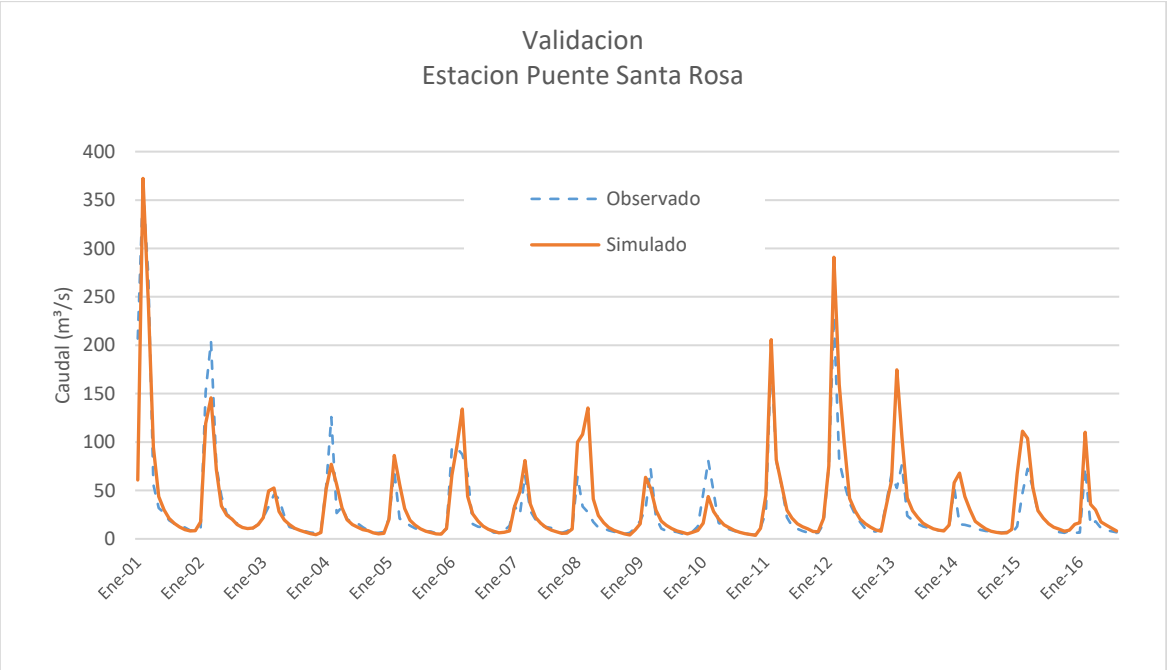
De acuerdo a nuestros indicadores un PBIAS optimo es 0 y satisfactorio +- 25%, en nuestro resultado obtenemos 14.59% por tanto estamos dentro del parámetro permitido.

De acuerdo a nuestros indicadores un RMSE ideal es 0, en nuestro resultado obtenemos 9.86 estando dentro del parámetro permitido.

Según nuestros indicadores El coeficiente de correlación puede tomar valores entre 0<r<1: a mayor valor de r, mejor ajuste, en nuestro estudio obtenemos 0.87 estando en dentro del rango permitido

Figura 25

Validación de estación Puente Santa Rosa



3.4 Descarga de Escenarios climáticos SSPS2-4.5 y SSPS5-8.5

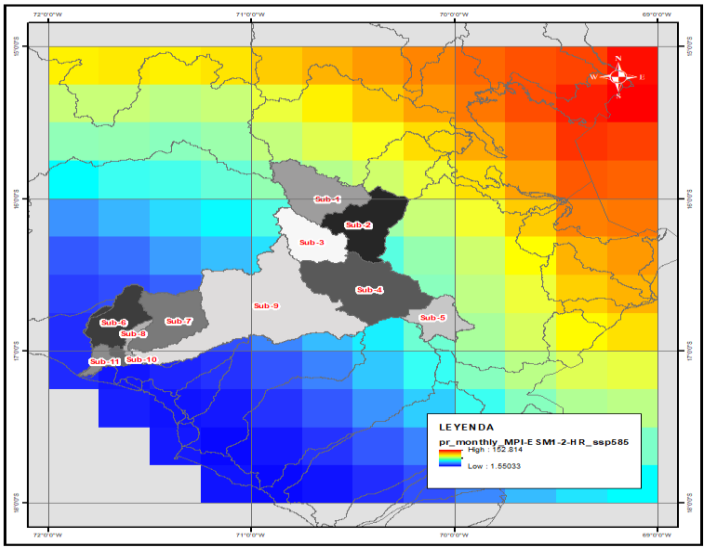
Se realizó la descarga de los Modelos Globales de Circulación (GCM): CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR para los escenarios climáticos Ssp2-4.5 y Ssp5-8.5 de las variables meteorológicas como precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. La descarga se realizo de la pagina https://ds.nccs.nasa.gov/thredds/catalog/AMES/NEX/GDDP-CMIP6/catalog.html.

Se descarga la información del CMIP6 siendo esta la data mas actualizada de IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) en los GCM (Modelos Climáticos Globales), esta data parte desde al año 2006 hasta 2015, estando en elaboración y revisión otra data actualizada que aun no esta al uso global, se menciona que antes del CMIP6, ha estado la data del CIMP5 que tenia datos actualizados hasta el 2005, por ello ya esta versión es poco aplicable a las investigaciones de este tipo la tener el CIMP6 como la versión mas actualizada.

En la figura 26 se observa las precipitaciones descargadas donde se obtiene que la precipitación para enero del 2015 fluctúa entre 1.55 a 152.81 mm para el Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP5-8.5.

Figura 26

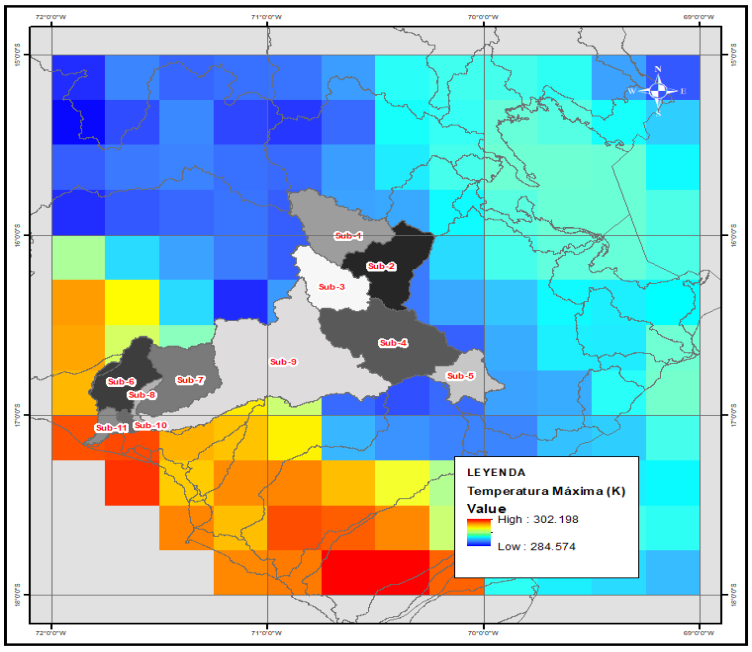
Precipitación(mm) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP5-8.5



En la figura 27 se observa las temperaturas máximas descargadas donde se obtiene que la temperatura máxima para enero del 2015 fluctúa entre 11.42°C a 29.05°C para el Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP5-8.5.

Figura 27

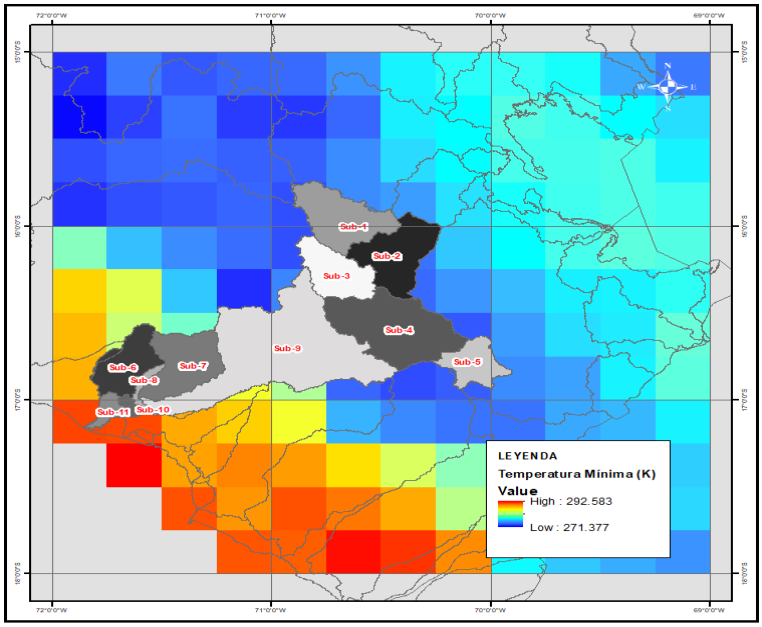
Temperatura Máxima (K) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP5-8.5



En la figura 28 se observa las temperaturas mínimas descargadas donde se obtiene que la temperatura minina para enero del 2015 fluctúa entre -1.77°C a 19.43°C para el Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP5-8.5.

Figura 28

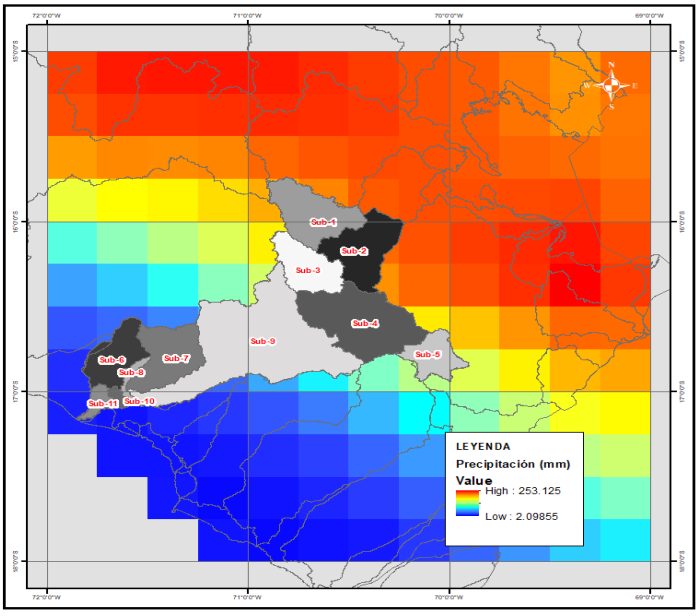
Temperatura Mínima (K) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP5-8.5



En la figura 29 se observa las precipitaciones descargadas donde se obtiene que la precipitación para enero del 2015 fluctúa entre 2.10 a 253.13 mm para el Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP2-4.5.

Figura 29

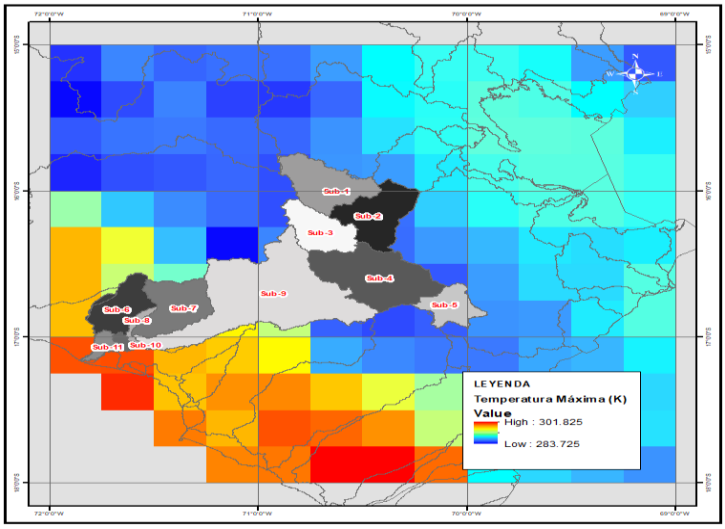
Precipitación(mm) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP2-4.5



En la figura 30 se observa las temperaturas máximas descargadas donde se obtiene que la temperatura máxima para enero del 2015 fluctúa entre 10.58°C a 28.68°C para el Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP2-4.5.

Figura 30

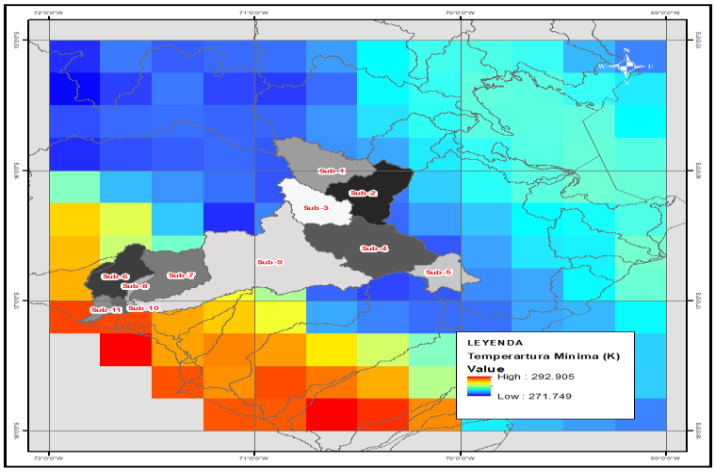
Temperatura Máxima (K) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP2-4.5



En la figura 31 se observa las temperaturas mínimas descargadas donde se obtiene que la temperatura minina para enero del 2015 fluctúa entre -1.40°C a 19.76°C para el Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP2-4.5.

Figura 31

Temperatura Mínima (K) - Modelo de Circulación Global MPI-ESM1-2-HR – Escenario SSP2-4.5



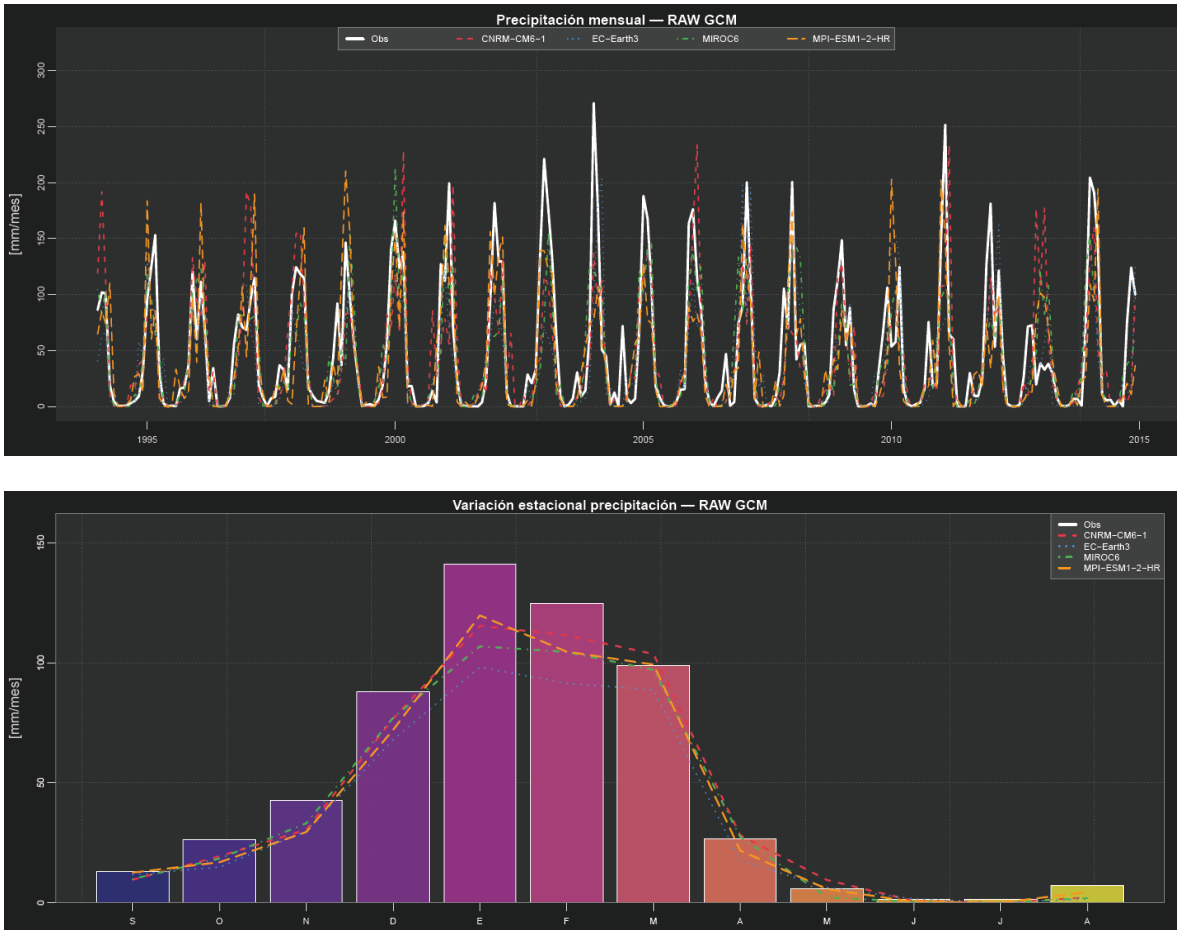
3.5 Dowscaling de los Modelos Climáticos Globales (GCM)

Para llevar a cabo el downscaling estadístico, se empleó la técnica de corrección de sesgo, una de las herramientas más utilizadas en este campo para ajustar las salidas de los modelos climáticos globales. Esta técnica permite eliminar las diferencias sistemáticas que existen entre lo que simulan dichos modelos y lo que realmente registran las observaciones, logrando así resultados más representativos de las condiciones locales.

En la figura 32 se observa la precipitación observada y modelos de circulación global sin corrección de sesgo, donde se puede ver que la precipitación observada esta encima de los escenarios de modelos de circulación global.

Figura 32

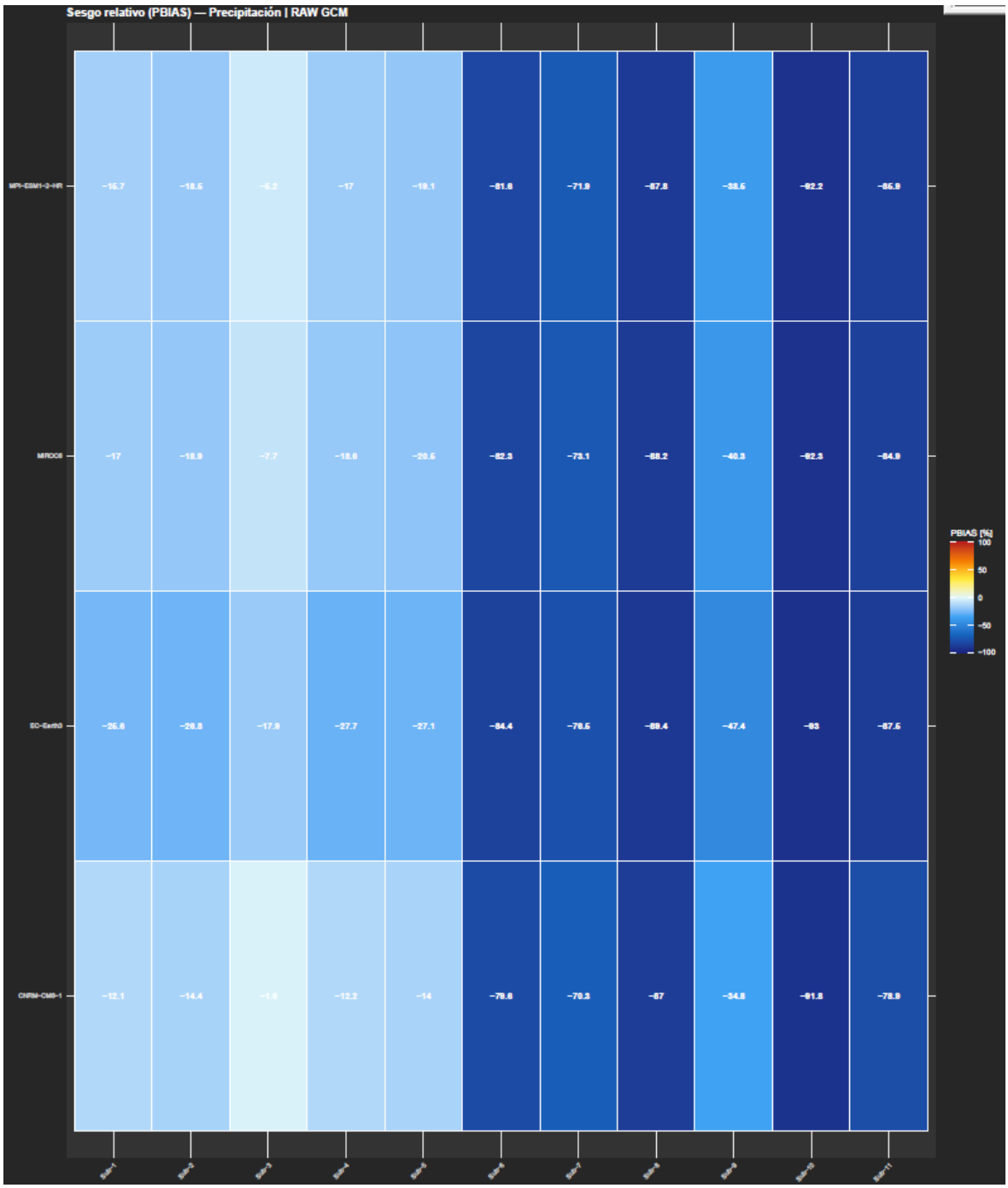
Precipitación Observada y Modelos de Circulación Global – Sin Corrección del Sesgo



En la figura 33 se observa que el parámetro estadístico PBIAS sin corrección de sesgo esta distante del 0 que es parámetro optimo y +-25% que es el permitido, teniendo valores de -70% a -85%, lo cual no cumple lo solicitado.

Figura 33

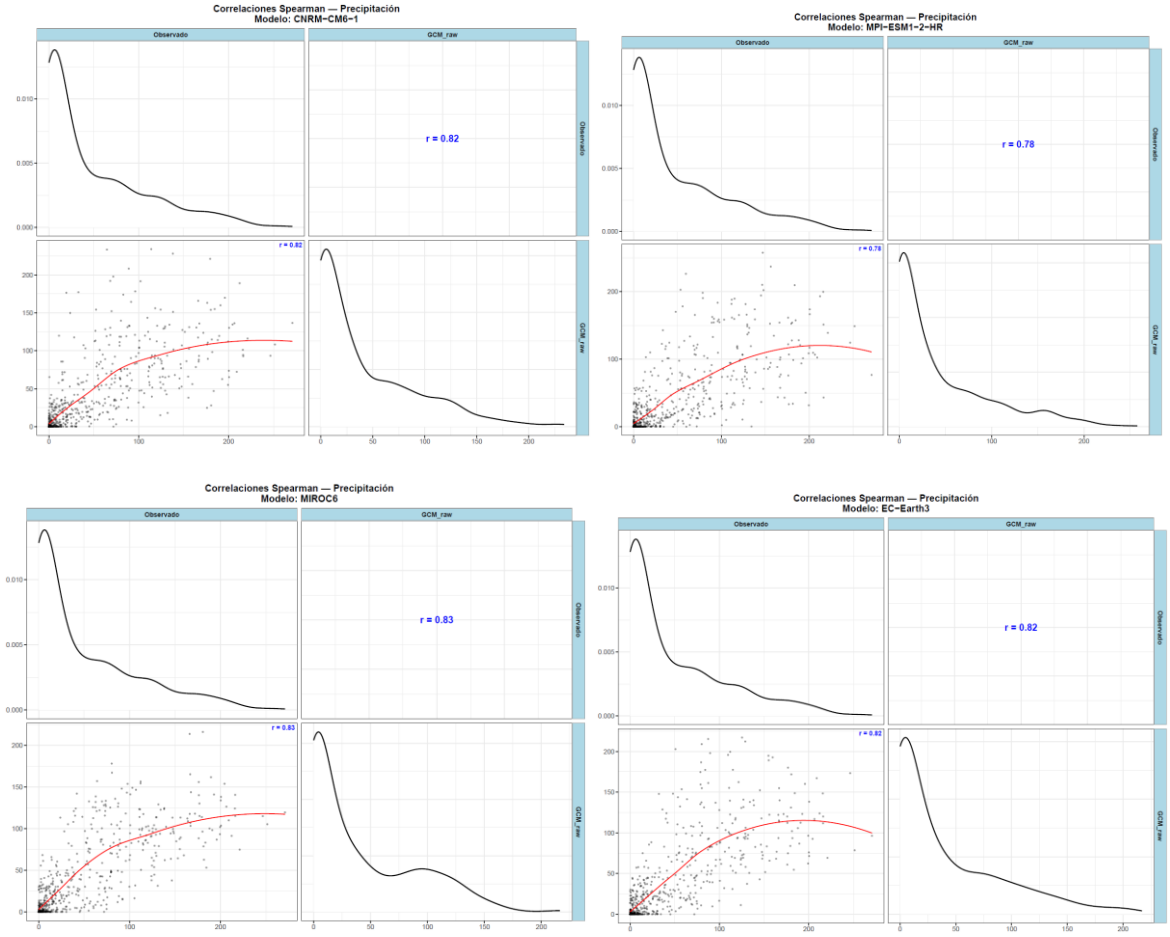
Parámetro Estadístico PBIAS – Sin Corrección del Sesgo



En la Figura 34 Para la realización del downscaling estadístico se empleó el método de Mapeo de Cuantiles Empírico (EQM, por sus siglas en inglés), una técnica de corrección de sesgo que ajusta la distribución estadística de las variables simuladas por el modelo climático para que se asemejen lo más posible a la distribución observada en la realidad.

Figura 34

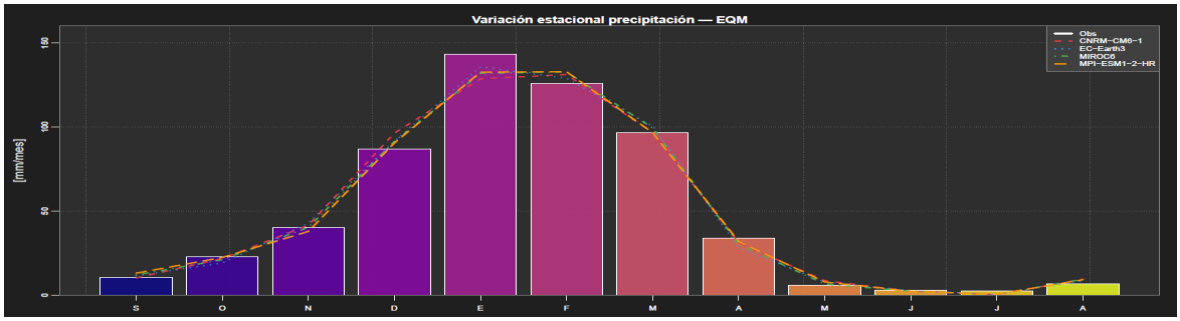
Parámetro Estadístico Spearman – Sin Corrección el Sesgo

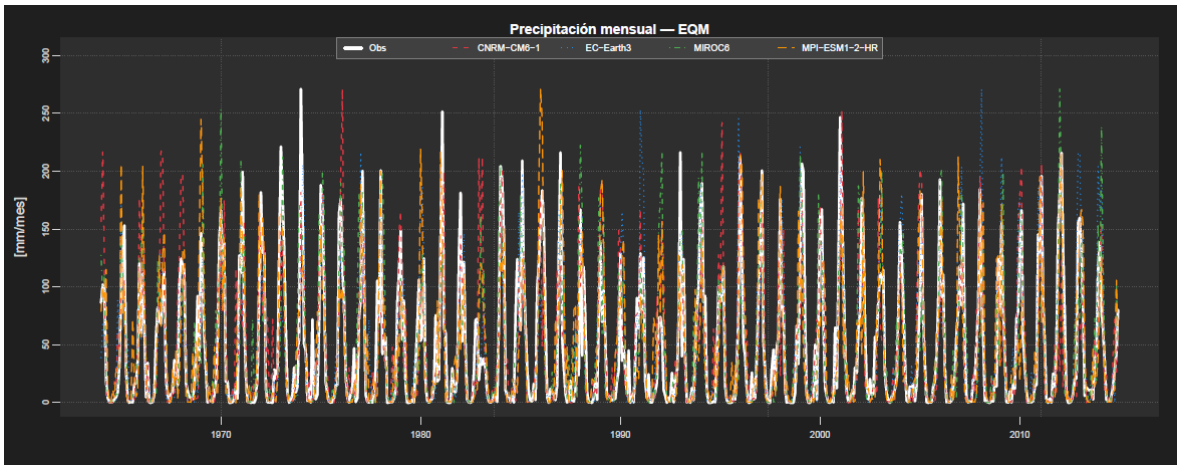


En la figura 35 se observa la precipitación observada y modelos de circulación global con corrección de sesgo, donde se puede ver que la precipitación observada esta alineada o ligeramente debajo de los escenarios de modelos de circulación global y es lo que el parámetro solicita.

Figura 35

Precipitación Observada y Modelos de Circulación Global – Corregido del Sesgo





En la figura 36 se observa que el parámetro estadístico PBIAS con corrección de sesgo esta cerca del 0 que es parámetro optimo y +-25% que es el permitido, teniendo valores de casi cero en todos los modelos, lo cual cumple lo solicitado.

Figura 36

Parámetro Estadístico PBIAS – Corregido del Sesgo

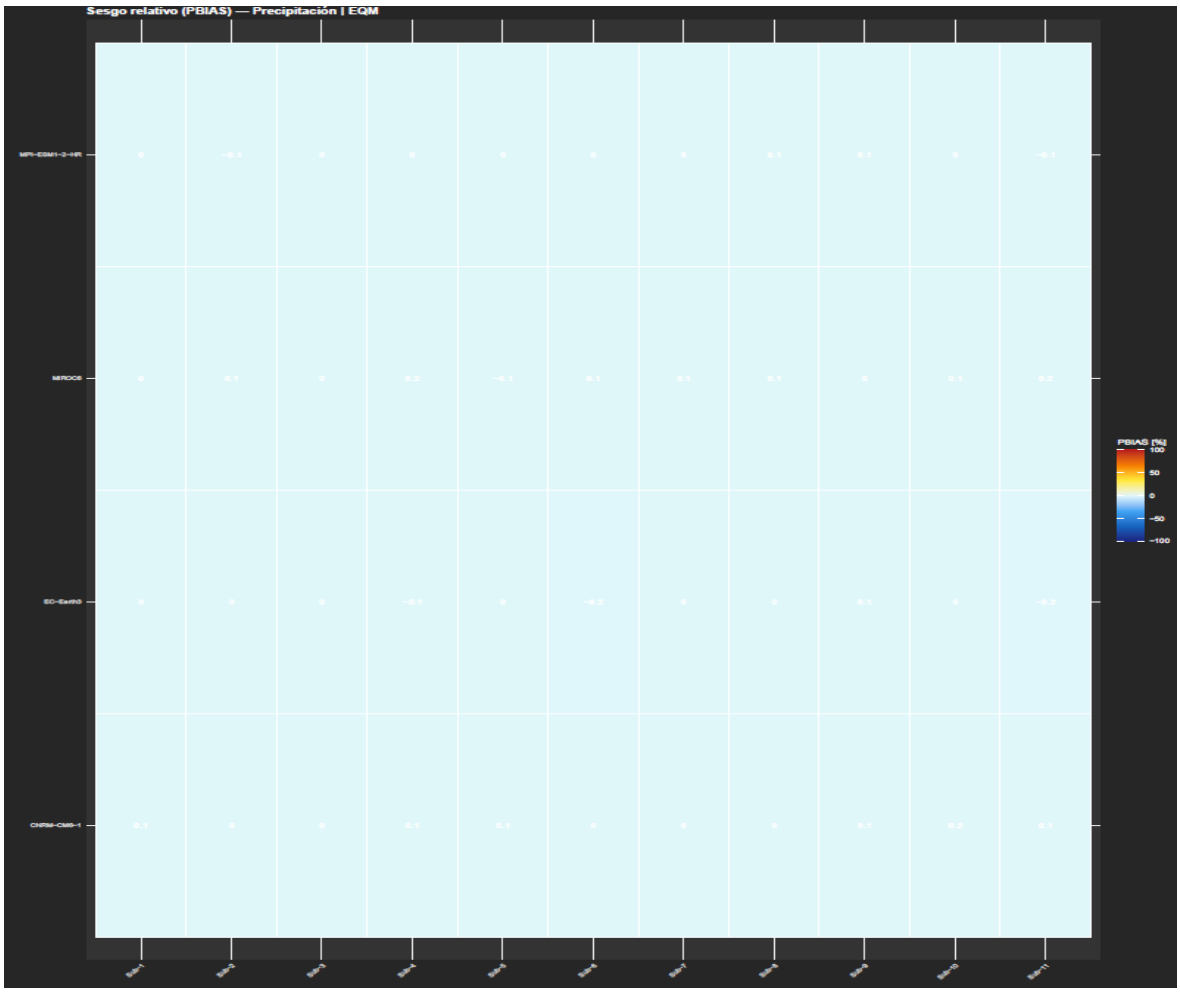
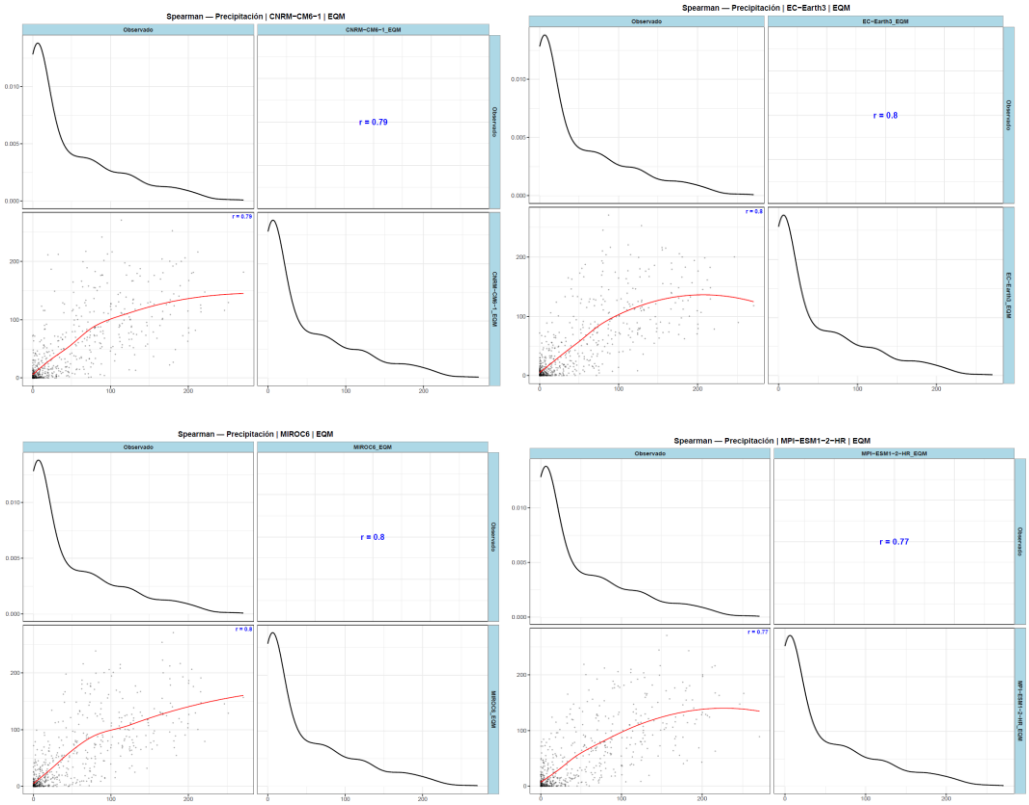


Figura 37

Parámetro Estadístico Spearman – Corregido del Sesgo



3.6 Simulación de la Respuesta Hidrológica Bajo Escenarios de Cambio Climático

Se realizó las simulaciones para el periodo futuro del 2014 al 2100 para 4 Modelos de Circulación Global así mismo para 2 escenarios (SSP2-4.5 y SSP5-8.5)

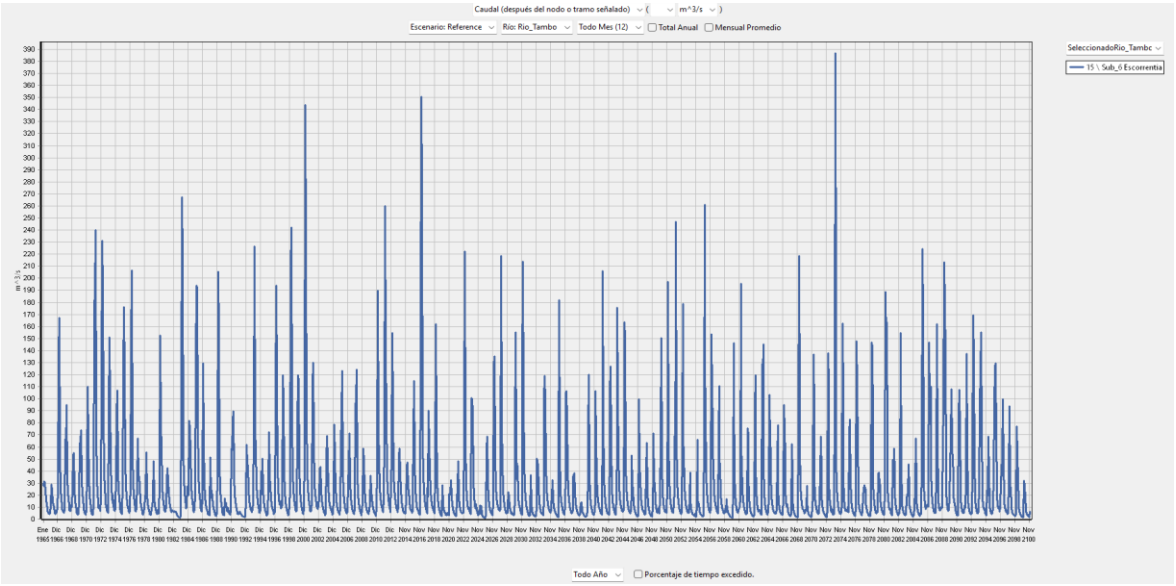
Los cuatro modelos analizados son CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, que son más utilizados a nivel global para proyecciones de caudales.

Los dos escenarios utilizados son SSP2-4.5 y SSP5-8.5 que son escenarios de emisión de Cambio Climático siendo parte del CMIP6, Siendo el escenario SSP5-8.5 el más extremo con FR (Forzamiento Radiativo) 8.5W/m2 y el escenario SSP2-4.5 moderado con FR (Forzamiento Radiativo) 4.5W/m2

En la figura 38 se observa los caudales simulados desde el año 1965 al 2100 bajo el modelo CNRM-CM6-1 y el escenario SSP5-8.5, teniendo un caudal máximo de 385m3/s en el año 2074.

Figura 38

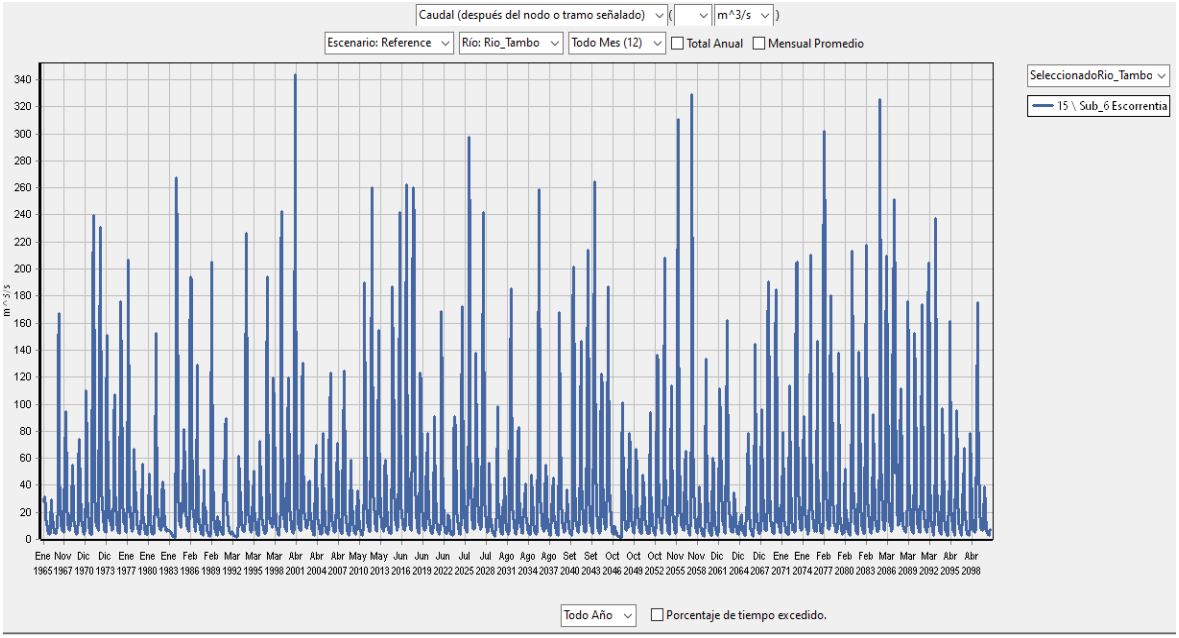
Caudales Simulados – Modelo CNRM-CM6-1 – Escenario SSP5-8.5



En la figura 39 se observa los caudales simulados desde el año 1965 al 2100 bajo el modelo CNRM-CM6-1 y el escenario SSP2-4.5, teniendo un caudal máximo de 330m3/s en el año 2058.

Figura 39

Caudales Simulados – Modelo CNRM-CM6-1 – Escenario SSP2-4.5



3.7 Interpretación de los Resultados

3.7.1 Cuadro de resumen de caudales proyectados

Se obtiene los siguientes cuadros de caudales proyectados para los escenarios de SSP5-8.5 y SSP2-4.5 en los modelos CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR.

En la Tabla 8 en el Escenario SSP5-8.5 indica el promedio de caudales observados desde el año 1965 a 2014, caudales proyectados en futuro cercano desde el año 2015 a 2050 y caudales proyectados en futuro lejano desde el año 2051 a 2100, teniendo un Caudal histórico desde 1965 al 2014 de 30.92 m3/s (975.09 MMC/año) el promedio de los caudales futuros del 2015 al 2100 es 53.33 m3/s.

Tabla 8

Resultados de Caudales para la Cuenca Tambo para el Escenario 2015 – 2100 – SSP 5-8.5

MODELO GCM SSP 5-8.5	CAUDAL HISTORICO (m3/s) 1965-2014	DISPONIBILIDAD HIDRICA HISTORICA (mmc/año) 1965-2014	CAUDAL FUTURO CERCANO (m3/s) 2015-2050	DISPONIBILIDAD HIDRICA (MMC/AÑO) 2015-2050	CAUDAL FUTURO LEJANO (M3/S) 2051-2100	DISPONIBILIDAD HIDRICA FUTURO LEJANO (MMC/AÑO) 2051-2100
CNRM-CM6-1	30.92	975.17	26.74	843.27	30.44	959.89
EC-Earth3	30.92	975.17	58.86	1856.22	135.57	4275.23
MIROC6	30.92	975.17	36.74	1158.56	46.66	1471.46
MPI-ESM1-2-HR	30.92	975.17	31.82	1003.53	41.25	1300.83

En la Tabla 9 en el Escenario SSP2-4.5 indica el promedio de caudales observados desde el año 1965 a 2014, caudales proyectados en futuro cercano desde el año 2015 a 2050 y caudales proyectados en futuro lejano desde el año 2051 a 2100, teniendo un Caudal histórico desde 1965 al 2014 de 30.87 m3/s (973.55 MMC/año) el promedio de los caudales futuros del 2015 al 2100 es 34.87 m3/s.

Tabla 9

Resultados de Caudales para la Cuenca Tambo para el Escenario 2015 – 2100 – SSP 2-4.5

MODELO GCM SSP 2-4.5	**CAUDAL HISTORICO (m3/s) 1965-2014**	**DISPONIBILIDAD HIDRICA HISTORICA (mmc/año) 1965-2014**	**CAUDAL FUTURO CERCANO (m3/s) 2015-2050**	**DISPONIBILIDAD HIDRICA (MMC/AÑO) 2015-2050**	**CAUDAL FUTURO LEJANO (M3/S) 2051-2100**	**DISPONIBILIDAD HIDRICA FUTURO LEJANO (MMC/AÑO) 2051-2100**
CNRM-CM6-1	30.87	973.55	26.19	825.94	30.96	976.46
EC-Earth3	30.87	973.55	55.52	1750.83	88.29	2784.22
MIROC6	30.87	973.55	27.89	879.38	40.36	1272.81
MPI-ESM1-2-HR	30.87	973.55	34.79	1097.20	36.01	1135.50

3.7.2 Análisis e Interpretación de resultados

3.7.2.1 Caudales proyectados para los escenarios de SSP5-8.5 en modelos CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR.

Nuestro Caudal promedio observado en la estación hidrométrica Puente Santa Rosa y realizando la completacion de datos desde el año 1965 al año 2014 es 30.92 m3/s, teniendo una disponibilidad hídrica histórica de 975.17 mmc/año (millones de metros cúbicos al año)

Para análisis dividimos en dos periodos de años proyectados para un futuro cercano y un futuro lejano, y se tenga datos del recurso hídrico para usos de agricultura, hidroeléctricas u otra actividad derivada del recurso.

3.7.2.1.1 Futuro Cercano desde el año 2015 al año 2050

3.7.2.1.1.1 Modelo CNRM-CM6-1

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo CNRM-CM6-1 de 26.74 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 843.27 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo resulta que el caudal proyectado promedio baja en 4.18 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada baja en 131.90 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 86.48% respecto al promedio observado.

3.7.2.1.1.2 Modelo EC-Earth3

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo EC-Earth3 de 58.86 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 1856.22 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 27.94 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 881.05 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 190.36% respecto al promedio observado.

3.7.2.1.1.3 Modelo MIROC6

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo MIROC6 de 36.74 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 1158.56 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 5.82 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 183.39 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 118.82% respecto al promedio observado.

3.7.2.1.1.4 Modelo MPI-ESM1-2-HR

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo MPI-ESM1-2-HR de 31.82 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 1003.53 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 0.90 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 28.36 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 102.91% respecto al promedio observado.

3.7.2.1.1.5 Histogramas de Futuro Cercano desde el año 2015 al año 2050

En la figura 40 tenemos los histogramas de los caudales observados vs caudales proyectados y en la figura 41 tenemos los histogramas de disponibilidad hídrica observada vs disponibilidad hídrica proyectada.

Figura 40

Caudales observados vs Caudales proyectados 2015 a 2050– Escenario SSP5-8.5

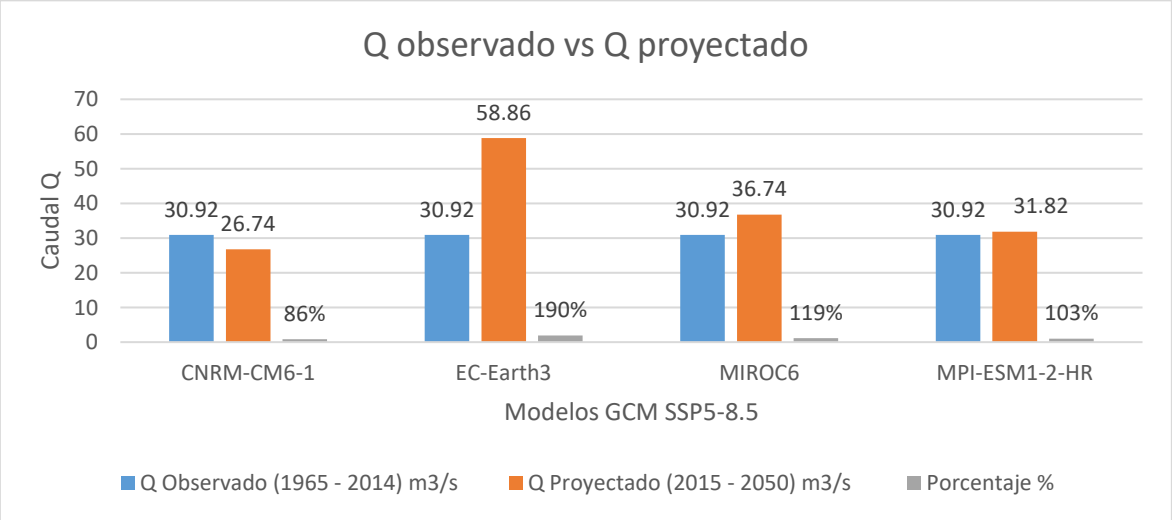
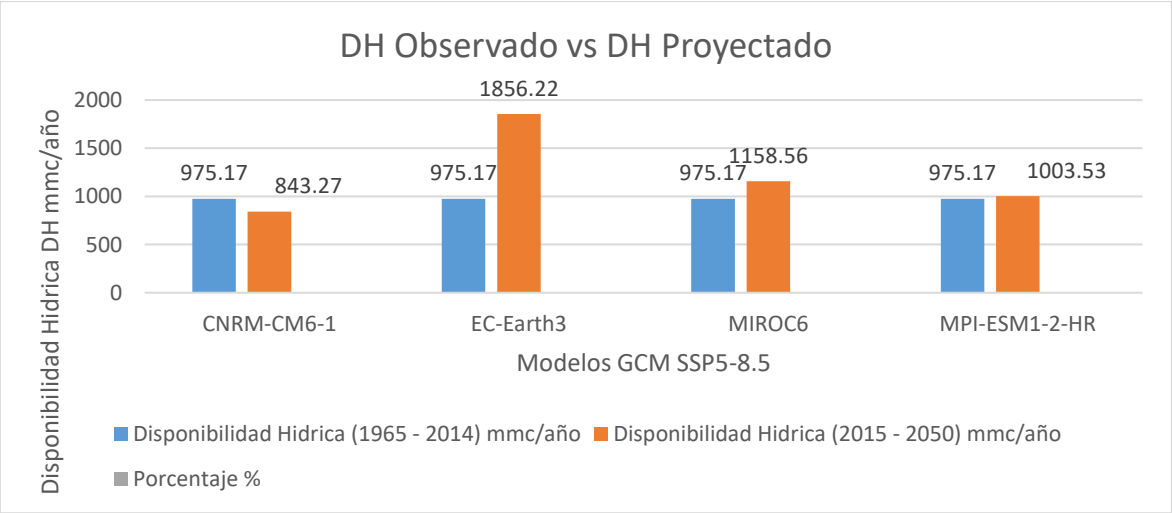


Figura 41

Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 2015 a 2050– Escenario SSP5-8.5



3.7.2.1.2 Futuro Lejano desde el año 2051 al año 2100

3.7.2.1.2.1 Modelo CNRM-CM6-1

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo CNRM-CM6-1 de 30.44 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 959.89 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo resulta que el caudal proyectado promedio baja en 0.48 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada baja en 15.28 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 98.44% respecto al promedio observado.

3.7.2.1.2.2 Modelo EC-Earth3

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo EC-Earth3 de 135.57 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 4275.23 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 104.65 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 3300.06 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 438.45% respecto al promedio observado.

3.7.2.1.2.3 Modelo MIROC6

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo MIROC6 de 46.66 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 1471.46 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 15.74 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 496.29 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 150.89% respecto al promedio observado.

3.7.2.1.2.4 Modelo MPI-ESM1-2-HR

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo MPI-ESM1-2-HR de 41.25 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 1300.83 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 10.33 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 325.66 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 133.41% respecto al promedio observado.

3.7.2.1.2.5 Histogramas de Futuro Lejano desde el año 2051 al año 2100

En la figura 42 tenemos los histogramas de los caudales observados vs caudales proyectados y en la figura 43 tenemos los histogramas de disponibilidad hídrica observada vs disponibilidad hídrica proyectada.

Figura 42

Caudales observados vs Caudales proyectados 2051 a 2100– Escenario SSP5-8.5

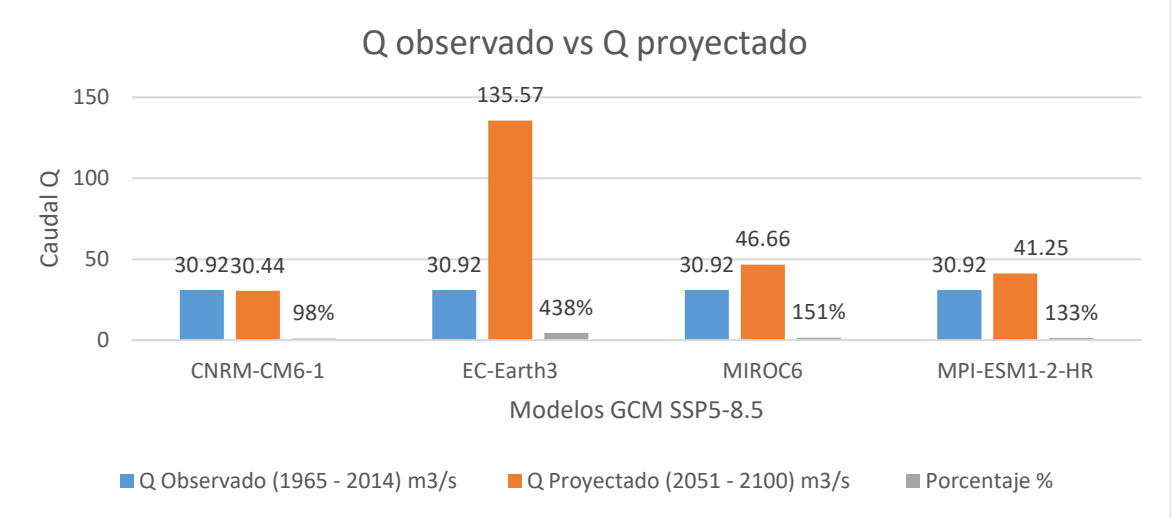
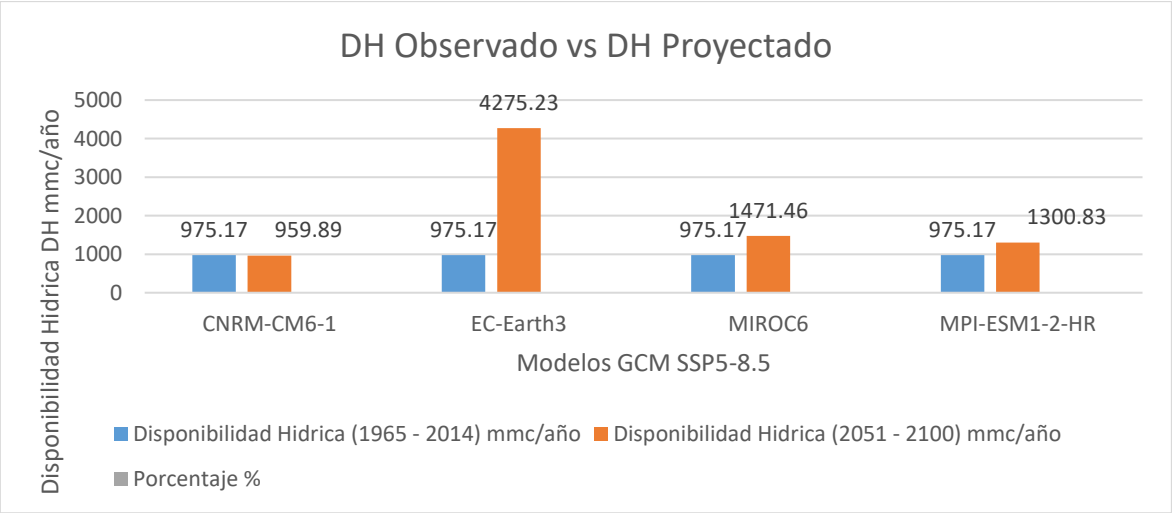


Figura 43

Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 2051 a 2100– Escenario SSP5-8.5

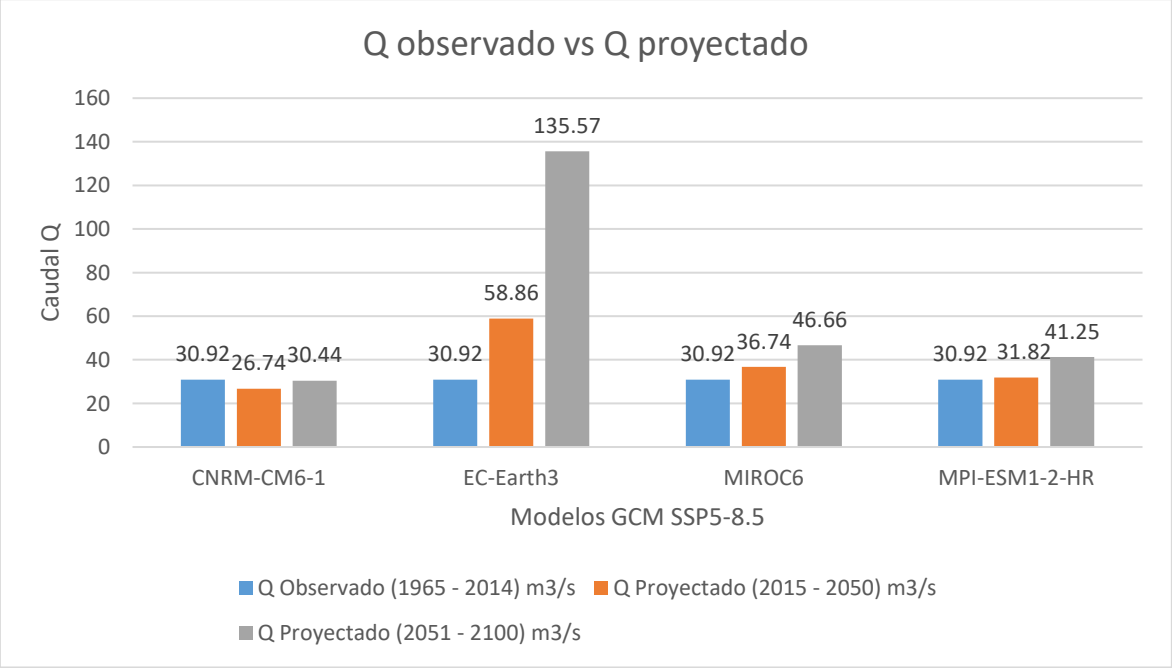


3.7.2.1.3 Histogramas de Caudales observados y proyectados para los escenarios de SSP5-8.5 en modelos CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR.

En la figura 44 realizamos el histograma uniendo los tres periodos.

Figura 44

Caudales observados vs Caudales proyectados 1965 a 2100– Escenario SSP5-8.5

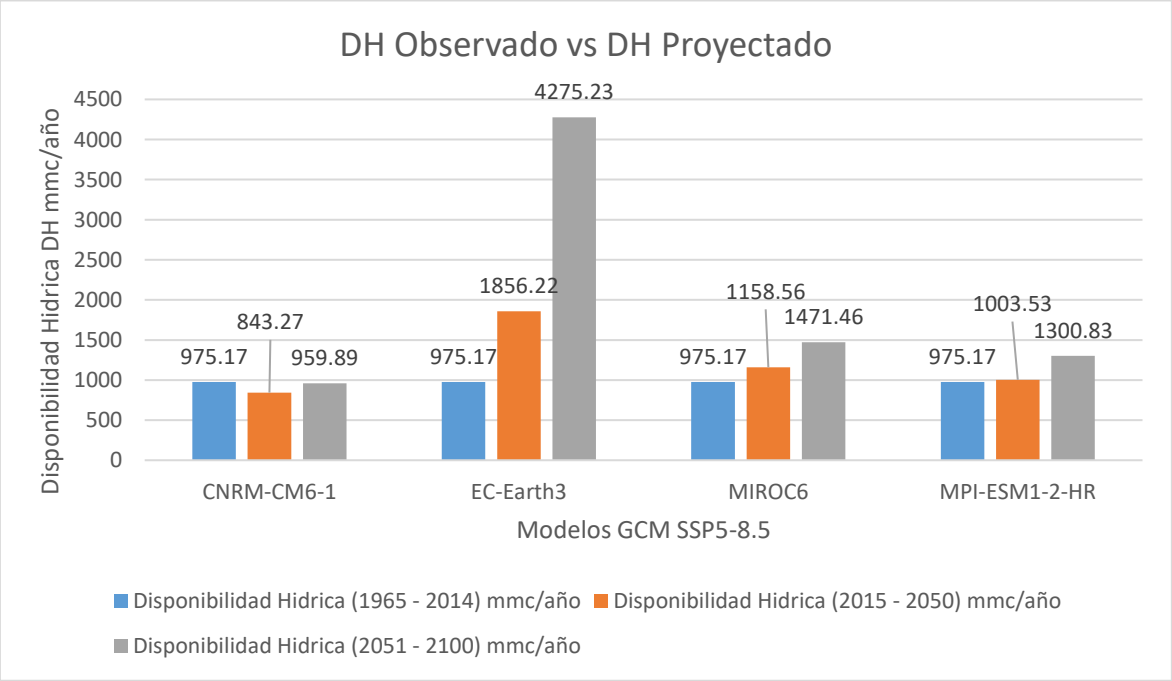


3.7.2.1.4 Histogramas de Disponibilidad Hídrica observada y proyectada para los escenarios de SSP5-8.5 en modelos CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR.

En la figura 45 realizamos el histograma uniendo los tres periodos.

Figura 45

Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 1965 a 2100– Escenario SSP5-8.5



3.7.2.2 Caudales proyectados para los escenarios de SSP2-4.5 en modelos CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR.

Nuestro Caudal promedio observado en la estación hidrométrica Puente Santa Rosa y realizando la completacion de datos desde el año 1965 al año 2014 es 30.87 m3/s, teniendo una disponibilidad hídrica histórica de 973.55 mmc/año (millones de metros cúbicos al año)

Para análisis dividimos en dos periodos de años proyectados para un futuro cercano y un futuro lejano, y se tenga datos del recurso hídrico para usos de agricultura, hidroeléctricas u otra actividad derivada del recurso.

3.7.2.2.1 Futuro Cercano desde el año 2015 al año 2050

3.7.2.2.1.1 Modelo CNRM-CM6-1

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo CNRM-CM6-1 de 26.19 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 825.94 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo resulta que el caudal proyectado promedio baja en 4.68 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada baja

en 147.61 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 84.84% respecto al promedio observado.

3.7.2.2.1.2 Modelo EC-Earth3

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo EC-Earth3 de 55.52 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 1750.83 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 24.65 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 777.28 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 179.85% respecto al promedio observado.

3.7.2.2.1.3 Modelo MIROC6

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo MIROC6 de 27.89 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 879.38 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio baja en 2.98 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada baja en 94.17 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 90.33% respecto al promedio observado.

3.7.2.2.1.4 Modelo MPI-ESM1-2-HR

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo MPI-ESM1-2-HR de 34.79 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 1097.20 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 3.92 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 123.65 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 112.70% respecto al promedio observado.

3.7.2.2.1.5 Histogramas de Futuro Cercano desde el año 2015 al año 2050

En la figura 46 tenemos los histogramas de los caudales observados vs caudales proyectados y en la figura 47 tenemos los histogramas de disponibilidad hídrica observada vs disponibilidad hídrica proyectada.

Figura 46

Caudales observados vs Caudales proyectados 2015 a 2050– Escenario SSP2-4.5

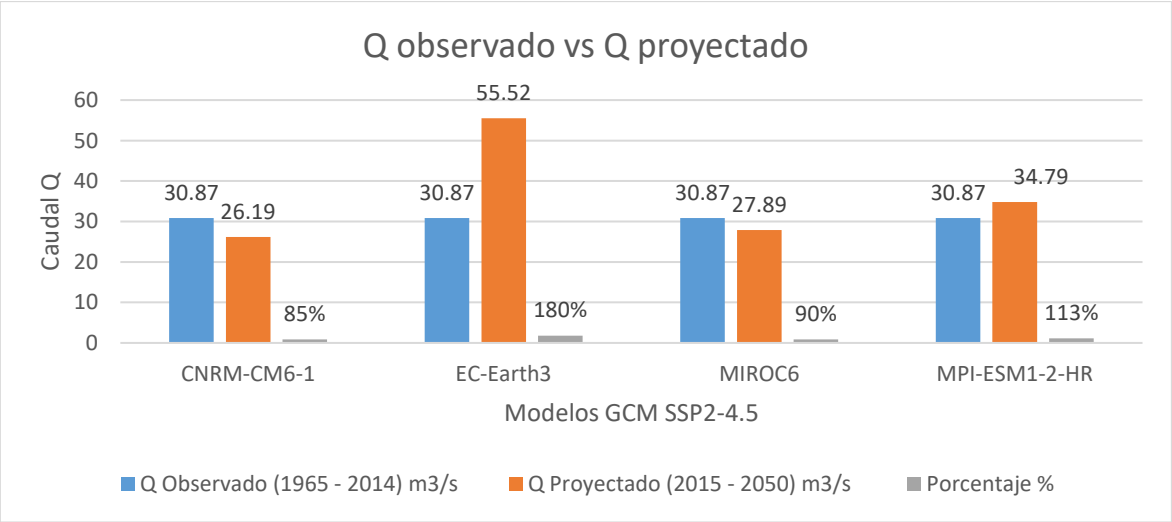
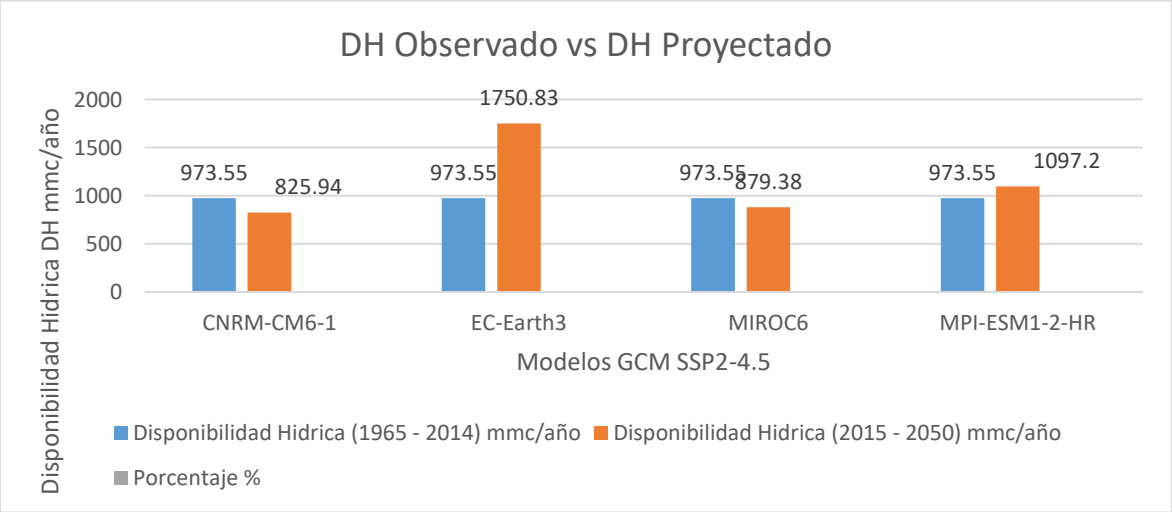


Figura 47

Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 2015 a 2050– Escenario SSP2-4.5



3.7.2.2.2 Futuro Lejano desde el año 2051 al año 2100

3.7.2.2.2.1 Modelo CNRM-CM6-1

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo CNRM-CM6-1 de 30.96 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 976.46 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo resulta que el caudal proyectado promedio sube en 0.09 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 2.91 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 100.30% respecto al promedio observado.

3.7.2.2.2.2 Modelo EC-Earth3

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo EC-Earth3 de 88.29 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 2784.22 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 57.42 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 1810.67 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 285.99% respecto al promedio observado.

3.7.2.2.2.3 Modelo MIROC6

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo MIROC6 de 40.36 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 1272.81 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 9.49 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 299.26 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 130.74% respecto al promedio observado.

3.7.2.2.2.4 Modelo MPI-ESM1-2-HR

Se obtuvo un caudal proyectado promedio para el modelo MPI-ESM1-2-HR de 36.01 m3/s y una disponibilidad hídrica proyectada de 1135.50 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), en este modelo el caudal proyectado promedio sube en 5.14 m3/s respecto al caudal promedio observado y correlativamente la disponibilidad hídrica proyectada sube en 161.95 mmc/año (millones de metros cúbicos al año), resultando en un 116.63% respecto al promedio observado.

3.7.2.2.2.5 Histogramas de Futuro Lejano desde el año 2051 al año 2100

En la figura 48 tenemos los histogramas de los caudales observados vs caudales proyectados y en la figura 49 tenemos los histogramas de disponibilidad hídrica observada vs disponibilidad hídrica proyectada.

Figura 48

Caudales observados vs Caudales proyectados 2051 a 2100– Escenario SSP2-4.5

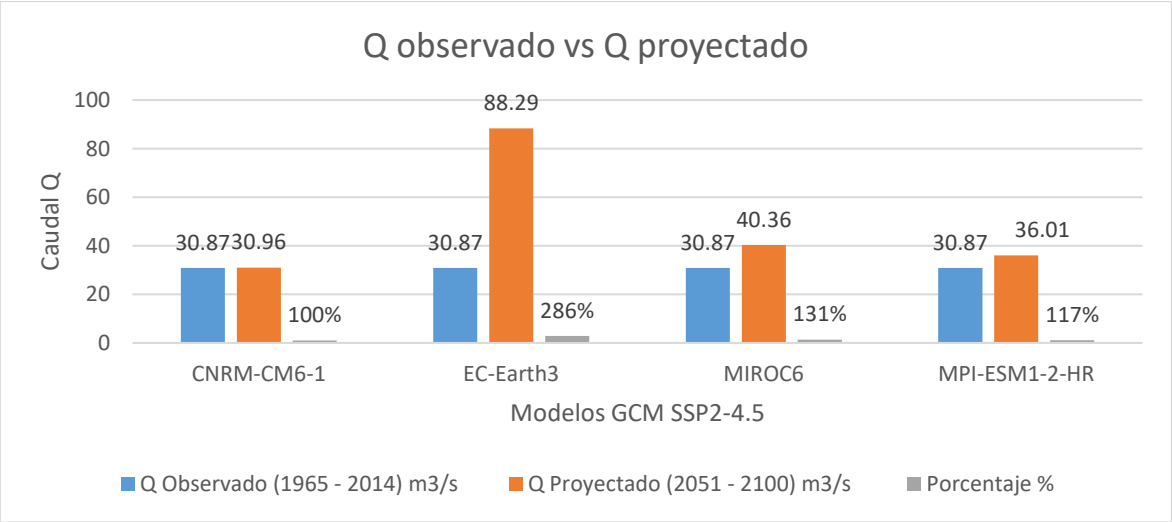
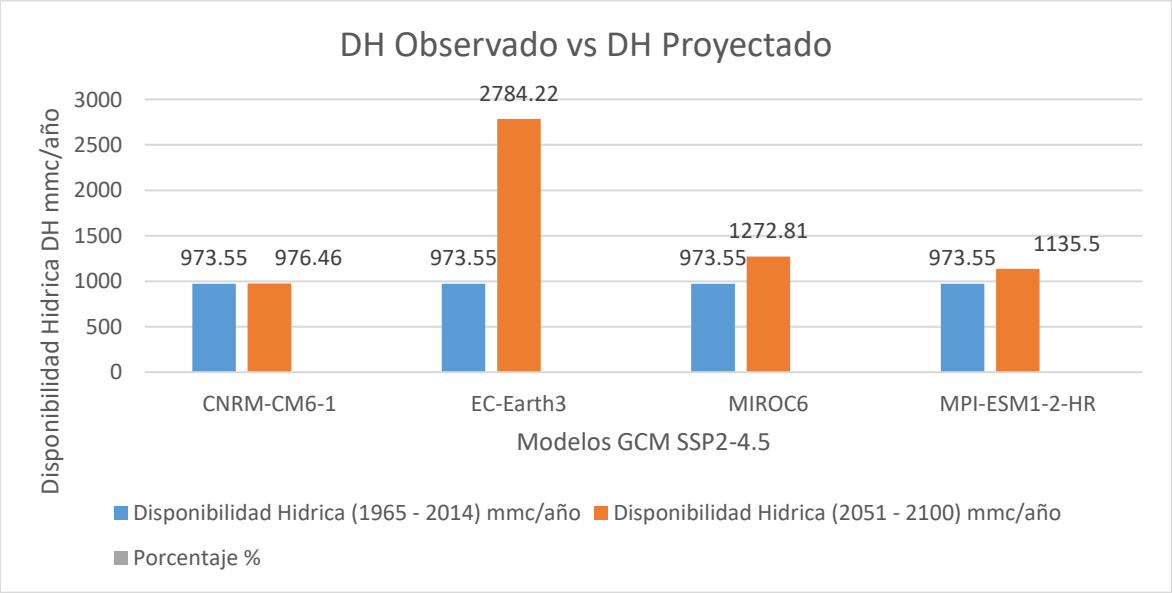


Figura 49

Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 2051 a 2100– Escenario SSP2-4.5

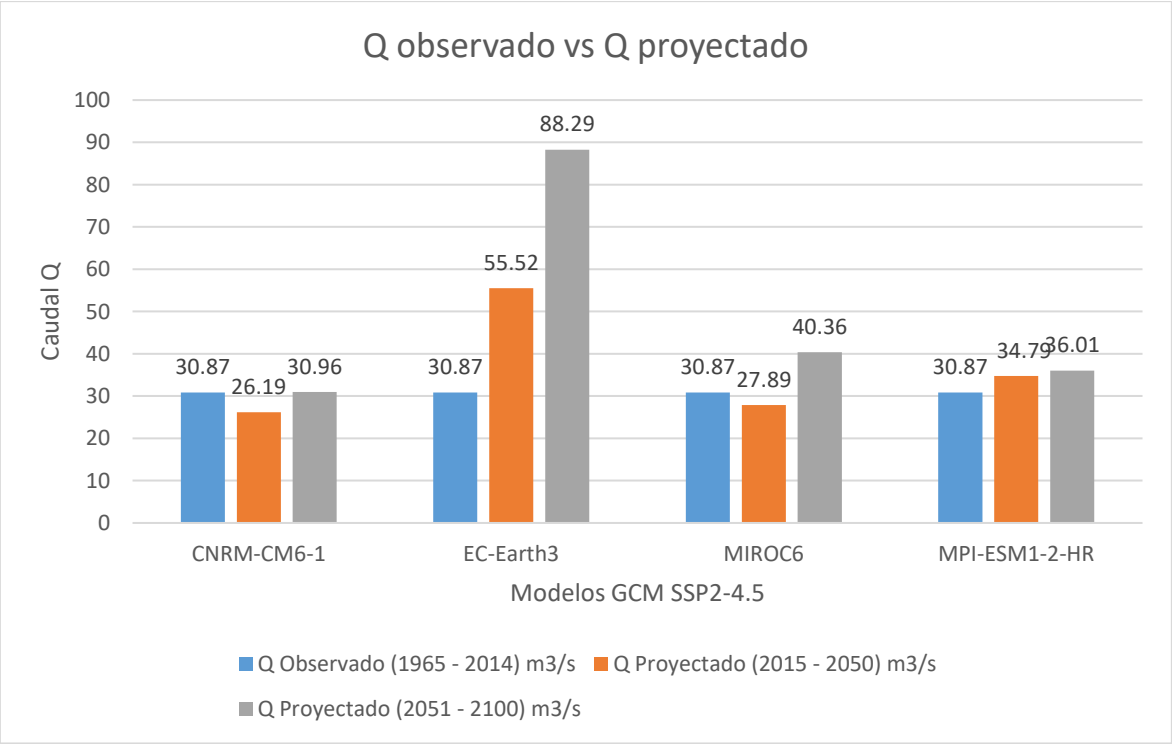


3.7.2.2.3 Histogramas de Caudales observados y proyectados para los escenarios de SSP2-4.5 en modelos CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR.

En la figura 50 realizamos el histograma uniendo los tres periodos.

Figura 50

Caudales observados vs Caudales proyectados 1965 a 2100– Escenario SSP2-4.5

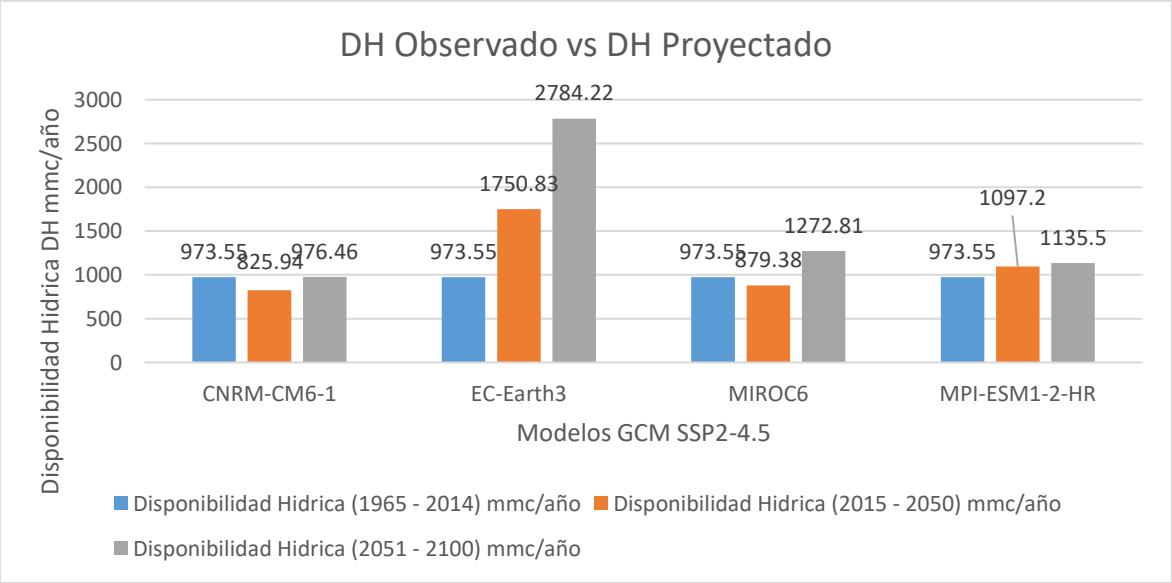


3.7.2.2.4 Histogramas de Disponibilidad Hídrica observada y proyectada para los escenarios de SSP2-4.5 en modelos CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR.

En la figura 51 realizamos el histograma uniendo los tres periodos.

Figura 51

Disponibilidad Hídrica observada vs Disponibilidad Hídrica proyectada 1965 a 2100– Escenario SSP2-4.5



4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones:

Objetivo 01: Recoger y procesar la información climática e hidrológica.

Se efectuó satisfactoriamente la recopilación y completacion de datos de las precipitaciones en las quince estaciones pluviométricas desde el año 1964 al año 2022, teniendo la mayor precipitación en la estación Rincon de la cruz con 764.74mm y la menor precipitación en la estación Ubinas con 311.34mm.

Objetivo 02: Calibrar y validar el modelo hidrológico en el software WEAP.

La calibración y validación del modelo hidrológico desarrollado en el software WEAP de los años observados desde 1965 a 2016, se realizó en una serie de tiempo de 60% (1965 a 1995) para calibración y 40% (1996 a 2016) para validación, también se desarrolló en la serie de tiempo de 70% (1965 a 2000) para calibración y 30% (2001 a 2016) para validación.

Obteniendo los resultados para la calibración del 60% los indicadores: Nash 0.96, PBIAS 1.67%, RMSE 6.47 y Coeficiente de correlación r 0.75. Y los resultados para la validación del 40% los indicadores: Nash 0.90, PBIAS 19.08%, RMSE 10.15 y Coeficiente de correlación r 0.87.

Obteniendo los resultados para la calibración del 70% los indicadores: Nash 0.96, PBIAS 5.86%, RMSE 6.49 y Coeficiente de correlación r 0.75. Y los resultados para la validación del 30% los indicadores: Nash 0.89, PBIAS 14.59%, RMSE 9.86 y Coeficiente de correlación r 0.87.

Los parámetros establecidos para los indicadores son los siguientes: Nash $0.50 < 1$, PBIAS $-25\%<0<25\%$, RMSE 0 y Coeficiente de Correlación r $0<r<1$, como se puede observar estamos dentro de los límites de los parámetros.

Objetivo 03: Realizar el downscaling de los modelos climáticos globales (GCM)

Se realiza la descarga de Modelos Globales de Circulación (GCM): CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR para los escenarios climáticos Ssp2-4.5 y Ssp5-8.5 de las variables meteorológicas como precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima y se aplica de la corrección de sesgo.

Las precipitaciones de los GCM se ajustan a las precipitaciones de las estaciones pluviales observadas como se representa en la Figura 35, y se llega a un PBIS desde -0.1% a 0.2%, acercándose a 0 en los cuatro modelos y las once sub cuencas, estando dentro de los márgenes del parámetro -25%<0<25% y se puede ver en la Figura 36.

Objetivo 04: Evaluar el funcionamiento hidrológico de la cuenca bajo condiciones proyectadas de cambio climático.

Se tiene los caudales observados desde el año 1965 al año 2015 y los caudales proyectados desde el año 2016 al año 2100, separándolos en futuro cercano desde el año 2016 al año2050 y futuro lejano desde el año 2051 al año 2100, los valores obtenidos promedios y porcentajes para el escenario SSP5-8.5 para Caudal observado (1965 a 2015) es 30.92 m3/s y caudal proyectado (2016 a 2100) 53.33 m3/s incrementando en un 72%. Y los valores obtenidos promedios y porcentajes para el escenario SSP2-4.5 para Caudal observado (1965 a 2015) es 30.87 m3/s y caudal proyectado (2016 a 2100) 43.58 m3/s incrementando en un 41%.

Se concluye que el aumento de caudales va desde 41% a 72% este incremento de caudales y disponibilidad hídrica del agua es un crecimiento muy grande que las autoridades encargadas deben tener en cuenta para mejor utilización del mismo.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar las proyecciones de caudales en el escenario SSP1-2.6 de los Modelos Climáticos Globales (GCM) del CMIP6, que es un escenario más conservador.
- Se sugiere que realice las proyecciones de caudales cuando se actualice los Modelos Climáticos Globales (GCM) de CMIP6 a CMIP7 en mismos escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, ya que en cada actualización los modelos van tomando datos de efecto invernadero reales y poder validar las proyecciones o ver si hay cambios a lo expuesto.
- Se tiene los datos que los caudales proyectados van aumentar en la estación Puente Santa Rosa en Arequipa, instalar una estación hidrométrica en Moquegua a la mitad del recorrido del rio nos aportaría datos de los caudales y poder distribuir el recurso hídrico a lo largo del cauce de la cuenca, instalando presas y derivando canales de regadío, y no tener que dejar desembocar en el mar el aumento del recurso.

5 REFERENCIAS

Singh, V.P. (Editor) (1995). Computer-Models of Watershed Hydrology. Water Res. Publications. Littleton, Colorado.

Chow, V. T. (1959). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill Companies.

Autoridad Nacional del Agua ANA. (2026). Lima. Retrieved from https://www.ana.gob.pe/contenido/el-agua-en-cifras

Ayala Bizarro, I., Castillo Navarro, L., & Zúñiga Mendoza, J. (2025). Modelización hidrológica-hidráulica con impacto del cambio climático e influencia del número de curva (CN) en la cuenca del río Ichu, Huancavelica-Perú. *Consorcio Latinoamericano y Caribeño de Instituciones de Ingeniería*.

Dr. Roberto Hernández Sampieri. (2014). *McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.* Retrieved from https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf

Josemanuel Carpio Fernández, F. P. (2020). Hidrogeología de la Cuenca del Río Tambo. *INGEMMET, Boletín Serie H: Hidrogeología N° 7*, 292.

M. Sivasakthi, S. S. (2026). Evaluación de la tendencia de cambio climatológico pasado y futuro en la cuenca del río Vellar, India, utilizando CMIP6. *Discover Sustainability*, 38.

Marta Teixeira, D. C. (2026). Impactos del cambio climático en la salud humana en Portugal según escenarios climáticos futuros CMIP6 a escala reducida: un análisis mediante índices de confort térmico. *Enviromental Research Climate*, 19.

Perrier ET, A. L.-l. (2021). Hydration for health hypothesis. *narrativereview of supporting evidence*, 67-80.

Priscila da Silva TAVARES, I. L. (2024). CONJUNTO DE DATOS DE PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO DE ALTA RESOLUCIÓN SOBRE SUDAMÉRICA CON CORRECCIÓN DE SESGO. *Derbyana, ISSN*, 28.