

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“MODELACIÓN EN WEAP Y RS MINERVE PARA LA
PROYECCIÓN HIDROLÓGICA FUTURA DE LA MICROCUENCA
MCHIQUE – SINCOS - HUANCAYO”**

TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE:
INGENIERA AGRÍCOLA

Presentado por:

CCORI PUMA GLORINDA FLOR

Lima – Perú

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“MODELACIÓN EN WEAP Y RS MINERVE PARA LA
PROYECCIÓN HIDROLÓGICA FUTURA DE LA MICROCUENCA
MCHIQUE – SINCOS - HUANCAYO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÍCOLA**

CCORI PUMA GLORINDA FLOR

Mg. Sc. Gonzalo Ramcés. Fano Miranda

PRESIDENTE

Mg. Sc. Cayo Leonidas Ramos Taipe

MIEMBRO

Mg. Sc. Toribio Sebastián Santayana Vela

MIEMBRO

Dr. Jesús Abel Mejía Marcacuzco

CO-ASESOR

Dr. Eduardo Abraham Chávarri Velarde

ASESOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo mi padre Julian Ccori Aguilar por siempre alentarme, en tus palabras “con toda la voluntad y todo el corazón se puede lograr grandes cosas”, de ti aprendí lo importante de la educación, valorar la cultura de nuestro país y respetar la naturaleza. A Justina A. Puma Pariapaza, a ti mamita que, con una sonrisa, una sola palabra puedes iluminar mis días, por enseñarme a tener fuerza y coraje en seguir adelante; a mi hermanita Thania, por caminar a mi lado en los malos y buenos momentos, a mis hermanos Carlos y Alex por su alegría y sus consejos en culminar esta investigación. Grande es el camino que queda por recorrer, y la vida puede ponernos muchas dificultades; pero, nada es imposible, son esos momentos malos que enseñan más, en los que se tiene que ser más fuerte para levantarse y seguir, el futuro avanza a pasos agigantados, y como Albert Einstein: “donde hay una voluntad hay un camino”, estoy segura que juntos lo vamos a lograr.

AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento a mi asesor Dr. Eduardo A. Chavarri Velarde, por sus consejos, su tiempo y su paciencia en este trabajo de investigación, al Ingeniero Gustavo De la Cruz Montalvo de SENAMHI, quien siempre estuvo dispuesto a resolver mis dudas, compartiendo su conocimiento y experiencia; de igual manera, a todos los ingenieros que alguna vez hice consultas y quienes siempre estuvieron dispuestos en ayudarme. Al Proyecto de Cooperación Belga VLIR/OUS-UNALM por darme las facilidades en los trabajos de campo, brindarme información de sus estaciones meteorológicas e hidrométricas y al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), por brindarme información de sus estaciones en la cuenca central del Mantaro.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
INDICE GENERAL.....	vi
RESUMEN.....	x
<i>ABSTRACT</i>	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xx
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. ANTECEDENTES	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1 Objetivo principal.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. CLIMA.....	5
2.2. SISTEMA CLIMÁTICO	5
2.3. CICLO HIDROLÓGICO.....	6
2.4. MODELOS HIDROLÓGICOS	7
2.4.1 Clasificación de modelos hidrológicos.....	7
2.4.2 Elección de un modelo hidrológico	8
2.4.3 Función objetivo	9
2.4.4 Calibración.....	9
2.4.5 Validación.....	10
2.5. SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON RS MINERVE	10
2.5.1 Concepto.....	10
2.5.2 Estación virtual	11
2.5.3 Descripción del modelo HBV.....	12

2.5.4	Indicadores de rendimiento	14
2.6.	SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON WEAP.....	15
2.6.1	Concepto.....	15
2.6.2	Métodos para la simulación de cuencas	15
2.6.3	Aplicaciones	16
2.6.4	Método de esorrentía pluvial	16
2.6.5	Calibración.....	19
2.6.6	Aplicaciones	20
2.7.	MODELOS CLIMÁTICOS.....	21
2.8.	MODELOS CLIMATICOS GLOBALES	21
2.8.1	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático.....	23
2.8.2	Proyecto de Intercomparacion de Modelos Acoplados	25
2.8.3	Quinto informe de evaluación	26
2.8.4	Escenarios para la investigación climática	27
2.8.5	Nuevos escenarios del IPCC.....	28
2.8.6	Forzamiento radiativo.....	28
2.8.7	Trayectorias de concentración representativas	29
2.9.	<i>DOWNSCALING</i>	30
2.9.1	Dinámico	31
2.9.2	Estadístico.....	32
2.9.3	Selección de modelos	33
2.10.	PRECIPITACIÓN	33
2.10.1	Definición	33
2.10.2	Agua precipitable.....	33
2.10.3	Medición.....	34
2.10.4	Limitaciones	34
2.10.5	PISCO.....	35
2.10.6	Variabilidad de la precipitación en la cuenca Mantaro	36
2.11.	OFERTA HÍDRICA.....	37
2.12.	CAMBIO CLIMÁTICO.....	37
2.12.1.	Variabilidad climática.....	38
2.12.2.	Diferencia entre cambio climático y variabilidad del clima.....	38
2.12.3.	Posibles consecuencias del cambio climático en el Perú	39
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
3.1.	MATERIALES	40

3.1.1	Descripción de la zona de estudio	40
3.1.2	Información pluviométrica histórica	40
3.1.3	Información pluviométrica futura.....	42
3.1.4	Información hidrométrica	42
3.2.	METODOLOGÍA	43
3.2.1	Evaluación del registro de datos de las estaciones VLIR-OUS.....	43
3.2.2	Análisis información PISCO	45
3.2.3	Análisis exploratorio de datos pluviométricos	46
3.2.4	Análisis de información hidrométrica	52
3.2.5	Simulación hidrológica con RS MINERVE.....	52
3.2.6	Simulación hidrológica con WEAP.....	57
3.2.7	Cálculo de la oferta hídrica.....	60
3.2.8	Efecto del cambio climático en la oferta hídrica futura.....	60
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1.	EVALUACIÓN DE LAS ESTACIONES DEL PROYECTO VLIR-OUS	61
4.1.1	Trabajo de campo	61
4.1.2.	Elección de estaciones	62
4.1.3.	Evaluación del registro de datos pluviométricos	62
4.2.	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PISCO	62
4.2.1	Descarga de datos	62
4.2.2	Corrección de sesgo.....	65
4.2.3	Análisis de la información pluviométrica PISCOv2.1	67
4.3.	ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS PLUVIOMETRICOS	68
4.3.1.	Diagrama de cajas.....	68
4.3.2.	<i>Test</i> de <i>grubbs</i>	69
4.3.3.	Formación de regiones homogéneas.....	69
4.3.4.	Estacionariedad.....	71
4.4.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA.....	71
4.5.	SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON RS MINERVE	72
4.5.1.	Elección del modelo hidrológico	72
4.5.2.	Calibración y validación del modelo hidrológico HBV	73
4.5.3	Caudal simulado con HBV	78
4.6.	SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON WEAP	79
4.6.1.	Definición esquemática y de los límites del modelo	79
4.6.2.	Calibración y validación.....	79

4.6.3	Caudal simulado con WEAP	81
4.7.	CÁLCULO DE LA OFERTA HÍDRICA FUTURA.....	82
4.7.1	Precipitación	82
4.7.2	Temperatura.....	83
4.7.3	Caudales.....	83
4.7.4	Resumen de resultados	84
4.8.	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	85
4.8.1	Futuro cercano: 2020 - 2040.....	85
4.8.2.	Futuro medio: 2041-2050	89
4.8.3.	Futuro lejano: 2051-2099	94
4.8.4.	Resumen de resultados	98
5.	CONCLUSIONES.....	101
6.	RECOMENDACIONES	103
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	104
8.	ANEXOS	109

RESUMEN

Se evaluó los efectos del cambio climático en la oferta hídrica de la microcuenca Mchique, para lo cual se trabajó con dos modelos hidrológicos, el HBV de RS MINERVE y WEAP “método de escorrentía pluvial”. Se usó la base de datos de PISCO desarrollado por SENAMHI, cuyo control de calidad se realizó mediante el análisis gráfico y estadístico, y posterior corrección de datos mediante el método “*Linear Scaling*”, con ocho estaciones meteorológicas del proyecto VLIR-OUS; con esta información se pudo detectar a 1984, 1993 y 2011 como los más lluviosos en toda la región y 1992 de “sequía extrema”. El análisis exploratorio de datos se desarrolló con el uso de diagramas de cajas, *Test de Grubbs*, formación de regiones homogéneas (método del Ward y Vector Regional) y análisis de estacionariedad por Mann Kendall. Se realizó el análisis multianual de la precipitación, temperatura y caudales simulados con información de tres modelos climáticos globales (CanNesm2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR) para dos escenarios RCP4.5 y RCP8.5, con lo que se pudo ver que el modelo HBV es más sensible en los resultados respecto de WEAP. El efecto del cambio climático en la oferta hídrica se analizó mediante el promedio multianual mensual, en los periodos futuro cercano (2020-2040), medio (2041-2050) y lejano (2051-2099). Los resultados muestran que, si bien existe escenarios con aumento en la precipitación, estos se dan en periodo de estiaje; al contrario, en avenidas en todos los escenarios se reduce, lo cual trae como consecuencia cambio del comportamiento del año hidrológico en la microcuenca. En promedio multimodelo todos los resultados muestran una pérdida promedio multianual mensual de más del 45.66 por ciento de la oferta hídrica, a pesar del incremento en 16.37 por ciento de la precipitación y del aumento de 2.13°C en la temperatura.

Palabras clave: RS MINERVE, WEAP, modelos climáticos globales, PISCO, cambio climático.

ABSTRACT

The effects of climate change on the water supply of the Mchique microbasin were evaluated, for which we worked with two hydrological models, the HBV of RS MINERVE and WEAP “storm runoff method”. The PISCO database developed by SENAMHI was used, whose quality control was performed through graphic and statistical analysis, and subsequent correction of data using the “Linear Scaling” method, with eight weather stations of the VLIR-OUS project; With this information it was possible to detect 1984, 1993 and 2011 as the rainiest in the entire region and 1992 of “extreme drought”. The exploratory data analysis was developed with the use of box diagrams, Grubbs Test, formation of homogeneous regions (Ward method and Regional Vector) and stationarity analysis by Mann Kendall. The multiannual analysis of rainfall, temperature and simulated flows was carried out with information from three global climate models (CanNesM2, CNRM-CM5 and MPI-ESM-MR) for two scenarios RCP4.5 and RCP8.5, which could be seen that the HBV model is more sensitive in the results compared to WEAP. The effect of climate change on water supply was analyzed using the monthly multiannual average, in the near future (2020-2040), medium (2041-2050) and distant (2051-2099) periods. The results show that, although there are scenarios with an increase in precipitation, these occur during the dry season; on the contrary, in avenues in all scenarios it is reduced, which results in a change in the behavior of the hydrological year in the microbasin. On a multi-model average, all the results show a monthly multi-annual average loss of more than 45.66 percent of the water supply, despite the 16.37 percent increase in rainfall and the 2.13 ° C increase in temperature.

Key words: RS MINERVE, WEAP, Global Climate Models, PISCO, climate change.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros y condiciones iniciales de la estación virtual	11
Tabla 2: Parámetros del modelo HBV	13
Tabla 3: Condiciones iniciales del modelo HBV	14
Tabla 4: Indicadores de rendimiento	14
Tabla 5: Parámetros usados por el “método de la escorrentía pluvial”	18
Tabla 6: Rutas de forzamiento radiativo.....	29
Tabla 7: Ubicación de la microcuenca Mchique	40
Tabla 8: Parámetros geomorfológicos de la microcuenca.....	41
Tabla 9: Características de las estaciones meteorológicas	41
Tabla 10: Modelos climáticos globales representativos para Perú.....	42
Tabla 11: Estaciones de SENAMHI con información regionalizada	42
Tabla 12: Coordenadas de la estación hidrométrica en el río Mchique.....	43
Tabla 13: Características de las estaciones meteorológicas del proyecto VLIR-OUS.....	61
Tabla 14: Resultados de los métodos de extracción en la estación Quilcas (2012)	64
Tabla 15: Precipitación anual en la estación Colpar (2015).....	65
Tabla 16: Coeficiente multiplicador para la corrección del sesgo.....	65
Tabla 17: Resultados “r” y “R ² ” entre VLIR-OUS y PISCO V2.1	66
Tabla 18: Resumen de las precipitaciones multianuales	68
Tabla 19: Formación preliminar de grupos por el método de Ward	70
Tabla 20: Resultados MVR del G1.....	71
Tabla 21: Resultados MVR del G2.....	71
Tabla 22: Resultados de la curva de calibración del río Mchique.....	72
Tabla 23: Peso de las 12 estaciones usadas en la “v-station”	75
Tabla 24: Condiciones iniciales establecidas para modelo HBV	75
Tabla 25: Peso de las estaciones Chacrampa y Cruzpampa en la “v-station”	75
Tabla 26: Parámetros calibrados del modelo HBV	77
Tabla 27: Indicadores de rendimiento para el modelo HBV	78
Tabla 28: Distribución de las coberturas y uso de suelo en la microcuenca	79
Tabla 29: Parámetros calibrados del modelo WEAP	80

Tabla 30: Indicadores de rendimiento del modelo WEAP	81
Tabla 31: Promedio multianual de la precipitación, temperatura y caudales futuros.....	85
Tabla 32: Resumen variación promedio de la precipitación (2020-2040)	86
Tabla 33: Resumen variación promedio de la temperatura (2020-2040)	87
Tabla 34: Resultados variación promedio de los caudales (2020-2040).....	88
Tabla 35: Resumen, variación promedio de las precipitaciones (2041-2050)	90
Tabla 36: Resumen, variación promedio de las temperaturas (2041-2050).....	91
Tabla 37: Resultados variación promedio de los caudales (2041-2050).....	93
Tabla 38: Resumen variación promedio de la precipitación (2051-2099)	94
Tabla 39: Resumen variación promedio de la temperatura (2051-2099)	96
Tabla 40: Resumen variación promedio de los caudales (2051-2099).....	97
Tabla 41: Efectos del cambio climático en los caudales, periodo 2020-2040.....	98
Tabla 42: Efectos del cambio climático en los caudales, periodo 2041-2050.....	99
Tabla 43: Efectos del cambio climático en los caudales, periodo 2051-2099.....	99
Tabla 44: Características del escenario “más crítico”	99
Tabla 45: Características del escenario "menos crítico"	100
Tabla 46: Número de datos faltantes por estaciones	112
Tabla 47: Precipitaciones mensuales de la estación Colpar (2014).....	114
Tabla 48: Precipitación mensual en la estación Tambo (2014).....	115
Tabla 49: Resultados <i>Test</i> de <i>Grubbs</i> , a un nivel de significancia de 0.05	122
Tabla 50: Resultados Test de Mann Kendall.....	124
Tabla 51: Variación en volumen del análisis de sensibilidad en RS MINERVE.....	126
Tabla 52: Datos de mensuales de la humedad del suelo.....	127
Tabla 53: Datos mensuales del coeficiente de cultivo.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo hidrológico, representación cualitativa.....	6
Figura 2: Clasificación de modelos hidrológicos	8
Figura 3: Esquema del modelo HBV	12
Figura 4: Elementos hidrológicos del “método de escorrentía pluvial”	17
Figura 5: Rejilla tridimensional sobre el globo terráqueo	22
Figura 6: Evolución de las resoluciones en los GCM	24
Figura 7: Representación por resolución de un GCM	31
Figura 8: Diferencias del número de estaciones	36
Figura 9: Desarrollo de la metodología	44
Figura 10: Diseño diagrama de cajas.....	47
Figura 11: Métodos de extracción y correlación de datos en la estación Colpar	63
Figura 12: Comparación de la precipitación mensual en la estación Quilcas (2012).....	63
Figura 13: Sobrestimación y subestimación de datos en la estación Colpar (2015)	64
Figura 14: Resultado de la corrección de sesgo en la Estación Cruzpampa.....	66
Figura 15: Precipitaciones anuales - estación Cruzpampa	67
Figura 16: Año hidrológico promedio de las 12 estaciones estudiadas.....	67
Figura 17: Diagrama de cajas de las precipitaciones anuales.....	68
Figura 18: Nivel de agua en la microcuenca Mchique	73
Figura 19: Caudales medidos en la microcuenca Mchique	73
Figura 20: Variación de la precipitación mensual en la estación Cruzpampa.....	74
Figura 21: Calibración de HBV, periodo 04/2014 a 03/2015.....	77
Figura 22: Caudales simulados según el modelo HBV, periodo 1981-2016.....	78
Figura 23: Calibración de WEAP, periodo 04/2014 a 03/2015.....	81
Figura 24: Caudal simulados según el modelo WEAP, periodo 1981-2016.....	81
Figura 25: Precipitación diaria del escenario CNRM-CM5-rcp4.5.....	82
Figura 26: Precipitación anual del escenario CNRM-CM5 - RCP4.5.....	82
Figura 27: Temperatura diaria del escenario CNRM-CM5-rcp4.5	83
Figura 28: Temperatura anual del escenario CNRM-CM5 - RCP4.5	83
Figura 29: Caudales diarios en el escenario CNRM-CM5 - RCP4.5	84

Figura 30: Caudales anuales simulados del CNRM-CM5 - RCP4.5.....	84
Figura 31: Variación de la precipitación en un futuro cercano, CNRM-CM5 - RCP8.5	86
Figura 32: Variación multianual mensual promedio de la precipitación (2020-2040).....	86
Figura 33: Variación de la temperatura en un futuro cercano, CNRM-CM5-RCP8.5	87
Figura 34: Variación multianual mensual promedio de la temperatura (2020-2040)	87
Figura 35: Variación de los caudales en el futuro cercano, CNRM-CM5-RCP8.5.....	88
Figura 36: Variación multianual mensual promedio de caudales – RS MINERVE (2020-2040).....	89
Figura 37: Variación multianual mensual promedio de caudales - WEAP (2020-2040)....	89
Figura 38: Variación de la precipitación en un futuro medio, CNRM-CM5 RCP8.5	90
Figura 39: Variación multianual mensual promedio de las precipitaciones (2041-2050)...	90
Figura 40: Variación de la temperatura en un futuro medio, CNRM-CM5-RCP8.5	91
Figura 41: Variación multianual mensual promedio de la temperatura (2041-2050)	92
Figura 42: Variación de los caudales simulados en un futuro medio, CNRM-CM5 RCP8.5	92
Figura 43: Variación multianual mensual promedio de caudales – RS MINERVE (2041-2050).....	93
Figura 44: Variación multianual mensual promedio de caudales – WEAP (2041-2050) ...	93
Figura 45: Variación de la precipitación en un futuro lejano, CNRM-CM5 - RCP8.5.....	94
Figura 46: Variación multianual mensual promedio de la precipitación (2051-2099).....	95
Figura 47: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CNRM-CM5-RCP8.5.....	95
Figura 48: Variación multianual mensual promedio de la precipitación (2051-2099).....	96
Figura 49: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CNRM-CM5 - RCP8.5.....	97
Figura 50: Variación multianual mensual promedio de caudales – RS MINERVE (2051-2099).....	97
Figura 51: Variación multianual mensual promedio de caudales - WEAP (2051-2099)....	98
Figura 52: Tendencia de los escenarios "más crítico" y "menos crítico"	100
Figura 53: Ubicación de la microcuenca Mchique	109
Figura 54: Ubicación de las estaciones meteorológicas	110
Figura 55: Calibración de las estaciones Davis	111
Figura 56: Descarga de datos hidrométricos	111
Figura 57: Acumulación de sedimento en la estación Cruzpampa.....	111
Figura 58: Presencia de vegetación en la estación Aramachay	112
Figura 59: Comparación de la precipitación mensual en la estación Colpar (2014).....	114

Figura 60: Sobreestimación y subestimación de datos en la estación Tambo (2014)	114
Figura 61: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Quilcas	115
Figura 62: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Tambo	115
Figura 63: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Colpar.....	116
Figura 64: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Chacampa	116
Figura 65: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación IRD Jauja	116
Figura 66: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Masmachique	117
Figura 67: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Molinos	117
Figura 68: Precipitaciones anuales - Estación Quilcas	117
Figura 69: Precipitaciones anuales - Estación Tambo.....	118
Figura 70: Precipitaciones anuales - Estación Colpar	118
Figura 71: Precipitaciones anuales - Estación Chacampa.....	118
Figura 72: Precipitaciones anuales - Estación Cruzpampa.....	119
Figura 73: Precipitaciones anuales - Estación IRD Jauja	119
Figura 74: Precipitaciones anuales - Estación Masmachique.....	119
Figura 75: Precipitaciones anuales - Estación Molinos.....	120
Figura 76: Precipitaciones anuales - Estación Huayao.....	120
Figura 77: Precipitaciones anuales - Estación Ingenio	120
Figura 78: Precipitaciones anuales - Estación Jauja.....	121
Figura 79: Precipitaciones anuales - Estación Santa Ana.....	121
Figura 80: Variación de la precipitación mensual - Estación Chacampa.....	121
Figura 81: Dendrograma.....	122
Figura 82: Índices anuales del vector regional - G1	123
Figura 83: Índices anuales del vector regional - G2.....	123
Figura 84: Caudales usados en la calibración.....	124
Figura 85: Hidrograma de caudales diarios históricos	124
Figura 86: Sección del cauce del rio Mchique	125
Figura 87: Esquema conceptual - modelo HBV	125
Figura 88: Primera simulación - HBV.....	125
Figura 89: Segunda simulación - HBV.....	126
Figura 90: Resultado del parámetro FC=0.05 del RS MINERVE	126
Figura 91: Esquema conceptual - modelo WEAP	127
Figura 92: Mapa de elevaciones de la microcuenca Mchique.....	127
Figura 93: Precipitación diaria del escenario CanESM2-rcp4.5	128

Figura 94: Precipitación anual del escenario CANESM2 - RCP4.5	128
Figura 95: Temperatura diaria del escenario CanESM2-RCP4.5.....	129
Figura 96: Temperatura anual del escenario CANESM2 - RCP4.5	129
Figura 97: Caudal diario en el escenario CANESM2-RCP4.5.....	129
Figura 98: Caudal anual del escenario CANESM2 - RCP4.5	130
Figura 99: Precipitación diaria del escenario CanESM2-rcp8.5	130
Figura 100: Precipitación anual del escenario CANESM2 - RCP8.5	130
Figura 101: Temperatura diaria del escenario CanESM2-RCP8.5.....	131
Figura 102: Temperatura anual del escenario CANESM2 - RCP8.5	131
Figura 103: Caudal diario del escenario CANESM2-RCP8.5	131
Figura 104: Caudales anual del escenario CANESM2 - RCP8.5.....	132
Figura 105: Precipitación diaria del escenario CNRM-CM5-rcp8.5.....	132
Figura 106: Precipitación anual del escenario CNRM-CM5 - RCP8.5.....	132
Figura 107: Temperatura diaria del escenario CNRM-CM5-rcp8.5	133
Figura 108: Temperatura anual del escenario CNRM-CM5 - RCP8.5	133
Figura 109: Caudales diarios del escenario CNRM-CM5 - RCP8.5.....	133
Figura 110: Caudal anual del escenario CNRM-CM5 - RCP8.5	134
Figura 111: Precipitación diaria del escenario MPI-ESM-MR-rcp4.5.....	134
Figura 112: Precipitación anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP4.5.....	134
Figura 113: Temperatura diaria del escenario MPI-ESM-MR-rcp4.5	135
Figura 114: Temperatura anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP4.5	135
Figura 115: Caudales diarios del escenario MPI-ESM-MR - RCP4.5.....	135
Figura 116: Caudal anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP4.5.....	136
Figura 117: Precipitación diaria del escenario MPI-ESM-MR-rcp8.5.....	136
Figura 118: Precipitación anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP8.5.....	136
Figura 119: Temperatura diaria del escenario MPI-ESM-MR-rcp8.5	137
Figura 120: Temperatura anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP8.5	137
Figura 121: Caudales diarios del escenario MPI-ESM-MR - RCP8.5.....	137
Figura 122: Caudal anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP8.5.....	138
Figura 123: Variación de la precipitación en un futuro cercano, CANESM2-RCP4.5.....	138
Figura 124: Variación de la precipitación en un futuro cercano, CANESM2-RCP8.5.....	138
Figura 125: Variación de la precipitación en un futuro cercano, CNRM-CM5-RCP4.5 ..	139
Figura 126: Variación de la precipitación en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP4.5	139
Figura 127: Variación de la precipitación en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP8.5	139

Figura 128: Variación de la temperatura en un futuro cercano, CANESM2-RCP4.5.....	140
Figura 129: Variación de la temperatura en un futuro cercano, CANESM2-RCP8.5.....	140
Figura 130: Variación de la temperatura en un futuro cercano, CNRM-CM5-RCP4.5....	140
Figura 131: Variación de la temperatura en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP4.5.	141
Figura 132: Variación de la temperatura en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP8.5.	141
Figura 133: Variación de los caudales en un futuro cercano, CANESM2-RCP4.5	141
Figura 134: Variación de los caudales en un futuro cercano, CANESM2-RCP8.5	142
Figura 135: Variación de los caudales en un futuro cercano, CNRM-CM5-RCP4.5	142
Figura 136: Variación de los caudales en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP4.5.....	142
Figura 137: Variación de los caudales en un futuro cercano, MPI-ESM-ME-RCP8.5.....	143
Figura 138: Variación de la precipitación en un futuro medio, CANESM2-RCP4.5	143
Figura 139: Variación de la precipitación en un futuro medio, CANESM2 - RCP8.5	143
Figura 140: Variación de la precipitación en un futuro medio, CNRM-CM5 – RCP4.5..	144
Figura 141: Variación de la precipitación en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP4.5	144
Figura 142: Variación de la precipitación en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP8.5	144
Figura 143: Variación de la temperatura en un futuro medio, CANESM2 - RCP4.5	145
Figura 144: Variación de la temperatura en un futuro medio, CANESM2 - RCP8.5	145
Figura 145: Variación de la temperatura en un futuro medio, CNRM-CM5-RCP4.5	145
Figura 146: Variación de la temperatura en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP4.5 .	146
Figura 147: Variación de la temperatura en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP8.5 .	146
Figura 148: Variación de los caudales en un futuro medio, CANESM2 - RCP4.5.....	146
Figura 149: Variación de los caudales en un futuro medio, CANESM2 - RCP8.5.....	147
Figura 150: Variación de los caudales en un futuro medio, CNRM-CM5 – RCP4.5	147
Figura 151: Variación de los caudales en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP4.5	147
Figura 152: Variación de los caudales en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP8.5	148
Figura 153: Variación de la precipitación en un futuro lejano, CANESM2-RCP4.5	148
Figura 154: Variación de la precipitación en un futuro lejano, CANESM2-RCP8.5	148
Figura 155: Variación de la precipitación en un futuro lejano, CNRM-CM5-RCP4.5.....	149
Figura 156: Variación de la precipitación en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP4.5..	149
Figura 157: Variación de la precipitación en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP8.5..	149
Figura 158: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CANESM2-RCP4.5	150
Figura 159: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CANESM2-RCP8.5	150
Figura 160: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CNRM-CM5-RCP4.5.....	150
Figura 161: Variación de la temperatura en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP4.5....	151

Figura 162: Variación de la temperatura en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP8.5....	151
Figura 163: Variación de los caudales en un futuro lejano, CANESM2-RCP4.5.....	151
Figura 164: Variación de los caudales en un futuro lejano, CANESM2-RCP8.5.....	152
Figura 165: Variación de los caudales en un futuro lejano, CNRM-CM5-RCP4.5	152
Figura 166: Variación de los caudales en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP4.5	152
Figura 167: Variación de los caudales en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP8.5	153

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Planos de ubicación	109
ANEXO 2: FOTOS - Trabajo de campo	111
ANEXO 3: Registro de datos en las estaciones VLIR-OUS y SENAMHI.....	112
ANEXO 4: Análisis de datos pluviométricos PISCO	114
ANEXO 5: Análisis exploratorio de datos	122
ANEXO 6: Curva de calibración de caudales - microcuenca Mchique	124
ANEXO 7: Simulación del modelo HBV de RS MINERVE.....	125
ANEXO 8: Simulación del modelo WEAP “metodo de escorrentía pluvial”	127
ANEXO 9: Análisis multianual de la precipitación, temperatura y caudal.....	128
ANEXO 10: Tasa de variación multianual mensual de la precipitación (2020-2040).....	138
ANEXO 11: Variación multianual mensual de la temperatura (2020-2040)	140
ANEXO 12: Tasa de variación multianual mensual de los caudales (2020-2040)	141
ANEXO 13: Tasa de variación multianual mensual de la precipitación (2041-2050).....	143
ANEXO 14: Variación multianual mensual de la temperatura (2041-2050)	145
ANEXO 15: Tasa de variación multianual mensual de los caudales (2041-2050)	146
ANEXO 16: Tasa de variación multianual mensual de la precipitación (2051-2099).....	148
ANEXO 17: Variación multianual mensual de la temperatura (2051-2099)	150
ANEXO 18: Tasa de variación multianual mensual de los caudales (2051-2099)	151

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Diversos estudios realizados sobre el problema del cambio climático, confirman que los ecosistemas muestran sus efectos en las alteraciones del hielo polar, en el deshielo de los glaciares y en las variaciones de los regímenes de lluvia a nivel global. En Perú, estudios como los desarrollados por los Grupos de Trabajo I y II del Cuarto Informe Científico (AR4) del IPCC para América Latina, señalaron que Perú será uno de los países más afectados por las consecuencias del cambio climático (SENAMHI, 2013).

El agua, recurso de mayor importancia para la vida, es un componente del sistema hidrológico; en la actualidad las variaciones que están ocurriendo en este sistema, han provocado la alteración del ciclo hidrológico. Para la comunidad científica el cambio climático global y sus implicaciones sobre las variables de precipitación, temperatura y el nivel del mar, se ha consolidado como un asunto de especial importancia, por lo que busca proveer de predicciones necesarias en la toma de decisiones para la sociedad, la agricultura, el abastecimiento de agua potable, gestión y prevención de riesgo de desastres entre otros.

La microcuenca Mchique, que forma parte de la cuenca del Mantaro, abastece de agua al distrito Sincos el cual cuenta con una población de 4059 pobladores según estadísticas del INEI en el 2017. El aporte de volúmenes de agua es indispensable para el desarrollo de las actividades agropecuarias, poblacionales y principalmente agrícolas, ya que, más del 50 por ciento del área de la microcuenca está relacionada con esta actividad. Estudios realizados en diferentes partes del mundo, mencionan que el crecimiento tanto poblacional y agrícola, hacen probable que las demandas posteriores continúen aumentando, por lo que proyecciones hidrológicas precisas para el suministro futuro de agua son importantes (Lutz *et al.*, 2016).

Los diferentes modelos hidrológicos, son una herramienta para conocer mejor el funcionamiento de los componentes del ciclo hidrológico (IMEFEN, 2018b). Un modelo es usado como una herramienta para la gestión y planeamiento, la mayor comprensión del rol de los componentes del ciclo hidrológico en una determinada cuenca, y extrapolar

potenciales condiciones futuras a partir de condiciones actuales, como base para la modelación de otros procesos, tales como la calidad de agua, erosión, etc.

En este estudio se trabajó con dos modelos hidrológicos, el *Water Evaluation And Planning System* (WEAP) “método de escorrentía pluvial”, muy útil para la realización de evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos (SEI, 2009) y el HBV del RS MINERVE, según Foehn *et al.* (2018), RS MINERVE es una herramienta de *software* para la simulación de formación y propagación de flujos de escorrentía de superficie libre. La simulación con dichos modelos hidrológicos con datos de precipitación y temperatura de CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR en dos escenarios RCP 4.5 y 8.5, tiene como resultado la obtención de caudales futuros; así, poder analizar los efectos del cambio climático. Los modelos climáticos globales o GCMs, son la herramienta más importante para desarrollar el análisis de la evolución futura del clima, mediante la aplicación de técnicas estadísticas.

La estimación futura de la oferta hídrica en la microcuenca Mchique, contribuyen con una mejor gestión de los recursos hídricos por parte de las Autoridades Locales del agua, y al desarrollo de un plan adecuado ante las consecuencias del cambio climático. En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (UNCED), celebrada en Río de Janeiro en 1992, se elaboró la Agenda 21 como modelo para el futuro, el cual, en el capítulo sobre agua dulce (Capítulo 18) reconoció que el conocimiento del ciclo hidrológico en términos de cantidad y calidad, constituye la base esencial para la gestión eficaz de los recursos hídricos. También, reconoció la naturaleza multisectorial del desarrollo de los recursos hídricos, y destacó los usos para el abastecimiento de agua y el saneamiento, la agricultura, la industria, el desarrollo urbano, la generación de energía hidroeléctrica, la pesca continental, el transporte, la recreación, la gestión de tierras bajas y planas, y otras actividades (ONU, 1992).

1.2. ANTECEDENTES

Se han realizado tres estudios anteriores en la microcuenca Mchique, el primero publicado el 2012 por el Bach. Diego Grados Bedoya con la tesis “Estudios de avenidas en las cuencas del Anya y Mchique departamento de Junín, Perú (periodo 2011 – 2012)”, en el cual realizó simulaciones con información pluviométrica diaria registrada en las estaciones Colpar (2004 – 2009) y Chacampa (2004 – 2010) con el objetivo de obtener caudales de avenidas mediante el modelo precipitación – escorrentía HEC-HMS a nivel diario.

Otro estudio, es el realizado por el Bach. Harold Llauca Soto en el 2014 con la tesis “Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas Anya y Mchique, departamento de Junín-Perú”, en el cual determinó la oferta hídrica a partir de la simulación de los caudales diarios, mediante el modelo HEC-HMS (modelo *soil moisture accounting*) en el periodo diciembre del 2011 a marzo del 2012, así como la estimación de la demanda agrícola, para determinar el balance hídrico con el uso del modelo MODSIM.

También, la tesis realizada por el Bach. Anthony Camones Cano en el 2015 titulada “Influencia de la humedad del suelo en la relación precipitación-escorrentía en las cuencas del Anya y Mchique, Junín-Perú”, en el que se usaron los modelos HEC-HMS (*Soil moisture accounting*) y RS MINERVE (HBV) con el objetivo de simular la humedad del suelo y los caudales.

En la presente investigación se realizó el análisis de la oferta hídrica futura de la microcuenca Mchique, mediante los modelos hidrológicos HBV del RS MINERVE y WEAP (método de escorrentía pluvial), con información de PISCO, cuyo control de calidad se realizó con datos del Proyecto VLIR-OUS. Para este análisis se utilizó tres modelos climáticos globales y dos escenarios RCP (3GCMx2RCP).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo principal

- Evaluar modelos en WEAP y RS MINERVE para la proyección hidrológica futura de la microcuenca Mchique – Sincos – Huancayo, mediante el uso de los modelos climáticos globales: CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR para dos escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar de la información de las estaciones meteorológicas del proyecto VLIR-OUS y del producto PISCO de SENAMHI, en el periodo histórico de 1981 al 2016.
- Analizar del comportamiento de las variables de precipitación, temperatura y caudales futuros de los modelos climáticos globales y sus escenarios RCP, en el periodo de 2010 al 2099.

- Calibrar y validar los modelos hidrológicos en HBV de RS MINERVE y de WEAP (“método del escurrimiento de lluvias”) a escala diaria.
- Analizar de los efectos del cambio climático en los caudales para tres periodos, futuro cercano (2010 al 2040), futuro medio (2041 al 2050) y futuro lejano (2051 al 2099).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. CLIMA

Entre las definiciones de clima están que es un “conjunto de los fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un punto cualquiera de la tierra”, otra definición considera el clima como “la serie de estados de la atmósfera por encima de un lugar en sucesión habitual”, o la definida por Cuadrat & Pita (2011) como el “conjunto de tendencias resultantes de condiciones habituales durante un largo periodo, que como mínimo se suele establecer en treinta años”.

En los años 60 y 70 comienzan a desencadenarse a escala mundial continuas anomalías climatológicas de repercusiones socioeconómicas brutales. Tales anomalías, junto con la eclosión de la preocupación medioambiental, desencadenada entre otras cosas por la crisis del petróleo, propician que se vuelvan de nuevo los ojos hacia la necesarias conexiones entre el clima y el resto de los componentes de medio geográfico (Cuadrat & Pita, 2011, p.19).

El clima constituye la expresión de un amplio sistema físico, sumamente complejo y rico de conexiones, cuyo funcionamiento está dominado por los intercambios energéticos. Los distintos elementos de este sistema mantienen fuertes vínculos entre sí, que se articulan unos a otros a través de una amplia gama temporal y espacial de procesos físicos. La naturaleza de estos fenómenos debe contemplarse en el marco del entendimiento de las interrelaciones existentes entre todos los componentes del sistema.

2.2. SISTEMA CLIMÁTICO

Los fenómenos hidrológicos son complejos, no obstante, se pueden representar por medio del concepto “sistema”. Para facilitar la comprensión de los fenómenos que sucede en el clima es conveniente conocer conceptos generales sobre los sistemas. Según Cuadrat & Pita (2011), un sistema puede ser definido como un conjunto estructurado de elementos o variables, interdependientes, con organización interna, que funcionan juntos a través de una combinación regular de conexiones dentro de unos límites definidos.

Otras definiciones, un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo. El ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos componentes son la precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo hidrológico (Chow *et al.*, 2000).

Los componentes del sistema climático son: la atmósfera, los océanos, la biósfera terrestre, los glaciares y capas de hielo y la superficie terrestre.

2.3. CICLO HIDROLÓGICO

Se denomina ciclo hidrológico, al conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado: sólido, líquido o gaseoso, como en su forma: superficial, subterránea, etc. (Villón, 2011). En la Figura 1, se detalla la forma cualitativa del ciclo hidrológico, donde se muestra las diferentes formas y estados en que se presenta el agua.

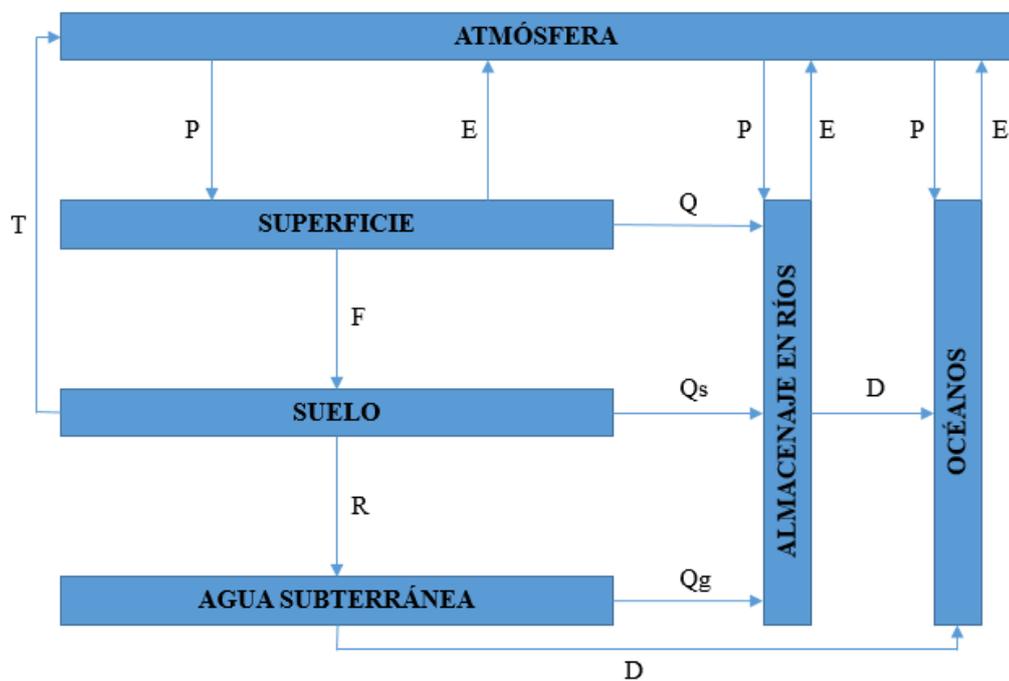


Figura 1: Ciclo hidrológico, representación cualitativa

FUENTE: Villón (2011)

Donde:

E: Evaporación

D: Descarga a los océanos

Q: Escurrimiento superficial

F: Infiltración

Q_s: Escurrimiento superficial

P: Precipitación

Q_g: Escurrimiento subterráneo

T: Transpiración

R: Recarga

El ciclo hidrológico se representa como un sistema. Una definición de sistema hidrológico: Es una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas que operan en ellas internamente y las produce como salidas (Chow *et al.*, 2000).

2.4. MODELOS HIDROLÓGICOS

Representan de forma esquemática un fenómeno hidrometeorológico que ocurre dentro de una cuenca hidrográfica, los cuales pueden ser de forma matemática, a través del análisis de expresiones analíticas (ecuaciones); o física, con la representación de maquetas que reproducen un fenómeno a una escala determinada.

“Existe un esfuerzo en la construcción de modelos que relacionen las entradas y salidas en lugar de llevar a cabo la extremadamente difícil tarea de una representación de los detalles del sistema. [...] un modelo del sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que las conectan” (Chow *et al.*, 2000, p.8). Estas entradas y salidas pueden expresarse como funciones del tiempo, $I(t)$ y $Q(t)$ respectivamente, en donde t pertenece al rango de tiempo T en consideración. El sistema realiza una transformación de la entrada en la salida representada por: $Q(t) = \Omega I(t)$, denominado como “ecuación de transformación” del sistema. El símbolo Ω es una “función de transferencia” entre la entrada y la salida.

2.4.1 Clasificación de modelos hidrológicos

Según Chow *et al.* (2000), los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos categorías: físicos y abstractos. Los modelos físicos representan un sistema en una escala reducida; mientras que los abstractos representan el sistema en forma matemática. La operación del sistema abstracto se describe por medio de un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y salida, las que se representan por un campo aleatorio. Desarrollar un modelo con variables aleatorias que dependen de las tres dimensiones espaciales y del tiempo es una tarea ardua.

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse teniendo en cuenta las formas en las que se lleva a cabo esta simplificación (forma, aleatoriedad y variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos). De la Figura 2, un modelo “determinístico” no considera aleatoriedad, esto quiere decir que una entrada dada produce siempre la misma salida. Un modelo “estocástico” tiene salidas que son por lo menos parcialmente aleatorias. En el

siguiente nivel del árbol en el tratamiento de la variable espacial, se tiene un modelo “determinístico agregado”, donde el sistema es promediado en el espacio o considerando como un punto único sin dimensiones. En contraste, un modelo “determinístico distribuido” considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales. Los modelos estocásticos se clasifican en independientes en el espacio y correlacionados en él, de acuerdo con la influencia que las variables aleatorias tengan entre ellas en diferentes puntos de este (Chow *et al.*, 2000).

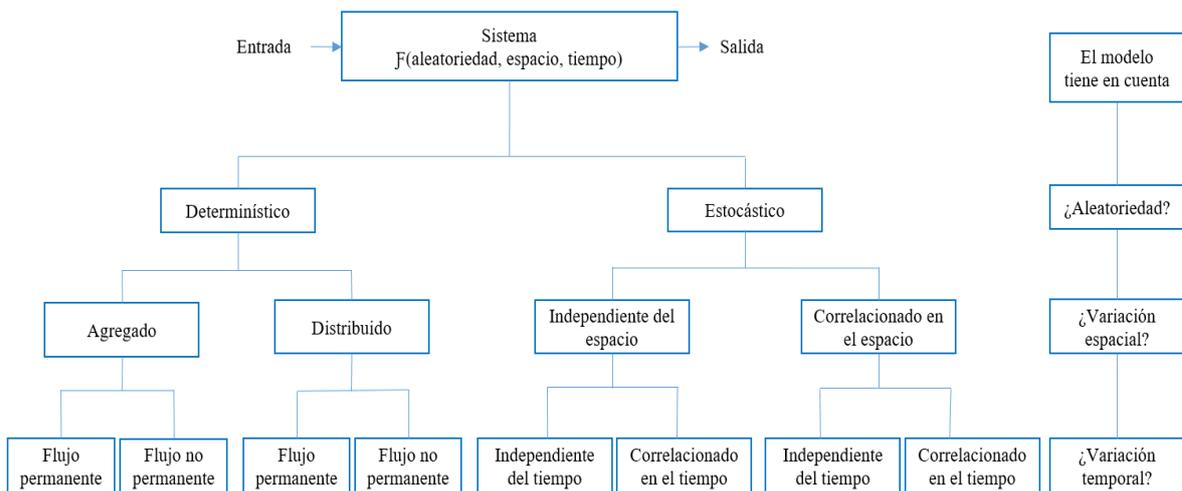


Figura 2: Clasificación de modelos hidrológicos

FUENTE: Chow *et al.* (2000)

En el tercer nivel del árbol se considera la variabilidad temporal. Los modelos determinísticos se clasifican en: de “flujo permanente” (la tasa de flujo no cambia con el tiempo) y de “flujo no permanente”. Los modelos estocásticos siempre tienen salidas que son variables en el tiempo, estos se clasifican en “independientes del tiempo” y correlacionados con él (Chow *et al.*, 2000).

2.4.2 Elección de un modelo hidrológico

Dependiendo de los parámetros que requieran y los resultados a los que se quiera llegar, la elección de un modelo es un desafío para los usuarios. Criterios para la selección de un modelo hidrológico:

- Ser de dominio público y gratuito.
- Ser computacionalmente eficiente, a pesar de la escasa información climatológica.
- Modelar procesos físicos.

Es así que, para la elección de un modelo hidrológico, se debe tener en claro el objetivo al que se quiera llegar mediante la simulación, así también los parámetros disponibles, la facilidad de utilización entre otros factores que conlleven a una representación eficiente del fenómeno.

2.4.3 Función objetivo

Para iniciar el proceso de calibración, se debe definir previamente la función objetivo. Usualmente, definida como una medida de bondad de ajuste (error de balance de masas, coeficiente de correlación, eficiencia de *Nash-Sutcliffe*, etc.) o dependiendo del peso que el investigador asigne a las diferentes medidas de bondad de ajuste, esta tendrá el nombre de función “multiobjetivo”, que es una combinación de estas medidas de bondad. Generalmente no se hace distinción de estas y se toma el término de “función objetivo” para referirse a una función simple o multiobjetivo (IMEFEN, 2018).

Una función multiobjetivo (G), asume las siguientes formas:

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

Donde, F_i son las medidas de bondad de ajuste y w_i son los pesos asignados a cada uno de dichas medidas.

Un buen ajuste del modelo y los datos observados, se logra minimizando la función objetivo. También, esta permite realizar análisis de sensibilidad, al variar un parámetro determinado.

2.4.4 Calibración

Es la mejora selectiva de las estimaciones de los parámetros iniciales por medio de la comparación de los valores simulados con los medidos, según Beven & O’Connell, citados por Canales (2015). Esta operación conlleva a determinar valores de parámetros que minimizan los errores de modelización. La calibración de un modelo, es el proceso por el cual se identifican los valores de sus parámetros, para los cuales la serie de datos simulados se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados (IMEFEN, 2018a). Este proceso se puede realizar de dos formas:

a. Prueba y error

Implica un ajuste manual de parámetros basado en el criterio del investigador. Es el método más utilizado y usualmente el más recomendado.

b. Automática

Optimiza los valores de los parámetros utilizando técnicas numéricas, es un método más rápido y objetivo que el anterior; sin embargo, es numéricamente complejo y presenta problemas en la compensación de errores y en la captura de valores mínimos locales. Algunos ejemplos son: técnicas de escalamiento (*hill-climbing techniques*), recocido simulado (*simulated annealing*), algoritmos genéticos, etc.

En la práctica, es recomendable usar en primera instancia el método de “prueba y error” para conseguir una primera aproximación y luego optimizarla utilizando una calibración automática (IMEFEN, 2018a).

2.4.5 Validación

Operación que se realiza después de la calibración y que es indispensable para la utilización de un modelo hidrológico. Este es un proceso por el cual se acepta el modelo, como un simulador fiable del sistema físico, con el que los resultados obtenidos no son aceptados como verdaderos, sino que su estructura está limpia de errores obvios y lógicos, sugiriendo un buen grado de coherencia entre el sistema físico y el modelo. La validación consiste en evaluar la calidad del modelo sobre un conjunto de datos, en un periodo diferente al tomado en la fase de calibración.

2.5. SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON RS MINERVE

2.5.1 Concepto

Según Foehn *et al.* (2018), RS MINERVE es un *software* para la simulación de formación y propagación de flujos de escorrentía. Modela complejas redes hidrológicas e hidráulicas de acuerdo a un esquema conceptual semidistribuido. Desarrollada por el centro de investigación CREALP y la oficina de ingeniería HydroCosmo S.A., así como otras colaboraciones tal como la Asociación Hydro10, que complementa y mejora su desarrollo. Su distribución es gratuita, siendo utilizado en investigaciones en cuencas en países como Suiza, España, Perú, Brasil, Francia, Nepal entre otros.

Además, de los procesos particulares como la fusión de nieve, el derretimiento de glaciares, el flujo superficial y subterráneo; también, incluyen elementos de control hidráulico como aliviaderos, bombas, entre otros. RS MINERVE, contiene diferentes modelos hidrológicos para el escurrimiento de precipitaciones, como GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J y HBV.

2.5.2 Estación virtual

También denominado “*V-Station*”, permite la distribución espacial de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial), a partir de medidas o estimaciones disponibles de una base de datos observados, con referencia espacial en coordenadas métricas (X, Y, Z). Este objeto está asociado con las coordenadas (x,y,z), normalmente el centro de gravedad de una subcuenca, y cada una requiere información de entrada de sus parámetros y condiciones iniciales (Tabla 1).

Tabla 1: Parámetros y condiciones iniciales de la estación virtual

Objeto	Nombre	Unidades	Descripción	Rango regular
Estación	x, y, z	-	Coordenadas de la estación virtual	-
	Search Radius	m	Radio de búsqueda de la estación virtual	>0
	Nº min. of stations	-	Número mínimo de estaciones utilizadas para la interpolación (prioridad más alta que "Radio de búsqueda")	≥1
	Gradient P	1/m	Gradiente de precipitación	- ^a
	Gradient T	°C/m	Gradiente de temperatura	-0.007 a 0.004
	Gradient ETP	1/m	Gradiente de evapotranspiración	- ^a
	Coeff P	-	Multiplicando el coeficiente de corrección	0.5 a 2
	Coeff T	°C	Sumando el coeficiente de corrección	-2 a 2
	Coefficiente ETP	-	Multiplicando el coeficiente de corrección	0.5 a 2

^a Los gradientes de precipitación y evapotranspiración son función de las condiciones locales. Sus rangos regulares deben ser estimados para cada caso estudiado.

FUENTE: García *et al.* (2018)

RS MINERVE cuenta con dos métodos para la distribución espacial de la precipitación, temperatura y evapotranspiración, que corresponden a:

- a. **Thiessen:** Obtiene la variable meteorológica en la estación virtual, de la estación meteorológica más cercana.
- b. **Sherpard:** Calcula la variable meteorológica en función de la inversa de la distancia cuadrada. El número de estaciones fijadas depende del radio de búsqueda definido.

RS MINERVE, también, realiza cálculos complementarios para la evapotranspiración (ETP), en caso de no contar con valores en la base de datos observados. Estos cálculos son desarrollados directamente en la estación virtual mediante los métodos de *Turc*, *McGuinnes*, *Oudin* y ETP uniforme.

2.5.3 Descripción del modelo HBV

Es uno de los modelos integrados de lluvia-escorrentía de RS MINERVE, y está compuesto por una función de nieve, un reservorio de humedad y dos reservorios de almacenamiento de suelo (superior e inferior), esta estructura se presenta en la Figura 3.

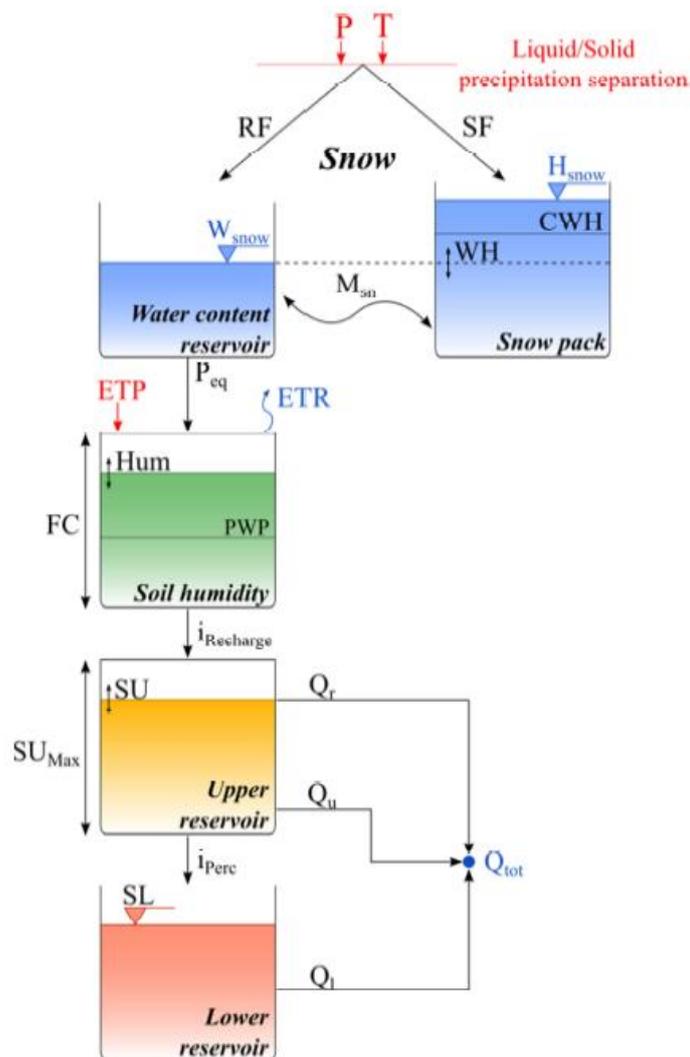


Figura 3: Esquema del modelo HBV

FUENTE: Garcia *et al.* (2018)

Este modelo cuenta con 14 parámetros, ocho relacionados con la precipitación y seis con la temperatura, estos son: CFMax, CFR, CWH, TT, TTInt, TTSM, Beta, FC, PWP, SUmax,

Kr, Ku, Kl y Kperc, detallados en la Tabla 2. El parámetro A (superficie de la cuenca) se supone que es constante. Las condiciones iniciales asociadas al modelo son: SWEIni, WHIni, HumIni, SUIni y SLIni, como se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 2: Parámetros del modelo HBV

Objeto	Nombre	Unidad	Descripción	Rango regular
HBV	A	m ² o km ²	Superficie de la cuenca	>0
	CFMax	mm/°C/d	Factor de fusión	0.5 a 20
	CFR	-	Factor de recongelación	0.05
	CWH	-	Contenido crítico relativo de agua de la capa de nieve	0.1
	TT	°C	Umbral de temperatura de lluvia / nieve.	0 a 3
	TTInt	°C	Intervalo de temperatura para mezclar lluvia / nieve	0 a 3
	TTSM	°C	Temperatura umbral para el derretimiento de la nieve.	0
	Beta	-	Parámetro modelo (coeficiente de forma).	1 a 5
	FC	m	Máxima capacidad de almacenamiento de suelo.	0.05 a 0.65
	PWP	-	Umbral de punto de marchitez permanente del suelo.	0.03 a 1
	SUMax	m	Umbral de nivel de agua del reservorio superior	0 a 0.1
	Kr	1/d	Coefficiente de almacenamiento de flujo superficial	0.05 a 0.5
	Ku	1/d	Coefficiente de almacenamiento interflujo	0.01 a 0.4
	Kl	1/d	Coefficiente de almacenamiento de flujo base	0 a 0.15
Kpert	1/d	Coefficiente de almacenamiento de percolación	0 a 0.8	

FUENTE: Garcia *et al.* (2018)

Las variables climáticas de entrada son la precipitación (P), temperatura (T) y evapotranspiración (ETP). El proceso de cálculo de este modelo comienza con la división de la precipitación en lluvias sólidas y líquidas, cuyos valores están en función de la temperatura.

La descarga total (Q_{tot}) es la suma de tres flujos de salida, como se ve en la ecuación:

$$Q_{tot} = Q_r + Q_u + Q_l$$

Donde:

Qtot: Salida total (L³/T)

Qr: Flujo cerca de la superficie (o flujo de escorrentía) (L³/T)

Qu: Flujo intermedio (o interflujo) (L³/T)

Ql: Flujo base (L³/T)

Tabla 3: Condiciones iniciales del modelo HBV

Objeto	Nombre	Unidad	Descripción	Rango regular
HBV	SWEIni	m	Altura inicial equivalente de agua de nieve	-
	WHIni	-	Contenido relativo inicial de agua en la capa de nieve.	-
	HumIni	m	Humedad inicial	-
	SUIni	m	Nivel inicial de agua del reservorio superior	-
	SLIni	m	Nivel inicial de agua del reservorio inferior	-

FUENTE: Garcia *et al.* (2018)

2.5.4 Indicadores de rendimiento

RS MINERVE cuenta con el objeto “*comparator*”, el cual muestra las variables de descargas y altura del nivel de agua observados y simulados. Este objeto mide la eficiencia del modelo a través de ocho indicadores de rendimiento. Las características de cada uno de estos se describen en la Tabla 4.

Tabla 4: Indicadores de rendimiento

Indicador	Rango de valores	Valor ideal
Nash	$-\infty$ a 1	1
Nash-In	$-\infty$ a 1	1
Coefficiente de correlación de Pearson	-1 a 1	1
Eficiencia Kling-Gupta (KGE)	$-\infty$ a 1	1
Bias Score (BS)	$-\infty$ a 1	1
Error cuadrático medio relativo (RRMSE)	0 a $+\infty$	0
Volumen relativo de sesgo (RVB)	$-\infty$ a $+\infty$	0
Error de pico normalizado (NPE)	$-\infty$ a $+\infty$	0

FUENTE: Garcia *et al.* (2018)

2.6. SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON WEAP

2.6.1 Concepto

Muchas regiones se enfrentan a desafíos en la gestión de recursos hídricos, calidad ambiental y las políticas para el uso sostenible del agua. El Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP) tiene como objetivo incorporar estos valores en una herramienta práctica para la planificación de los recursos hídricos (SEI, 2015).

Según el SEI (2009), WEAP (“*Water Evaluation And Planning*”), desarrollado por *Stockholm Environment Institute’s U.S. Center* (SEI), es una herramienta de *software* que toma un enfoque integrado para la realización de evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos.

WEAP también se distingue por su enfoque integral al simular tanto los componentes naturales (ejemplo: demandas, evapotranspiración, escorrentía, flujo base) como los componentes de infraestructura (ejemplo: embalses, bombeo de agua subterránea) de los sistemas hídricos. Como resultado es una herramienta efectiva para examinar opciones para el desarrollo y gestión de los recursos hídricos, en el que incluye:

- Demandas de agua con prioridades y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso.
- Apoya a la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua con la demanda.
- Incluye varios módulos que permiten integrar WEAP con los modelos de agua subterránea (MODFLOW) y de calidad de agua (QUAL2K). WEAP también ha sido utilizado en conjunción con modelos socio-económicos.

Estas características hacen de WEAP un modelo ideal para realizar estudios de cambio climático, en el que es importante estimar cambios en la oferta y demanda de agua, los que producirán un balance de agua diferente a nivel de cuenca. En resultado es efectiva para examinar opciones para el desarrollo y gestión de los recursos hídricos (SEI, 2019).

2.6.2 Métodos para la simulación de cuencas

Para la simular los procesos de captación de las cuencas o *catchments*, tal como la evapotranspiración, escorrentía, infiltración y las demandas de riego, WEAP dispone de

cinco métodos. Estos son: solo para demandas de irrigación (coeficiente simplificado), de escorrentía pluvial (coeficiente simplificado), de escorrentía pluvial (método de la humedad del suelo), MABIA (FAO 56, dual Kc, diario) y de crecimiento de plantas o PGM. La elección del método depende del nivel de complejidad deseado para representar los procesos de captación y la disponibilidad de datos.

2.6.3 Aplicaciones

Los pasos generales para la aplicación de WEAP incluyen, según la definición del estudio, el límite espacial, los componentes del sistema y la configuración del problema. Según el SEI (2009), el desarrollo consta de las siguientes etapas:

- Definición del estudio: establecimiento del marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
- Búsqueda de información: el cual se da de acuerdo con el tipo de estudio definido, y si una vez montado el modelo hay necesidad de agregar información adicional con datos específicos.
- Desarrollo del modelo: construcción del esquema conceptual, entrada de datos y simulaciones iniciales del modelo para observar su comportamiento preliminar ante posibles inconsistencias y errores.
- Calibración y validación.
- Uso del modelo / generación de escenarios: Explorar los impactos que tendría una serie de supuesto alternativos como políticas futuras, costos, clima, etc.

2.6.4 Método de escorrentía pluvial

Representa la captación con dos capas de suelo, así como el potencial de acumulación de nieve. En la capa superior o también llamado “zona de raíces” se simula la evapotranspiración considerando la lluvia y el riego en tierras agrícolas y no agrícolas, la escorrentía y la escorrentía sub superficial (interflujo), y los cambios en la humedad del suelo. La ruta del flujo base hacia el río y los cambios de humedad del suelo se simulan en la capa inferior o “zona profunda”. También, se cuenta con un módulo de glaciares que se puede activar si es necesario (SEI, 2015).

En este método la percolación más profunda dentro de la cuenca (*catchments*) se puede transmitir directamente a un nodo de agua subterránea, en caso se tenga, creando un enlace de escorrentía / infiltración desde la cuenca hasta el nodo.

Según el SEI (2009), los componentes del balance hidrológico modelados, usando WEAP, son evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía sub superficial (o inter flujo), y flujo de base, como se muestra en la Figura 4.

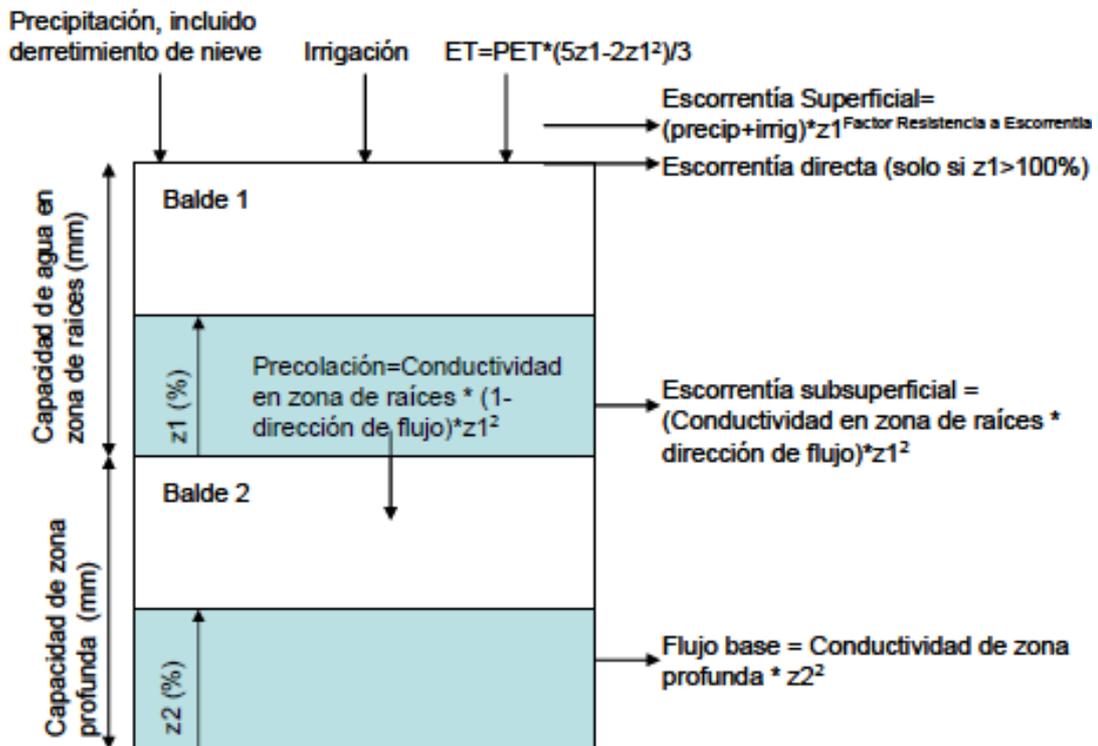


Figura 4: Elementos hidrológicos del "método de escorrentía pluvial"

FUENTE: SEI (2009)

Para la simulación con WEAP se requiere la entrada de datos climatológicos, de cobertura vegetal y adicionalmente de caudales para poder comparar los resultados del modelo y realizar calibraciones, todo ello para cada una de las unidades hidrológicas o *catchments*, definidos a través de procedimientos de delimitación de cuencas.

Conceptualmente, lo que hace WEAP, es convertir las entradas de precipitación en salidas hacia flujos que alimentan los ríos. Este tiene nueve parámetros que influyen en cada uno de los procesos del ciclo del agua, los que se detallan en la Tabla 5.

Matemáticamente, el método de escorrentía pluvial (método de la humedad del suelo), realiza un balance de agua entre las entradas y salidas, cuya diferencia en cada uno de las capas (superior e inferior) representa los cambios en la humedad de cada uno.

Tabla 5: Parámetros usados por el “método de la escorrentía pluvial”

Parámetro	Descripción	Rango regular	Unidad
Área	Área correspondiente a una ramificación, o la proporción del área cubierta por la ramificación anterior	>0	km ²
Coefficiente de cultivo (Kc)	En relación al cultivo de referencia. Para el método de coeficiente simplificado, Kc = 0 significa que el área es doble recortada con otra área. Si es simplemente barbecho, poner mayor que cero.	>0	-
Capacidad de la capa superior del suelo (Sw)	Capacidad efectiva de retención del agua de la capa superior del suelo (“tanque superior”).	>0	mm
Capacidad de la capa profunda del suelo (Dw)	Profundidad de la capa inferior del suelo (“tanque inferior”). Este valor es ignorado si el sitio de demanda tiene un escurrimiento/infiltración en conexión a un nodo de agua subterráneas.	>0	mm
Factor de resistencia a la escorrentía (RRF)	Usado para controlar la respuesta de la escorrentía superficial. Relacionado a factores como índice de área foliar y pendiente del suelo. La escorrentía tenderá a decrecer con los valores más altos del Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF).	0 - 1000	-
Conductividad de la capa superior del suelo (Ks)	Zona radicular (“tanque superior”) tasa de conductividad hidráulica a saturación plena (cuando el almacenamiento relativo Z1 = 1.0), que será fraccionado de acuerdo a dirección preferida de flujo, entre interflujo y flujo hacia capas inferiores del suelo.	-	mm/mes
Conductividad de la capa profunda (Kd)	Tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la capa profunda (“tanque inferior”) a saturación total (cuando el almacenamiento relativo Z2 = 1.0), el cual controla la transmisión del flujo base. El flujo base incrementa a medida que este parámetro aumenta.	>0.1	mm/mes
Dirección de flujo preferencial (f)	Dirección del flujo preferencial: 1.0 = 100% flujo horizontal, 0 = 100% flujo vertical. Usado para la partición del caudal de salida de la capa de la zona de raíces (“tanque superior”) entre el interflujo y caudal de la capa más baja del suelo (“tanque inferior”).	0 - 1	-
Humedad inicial en la capa superior (Z1)	Valor inicial de Z1 al comienzo de la simulación	0 - 100	%
Humedad inicial en la capa profunda (Z2)	Valor inicial de Z2 al comienzo de la simulación	0 - 100	%

FUENTE: SEI (2009)

El balance en la capa superior está compuesto por seis términos referidos al cambio de humedad del suelo, precipitación efectiva (en el que se incluye en riego y el derretimiento de la nieve), evapotranspiración potencial, escorrentía y percolación.

$$Sw_j \frac{dz1_j}{dt} = P_e(t) - PET(t)Kc_j(t) \left(\frac{5z1_j - 2z1_j^2}{3} \right) - P_e(t)z1_j^{\frac{RRF_j}{2}} - f_jK_s z1_j^2 - (1 - f_j)K_s z1_j^2$$

El balance en la capa inferior, está compuesta por tres términos, uno del cambio de humedad del suelo, otro de flujo base y el último de la percolación, como se puede ver en la ecuación:

$$Dw_j \frac{dz2_j}{dt} = (1 - f_j)K_s z1_j^2 - K_d z2_j^2$$

Del balance en las capas se mide el desempeño del modelo, mediante el uso de las medidas de bondad y ajuste, cuyos valores según la literatura clasifican los modelos como muy buenos, buenos, satisfactorios o insatisfactorios.

2.6.5 Calibración

La calibración busca lograr un set de parámetros hidrológicos y operaciones, que permitan obtener una representación de caudales simulados semejantes a los históricos, para lo cual se utilizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo (SEI, 2009). A continuación, se muestra los aspectos metodológicos y prácticos para la calibración del modelo, el cual se realiza en tres etapas:

a. Calibración hidrológica de las cuencas aportantes

Consiste en una calibración hidrológica de las cuencas aportantes o en zonas de régimen natural, asociadas a los ecosistemas que sean relevantes en la cuenca de estudio. En esta primera aproximación se puede establecer factores de calibración generales para toda el área trabajada, los cuales modifican los parámetros de uso de suelo incluyendo, principalmente el coeficiente de cultivo (K_c), la capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw), capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (Dw), factor de resistencia a la escorrentía (RRF), conductividad de zona de raíces (K_s), conductividad de zona profunda (K_d) y la dirección preferencial el flujo (f).

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los simulados normalmente se utiliza en la calibración de modelos hidrológicos los índices de *Nash-Sutcliffe* y el *Bias* (SEI, 2009).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$$

$$Bias = 100 * \frac{[(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o)]}{\bar{Q}_o}$$

Donde $Q_{s,i}$ y $Q_{o,i}$ corresponden a caudales simulados y observados respectivamente, para cada paso tiempo i y n corresponden al número total de pasos de tiempo.

b. Calibración de cuencas intermedias

Al igual que en la zona alta, se realiza la calibración para todas las estaciones contenidas, utilizando las estadísticas para medir la relación entre los caudales simulados y observados. Finalizada esta etapa se procede a “cerrar” el modelo en las estaciones intermedias, pretendiendo así, no arrastrar las desviaciones aceptadas en la sección media hacia la calibración de la parte baja. En el proceso de calibración de las cuencas intermedias y bajas se deben considerar la demanda de agua de los diferentes usuarios (SEI, 2009).

c. Calibración de operaciones de infraestructura

Una vez completada la etapa de calibración hidrológica, se calibra la operación de los embalses y otras obras de infraestructura que se encuentren en la cuenca. Si el embalse está ubicado en la zona de cierre de la cuenca, se realiza una calibración hidrológica y operacional de manera independiente. Se consideran dos variables principales en el proceso de calibración: el volumen almacenado y el total de energía generada (SEI, 2009).

Como aspectos prácticos en la calibración del modelo, se puede hacer uso de los *key assumptions*, que controlan los parámetros de manera independiente en cada uno de los *catchment*. Otra forma de usar los *key assumptions* durante la calibración es creando un nuevo escenario en el cual se asignan nuevos valores a los parámetros de forma que al correr el modelo se pueda observar la diferencia entre los resultados.

2.6.6 Aplicaciones

Entre algunos de los proyectos en los que se ha usado WEAP se tiene:

- “*Water Management Adaptation to the Loss of Glaciers in the Andes of Peru 2008-2009*”, en Perú.
- “*Model developed to estimate climate change impacts on a semi-arid snowmelt dominated basin*”, en Chile.
- “*Effects of climate change on Ecosystem Services in California 2001-2004*”, en California.
- “*Climate change information to effect decision outcomes in the San Francisco Bay Watershed 2004-2006*”, en San Francisco.

2.7. MODELOS CLIMÁTICOS

Según estudios realizados por el IPCC (1997), los procesos climáticos se pueden representar en términos matemáticos basados en las leyes físicas, cuya complejidad del sistema hace que, en la práctica los cálculos con esas ecuaciones matemáticas solo se puedan realizar mediante computadora; es así que, la formulación matemática se realiza en un programa informático al que se denomina “modelo”. Cuando el modelo contiene los componentes del sistema climático que bastan para simular el clima se le denomina “modelo climático”. Los modelos del sistema climático son fundamentalmente diferentes de los modelos puramente estadísticos empleados en algunas ciencias sociales, que se basan solo en correlaciones empíricas y no se apoyan en un conjunto de leyes físicas.

Predecir el clima meses e incluso años por delante es un proceso muy complejo. Por lo que, a medida que su comprensión evolucionó; también, se han ido produciendo modelos matemáticos cada vez más complejos, que proporcionan predicciones mejoradas (WMO, 2017). Todo esto hace necesario el avance y la investigación en el desarrollo de modelos del sistema climático.

2.8. MODELOS CLIMATICOS GLOBALES

También llamados GCM, son modelos numéricos que representan los procesos físicos de la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre. Consideradas como las herramientas más avanzadas, actualmente disponibles para simular la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Los modelos climáticos serán fidedignos solo en la medida en que sean capaces de proporcionar

simulaciones de los patrones de circulación a gran escala y de las variables climáticas, a un nivel diario, anual, estacional, etc. (Avalos *et al.*, 2013).

Los GCM representan el clima usando una rejilla tridimensional sobre el mundo como se ve en la Figura 5. Por lo general con una resolución horizontal entre 250 y 600 km, y de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera, a veces hasta 30 capas en los océanos (IPCC, 2017).

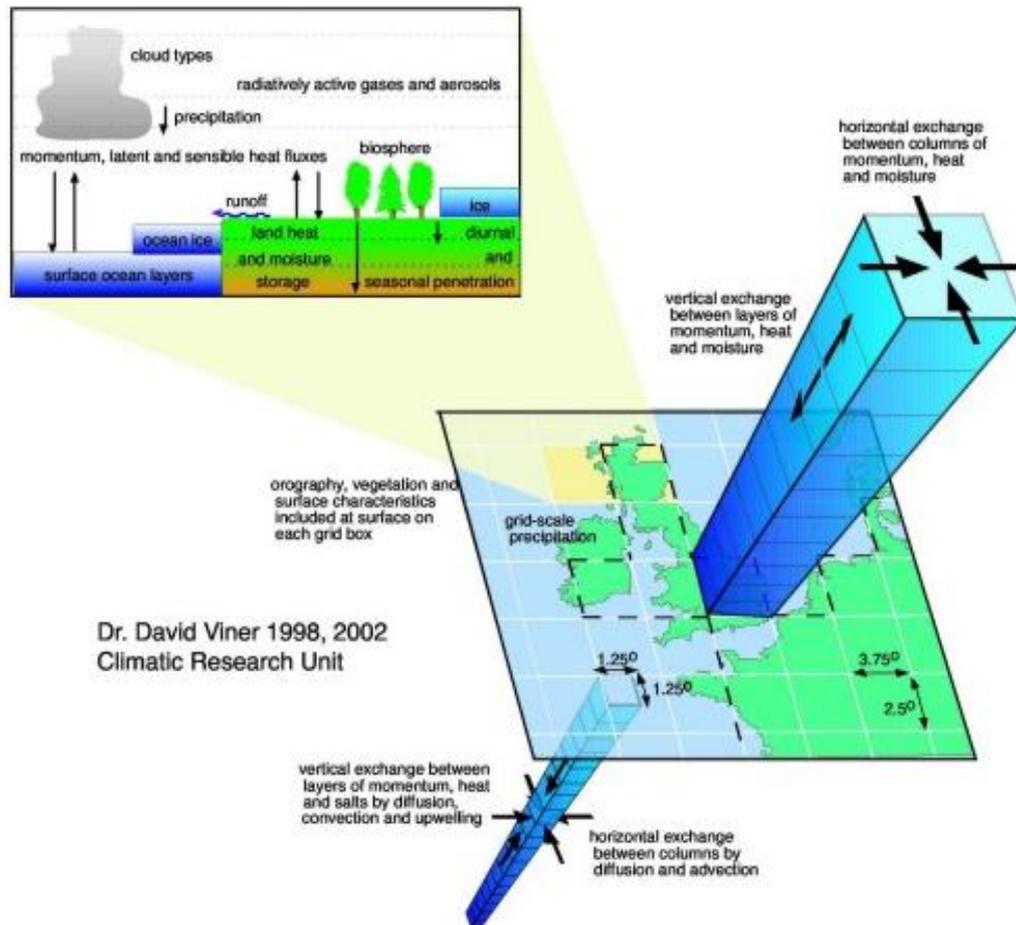


Figura 5: Rejilla tridimensional sobre el globo terráqueo

FUENTE: IPCC (2019)

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), es el que estudia la producción de los modelos climáticos, proporciona una infraestructura para el diagnóstico, validación, intercomparación, documentación y acceso a los datos de los modelos climáticos; actualmente, se encuentra en la fase 6 (CMIP6). Los modelos que se evalúan son del tipo *Earth System Models* (ESMs) o *Atmosphere-Ocean General Circulation Models* (AOGCMs).

2.8.1 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático

Comunmente denominado IPCC, es un organismo internacional encargado de envaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático. Establecido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1988, para proporcionar al mundo una visión científica clara, en cuanto al estado actual del conocimiento sobre el cambio climático y sus posibles impactos ambientales y socioeconómicos. Actualmente, 195 países son miembros.

Los gobiernos participan en el proceso de examen y en las sesiones plenarias, donde se toman las principales decisiones sobre el programa de trabajo y se aceptan, adoptan y aprueban los informes. Los miembros de la Mesa del IPCC, incluido el Presidente, también son elegidos durante las sesiones plenarias (IPCC, 2019).

a. Modelos climáticos globales del IPCC

Miles de científicos de todo el mundo contribuyen a su trabajo, los cuales están formados en diferentes grupos. Estos realizan un análisis exhaustivo del estado del conocimiento científico, técnico y socioeconómico sobre el cambio climático. El resultado de estos análisis son publicados en informes de evaluación denominados por sus siglas en inglés AR (*Assessment Report*).

- Primer reporte de evaluación (FAR): 1990
- Segundo (SAR): 1995 (bases para el protocolo de Kyoto)
- Tercero (TAR): en 2001
- Cuarto (AR4): en 2007 (uso de 23 modelos climáticos globales)
- Quinto (AR5): salio en 2013 – 2014 (uso de mas de 50 modelos climaticos globales)

Actualmente, se encuentra en su sexto ciclo de evaluación, durante este tiempo el Panel producirá tres informes especiales, un informe de metodología sobre los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y el Sexto Informe de Evaluación (AR6), que comprenderá tres contribuciones del grupo de trabajo, y un informe de síntesis. Todo ello finalizará en la primera mitad del 2022.

b. Evolución de las resoluciones en los modelo climáticos

Este proceso se puede ver en la Figura 6. En el último trabajo publicado (AR5), la resolución horizontal máxima de los modelos climáticos globales fue de 70 km, hasta 90 capas en la atmósfera y 60 en el océano (León, 2018), lo que permite tener información más detallada del lugar de estudio.

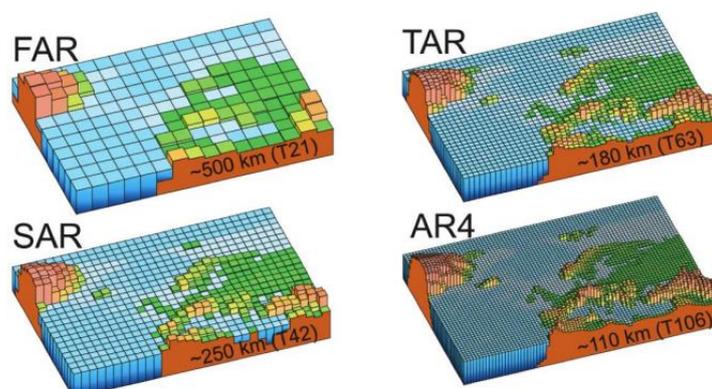


Figura 6: Evolución de las resoluciones en los GCM

FUENTE: Junquas *et al.* (2014)

c. Simulaciones de los modelos del IPCC

Esta información está disponible a través del programa *World climate Research Program* (WCRP) / *Coupled Model Intercomparison Project*, fase 5 (CMIP5); cuyo objetivo es evaluar el realismo de los modelos, mediante la comparación entre las simulaciones del pasado y las observaciones disponibles. El WCRP/CMIP5 también, pone a disposición simulaciones futuras: de corto plazo (hasta 2035, que pueden servir para predicciones decadales) y de largo plazo (alrededor del 2100, que sirven de proyecciones para variables climatológicas).

d. Limitaciones

Dos puntos esenciales: la falta de datos observados (ejemplo Amazonía, Andes); ya que, las simulaciones del clima reciente son realizadas con condiciones iniciales calculadas a partir de las observaciones actuales disponibles; y las proyecciones futuras son condicionados al escenario de emisiones escogido como forzante y la capacidad del modelo en reproducir el “clima actual” y el “clima perturbado” (Junquas *et al.*, 2014)

2.8.2 Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), comprende un nuevo conjunto de experimentos coordinados de modelos climáticos, cuyo objetivo es comprender mejor estos pasados, presentes y futuros que surgen de la variabilidad natural, no forzada o en respuesta a los cambios en el forzamiento radiativo en un contexto de múltiples modelos (WCRP, 2019).

En el marco del Programa Mundial de Investigación sobre el Clima (WCRP), el Grupo de Trabajo sobre Modelado Acoplado (WGCM), estableció el Proyecto de Intercomparación de Modelo Acoplado (CMIP) como un protocolo experimental estándar para estudiar la producción de modelos de circulación general acoplados a la atmósfera-océano (AOGCM). CMIP proporciona una infraestructura basada en la comunidad para el diagnóstico, validación, intercomparación, documentación y acceso a datos del modelo climático. En la quinta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5), este proporcionará un contexto de múltiples modelos para:

- Evaluar mecanismos responsables de las diferencias de modelos en las retroalimentaciones poco entendidas asociadas con el ciclo del carbono y con las nubes.
- Examinar la “previsibilidad” del clima y explorar la capacidad de los modelos para predecir el clima en diferentes escalas de tiempo.
- Determinar por qué los modelos forzados de manera similar producen un rango de respuestas (CMIP5, 2019).

Los modelos con los que trabaja CMIP5 van desde simples a complejos, para conseguir resultados en la proyección de los cambios climáticos. También, el uso de modelos integrales y del sistema tierra resultan ser un elemento fundamental de las proyecciones del sistema climático (Stocker *et al.*, 2013).

Importante señalar que en el marco de la Quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas se utilizó un nuevo conjunto de escenarios, denominados trayectorias de concentración representativas (León, 2018).

2.8.3 Quinto informe de evaluación

La decisión de preparar un Quinto Informe de Evaluación (AR5) fue tomada por los miembros del IPCC en su 28ª reunión (09-10 de abril, 2008, Budapest, Hungría). Se realizó otra (13-17 de julio de 2009, Venecia, Italia) para desarrollar el alcance y el esbozo del AR5. Los perfiles resultantes de las tres contribuciones de los grupos de trabajo al AR5 fueron aprobados por el IPCC en Bali en su 31ª reunión (26-29 de octubre de 2009).

Estos materiales publicados, en la página del IPCC, comprenden la evaluación científica y técnica completa del cambio climático en tres volúmenes, uno para cada uno de los grupos de trabajo del IPCC y un informe de síntesis.

a. Grupo de Trabajo I

El informe publicado por este grupo “Cambio climático 2013: la base de la ciencia física”, consideró los cambios pasados y futuros en el sistema climático, como la temperatura de la tierra y el océano, la precipitación, el hielo y los glaciares, el aumento del nivel del mar, las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, la acidificación de océanos y el presupuesto energético. También, evaluó los GCM, la respuesta del sistema climático y la influencia humana en el cambio climático (UNFCCC, 2017).

b. Grupo de Trabajo II

Desarrolló el informe sobre “Cambio climático 2014: impactos, adaptaciones y vulnerabilidad”, tuvo como consideraciones los impactos en los ecosistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos, causados en las últimas décadas. Evaluó como los patrones de riesgos y beneficios potenciales se modificaron debido al cambio climático, y analizó como los impactos y riesgos pueden ser reducidos y manejados a través de la adaptación y mitigación. La información se consideró por sectores (recursos hídricos, ecosistemas, alimentos y bosques, sistemas costeros, industria, salud humana) y regiones (UNFCCC, 2017).

c. Grupo de Trabajo III

Tuvo como tema el “Cambio climático 2014: mitigación”, para lo cual tomó en cuenta los aspectos científicos, tecnológicos, ambientales, económicos y sociales de la mitigación. Evaluó las tendencias de las emisiones de gases de efecto invernadero, las políticas de

mitigación y las vías de mitigación a largo plazo con diversos sectores, que comprenden el suministro de energía, el transporte, los edificios, la industria, la agricultura (uso de suelo) y los asentamientos (UNFCCC, 2017).

d. Síntesis

Además, de los tres informes presentados se desarrolló un cuarto denominado “Cambio climático 2014: informe de síntesis”, el cual integra las conclusiones de las tres contribuciones mencionadas del Quinto informe de evaluación del IPCC (UNFCCC, 2017). Estos informes fueron aprobados el 2013 y 2014.

2.8.4 Escenarios para la investigación climática

Los escenarios describen líneas evolutivas plausibles de las condiciones climáticas y otros aspectos del futuro, principalmente relacionados con aspectos socio-económicos y las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles asociados (CIIFEN, 2014).

Trabajar con escenarios no es predecir el futuro, sino entender las incertidumbres con el fin de llegar a decisiones que sean robustas en una amplia gama de posibles futuros. Para la mejor comprensión de las complejas interacciones del sistema climático terrestre, los ecosistemas y las actividades humanas; la comunidad científica desarrolla y utiliza escenarios. Este término se refiere a una descripción coherente, internamente consistente y convincente de posibles estados futuros del mundo (Armenta *et al.*, 2014). Los tipos de escenarios más importantes son:

a. De emisión

Describen posibles emisiones futuras de GEI, aerosoles y usos de suelo. Incluyen también, otros factores de cambio, como patrones y ritmo de crecimiento económico, cambio demográfico, tecnología, política y otros importantes para la evaluación de impactos. No reflejan fluctuaciones a “corto plazo”, tales como ciclos económicos o ciclos de mercado; el énfasis está en el “largo plazo”, para evaluar la respuesta lenta del sistema climático.

b. Climáticos

Son representaciones de posibles estados futuros del clima (temperatura, precipitación y otros fenómenos climatológicos). Proporcionan la mayor parte de la información utilizada en estudios de impacto climático.

c. Medioambientales

Estos hacen hincapié en factores ambientales distintos del clima que, pueden ser independientes del cambio climático. Estos son la disponibilidad de agua y su calidad a nivel de cuencas, variaciones en el nivel del mar debido a factores geológicos, características del suelo y uso, y condiciones locales de la atmósfera que influyen en la calidad del aire.

d. De vulnerabilidad

El Quinto Informe del IPCC se basa en escenarios que por primera vez, exploran estrategias de mitigación en adición a los escenarios tradicionales “sin políticas climáticas”. La información primaria sobre posibles cambios climáticos debido al aumento de la concentración de GEI, de origen antropogénico, procede de los diferentes Modelos de Circulación General atmósfera – océano (AOCGM) integrados con escenarios alternativos de emisión RCP (en español, vías de concentración representativas).

Los modelos usados en el CMIP5, simulan cambios basados en un conjunto de escenarios de forzamientos antropogénicos (Stocker *et al.*, 2013).

2.8.5 Nuevos escenarios del IPCC

Los escenarios con los que se trabajó en el informe AR4, no incluían iniciativas climáticas adicionales (aplicación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) o en los objetivos de emisión del Protocolo de Kyoto); ya que, las emisiones de gases de efecto invernadero se ven directamente afectadas por políticas no vinculadas al cambio climático y encaminadas a muchos otros fines (Stocker *et al.*, 2013). Los informes TAR y AR4 estuvieron basados sobre escenarios socio-económicos, denominados SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*), clasificados en A1 (grupos A1T, A1B y A1FI), A2, B1 y B2. Por el contrario los escenarios RCPs del AR5, denominadas “trayectorias de concentración representativas” o “Vías Representativas de Concentración”, incluyen medidas políticas implícitas encaminadas a la mitigación.

2.8.6 Forzamiento radiativo

Significa cualquier cambio en la radiación entrante o saliente de un sistema climático. Un forzante positivo tiende a calentar el sistema (más energía recibida que la emitida), mientras que uno negativo lo enfría (más energía perdida que recibida).

Según el informe AR5, el forzamiento radiativo se define como la variación del flujo descendente neto (onda corta mas onda larga) en la tropopausa, tras permitir que las temperaturas estratosféricas se ajusten hasta alcanzar el equilibrio radiativo, mientras que se mantiene fijas las otras variables de estado, como las temperaturas troposféricas, el vapor de agua y la cubierta de nubes (Stocker *et al.*, 2013).

2.8.7 Trayectorias de concentración representativas

También denominadas “Vías Representativas de Concentración” (RCPs – *Representative Concentration Pathways*), son rutas prescritas de los gases de efecto invernadero (GEI) y las concentraciones de aerosoles, junto con el cambio en el uso de la tierra.

Tabla 6: Rutas de forzamiento radiativo

Nombre	Forzamiento Radiativo	Concentración	Forma de itinerario
RCP8.5	>8.5 W/m ² en 2100	>~1370 CO ₂ -eq en 2100	En aumento
RCP6.0	Estabilización en ~6 W/m ² a partir de 2100	~850 CO ₂ -eq (estabilización, a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
RCP4.5	Estabilización en ~4.5 W/m ² a partir de 2100	~650 CO ₂ -eq (estabilización, a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
RCP2.6	Máximo a ~3 W/m ² antes de 2100; disminución posterior	Máximo a ~490 CO ₂ -eq antes de 2100; disminución posterior	Culminación seguida de disminución

FUENTE: CIIFEN (2014)

Los escenarios RCPs están basados en la evolución del forzamiento radiativo que producen al 2100 y son en total cuatro, nombrados de acuerdo al forzamiento (RCP2.6 W/m², RCP4.5 W/m², RCP6.0 W/m² y RCP8.5 W/m²). En la Tabla 6 se detallan sus características.

a. RCP 2.6

Representa un escenario de mitigación, cuyo objetivo es limitar el calentamiento global a menos de 2 °C a fin del siglo XXI, esto se alcanzará si el forzamiento radiativo hacia el año 2100 llega a tener valores menores de 3 W/m². Medida que requiere de tecnologías de almacenamiento y captura de carbono (“*Carbón Capture and Storage - CCS*”) y disminución de emisiones de bioenergías, gas natural, petróleo y carbono a partir del año 2020.

b. RCP 4.5

Llamado también escenario de estabilización, en el que para el 2100 el forzamiento radiativo es de 4.5 W/m^2 . Alcanzar este objetivo, implica la implementación de políticas climáticas, que incluyen la penalización del uso de carbono, tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CCS). En este escenario las emisiones de GEI llegan a su máximo alrededor del 2040, luego comienzan a bajar hasta el 2080, cuando se estabilizan.

c. RCP 6.0

En este escenario, las emisiones de gases de efecto invernadero y cambios en el uso de suelo se traducen en un forzamiento radiativo de 6 W/m^2 en el 2100, según Masui *et al.* citado por CIIFEN (2014). Para llegar a tal objetivo, se requiere disminuciones significativas de emisiones a partir del 2060, que se logran a través de la imposición de políticas climáticas, que limiten las emisiones vía precios y tecnología de CCS.

d. RCP 8.5

Este escenario, representa una vía en la que las emisiones y las concentraciones son altas. Sus principales supuestos socio-económicos incluyen alto crecimiento poblacional, relativamente bajo crecimiento de PBI, con tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética. Esto lleva a una importante demanda energética y consecuente incremento de emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario no se implementan políticas de cambio climático.

2.9. DOWNSCALING

Los nuevos modelos climáticos globales o GCMs pueden llegar a tener resoluciones entre los 70 km, por lo que proporcionan buenos resultados en las simulaciones de las variables climáticas a gran escala espacial. Sin embargo, no son capaces de resolver procesos de una escala inferior y de incorporar características locales, tales como factores geográficos, topográficos, distribución tierra-agua o tipos de vegetación, lo que los hace inapropiados para la mayoría de estudios de impacto climático. Para estudiar el clima de una región y sus impactos a partir de las simulaciones globales, es necesario una reducción de escala o Downscaling, cuya resolución debe estar en el orden de 10 a 50 km (Junquas *et al.*, 2014).

Considerando que el cambio climático es global por naturaleza, el punto de partida para la evaluación de sus impactos son los GCMs. Sin embargo, su evaluación exige datos sobre el clima con una mayor resolución espacial de lo que pueden proporcionar estos (Avalos *et al.*, 2013). Los métodos de *downscaling* son:

2.9.1 Dinámico

Se realiza mediante modelos climáticos regionales (RCM) o modelos de área limitada (LAM). Estos utilizan condiciones de contorno laterales y a gran escala de los GCM para producir salidas de mayor resolución (Fowler *et al.*, 2007). Esta técnica es una de las más utilizadas para obtener información más detallada, para lo cual es necesario forzar al Modelo Climático Regional con un GCM.

Los GCM representan descripciones de la atmósfera-océano-hielo marino en una cuadrícula horizontal con una distancia típica entre 150 km y 300 km, mientras que en los MCR la atmósfera es representada en una cuadrícula de mayor resolución, entre 20 km y 50 km (Avalos *et al.*, 2013). El modelo climático global (GCM), crea un clima futuro cuadrículado con cobertura espacial grueso ($\sim 2^\circ \times 2.5^\circ$) y temporal (3-6 h).

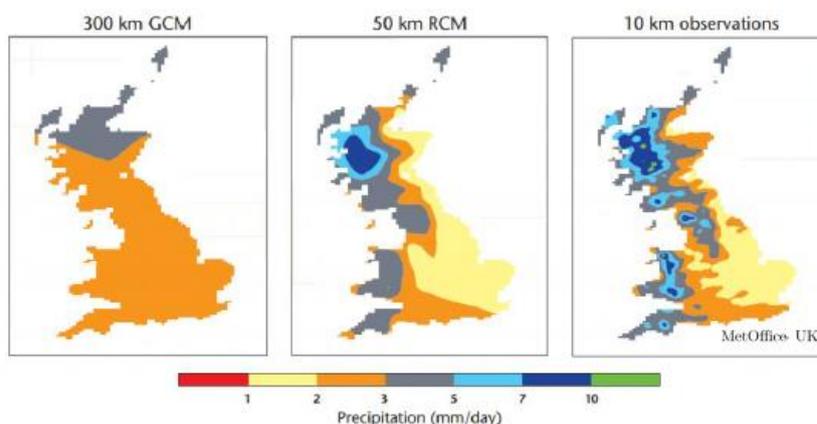


Figura 7: Representación por resolución de un GCM

FUENTE: León (2018)

Con el *downscaling* dinámico se encuentra mayores detalles locales: física apropiada, interfases de topografía tierra/agua, áreas urbanas (centros poblados), patrones de precipitación, aumento de la salida temporal (~ 1 h). Sin embargo, la modelación dinámica del clima regional requiere de intensos recursos (computacionales y personal especializado) que no todos los países disponen, ante lo cual en años recientes algunos centros mundiales de investigación del clima han implementado técnicas para obtener mayor resolución de los GCM para periodos de tiempo definidos o “time-slice” (Avalos *et al.*, 2013). En la Figura 7,

se puede ver las diferencias en el downscaling dinámico para Reino Unido por un modelo climático global, un modelo climático regional y datos observados.

2.9.2 Estadístico

Método que consiste en la determinación de regresiones estadísticas entre las variables promedio de gran escala en la grilla del GCM y las observaciones puntuales (Avalos *et al.*, 2013). Esta técnica supone que la relación entre las variables climáticas a gran escala (predictores-x) y la variable real medida (predictando-y) siempre será la misma. Al conocer esta relación por el clima actual, se puede conocer las proyecciones del clima futuro. Este método es útil en ambientes heterogéneos con fisiografía compleja (ejemplo: montañas, islas, etc.).

Se puede aplicar, rápidamente, a varios GCM para producir una variedad de escenarios climáticos, pero tiene varias advertencias, como el que supone un sesgo constante a lo largo del tiempo. En el segundo lugar, los factores de cambio sólo escalan la media, máximos y mínimos de las variables climáticas, ignorando el cambio en la variabilidad y asumiendo que el patrón espacial del clima se mantendrá constante (Fowler *et al.*, 2007).

Esencialmente, el clima regional se considera condicionado por el estado climático a gran escala, en la forma $R = F(X)$ donde, R representa la variable climática local que se está reduciendo a escala, X es el conjunto de grandes dimensiones escalar las variables climáticas y F es una función que relaciona los dos y se establece típicamente entrenando y validando los modelos usando observaciones puntuales o datos de re análisis. Esta relación puede expresarse como una función estocástica y/o determinística entre las variables atmosféricas a gran escala (predictores) y las variables climáticas locales o regionales (predictandos).

La ventaja de este método es su bajo costo computacional, mientras que su desventaja, es el supuesto que la relación estadística encontrada en el presente, se mantiene para los diferentes escenarios futuros (estacionariedad).

Algunas técnicas de *downscaling* estadísticos usadas en diferentes proyectos científicos son: las trabajadas por los europeos como el “*Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions*” (STARDEX), el “*Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales*” (ENSEMBLES - Primer programa nacional de generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España, coordinado por el AEMET), Programa coordinado para la generación de escenarios regionalizados de

cambio climático: Regionalización estadística (ESTCENA); a nivel nacional en el proyecto “Regionalización estadística de escenarios climáticos en Perú”, coordinado por el proyecto AMICAF – SENAMHI (FIC, 2019).

2.9.3 Selección de modelos

Los GCMs elegidos para un determinado estudio, serán aquellos que representan mejor los procesos físicos (ejemplo, la precipitación). Para hacer un estudio y análisis de proyecciones climáticas en una determinada región, no debe hacerse con un solo modelo, tampoco con el promedio del conjunto de modelos, sino que es necesario hacer una selección de modelos a partir de sus capacidades a simular la realidad, en la región de análisis (Junquas *et al.*, 2014).

2.10. PRECIPITACIÓN

2.10.1 Definición

La precipitación es toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo [...] desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica, la precipitación es la fuente primaria de agua de la superficie terrestre, y sus mediciones y análisis, forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua (Villón, 2011).

Según Cuadrat & Pita (2011), “el término precipitación, expresa todas las formas de humedad caídas directamente sobre el suelo en estado líquido o sólido, aunque solo la lluvia y la nieve desprendidas de las masas nubosas contribuyen de modo significativo a los totales pluviométricos” (p.135).

“Desde el punto de vista de ingeniería, son necesarios tres parámetros para definir completamente una precipitación: su duración, intensidad y frecuencia” (Mejía, 2012).

2.10.2 Agua precipitable

Las nubes son la principal fuente de precipitación, pero no todas ellas llegan a la superficie, esta agua precipitable, formada por diminutas gotitas y cristales de hielo, deben crecer lo suficiente de tal manera vencer las corrientes de aire ascendentes que las mantiene en suspensión (Cuadrat & Pita, 2011). “La cantidad de humedad contenida en una columna atmosférica se conoce con el nombre de agua precipitable” (Chow *et al.*, 2000).

2.10.3 Medición

La precipitación se mide en términos de lámina de agua, que indica la altura del agua que se acumularía en una superficie horizontal, si la precipitación permaneciera donde cayó, esta se expresa comúnmente en milímetros (Villón, 2011). Los aparatos de medición son los pluviógrafos y pluviómetros, clasificados de acuerdo con el registro de las precipitaciones.

La cuantificación y posterior análisis, es de gran importancia en el diseño de obras de infraestructura hidráulica, por lo que es necesario conocer diferentes tipos de medición y métodos de análisis de los datos, de esta manera contar con información exacta para su utilización respectiva.

“La forma más común y la que mayor interés tiene en la ingeniería, es la lluvia que viene a ser la causa de los más importantes fenómenos hidrológicos y su cuantificación correcta es uno de los desafíos que el hidrólogo o ingeniero enfrenta” (Mejía, 2012, p.97).

2.10.4 Limitaciones

Disponer de una importante red de pluviómetros, permite obtener una idea representativa de la distribución espacial de la precipitación. Es evidente que los errores al estimar los promedios del agua caída aumentan cuando el número de observatorios es insuficiente, y con tendencia a incrementar cuando las precipitaciones son aún mayores (Cuadrat & Pita, 2011).

La precipitación, es una variable importante para entender distintos procesos hidrológicos, modelamiento de cuencas, monitoreo de sequías e inundaciones y recarga de acuíferos. A pesar de que los pluviómetros ofrecen una acertada información acerca de la cantidad y la frecuencia de las lluvias; sin embargo, no posibilitan una adecuada cobertura espacial (Aybar *et al.*, 2017).

Una alternativa valiosa para mejorar los vacíos de información pluviométrica en muchas partes del mundo, es el uso de productos satelitales de libre disponibilidad para estimaciones de lluvias, como: el *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMN)*, el *National Oceanic and Atmospheric Administration's Climate Prediction Center morphing technique (CMORPH)*, el *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN)* y el *Global Precipitation Measurement (GPM)*.

2.10.5 PISCO

La baja densidad de estaciones meteorológicas en el país, hace necesario la utilización de procedimientos alternativos, para así generar información en sitios no instrumentados. Ante este inconveniente SENAMHI ha generado la base de datos PISCO - *Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations* (Lavado *et al.*, 2017).

Desarrollada por SENAMHI desde el 2013 y creada a través de su Dirección de Hidrología (DHI); PISCO es una base de datos hidroclimáticos, a una escala espacial de ~5 km, disponibles en la página web del SENAMHI en formato NETCDF, y que cuenta con información desde enero de 1981 hasta diciembre del 2016.

PISCO fue desarrollado tomando como covariable la base de datos global del proyecto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), el cual es una mezcla de datos provenientes de sensores remotos, modelos y datos provenientes de estaciones terrenas. CHIRPS fue desarrollada por un grupo de investigación en hidroclimatológica, que a nivel mundial han trabajado con información satelital de precipitación, para construir bases de datos con buena resolución espacial y temporal.

La metodología que siguió SENAMHI para la generación de “PISCO precipitación diaria” (PISCOpd) y mensual (PISCOpm), fue:

- Control de calidad de la información pluviométrica.
- Análisis exploratorio (AE) de la información satelital.
- Mezcla de datos basado en técnicas geo estadísticas (mensual) y determinísticas (diaria).

Se recomienda que para estudios climáticos (cambio climático, fenómeno El Niño, análisis de tendencia, etc.) se tiene que hacer uso complementario de observaciones pluviométricas disponibles en el ámbito de estudio, con el control de calidad lo más riguroso posible para un contraste con datos de PISCO (Lavado *et al.*, 2017).

Las limitaciones de la base de datos PISCO, es que la precisión de la predicción espacial temporal de las precipitaciones, es más fiable en los lugares donde se cuente con información de pluviómetros. Según Lavado *et al.* (2019), el número de estaciones deseadas para cubrir

todo el territorio nacional sería de 1976, en la actualidad SENAMHI solo cuenta con 427, cubriendo el 21.6 por ciento del territorio nacional. Ver diferencias en la Figura 8.

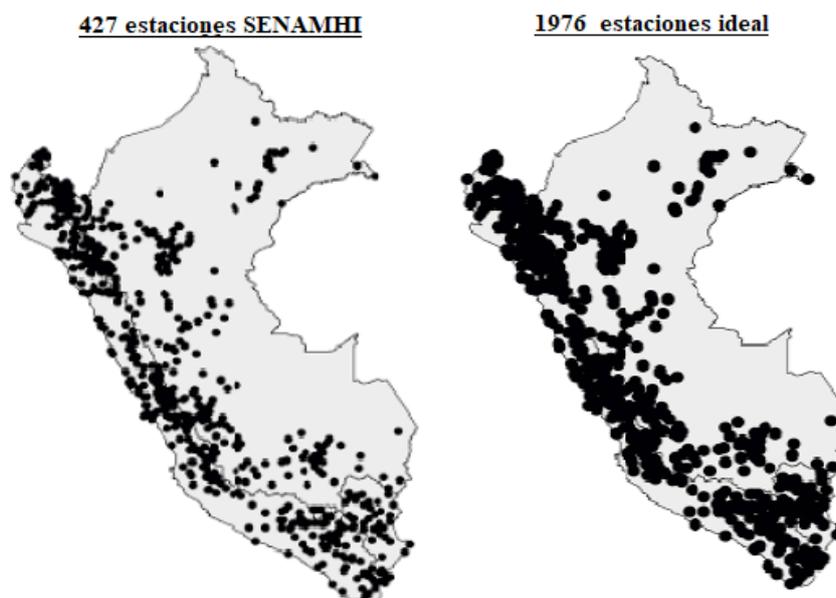


Figura 8: Diferencias del número de estaciones

FUENTE: Lavado *et al.* (2019)

Utilizado, actualmente con éxito, por SENAMHI en la calibración de modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía, para el pronóstico de caudales a corto plazo (DHI), elaboración de los Sistemas de Observación de Inundaciones (SONICS), monitoreo decario de precipitación (MIDAS), elaboración de los mapas de umbrales de precipitaciones extremas a nivel nacional, mapas hidroclimáticos de cuencas, vigilancia nacional de sequías, entre otros (Aybar *et al.*, 2017).

2.10.6 Variabilidad de la precipitación en la cuenca Mantaro

Debido a la compleja distribución espacial que exhiben las lluvias en la región andina, así como su elevada variabilidad temporal, la tendencia de la precipitación en la cuenca del Mantaro no muestra un comportamiento definido. Sin embargo, predomina un patrón de disminución de lluvias a lo largo de la cuenca, acompañadas con la pérdida en la intensidad e incremento del número de días secos consecutivos (SENAMHI, 2012).

La distribución temporal de la precipitación en la cuenca del río Mantaro como promedio, se inicia para toda la cuenca en julio y se incrementan gradualmente entre agosto y setiembre, haciéndose más significativas a partir de octubre hasta alcanzar valores máximos en febrero. Las máximas precipitaciones ocurren en enero, febrero y marzo; mientras que a inicios de

abril la precipitación disminuye bruscamente, para luego alcanzar valores mínimos en junio. El 83 por ciento de la precipitación anual ocurre entre octubre y abril, de los cuales el 48 por ciento están distribuidos casi equitativamente entre enero, febrero y marzo (IGP, 2005).

2.11. OFERTA HÍDRICA

Está directamente asociada a la disponibilidad de agua que el ciclo hidrológico provee en un periodo y lugar dado. Según la ANA (2013), la oferta hídrica son todos los recursos hídricos en régimen natural, “considerados como aquellos procedentes de las precipitaciones que no se han evapotranspirado y que pueden estar circulando por los cauces en forma superficial, infiltrado en el terreno formando acuíferos, y que constituyen los recursos subterráneos o almacenados en lagos, lagunas o embalses artificiales”.

De acuerdo con la ANA (2019), se define los recursos hídricos como “las aguas contenidas o que discurren en las lagunas, ríos, nevados, glaciares, ensenadas, manantiales; el agua subterránea residual, medicinal, geotermal, atmosférica, la proveniente de la desalación del agua de mar, entre otros. También son los bienes asociados al agua como los cauces de los ríos, las playas, los lechos, las riberas, etc.”. Otra definición, “son recursos disponibles o potencialmente disponibles, en un periodo de tiempo dados, apropiados para satisfacer una demanda identificable” (WMO, 2012).

Según la Resolución Jefatural N° 090-2016-ANA, resuelve la aprobación de los Términos de referencia comunes del contenido hídrico que deberían cumplirse en la elaboración de los estudios ambientales, el cálculo de la oferta hídrica es en base a modelos matemáticos, determinísticos o estocásticos los cuales estarán calibrados con información hidrometeorológica o hidrogeológica consistente y confiable, y de acuerdo al planeamiento hidráulico y captaciones consideradas, en la cuenca regulada o no.

2.12. CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático se refiere a una variación estadísticamente significativa tanto en el estado medio del clima como en su variabilidad, que persiste durante un periodo prolongado (típicamente décadas o más). El cambio climático puede deberse a procesos como cambios persistentes en la atmósfera o cambios en el uso de la tierra (WMO, 2017).

Otra definición es la que se da en la Convención de la Naciones Unidas sobre el Cambio climático, que refiere en el Artículo 1 lo siguiente: “por cambio climático se entiende un

cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables” (ONU, 1992, p.4).

Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial impulsada principalmente por el crecimiento económico y demográfico. De 2000 a 2010 las emisiones fueron las más altas de la historia, llevando a concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso a niveles sin precedentes en al menos los últimos 800.000 años, lo que lleva a una absorción de energía por el sistema climático (IPCC, 2014).

La variación en la cantidad y distribución de lluvia, deshielo de glaciares, etc. se verá reflejada en la duración, intensidad y periodicidad de sequías e inundaciones las que; además, están relacionadas con la calidad del agua. Una consecuencia de estos cambios es que el ciclo hidrológico podría verse alterado en un mediano plazo. Los probables cambios en la precipitación de las cuencas hidrográficas, podrían afectar en las actividades humanas como la agricultura.

2.12.1. Variabilidad climática

Se define como variaciones en el estado medio y otras estadísticas del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de los eventos climáticos individuales. El término "variabilidad climática" se utiliza a menudo para indicar las desviaciones de las estadísticas climáticas durante un período de tiempo determinado (por ejemplo, un mes, una estación o un año) en comparación con las estadísticas a largo plazo para el mismo período calendario. La variabilidad climática se mide por estas desviaciones, que generalmente se denominan anomalías (WMO, 2017).

2.12.2. Diferencia entre cambio climático y variabilidad del clima

La “variabilidad climática” describe una serie de condiciones meteorológicas que promediadas, definen el clima de una región. En algunos lugares o regiones del mundo esta variabilidad puede ser escasa. Sin embargo, en otros sitios o durante otros periodos de tiempo, las condiciones pueden variar ampliamente, pasando de temperaturas muy frías a muy cálidas, o de un tiempo húmedo a un tiempo muy seco, mostrando por lo tanto una gran variabilidad. Cuando se da en cierta medida este tipo de situación, los habitantes de la región son conscientes de esa variabilidad y es una situación previsible.

Por el contrario, a veces se produce un fenómeno o una serie de fenómenos nunca antes registrados o experimentados, como la excepcional estación de huracanes en el Atlántico de 2005. Incluso esta situación pueda ser parte de la variabilidad natural del clima. Si no se produce una estación de este tipo en los próximos 30 años, se considerará retrospectivamente como excepcional, pero no como un presagio de cambios. Únicamente una serie persistente de fenómenos poco frecuentes estudiados en el contexto de los parámetros climáticos regionales puede sugerir que se ha producido un cambio climático.

2.12.3. Posibles consecuencias del cambio climático en el Perú

Afecta en su mayoría a las comunidades y familias pobres, más aún considerando que el Perú es uno de los países más vulnerables al cambio climático, debido a la repercusión de fenómenos hidrometeorológicos relacionados con el fenómeno de El Niño y su mega diversidad climática. Los regímenes de precipitaciones que a través de los años se han alterado, generan incertidumbre en las comunidades, no solo en la zona de estudio, sino también otras como las alto andinas, que dependen de la lluvia para sembrar y cosechar. En todas las actividades de los seres humanos el agua es el recurso central que soporta la vida y las actividades socioeconómicas asociadas a una cuenca.

Hacia el 2050 la tierra quedará completamente destruida por el cambio climático, se prevé que la temperatura media del Ártico sufrirá un aumento entre 3 a 5 grados centígrados en los próximos 30 años. La investigación realizada por 250 especialistas internacionales, indican que la única solución para revertir este escenario es mediante la reducción drástica de las emisiones a la atmósfera en 40 por ciento en el 2020 y 70 por ciento en el 2050 (PNUMA, 2019).

Teniendo como marco la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático – COP20, el SENAMHI presentó el reporte del tiempo para el 21 de diciembre del 2050, que tiene como consecuencia, inundaciones, sequías y fenómenos El Niño que sería uno de los más devastadores de la historia (SENAMHI, 2019).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1 Descripción de la zona de estudio

a. Ubicación

La investigación se realizó en la microcuenca experimental del río Mchique, que forma parte de la cuenca del Mantaro. Con una superficie de 28.29 km², está comprendida entre los 75.45° a 75.38° de longitud y de 11.97° a 11.86° de latitud, como se puede ver en el mapa de la Figura 53 (ANEXO 1). En la Tabla 7, se detalla la ubicación política.

Tabla 7: Ubicación de la microcuenca Mchique

Cuenca	Departamento	Provincia	Distrito
Mchique	Junín	Jauja	Sincos

b. Características geomorfológicas de la microcuenca

Cada una de estos resultados para la microcuenca Mchique se puede ver en la Tabla 8. Valores como 1.05 de la relación de elongación, muestra que es de relieve poco pronunciado, 2.89 del coeficiente de compacidad, representa la irregularidad de la forma de la microcuenca y lo alargada que es, 1.52 de la frecuencia de corriente, indica que no tiene buen drenaje, otra característica es el coeficiente de torrencialidad de 36.1, el cual corresponde a una buena capacidad de evacuar el escurrimiento, al igual que el anterior este depende de la cantidad de corrientes de primer orden que posea.

3.1.2 Información pluviométrica histórica

Se trabajó con la base de datos PISCO de SENAMHI; el cual, contiene información en resoluciones de 5 km y 10 km por grilla; con datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, a escala temporal diaria y mensual. Se realizó la descarga de información para cuatro puntos de estaciones SENAMHI y ocho puntos de estaciones del proyecto VLIR-OUS, para un periodo de estudio desde enero 1981 a diciembre del 2016 a

un nivel temporal diario. En la Tabla 9, se describe el detalle de cada uno de los puntos de estación donde se descargó los datos PISCO.

Tabla 8: Parámetros geomorfológicos de la microcuenca

	Parámetro	Valor
De relieve	Área de la cuenca	28.29 km ²
	Perímetro	54.57 km
	Pendiente de la cuenca	21.54%
	Altitud media	3827 m s.n.m.
	Altitud máxima	4248 m s.n.m.
	Altitud mínima	3271 m s.n.m.
	Rectángulo equivalente - lado menor	1.08 km
	Rectángulo equivalente - lado mayor	26.21 km
De forma	Coefficiente de masividad	0.76 m/km ²
	Coefficiente de compacidad	2.89
	Relación de elongación	1.05
	Relación de circularidad	0.12
	Factor forma	0.14
De drenaje	Longitud del cauce principal	14.22 km
	Pendiente equivalente constante del cauce principal	2.12%
	Orden de la cuenca	3
	Frecuencia de corriente	1.52
	Densidad de drenaje	1.63 km/km ²
	Extensión media del escurrimiento	0.15 km
	Coefficiente de Torrencialidad	36.1
	Relación de bifurcación	2.45
Tiempo de concentración	5.35 h	

FUENTE: Camones (2015)

Tabla 9: Características de las estaciones meteorológicas

Estación	Longitud	Latitud	Altitud	Tipo	Institución
1. Colpar	-75.25	-11.92	3509	Davis	VLIR - OUS
2. Quilcas	-75.26	-11.93	3355	Davis	VLIR - OUS
3. Tambo	-75.23	-11.92	4097	Hobo	VLIR - OUS
4. Chacrapampa	-75.4	-11.9	3619	Davis	VLIR - OUS
5. Cruzpampa	-75.43	-11.92	3894	Davis	VLIR - OUS
6. IRD jauja	-75.4	-11.86	3330	Davis	VLIR - OUS
7. Masmachique	-75.3	-11.74	3697	Hobo	VLIR - OUS
8. Molinos	-75.45	-11.74	3427	Davis	VLIR - OUS
9. Huayao	-75.338	-12.038	3360	Convencional	SENAMHI
10. Ingenio	-75.288	-11.881	3390	Convencional	SENAMHI
11. Jauja	-75.487	-11.787	3378	Convencional	SENAMHI
12. Santa Ana	-75.221	-12.004	3295	Convencional	SENAMHI

3.1.3 Información pluviométrica futura

El Proyecto *Analysis & Mapping of Impacts under Climate Change for Adaptation & Food Security* (AMICAF) en Perú, ofrece proyecciones climáticas futuras en 265, 105 y 102 puntos de estación, con datos para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperaturas mínimas respectivamente (SENAMHI, 2014).

Esta información regionalizada por SENAMHI, dispone para un periodo histórico desde 1971 al 2000 y un periodo futuro desde 2010 al 2099, de tres modelos climáticos globales (CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR) y dos escenarios RCPs (RCP4.5 y RCP8.5), en total seis proyecciones posibles; resultados a los que llegaron por medio de la metodología de “regionalización estadística o *downscaling* estadístico”. En esta investigación se trabajó con data de precipitación y temperaturas de estas seis proyecciones futuras, para los periodos del 1981 al 2000 y 2010 al 2099. En las Tablas 10 y 11 se puede ver las características de los GCM y la información con la que cuenta.

Tabla 10: Modelos climáticos globales representativos para Perú

MCG requerido para cada estación	Instituto	Resolución	Referencia
CanESM2	CCCMA	2.8° x 2.8°	(Chylek et al, 2011)
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	1.4° x 1.4°	(Voltaire et al, 2013)
MPI-ESM-MR	MPI	1.8° x 1.8°	(Jungclaus et al, 2010; Raddatz et al, 2007)

FUENTE: SENAMHI (2014)

Tabla 11: Estaciones de SENAMHI con información regionalizada

Estación	Variable	Periodo histórico	Periodo futuro	Coordenadas		Datos	Escenarios
				Latitud	Longitud		
Jauja	Pp, Tmax,	1971 - 2000	2010 - 2099	-11.7831	-75.4794	Diaria	RCP4.5 y RCP8.5
Ingenio	Pp	1971 - 2000	2010 - 2099	-11.8808	-75.2878	Diaria	RCP4.5 y RCP8.5
Huayao	Pp, Tmax, Tmin	1971 - 2000	2010 - 2099	-12.0383	-75.3228	Diaria	RCP4.5 y RCP8.5

3.1.4 Información hidrométrica

La estación hidrométrica del proyecto VLIR-UOS en la microcuenca Mchique, realiza mediciones de caudal mediante uso de un correntómetro, entre una y dos veces al mes. Para los niveles de agua del río Mchique tiene instalado una regla limnimétrica y registradores

automáticos, un *Datalogger* y un *Diver*, cuya ubicación se puede ver en la Figura 54 del ANEXO 1. Se trabajó con información desde diciembre del 2011 hasta diciembre del 2016, en concordancia con el periodo de datos de precipitación de PISCO. En la Tabla 12, se muestra las coordenadas de la estación hidrométrica.

Tabla 12: Coordenadas de la estación hidrométrica en el río Mchique

Estación	Longitud	Latitud	Altura
Mchique	-75.4	-11.889	3350 msnm.

La información de caudales medios diarios observados, ha sido usado para la evaluación del desempeño de los modelos hidrológicos mediante la calibración y validación.

3.2. METODOLOGÍA

En la Figura 9, se muestra la metodología que se empleó en la presente investigación. El trabajo consistió primero en un análisis de la información meteorológica de las estaciones VLIR-OUS; ante el vacío de información se trabajó con datos PISCO de SENAMHI, a los que luego de la corrección de sesgo se hizo los respectivos análisis estadísticos y gráficos para comprobar el estado de los datos y su comportamiento. Con la “curva de calibración” del río Mchique se obtuvo los caudales observados, los que se usó para la calibración y validación los modelos hidrológicos HBV del RS MINERVE y WEAP “método de escurrimiento pluvial”. Se analizó los datos futuros de precipitación y temperatura de los modelos climáticos globales CANESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR en dos escenarios RCP4.5 y RCP8.5, se calculó los caudales mediante los modelos hidrológicos. Finalmente se analizó los efectos del cambio climático en la oferta hídrica de la microcuenca Mchique en tres periodos futuros: cercano, medio y lejano.

3.2.1 Evaluación del registro de datos de las estaciones VLIR-OUS

a. Trabajo de campo

Se realizó dos viajes que tuvo como objetivo el reconocimiento del área estudiada, la evaluación del estado de las estaciones meteorológicas, descarga de información y encuesta a los pobladores sobre su percepción de cambios en la precipitación. En el caso de las Davis, fueron desmontadas por el técnico para su limpieza y calibración.

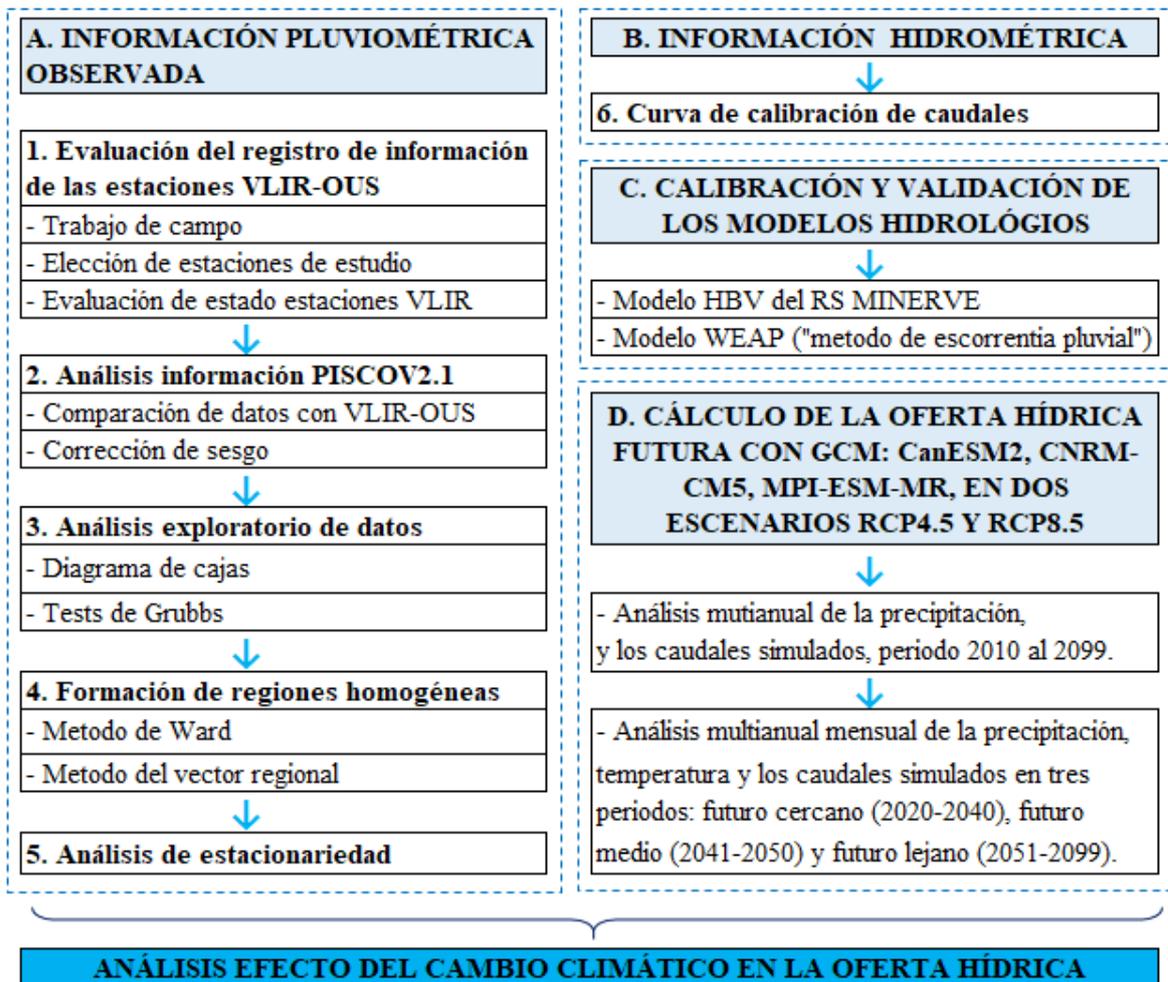


Figura 9: Desarrollo de la metodología

b. Elección de las estaciones

El proyecto VLIR-OUS/UNALM, cuenta con 13 estaciones meteorológicas en la parte central de la cuenca del Mantaro, de los cuales se evaluó ocho, seis de la marca Davis y dos de Hobo. También, se usó cuatro más de SENAMHI; todo esto con el fin de poder evaluar la precipitación dentro y alrededor de la microcuenca Mchique.

c. Registro de información de las estaciones VLIR-OUS

Se analizó los datos pluviométricos desde diciembre del 2011 a diciembre del 2016, con excepción de Colpar y Molinos, que inician en noviembre del 2004 y febrero del 2007, respectivamente. Las estaciones Davis registran información de cada 30 minutos, mientras que las Hobo cada 15 minutos, estas fueron trabajadas en precipitaciones diarias y mensuales. Los resultados en cada una se resumieron en tablas, observándose si cuentan con información completa.

La disponibilidad de datos es determinante en la selección del modelo a utilizar y en su capacidad predictiva; respecto a este último si la data es pobre, trabajar con modelos complejos no la mejora, ya que esta será también baja. Si la data es de alta resolución pero el modelo es simple, entonces dicha capacidad también es baja, pues la simplicidad del modelo introduce incertidumbre (IMEFEN, 2018).

3.2.2 Análisis información PISCO

El estudio de las proyecciones climáticas requiere de una amplia base de información, de tal manera que las relaciones entre la precipitación, temperaturas y caudales que se proyectarán a futuro puedan interpretarse mejor. Ante la falta de estaciones meteorológicas y de estaciones con largos periodos de información en el Perú, SENAMHI ha puesto a disposición el producto PISCO, que es una alternativa para superar estos inconvenientes, con el que se puede generar información en sitios no instrumentados. La información grillada PISCO, sirve para el desarrollo de estudios de modelamiento hidrológico, análisis de sequías, balance hídrico, cambio climático entre otros. Esta ya está calibrada y validada con estaciones de SENAMHI; no obstante, en puntos de descarga diferentes se debe hacer uso complementario de datos pluviométricos disponibles en el ámbito de estudio, para un adecuado control de calidad (Aybar *et al.*, 2017).

a. Descarga de datos

La precipitación se trabajó con la versión PISCO v2.1 y las temperaturas máximas y mínimas con PISCO v1.1, para un periodo desde 1981 al 2016, cuya información está en formato NETCDF. Para su utilización se realizó la descarga de datos mediante la herramienta R Studio, trasladando la información grillada a los puntos de estación mediante el método de “inverso a la distancia cuadrada”; también se hace una comparación mensual con extracción de datos mediante el método de “estación más cercana”. Para ver la efectividad de la representación de los datos pluviométricos de PISCO, se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de correlación de *Pearson* (r).

b. Corrección de sesgo en la precipitación

La precipitación es una variable climática de gran importancia y la disponibilidad de información de alta resolución y de buena calidad es esencial (Asurza *et al.*, 2018). En este contexto, se trabajó con el método de corrección de sesgo (*bias correction*) denominado

“*Linear scaling*” (LS), el cual corrige la precipitación con un multiplicador, lo que resulta en un mejor ajuste de los resultados, su fórmula es el siguiente:

$$P_{cor,m,d} = P_{raw,m,d} * \frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{raw,m})}$$

Donde $P_{cor,m,d}$ es la precipitación corregida en el d th día del m th mes, y $P_{raw,m,d}$ es la precipitación observada en el d th día del m th mes. $\mu(\cdot)$ representa la expectativa del operador ($P_{obs,m}$ representa el valor medio de la precipitación observada en el mes “ m ” dado).

El desarrollo de productos grillados de precipitación permite obtener una estimación aproximada mas no exacta en zonas no cubiertas y de difícil acceso (especialmente en zonas altas y montañosas), siempre y cuando estos hayan sido previamente validados en comparación con estaciones en tierra (Asurza, 2017).

c. Análisis de la información pluviométrica

Los datos de precipitación de PISCO v2.1 corregidos, fueron trabajados a nivel anual, para ver las fluctuaciones que tuvo en el periodo 1981 al 2016; también, se observó el comportamiento del año hidrológico en cada una de las estaciones, a través del promedio multianual mensual.

3.2.3 Análisis exploratorio de datos pluviométricos

Con el objetivo de tener información de calidad y que cumpla los requerimientos para la aplicación de los métodos a realizar, se trabajó en la detección de datos atípicos (*outliers*). Para lo cual, se emplearon técnicas gráficas y estadísticas, con los que se visualizaron las relaciones existentes de los datos pluviométricos. También, se realizó un análisis de homogeneidad de las estaciones mediante el *Clustering* y el Método del Vector Regional; y un análisis de estacionariedad con Mann Kendall.

a. Diagrama de cajas

Esta técnica ofrece una clara visualización de la extensión de los datos, y en particular se puede observar la mediana, la magnitud de la variabilidad y cualquier valor atípico (Boddy & Smith, 2009). También llamada *boxplot*, su distribución a través de cuartiles proporciona una visión general de los datos, apreciándose una simetría (asimetría) al estar (no estar) Q2 en el centro del rango inter cuartil (Q3-Q1). Los intervalos de confianza de 5 y 95 por ciento

son indicados con barras de error en la caja. Aquellos valores que caen fuera de estos son candidatos de ser *outliers* (Iglewicz & Hoaglin, 1993). Ver diagrama en la Figura 10.

Límite para el intervalo de confianza al 95 por ciento:

$$\frac{x - Q3}{Q3 - Q1} > Ls$$

Límite para el intervalo de confianza al 5 por ciento:

$$\frac{Q1 - x}{Q3 - Q1} > Li$$

$$Li = Q1 - (Q3 - Q1) * 1.5$$

$$Ls = Q3 + (Q3 - Q1) * 1.5$$

Donde Li, Ls es el valor crítico en la regla de *boxplot*, x es el punto fuera del límite más alto o más bajo y Qi = cuartil i-esimo.

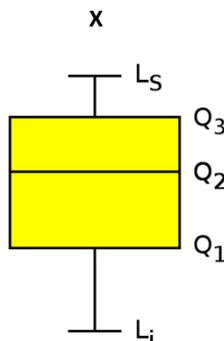


Figura 10: Diseño diagrama de cajas

b. Test de Grubbs para detección de outliers

Según Boddy & Smith (2009), la prueba de *Grubbs* es aplicable a situaciones claramente especificadas en las hipótesis, como un posible valor atípico en un conjunto de datos que normalmente se distribuyen.

Recomendado por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (*Environmental Protection Agency – EPA*), como un *test* estadístico para *outliers* (EPA, 1992). Los datos son clasificados en orden ascendente y se calcula la media y la desviación típica. Aquellos puntos más altos o más bajos pueden ser declarados estadísticamente como un *outlier*. Según Barnett & Lewis (1994), matemáticamente:

El estadístico Z para el valor más pequeño es:

$$Z = \frac{\bar{X} - X_1}{s}$$

El estadístico Z para el valor más grande es:

$$Z = \frac{X_n - \bar{X}}{s}$$

Donde s es la desviación típica.

El estadístico Z, también denominado G es comparado con un valor crítico de Z o G crítico según el tamaño de la muestra y el nivel de significación “ α ” seleccionado. Si Z es más grande que el Z crítico, la hipótesis nula es rechazada y la conclusión es que el dato bajo consideración es un *outlier*.

Un valor atípico se define, como una observación que no se ajusta al patrón del resto de los datos o de patrón de conjuntos de datos anteriores (Boddy & Smith, 2009). Este *test* se utiliza para identificar valores atípicos mas no para retirarlos, esto se dará una vez se confirme con fenómenos anormales ocurridos o no.

c. Formación de regiones homogéneas

La formación de regiones homogéneas o regionalización, permite el agrupamiento de estaciones meteorológicas en regiones climáticamente homogéneas, basándose en un determinado parámetro meteorológico (típicamente temperatura y precipitación). Resulta que para distintos propósitos es conveniente dividir espacialmente la climatología de una variable en un número de áreas cuasi-homogéneas respecto a su variabilidad temporal (Bettolli *et al.*, 2010).

El objetivo de las regiones homogéneas, es agrupar citios dentro de las cuales las características del lugar sean lo más similares posible. Existen tipos de algoritmos de agrupamiento como el jerárquico (método de *Ward*), no jerárquico (k-means), entre otros. Se usó el algoritmo de agrupación por jerarquías, donde los *clustering* se crean de manera que tengan un orden predeterminado, es decir una jerarquía; estas pueden ser por dos formas:

- Método divisivo: parte suponiendo que todas las observaciones pertenecen a un único grupo, que luego se dividen en dos grupos menos similares, esto se repite sucesivamente en cada grupo.

- Método aglomerativo o HAC: donde a cada observación se le asigna su propio *cluster* (grupo); luego se calcula la distancia (o similitud) entre cada uno de los *clusters*, se encuentra el par más cercano y se combinan en uno, se repite este proceso hasta que todos los elementos queden agrupados en uno solo.

Se trabajó con la agrupación por jerarquías mediante el método aglomerativo con la herramienta InfoStat, donde luego de designar a cada observación como un *cluster*, la distancia entre cada uno se calculó usando la función Euclidiana (otras funciones son: Manhattan, Minkowski, etc.), donde los más similares se fusionan en uno. Luego la matriz se actualizó para especificar la distancia (o similitud) entre los diferentes *clusters* con el método de *Ward*, la fusión da como resultado un aumento mínimo de la pérdida de información a través de la suma de cuadrados del error (ESS). Este proceso se repite hasta que quede un solo grupo (Jimenez, 2018).

Matemáticamente, el método de Ward se expresa según las siguientes ecuaciones. Si X_{ijk} denota el valor de la variable k en la observación j que pertenece al grupo i . Se define:

Error de la suma de los cuadrados (ESS):

$$ESS = \sum_i \sum_j \sum_k |X_{ijk} - \bar{X}_{i.k}|^2$$

La suma de todas las variables y todas las unidades dentro de cada grupo, se compara con las observaciones individuales para cada variable con las medias del grupo para esa variable. Si el ESS es pequeño, entonces se tiene un grupo de unidades similares.

Distancia entre unidades con el vector de observación “x” y “y”:

$$D_{12} = \sqrt{\frac{2 * |k| * |l|}{|k| + |l|}} * \|\bar{x} - \bar{y}\|$$

Dónde: X_1, X_2, X_k (observaciones del *cluster* 1), Y_1, Y_2, Y_l (observaciones del *cluster* 2) y $\|\cdot\|$ (norma euclidiana).

d. Método del vector regional

El Vector Regional (MVR) es un método de cálculo orientado a tres tareas definidas: análisis y síntesis, la homogenización y la extensión-completación de datos pluviométricos. La hipótesis fundamental consiste en asumir que, para una misma zona climática sometida a un

mismo régimen de precipitaciones, los totales pluviométricos anuales son seudoproporcionales, con una pequeña variación aleatoria cada año, debida a la repartición de lluvias dentro de la zona (Espinoza, 2005).

El principal fundamento del MVR, es elaborar una estación ficticia que sea una “especie promedio de todas las estaciones de la zona”, con la cual se comparan cada una de las estaciones. Para calcular la “estación vector”, el MVR emplea el método de Mínimos Cuadrados para encontrar los índices pluviométricos regionales anuales “ Z_i ” y la precipitación media extendida “ P_j ”. Esto se logra al minimizar la sumatoria de la expresión siguiente:

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

Donde, “ i ” es el índice del año, “ j ” el índice de estación, N el número de años y M el número de estaciones. P_{ij} es la precipitación anual en la estación j el año i , P_j es la precipitación media extendida al periodo de N años y Z_i es el índice pluviométrico regional del año i .

Para estos cálculos se utilizó el paquete computacional HYDRACCESS, el cual ejecuta el MVR y proporciona información resumida en hojas de cálculo Excel. La calidad de una estación depende de los parámetros calculados en estas hojas; los más importantes son: la desviación estándar de los desvíos (D.E.D), que compara la desviación de una estación respecto al vector, y la correlación entre la estación y el vector, donde si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos entre sí, si un valor es sensiblemente más bajo que el promedio de la zona, entonces la estación tiene grandes probabilidades de tener errores. Al término del proceso de crítica, y según el nivel de precisión que se requiera, se obtienen regiones de estaciones con semejante comportamiento multianual o regidas por un clima homogéneo (Espinoza, 2005).

e. Análisis de estacionariedad

El criterio de estacionariedad implica que los datos deben estar libres de tendencia durante el periodo de observación, por lo que la serie de tiempo de datos hidrológicos analizada es estrictamente estacionaria, solo si sus propiedades estadísticas (media, varianza y momentos de orden superior) no son afectados por la elección del momento de origen de la serie de datos (Dahmen & Hall, 1990).

La prueba no paramétrica de Mann Kendall (MK), o también llamada tau de Kendall, está basada en rangos para evaluar la importancia de una tendencia monótona, y se ha utilizado ampliamente en estudios de detección de tendencias hidrológicas (Yue *et al.*, 2002 y Tosunoglu & Kisi, 2016). Es así, que establece una hipótesis nula (H_0) que los datos (X_i , $i = 1, 2, \dots, n$) son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (Lopez *et al.*, s.f).

La estadística S de la tau de Kendall se define de la siguiente manera:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } X_j > X_i \\ 0 & \text{if } X_j = X_i \\ -1 & \text{if } X_j < X_i \end{cases}$$

Donde n es la longitud del conjunto de datos y X_i y X_j indican los valores de los datos en los momentos i y j. Según Ay & Kisi, citado por Tosunoglu & Kisi (2016) y Omondi *et al.* (2015), un valor negativo de S indica una tendencia decreciente, y un valor positivo indica una tendencia creciente.

La significación estadística de la tendencia se verifica si la hipótesis nula (H_0), que es una suposición establecida de que los datos son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (no hay tendencia), y si $n > 10$, se espera que la estadística S sea una distribución normal con una media de cero y una varianza que se calcula como:

$$E(S) = 0$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^P t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

Donde, P es el número de grupos vinculados, el signo “ \sum ” la suma de todos los grupos vinculados, y t_i es el número de datos en el grupo i (vinculado). Si los grupos vinculados no están disponibles, este proceso de suma se excluye de la ecuación (Tosunoglu & Kisi, 2016). Entonces el valor de Z estándar de las estadísticas de prueba se puede calcular como:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

Si el valor Z estándar calculado es mayor que el valor crítico de la distribución normal estándar, $Z_{1-\alpha/2}$ en el nivel de significación (α), se rechaza la hipótesis nula (H_0) e indica que hay una tendencia positiva o negativa significativa en la serie de datos.

3.2.4 Análisis de información hidrométrica

La relación del caudal y el nivel de agua (curvas de descarga) en un tramo determinado de un cauce, es producto de una serie de aforos que se realizan por un largo periodo de tiempo, de tal manera se ajuste más a la realidad. Esta curva sirve para conocer el caudal por medio del nivel del agua y presentan valores mínimos y máximos, por lo que la medición de largos periodos logra un mejor ajuste al comportamiento del cauce. La toma de datos de los aforos en la microcuenca Mchique, se realiza mediante el uso de un correntómetro.

Según lo establecido por la Dirección de Gestión de Calidad de los recursos Hídricos del ANA, en el “Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad en Cuerpos de Agua Superficial”, esta es una metodología aprobada junto con el método acústico, para la verificación de aforos en cuencas hidrográficas (ANA, 2015).

El objetivo de aforar una corriente, durante varias épocas en el año en una sección determinada, es determinar lo que se conoce como “curva de calibración”. Si la sección de un río puede aproximarse a una figura geométrica conocida como un rectángulo, trapecio, triángulo, etc. Según Pérez (1969), el caudal Q se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$Q = K * (H - H_0)^b$$

Donde, Q es el caudal (m^3), K y b son los parámetros de ajuste, H_0 es el nivel al cual el cauce es cero (m) y H viene a ser el nivel del agua (m).

Se calculó los caudales que correspondían a los niveles de agua, con el método logarítmico, donde la ecuación, $Q = K*(H-H_0)^b$, se linealiza, transformándola en $\log Q = \log K + b*\log (H-H_0)$, con el cual se obtuvo los coeficientes de la ecuación que caracteriza los caudales del río Mchique.

3.2.5 Simulación hidrológica con RS MINERVE

Para la obtención de los caudales en la microcuenca, primero se calibró el modelo hidrológico, con los caudales diarios del río Mchique medidos en su estación hidrométrica; seguidamente, se realizó la simulación.

a. Modelo hidrológico HBV

Compuesto por cinco reservorios, dos para la función nieve (de agua y otro de nieve), un tercero para el cálculo de humedad del suelo y dos más para el cálculo de los flujos (superior e inferior), como se puede ver en la Figura 3. La precipitación se divide en dos procesos: nevadas (SF) y precipitaciones (RF), todo en función de α , el cual está relacionado con la temperatura, como se describe en las ecuaciones:

$$RF = \alpha * P \qquad SF = (1 - \alpha) * P$$

El valor de α depende de la temperatura observada (T), donde, si es inferior a $TT - TTInt / 2$, solo se producen nevadas sólidas; mientras que si es superior a $TT + TTInt / 2$, solo se producen precipitaciones; y si se encuentra entre estos valores se producen nevadas y lluvias.

$$\alpha = 0 \qquad Si \quad T < TT - TTInt/2$$

$$\alpha = \frac{T - (TT - \frac{TTInt}{2})}{TTInt} \qquad Si \quad TT - TTInt/2 < T < TT + TTInt/2$$

$$\alpha = 1 \qquad Si \quad T > TT + TTInt/2$$

RF: lluvia [L/T]; α : factor de separación; P: precipitación [L/T]; SF: nevada [L/T]; T: temperatura [°C]; TT: umbral de temperatura lluvia/nieve [°C]; TTInt: intervalo de temperatura para la mezcla lluvia/nieve [°C].

El deshielo de la nevada (Msn) se utiliza como entrada, para el reservorio de contenido de agua, que varía en función de la fusión o la congelación. Cálculo del deshielo:

$$M_{sn} = CFMax * (T - TTSM) \qquad Si \quad T > TTSM$$

$$M_{sn} = CFR * CFMax * (T - TTSM) \qquad Si \quad T \leq TTSM$$

$$dH_{snow}/dt = SF - M_{sn}$$

$$M_{sn} \leq SF + H_{snow}/dt$$

$$M_{sn} \geq -W_{snow}/dt$$

Donde, Msn: deshielo o congelación [L/T]; CFMax: factor de fusión día-grado [L/T/°C]; CFR: factor de recongelación [-]; TTSM: temperatura umbral para el derretimiento de nieve [°C]; Hsnow: altura de la nieve [L]; Wsnow: contenido de agua [L]; dt: paso de tiempo [T].

El contenido de agua de la nieve, produce una precipitación equivalente (P_{eq}), que se calcula de la siguiente manera:

$$WH = W_{snow}/H_{snow}$$

$$P_{eq} = RF + W_{snow}/dt \quad Si \quad H_{snow} = 0$$

$$P_{eq} = 0 \quad Si \quad H_{snow} > 0 \quad y \quad WH \leq CWH$$

$$P_{eq} = (WH - CWH) * H_{snow}/dt \quad Si \quad H_{snow} > 0 \quad y \quad WH > CWH$$

$$\frac{dW_{snow}}{dt} = RF + M_{sn} - P_{eq}$$

Donde WH: contenido relativo de agua en el reservorio de nieve [-]; CWH: contenido crítico relativo de agua de la capa de nieve [-]; P_{eq}: precipitación equivalente [L/T].

El SWE, equivalente en agua de la nieve [L], es el resultado es la adición de H_{snow} y W_{snow}.

$$SWE = H_{snow} + W_{snow}$$

El cálculo de la recarga se realiza según el modelo de parámetro Beta:

$$i_{Recharge} = (Hum/FC)^{Beta} * P_{eq}$$

Donde $i_{recharge}$ es la intensidad de recarga del depósito [L/T]; Hum: humedad [L]; FC: máxima capacidad de almacenamiento del suelo [L]; Beta: parámetro del modelo (coeficiente de forma) [-], P_{eq}: precipitación equivalente [L/T].

El parámetro PWP es una tasa relacionada con el parámetro FC por lo que, la altura del umbral del punto de marchitamiento permanente del suelo, se calcula multiplicando PWP por FC. La evapotranspiración (ETR) se calcula, según:

$$ETR = ETP * \frac{Hum}{(PWP*FC)} \quad Si \quad Hum < (PWP * FC)$$

$$ETR = ETP \quad Si \quad Hum \geq (PWP * FC)$$

ETR: evapotranspiración [L/T], ETP: evapotranspiración potencial [L/T]; PWP: umbral de punto de marchitamiento permanente del suelo [-].

Finalmente, la humedad del suelo (Hum) se realiza teniendo en cuenta la entrada (precipitación equivalente) y las salidas (intensidad de descarga y evapotranspiración), según:

$$dHum/dt = (P_{eq} - i_{Recharge}) - ETR$$

$$Hum \geq 0$$

El flujo cerca de la superficie (o escorrentía) depende del nivel de agua en el depósito superior (SU) y su umbral, así como en un coeficiente de almacenamiento de flujo (Kr).

$$Q_r = K_r * (SU - SU_{Max}) * A \quad Si \quad SU > SU_{Max}$$

$$Q_r = 0 \quad Si \quad SU \leq SU_{Max}$$

Q_r: flujo cerca de la superficie (o flujo escorrentía) [L³/T]; Kr: coeficiente de almacenamiento de flujo superficial [1/T]; SU: nivel superior del agua del reservorio [L]; SUMAX: umbral de nivel de agua del reservorio superior [L]; A: superficie de la cuenca [L²].

El depósito superior de almacenamiento de suelo que produce el flujo intermedio, se calcula de la siguiente manera:

$$dSU/dt = i_{Recharge} - (K_{perc} + K_u) * SU - Q_r/A$$

$$SU \geq 0$$

$$i_{perc} = K_{perc} * SU$$

$$Q_u = K_u * SU * A$$

K_{perc}: coeficiente de almacenamiento de la percolación [1/T]; K_u: coeficiente de almacenamiento de interflujos [1/T]; i_{perc}: intensidad de percolación [L/T]; Q_u: inter flujo [L³/T].

Posteriormente, el depósito inferior de almacenamiento de suelo (o de flujo base), se calcula:

$$dSL/dt = i_{perc} - K_l * SL$$

$$SL \geq 0$$

$$Q_l = K_l * SL * A$$

con SL: nivel de agua del depósito inferior [L]; KI: coeficiente de almacenamiento de flujo base [1/T]; QI: flujo base [L³/T].

La descarga total (Qtot) en [L³/T], es la suma de los flujos:

$$Q_{tot} = Q_r + Q_u + Q_l$$

Las condiciones iniciales asociadas a este modelo son *HsnowIni*, *WHIni*, *HumIni*, *SUIni* y *SLIni*. Los parámetros a ajustar son CFMax, CFR, CWH, TT, TTInt, TTSM, Beta, FC, PWP, SUmáx, Kr, Ku, Kl y Kperc, el parámetro A se supone que es constante. En las Tablas 2 y 3 están detallados cada uno. Los datos de entrada del modelo son precipitación, temperatura y evapotranspiración. La salida es la descarga total (Qtot).

b. Análisis de sensibilidad

En las primeras simulaciones se realizó la variación de los parámetros del modelo HBV dados por defecto, en un ± 50 por ciento en cada uno, considerando su rango admisible. Se midió el total de volumen producido por estas modificaciones, para de esta forma conocer el comportamiento de cada uno en las simulaciones. Esta prueba corresponde a una primera calibración manual del modelo.

c. Calibración y validación

Para esta etapa se realizó una calibración manual y luego una automática mediante la herramienta de cálculo “*Expert-Calibrator*”, de tal manera, los indicadores de rendimiento den su máximo valor próximo a la función objetivo establecida. Según la información hidrométrica con la que se cuenta, se estableció el periodo de calibración entre abril del 2014 a marzo del 2015 (12 meses) y de abril del 2015 a enero del 2016 para la validación (10 meses).

RS MINERVE cuenta con siete indicadores de rendimiento, *Nash*, *Nash-ln*, coeficiente de *Pearson*, *Kling-Gupta Efficiency*, *Bias Score*, raíz del error cuadrático medio, volumen relativo del sesgo y el error pico normalizado (García *et al.*, 2018). Según la ANA (2015) y el IMEFEN (2018), un *Nash* resultante entre 0.6 y 0.8 está en el rango de rendimiento del modelo “muy bueno”.

3.2.6 Simulación hidrológica con WEAP

a. Generación de *Catchments*

Según el *Stockholm Environment Institute* (SEI) citado por Chávez (2015), los *catchments* son unidades hidrológicas espacialmente uniformes respecto a sus características topográficas y climatológicas, sobre las cuales WEAP aplica rutinas para estimar evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas y flujo base. En WEAP los procesos de precipitación-escorrentía son simulados dividiendo primero una cuenca en subcuencas, las cuales son áreas contribuyentes sobre los puntos de medición de caudales. El área de cada subcuenca, sobre el punto de calibración, es dividida en “i” bandas de elevación. Así cada subcuenca/banda de elevación es representada como un único objeto *catchments* en WEAP. Para tal propósito, se necesita mapas de subcuencas y de bandas de elevación, este último a partir de su Modelo Digital de elevación (MED).

a.1. Mapa de subcuencas

Son generados a partir de un Modelo Digital de Elevación (MED). En el proceso de delimitación inicial, se obtienen numerosas subcuencas las cuales se agrupan en unidades más amplias, con el fin de simplificar su modelamiento hidrológico.

a.2. Mapa de bandas de elevación

Generados a partir de un MED en el que la cuenca es dividida en rangos o bandas de elevación de manera conveniente; este proceso es llamado “reclasificado”.

a.3. Mapas de vegetación y uso de la tierra

Con información digitalizada sobre cobertura vegetal y uso de tierras se agrupa de acuerdo a criterios de clasificación, tal que sean las más representativas del terreno.

a.4. Generación de *catchments*

Se logra con la intersección de los mapas de subcuencas y de bandas de elevación, con el que la cuenta queda dividida en un número determinado de *catchments*. Estos tienen que ser divididos en *subcatchments*, de acuerdo a su tipo de cobertura; proceso que se logra intersectándolos con los mapas de cobertura “reclasificada”. Se calcula las áreas de cada uno de estos elementos, logrando así la creación del esquema base dentro de WEAP.

b. Modelo hidrológico WEAP “método de escorrentía pluvial”

Este método divide el suelo en dos capas (Figura 4), donde la capa superior incluye los aportes de precipitación, derretimiento de hielo e irrigación, y considera como pérdidas la evapotranspiración y los flujos de caudal. La escorrentía total se define como la suma de la escorrentía directa y superficial, la escorrentía sub-superficial y el flujo base derivado de la capa de suelo inferior (Cortes, 2010).

El proceso comienza con la precipitación efectiva, el cual se calcula en base al derretimiento de nieve, combinado con la precipitación sobre el *catchment*.

$$\text{Precipitación efectiva} = P_i * M_c + M_i$$

Donde, M_i y M_c son términos que corresponden al derretimiento de nieve.

$$M_c = \begin{cases} 0 & \text{si } T_i < T_s \\ 1 & \text{si } T_i > T_d \\ \frac{T_i - T_s}{T_d - T_s} & \text{si } T_s < T_i < T_d \end{cases} ; \quad M_i = \min(AC_i * M_c, E_m)$$

T_i , T_s y T_d son las temperaturas medida, de congelación y derretimiento, respectivamente. La energía disponible para el derretimiento convertida en un equivalente de profundidad/tiempo (E_m) es:

$$E_m = R_{Net} + E_{other}$$

R_{Net} es la radiación neta sobre los *catchment* de acuerdo a la latitud y día del año y el E_{other} , representa parámetros energéticos agrupados en un solo término.

La acumulación de nieve sobre un área o subcuenca finalmente se define como:

$$AC_i = AC_{i-1} + (1 - M_i) * P_i - M_{i-1}$$

AC_i = acumulación en el periodo de tiempo "i" en la altura equivalente en agua

La escorrentía superficial (ES) ocurre a partir de la precipitación afectiva y la irrigación, y depende la humedad que tenga la primera capa de suelo (capa superior). Mientras que la escorrentía directa (ED) se da cuando se sobrepasa el 100 por ciento de humedad en la primera capa de suelo (Cortes, 2010).

$$ES = (\text{Precipitación efectiva} + \text{irrigación}) * Z_1^{RRF}$$

$$ED = \text{Ocurre sólo si } Z_1 > 100 \%$$

El flujo sub superficial (FS) o intermedio, se calcula utilizando el cuadrado del porcentaje de humedad de la primera capa de suelo (Z_1), que es directamente proporcional a su conductividad (K_s) y al porcentaje de flujo que va desde la capa superior a la inferior (f).

$$FS = (K_s * f) * Z_1^2$$

La percolación de la capa superior del suelo a la inferior, se calcula a partir de la conductividad de la primera y al porcentaje de flujo asignado a la segunda

$$Percolación = (K_s * (1 - f)) * Z_1^2$$

El flujo base (FB), está en función al cuadrado del porcentaje de humedad de la segunda capa y es directamente proporcional a la conductividad de esta.

$$FB = K_d * Z_2^2$$

Las pérdidas producto de la evapotranspiración se da a través de la siguiente ecuación.

$$Evapotranspiración = PET * \frac{(5Z_1 - 2Z_1^2)}{3}$$

Donde, PET corresponde a la ecuación de *Penman-Monteith* utilizada por la FAO, y utiliza la humedad relativa y el viento estimado en el área.

Finalmente, la descarga total es la suma de ES, ED, FS y FB.

c. Información de entrada para la simulación

Con el modelo conceptual establecido, se agregó información a cada uno de los *catchments*, teniendo en cuenta que están divididos por clasificaciones de cobertura de tierra. Los parámetros del modelo se vinculan mediante el uso de los “supuestos clave” y el “editor de ecuaciones”, y son determinados mediante la calibración. Antes de agregar las variables climáticas de cada uno de los *catchments*, se comprueba el periodo de simulación y el paso del tiempo que tiene el modelo. Para evaluar su desempeño del modelo se vincula la serie de tiempo de caudales medidos con los simulados mediante un “medidor”.

d. Calibración y validación

La calibración del modelo consistió en ajustar sus parámetros, para así representar una buena simulación de los caudales en la microcuenca. En cuanto a la validación, este proceso se

realizó con el fin de corroborar que el modelo es capaz de realizar simulaciones de suficiente precisión. Se consideró los mismos periodos establecidos en RS MINERVE.

El ajuste de parámetros del modelo en la calibración se realizó comparando los resultados, entre las series de datos de caudales observados y simulados, mediante el uso de cinco indicadores de rendimiento: *Nash-Sutcliffe* (NSE), *Nash-In*, el coeficiente de correlación de *Pearson*, el *Bias Score* y el error relativo de volumen (V%). Según la ANA (2015) y el IMEFEN (2018), un *Nash* entre 0.6 y 0.8 muestra un rendimiento del modelo “muy bueno”.

3.2.7 Cálculo de la oferta hídrica

Con los modelos hidrológicos HVB del RS MINERVE y WEAP “método de escorrentía pluvial” calibrados, se realizó las simulaciones para determinar los caudales históricos y futuros en la microcuenca. El cual se logró con información climática de precipitación y temperatura observada (PISCO) y futura (modelos globales: CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR, en dos escenarios RCP4.5 y RCP8.5); con los caudales futuros generados se pudo ver la evolución en la oferta hídrica desde el 2010 al 2099. Previamente, se realizó el análisis de la información climática futura.

3.2.8 Efecto del cambio climático en la oferta hídrica futura

Se analizó el comportamiento de las variables estudiadas en un año hidrológico, a través de la tasa de variación multianual mensual de las precipitaciones, temperaturas y los caudales resultantes de la simulación con los modelos hidrológicos. Las investigaciones sobre el cambio climático, proyectan sus resultados para mediados del 2045. A fin de hacer un análisis antes y después de este año promedio, se dividió en tres periodos futuros:

- Cercano: 2020 a 2040.
- Medio: 2041 al 2050
- Lejano: 2051 al 2099

Todos los cuales en comparación con resultados históricos observados PISCO, en el periodo de 1981 al 2016, mostraron los resultados finales. Estos se presentan en variaciones porcentuales para la precipitación y caudales, y de grados centígrados en la temperatura.

Se realizó el análisis de comportamiento de las variables en un año hidrológico, así como la interpretación de los resultados de los promedios multianuales mensuales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EVALUACIÓN DE LAS ESTACIONES DEL PROYECTO VLIR-OUS

4.1.1 Trabajo de campo

El proyecto VLIR-OUS cuenta con trece estaciones en la cuenca central del Mantaro, cuyas características se puede ver en la Tabla 13. Se encontró que la estación Cruzpampa presentaba acumulación de sedimento (Figura 57 del ANEXO 2), lo que podría impedir el correcto registro de la información, así también se encontró la estación Aramachay rodeada de vegetación (Figura 58 del ANEXO 2), hecho que según requerimiento para la instalación de estaciones meteorológicas debe evitarse, a fin de no afectar la información registrada.

Tabla 13: Características de las estaciones meteorológicas del proyecto VLIR-OUS

	Estación	Tipo	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)
1	Colpar	Davis	-75.13	-11.54	3540
2	Quilcas	Davis	-75.25	-11.92	3509
3	Tambo	Hobo	-75.26	-11.93	3355
4	Chacrampa	Davis	-75.23	-11.92	4097
5	Cruzpampa	Davis	-75.34	-11.58	3762
6	IRD Jauja	Davis	-75.4	-11.9	3619
7	Molinos	Davis	-75.43	-11.92	3894
8	Masmachique	Hobo	-75.38	-11.89	3309
9	Quero	Hobo	-75.4	-11.86	3330
10	Jajapaqui	Hobo	-75.3	-11.4	3606
11	Aramachay	Watchdog	-75.3	-11.74	3697
12	Sincos	Watchdog	-75.45	-11.74	3427
13	Casacancha	Hobo	-75.38	-11.71	3882

Según la encuesta realizada a los pobladores, manifiestan que el inicio de lluvias se da entre mediados de setiembre y octubre hoy en día, anteriormente era a mediados de agosto. Los meses de mayor precipitación se da en enero y febrero. La labor a la que se dedican en su mayoría es la agricultura, que depende de las lluvias estacionales, ya que no cuentan con sistemas de riego en sus campos.

4.1.2. Elección de estaciones

Se trabajó con 12 estaciones meteorológicas, ocho del proyecto VLIR-OUS (Chacrampa, Colpar, Cruzpampa, IRD Jauja, Masmachique, Molinos, Quilcas y Tambo) y cuatro de SENAMHI (Huayao, Ingenio, Jauja y Santa Ana). Se tuvo en cuenta que sólo las estaciones Chacrampa y Cruzpampa se encuentran dentro de la microcuenca Mchique, así como, la información futura regionalizada por SENAMHI, en Jauja, Ingenio y Huayo, no se encuentran dentro de la microcuenca, razones por las cuales se analizó también aquellas que están alrededor de la microcuenca. En la Figura 54 del ANEXO 1, se puede ver el mapa de ubicación de las estaciones.

4.1.3. Evaluación del registro de datos pluviométricos

Se procesó la información de las 12 estaciones meteorológicas a nivel diario y mensual, como se puede ver en la Tabla 46 del ANEXO 3. Se encontró que Colpar, Molinos y Tambo del proyecto VLIR-OUS no cuentan con información registrada de 21, 14 y 6 meses respectivamente. También, periodos que dan un total mensual de “cero” (IRD Jauja, Masmachique, Colpar y Tambo), contrario a estaciones próximas que si presentaron valores normales de precipitación. Las estaciones de SENAMHI, tienen la mayoría de su data completa y con periodos más largos; siendo sólo la estación Ingenio al que le hacen falta seis meses.

Como resultado, las estaciones no cuentan con datos completos y de registros largos necesarios para el análisis de cambio climático, razón por el cual, se trabajó con datos de la base PISCO de SENAMHI, usándose para el control de calidad de estos las 12 estaciones meteorológicas del proyecto VLIR-OUS y SENAMHI.

4.2. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PISCO

4.2.1 Descarga de datos

Se trabajó con las versiones 2.0 y 2.1 para la variable de precipitación y 1.1 para la temperatura. La descarga de datos se realizó con los métodos de “estación más cercana” y del “inverso a la distancia cuadrada”, con el fin de analizar la variación en los resultados con cada proceso y obtener datos confiables.

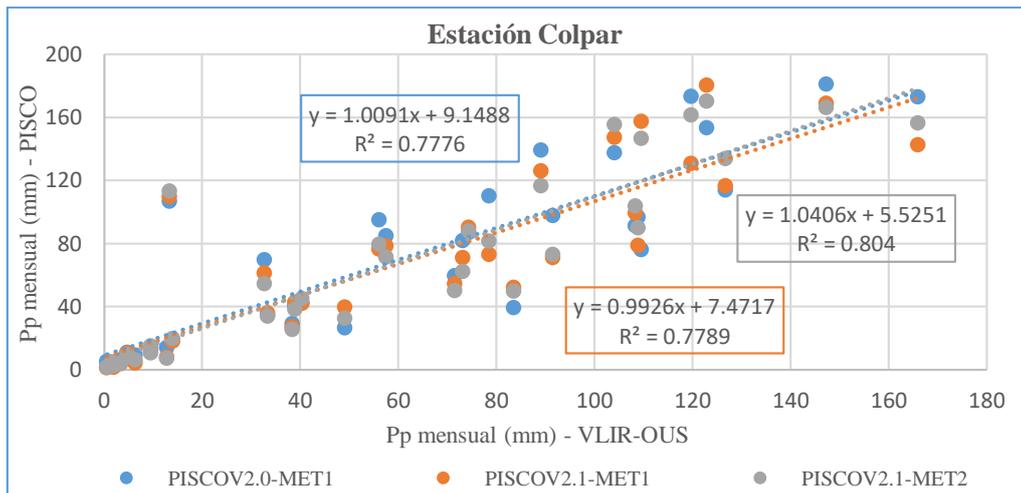


Figura 11: Métodos de extracción y correlación de datos en la estación Colpar

En la Figura 11, se puede ver la correlación entre los datos meteorológicos de VLIR-OUS en la estación Colpar con datos extraídos de PISCO por los métodos de “estación más cercana” (MET1) y del “inverso a la distancia cuadrada” (MET2), el coeficiente de correlación lineal muestra la gran similitud en los resultados a nivel mensual, en un periodo evaluado desde 2014 al 2016. Según los resultados, existe una buena relación entre PISCO y las estaciones meteorológicas del proyecto VLIR-OUS, en cuanto a la versión y el método de extracción.

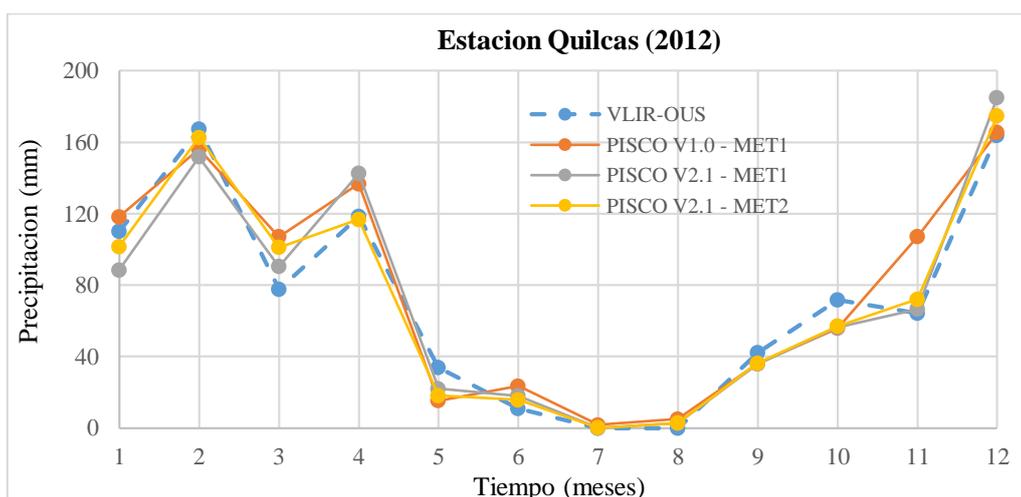


Figura 12: Comparación de la precipitación mensual en la estación Quilcas (2012)

En otro ejemplo, se puede ver gráficamente en la Figura 12, la similitud de resultados de la precipitación mensual en la estación Quilcas (2012); también, a nivel anual según se muestra en la Tabla 14, la precipitación observada de 860.4 mm, es más similar con el resultado del método 2 en la versión 2.1 de 859.25 mm. Otro ejemplo se puede ver en la Figura 59 y Tabla 47 del ANEXO 4 (estación Colpar del 2014).

Tabla 14: Resultados de los métodos de extracción en la estación Quilcas (2012)

MES	PP (mm) - VLIR	PISCO V1.0		PISCO V2.1	
		MET 1	MET 1	MET 2	MET 2
Enero	110	118.24	88.51	101.57	
Febrero	167.4	156.09	151.75	162.59	
Marzo	77.8	107.04	90.35	101.16	
Abril	118.4	136.68	142.51	116.78	
Mayo	34	15.41	22.05	18.11	
Junio	11	23.61	17.98	15.78	
Julio	0.0	1.83	0.0	0.17	
Agosto	0.0	5.02	2.71	2.81	
Setiembre	42.2	36.02	35.94	36.41	
Octubre	71.6	55.8	56.27	57.06	
Noviembre	64.2	107.11	66.65	72.13	
Diciembre	163.8	165.46	184.98	174.68	
Σ Pp	860.4	928.31	859.70	859.25	

Sin embargo, en algunas estaciones se encontró sobreestimación y subestimación de datos en periodos de avenidas, como se puede ver en la Figura 13 de la estación Colpar (2015). Según la Tabla 15, las precipitaciones anuales de PISCO muestran una diferencia promedio de 238.3 mm, respecto de la estación meteorológica. Otro resultado con estas características es en la estación Tambo del 2014, el que se puede ver en la Figura 60 y en la Tabla 48 del ANEXO 4.

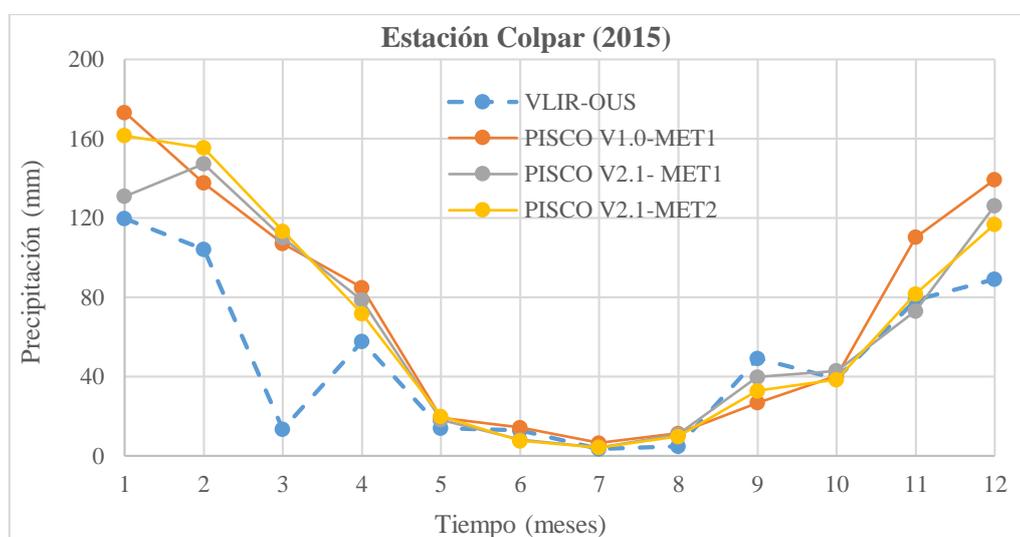


Figura 13: Sobreestimación y subestimación de datos en la estación Colpar (2015)

Tabla 15: Precipitación anual en la estación Colpar (2015)

MES	PP (mm) - VLIR	PISCO V1.0		PISCO V2.1	
		MET 1	MET 1	MET 2	MET 2
Enero	119.8	173.24	130.88	161.55	
Febrero	104.2	137.59	147.28	155.33	
Marzo	13.4	107.03	109.92	113.29	
Abril	57.6	84.88	78.49	71.68	
Mayo	14	19.07	18.18	19.82	
Junio	12.8	14.28	8.09	7.53	
Julio	3.4	6.48	4.14	4.15	
Agosto	4.8	11.28	10.81	9.62	
Setiembre	49.2	26.68	39.75	32.79	
Octubre	39	40.34	42.86	38.43	
Noviembre	78.6	110.24	73.04	81.68	
Diciembre	89.2	139.39	126.16	116.85	
Σ Pp	586	870.5	789.59	812.71	

4.2.2 Corrección de sesgo

Debido a la sobreestimación y subestimación de datos, es que se realizó la corrección de sesgo en las estaciones del proyecto VLIR-OUS, por el método de “*Linear scaling*” (LS). En cuanto a las estaciones de SENAMHI (Huayao, Ingenio, Jauja y Santa Ana) el producto grillado PISCO ya tiene un control de calidad realizado por esta misma institución.

Tabla 16: Coeficiente multiplicador para la corrección del sesgo

Mes	Chacrampa	Colpar	Cruzpampa	IRD Jauja	Masmachique	Molinos	Quilcas	Tambo
1	1.401	1.125	1.600	1.460	0.942	1.050	1.181	1.173
2	1.144	0.908	1.403	0.931	1.262	1.049	0.897	0.910
3	1.094	0.998	1.273	1.095	1.474	1.235	0.920	1.116
4	2.232	1.110	2.771	1.527	0.509	0.712	0.891	1.213
5	1.269	1.285	1.643	1.146	0.826	1.390	0.956	1.603
6	6.090	0.820	5.416	5.570	1.288	1.658	0.532	1.499
7	4.507	1.133	6.390	3.440	0.792	1.870	0.942	0.104
8	3.454	0.573	3.376	2.442	2.344	1.396	0.979	0.492
9	1.700	1.248	2.411	1.832	0.853	1.283	1.079	1.739
10	1.672	1.379	1.964	1.743	1.096	0.949	0.889	1.500
11	2.267	1.270	1.907	1.694	0.949	1.144	1.241	1.465
12	1.587	1.154	1.760	1.590	0.992	1.062	0.978	0.887

El método LS implicó calcular un coeficiente o factor multiplicador para el ajuste de los datos. En la Tabla 16 se puede ver estos resultados, donde los valores mayores a uno indican

que existió subestimación de los datos VLIR-OUS, mientras que menores a uno sobrestimación.

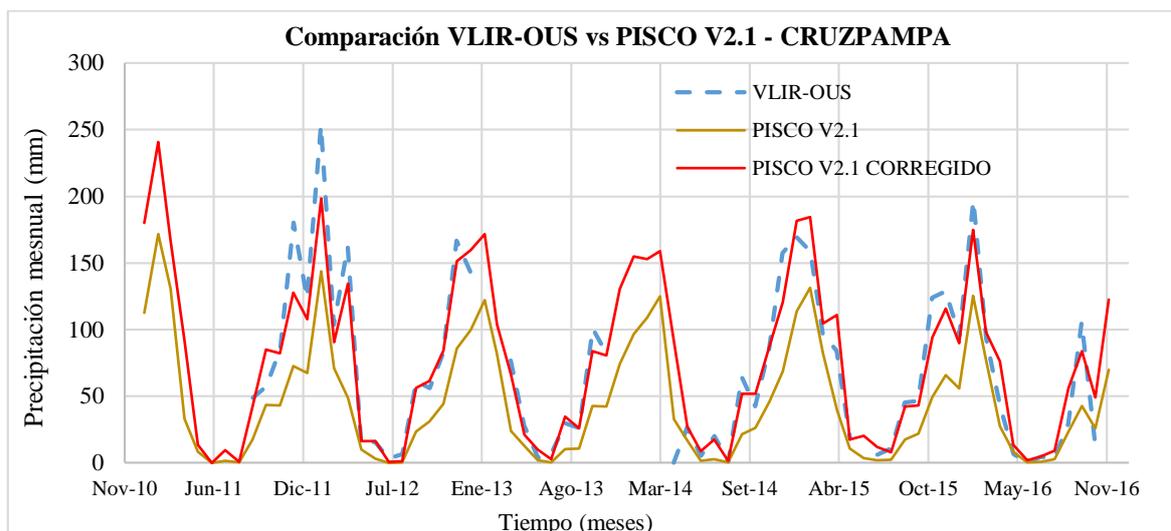


Figura 14: Resultado de la corrección de sesgo en la Estación Cruzpampa

Con los coeficientes para cada una de las estaciones, se realizó el ajuste de los datos de PISCO. Se puede ver un ejemplo en la Figura 14 para la estación Cruzpampa, en líneas rojas, el PISCO V2.1, corregido por el LS, se ajusta más a los datos de la estación meteorológica. Los resultados de las otras estaciones se encuentran en las Figuras 61 al 67 del ANEXO 4.

Tabla 17: Resultados “r” y “R²” entre VLIR-OUS y PISCO V2.1

Estaciones VLIR- OUS	PISCOv2.1			
	"r" inicial	"r" final	"R ² " inicial	"R ² " final
1. Quilcas	0.93	0.94	0.87	0.88
2. Tambo	0.89	0.89	0.80	0.79
3. Colpar	0.92	0.94	0.84	0.88
4. Chacampa	0.89	0.93	0.78	0.87
5. Cruzpampa	0.93	0.94	0.86	0.89
6. IRD Jauja	0.86	0.90	0.73	0.82
7. Masmachique	0.84	0.84	0.70	0.70
8. Molinos	0.90	0.92	0.82	0.84

Se utilizó el coeficiente de correlación *Pearson* “r” y el coeficiente determinación “R²”, para evaluar el desempeño del producto PISCO V2.1. En la Tabla 17, se puede ver este resultado de la correlación a nivel mensual, donde si bien existe una buena representación inicial estos han sido mejorados; mientras que otros han mantenido su correlación.

4.2.3 Análisis de la información pluviométrica PISCOv2.1

De los cálculos anteriores se obtuvo información pluviométrica para doce puntos de estación, en el periodo 1981 al 2016 a nivel diario. Se analizó el comportamiento de las precipitaciones en cada punto de estación a nivel anual; un ejemplo se muestra en la Figura 15 para la estación Cruzpampa, con un promedio multianual de 822.1 mm.

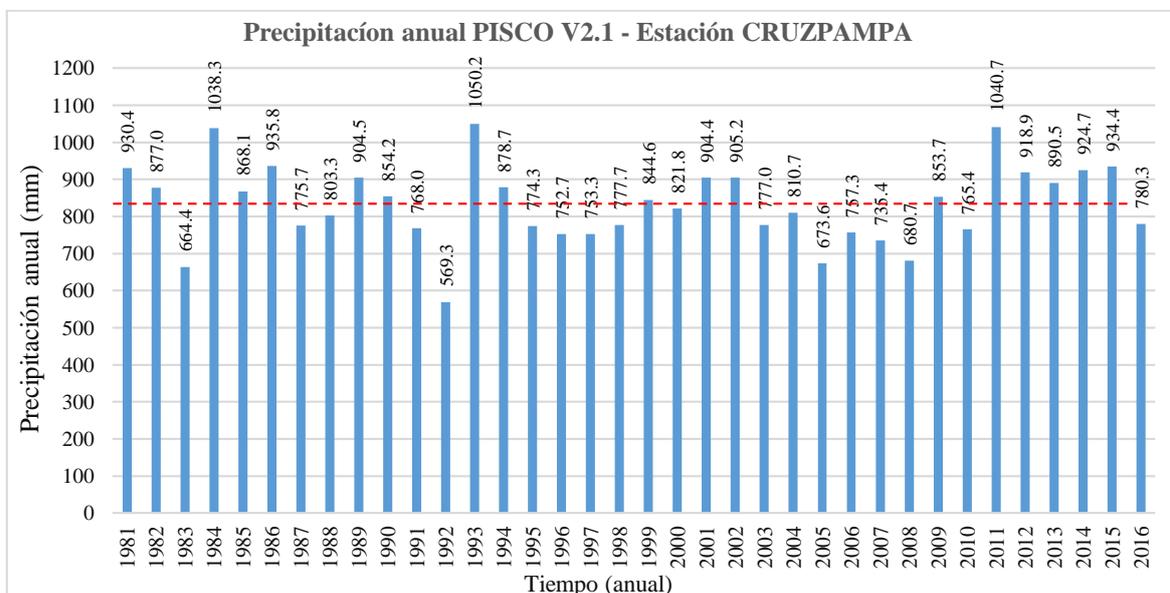


Figura 15: Precipitaciones anuales - estación Cruzpampa

Según la ANA (2015) y el SENAMHI (2007), en 1984, 1993 y 2011, se dio en la cuenca central del Mantaro “precipitaciones extremas”, mientras que 1992 fue de “sequía extrema”, lo cual concuerda con los datos de PISCO en los doce puntos de estación trabajados. Como ejemplo se puede ver en la Figura 15 para la estación Cruzpampa, el resto de resultados de las precipitaciones anuales se encuentran en las Figuras del 68 al 79 en el ANEXO 4.

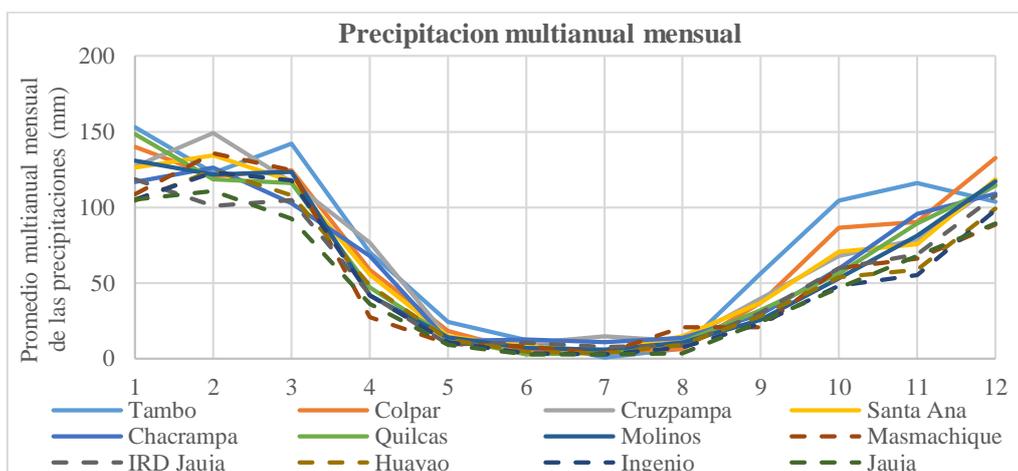


Figura 16: Año hidrológico promedio de las 12 estaciones estudiadas

El comportamiento de la precipitación en un año hidrológico promedio, se puede ver en la Figura 16, a través de la precipitación multianuales mensuales. También, en la Tabla 18 se muestra el promedio de precipitaciones multianuales.

Tabla 18: Resumen de las precipitaciones multianuales

	Estación	Precipitación multianual
1	Tambo	912.51
2	Colpar	823.45
3	Cruzpampa	822.14
4	Santa Ana	778.19
5	Chacrampa	756.05
6	Quilcas	753.25
7	Molinos	732.30
8	Masmachique	672.92
9	IRD Jauja	670.11
10	Huayao	655.66
11	Ingenio	636.85
12	Jauja	590.67

4.3. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS PLUVIOMETRICOS

4.3.1. Diagrama de cajas

Los datos evaluados de precipitación a nivel anual, para el periodo de 1981 al 2016, están contenidos dentro del 90 por ciento del límite de confianza establecido.

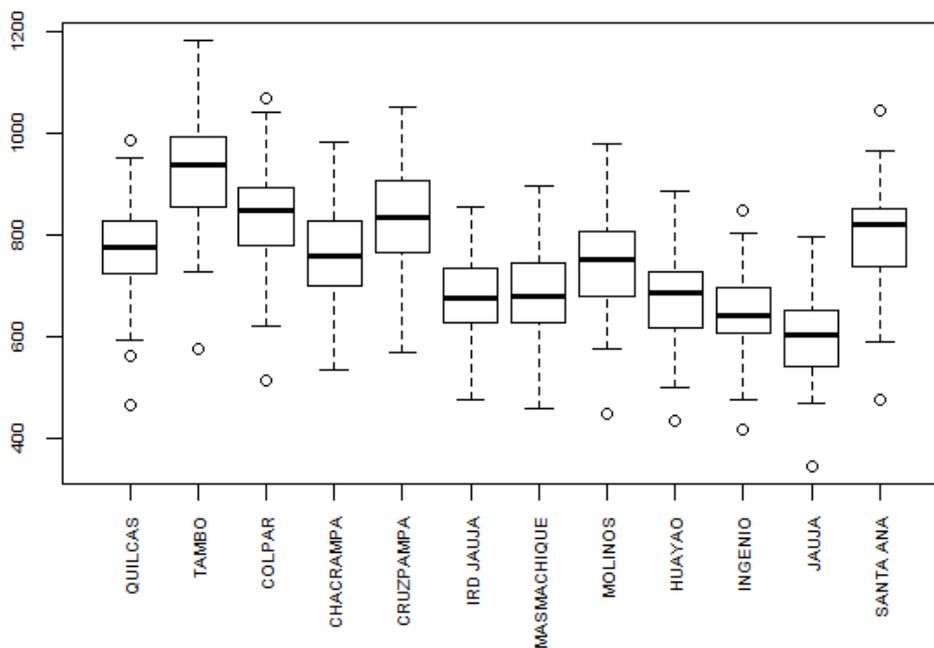


Figura 17: Diagrama de cajas de las precipitaciones anuales

Como se muestra en la Figura 17, las estaciones Quilcas, Tambo, Colpar, Molinos, Huayao, Ingenio, Jauja y Santa Ana, presentan valores atípicos u *outliers* fuera de los límites de confianza en 1984, 1992, 1993 y 2011. Del análisis de las precipitaciones anuales realizado en el capítulo anterior, estos posibles datos atípicos corresponden a los años de “precipitaciones y sequías extremas”.

4.3.2. Test de grubbs

Del diagrama de cajas se pudo detectar ocho estaciones con posibles datos atípicos; para comprobar esta hipótesis se trabajó el *Test de Grubbs* a un nivel de significación de 0.05 (5 por ciento) interpretado como, que se tiene un 95 por ciento de confianza de los datos adoptados son correctos y una probabilidad de 0.05 que sean datos atípicos u *outliers*.

El análisis para las doce estaciones se realizó a un nivel temporal anual, la Tabla 49 del ANEXO 5, muestra que sólo la estación Jauja es un dato atípico, cuyo estadístico Z es mayor que el Z crítico de 2.83 (Grubbs tabulado, para un $\alpha = 0.05$ y $n = 36$). Con una precipitación anual de 346.13 mm en el 1992, es la estación con menor valor registrado de todas.

Tanto el diagrama de cajas como el *Tests de Grubbs*, sirven para identificar valores atípicos mas no para retirarlos. Para descartar, finalmente, estos datos atípicos se compararon con fenómenos anormales ocurridos en la zona estudiada. Según SENAMHI (2007), en la década de los noventa se presentó mayor recurrencia de periodos secos, siendo los más críticos en el 1991 y 1992, con predominancia de sequías extremas en el sector centro de la cuenca del Mantaro, donde se encuentra la microcuenca Mchique; lo cual concuerda con el registro de todas las estaciones. Así, la estación Jauja que presenta a 1992 como valor atípico es resultado de este fenómeno extremo. También, el 2011 fue un año de “precipitaciones extremas” en la cuenca del Mantaro según la ANA (2015). Resultado que concuerda con el mayor valor registrado por las estaciones Quilcas, Colpar, Huayao, Ingenio y Santa Ana.

De los resultados del diagrama de cajas, el *Test de Grubbs* y de estudios realizados en la zona, estos eventos fueron fenómenos que si ocurrieron, por lo tanto no se consideran como datos atípicos u *outliers*.

4.3.3. Formación de regiones homogéneas

Este proceso se realizó en dos etapas, una formación preliminar de regiones con el método de Ward y el uso del Método del Vector Regional (MVR), para la confirmar si las regiones preliminares son regiones homogéneas.

a. Método de Ward

Este análisis fue realizado en base a las precipitaciones anuales de las estaciones, cuyo resultado es el dendrograma, el cual se muestra en la Figura 81 del ANEXO 5. Se tomó como línea referencial un nivel de similitud del 50 por ciento (3.4, aproximadamente), que resultó en dos grupos preliminares (G1 y G2). En la Tabla 19, se resume la composición de cada grupo; donde, las estaciones que se pertenecen a la microcuenca Mchique (Cruzpampa y Chacrampa) están en la misma región que Tambo, Colpar, Santa Ana, Molinos y Quilcas; por lo que todas muestran un comportamiento pluviométrico similar.

Tabla 19: Formación preliminar de grupos por el método de Ward

Grupo	Estación
G1	Jauja, Ingenio, Masmachique, IRD Jauja y Huayao
G2	Tambo, Cruzpampa, Colpar, Santa Ana, Molinos, Quilcas y Chacrampa

b. Método del vector regional

En esta etapa se determinó si las dos regiones preliminares son homogéneas, consolidando así los resultados obtenidos en el dendrograma. Este análisis fue realizado a nivel anual, cuyos resultados gráficos se muestran las Figuras 82 y 83 del ANEXO 5. En las Tablas 20 y 21, se muestran los resultados de la desviación estándar de los desvíos (D.E.D) y la correlación entre las estaciones y el vector (CC), obtenidos para cada uno de los grupos preliminares, G1 y G2.

La desviación estándar de las desviaciones (DED), es la diferencia entre los índices pluviométricos anuales de las estaciones menos el índice del vector regional, sus resultados muestran que tan alejados están los índices de las estaciones respecto al vector o de sus límites (superior e inferior), como se ve en las Tablas 20 y 21, estas diferencias son muy pequeñas. Mientras que la correlación de las estaciones respecto al vector (CC) es otra de las características importantes que se tuvo en cuenta, los resultados más favorables son los valores más próximos a uno, que reflejan que tanto el incremento o decremento del vector son también, de las estaciones. Con estos dos parámetros se reconoció que las variabilidades multianuales de las estaciones son favorables respecto al análisis de sus precipitaciones anuales, indicadores de una misma zona; por lo tanto, cada una de estas regiones son regidas por un clima homogéneo.

Tabla 20: Resultados MVR del G1

Id Estación	Estación	D.E.D.	CC
1_P_MP_(mm)	Jauja	0.038	0.962
2_P_MP_(mm)	Ingenio	0.025	0.983
3_P_MP_(mm)	Masmachique	0.036	0.966
4_P_MP_(mm)	IRD Jauja	0.027	0.980
5_P_MP_(mm)	Huayao	0.037	0.967

Tabla 21: Resultados MVR del G2

Id Estación	Estación	D.E.D.	CC
6_P_MP_(mm)	Tambo	0.024	0.984
7_P_MP_(mm)	Cruzpampa	0.035	0.965
8_P_MP_(mm)	Colpar	0.020	0.989
9_P_MP_(mm)	Santa Ana	0.039	0.962
10_P_MP_(mm)	Molinos	0.047	0.941
11_P_MP_(mm)	Quilcas	0.024	0.986
12_P_MP_(mm)	Chacrampa	0.034	0.966

4.3.4. Estacionariedad

Se realizó el análisis de tendencia a nivel anual por el *test* estadístico de Mann Kendall, para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, a dos colas. Los resultados muestran que en las doce estaciones trabajadas no existe tendencia en las series de precipitación, el resumen de este resultado se puede ver en la Tabla 50 del ANEXO 5.

4.4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

Mediante la “curva de calibración” del río Mchique se obtuvieron los caudales que corresponden a los niveles de agua, mediante la ecuación $Q = k \cdot (H - H_0)^b$, cuyos resultados de estos coeficientes se puede ver en la Tabla 22. El periodo evaluado fue desde diciembre del 2011 a enero del 2016. Gráficamente, este resultado se puede ver en las Figuras 84 y 85 del ANEXO 6.

Los valores de la curva de calibración encontrados para la sección del río muestran una correlación positiva muy alta. Este resultado indica que existe una buena relación o gran similitud de los valores observados y calculados, estos datos hidrométricos son importantes

para la calibración de los modelos hidrológicos; también, en la Figura 86 del ANEXO 6, se puede ver el perfil de la sección del río.

Tabla 22: Resultados de la curva de calibración del río Mchique

Valor de los coeficientes	
k	1.3023
b	1.711
Ho	0.00001
r	0.9216

4.5. SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON RS MINERVE

4.5.1. Elección del modelo hidrológico

La correcta representación del caudal de una cuenca depende de la disponibilidad de los datos, ya que la capacidad predictiva de un modelo está sujeto a la información que se tenga de la cuenca en estudio. La elección de un modelo hidrológico depende de evaluar el desempeño de cada uno, por lo que se requiere realizar pruebas de sensibilidad de parámetros, calibración y validación, para escoger el que se ajuste mejor. RS MINERVE cuenta con siete modelos hidrológicos, de los que en esta investigación se ha trabajado con el HBV. El fin de esta investigación no es determinar el mejor modelo que representa la cuenca hidrológica, por lo que se trabajó de manera conceptual en su elección. La estructura del modelo HBV está dividida en cinco partes:

- La función nieve divide en precipitaciones y nevadas, dependiente de la temperatura y por tanto de los parámetros TT, TTInt, CFMax, CFR, TTSM, y CWH.
- La humedad de suelo en un tercer reservorio, depende de los parámetros: Beta, PWP y FC, con los que finalmente se calcula la humedad del suelo.
- Dos reservorios de suelo (superior e inferior) para el cálculo de flujos, los que necesitan de los parámetros SUMax, Kr, Kpert, Ku y Kl.

Finalmente, la descarga total será el resultado de todos los flujos.

4.5.2. Calibración y validación del modelo hidrológico HBV

a. Datos

Los registros del nivel de agua en la estación hidrométrica de Mchique muestran valores elevados, a finales del 2011 hasta febrero del 2012 como se ve en la Figura 18, siendo el máximo 0.98 m.



Figura 18: Nivel de agua en la microcuenca Mchique

Con la “curva de calibración” estos niveles de agua resultan también en caudales elevados, como se puede ver en la Figura 19; siendo el máximo 0.87 m³/s.



Figura 19: Caudales medidos en la microcuenca Mchique

Se analizó las precipitaciones de las estaciones Chacrampa y Cruzpampa del G2 (resultado de la formación de regiones homogéneas) que se encuentran dentro de la microcuenca Mchique, como se puede ver en la Figura 20. Se encontró que en el periodo de 1981 al 2016 las mayores precipitaciones registradas en la estación Cruzpampa, corresponde a 1984, 1993 y 2011. También, los meses de febrero de este periodo con mayor precipitación fueron en

1984, 2011 y 2012, lo cual corresponde con los caudales registrados por la estación hidrométrica, de diciembre del 2011 a febrero del 2012.

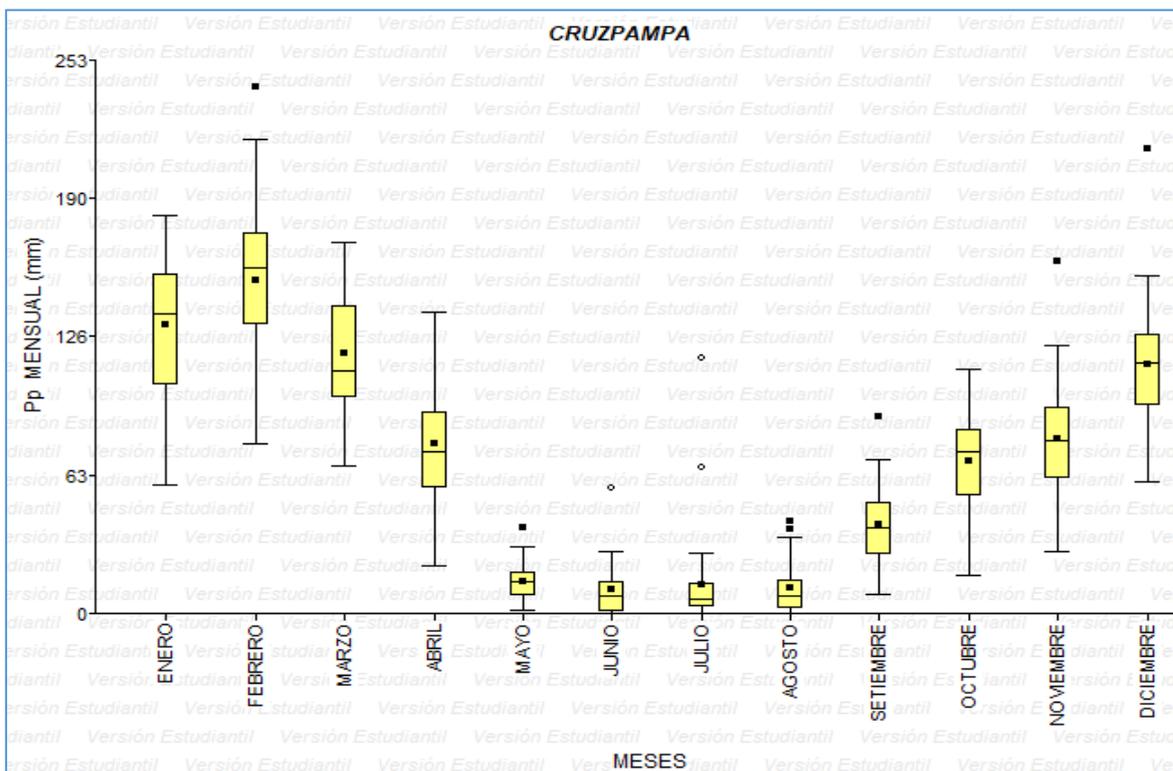


Figura 20: Variación de la precipitación mensual en la estación Cruzpampa

Los niveles de agua desde diciembre del 2011 a febrero del 2012, son valores que corresponde a un periodo en el que las precipitaciones registradas por las estaciones Cruzpampa y Chacrampa resultan estar por encima del promedio multianual y de los que también se esperaría un comportamiento similar de los caudales en 1984 y 1993. El resultado de la estación Chacrampa se puede ver Figura 80 del ANEXO 4.

b. Análisis de sensibilidad

Con el esquema conceptual de la cuenca Mchique establecido en RS MINERVE (Figura 87 del ANEXO 7), este análisis se desarrolló para el periodo de diciembre del 2011 a enero del 2016. Las primeras simulaciones se realizaron con doce estaciones meteorológicas y con los parámetros y condiciones iniciales dadas por defecto. La Tabla 23, muestra la influencia de las estaciones meteorológicas en la estación virtual. Al cambiar las condiciones iniciales como se muestra en la Tabla 24, se encontró que el volumen total resultante, en la primera simulación fue de 228.03 m³ mientras que con la modificación resulto en 265.48 m³, el cual respecto de un volumen total observado de 109.29 m³, se puede ver que existe la

sobreestimación de caudales. Estas simulaciones se pueden ver en las Figuras 88 y 89 del ANEXO 7. Una tercera simulación donde se consideró solo las estaciones que se encuentran dentro de la microcuenca Mchique (Chacrampa y Cruzpampa), se obtuvo un volumen de 268.65 m³. En la Tabla 25, se puede ver el peso de las estaciones en la estación virtual.

Tabla 23: Peso de las 12 estaciones usadas en la “v-station”

SC1		SC2		SC3	
Estación	Peso	Estación	Peso	Estación	Peso
Chacrampa	0.339	Chacrampa	0.834	Chacrampa	0.723
Cruzpampa	0.282	Cruzpampa	0.099	Cruzpampa	0.167
IRD_Jauja	0.257	IRD_Jauja	0.025	IRD_Jauja	0.059
Jauja	0.027	Ingenio	0.007	Ingenio	0.011
Ingenio	0.019	Huayao	0.006	Jauja	0.007
Molinos	0.017	Quilcas	0.005	Quilcas	0.006
Quilcas	0.012	Jauja	0.005	Colpar	0.006
Colpar	0.011	Colpar	0.005	Molinos	0.005
Huayao	0.010	Tambo	0.004	Tambo	0.004
Masmachique	0.010	Molinos	0.004	Huayao	0.004
Tambo	0.009	Santa_Ana	0.003	Masmachique	0.004
Santa_Ana	0.006	Masmachique	0.003	Santa_Ana	0.003

Tabla 24: Condiciones iniciales establecidas para modelo HBV

Nombre	Unidad	Valor regular	SC 1	SC 2	SC 3
SWEIni	m	-	0	0	0
WHIni	-	-	0	0	0
HumIni	m	-	0.18	0.225	0.2
SUIni	m	-	0.003	0.006	0.002
SLIni	m	-	0.006	0.003	0.001

FUENTE: Camones (2015)

Tabla 25: Peso de las estaciones Chacrampa y Cruzpampa en la “v-station”

Estación	SC1	Estación	SC2	Estación	SC3
Chacrampa	0.546	Cruzpampa	0.894	Chacrampa	1
Cruzpampa	0.454	Chacrampa	0.106		

Para el análisis de sensibilidad se trabajó solo con las dos estaciones contenidas en la microcuenca y con las condiciones iniciales de la Tabla 24, el volumen de este caudal simulados fue de 268.5 m³. En la Tabla 51 del ANEXO 7, se puede ver la variación de

volumen ante el cambio en un ± 50 por ciento de los parámetros. La determinación del comportamiento de los parámetros del modelo, se realizó con aquellos directamente relacionados con la precipitación: Beta, FC, PWP, SUMax, Kr, Ku, Kl y Kpert; los valores de CFMax, CFR, CWH, TT, TTInt y TTSM, relacionados con la temperatura se dejó por defecto. Con el análisis se encontró que los parámetros Beta, FC y PWP, relacionados con el tercer depósito (para el cálculo de la humedad del suelo), son los más sensibles.

Así, valores más elevados en el parámetro Beta, provoca la disminución del volumen de agua para todo el periodo simulado; mientras que PWP, menores valores resultan en una disminución de los volúmenes en la parte media y final. El parámetro FC (capacidad de almacenamiento máxima) en particular, con menores valores resulta en un aumento de los volúmenes en el inicio del periodo simulado, como se puede ver en la Figura 90 del ANEXO 7, este parámetro es importante; ya que está relacionado con los caudales elevados registrados en diciembre del 2011 a febrero del 2012. El resto de los parámetros en general, el aumento del valor en Kpert y la disminución de Kl provoca menores volúmenes en todo el periodo simulado; mayores valores de Ku resulta en un aumento de volumen y se hace más notorio los picos. Finalmente, con Kr y SUMax no existe variaciones significativas.

c. Calibración y validación

La calibración del modelo para periodo diciembre del 2011 a diciembre del 2013, el cual incluye las precipitaciones elevadas anormales (diciembre del 2011 a febrero del 2012); los índices de rendimiento resultado de la calibración, se reducen considerablemente en todos los casos en el periodo de validación (enero del 2014 a enero del 2016), esto debido al parámetro FC.

Se deduce que, si el proceso de calibración incluye un evento extremo como en este caso, este también es reflejado en el periodo de validación, por lo que, si en el periodo considerado en la calibración incluye un evento extremo, la validación también debe incluir un evento similar, de tal manera los índices de rendimiento no se vean afectados, ya que el resultado de estos depende de los caudales simulados y observados.

Acorde con las precipitaciones y los caudales observados se estableció el periodo de calibración desde abril del 2014 a marzo del 2015, y de validación, abril del 2015 a enero del 2016, como se puede ver en la Figura 21. Los parámetros finales de la calibración se muestran en la Tabla 26.

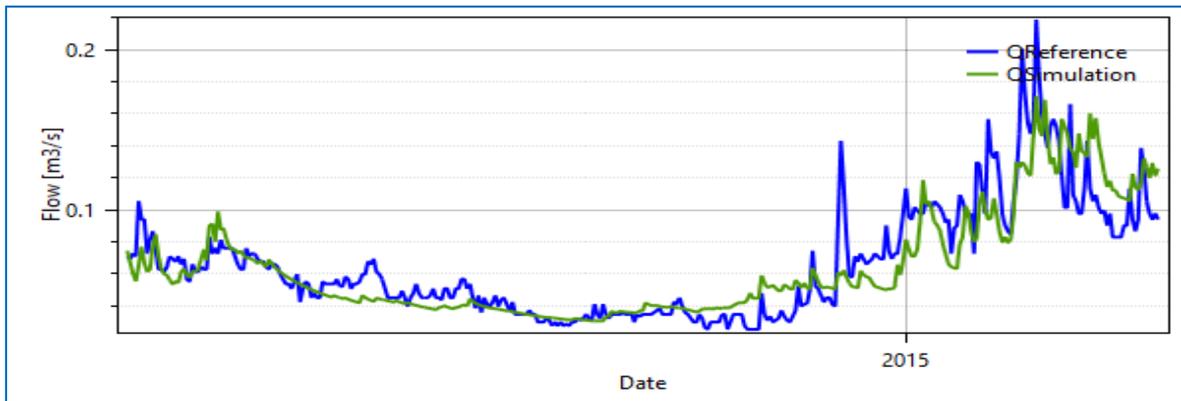


Figura 21: Calibración de HBV, periodo 04/2014 a 03/2015

Tabla 26: Parámetros calibrados del modelo HBV

Nombre	Unidad	Rango regular	SC 1	SC 2	SC 3
CFMax	mm/°C/d	0.5 a 20	5	5	5
CFR	-	0.05	0.05	0.05	0.05
CWH	-	0.1	0.1	0.1	0.1
TT	°C	0 a 3	2	2	2
TTInt	°C	0 a 3	2	2	2
TTSM	°C	0	0	0	0
Beta	-	1 a 5	4.9964578	1.2934631	1.0000347
FC	m	0.05 a 0.65	0.30008466	0.4941653	0.4244473
PWP	-	0.03 a 1	0.0300031	0.0300041	0.9983941
SUMax	m	0 a 0.1	0.0581911	0.0326767	0.0090979
Kr	1/d	0.05 a 0.5	0.3837553	0.2924449	0.1252773
Ku	1/d	0.01 a 0.4	0.0100003	0.02100045	0.0117765
Kl	1/d	0 a 0.15	0.086143	0.0037662	0.0664259
Kpert	1/d	0 a 0.8	0.0037164	0.2993637	0.1098719

Con el proceso de la calibración manual se obtuvo un Nash de 0.656 y 0.687 en la validación, seguidamente estos valores se mejoraron con una calibración automática, mediante la herramienta “*model expert*” de RS MINERVE, con el que pueden hacer variaciones de hasta cinco decimales, el cual resultó en un Nash de 0.74285 en la calibración y 0.76614 en la validación. Según la ANA (2015) y el IMEFEN (2018), este Nash se encuentra dentro del rango de un rendimiento del modelo “muy bueno”. Los otros indicadores de rendimiento se pueden ver en la Tabla 27.

Los resultados del *Nash-In* muestran un buen rendimiento para la simulación de caudales pequeños, mientras que el coeficiente de *Pearson* resulta en una correlación positiva. En general los indicadores *Kling-Gupta Efficiency* y *Bias Score*, próximas al valor de la unidad

indica un buen rendimiento del modelo; en cuanto a la raíz del error cuadrático medio, cuanto menor es el resultado tanto mejor es el rendimiento del modelo. Otro indicador importante es el error relativo entre los volúmenes simulados y observados, donde valores cercanos a cero indican un buen rendimiento entre los resultados de descargas observadas y simuladas, también, el valor negativo indica que el volumen simulado está por debajo del observado. Otro indicador es el error pico normalizado, cuyos resultados negativos muestran que el valor máximo simulado está por debajo del observado (García *et al.*, 2018).

La función objetivo para la calibración automática, utilizó el criterio de *Nash*, cuyo efecto sobre la simulación es de desplazar hacia arriba o hacia abajo toda la serie; y el “error de volumen” permite desplazar horizontalmente la serie (IMEFEN, 2018)

Tabla 27: Indicadores de rendimiento para el modelo HBV

Índice	Rango de variación	Valor ideal	Calibración	Validación
Nash	$-\alpha$ a 1	1	0.74285	0.76614
Nash-ln	$-\alpha$ a 1	1	0.79138	0.68826
Pearson Correlation Coeff	-1 a 1	1	0.86667	0.90483
Kling-Gupta Efficiency	0 a 1	1	0.86037	0.67478
Bias Score	$-\alpha$ a 1	1	0.99927	0.99492
RRMSE	0 a $+\alpha$	0	0.26667	0.20761
Relative Volume Bias	-1 a $+\alpha$	0	-0.02634	0.07131
Normalized Peak Error	-1 a $+\alpha$	0	-0.21836	-0.16446

4.5.3 Caudal simulado con HBV

Con el modelo HBV caracterizado con los parámetros adecuados para la microcuenca Mchique, se determinó los caudales diarios del periodo histórico, 1981 al 2016 (Figura 22).

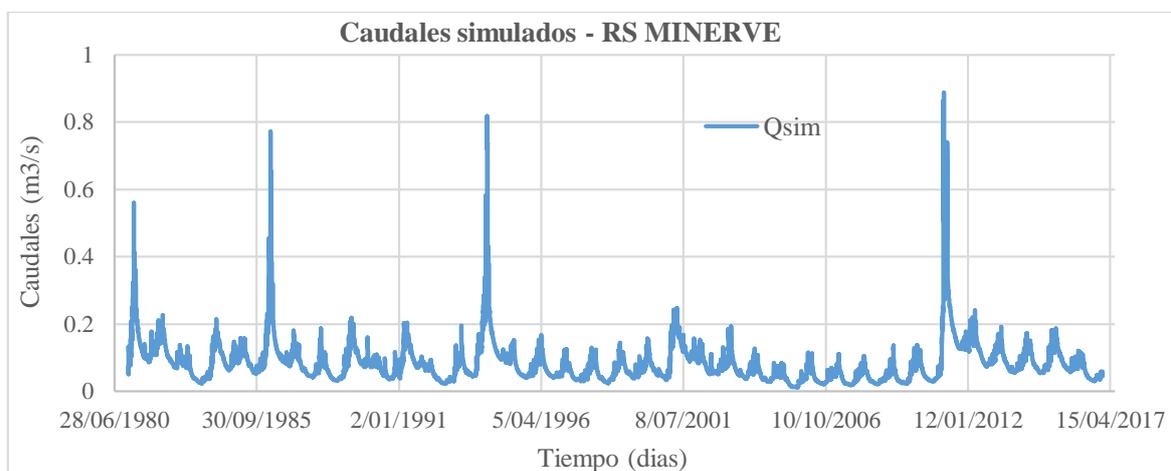


Figura 22: Caudales simulados según el modelo HBV, periodo 1981-2016

4.6. SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON WEAP

4.6.1. Definición esquemática y de los límites del modelo

Se consideró el mismo periodo de calibración y validación que el modelo HBV, del cual WEAP toma como “año de cuenta corriente” el 2014, en el que recopila toda la información y la reproduce para los años siguientes. La simulación se realizó nivel diario, empleando el “método de la escorrentía pluvial” (método de la humedad del suelo); con el cual, se estableció el esquema conceptual, que se encuentra en la Figura 91 del ANEXO 8.

Se dividió la microcuenca Mchique en tres *catchments*, que a su vez están diferenciados por su cobertura y uso de suelo (Tabla 28). También, en la Figura 92 del ANEXO 8 se puede ver el modelo de elevación digital por *catchments*.

Tabla 28: Distribución de las coberturas y uso de suelo en la microcuenca

Catchments Mchique	Área en km ²	% cultivos agrícolas	% césped de puna o pajonal	% población
Catchments_SC1	6.743	50	48	2
Catchments_SC2	18.547	57	39	4
Catchments_SC3	2.166	60	39	1

FUENTE: Camones (2015)

4.6.2. Calibración y validación

a. Datos

Se cuenta con información de humedad del suelo “Z1”, coeficiente de cultivo “Kc” (Tablas 52 y 53 del ANEXO 8) y latitud; los demás parámetros fueron dejados por defecto. Los datos climáticos que requiere el modelo son la precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, fracción de nubosidad y latitud, en este caso la microcuenca Mchique no tiene superficies glaciares por lo que no se ha hecho uso del módulo de glaciares. Los datos de humedad relativa y velocidad del viento se tomaron de las estaciones meteorológicas Davis (Cruzpampa y Chacrapampa), el cual registra información cada 30 minutos; se trabajó a nivel diario para ser incluida en el modelo.

b. Análisis de sensibilidad

Este análisis consistió en la variación de ± 50 por ciento de los parámetros, con el que se encontró los cuatro de mayor respuesta o sensibilidad, la capacidad de agua del suelo (Sw), el factor de resistencia a la escorrentía (RRF), que mayores valores disminuye la escorrentía,

la conductividad de la zona radicular (K_s), que influye en la percolación y en el flujo intermedio del “tanque 1 o capa superior”, y la conductividad profunda (Z_2) relacionado con el flujo base del “tanque 2 o capa inferior”. Otros, como la tasa de conductividad de la capa profunda “ K_d ” ocasiona un aumento en el flujo base; K_s , f y Z_2 , varían entre tipos de suelo.

c. Calibración y validación

El periodo considerado fue el mismo que el RS MINERVE. En la Tabla 29, se muestra el resumen de los resultados finales de los parámetros calibrados, para cada uno de los *catchments* y coberturas de suelo. Gráficamente, este resultado se puede ver en la Figura 23.

Tabla 29: Parámetros calibrados del modelo WEAP

Parámetros	Cuenca	Rango regular	Inicial	Final
Sw	<i>catchment 1</i>	>0	1000	500, 400, 400
	<i>catchment 2</i>			1500, 1400, 1300
	<i>catchment 3</i>			750, 700, 700
Dw	<i>catchment 1</i>	>0	1000	2000
	<i>catchment 2</i>			2000
	<i>catchment 3</i>			2000
RRF	<i>catchment 1</i>	0 - 1000	2	6, 8, 9
	<i>catchment 2</i>			6, 7.2, 11
	<i>catchment 3</i>			8, 8, 9
RRF	<i>catchment 1</i>	0 - 1000	2	6, 8, 9
	<i>catchment 2</i>			6, 7.2, 11
	<i>catchment 3</i>			8, 8, 9
Ks	<i>catchment 1</i>	-	20	7.5, 7.4, 7.8
	<i>catchment 2</i>			9.5, 8.4, 6.8
	<i>catchment 3</i>			7.5, 6.4, 6.8
Kd	<i>catchment 1</i>	>0.1	20	0.101
	<i>catchment 2</i>			0.102
	<i>catchment 3</i>			0.102
f	<i>catchment 1</i>	0 - 1	0.15	0.24, 0.27, 0.26
	<i>catchment 2</i>			0.14, 0.17, 0.16
	<i>catchment 3</i>			0.14, 0.17, 0.16
Z2	<i>catchment 1</i>	0 - 100	30	14
	<i>catchment 2</i>			16
	<i>catchment 3</i>			16

Los indicadores de rendimiento calculados como se puede ver en la Tabla 30; muestran según el *Nash*, un rendimiento del modelo “muy bueno”; también, el *Nash-ln* para caudales

pequeños. El coeficiente de correlación de *Pearson* muestra una buena la covariabilidad, al igual que el *Bias Score* y el volumen relativo de sesgo (RVB).

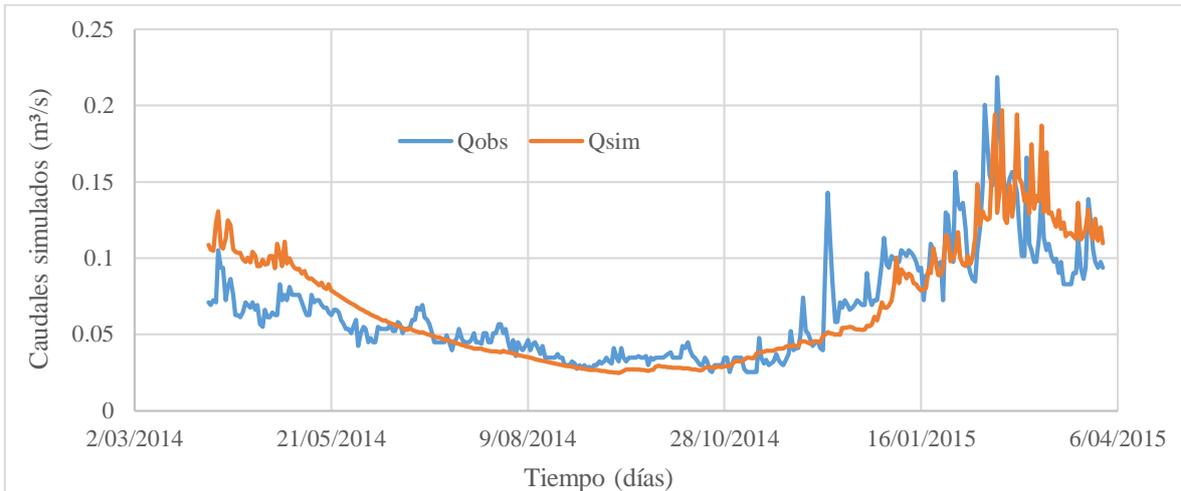


Figura 23: Calibración de WEAP, periodo 04/2014 a 03/2015

Tabla 30: Indicadores de rendimiento del modelo WEAP

Índice de rendimiento	Valor ideal	Calibración	Validación
Nash	1	0.705	0.786
Nash-In	1	0.728	0.7
Coef. Pearson	1	0.843	0.889
Bias Score	1	0.999	1
RVB	0	0.033	0.011

4.6.3 Caudal simulado con WEAP

Con el modelo calibrado para la microcuenca Mchique, se determinó los caudales diarios en el periodo histórico desde 1981 al 2016, como se puede ver en la Figura 24.

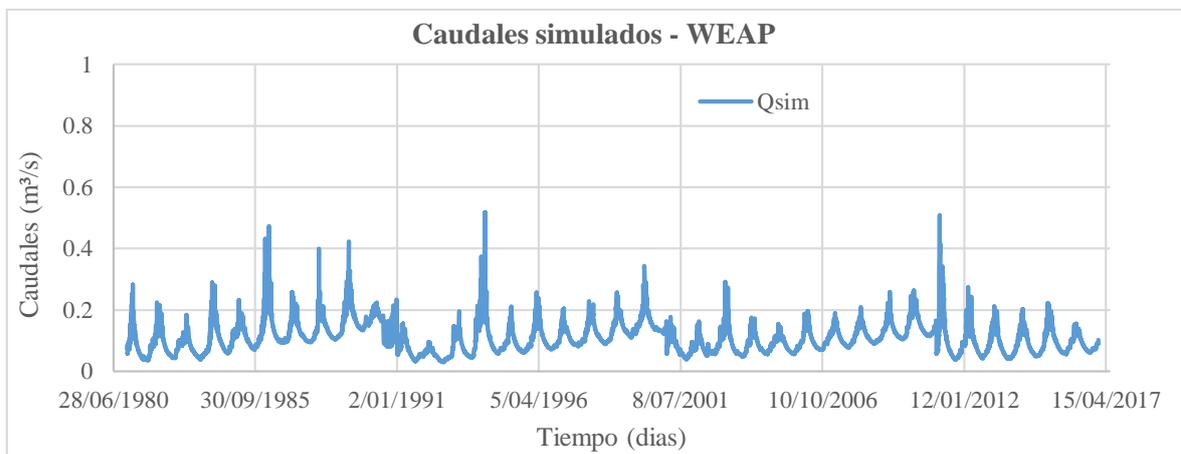


Figura 24: Caudal simulados según el modelo WEAP, periodo 1981-2016

4.7. CÁLCULO DE LA OFERTA HÍDRICA FUTURA

Previamente, se analizó a nivel anual las precipitaciones y temperaturas resultado de los modelos climáticos globales (GCM): CANESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR, en dos escenarios RCP4.5 y RCP8.5, en total seis escenarios posibles (3ESMx2RCP), posteriormente se realizó la simulación de los caudales para cada uno de estos escenarios en el periodo histórico (1981 al 2000) y futuro (2010 al 2099), a nivel diario. Se presenta el escenario más crítico, CNRM-CM5 - RCP4.5, los resultados de los demás escenarios se pueden ver en el ANEXO 9.

4.7.1 Precipitación

Las Figuras 25 y 26, muestra el comportamiento de la precipitación a nivel diario y anual, cuyos resultados de este último en las estaciones Jauja, Ingenio y Huayao para el periodo del 2010 al 2099 muestran que disminuirán; con un promedio multianual de las tres estaciones 588.89 mm; ante un histórico (1981 al 2016) de 789.09 mm.

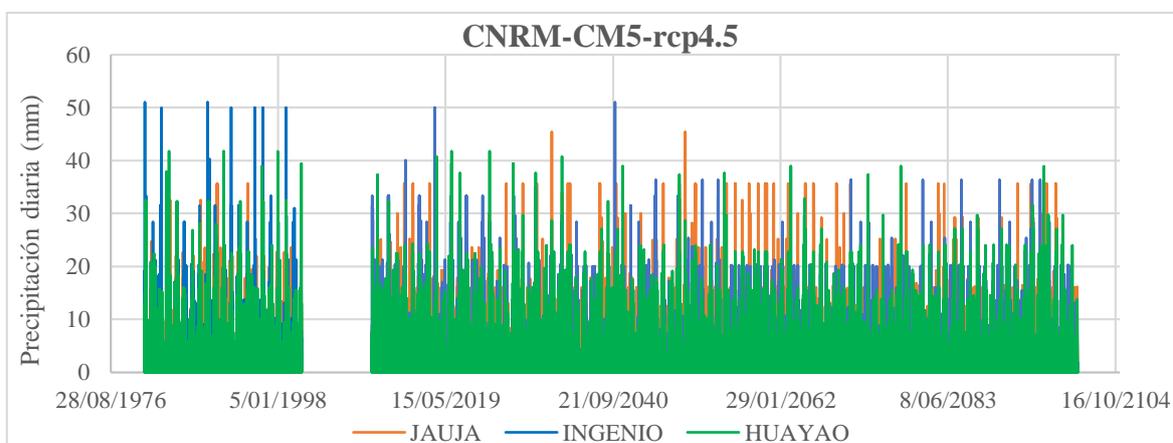


Figura 25: Precipitación diaria del escenario CNRM-CM5-rcp4.5

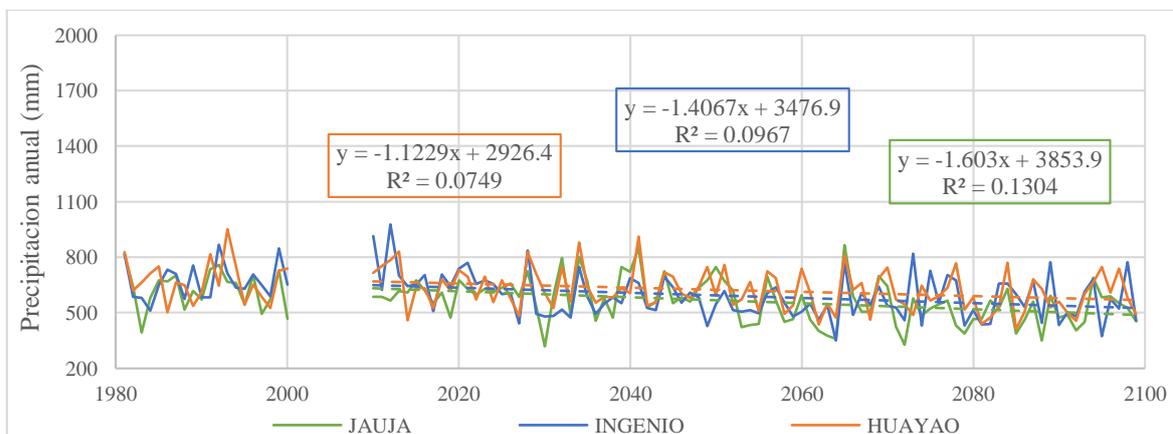


Figura 26: Precipitación anual del escenario CNRM-CM5 - RCP4.5

4.7.2 Temperatura

Los resultados de la evolución de las temperaturas diarias y anuales según las Figuras 27 y 28 muestran, en este último, una tendencia lineal positiva al incremento de 1.37 °C; donde, según el promedio multianual de las estaciones se pasa de un histórico 11.89 °C a uno de 13.26 °C.

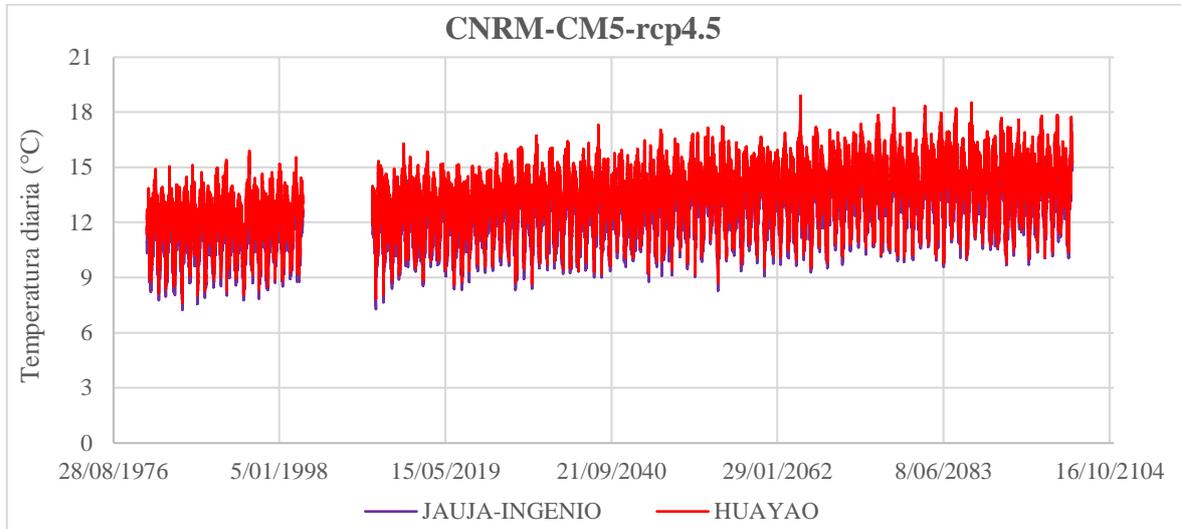


Figura 27: Temperatura diaria del escenario CNRM-CM5-rcp4.5

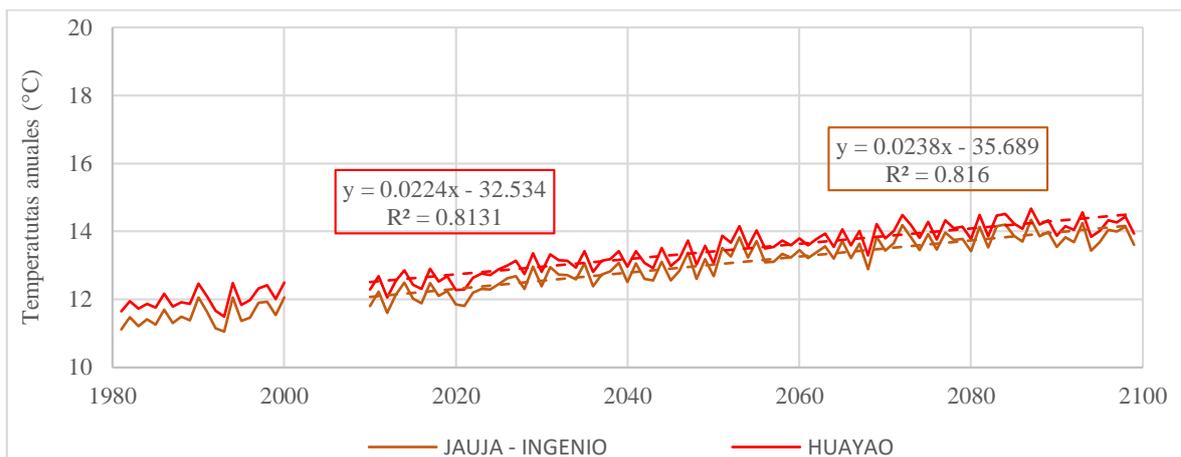


Figura 28: Temperatura anual del escenario CNRM-CM5 - RCP4.5

4.7.3 Caudales

Resultado de las simulaciones con los dos modelos hidrológicos, HBV de RS MINERVE y WEAP “método de escorrentía pluvial”, se obtuvieron caudales a un nivel diario, como se muestra en la Figura 29 del escenario “más crítico” CNRM-CM5 – RCP4.5. Para la interpretación de resultados se trabajó y se resumió a nivel anual, como se muestra en la Figura 30.

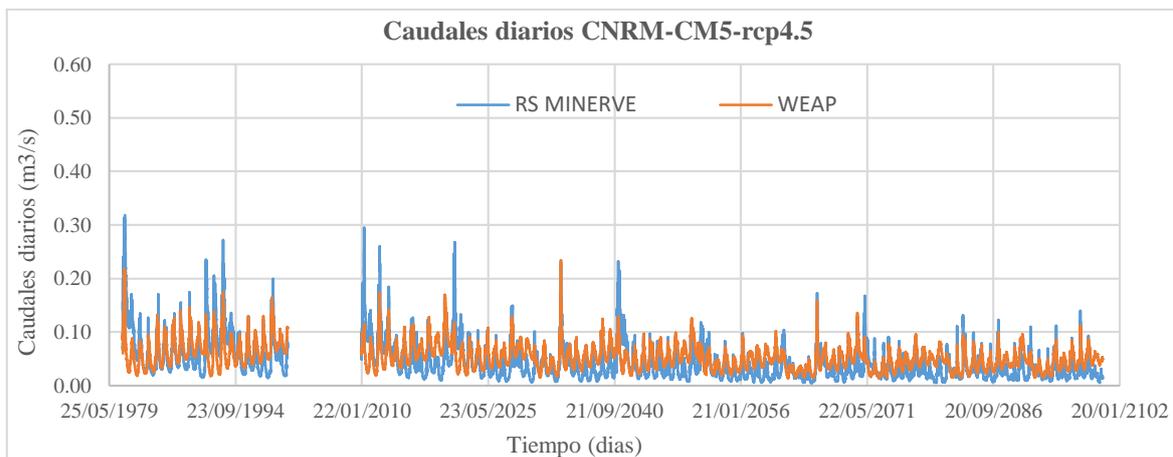


Figura 29: Caudales diarios en el escenario CNRM-CM5 - RCP4.5

Del análisis anual, los resultados muestran disminución de caudales; donde, el promedio multianual histórico de 0.067 m³/s se reduce a 0.035 m³/s según el modelo HBV del RS MINERVE y a 0.050 m³/s según el modelo WEAP “método de escorrentía pluvial”.

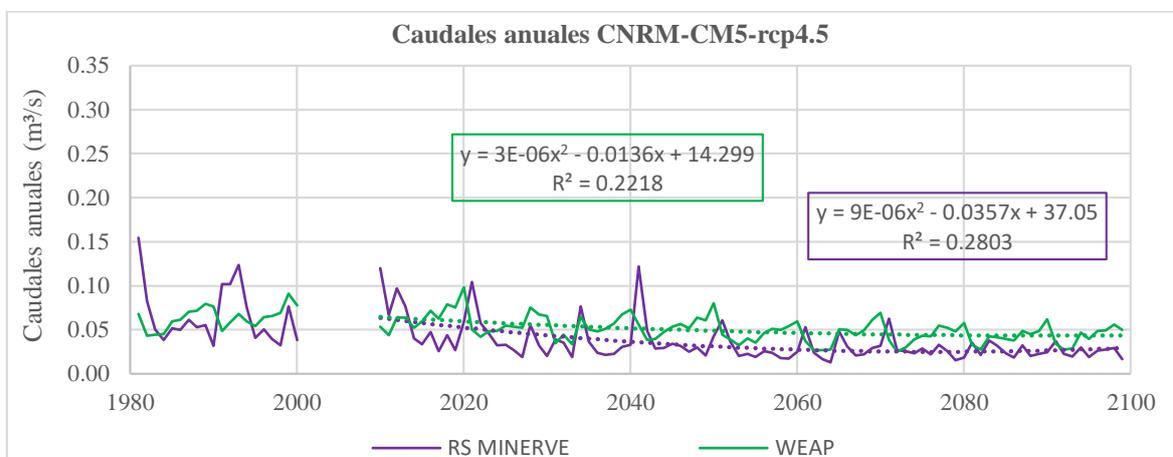


Figura 30: Caudales anuales simulados del CNRM-CM5 - RCP4.5

4.7.4 Resumen de resultados

A un nivel de análisis multianual promedio en el periodo 2010 al 2099 como se presenta en la Tabla 31, cuatro escenarios resultan en una disminución de los caudales, CanESM2 – RCP4.5, CNRM-CM5 – RCP4.5, CNRM-CM5 – RCP8.5 y MPI-ESM-MR – RCP4.5, con pérdidas del 20.27, 47.96, 40.84 y del 31.32 por ciento, según el modelo HBV y de 12.7, 25.99, 21.09 y 8.02 por ciento respectivamente según WEAP. El escenario más crítico se da en CNRM-CM5 – RCP4.5, según resultados de ambos modelos hidrológicos. También, se puede ver que los resultados son mayores en el modelo HBV respecto del WEAP, lo que lo hace más sensible en las simulaciones.

Tabla 31: Promedio multianual de la precipitación, temperatura y caudales futuros

Variable	Periodo	CANESM2		CNRM-CM5		MPI-ESM-MR	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Precipitación (mm)	Histórico	789.09	789.09	789.09	789.09	789.09	789.09
	Futuro	668.42	776.80	588.89	625.89	683.28	869.11
	Variación (%)	-15.29	-1.56	-25.37	-20.68	-13.41	10.14
Temperatura (°C)	Histórico	11.89	11.89	11.89	11.89	11.89	11.89
	Futuro	14.76	15.92	13.26	14.08	13.87	15.15
	Variación (°C)	2.87	4.03	1.37	2.19	1.98	3.25
Caudales (m³/s)	Histórico	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067
	Futuro HBV	0.054	0.068	0.035	0.040	0.046	0.104
	Futuro WEAP	0.059	0.074	0.050	0.053	0.062	0.087
	Variación HBV (%)	-20.27	1.23	-47.96	-40.84	-31.32	54.05
	Variación WEAP (%)	-12.79	10.13	-25.99	-21.09	-8.02	28.69

El promedio multimodelo de los cuatro escenarios con pérdidas de caudales, resulta en 35.10 por ciento, según el HBV del RS MINERVE y 16.97 por ciento en el WEAP (“método escorrentía pluvial”), cuyos resultados son consecuencia de la reducción del 18.69 por ciento en las precipitaciones y del incremento en 2.10 °C en la temperatura. También, en el escenario MPI-ESM-MR – RCP8.5, se puede ver el aumento de caudales en un 54.05 por ciento según el HBV y de 28.69 por ciento en WEAP, el cual corresponde al incremento en las precipitaciones de 10.14 por ciento y de 3.25°C en temperatura.

4.8. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Se analizó cada una de las variables involucradas en los seis escenarios futuros (3ESMx2RCP), mediante la tasa de variación multianual mensual, en tres periodos: futuro cercano (2020-2040), futuro medio (2041-2050) y futuro lejano (2051-2099). Se presenta los resultados del escenario “más crítico”.

4.8.1 Futuro cercano: 2020 - 2040

a. Precipitación

La tasa de variación multianual mensual del escenario CNRM-CM5 - RCP8.5 presentado en la Figura 31, muestra la reducción de las precipitaciones en once meses del año hidrológico

promedio, exceptuando mayo, que presenta un aumento de 111.92 por ciento, los resultados de los otros cinco escenarios se pueden ver en las Figuras 123 al 127 en el ANEXO 10.

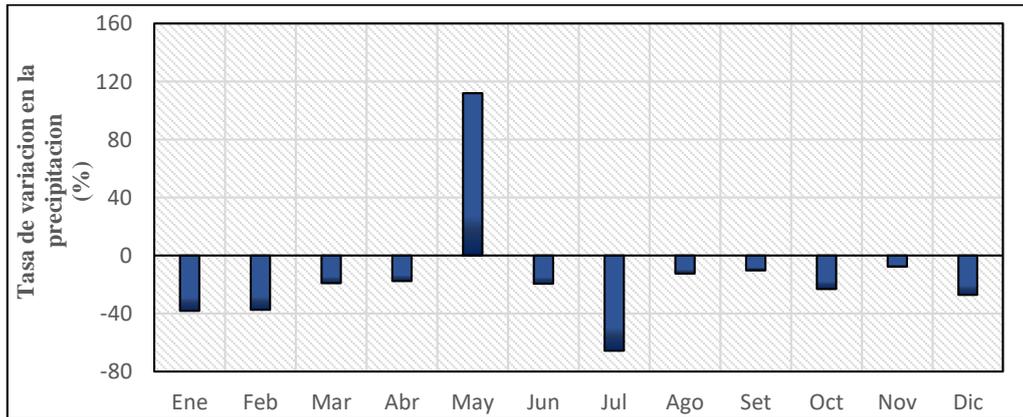


Figura 31: Variación de la precipitación en un futuro cercano, CNRM-CM5 - RCP8.5

El promedio de las variaciones multianuales mensuales de los escenarios como se muestra en la Tabla 32, las mayores pérdidas ocurren en CNRM-CM5 – RCP4.5 y CNRM-CM5 – RCP8.5. Por el contrario, CANESM2 - RCP4.5 y CANESM2 - RCP8.5, muestran un incremento; no obstante, este corresponde a los meses de mayo, junio y agosto.

Tabla 32: Resumen variación promedio de la precipitación (2020-2040)

Modelo	Escenario	Variación (%)
CANESM2	RCP 4.5	30.47
	RCP 8.5	21.64
CNRM-CM5	RCP 4.5	-16.95
	RCP 8.5	-13.78
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	-0.58
	RCP 8.5	1.55

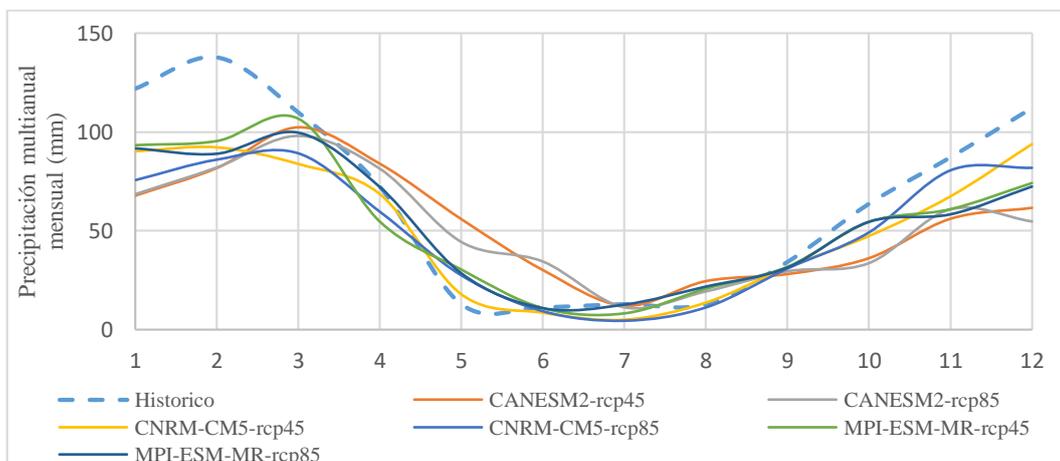


Figura 32: Variación multianual mensual promedio de la precipitación (2020-2040)

De la Figura 32, el comportamiento de las precipitaciones en un año hidrológico promedio multianual mensual, resulta en la disminución de las lluvias en los meses de avenidas en todos los escenarios; mientras que en los meses de estiaje se incrementa.

b. Temperatura

En la Figura 33, de las variaciones en la temperatura multianual mensual, todos los meses muestran incremento, similar comportamiento se da en el resto de escenarios, los que se muestran en las Figuras del 128 al 132 del ANEXO 11.

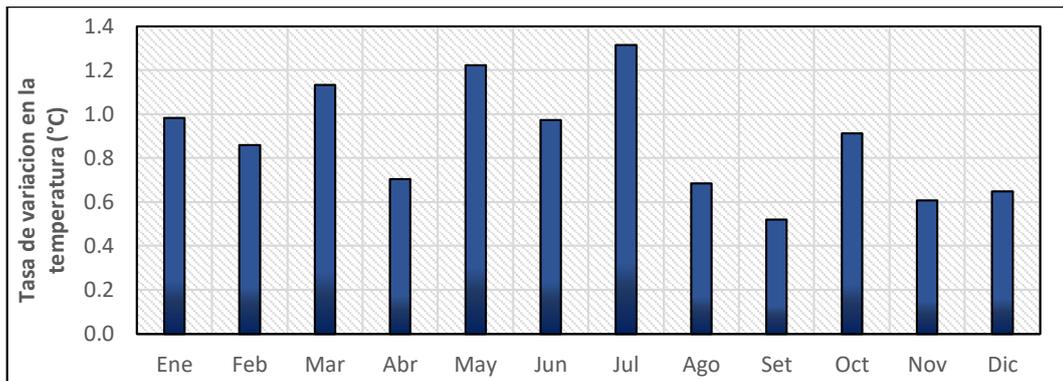


Figura 33: Variación de la temperatura en un futuro cercano, CNRM-CM5-RCP8.5

Tabla 33: Resumen variación promedio de la temperatura (2020-2040)

Modelo	Escenario	Variación (°C)
CANESM2	RCP 4.5	+2.23
	RCP 8.5	+2.24
CNRM-CM5	RCP 4.5	+0.79
	RCP 8.5	+0.88
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	+1.24
	RCP 8.5	+1.53

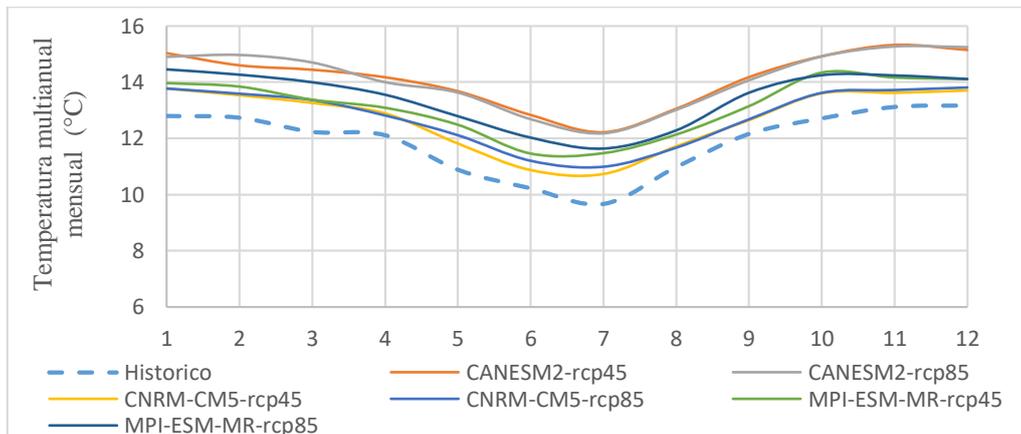


Figura 34: Variación multianual mensual promedio de la temperatura (2020-2040)

Los promedios de las variaciones multianuales mensuales, muestran incremento de la temperatura en los seis escenarios, como se resume en la Tabla 33; donde el CANESM2 – RCP4.5 y CANESM2 – RCP8.5 resultan con las de mayores variaciones. Gráficamente, el comportamiento de la temperatura se puede ver en la Figura 34.

c. Caudales

Como resultado de las simulaciones en ambos modelos hidrológicos, para escenario más crítico (CNRM-CM5 - RCP8.5) se muestra la Figura 35; donde la tasa de variación multianuales mensuales muestran reducción de caudales en todos los meses. En las Figuras 133 al 137 del ANEXO 12, se detalla los resultados del resto escenarios.

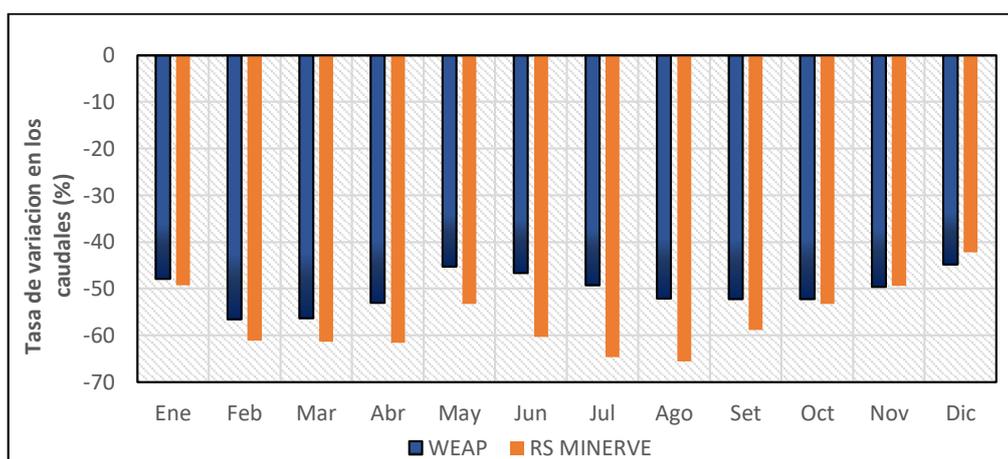


Figura 35: Variación de los caudales en el futuro cercano, CNRM-CM5-RCP8.5

El promedio de la tasa de variación multianuales mensuales, resultan en pérdidas de caudales en los seis escenarios, el cual se resume en la Tabla 34, donde, el escenario más crítico es el CNRM-CM5 - RCP8.5 de acuerdo con las simulaciones del RS MINERVE y WEAP.

Tabla 34: Resultados variación promedio de los caudales (2020-2040)

Modelo	Escenario	Δ RS MINERVE (%)	Δ WEAP (%)
CANESM2	RCP 4.5	-46.36	-47.65
	RCP 8.5	-51.67	-48.46
CNRM-CM5	RCP 4.5	-52.28	-47.16
	RCP 8.5	-56.74	-50.49
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	-53.65	-45.31
	RCP 8.5	-50.26	-44.99

Según la Tabla 34, todos los escenarios muestran una pérdida de más del 45 por ciento de caudales. Esto a pesar de la existencia de escenarios donde el promedio de la tasa de variación multianual mensual de precipitación, como en CANESM2 – RCP4.5, se

incrementaron en 30.47 por ciento. Cabe resaltar que este escenario con mayor incremento de precipitación, también, lo es en temperatura (+2.23°C).

Gráficamente, el comportamiento de los caudales multianuales mensuales en un año hidrológico como se ve en las Figuras 36 y 37, la mayor reducción ocurre en los meses de avenidas.

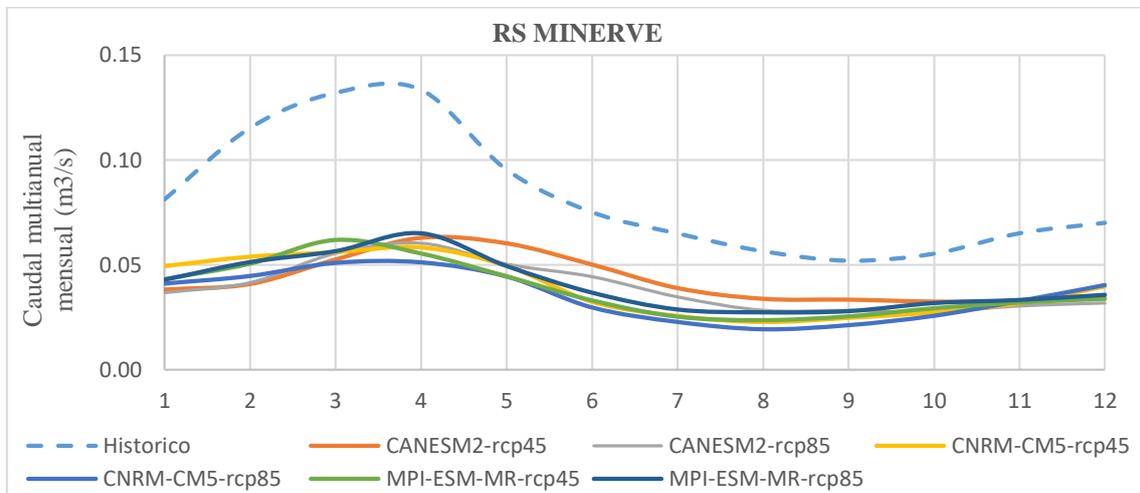


Figura 36: Variación multianual mensual promedio de caudales – RS MINERVE (2020-2040)

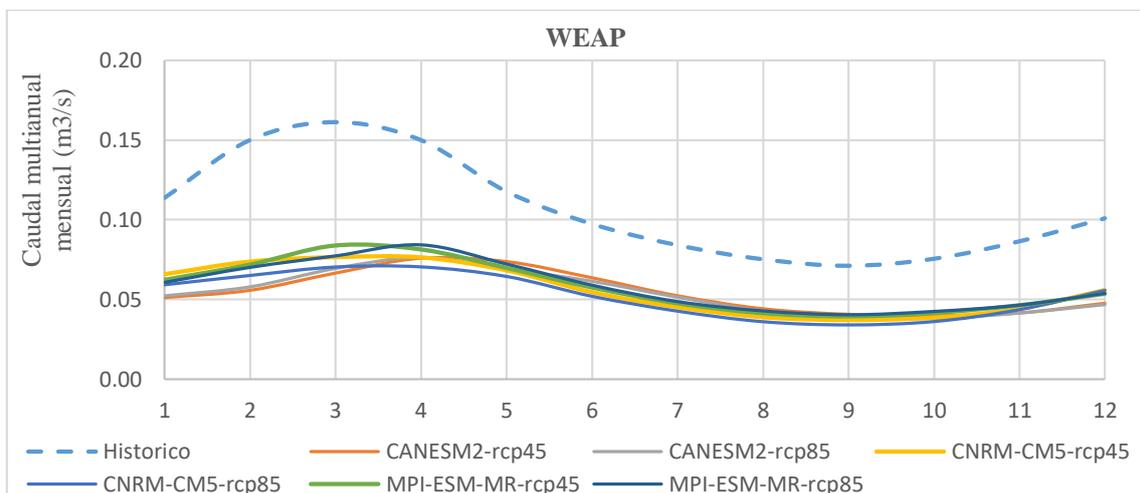


Figura 37: Variación multianual mensual promedio de caudales - WEAP (2020-2040)

4.8.2. Futuro medio: 2041-2050

a. Precipitación

La tasa de variación multianuales mensuales del escenario “más crítico” (CNRM-CM5 - RCP 8.5) en todos los meses disminuyen, excepto en mayo el cual se incrementa en 142.81 por ciento como se ve en la Figura 38. El resto de escenarios se puede ver en las Figuras 138

al 142 del ANEXO 13; donde, los resultados muestran incremento de las precipitaciones en los meses de estiaje (entre mayo y agosto), contrario al periodo de avenidas que se reducen.

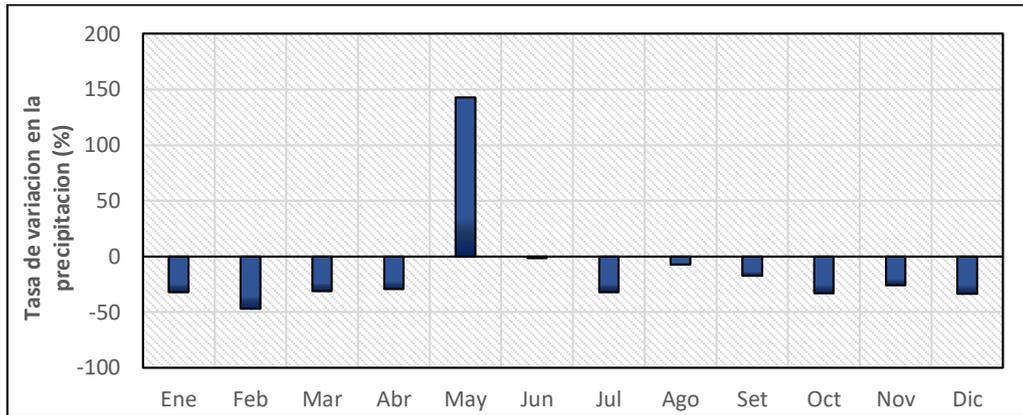


Figura 38: Variación de la precipitación en un futuro medio, CNRM-CM5 RCP8.5

La Tabla 35, muestra en resumen los promedios de las variaciones multianuales mensuales en cada uno de los escenarios; donde, el escenario “más crítico” (CNRM-CM5 – RCP8.5) disminuye en 12.36 por ciento. Por el contrario, el CANESM2 - RCP8.5 resultada un aumento de precipitación en 44.24 por ciento.

Tabla 35: Resumen, variación promedio de las precipitaciones (2041-2050)

Modelo	Escenario	Variación (%)
CANESM2	RCP 4.5	37.88
	RCP 8.5	44.24
CNRM-CM5	RCP 4.5	-12.07
	RCP 8.5	-12.36
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	14.99
	RCP 8.5	34.37

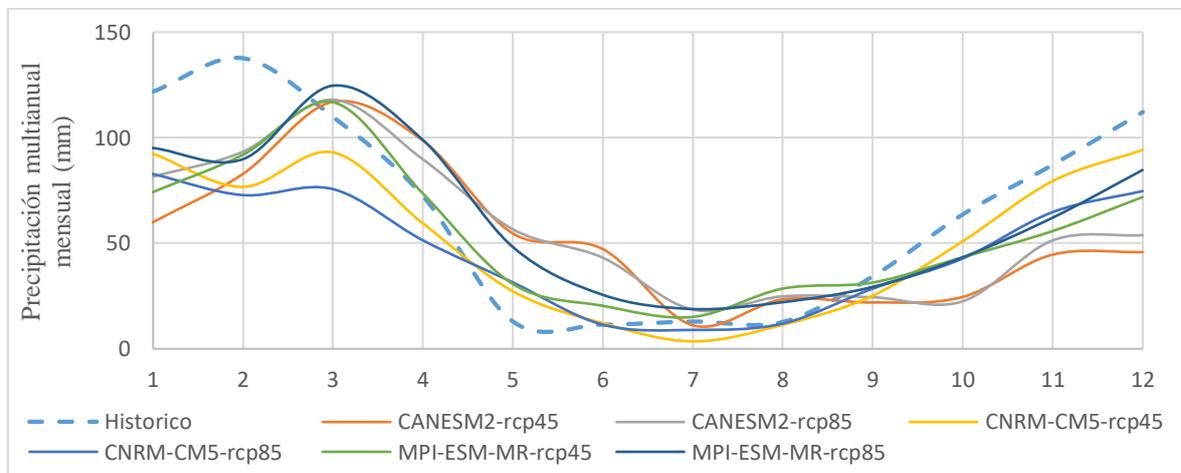


Figura 39: Variación multianual mensual promedio de las precipitaciones (2041-2050)

En la Figura 39 se puede notar que, en los seis escenarios futuros los resultados de las precipitaciones en entre marzo y setiembre se incrementan, mientras que en los meses de octubre a febrero sucede lo contrario.

b. Temperatura

En la Figura 40, se puede ver la tasa de variación multianual mensual para el escenario más crítico; donde, cada uno de los meses muestran incremento. Similar comportamiento se presenta en los otros cinco escenarios, como se puede ver en las Figuras 143 al 147 del ANEXO 14.

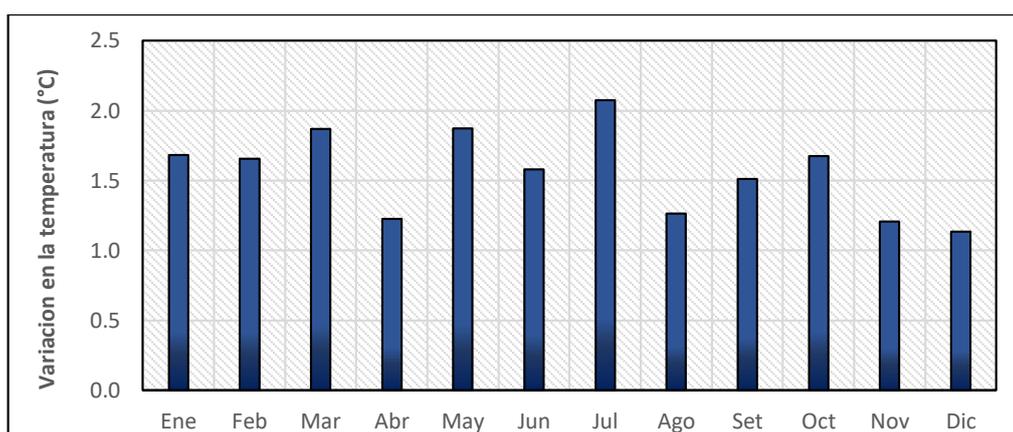


Figura 40: Variación de la temperatura en un futuro medio, CNRM-CM5-RCP8.5

El promedio de las variaciones multianuales mensuales, muestran en todos los escenarios incremento de la temperatura; el mayor se da en el CANESM2 - RCP8.5, que prevé un aumento en 3.39 °C, como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36: Resumen, variación promedio de las temperaturas (2041-2050)

Modelo	Escenario	Variación (°C)
CANESM2	RCP 4.5	+2.70
	RCP 8.5	+3.39
CNRM-CM5	RCP 4.5	+1.10
	RCP 8.5	+1.56
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	+2.04
	RCP 8.5	+2.53

La temperatura multianual mensual como se ve en la Figura 41, muestra que, en los seis escenarios futuros del periodo 2041 al 2050, aumentan. El CanESM2 - RCP8.5 es el de mayor variación (3.39 °C), con el cual con una temperatura multianual mensual promedio histórica de 11.89 °C pasaría a tener una de 15.28 °C en este periodo.

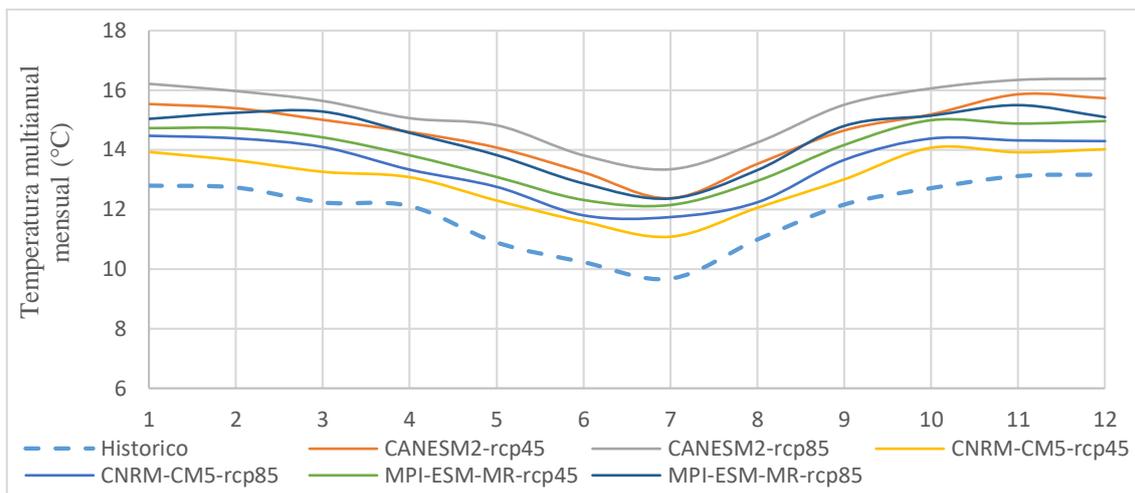


Figura 41: Variación multianual mensual promedio de la temperatura (2041-2050)

c. Caudales

En la Figura 42, se puede ver la comparación de las variaciones multianuales mensuales de los dos modelos hidrológicos, en el escenario “más crítico” (CNRM-CM5 - RCP8.5). Estas variaciones respecto del histórico resultan en pérdida de caudales, similar resultado se da en los otros cinco escenarios, cuyos resultados se pueden ver en las Figuras 148 al 152 del ANEXO 15.

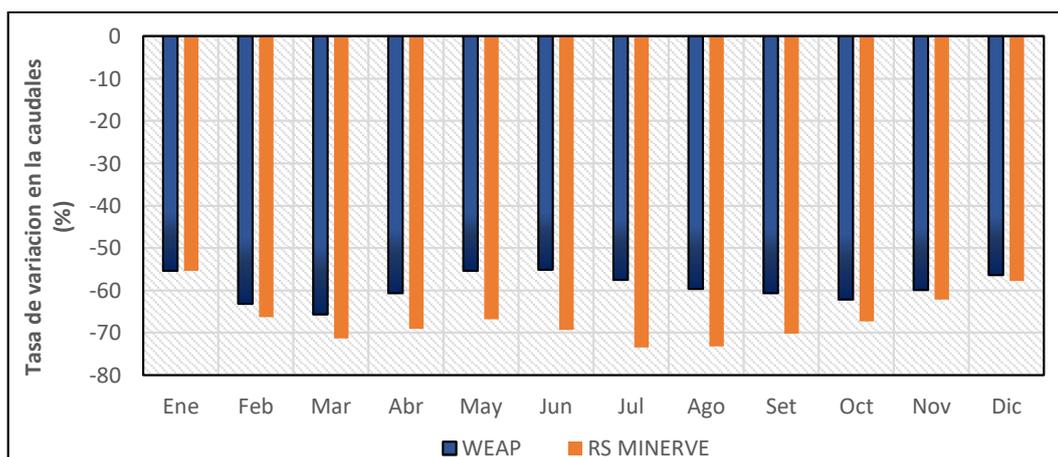


Figura 42: Variación de los caudales simulados en un futuro medio, CNRM-CM5 RCP8.5

El promedio de las variaciones multianuales mensuales en los seis escenarios se resume en la Tabla 37, como resultado todos los escenarios muestran pérdida de caudales. El escenario más crítico ocurre en CNRM-CM5 - RCP8.5, el cual, según el modelo HBV de RS MINERVE este resulta en 66.90 por ciento y en 59.35 por ciento con WEAP (“método de escorrentía pluvial”).

Tabla 37: Resultados variación promedio de los caudales (2041-2050)

Modelo	Escenario	Variación RS MINERVE (%)	Variación WEAP (%)
CANESM2	RCP 4.5	-40.12	-47.54
	RCP 8.5	-37.10	-43.01
CNRM-CM5	RCP 4.5	-49.78	-48.49
	RCP 8.5	-66.90	-59.35
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	-46.44	-45.74
	RCP 8.5	-27.96	-36.17

La pérdida de caudales afecta en mayor medida en los meses de avenida (enero a marzo), como se muestran en las Figuras 43 y 44; también, se puede ver que en el periodo de estiaje se ha incrementado; este resultado corresponde al aumento en las precipitaciones en el periodo de estiaje y de reducción en el de avenidas, visto en el análisis de la precipitación.

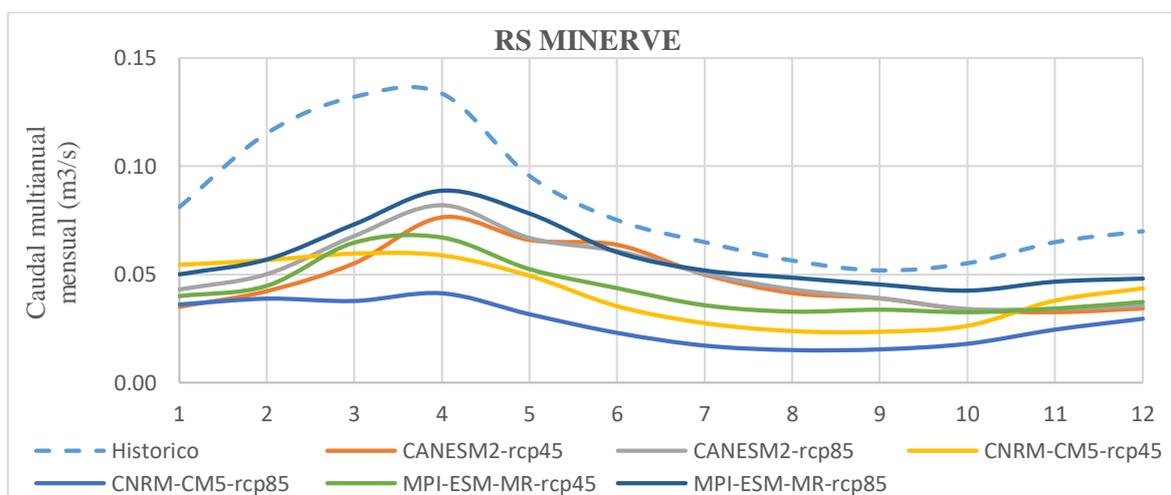


Figura 43: Variación multianual mensual promedio de caudales – RS MINERVE (2041-2050)

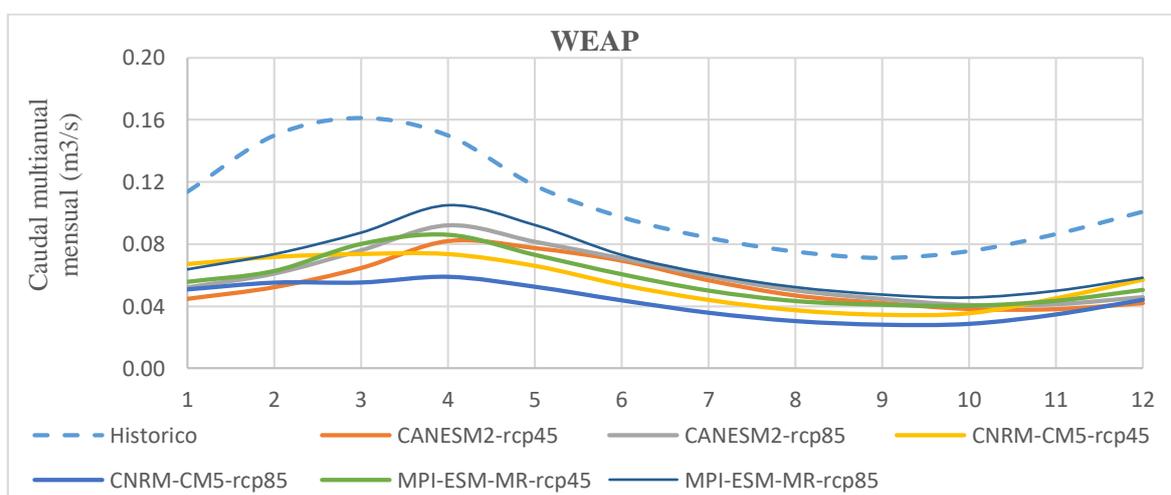


Figura 44: Variación multianual mensual promedio de caudales – WEAP (2041-2050)

4.8.3. Futuro lejano: 2051-2099

a. Precipitación

En el futuro lejano la tasa de variación multianual mensual en el escenario “más crítico” (CNRM-CM5 - RCP 8.5), como se ve en la Figura 45, muestra reducción en la mayoría de meses, excepto en mayo y junio, en los que se incrementa en 167.35 y 49.18 por ciento respectivamente. En las Figuras 153 al 157 del ANEXO 16, están los resultados del resto de los escenarios.

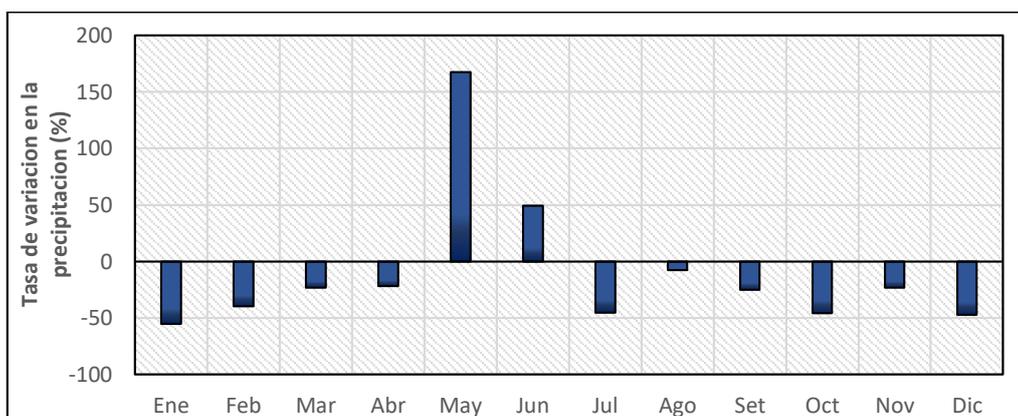


Figura 45: Variación de la precipitación en un futuro lejano, CNRM-CM5 - RCP8.5

El promedio de las variaciones multianuales mensuales se resume en la Tabla 38, donde, para el escenario más crítico, los resultados indican la pérdida de 9.82 por ciento de la precipitación. Contrario a este resultado el escenario CANESM2 – RCP8.5, muestra un incremento de 82.97 por ciento; tener en cuenta que este incremento se da en los meses de estiaje.

Tabla 38: Resumen variación promedio de la precipitación (2051-2099)

Modelo	Escenario	Variación (%)
CANESM2	RCP 4.5	41.35
	RCP 8.5	82.97
CNRM-CM5	RCP 4.5	-6.79
	RCP 8.5	-9.82
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	21.45
	RCP 8.5	36.10

El comportamiento de las precipitaciones en un año hidrológico de estos seis escenarios, se muestra en la Figura 46. Se observa la reducción de esta variable en los meses de avenidas y un aumento considerable en los meses de estiaje. El mayor pico se presenta en marzo, a diferencia del histórico el cual se da en febrero.

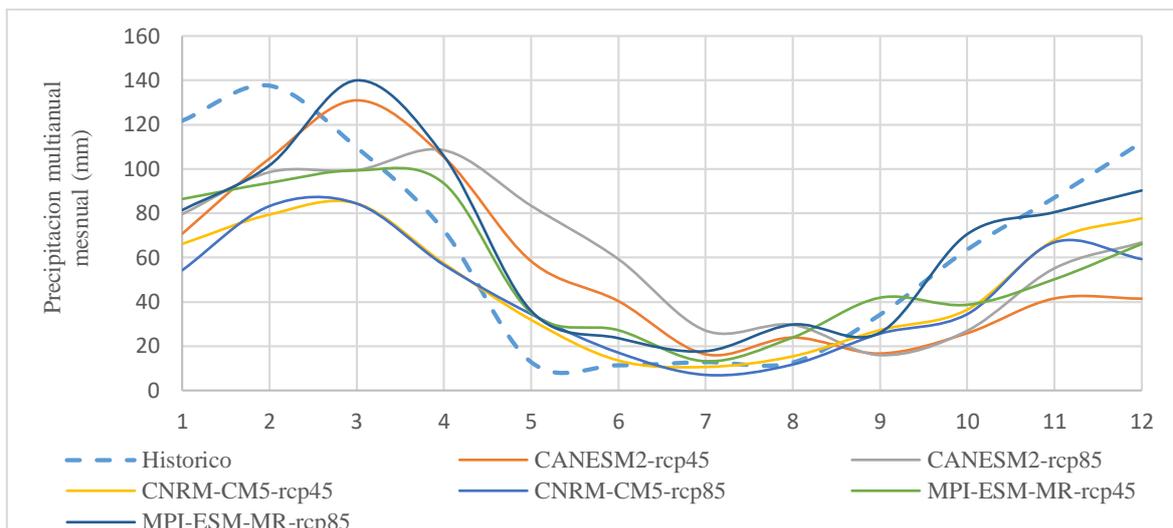


Figura 46: Variación multiannual mensual promedio de la precipitación (2051-2099)

b. Temperatura

Según la de variación multiannual mensual como se muestra en la Figura 47 para el escenario CNRM-CM5 – RCP8.5, donde, el mayor incremento se da en enero, en un valor de 2.5 °C. Los resultados muestran incremento en todos los meses y escenarios, como se puede ver en las Figuras 158 al 162 del ANEXO 17.

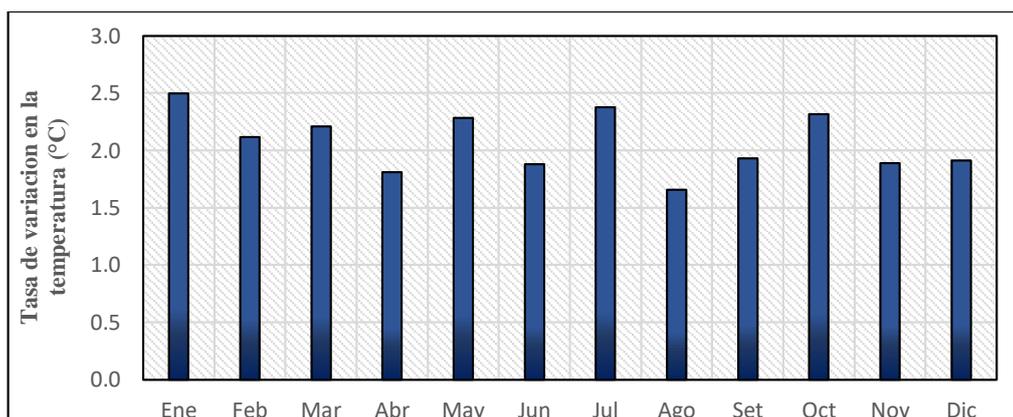


Figura 47: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CNRM-CM5-RCP8.5

El promedio de las variaciones multiannuals mensuales de todos los escenarios se muestra en la Tabla 39, donde la mayor variación se da en CANESM2 – RCP8.5, con temperaturas que llegan a aumentar en 4.07 °C; con el cual, de un promedio histórico de 11.89 °C se pasaría a uno de 15.96 °C. El escenario menos crítico es el CNRM-CM5 – RCP4.5, con un incremento de 1.61 °C.

Tabla 39: Resumen variación promedio de la temperatura (2051-2099)

Modelo	Escenario	Variación (°C)
CANESM2	RCP 4.5	+3.12
	RCP 8.5	+4.07
CNRM-CM5	RCP 4.5	+1.61
	RCP 8.5	+2.07
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	+2.14
	RCP 8.5	+3.17

En la Figura 48, se puede ver el comportamiento de la temperatura multianual mensual en un año hidrológico; donde se observa que en cada uno de los escenarios se ha superado la temperatura histórica promedio de 11.89 °C.

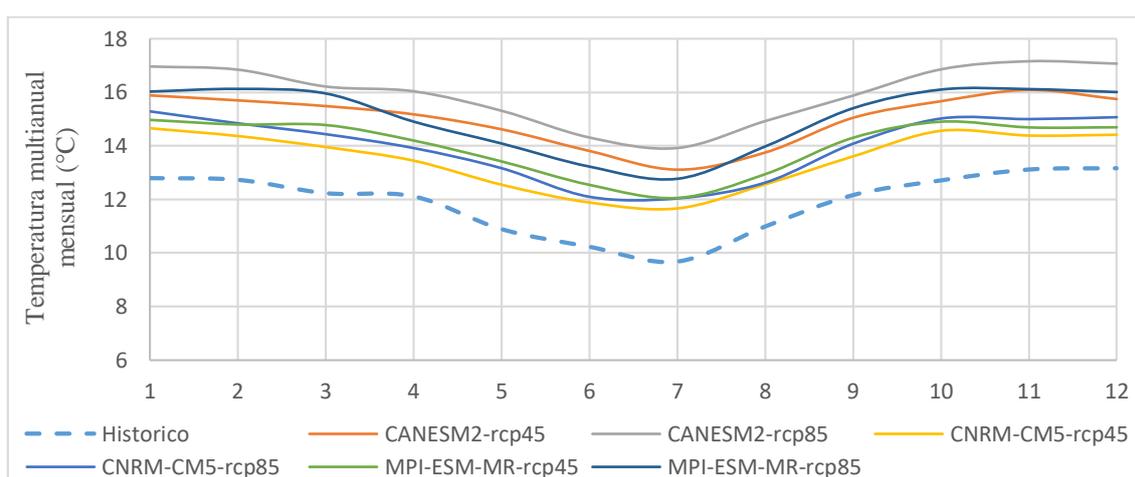


Figura 48: Variación multianual mensual promedio de la precipitación (2051-2099)

c. Caudales

Para el escenario “más crítico” (CNRM-CM5 – RCP8.5) en este periodo, los resultados de las simulaciones, muestran que la variación entre los caudales multianuales mensuales respecto del histórico, en todos los meses resultan ser negativas, que demuestra pérdidas como se ve en la Figura 49.

Se observó también que, según el modelo hidrológico HBV de RS MINERVE, en el escenario CANESM2-RCP4.5, los caudales en periodos de estiaje se incrementan en junio (6.12 por ciento), julio (3.41 por ciento) y agosto (3.38 por ciento); similar en el escenario CANESM2-RCP8.5, en junio (4.40 por ciento), julio (4.31 por ciento) y agosto (7.67 por ciento), lo cual es diferente a las variaciones en los caudales en los periodos cercano y medio, donde la pérdida se da en todos los meses. Los resultados del resto de escenarios se pueden ver en las Figuras 163 al 167 del ANEXO 18.

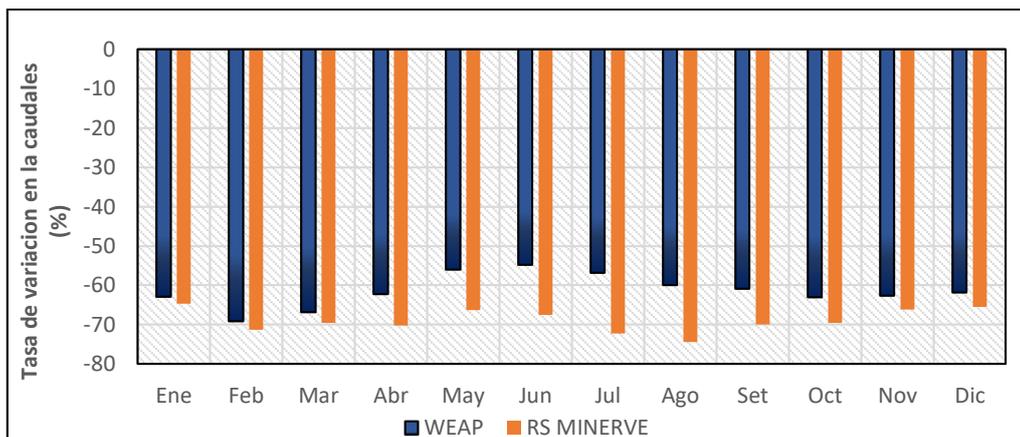


Figura 49: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CNRM-CM5 - RCP8.5

El promedio de las variaciones multianuales mensuales de los escenarios, resumidas en la Tabla 40, muestran pérdidas en todos los escenarios y en ambos modelos hidrológicos. El “más crítico” se da en CNRM-CM5-RCP8.5, donde, según el modelo HBV de RS MINERVE y el WEAP “método del escurrimiento de lluvias”, esta pérdida es de 68.96 y 61.42 por ciento respectivamente.

Tabla 40: Resumen variación promedio de los caudales (2051-2099)

Modelo	Escenario	Δ RS MINERVE (%)	Δ WEAP (%)
CANESM2	RCP 4.5	-21.44	-43.53
	RCP 8.5	-21.16	-34.31
CNRM-CM5	RCP 4.5	-67.09	-57.09
	RCP 8.5	-68.96	-61.42
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	-41.79	-43.00
	RCP 8.5	-14.95	-25.51

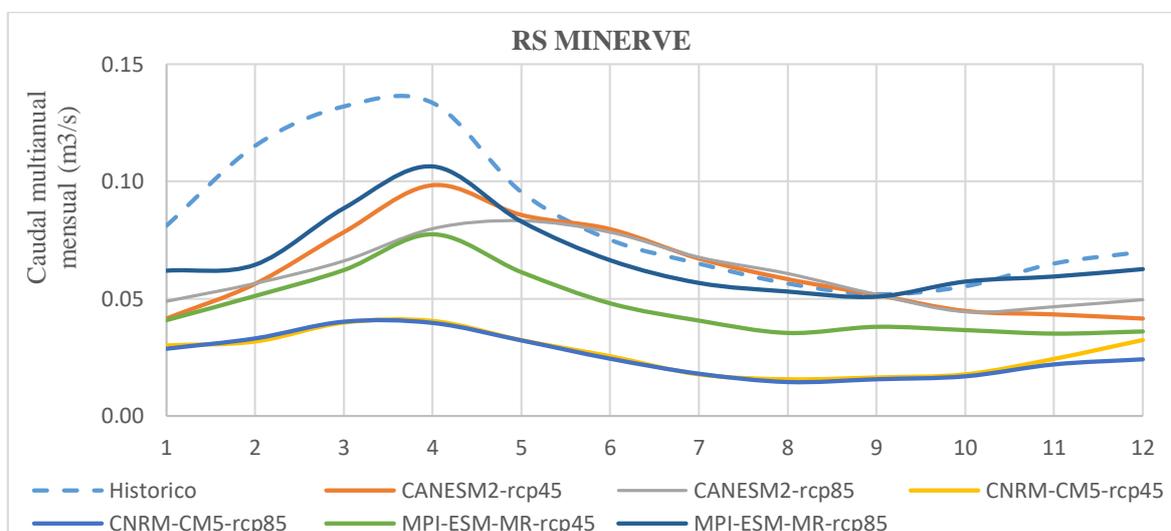


Figura 50: Variación multianual mensual promedio de caudales – RS MINERVE (2051-2099)

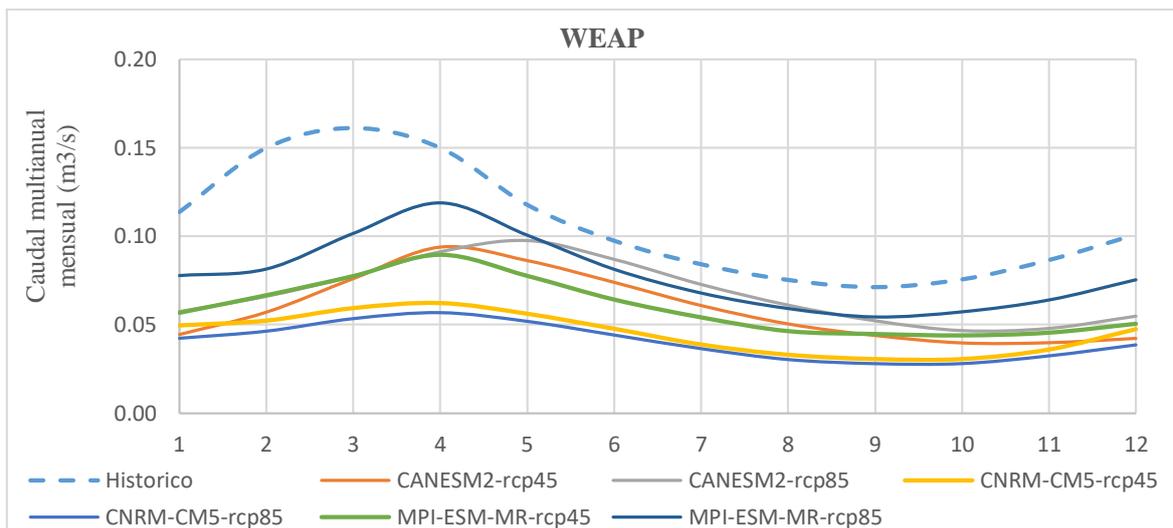


Figura 51: Variación multianual mensual promedio de caudales - WEAP (2051-2099)

En las Figuras 50 y 51, se puede ver el comportamiento de los caudales en un año hidrológico. Los resultados según los dos modelos hidrológicos, muestran disminución en cada uno de los seis escenarios. Según los escenarios CANESM2 RCP4.5 y RCP8.5, los caudales se incrementan entre de junio y agosto, los que corresponden al periodo de estiaje, este resultado está acorde con el incremento de precipitación en estos meses.

4.8.4. Resumen de resultados

Tanto por el modelo hidrológico HBV como por el WEAP, el escenario “más crítico” es el CNRM-CM5 – RCP8.5 en los tres periodos futuros cercano, medio y lejano, con pérdidas del 56.74, 66.90 y 68.96 y de 50.49, 59.35 y 61.42, respectivamente. También, el escenario “menos crítico” se da en el MPI-ESM-MR – RCP8.5, con resultados de 50.26, 27.96 y 14.95 por ciento según el HBV y de 44.99, 36.17 y 25.51 por ciento con el WEAP, como se puede ver en las Tablas 41, 42 y 43.

Tabla 41: Efectos del cambio climático en los caudales, periodo 2020-2040

Modelo	Escenario	Precipitación	Temperatura	Caudal	
		Variación (%)	Variación (°C)	Δ RS MINERVE (%)	Δ WEAP (%)
CANESM2	RCP 4.5	30.47	+2.23	-46.36	-47.65
	RCP 8.5	21.64	+2.24	-51.67	-48.46
CNRM-CM5	RCP 4.5	-16.95	+0.79	-52.28	-47.16
	RCP 8.5	-13.78	+0.88	-56.74	-50.49
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	-0.58	+1.24	-53.65	-45.31
	RCP 8.5	1.55	+1.53	-50.26	-44.99

Tabla 42: Efectos del cambio climático en los caudales, periodo 2041-2050

Modelo	Escenario	Precipitación	Temperatura	Caudal	
		Variación (%)	Variación (°C)	Δ RS MINERVE (%)	Δ WEAP (%)
CANESM2	RCP 4.5	37.88	+2.70	-40.12	-47.54
	RCP 8.5	44.24	+3.39	-37.10	-43.01
CNRM-CM5	RCP 4.5	-12.07	+1.10	-49.78	-48.49
	RCP 8.5	-12.36	+1.56	-66.90	-59.35
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	14.99	+2.04	-46.44	-45.74
	RCP 8.5	34.37	+2.53	-27.96	-36.17

Tabla 43: Efectos del cambio climático en los caudales, periodo 2051-2099

Modelo	Escenario	Precipitación	Temperatura	Caudal	
		Variación (%)	Variación (°C)	Δ RS MINERVE (%)	Δ WEAP (%)
CANESM2	RCP 4.5	41.35	+3.12	-21.44	-43.53
	RCP 8.5	82.97	+4.07	-21.16	-34.31
CNRM-CM5	RCP 4.5	-6.79	+1.61	-67.09	-57.09
	RCP 8.5	-9.82	+2.07	-68.96	-61.42
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	21.45	+2.14	-41.79	-43.00
	RCP 8.5	36.10	+3.17	-14.95	-25.51

Analizando el escenario “más crítico” (Tabla 44), estos resultados corresponden a la pérdida de precipitación del 13.78, 12.36 y 9.82 por ciento, y del incremento en la temperatura en 0.88, 1.56 y 2.07 °C en los tres periodos futuros respectivamente. Mientras que en el escenario más favorable o “menos crítico” (Tabla 45), corresponden al incremento en la precipitación de 1.55, 34.37 y 36.10 por ciento, y de temperaturas en 1.53, 2.53 y 3.17 °C.

Tabla 44: Características del escenario “más crítico”

CNRM-CM5 - RCP8.5				
Periodo futuro	Pp (mm)	Temp (°C)	Δ RS MINERVE (%)	Δ WEAP (%)
cercano	-13.78	0.88	-56.74	-50.49
medio	-12.36	1.56	-66.90	-59.35
lejano	-9.82	2.07	-68.96	-61.42

Tabla 45: Características del escenario "menos crítico"

MPI-ESM-MR - RCP8.5				
Periodo futuro	Pp (mm)	Temp (°C)	Δ RS MINERVE (%)	Δ WEAP (%)
cercano	1.55	1.53	-50.26	-44.99
medio	34.37	2.53	-27.96	-36.17
lejano	36.10	3.17	-14.95	-25.51

En el escenario “más crítico”, la pérdida de caudales se incrementa hacia el 2099 a pesar de que en promedio la pérdida de precipitación disminuye, esto puede ser a causa del aumento de la temperatura. Por el contrario, en el escenario “menos crítico” las pérdidas de caudales disminuyen, debido al aumento considerable de las precipitaciones; aunque, como se ha visto este corresponde a los meses de estiaje; así mismo la variación de la temperatura se incrementa, llegando a subir hasta en 3.17 °C. Gráficamente estas tendencias se pueden ver en la Figura 52.

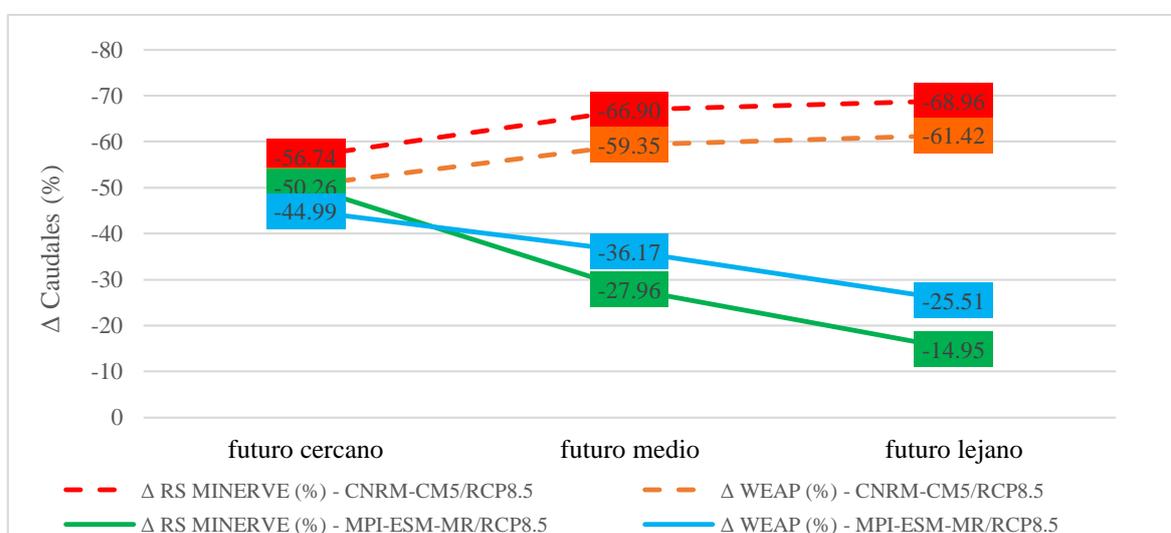


Figura 52: Tendencia de los escenarios "más crítico" y "menos crítico"

5. CONCLUSIONES

- Existe una buena correlación entre los datos observados de las estaciones del proyecto VLIR-OUS, con los de la base PISCO de SENAMHI.
- En el periodo 1981 al 2016, la menor precipitación anual en ocurre en 1992 (“sequía extrema”), mientras que 1984, 1993 y 2011 son los de mayor valor (“precipitaciones extremas”). Este último año, corresponde con el incremento de los caudales anormales, registrados por la estación hidrométrica de Mchique. Se concluye que existe una buena correlación entre las precipitaciones y los caudales.
- La calibración de los modelos hidrológicos HBV del RS MINERVE y WEAP (“método de escorrentía pluvial”), están en el rango de un rendimiento “muy bueno”.
- Los resultados muestran que el modelo HBV es más sensible en los resultados respecto de WEAP, esta variación se incrementa en los escenarios más extremos, con variaciones de más 20 por ciento en los resultados.
- Según el promedio multianual evaluado en el periodo del 2010 al 2099, cuatro escenarios resultan con pérdida de caudales, cuyo promedio multimodelo es de 35.10 y 16.67 por ciento según el HBV y WEAP, respectivamente. Como consecuencia de la reducción del 18.69 por ciento en la precipitación y del incremento en 2.10 °C.
- Los resultados en los seis escenarios futuros y en los tres periodos de análisis en la precipitación, muestran cambios en el comportamiento del año hidrológico, cuyas variaciones indican aumento en el periodo de estiaje (entre abril y agosto) y reducción en avenidas (noviembre a febrero). Así mismo, el mes de mayor precipitación es marzo, contrario al histórico el cual se da en febrero.
- Del promedio multianual mensual se concluye que, el escenario “más crítico” es el CNRM-CM5 - RCP8.5, cuyas pérdidas hacia el futuro lejano se incrementa, a pesar de que en la precipitación disminuye, esto debido al aumento de la temperatura. En

el escenario “menos crítico” (MPI-ESM-MR - RCP8.5), esta pérdida de caudales disminuye, a causa del aumento considerable de las precipitaciones, a pesar de que las variaciones de la temperatura se incrementan.

- Todos los modelos muestran una pérdida promedio multianual mensual de más del 45.66 por ciento de la oferta hídrica en los tres periodos (futuro cercano, medio y lejano); a pesar del aumento del 16.37 por ciento en la precipitación y de 2.13 °C en la temperatura.
- De la encuesta realizada en la microcuenca Mchique y sus alrededores, los pobladores perciben el cambio climático en el retraso del inicio de lluvias, de mayor intensidad y corto periodo, así como precipitaciones en fechas que no corresponden.

6. RECOMENDACIONES

- El uso de herramientas como PISCO de SENAMHI, u otras como mediciones satelitales de libre acceso, en zonas en las que no se encuentran estaciones meteorológicas.
- Es importante calibrar las estaciones meteorológicas al menos una vez al año, así como también realizar la limpieza y control de datos mensualmente en las mismas, ya que de ellas depende la calidad de información. De igual manera, se debe tomar los debidos cuidados en las estaciones hidrométricas.
- Para mejorar la representación de los modelos hidrológicos en una cuenca estudiada, es recomendable trabajar con periodos largos que, incluyan al menos dos eventos similares como fenómenos El Niño, sequías, entre otros.
- Las simulaciones que incluyan “eventos extremos”, debe contar con información hidrométrica que incluya tanto en la calibración como en la validación eventos similares. Esto a fin de obtener resultados óptimos en los índices de rendimiento en estos procesos.
- Se recomienda hacer un análisis sobre la intensidad de las lluvias en periodos futuros, ya que existe la posibilidad de que en un futuro las precipitaciones sean de mayor intensidad y de corto periodo.
- Con los avances de la tecnología, es menester de los estudiantes y educadores ampliarse en campos como la geingeniería, la inteligencia artificial, la computación cuántica entre otros, que son una alternativa para la solución del procesamiento de información con gran cantidad de datos, mejora de los modelos predictivos, tecnología que puede modificar el clima entre otros; los pueden ser usados como una herramienta para el análisis en el campo de la hidrología.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANA (Autoridad Nacional del Agua). (2013). Plan Nacional de recursos hídricos del Perú. Lima, Perú.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua). (2015). Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de Mantaro. Informe final. Lima, Perú.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua). (junio de 2019). Autoridad Nacional del Agua. Obtenido de <https://www.ana.gob.pe/gestion-compartida/preguntas-frecuentes-del-usuario>.
- Armenta, G.; Dorado, J.; Rodriguez, A.; Ruiz, J. (2014). Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.
- Asurza, F. (2017). Comparación de los productos TRMM y GPM para el modelamiento hidrológico en la cuenca del río Huancane (Tesis Ingeniero agrícola). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 101 p.
- Asurza, F.; Ramos, C.; Lavado, W. (2018). Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané, Perú. Lima, Perú.
- Avalos, G.; Oria, C.; Jacome, G.; Acuña, D.; Llacza, A.; Cubas, F. (2013). Cambio climático en la cuenca del río Mantaro, Proyecciones para el año 2030. SENAMHI. Lima, Perú.
- Aybar, C.; Lavado, W.; Huerta, A.; Fernandez, C.; Vega, F.; Sabino, E.; Felipe, O. (2017). Uso del producto grillado PISCO de precipitaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI. Lima, Perú.
- Barnett, V. & Lewis, T. (1994). Outliers in statistical data. Reino Unido. Wiley
- Bettolli, M.; Rivera, J. & Penalba, O. (2010). Regionalización de los días secos en Argentina, un enfoque metodológico. Vol. 35 N° 2. Buenos Aires, Argentina.
- Boddy, R. & Smith, G. (2009). Statistical methods in practice, for scientists and technologists. Wiley.
- Camones, A. (2015). Influencia de la humedad del suelo en la relación precipitación-escorrentía en las cuencas Anya y Mchique (Tesis Ingeniero agrícola). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 226 p.
- Canales, M. (2015). Modelación del proceso precipitación escorrentía en la cuenca del río Ica (Tesis Ingeniero agrícola). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 210 p.

- Chavez, J. (2015). Variación de la oferta hídrica natural del río Ica por efecto del cambio climático (Tesis Ingeniero agrícola). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Chow, V., Maidment, D. & Mays, L. (2000). Hidrología Aplicada. Bogota, Colombia.
- CIIFEN (Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno en el Niño). (2014). Metodología para la estimación de vulnerabilidad en Ecuador, Perú y Bolivia, Proyecto información de cambio climático y biodiversidad para el fomento de políticas públicas de conservación y adaptación en la región de los Andes Tropicales. Guayaquil, Ecuador.
- CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase). (abril, 2019). CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project, WCRP World climate Research Programme. Disponible en <https://cmip.llnl.gov/cmip5/>
- Cortes, G. (2010). Evaluación de un modelo hidrológico semidistribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el Rio Juncal (Tesis Ingeniería Civil). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Cuadrat, J. & Pita, F. (2011). Climatología. Madrid, España.
- Dahmen, E. & Hall, M. (1990). Screening of hidrological Data: Test for stationarity and relative consistency. Netherlands.
- Espinoza, J. (2005). El método del vector regional de índices pluviométricos. Curso taller: Utilización del método del Vector Regional con HYDRACCESS - SENAMHI. Lima, Perú.
- Foehn, A.; Garcia, J.; Roquier, B.; Fluixa, J.; Paredes, J. (2018). RS MINERVE - User's manual v2.11. Switzerland.
- Fowler, H.; Blenkinsop, S.; Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. Wiley.
- FIC (Fundación para la Investigación del Clima). (mayo, 2019). Descripción de la metodología de downscaling estadístico - FICLIMA. Disponible en: <https://www.ficluma.org/que-es-la-fic-2/>.
- Garcia, J.; Paredes, J.; Foehn, A.; Roquier, B.; Fluixa, J. (2018). RS MINERVE - Technical manual v2.16. Switzerland.
- IMEFEN (Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño). (diciembre, 2018a). Calibración de modelos hidrológicos. FIC-UNI. Lima, Perú. Disponible en: <http://www.imefen.uni.edu.pe/modhidro.htm>.
- IMEFEN (Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño). (diciembre, 2018b). Modelos hidrológicos. FIC-UNI. Lima, Perú. Disponible en: <http://www.imefen.uni.edu.pe/modhidro.htm>.
- Iglewicz, B. & Hoaglin, D. (1993). How to detected and handle outliers. Wisconsin, United States of America. Vol. 6, 77p.

- IGP (Instituto Geofísico del Perú). (2005). Diagnóstico de la Cuenca del Mantaro bajo la visión del cambio climático, Volumen II. Lima, Perú.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (1997). Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva, Switzerland.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (julio, 2017). Modelos climáticos globales (GCM). Data Distribution Centre. Disponible en: http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (julio, 2017). Proceso de escenario para el AR5. Data Distribution Centre. Disponible en: http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenarioproces/RCPs.html
- IPCC (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático). (abril, 2019). Ficha informativa: El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/FS_what_ipcc_es.pdf
- Jimenez, M. (9 de mayo de 2018). R Pubs, brought to you by RStudio. Obtenido de <http://rpubs.com/mjimcua/clustering-jerarquico-en-r>
- Junquas, C.; Takahashi, K. & Espinoza, J.-C. (2014). Modelación y cambio climático. Foro Internacional Cambio Climático. Perú.
- Lavado, W.; Aybar, C.; Huerta, A.; Sabino, E.; Vega, F.; Fernández, C. & Endara, S. (mayo, 2019). Sistema de observación de inundaciones potenciales del SENAMHI. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=observacion-de-inundaciones>
- León, K. (2018). Modelos de cambio climático para la evaluación de la disponibilidad hídrica futura. Curso taller - Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú.
- Llauca, H. (2014). Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas del Anya y del Mchique, departamento de Junín-Perú (Tesis Ingeniero agrícola). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú.
- Lopez, P.; Seoane, R.; Fornero, L.; Rodríguez, J. & Nuñez, M. (s.f.). Análisis de tendencia en series autocorrelacionadas. Belgrado.
- Lutz, A.; Immerzeel, W.; Kraaijenbrink, A.; Shrestha, M. & Bierkens, P. (2016). Climate Change Impacts on the Upper Indus Hydrology: Sources, Shifts and Extremes. Universidad de Vigo. España.
- Mejía, J. (2012). Hidrología Aplicada. Lima, Perú.
- NEX-GDDP. (2019). NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections. Disponible en: <https://nex.nasa.gov/nex/projects/1356/>
- Omondi, V.; Van der Tol, C.; Van Oel, P.; Meins, F.; Becht, R.; Onyando, J. & Su, Z. (2015). Characterisation of hydroclimatological trends and variability in the Lake Naivasha basin, Kenya.

- OMM (Organización Meteorológica Mundial). (agosto, 2017). Clima. Organización Meteorológica Mundial. Disponible en: <https://public.wmo.int/es/preguntas-frecuentes-clima>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (1992). Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático.
- Perez, A. (1969). Métodos para elaborar curvas de calibración en cauces aluviales. Colombia.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). (2019). Perspectivas de medio ambiente mundial, GEO 6: Planeta sano, personas sanas. Nairobi.
- SEI (Stockholm Environment Institute). (2009). Guía metodológica: Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Santiago, Boston.
- SEI (Stockholm Environment Institute). (2015). User guide for WEAP. Somerville, USA.
- SEI (Stockholm Environment Institute). (junio, 2019). Water Evaluation And Planning (WEAP). Disponible en: <http://www.weap21.org/index.asp?action=202>
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). (2007). Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Mantaro para el año 2100. Lima, Perú.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). (2013). Cambio climático en la cuenca del Río Mantaro, proyecciones para el año 2030. Lima, Perú.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). (2014). Regionalización Estadística de Escenarios climáticos en Perú. Lima, Perú.
- Stocker, T.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Nauels, A.; Tignor, M.; Allen, S.; Boschung, J.; ... Xia, Y. (2013). Cambio climático 2013, bases físicas: Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto informe de Evaluación del IPCC. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos de América.
- Tosunoglu, F. & Kisi, O. (2016). Trend analysis of maximum hydrologic drought variables using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method. Wiley. Turkey.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (agosto, 2017). The Fifth Assessment Report of the IPCC. United Nations Framework Climate Change. Disponible en: http://unfccc.int/science/workstreams/cooperation_with_the_ipcc/items/8732.php
- Villón, M. (2011). Hidrología. Lima, Perú.
- Villón, M. (2016). Hidrología Estadística. Lima, Perú.
- WCRP (World Climate Research Programme). (abril, 2019). Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP). World Climate Research Programme. Disponible en: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>
- WMO (World Meteorological Organization). (2012). International glossary of hydrology. Switzerland.

- WMO (World Meteorological Organization). (junio 2017). Climate. World Meteorological Organization. Disponible en: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate>
- Yue, S.; Pilon, P.; Phinney, B. & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. Wiley.

8. ANEXOS

ANEXO 1: PLANOS DE UBICACIÓN

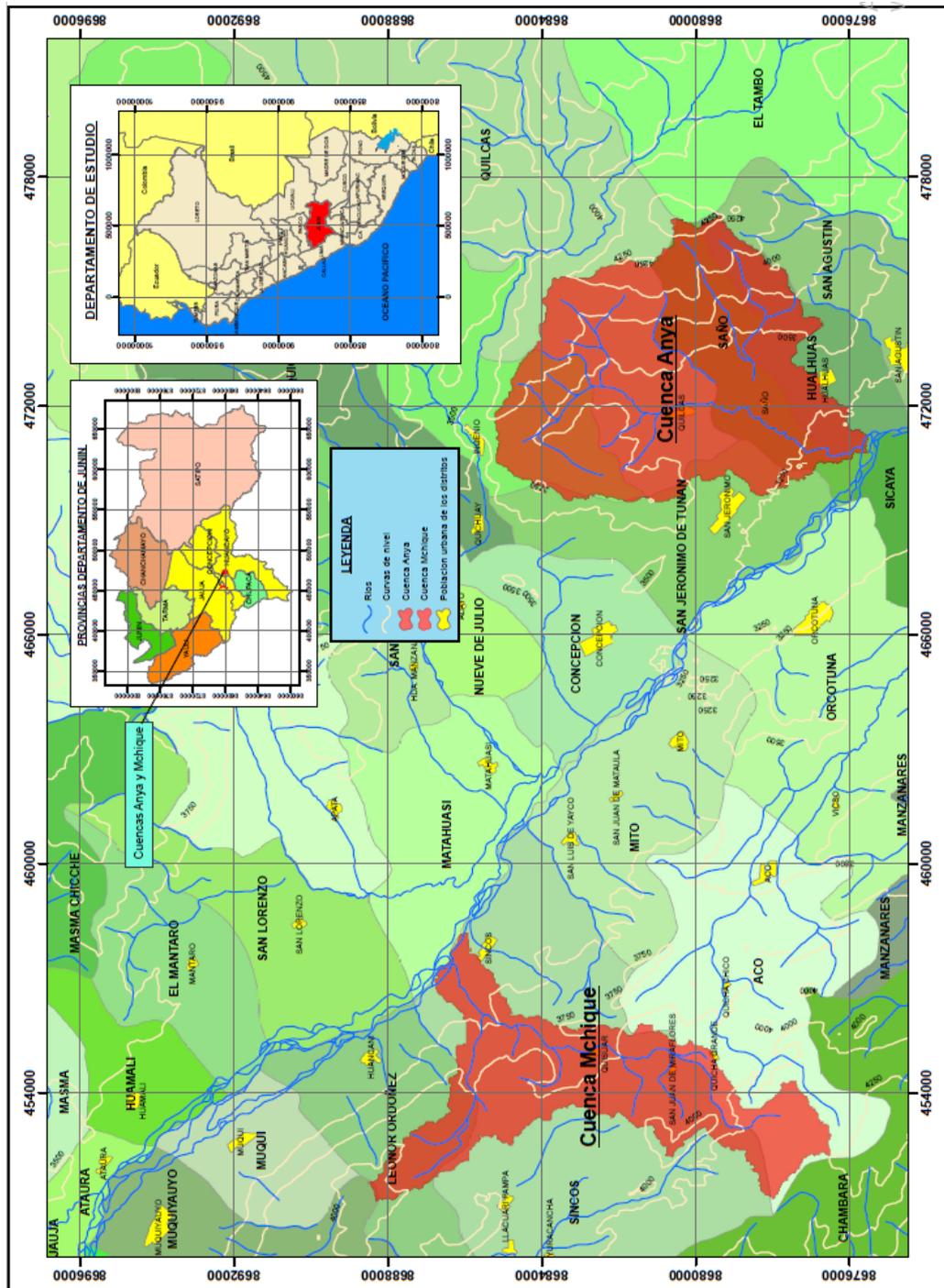


Figura 53: Ubicación de la microcuenca Mchique

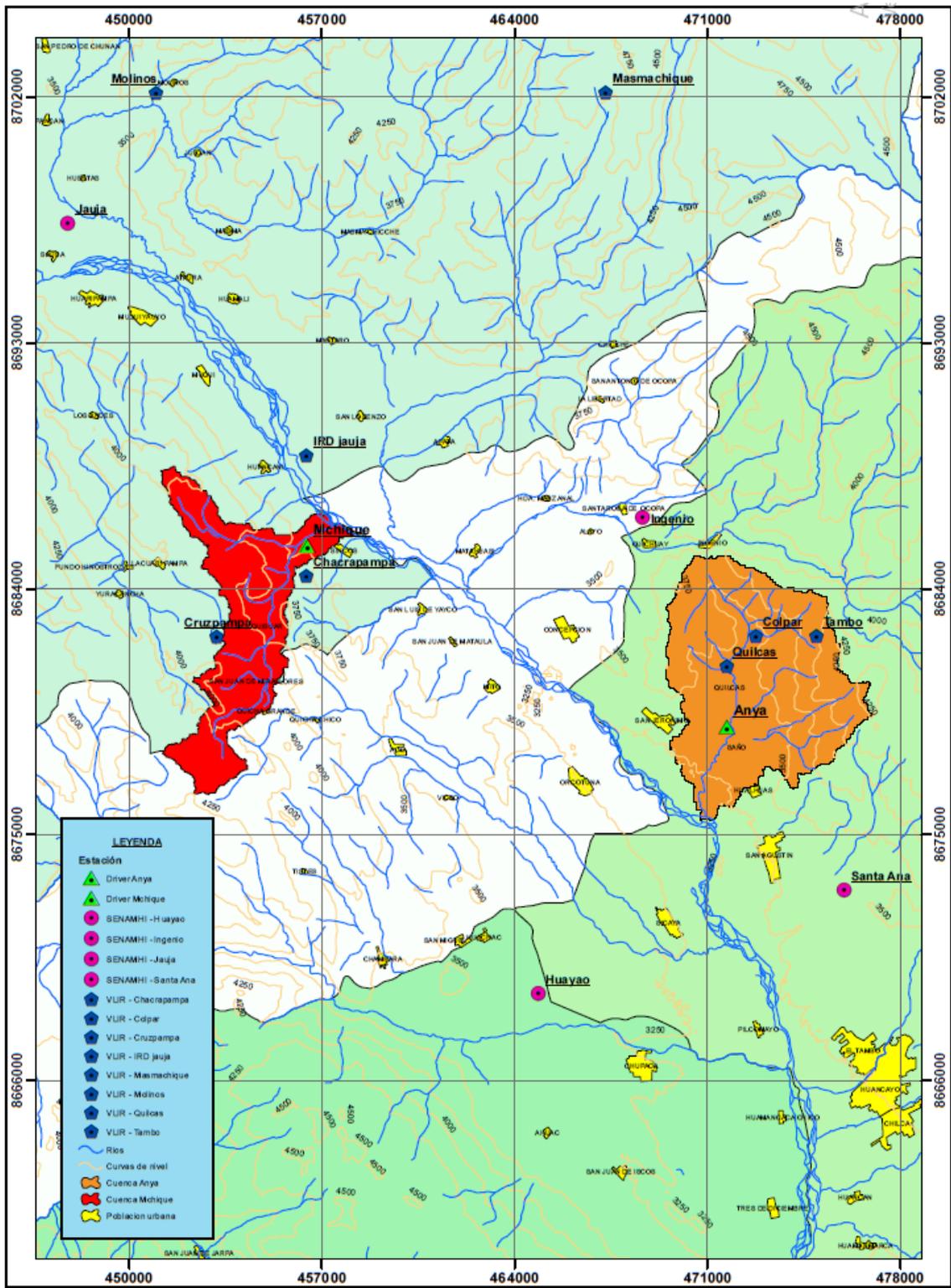


Figura 54: Ubicación de las estaciones meteorológicas

ANEXO 2: FOTOS - TRABAJO DE CAMPO



Figura 55: Calibración de las estaciones Davis



Figura 56: Descarga de datos hidrométricos



Figura 57: Acumulación de sedimento en la estación Cruzpampa



Figura 58: Presencia de vegetación en la estación Aramachay

ANEXO 3: REGISTRO DE DATOS EN LAS ESTACIONES VLIR-OUS Y SENAMHI

Tabla 46: Número de datos faltantes por estaciones

1	HUAYAO - SENAMHI																										
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
ENERO	1	1	5	2	2		1		1																		
FEBRERO	2	2	6	1	1				1																		
MARZO	5	4	1	1	3	1										1											
ABRIL	1	3	1	4	2																						
MAYO	2	2	4	1		1				1																	
JUNIO	1		2								1																
JULIO	3	1	6	1																							
AGOSTO			1	3		1			1																		
SEPTIEMBRE	1	2		3			1	1																			
OCTUBRE	3	4		3	1												1										
NOVIEMBRE	2	6	3	1	1		1	1	2				1														
DICIEMBRE	2	3	1	2	1				1													1					

2	INGENIO - SENAMHI																										
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
ENERO											1			1		1	2	1	2								
FEBRERO				1									1	1	1	1	1	1	2		1	1					
MARZO				3	1	1		1	1	1	2	1	3	1		1	3	2		1	4	1		1	1	1	
ABRIL				1							3		2				1	3									
MAYO							3					2															
JUNIO																											
JULIO							1					1						1									
AGOSTO							2	4		1							1	1	2								
SEPTIEMBRE							4	3				1						1									
OCTUBRE								2	3				1				2	1	1	1						3	
NOVIEMBRE									1			2					2	1	1	1						3	
DICIEMBRE												2					4	2	2							3	

3	JALIA - SENAMHI																										
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
ENERO																											
FEBRERO	1		1																								
MARZO																											
ABRIL				1																							
MAYO	1					1	2																				
JUNIO	1																										
JULIO	3			1							1																
AGOSTO	3											1															
SEPTIEMBRE	3				2								2	1			2	1	1	1							
OCTUBRE	14				1		1										2	1	1								
NOVIEMBRE	6	1					1										4	2	2								
DICIEMBRE																											

4	SANTA ANA - SENAMHI																										
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
ENERO			16			1	1	6																			
FEBRERO			1		1		1																		1		
MARZO			1																								
ABRIL				4																	2						
MAYO			1					1	1													2					
JUNIO						1	2																				
JULIO																											
AGOSTO								4																			
SEPTIEMBRE			2		1		1																				
OCTUBRE			2	1	1	2	3										1										
NOVIEMBRE						1							1														
DICIEMBRE					3								1														

“continuación”

5	CHACRAPAMPA - VLIR-OUS																											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
ENERO																								9				
FEBRERO																								10				
MARZO																												
ABRIL																											1	
MAYO																								3				
JUNIO																							13			6		
JULIO																												
AGOSTO																												
SEPTIEMBRE																							0	4	1			
OCTUBRE																							0					
NOVIEMBRE																									19			
DICIEMBRE																									21			

6	CRUZPAMPA - VLIR-OUS																											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
ENERO																												
FEBRERO																									15	10		
MARZO																								31	6			
ABRIL																								2	0		3	
MAYO																												
JUNIO																							13				7	
JULIO																												
AGOSTO																							13					
SEPTIEMBRE																									1			
OCTUBRE																												
NOVIEMBRE																								4				
DICIEMBRE																									9			1

7	IRD JAUJA - VLIR-OUS																											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
ENERO																								1			1	
FEBRERO																								8	3			
MARZO																							2		2			
ABRIL																								18				
MAYO																								9				
JUNIO																								30				
JULIO																								31				
AGOSTO																							6	26	28	0		
SEPTIEMBRE																							20		0			
OCTUBRE																									0			
NOVIEMBRE																										8		
DICIEMBRE																									0			

8	MOLINOS - VLIR-OUS																												
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		
ENERO																							31	25	31	15			
FEBRERO																								28	1	1	5		
MARZO																								31	4				
ABRIL																								30			1		
MAYO																								31	15				
JUNIO																								30	7				
JULIO																								29	0	31	8		
AGOSTO																								31	10	31			
SEPTIEMBRE																							15	11	30	26	3		
OCTUBRE																								31	23	27			
NOVIEMBRE																								4	30	8.2		7	
DICIEMBRE																							19	4	30	15.4	4	13	15

9	MASMACHIQUE - VLIR-OUS																											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
ENERO																												0
FEBRERO																												0
MARZO																									22	2		
ABRIL																												
MAYO																												
JUNIO																										0		
JULIO																									0			
AGOSTO																								10				
SEPTIEMBRE																								28				
OCTUBRE																								10				
NOVIEMBRE																												
DICIEMBRE																												

10	COLPAR - VLIR-OUS																											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
ENERO																6	15		2	0			31					
FEBRERO																								0				
MARZO																								28	28			
ABRIL																								31	31			
MAYO																								16	0			
JUNIO																								15	9	0		
JULIO																								30	30		2	11
AGOSTO																								17	31			5
SEPTIEMBRE																								30				
OCTUBRE																								31				
NOVIEMBRE																								31	0	0		4
DICIEMBRE																								30	0	0		10
																								31	0	0		
																								31	0	0		
																								24	9			
																								28				
																									30	30		
																									25			
																									17			

11	QUILCAS - VLIR-OUS																				
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	20

ANEXO 4: ANÁLISIS DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS PISCO

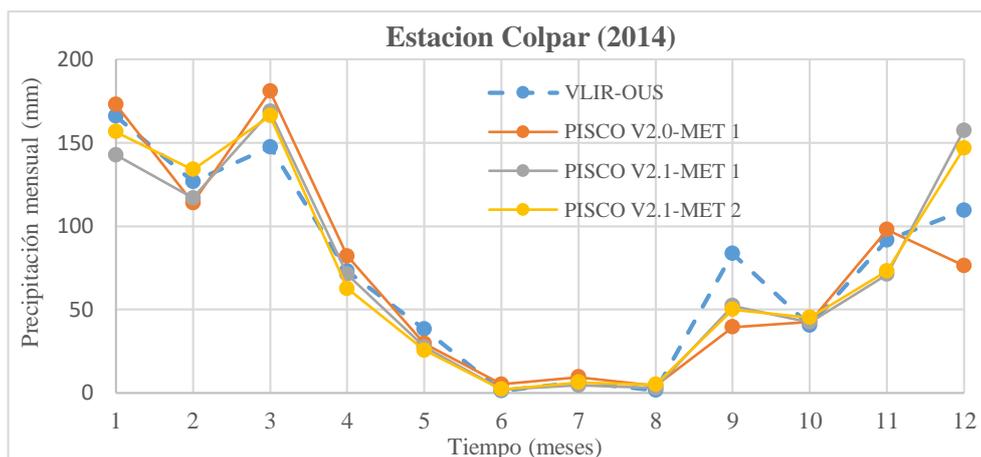


Figura 59: Comparación de la precipitación mensual en la estación Colpar (2014)

Tabla 47: Precipitaciones mensuales de la estación Colpar (2014)

MES	PP (mm) - VLIR	PISCO V2.0		PISCO V2.1	
		MET 1	MET 1	MET 1	MET 2
Enero	166	173.02	142.81	156.57	
Febrero	126.8	113.95	116.81	133.89	
Marzo	147.4	180.93	168.83	166.13	
Abril	73.2	82.13	71.11	62.57	
Mayo	38.4	29.53	27.45	25.56	
Junio	1.2	5.07	1.93	2.16	
Julio	6.4	9.51	4.56	6.28	
Agosto	1.6	4.15	2.93	4.94	
Setiembre	83.6	39.46	52.17	49.96	
Octubre	40.4	42.67	42.34	45.24	
Noviembre	91.6	97.82	71.01	73.08	
Diciembre	109.6	76.33	157.41	146.81	
∑ Pp 2014	886.2	854.57	859.37	873.20	

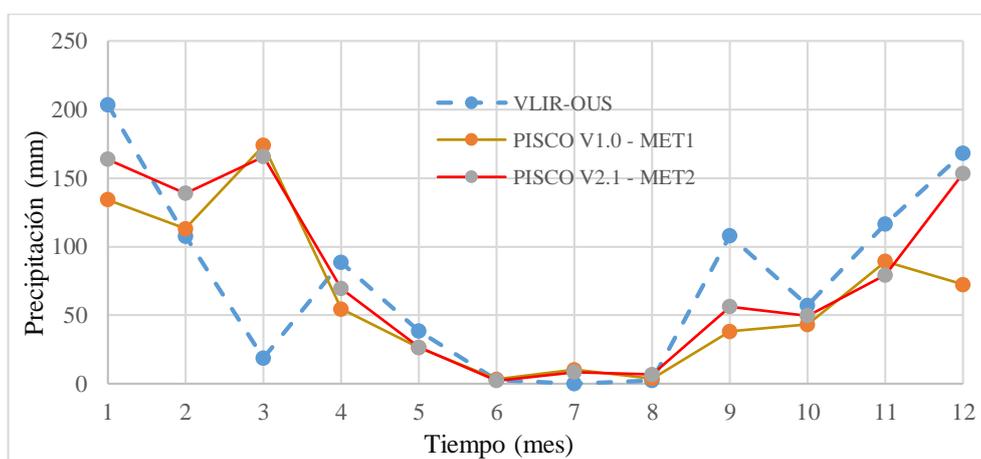


Figura 60: Sobreestimación y subestimación de datos en la estación Tambo (2014)

Tabla 48: Precipitación mensual en la estación Tambo (2014)

MES	VLIR-OUS	PISCOv2.0 – MET1	PISCOv2.1 – MET2
Enero	203.2	134.31	163.770
Febrero	107.6	113	138.810
Marzo	18.8	173.8	165.660
Abril	88.4	54.5	69.450
Mayo	38.6	26.38	26.598
Junio	2.8	3.35	2.366
Julio	0	10.37	8.570
Agosto	2.4	3.93	6.857
Setiembre	108	38.31	56.191
Octubre	57	43.38	49.689
Noviembre	116.4	89.15	79.332
Diciembre	168	72.37	153.370
∑ Pp 2014	911.2	762.85	920.66

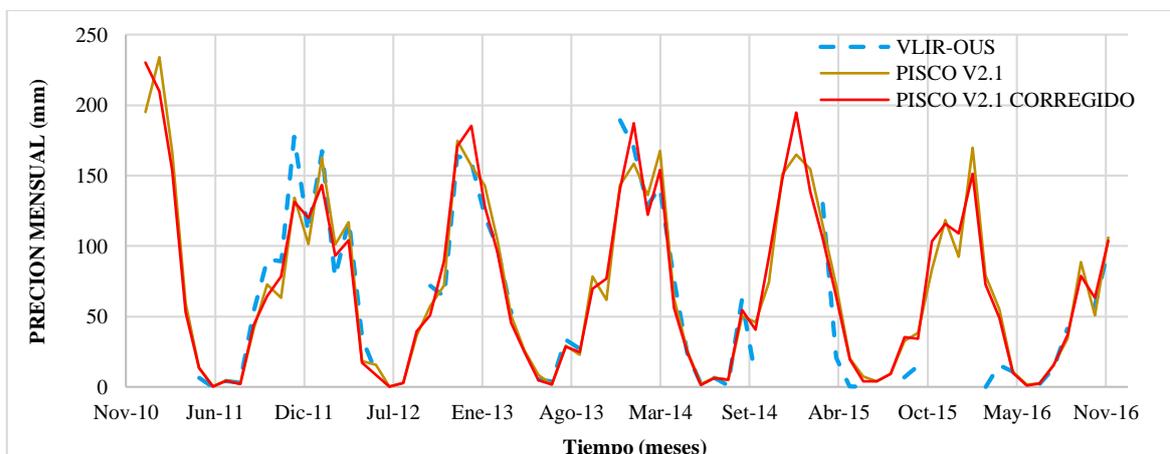


Figura 61: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Quilcas

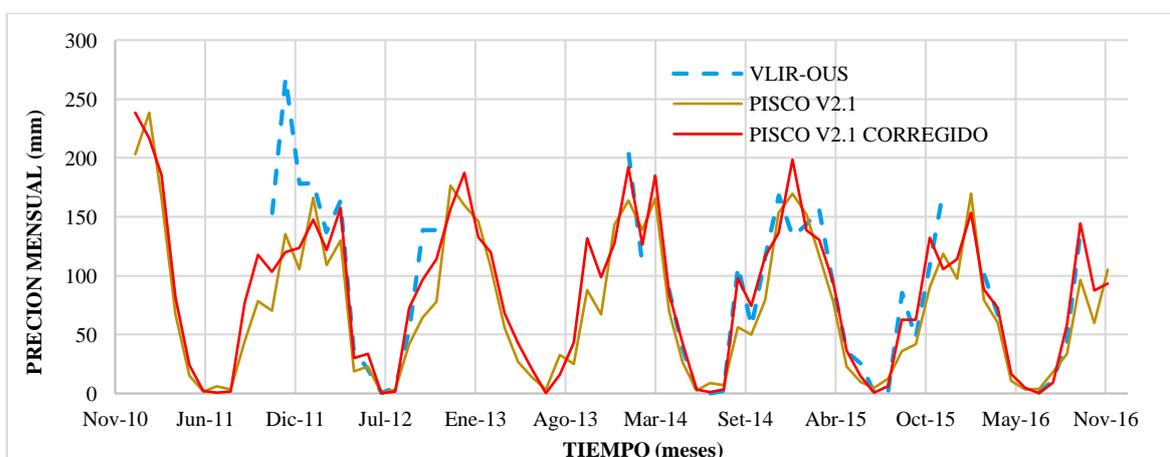


Figura 62: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Tambo

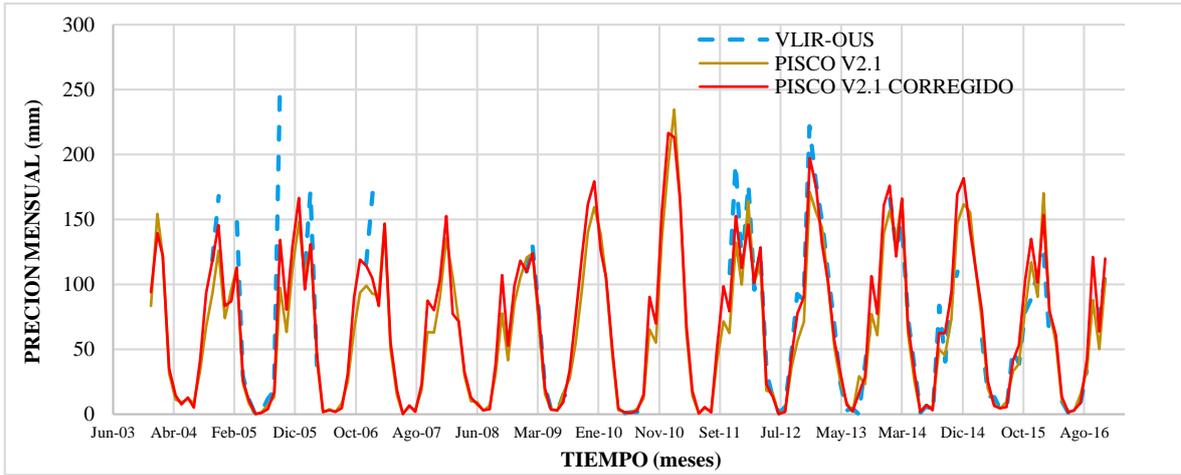


Figura 63: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Colpar

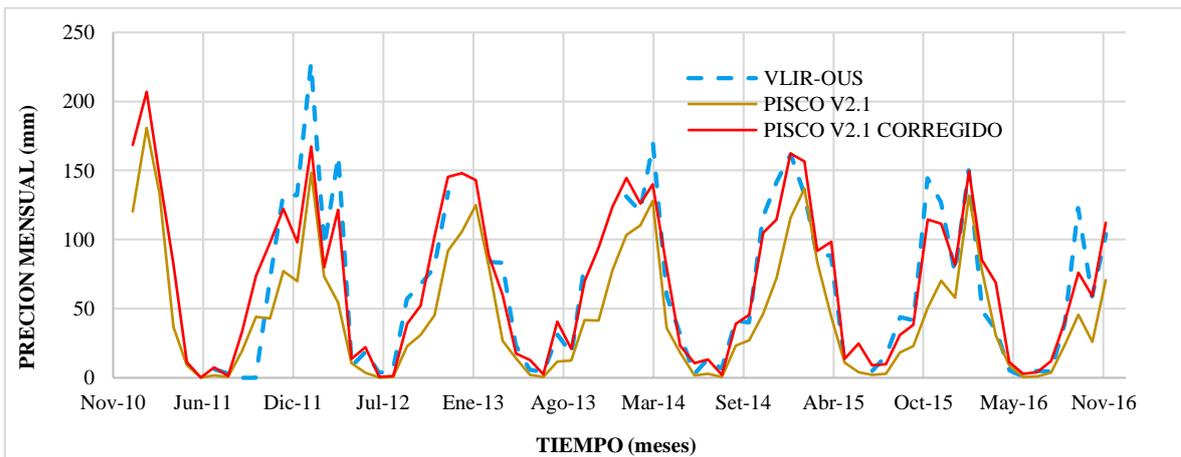


Figura 64: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Chacrampa

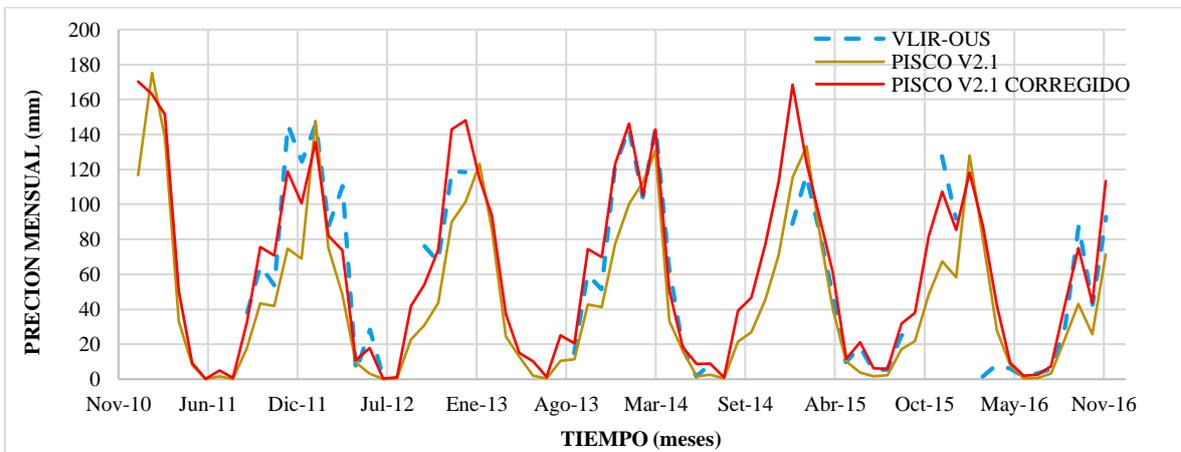


Figura 65: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación IRD Jauja

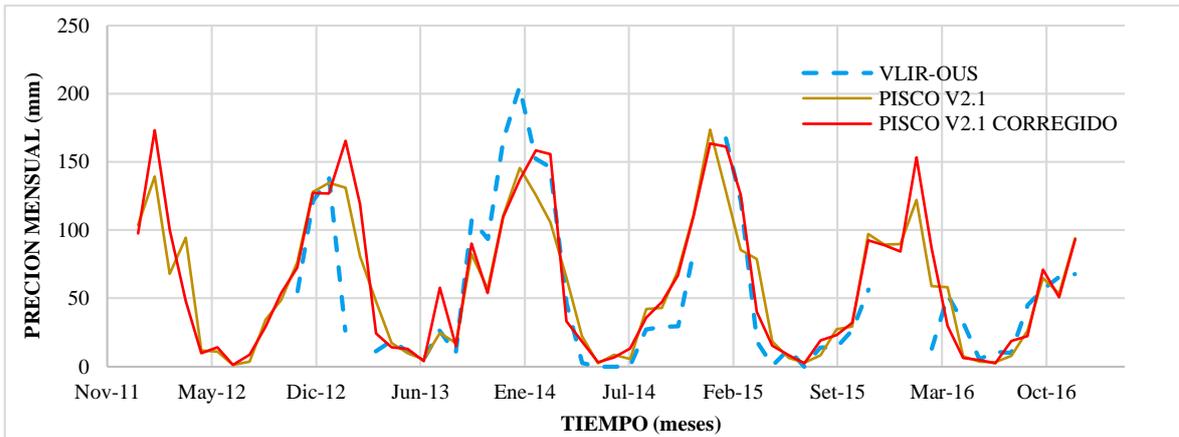


Figura 66: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Masmachique

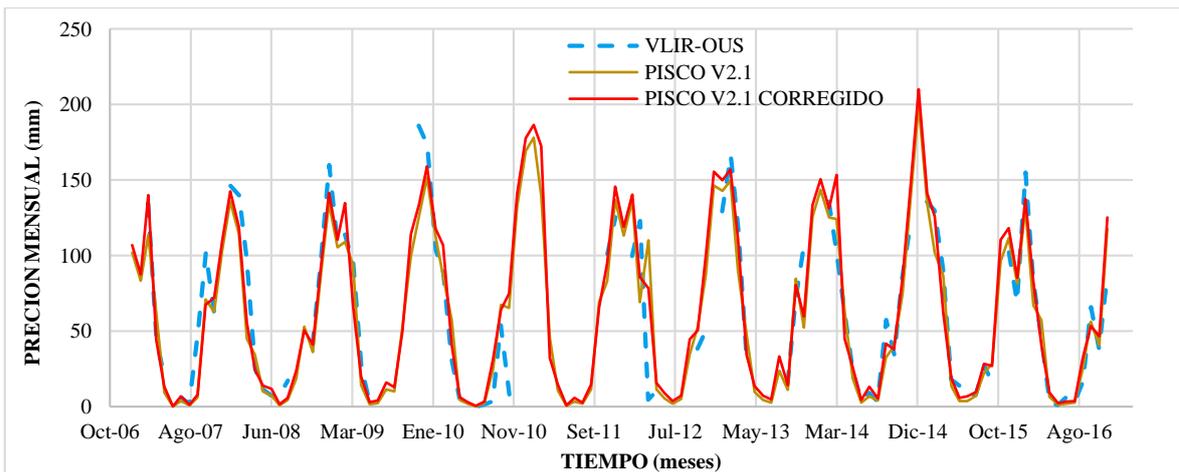


Figura 67: Comparación VLIR-OUS vs PISCOv2.1 - Estación Molinos

QUILCAS	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	822.1
1982	773.2
1983	561.1
1984	952.3
1985	778.9
1986	932.0
1987	713.8
1988	830.5
1989	806.9
1990	780.7
1991	638.7
1992	466.0
1993	904.3
1994	739.1
1995	739.4
1996	671.9
1997	782.8
1998	773.6
1999	777.1
2000	744.0
2001	787.2
2002	834.6
2003	767.5
2004	757.4
2005	608.4
2006	741.9
2007	659.9
2008	593.2
2009	782.2
2010	737.3
2011	985.0
2012	839.1
2013	824.2
2014	891.0
2015	827.8
2016	693.4
Prom	793.3

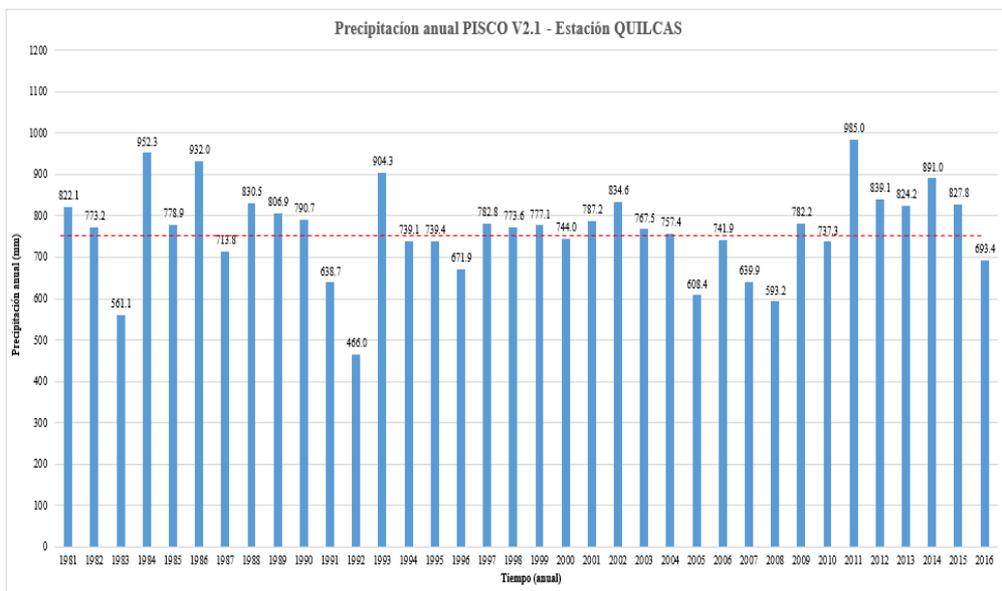


Figura 68: Precipitaciones anuales - Estación Quilcas

TAMBO	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	992.3
1982	972.0
1983	726.5
1984	1181.8
1985	962.6
1986	1093.9
1987	832.4
1988	971.3
1989	994.7
1990	1012.5
1991	833.8
1992	576.0
1993	1054.2
1994	879.8
1995	899.0
1996	812.8
1997	927.7
1998	944.9
1999	965.5
2000	879.6
2001	940.1
2002	1031.8
2003	889.5
2004	919.2
2005	738.3
2006	916.8
2007	779.2
2008	741.2
2009	933.5
2010	870.1
2011	1167.5
2012	1055.1
2013	988.2
2014	1062.6
2015	982.1
2016	842.8
Prom	912.5

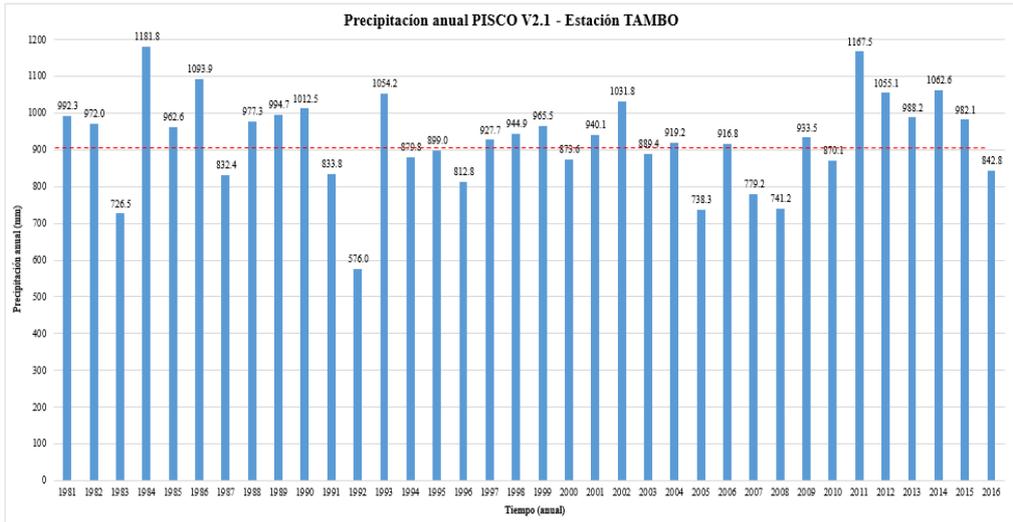


Figura 69: Precipitaciones anuales - Estación Tambo

COLPAR	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	889.3
1982	862.2
1983	619.8
1984	1039.6
1985	864.7
1986	991.9
1987	763.2
1988	907.6
1989	880.7
1990	874.9
1991	721.3
1992	515.4
1993	973.0
1994	813.9
1995	807.8
1996	732.4
1997	831.6
1998	849.0
1999	848.5
2000	789.8
2001	865.0
2002	924.1
2003	821.6
2004	839.8
2005	684.4
2006	802.2
2007	710.0
2008	658.0
2009	858.1
2010	798.0
2011	1068.8
2012	936.6
2013	893.6
2014	964.6
2015	889.8
2016	769.2
Prom	823.4

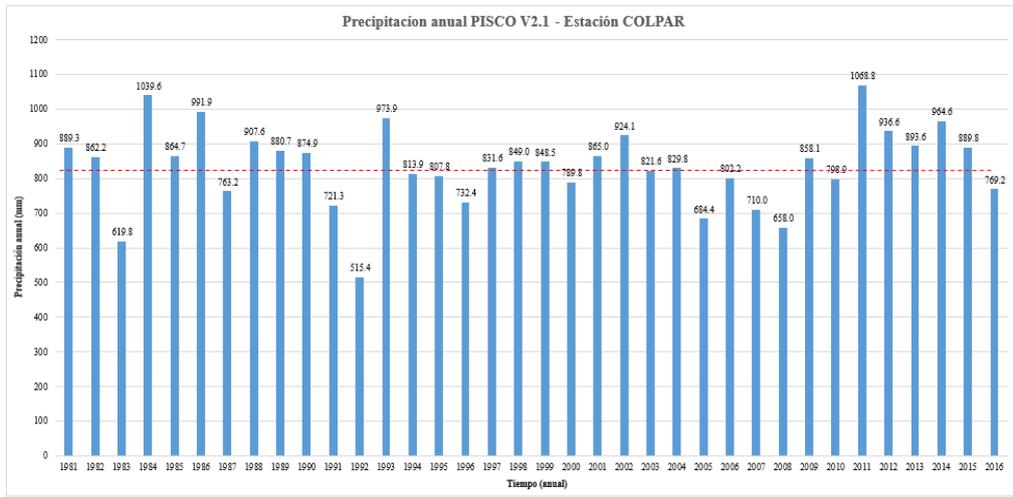


Figura 70: Precipitaciones anuales - Estación Colpar

CHACRAMPA	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	972.8
1982	810.5
1983	602.5
1984	942.9
1985	799.3
1986	859.8
1987	720.1
1988	741.7
1989	832.8
1990	820.9
1991	832.8
1992	820.9
1993	983.2
1994	806.5
1995	711.6
1996	672.0
1997	702.9
1998	736.1
1999	769.7
2000	746.5
2001	823.1
2002	821.0
2003	735.8
2004	745.0
2005	619.0
2006	695.8
2007	667.2
2008	616.8
2009	798.7
2010	698.9
2011	949.5
2012	842.5
2013	821.0
2014	843.6
2015	860.6
2016	701.8
Prom	756.0

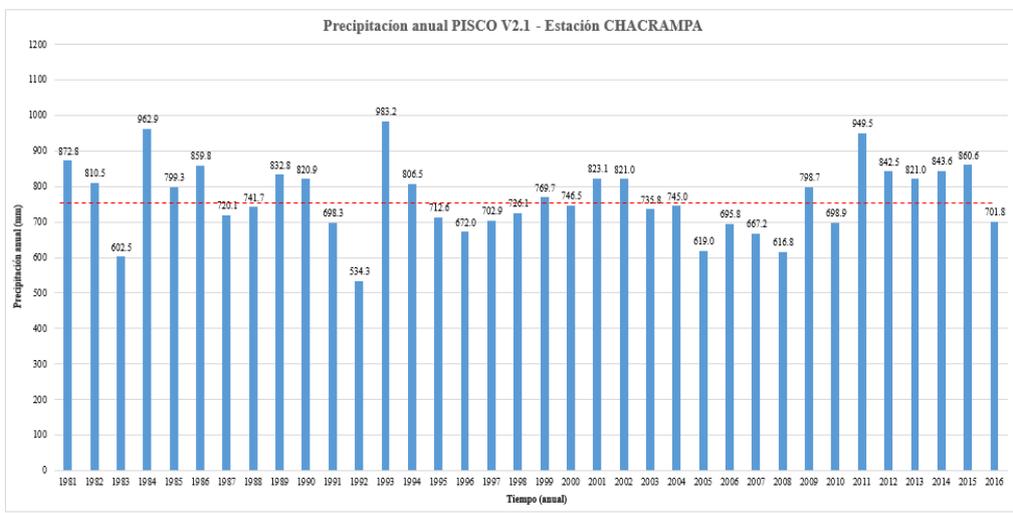


Figura 71: Precipitaciones anuales - Estación Chacrampa

CRUZPAMPA	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	930.4
1982	877.0
1983	664.4
1984	1038.3
1985	888.1
1986	935.8
1987	775.7
1988	803.3
1989	904.5
1990	854.2
1991	768.0
1992	569.3
1993	1050.2
1994	878.7
1995	743.3
1996	732.7
1997	753.3
1998	777.5
1999	844.6
2000	831.8
2001	904.4
2002	905.2
2003	777.0
2004	810.1
2005	673.6
2006	757.3
2007	735.4
2008	680.7
2009	853.7
2010	785.4
2011	1040.7
2012	918.9
2013	890.5
2014	924.7
2015	934.4
2016	780.3
Prom	822.1

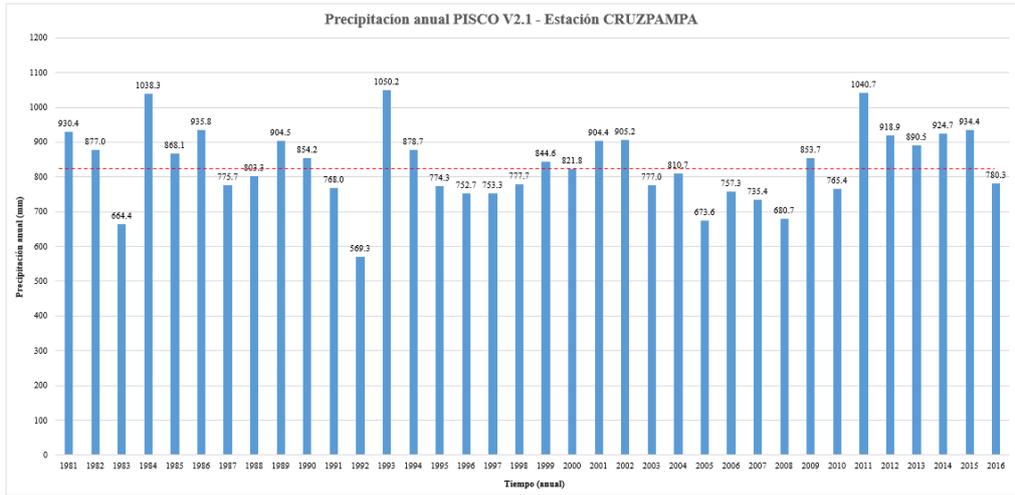


Figura 72: Precipitaciones anuales - Estación Cruzpampa

IRD JAUJA	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	789.0
1982	707.4
1983	547.0
1984	847.3
1985	699.1
1986	751.9
1987	630.3
1988	669.5
1989	736.0
1990	710.8
1991	628.0
1992	476.3
1993	856.3
1994	701.5
1995	634.3
1996	605.1
1997	611.5
1998	653.8
1999	677.0
2000	676.4
2001	725.8
2002	703.6
2003	624.9
2004	660.7
2005	561.3
2006	624.2
2007	600.2
2008	571.0
2009	697.6
2010	638.0
2011	847.8
2012	734.8
2013	733.1
2014	758.5
2015	751.3
2016	629.2
Prom	670.1

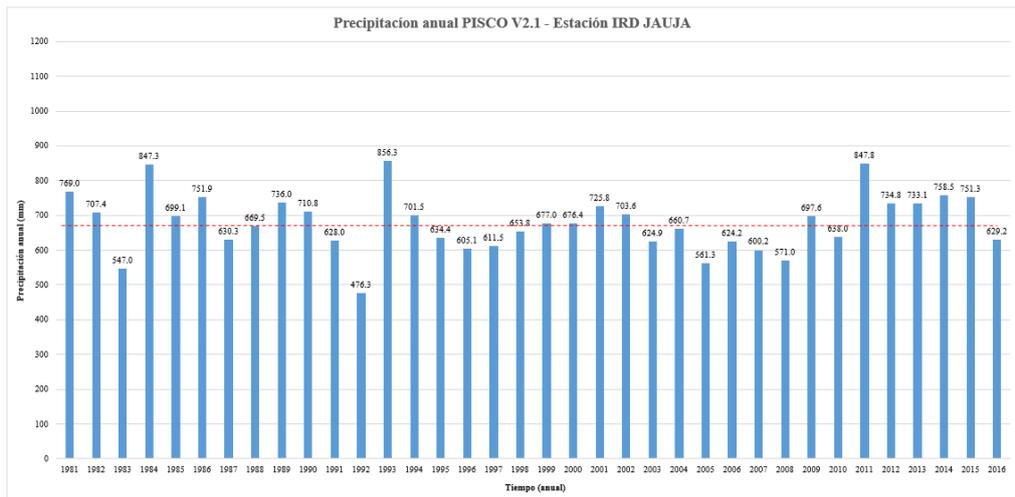


Figura 73: Precipitaciones anuales - Estación IRD Jauja

MASMACHIQUE	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	819.2
1982	705.4
1983	540.1
1984	895.8
1985	685.2
1986	832.2
1987	631.7
1988	677.3
1989	755.4
1990	710.7
1991	588.8
1992	459.1
1993	797.3
1994	667.5
1995	667.9
1996	609.2
1997	670.8
1998	669.2
1999	714.5
2000	734.6
2001	660.0
2002	704.7
2003	610.8
2004	648.1
2005	531.4
2006	688.4
2007	583.2
2008	540.9
2009	661.6
2010	681.9
2011	859.5
2012	735.6
2013	793.2
2014	786.1
2015	771.6
2016	624.2
Prom	672.9

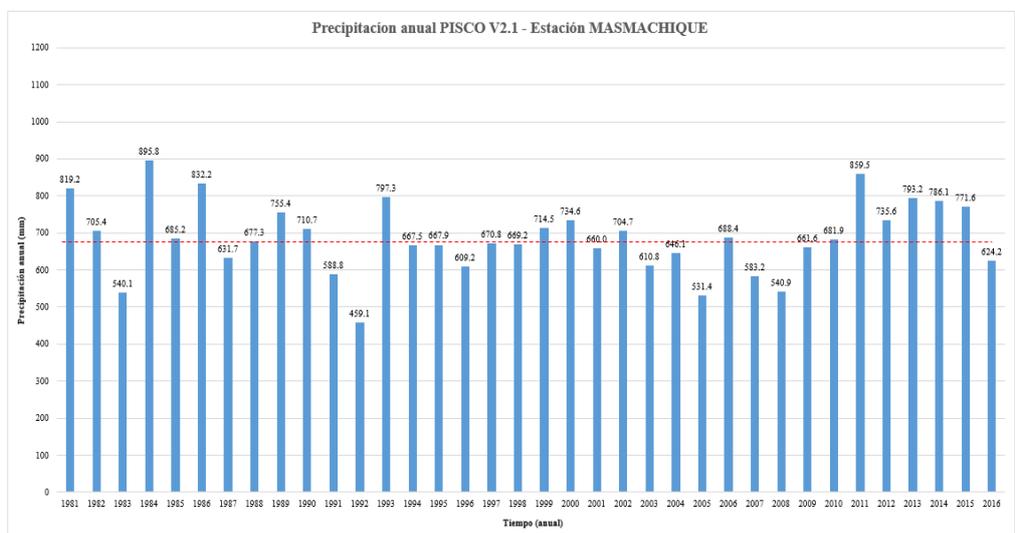


Figura 74: Precipitaciones anuales - Estación Masmachique

MOLINOS	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	862.0
1982	773.0
1983	657.1
1984	977.3
1985	741.3
1986	860.7
1987	699.6
1988	752.0
1989	773.2
1990	770.0
1991	621.3
1992	448.9
1993	895.2
1994	797.5
1995	736.9
1996	665.6
1997	695.1
1998	700.0
1999	818.3
2000	803.6
2001	733.2
2002	767.0
2003	657.6
2004	701.2
2005	576.9
2006	742.6
2007	656.6
2008	582.0
2009	806.2
2010	748.7
2011	913.0
2012	808.5
2013	797.6
2014	840.6
2015	864.2
2016	621.8
Prom	732.3

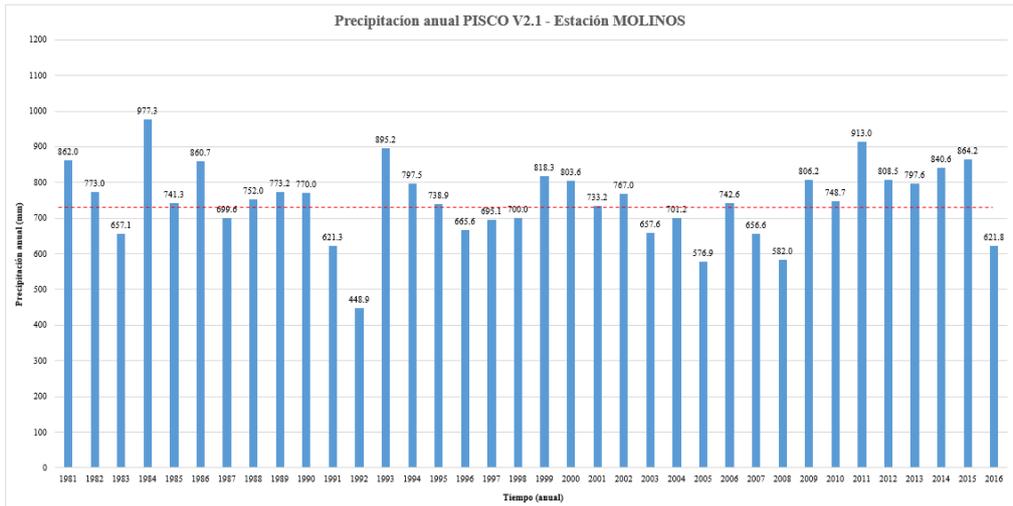


Figura 75: Precipitaciones anuales - Estación Molinos

HUAYAO	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	765.9
1982	655.6
1983	511.1
1984	858.7
1985	705.5
1986	818.8
1987	643.6
1988	726.8
1989	724.1
1990	708.5
1991	587.6
1992	456.4
1993	774.3
1994	688.9
1995	625.9
1996	581.2
1997	641.8
1998	667.7
1999	667.3
2000	420.8
2001	726.9
2002	732.4
2003	701.4
2004	637.4
2005	532.5
2006	610.2
2007	594.9
2008	502.1
2009	711.1
2010	612.7
2011	886.0
2012	724.1
2013	688.1
2014	736.4
2015	728.5
2016	620.6
Prom	655.7

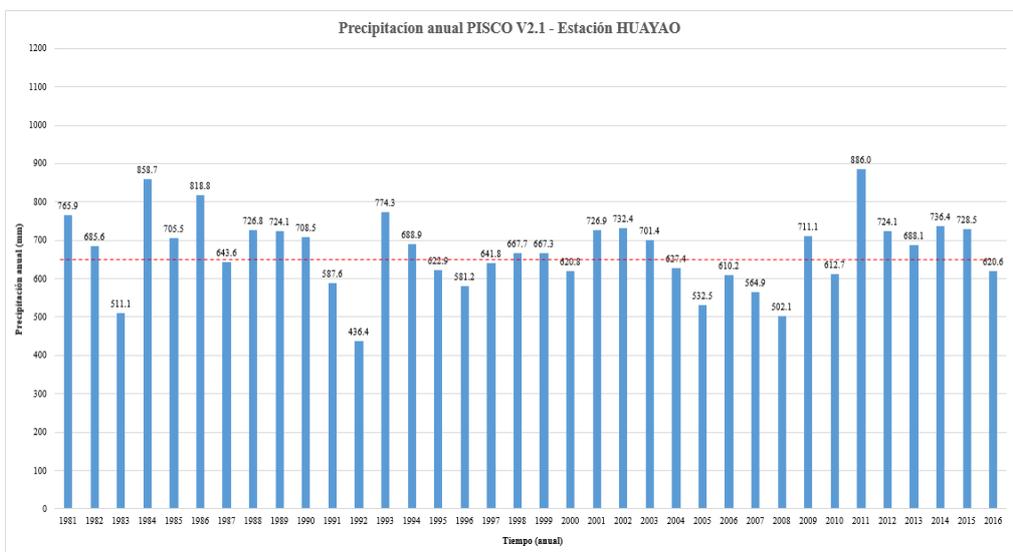


Figura 76: Precipitaciones anuales - Estación Huayao

INGENIO	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	712.8
1982	648.0
1983	477.7
1984	804.3
1985	659.5
1986	788.1
1987	596.9
1988	674.0
1989	701.5
1990	646.6
1991	568.8
1992	419.3
1993	770.2
1994	640.6
1995	617.4
1996	578.6
1997	633.7
1998	641.6
1999	644.4
2000	654.8
2001	663.5
2002	674.4
2003	654.7
2004	639.6
2005	530.5
2006	606.8
2007	554.8
2008	510.5
2009	659.7
2010	614.4
2011	849.2
2012	718.7
2013	693.3
2014	752.9
2015	696.8
2016	607.1
Prom	636.9

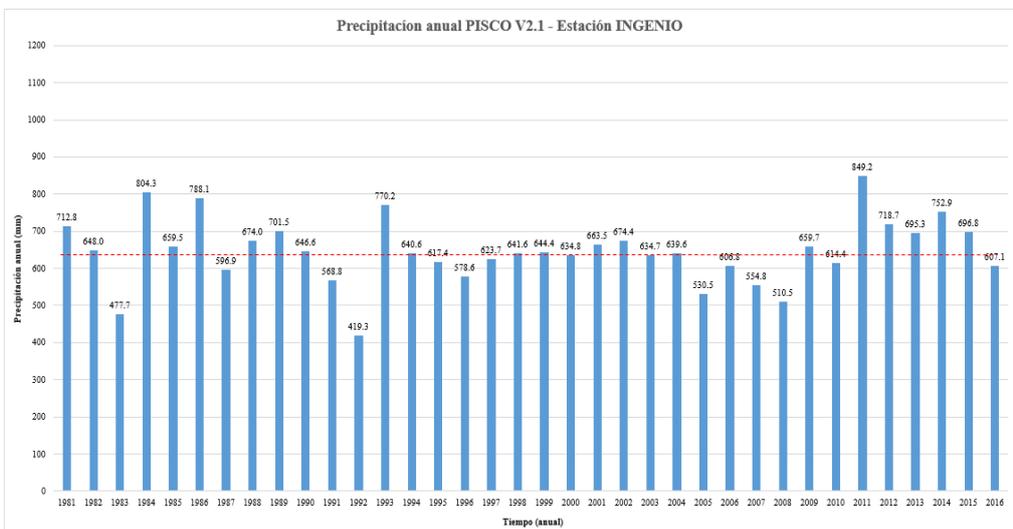


Figura 77: Precipitaciones anuales - Estación Ingenio

INGENIO	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	667.9
1982	641.5
1983	528.3
1984	795.3
1985	604.2
1986	665.1
1987	568.7
1988	605.6
1989	623.2
1990	591.0
1991	518.7
1992	346.1
1993	735.4
1994	646.9
1995	579.3
1996	528.9
1997	534.4
1998	555.7
1999	650.8
2000	628.0
2001	619.3
2002	648.4
2003	540.2
2004	571.6
2005	469.9
2006	544.4
2007	483.8
2008	660.3
2009	583.7
2010	740.8
2011	648.3
2012	657.1
2013	666.6
2014	710.2
2015	532.1
2016	526.7
Prom	526.7

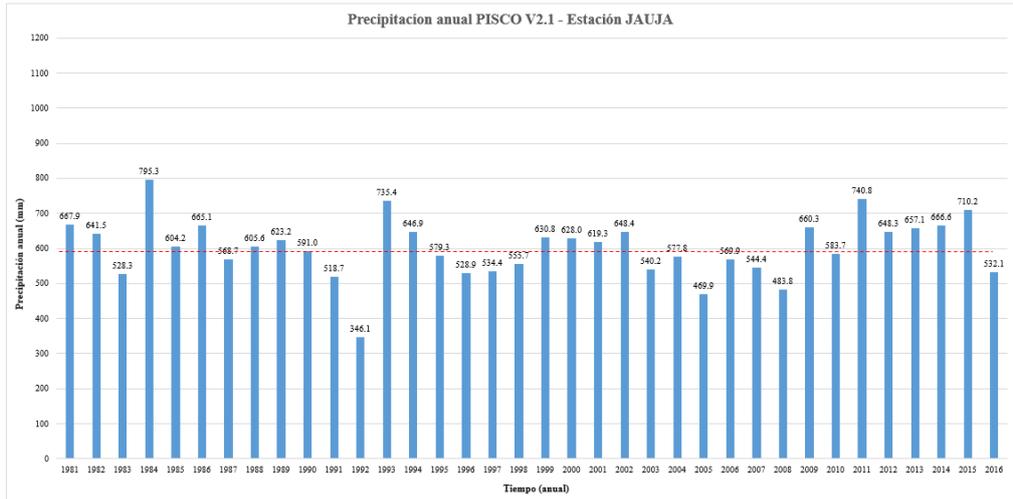


Figura 78: Precipitaciones anuales - Estación Jauja

INGENIO	
AÑO	Pp TOTAL (mm)
1981	900.4
1982	812.7
1983	590.3
1984	964.0
1985	794.8
1986	918.8
1987	741.3
1988	857.3
1989	836.2
1990	843.1
1991	656.6
1992	477.6
1993	862.9
1994	796.0
1995	755.4
1996	692.9
1997	825.6
1998	826.6
1999	815.7
2000	759.1
2001	828.0
2002	902.1
2003	831.6
2004	660.2
2005	616.5
2006	783.3
2007	656.9
2008	632.2
2009	841.9
2010	743.3
2011	1043.7
2012	892.0
2013	823.0
2014	868.7
2015	824.0
2016	722.0
Prom	719.2

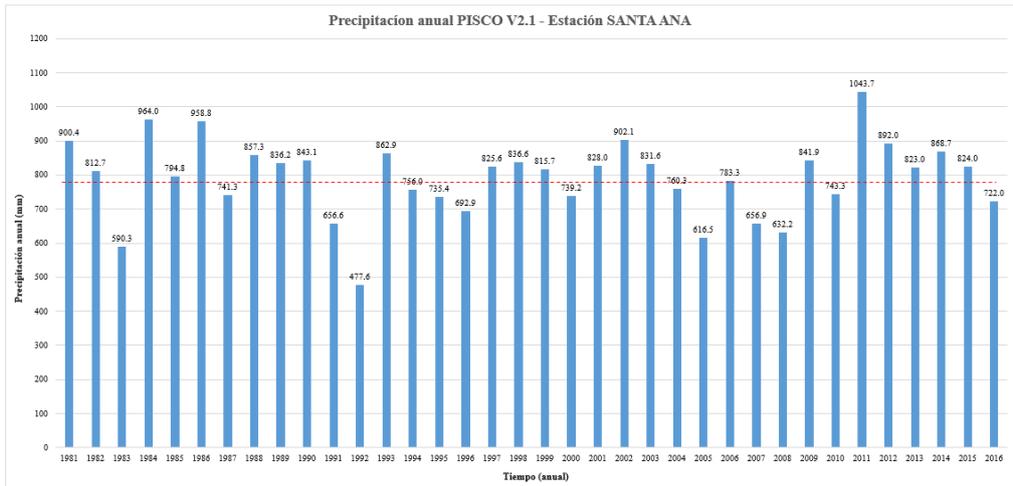


Figura 79: Precipitaciones anuales - Estación Santa Ana

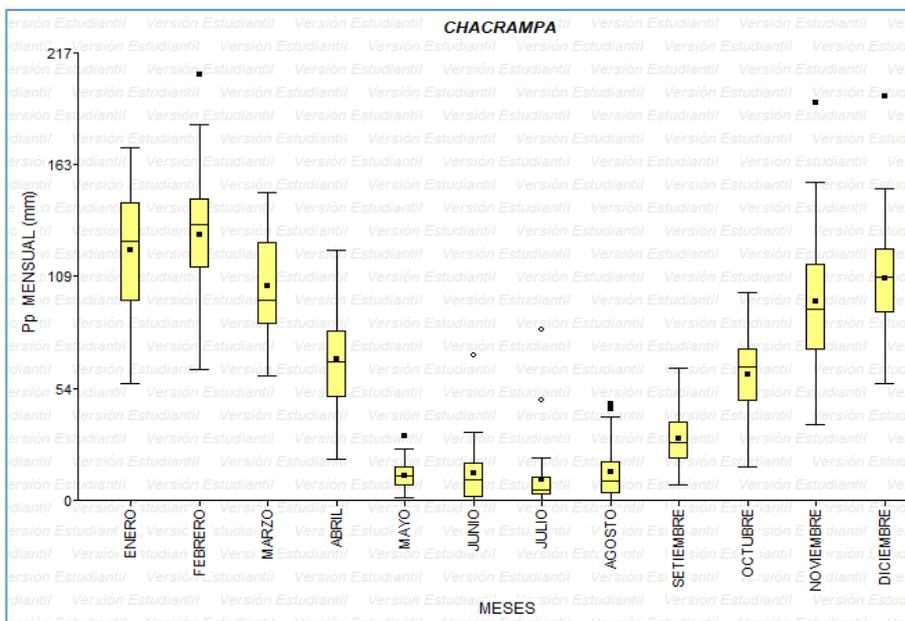


Figura 80: Variación de la precipitación mensual - Estación Chacarampa

ANEXO 5: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

Tabla 49: Resultados *Test* de *Grubbs*, a un nivel de significancia de 0.05

Estación	Pp anual max	Año	Pp anual min	Año	Grubbs - outliers
Quilcas	984.97	2011	466.03	1992	no/no
Tambo	1181.77	1984	575.98	1992	no/no
Colpar	1068.82	2011	515.39	1992	no/no
Chacrampa	983.23	1993	534.33	1992	no/no
Cruzpampa	1050.15	1993	569.31	1992	no/no
IRD Jauja	856.34	1993	476.27	1992	no/no
Masmachique	895.85	1984	459.08	1992	no/no
Molinos	977.25	1984	448.94	1992	no/no
Huayao	885.96	2011	436.38	1992	no/no
Ingenio	849.21	2011	419.29	1992	no/no
Jauja	795.27	1984	346.13	1992	no/si
Santa Ana	1043.68	2011	477.56	1992	no/no

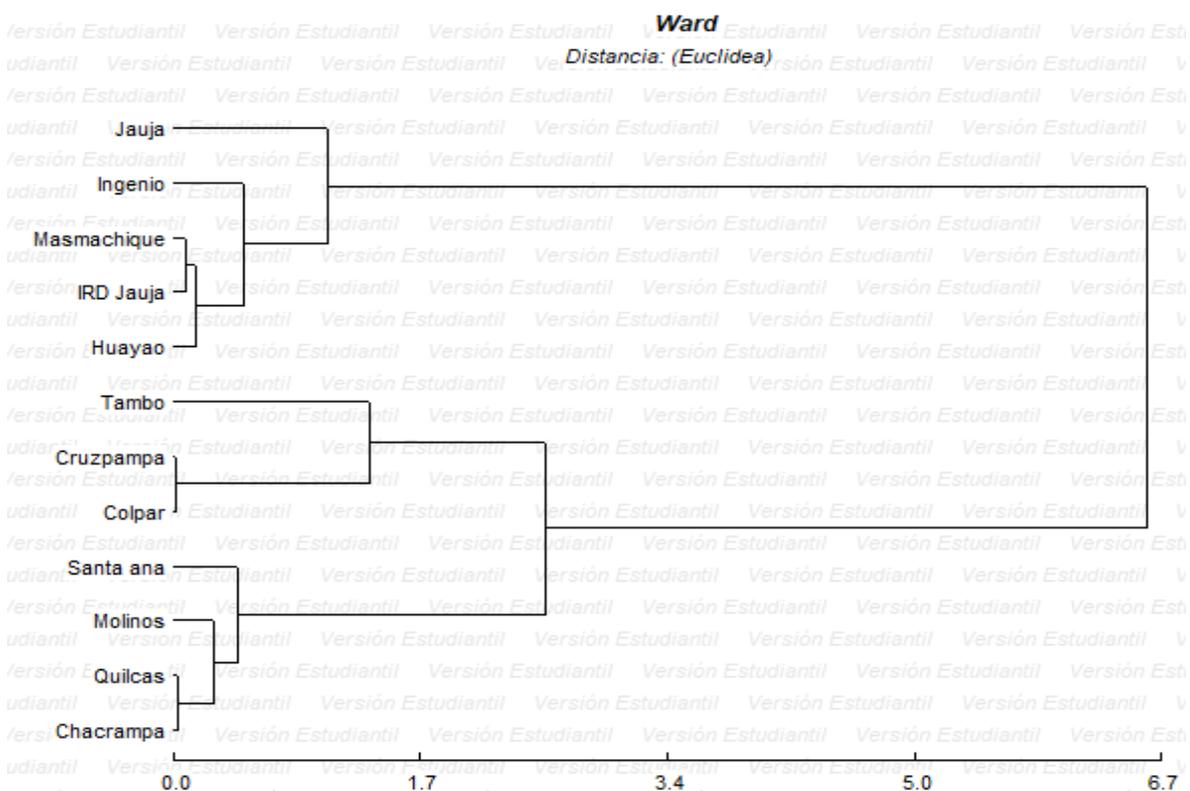


Figura 81: Dendrograma

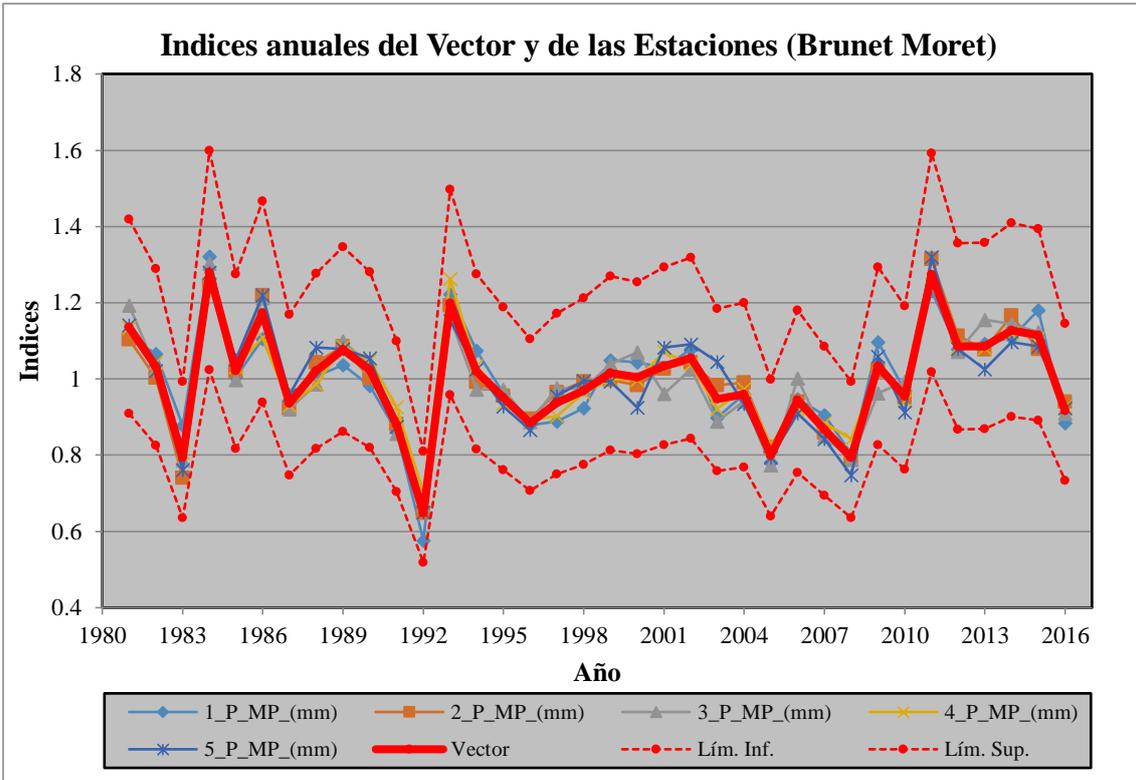


Figura 82: Índices anuales del vector regional - G1

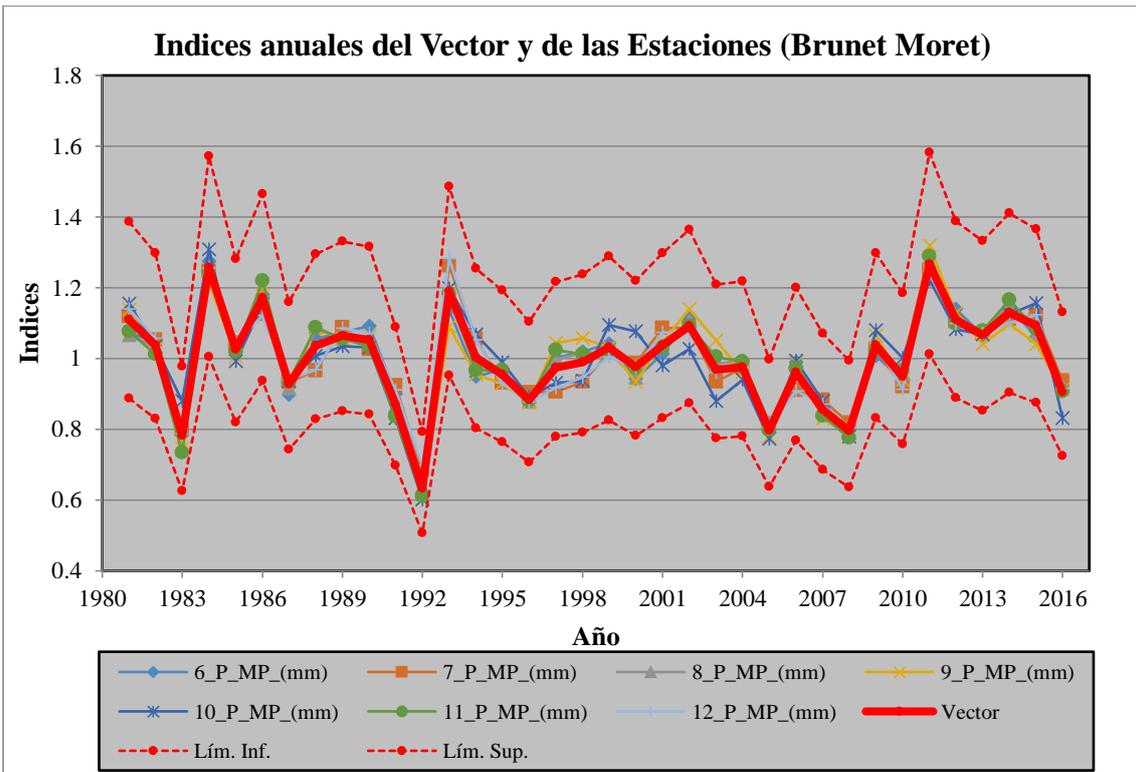


Figura 83: Índices anuales del vector regional - G2

Tabla 50: Resultados Test de Mann Kendall

Estaciones	Tau de Kendall	Tendencia	P	Hipótesis Nula
Quilcas	0.015	-0.117	0.910	Sin tendencia
Tambo	-0.008	-1.048	0.955	Sin tendencia
Colpar	-0.008	-0.756	0.955	Sin tendencia
Chacrampa	0.002	-0.504	1.000	Sin tendencia
Cruzpampa	0.029	-0.157	0.820	Sin tendencia
IRD Jauja	0.012	-0.333	0.932	Sin tendencia
Masmachique	0.022	-0.700	0.865	Sin tendencia
Molinos	0.035	-0.242	0.776	Sin tendencia
Huayao	-0.045	-1.108	0.712	Sin tendencia
Ingenio	0.008	-0.297	0.955	Sin tendencia
Jauja	0.062	0.140	0.609	Sin tendencia
Santa Ana	0.008	-0.637	0.955	Sin tendencia

ANEXO 6: CURVA DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES - MICROCUENCA MCHIQUE

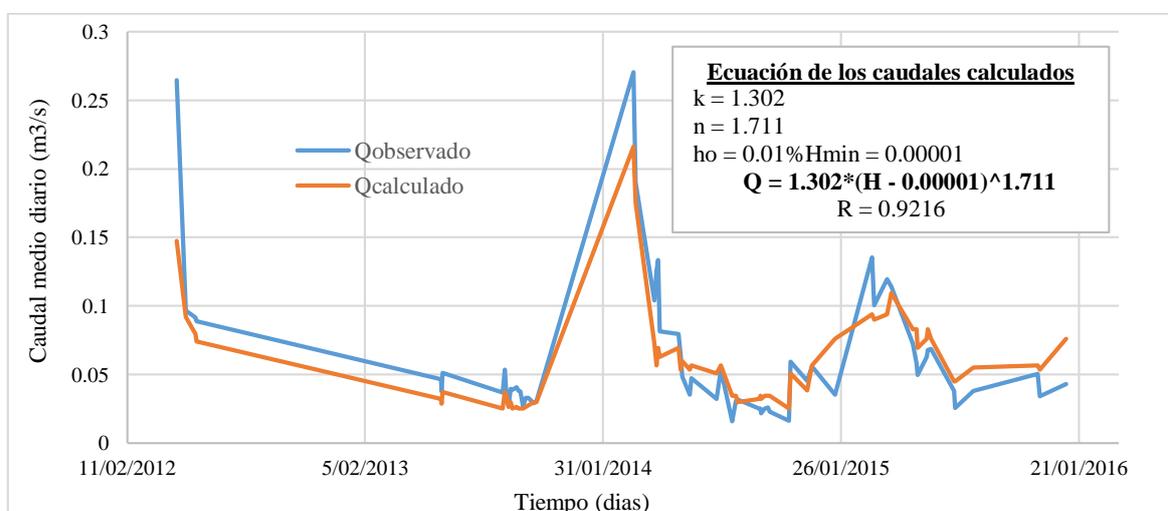


Figura 84: Caudales usados en la calibración



Figura 85: Hidrograma de caudales diarios históricos

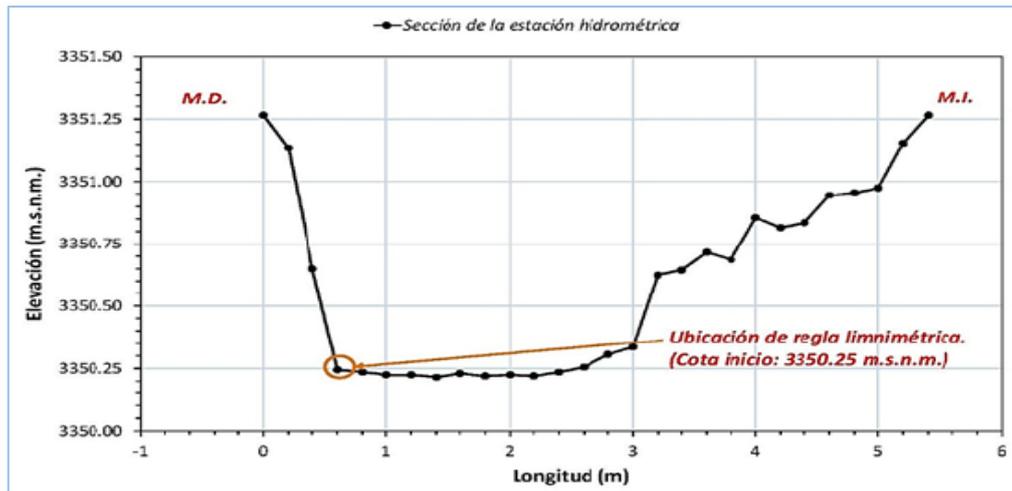


Figura 86: Sección del cauce del río Mchique

FUENTE: Camones (2015)

ANEXO 7: SIMULACIÓN DEL MODELO HBV DE RS MINERVE

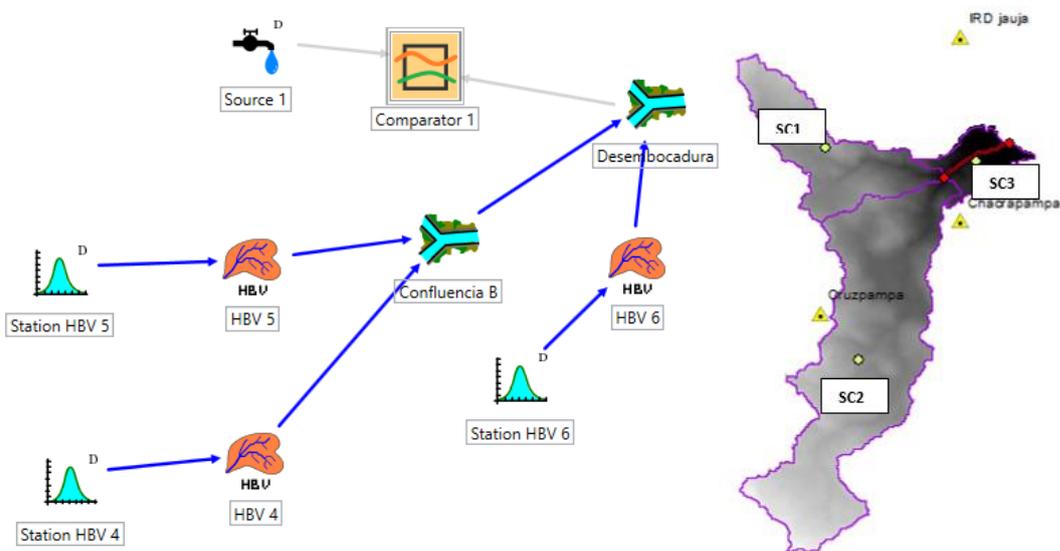


Figura 87: Esquema conceptual - modelo HBV

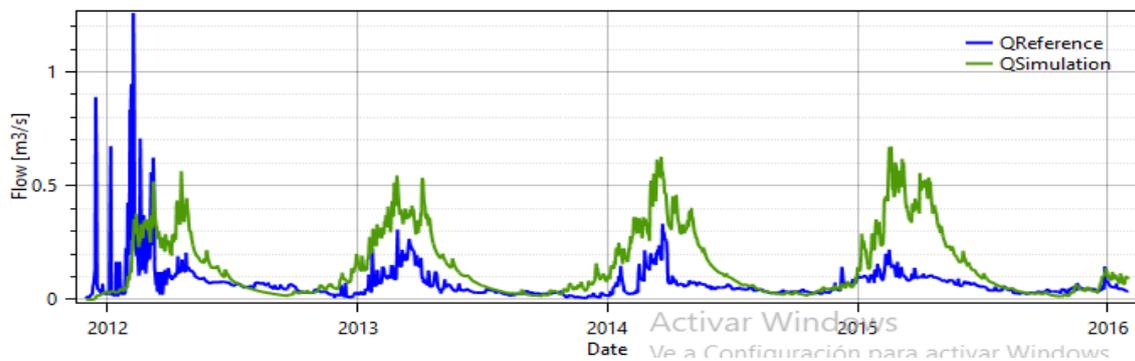


Figura 88: Primera simulación - HBV

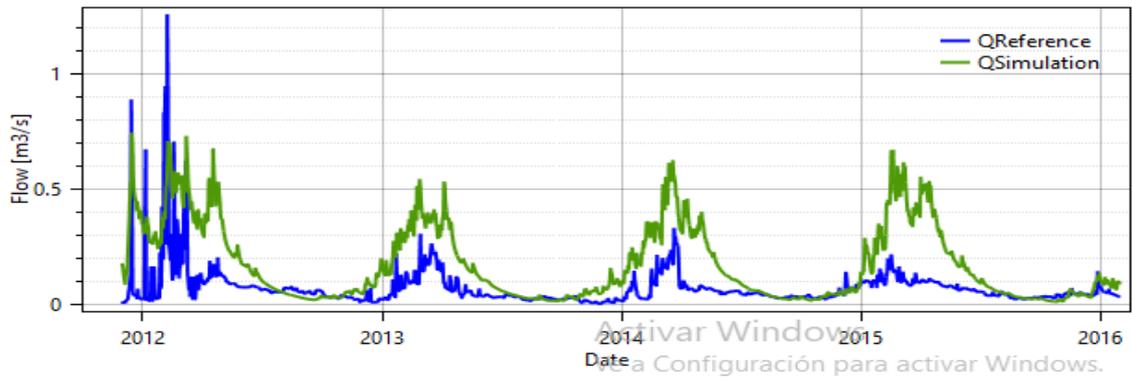


Figura 89: Segunda simulación - HBV

Tabla 51: Variación en volumen del análisis de sensibilidad en RS MINERVE

Parámetros	Vol. histórico = 268.65	Δ VOLUMEN
Beta -50%	394.48	-0.468
Beta +50%	224.30	0.165
FC -50%	326.19	-0.214
FC+50%	225.72	0.160
PWP -50%	208.22	0.225
PWP +50%	356.72	-0.328
SUMax -50%	268.65	0.000
SUMax +50%	268.65	0.000
Kr -50%	268.65	0.000
Kr +50%	268.65	0.000
Ku -50%	267.92	0.003
Ku +50%	269.14	-0.002
Kl -50%	266.21	0.009
Kl +50%	269.31	-0.002
Kpert -50%	269.22	-0.002
Kpert +50%	268.34	0.001

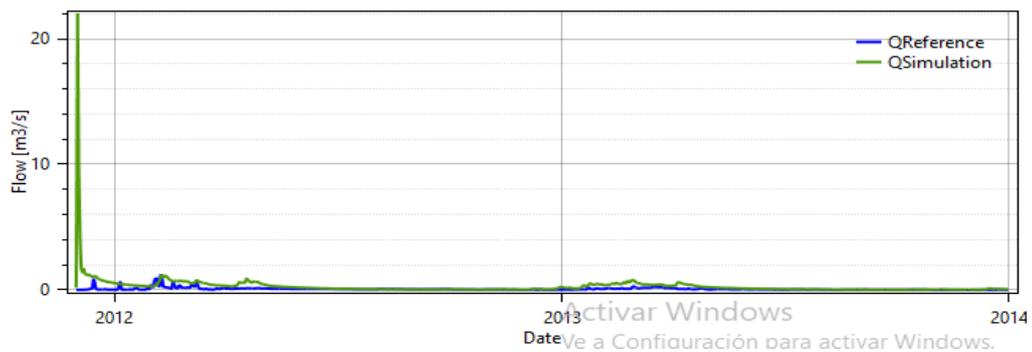


Figura 90: Resultado del parámetro FC=0.05 del RS MINERVE

ANEXO 8: SIMULACIÓN DEL MODELO WEAP “METODO DE ESCORRENTÍA PLUVIAL”

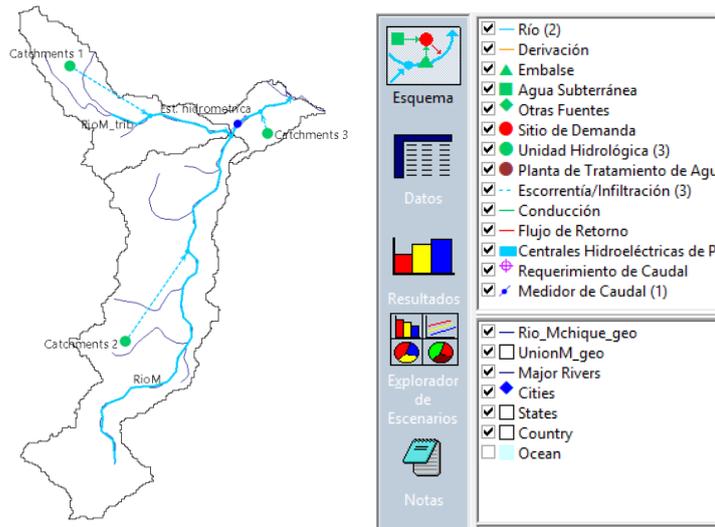


Figura 91: Esquema conceptual - modelo WEAP

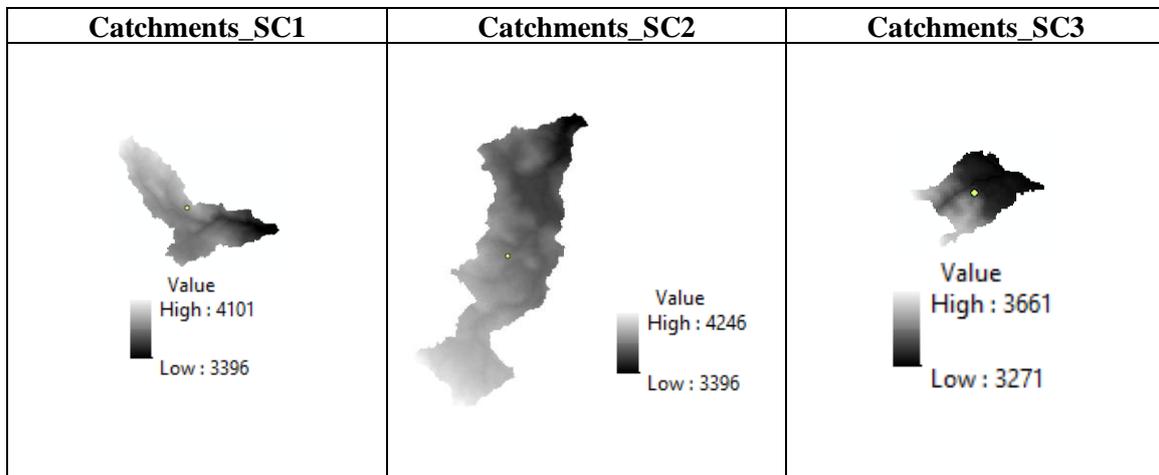


Figura 92: Mapa de elevaciones de la microcuenca Mchique

Tabla 52: Datos de mensuales de la humedad del suelo

Mes	SC1 (%)	SC2 (%)	SC3 (%)
Enero	43	51	62
Febrero	24	28	33
Marzo	44	32	32
Abril	30	22	20
Mayo	22	38	22
Junio	7	9	8
Julio	8	9	9
Agosto	6	9	6
Setiembre	9	10	11
Octubre	15	11	12
Noviembre	22	18	18
Diciembre	22	43	26

FUENTE: Camones (2015)

Tabla 53: Datos mensuales del coeficiente de cultivo

Mes	SC1	SC2	SC3
Enero	0.94	0.94	0.94
Febrero	0.99	0.99	0.99
Marzo	0.95	0.95	0.95
Abril	0.87	0.87	0.87
Mayo	0.81	0.81	0.81
Junio	0.88	0.88	0.88
Julio	0.95	0.95	0.95
Agosto	0.95	0.95	0.95
Setiembre	0.95	0.95	0.95
Octubre	0.93	0.93	0.93
Noviembre	0.68	0.68	0.68
Diciembre	0.68	0.68	0.68

FUENTE: Llauca (2014)

ANEXO 9: ANÁLISIS MULTIANUAL DE LA PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y CAUDAL

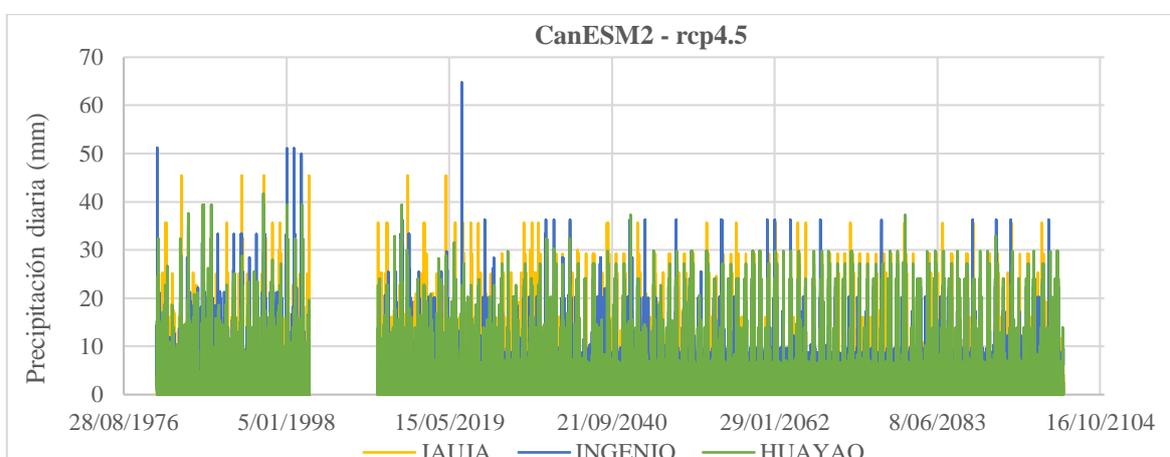


Figura 93: Precipitación diaria del escenario CanESM2-rcp4.5

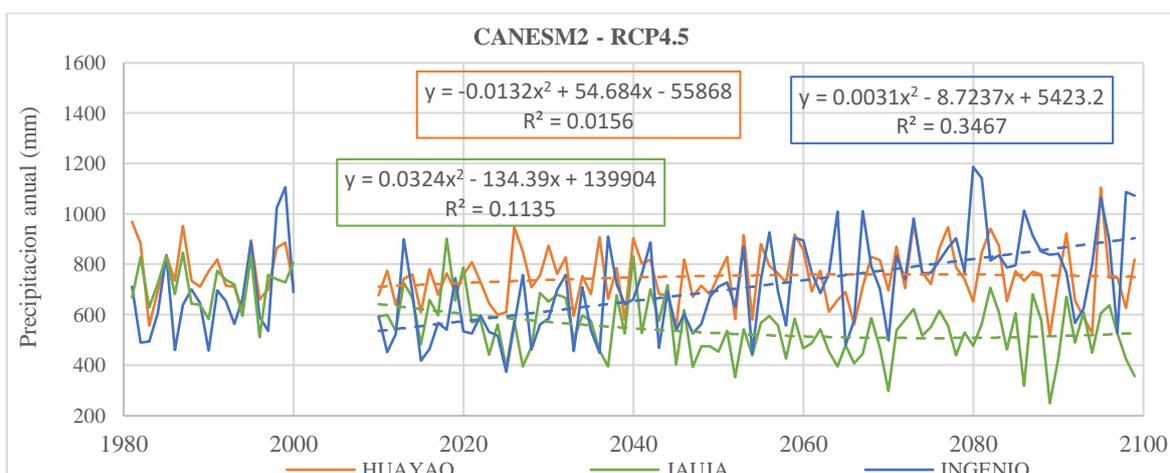


Figura 94: Precipitación anual del escenario CANESM2 - RCP4.5

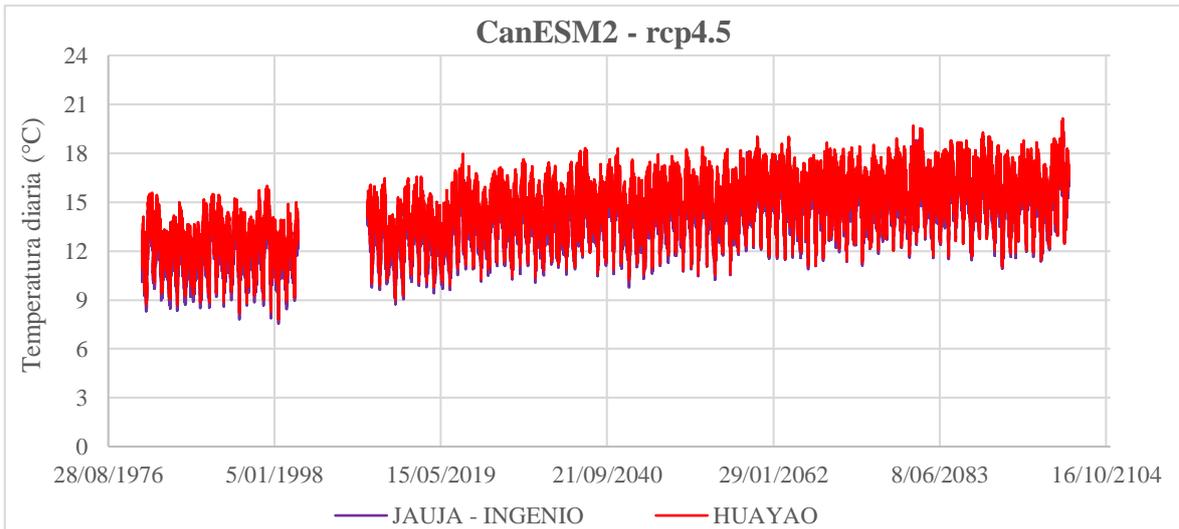


Figura 95: Temperatura diaria del escenario CanESM2-RCP4.5

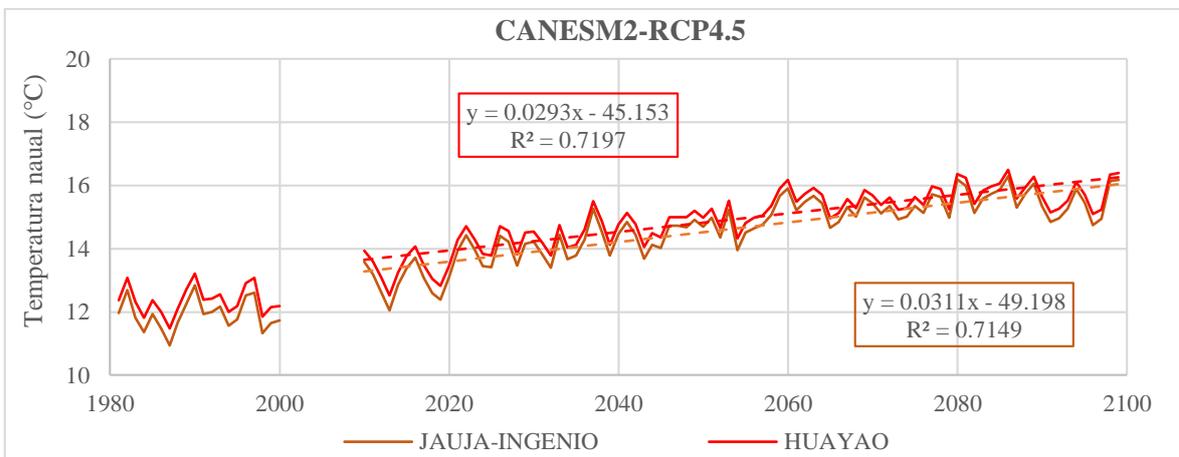


Figura 96: Temperatura anual del escenario CANESM2 - RCP4.5

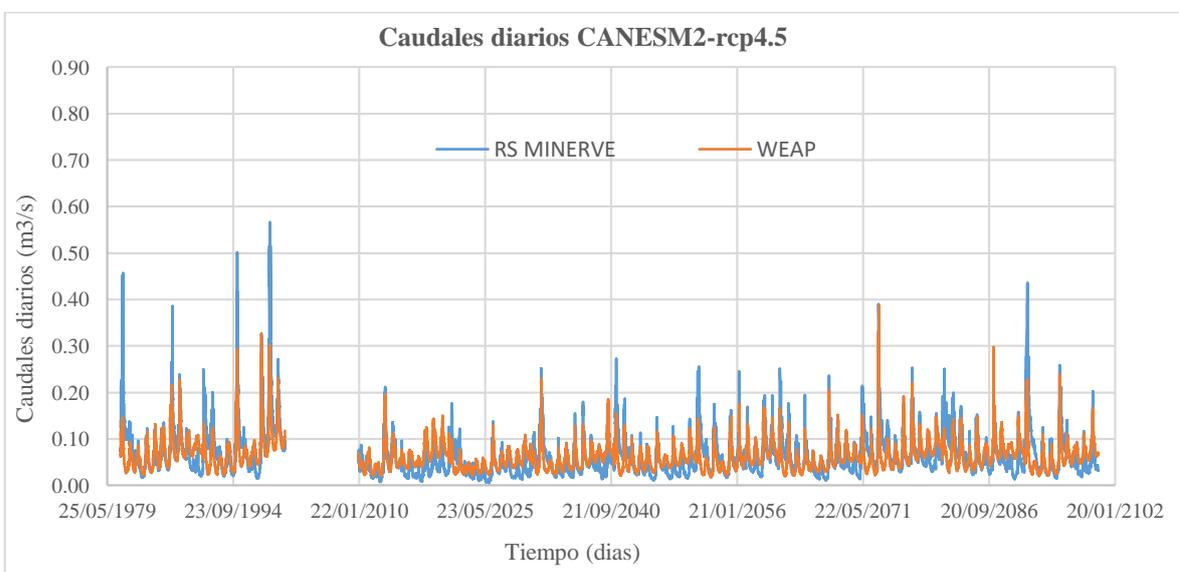


Figura 97: Caudal diario en el escenario CANESM2-RCP4.5

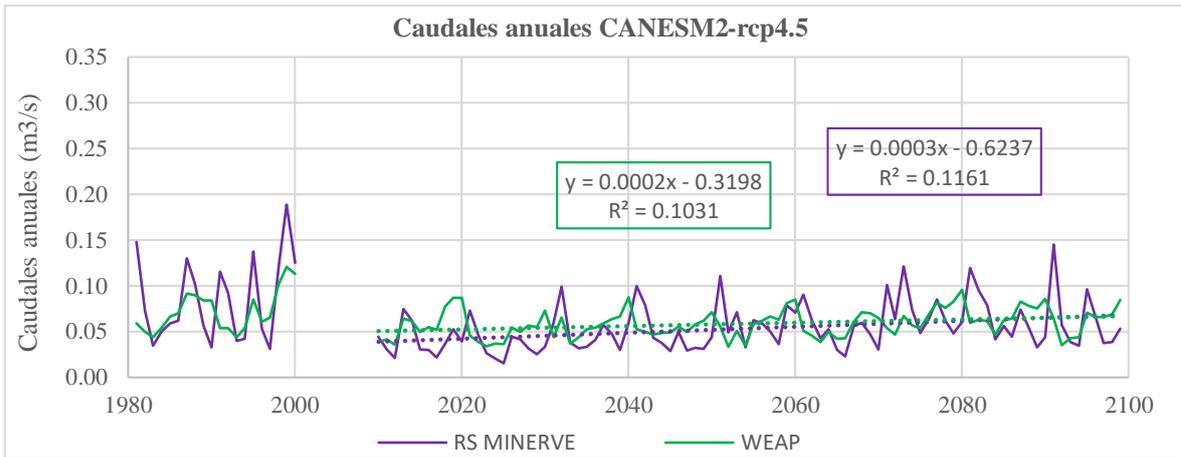


Figura 98: Caudal anual del escenario CANESM2 - RCP4.5

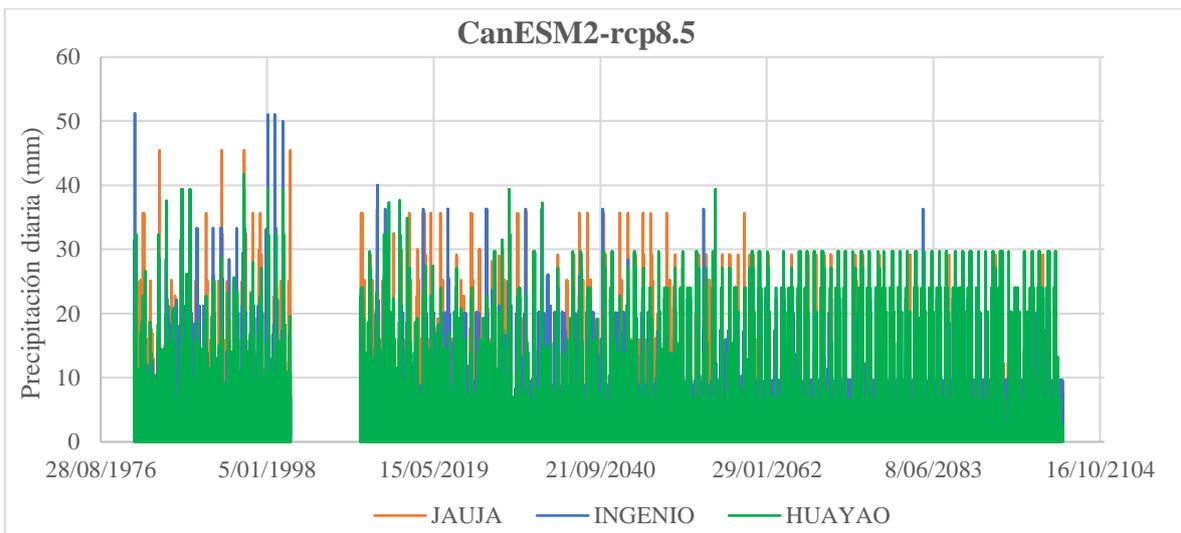


Figura 99: Precipitación diaria del escenario CanESM2-rcp8.5

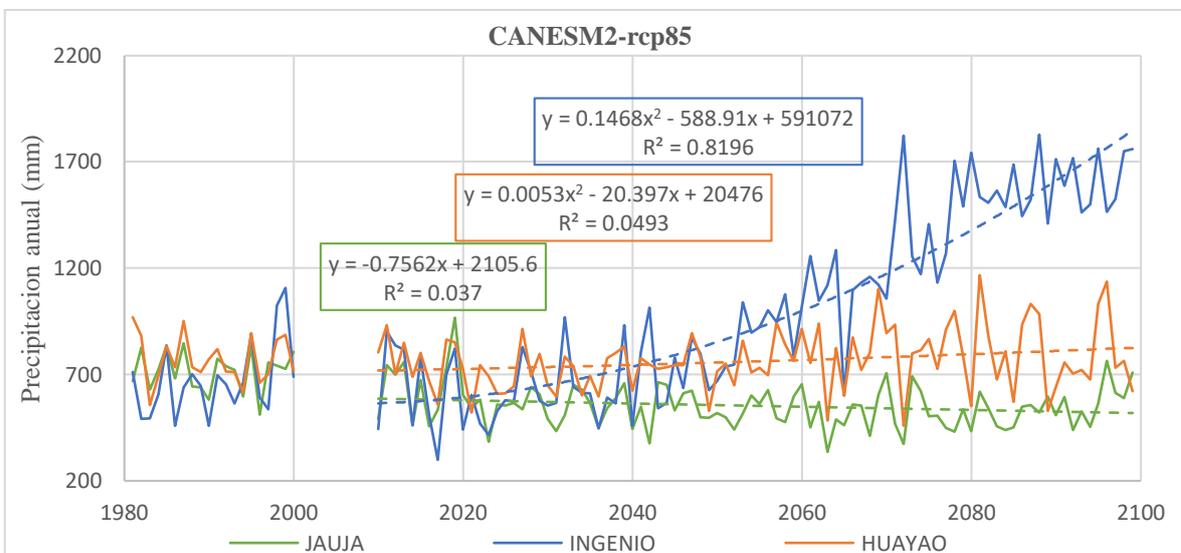


Figura 100: Precipitación anual del escenario CANESM2 - RCP8.5

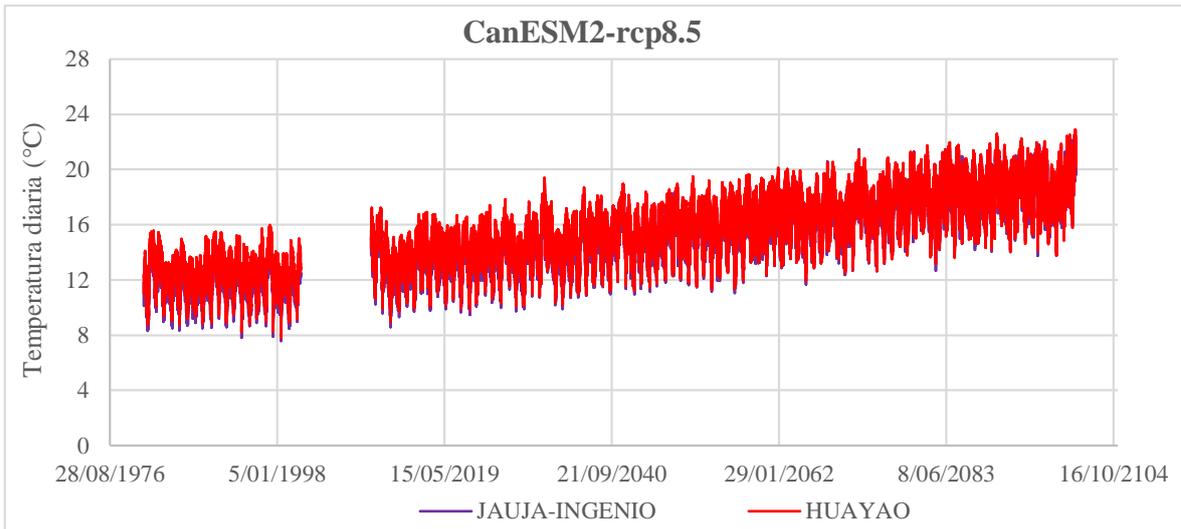


Figura 101: Temperatura diaria del escenario CanESM2-RCP8.5

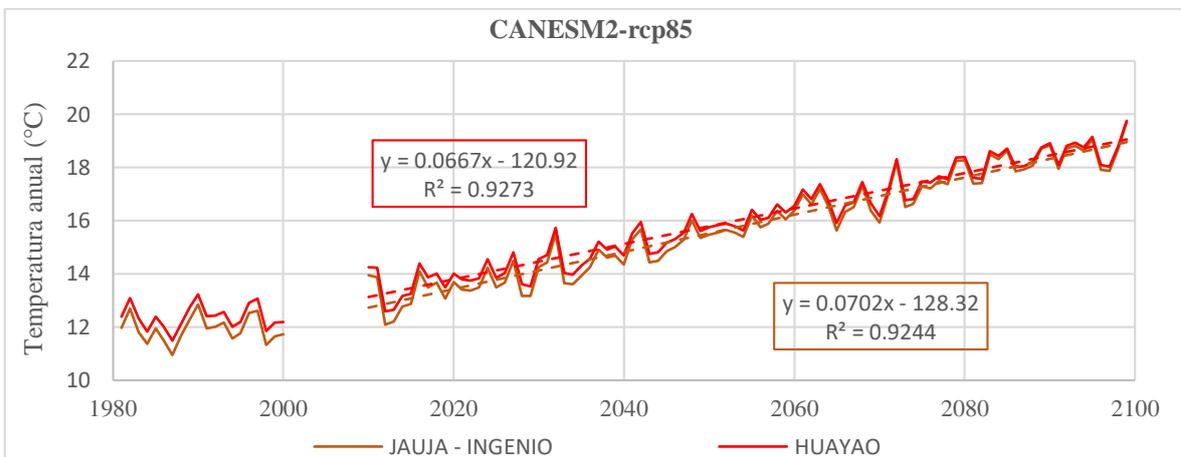


Figura 102: Temperatura anual del escenario CANESM2 - RCP8.5

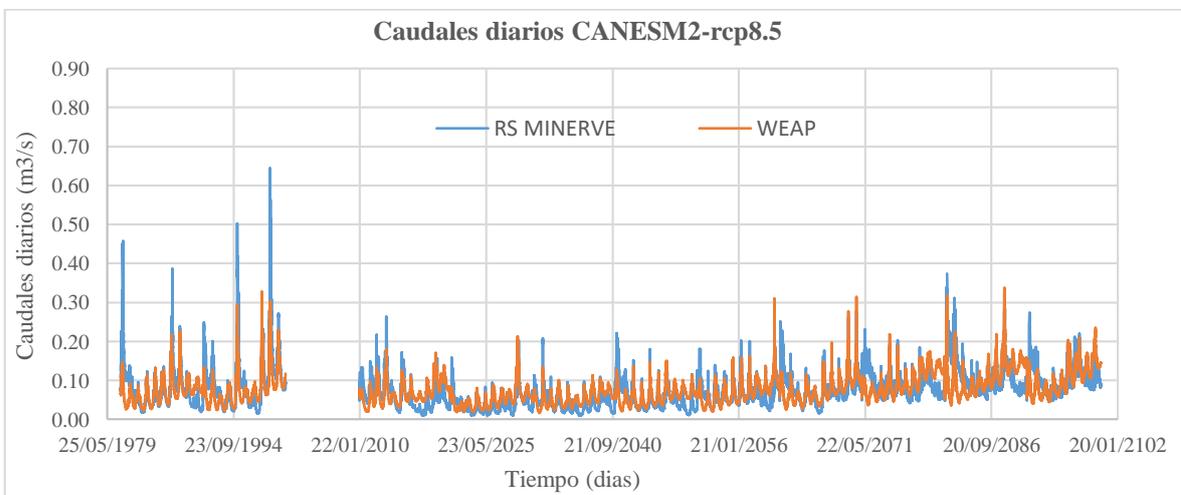


Figura 103: Caudal diario del escenario CANESM2-RCP8.5

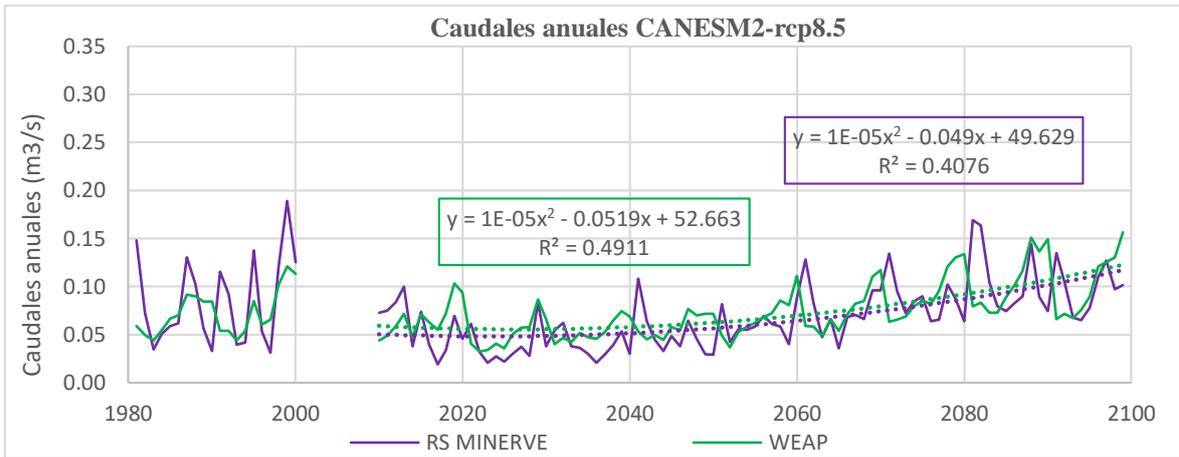


Figura 104: Caudales anual del escenario CANESM2 - RCP8.5

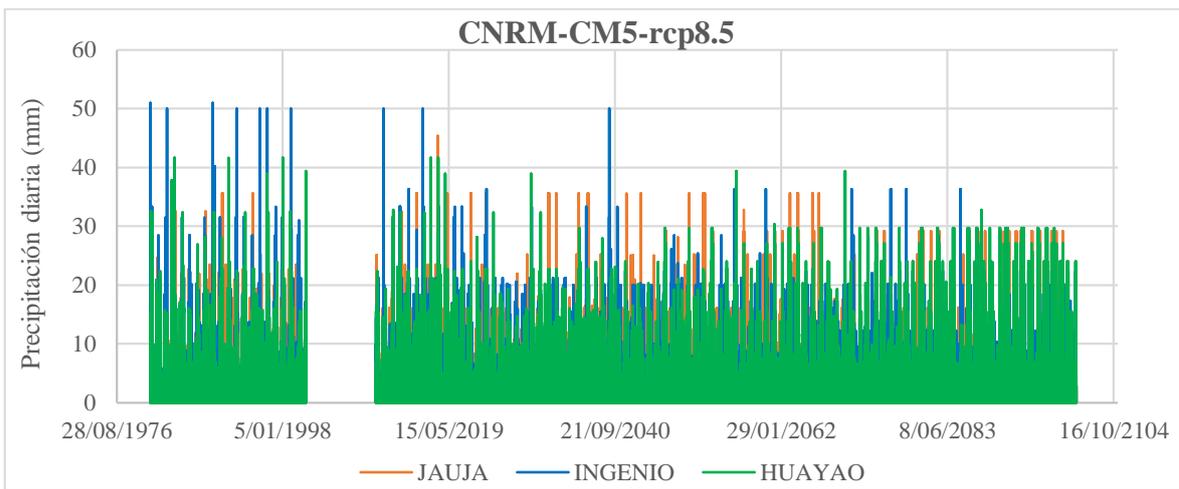


Figura 105: Precipitación diaria del escenario CNRM-CM5-rcp8.5

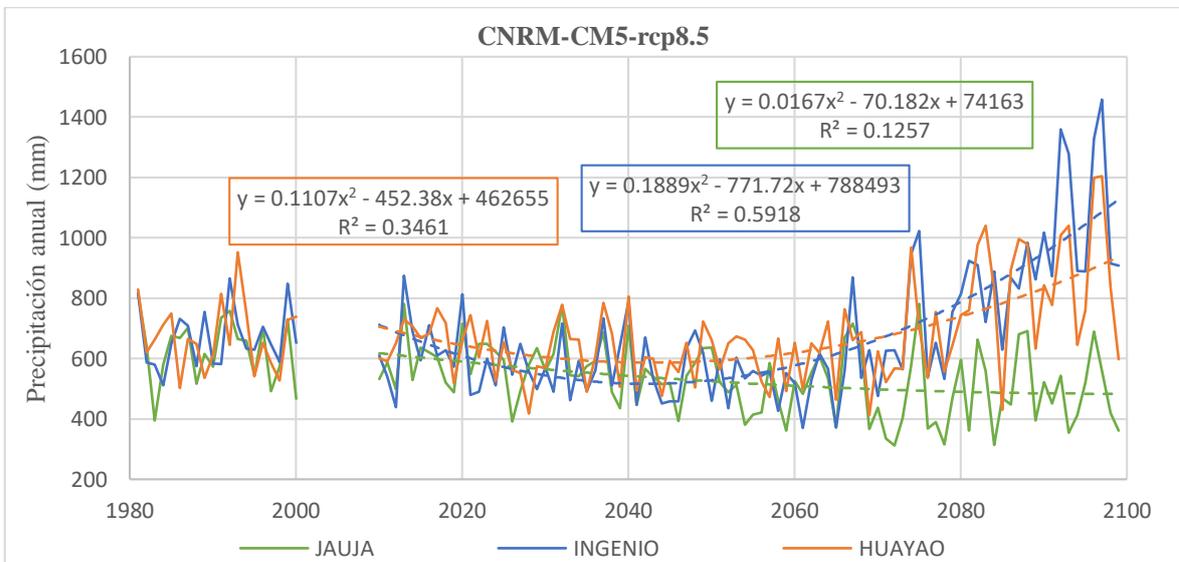


Figura 106: Precipitación anual del escenario CNRM-CM5 - RCP8.5

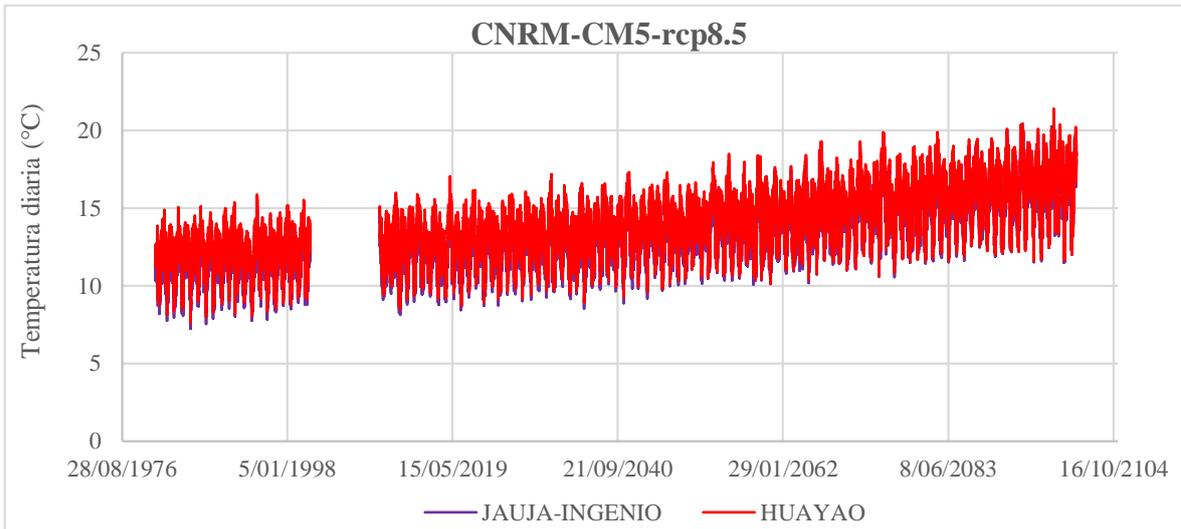


Figura 107: Temperatura diaria del escenario CNRM-CM5-rcp8.5

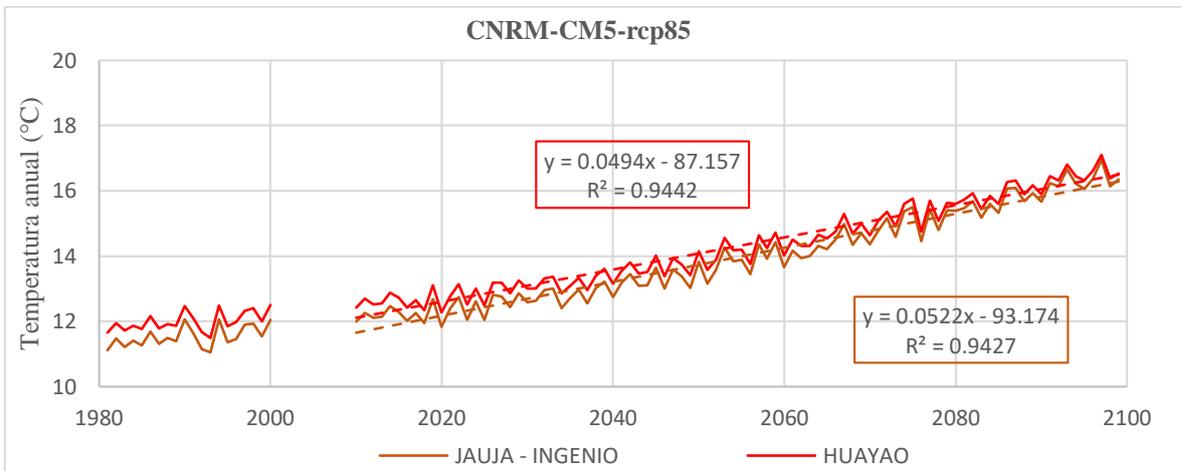


Figura 108: Temperatura anual del escenario CNRM-CM5 - RCP8.5

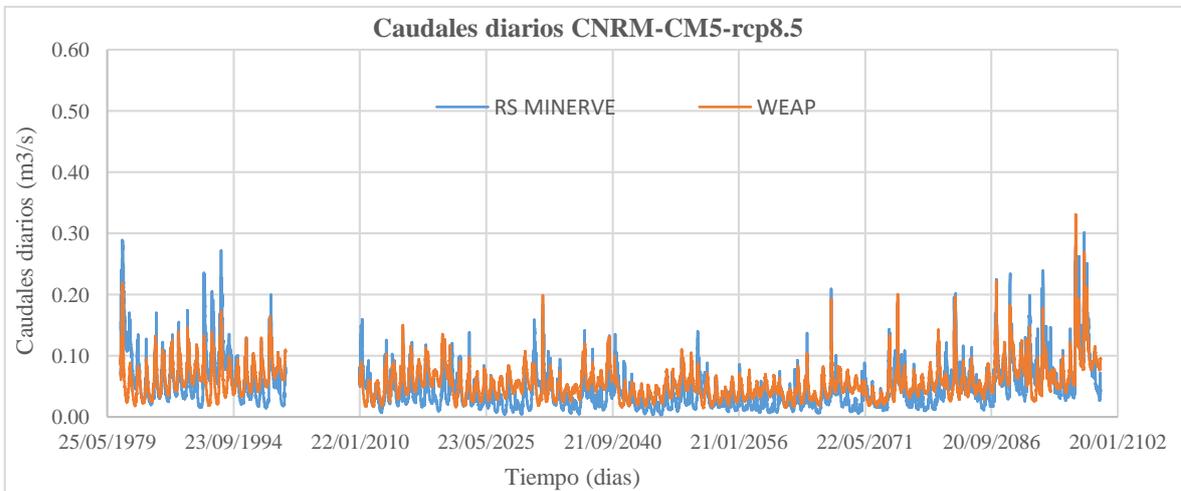


Figura 109: Caudales diarios del escenario CNRM-CM5 - RCP8.5

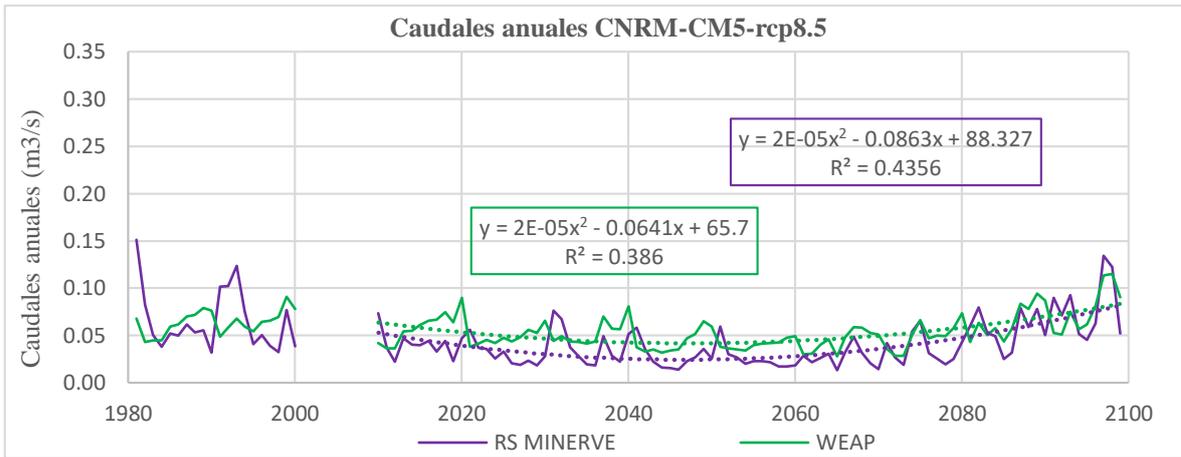


Figura 110: Caudal anual del escenario CNRM-CM5 - RCP8.5

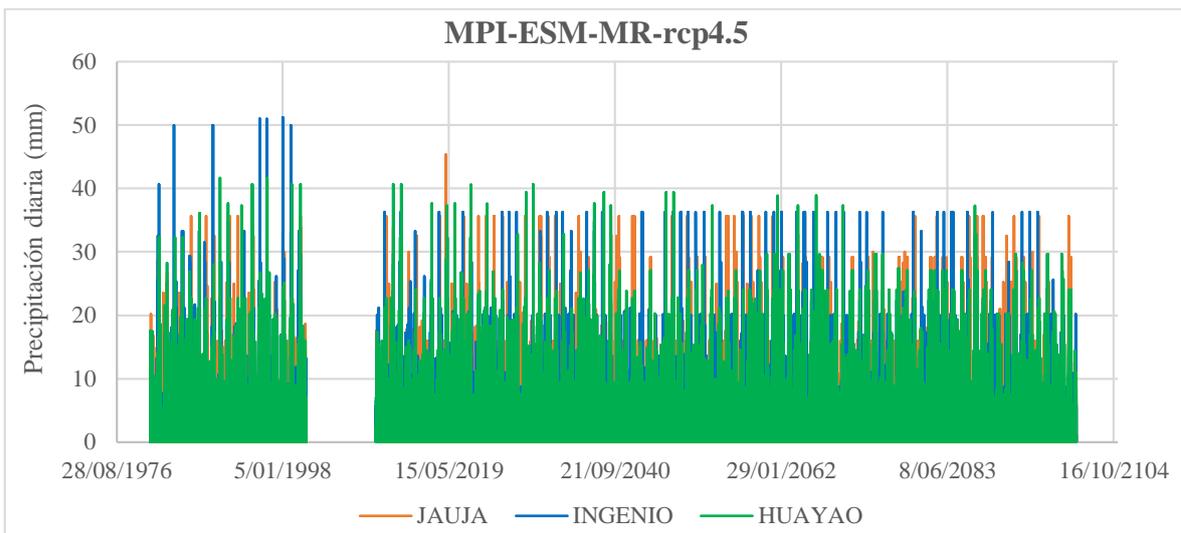


Figura 111: Precipitación diaria del escenario MPI-ESM-MR-rcp4.5

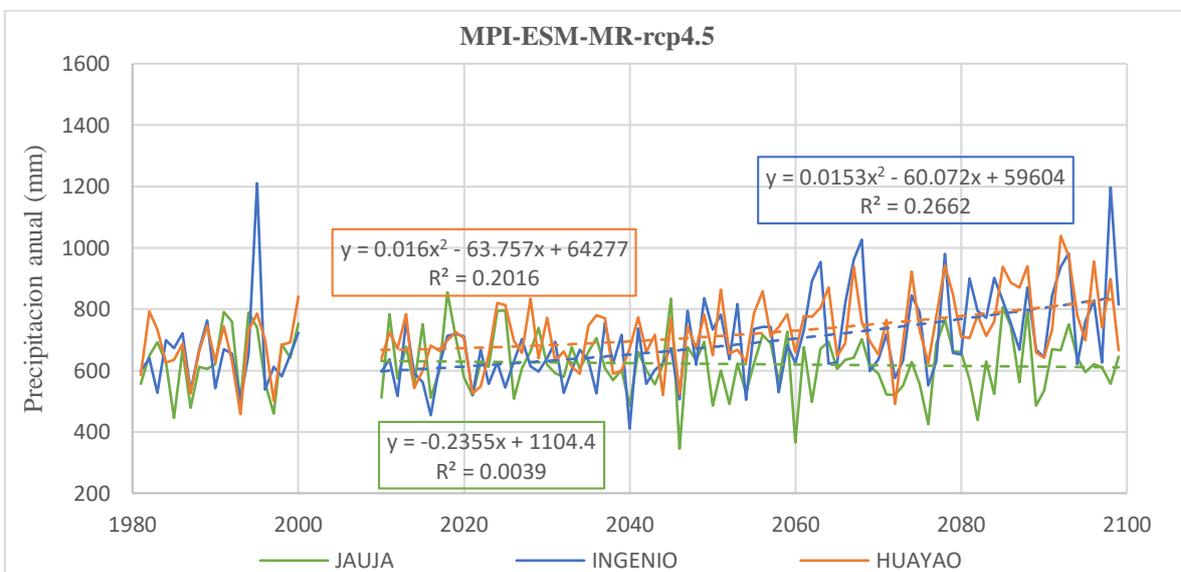


Figura 112: Precipitación anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP4.5

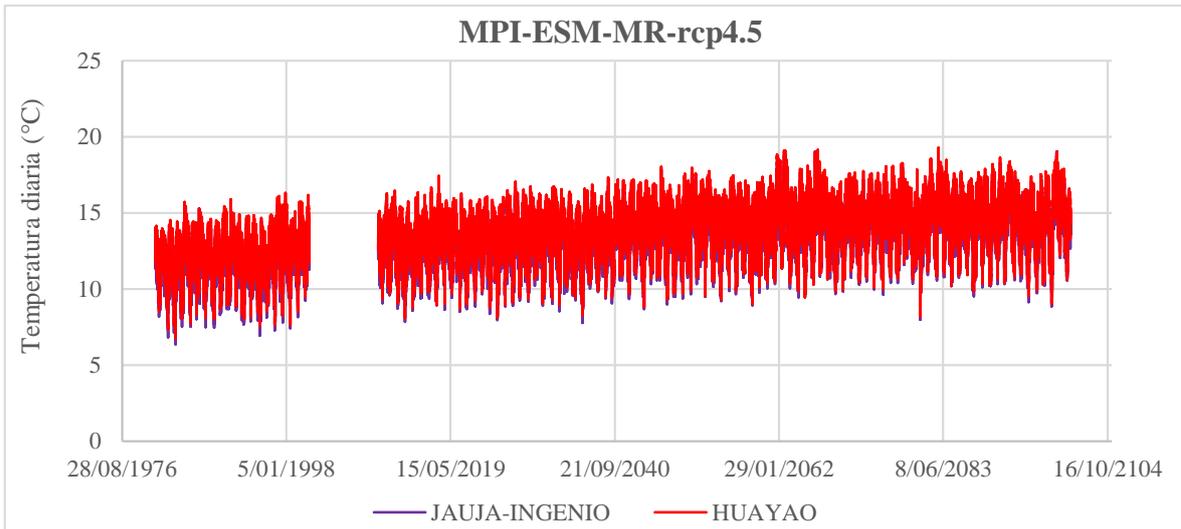


Figura 113: Temperatura diaria del escenario MPI-ESM-MR-rcp4.5

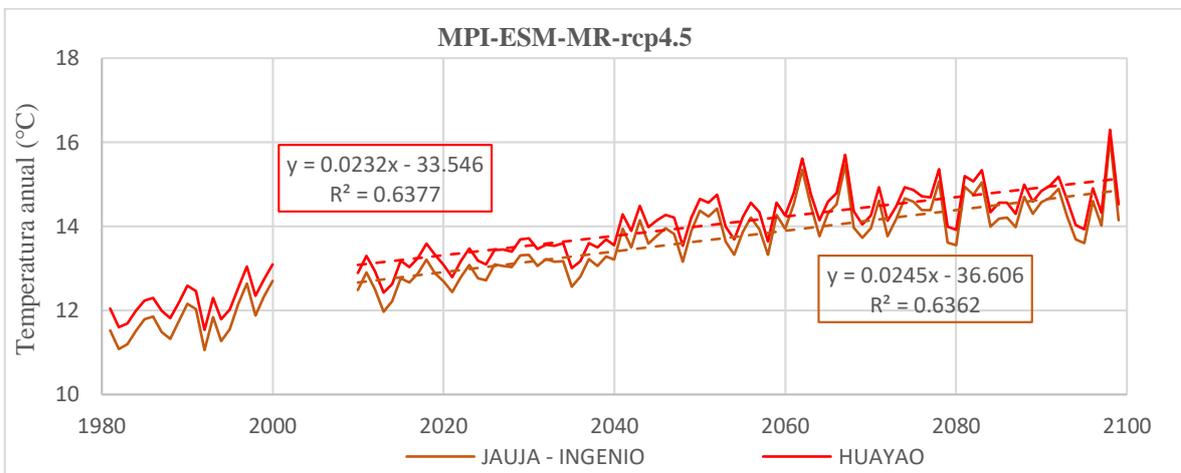


Figura 114: Temperatura anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP4.5

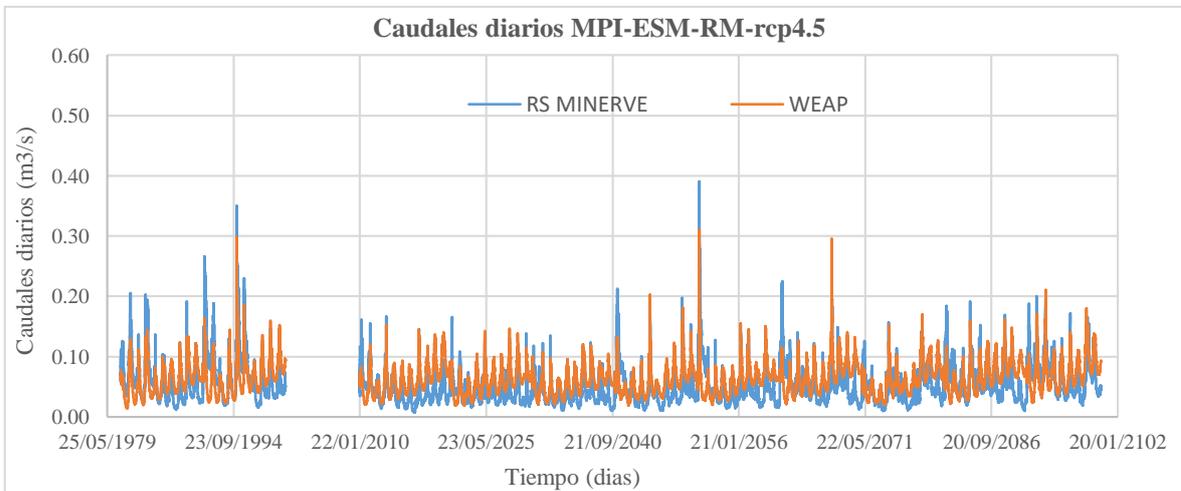


Figura 115: Caudales diarios del escenario MPI-ESM-MR - RCP4.5

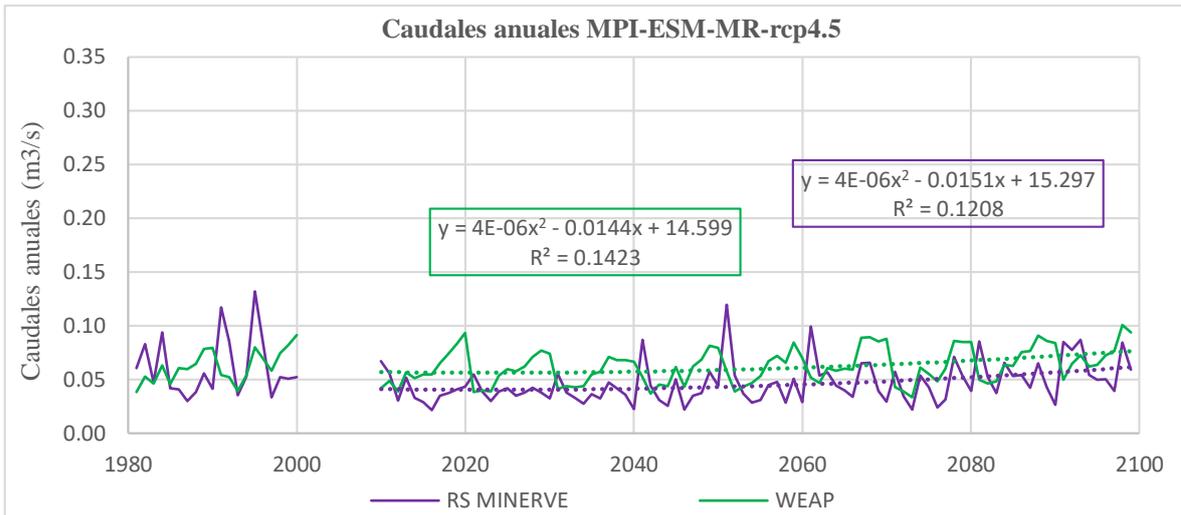


Figura 116: Caudal anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP4.5

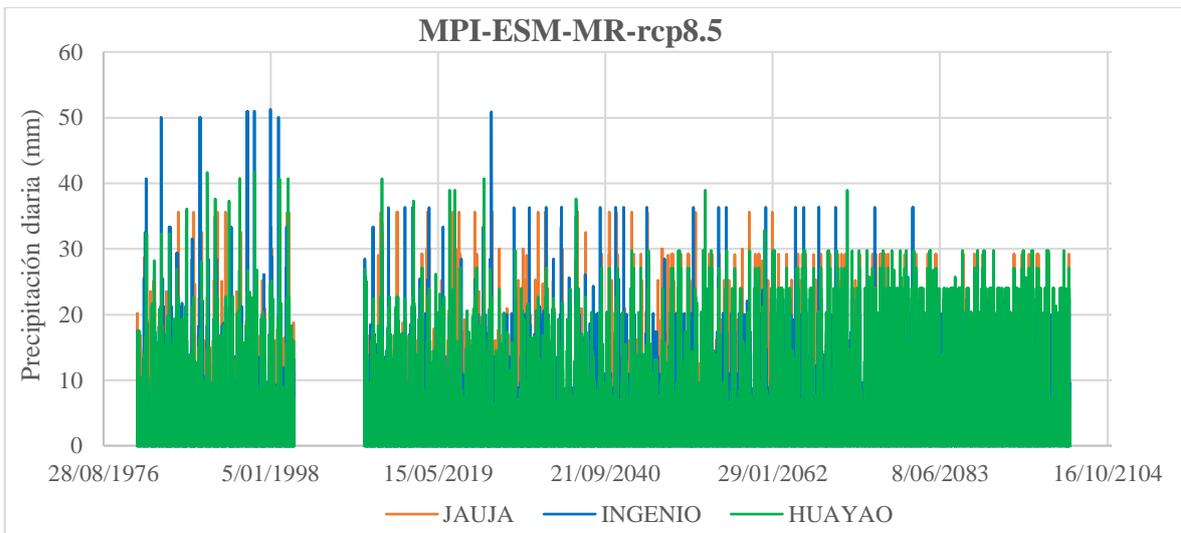


Figura 117: Precipitación diaria del escenario MPI-ESM-MR-rcp8.5

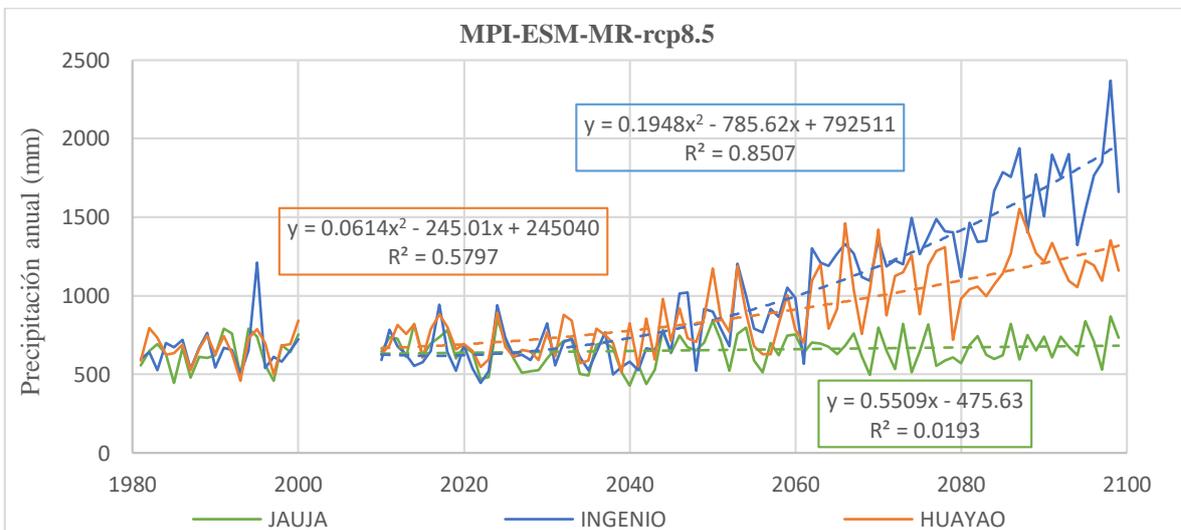


Figura 118: Precipitación anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP8.5

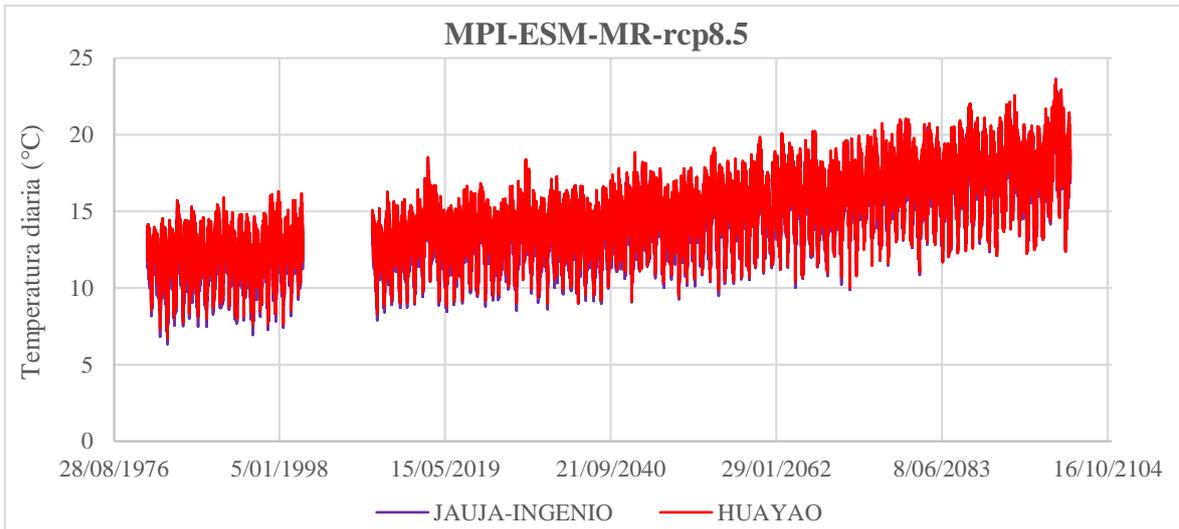


Figura 119: Temperatura diaria del escenario MPI-ESM-MR-rcp8.5

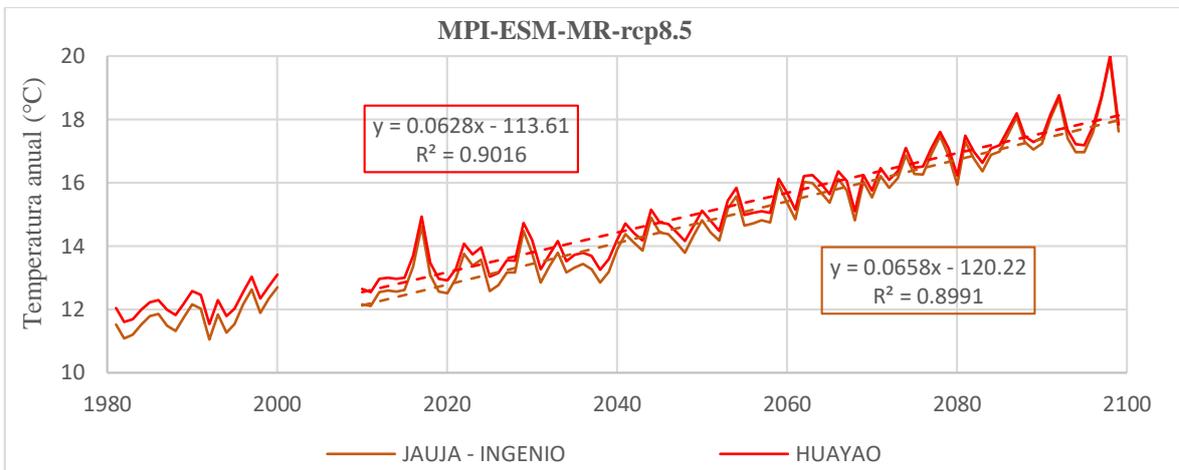


Figura 120: Temperatura anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP8.5

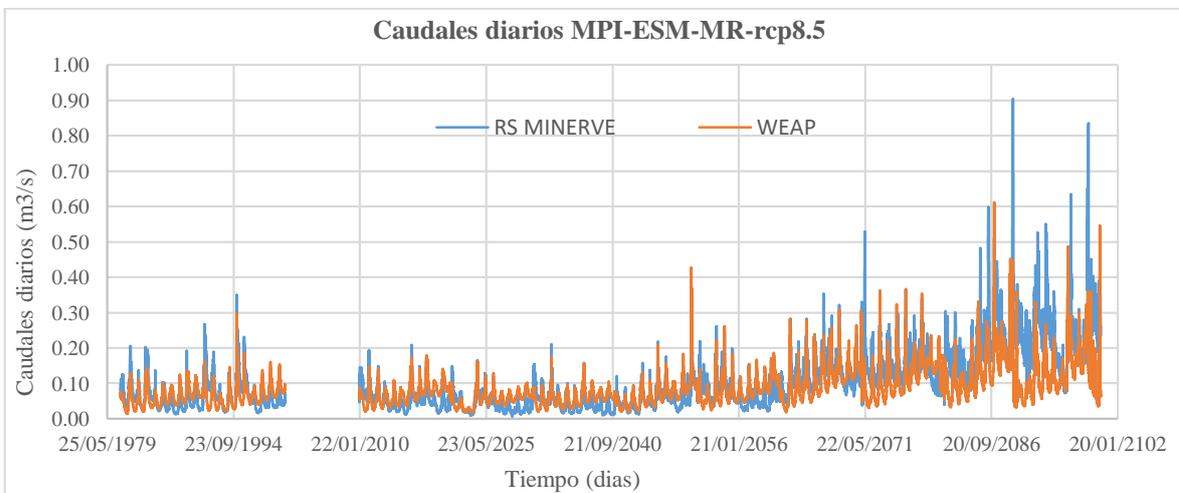


Figura 121: Caudales diarios del escenario MPI-ESM-MR - RCP8.5

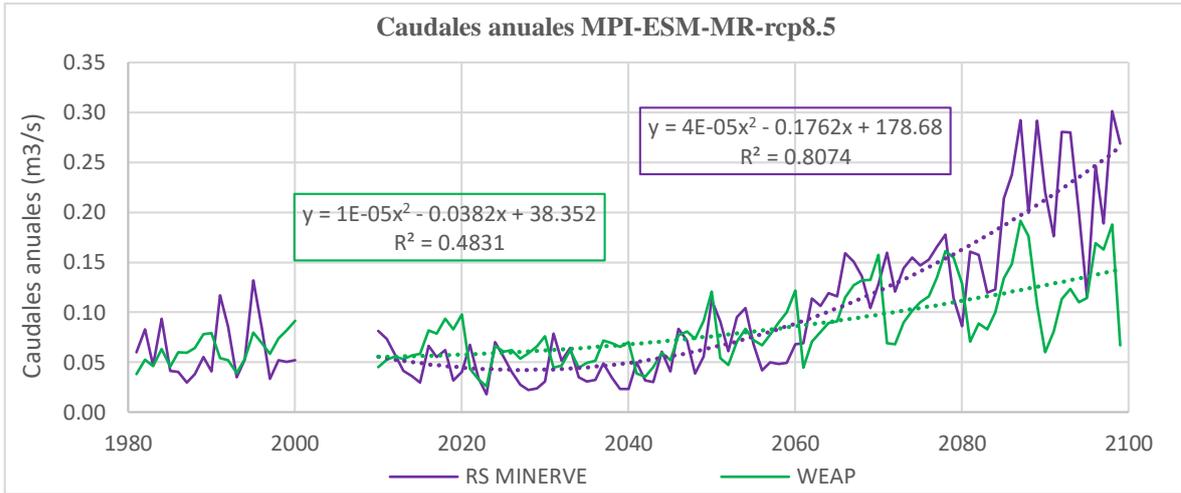


Figura 122: Caudal anual del escenario MPI-ESM-MR - RCP8.5

ANEXO 10: TASA DE VARIACIÓN MULTIANUAL MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN (2020-2040)

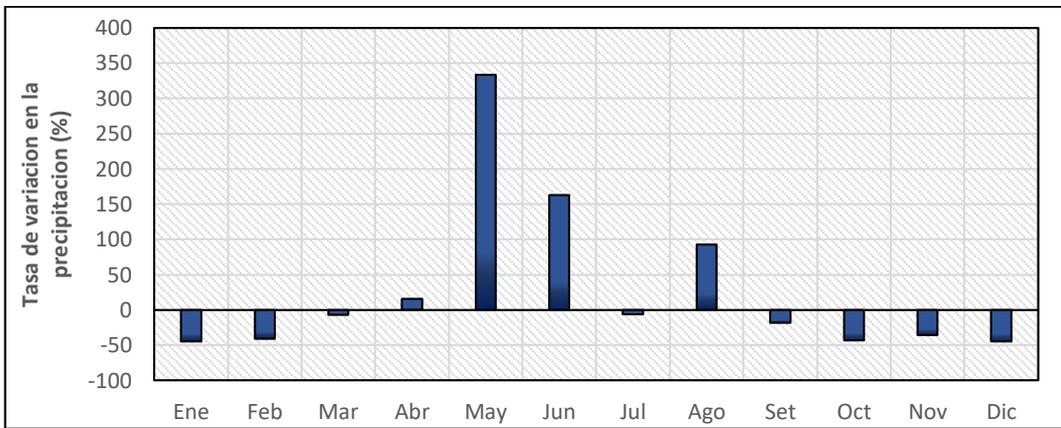


Figura 123: Variación de la precipitación en un futuro cercano, CANESM2-RCP4.5

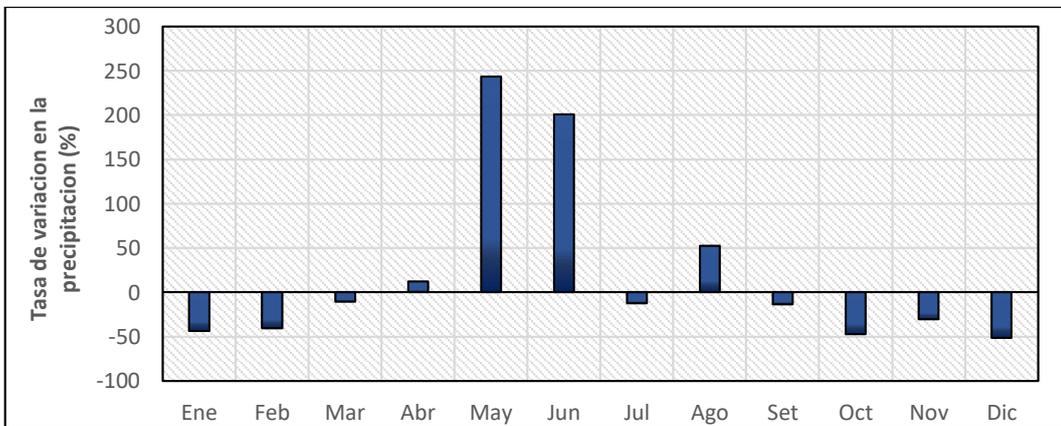


Figura 124: Variación de la precipitación en un futuro cercano, CANESM2-RCP8.5

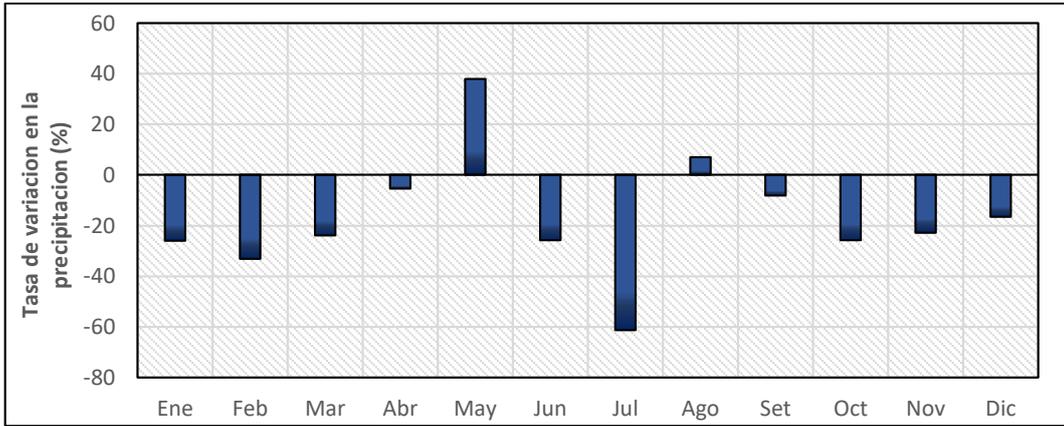


Figura 125: Variación de la precipitación en un futuro cercano, CNRM-CM5-RCP4.5

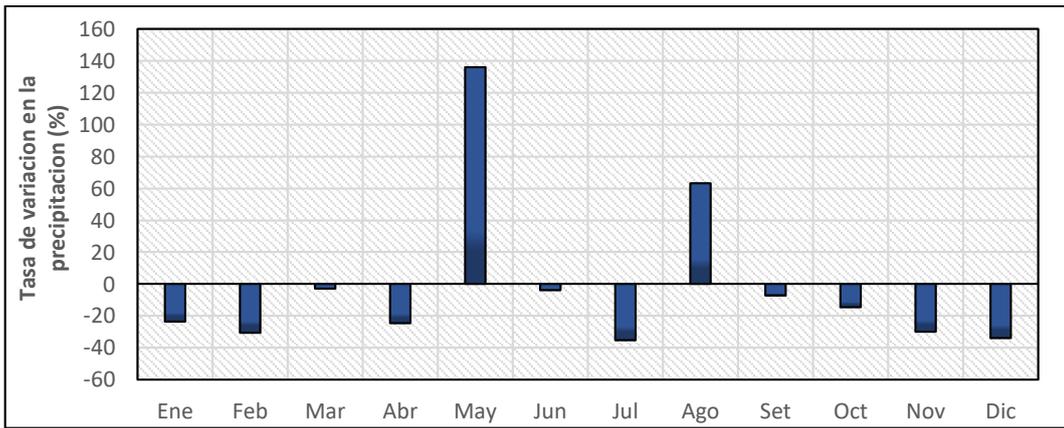


Figura 126: Variación de la precipitación en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP4.5

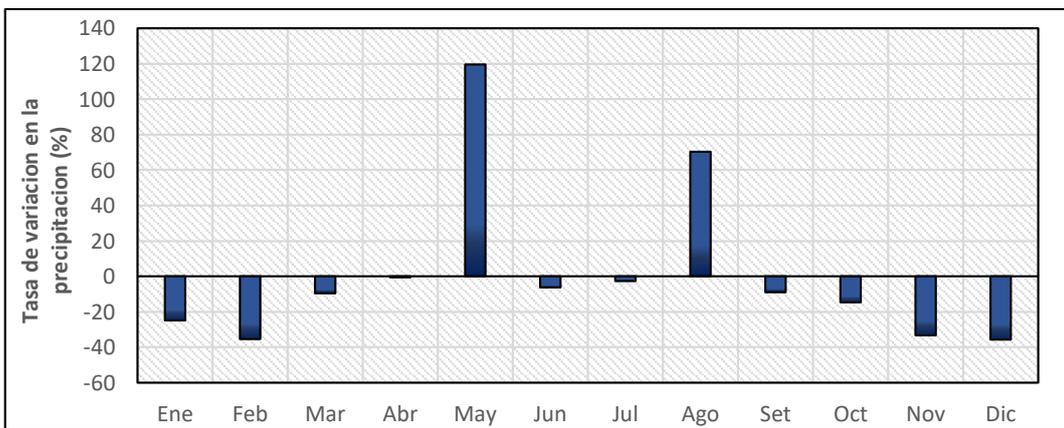


Figura 127: Variación de la precipitación en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP8.5

ANEXO 11: VARIACIÓN MULTIANUAL MENSUAL DE LA TEMPERATURA (2020-2040)

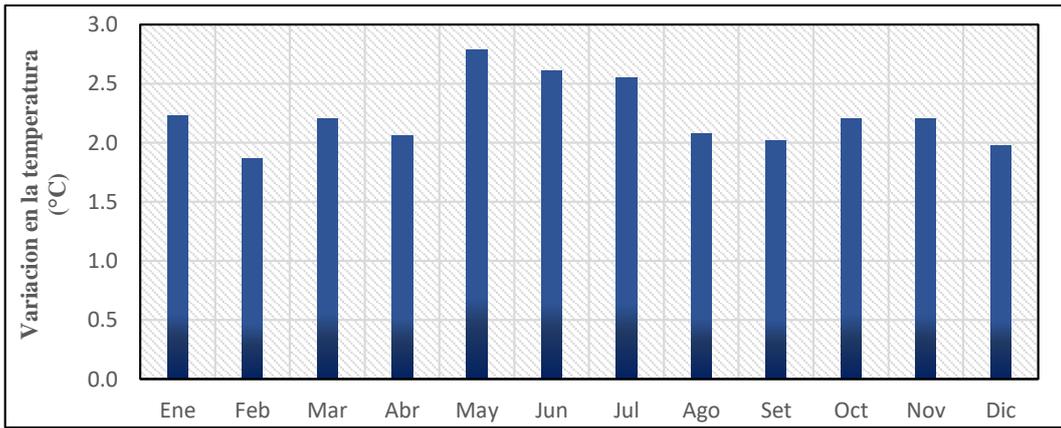


Figura 128: Variación de la temperatura en un futuro cercano, CANESM2-RCP4.5

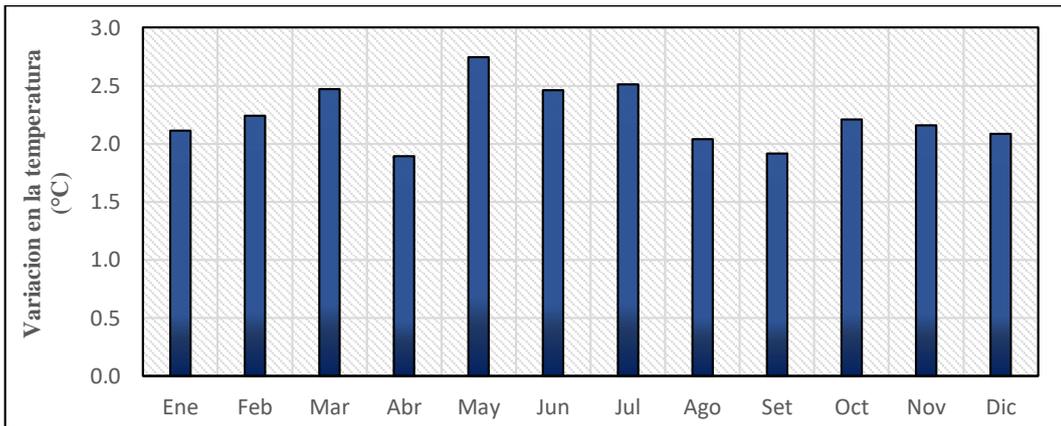


Figura 129: Variación de la temperatura en un futuro cercano, CANESM2-RCP8.5

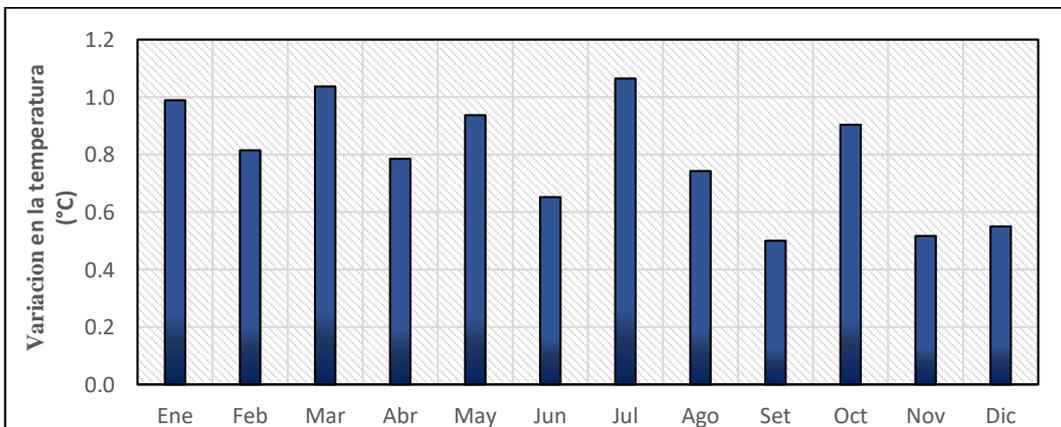


Figura 130: Variación de la temperatura en un futuro cercano, CNRM-CM5-RCP4.5

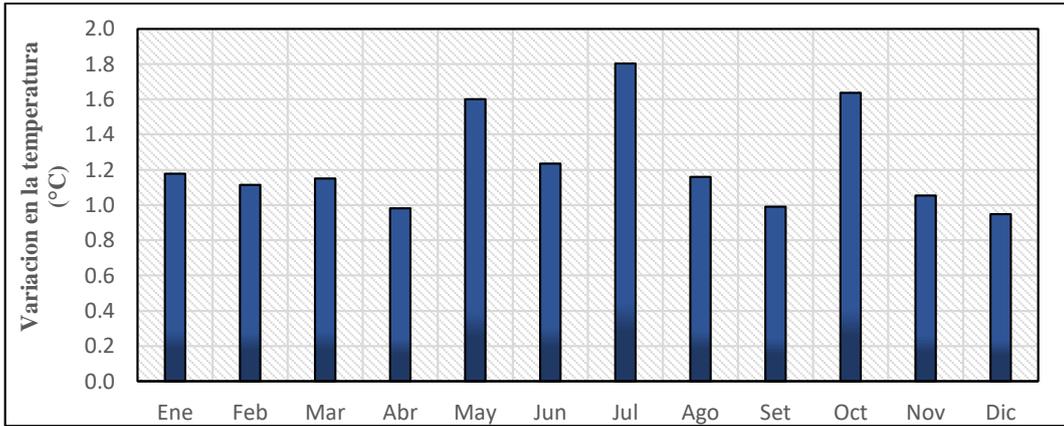


Figura 131: Variación de la temperatura en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP4.5

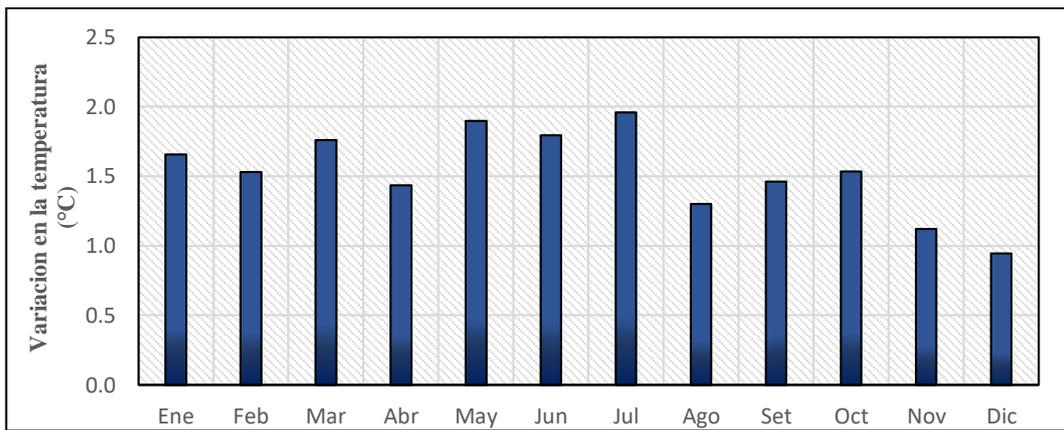


Figura 132: Variación de la temperatura en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP8.5

ANEXO 12: TASA DE VARIACIÓN MULTIANUAL MENSUAL DE LOS CAUDALES (2020-2040)

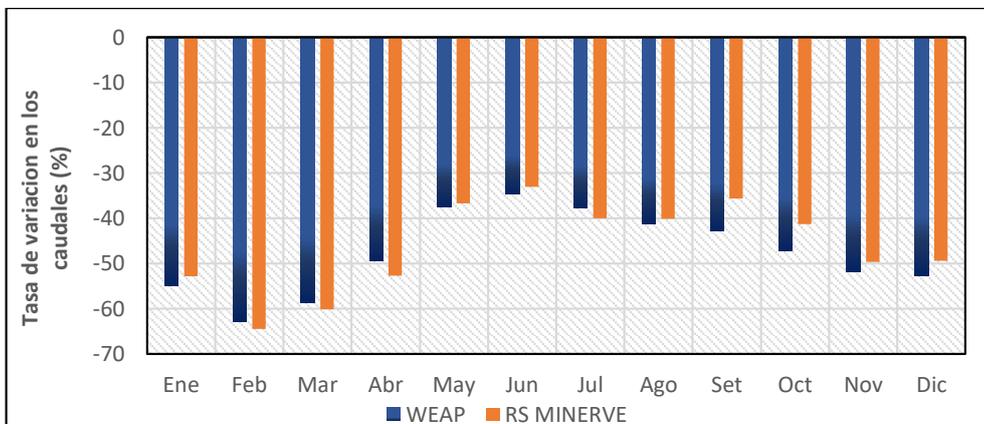


Figura 133: Variación de los caudales en un futuro cercano, CANESM2-RCP4.5

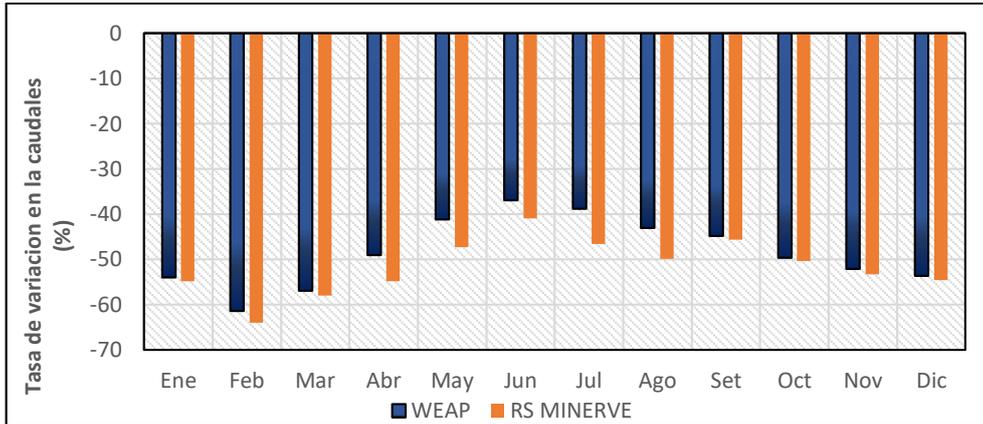


Figura 134: Variación de los caudales en un futuro cercano, CANESM2-RCP8.5

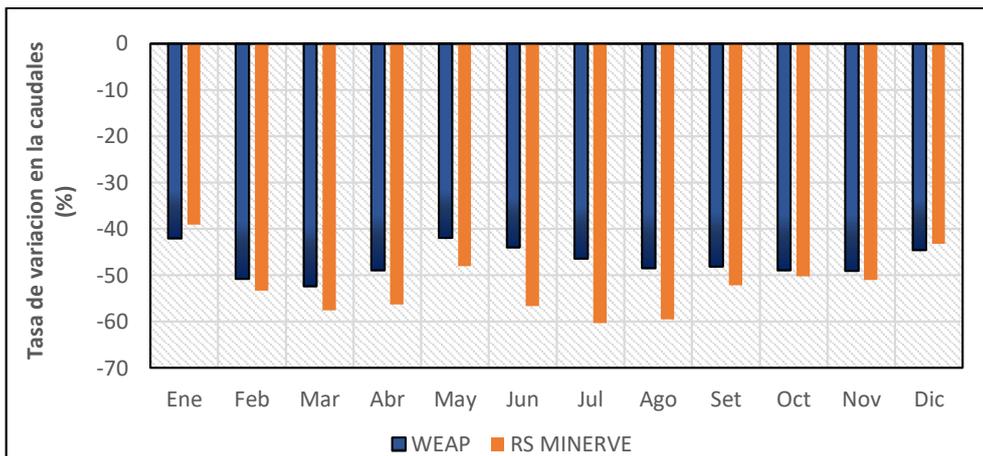


Figura 135: Variación de los caudales en un futuro cercano, CNRM-CM5-RCP4.5

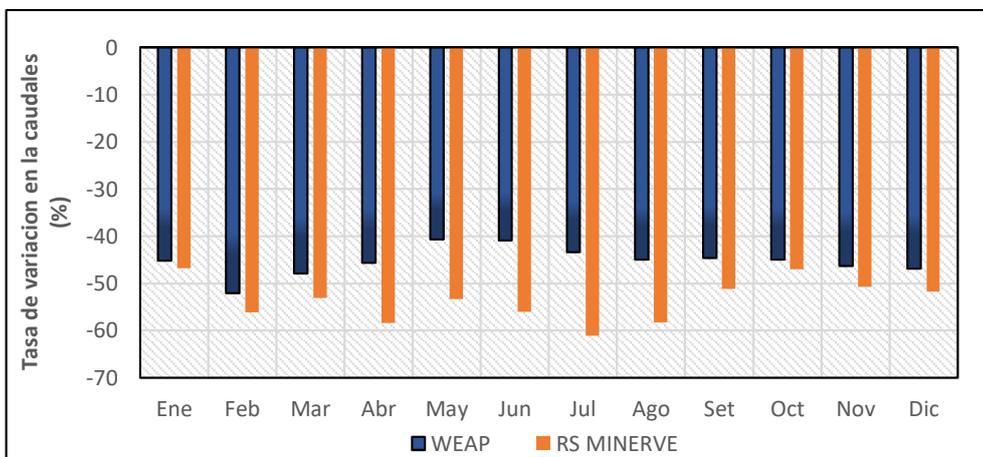


Figura 136: Variación de los caudales en un futuro cercano, MPI-ESM-MR-RCP4.5

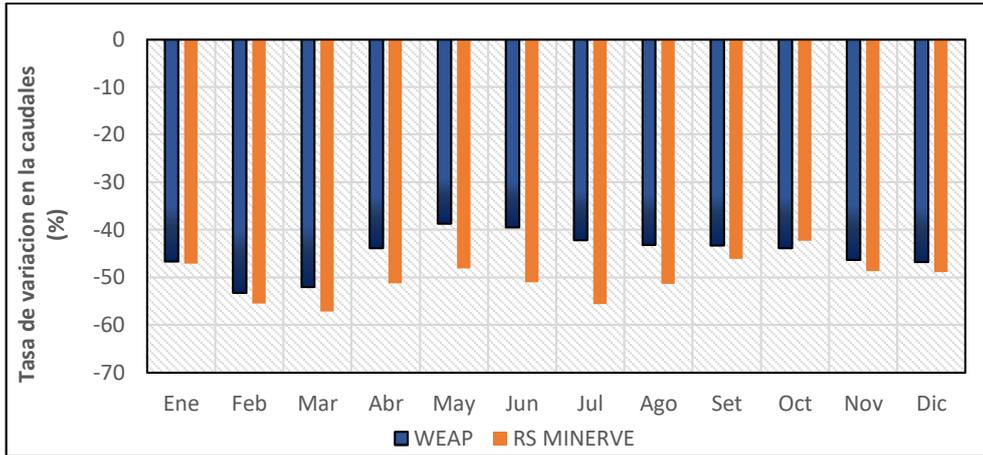


Figura 137: Variación de los caudales en un futuro cercano, MPI-ESM-ME-RCP8.5

ANEXO 13: TASA DE VARIACIÓN MULTIANUAL MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN (2041-2050)

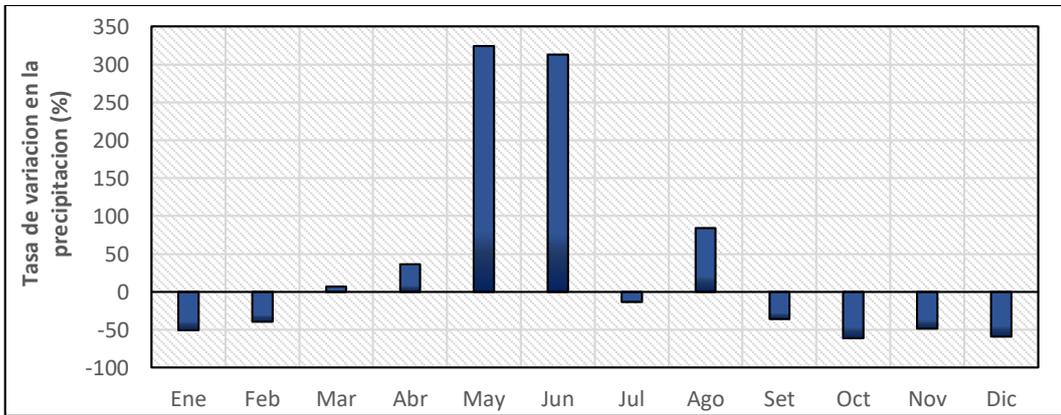


Figura 138: Variación de la precipitación en un futuro medio, CANESM2-RCP4.5

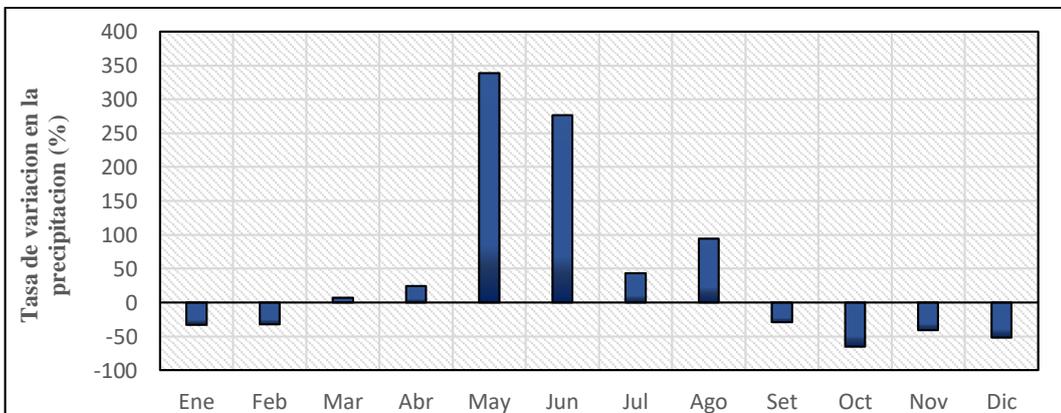


Figura 139: Variación de la precipitación en un futuro medio, CANESM2 - RCP8.5

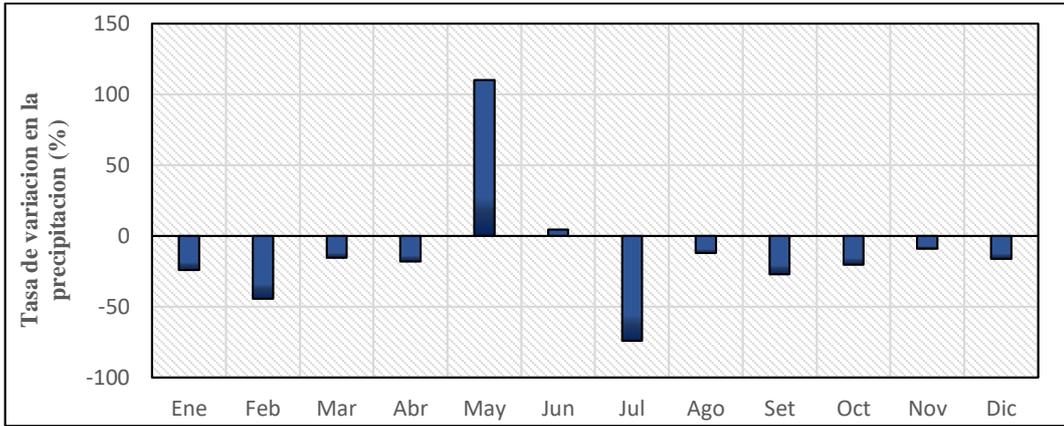


Figura 140: Variación de la precipitación en un futuro medio, CNRM-CM5 – RCP4.5

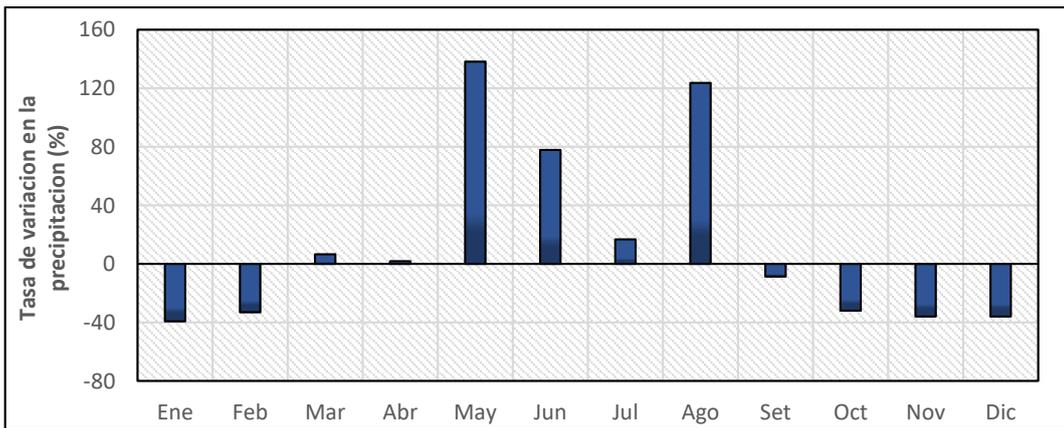


Figura 141: Variación de la precipitación en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP4.5

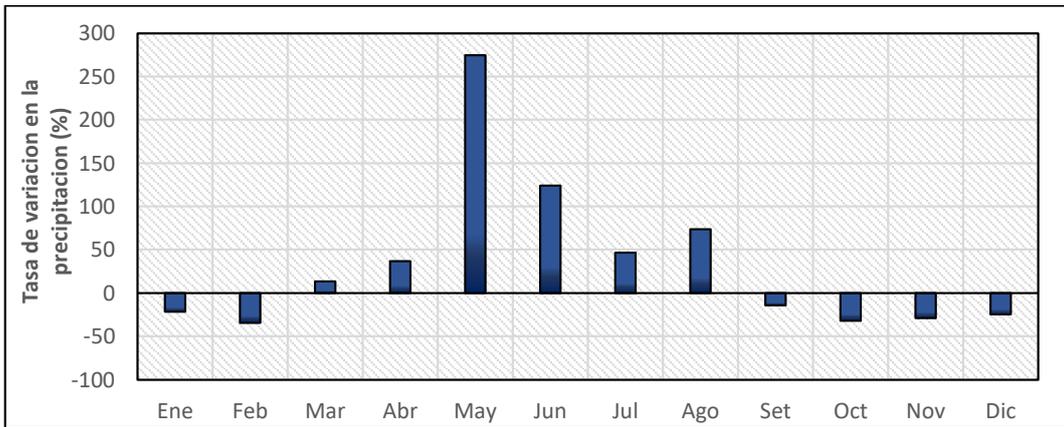


Figura 142: Variación de la precipitación en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP8.5

ANEXO 14: VARIACIÓN MULTIANUAL MENSUAL DE LA TEMPERATURA (2041-2050)

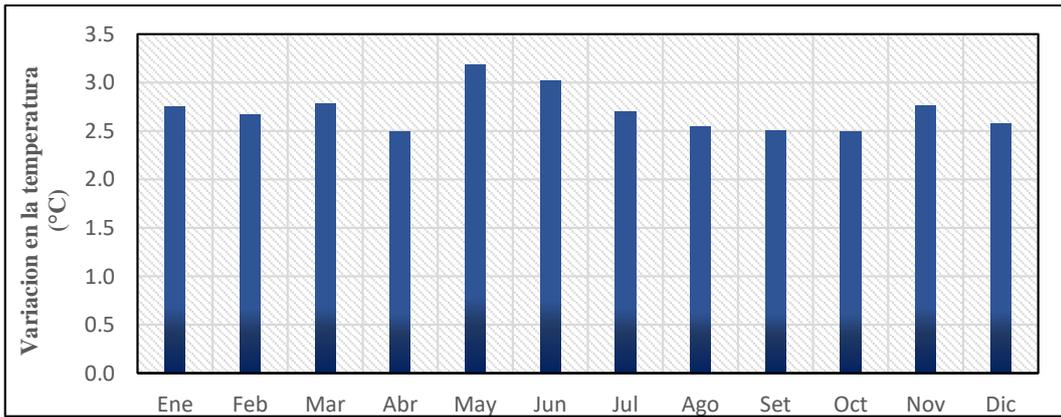


Figura 143: Variación de la temperatura en un futuro medio, CANESM2 - RCP4.5

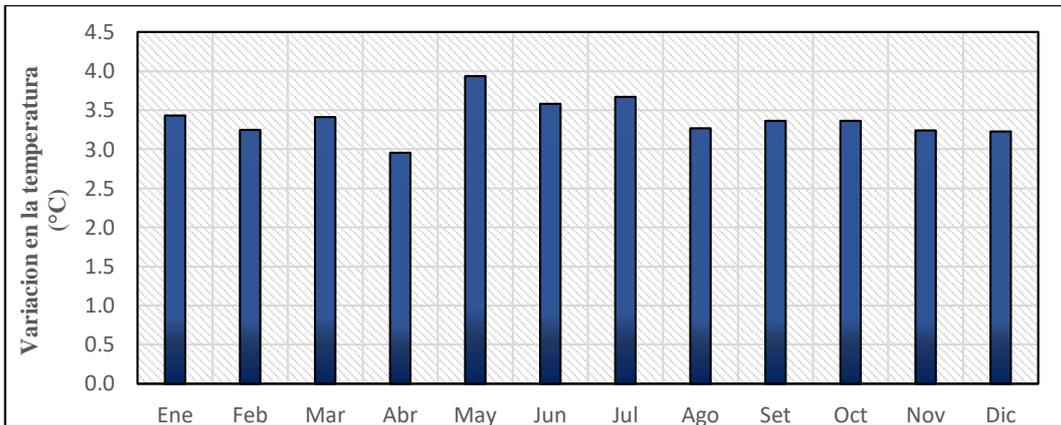


Figura 144: Variación de la temperatura en un futuro medio, CANESM2 - RCP8.5

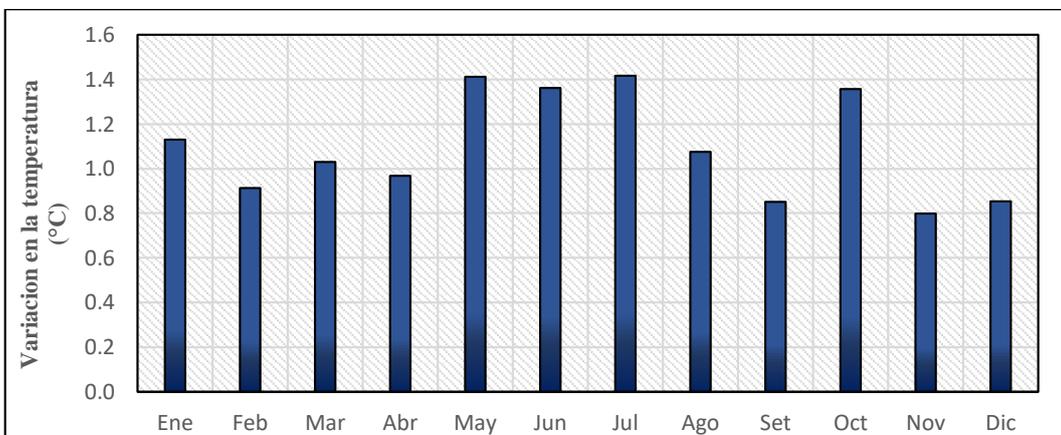


Figura 145: Variación de la temperatura en un futuro medio, CNRM-CM5-RCP4.5

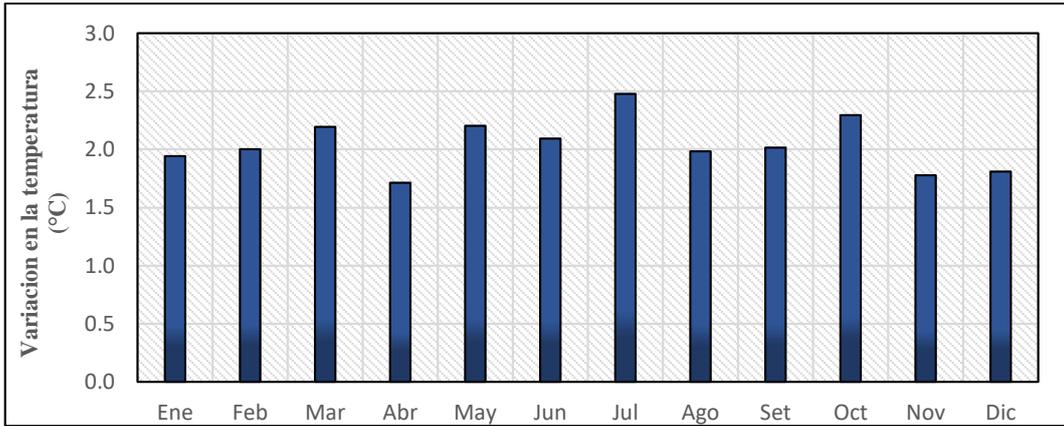


Figura 146: Variación de la temperatura en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP4.5

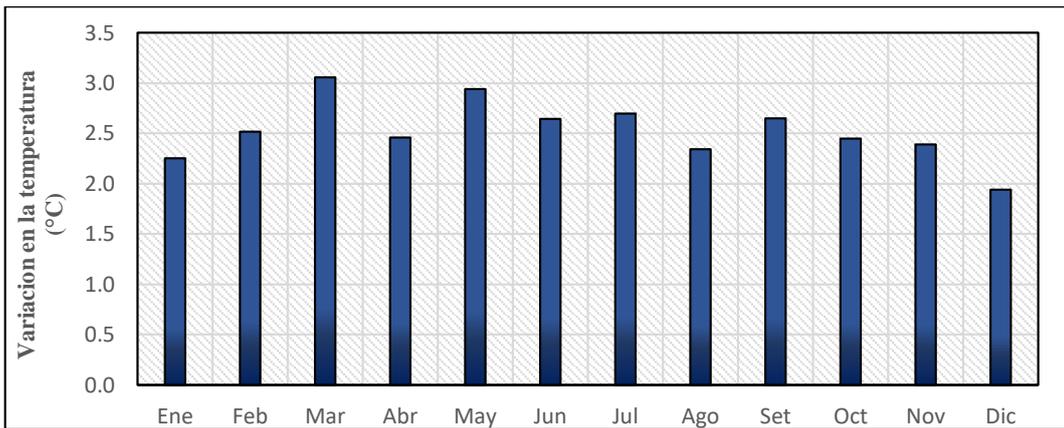


Figura 147: Variación de la temperatura en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP8.5

ANEXO 15: TASA DE VARIACION MULTIANUAL MENSUAL DE LOS CAUDALES (2041-2050)

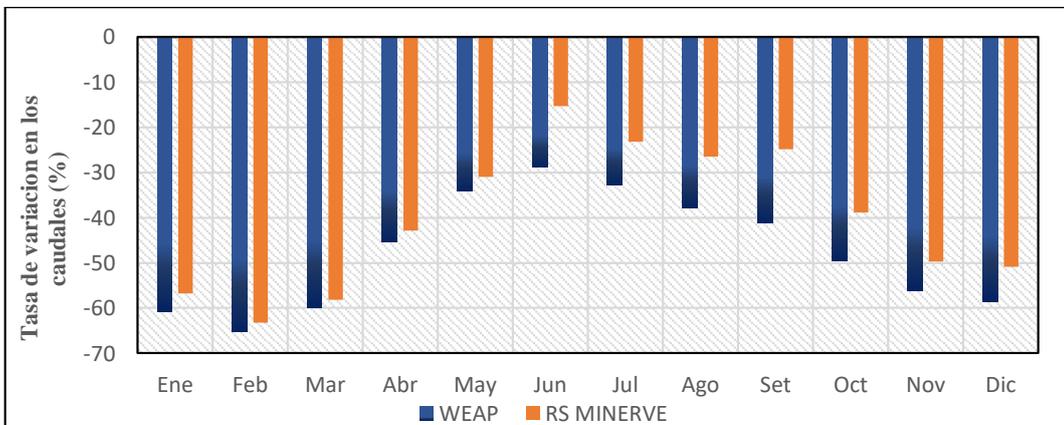


Figura 148: Variación de los caudales en un futuro medio, CANESM2 - RCP4.5

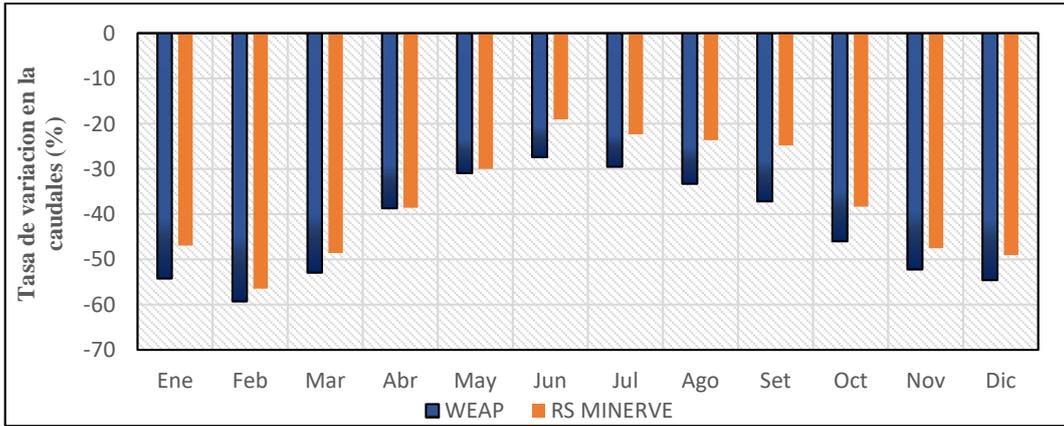


Figura 149: Variación de los caudales en un futuro medio, CANESM2 - RCP8.5

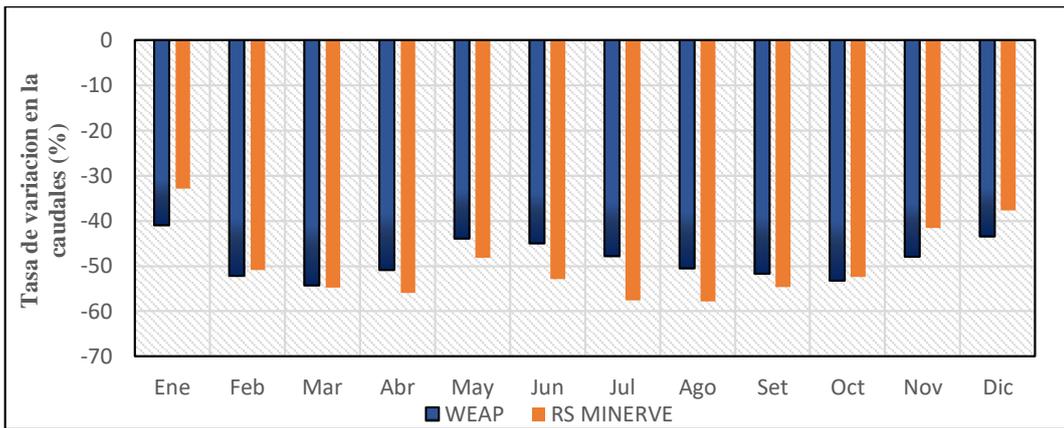


Figura 150: Variación de los caudales en un futuro medio, CNRM-CM5 - RCP4.5

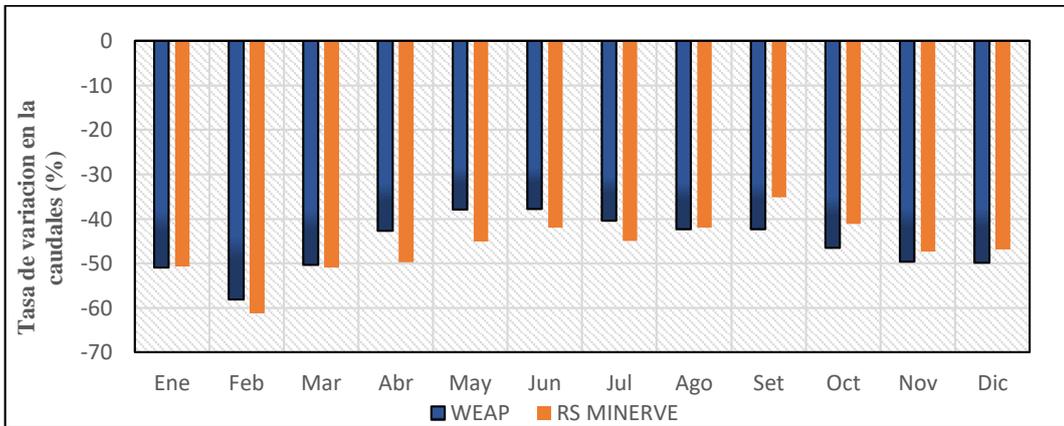


Figura 151: Variación de los caudales en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP4.5

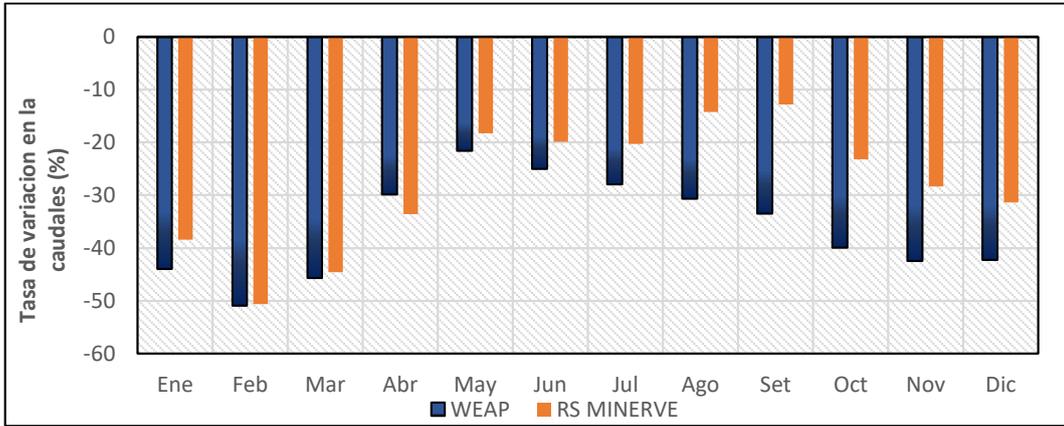


Figura 152: Variación de los caudales en un futuro medio, MPI-ESM-MR - RCP8.5

ANEXO 16: TASA DE VARIACIÓN MULTIANUAL MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN (2051-2099)

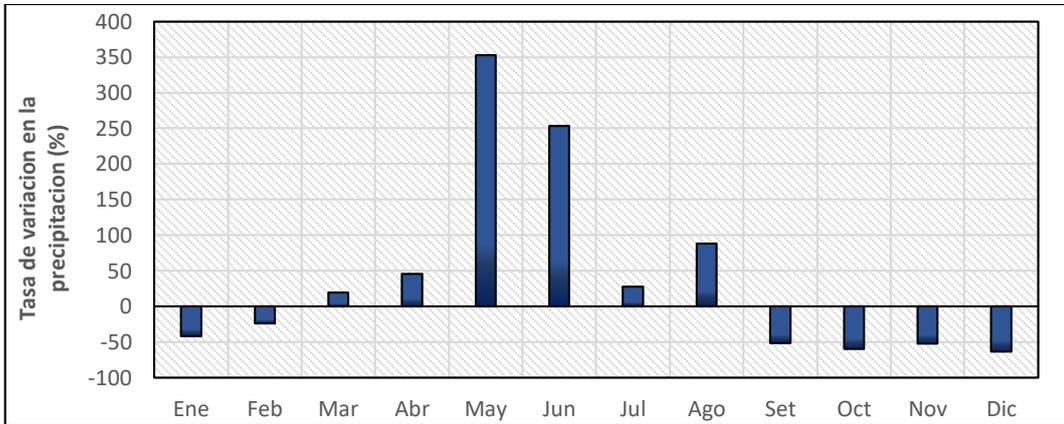


Figura 153: Variación de la precipitación en un futuro lejano, CANESM2-RCP4.5

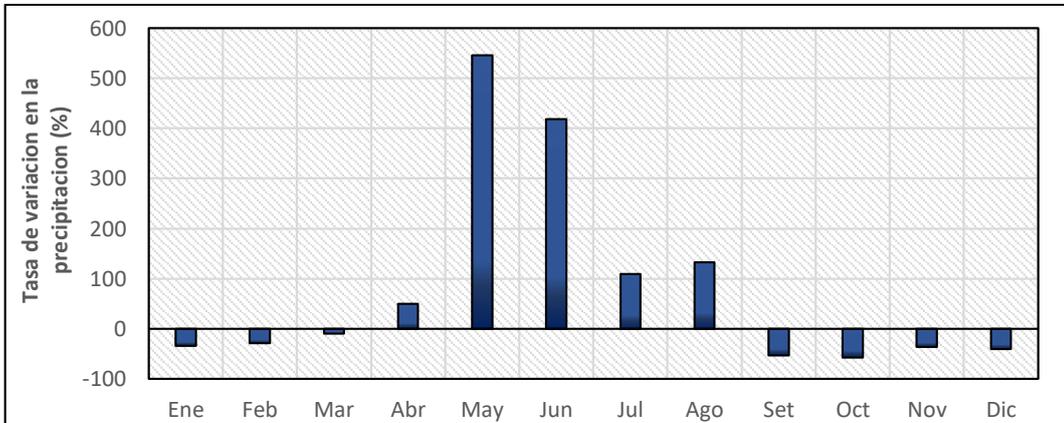


Figura 154: Variación de la precipitación en un futuro lejano, CANESM2-RCP8.5

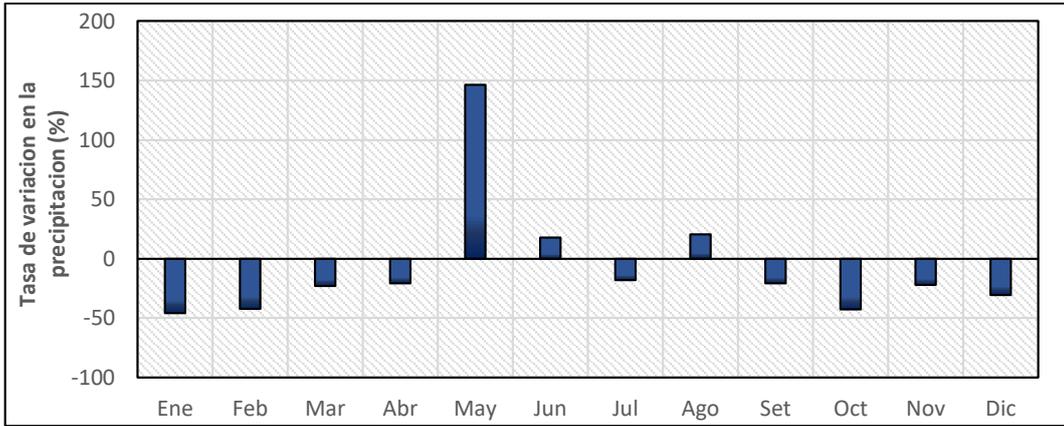


Figura 155: Variación de la precipitación en un futuro lejano, CNRM-CM5-RCP4.5

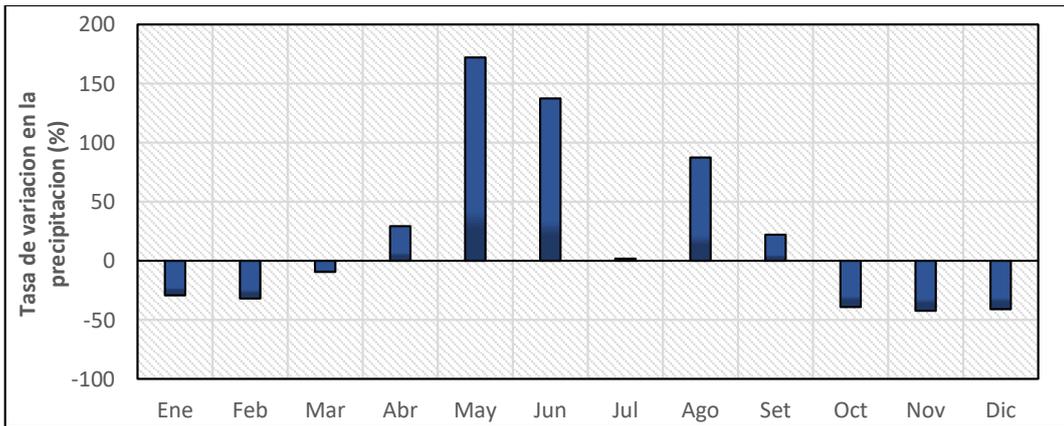


Figura 156: Variación de la precipitación en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP4.5

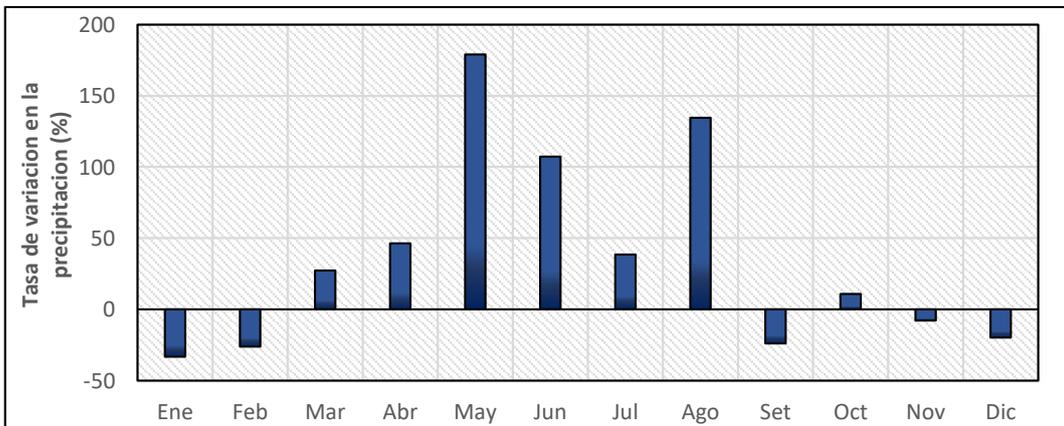


Figura 157: Variación de la precipitación en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP8.5

ANEXO 17: VARIACIÓN MULTIANUAL MENSUAL DE LA TEMPERATURA (2051-2099)

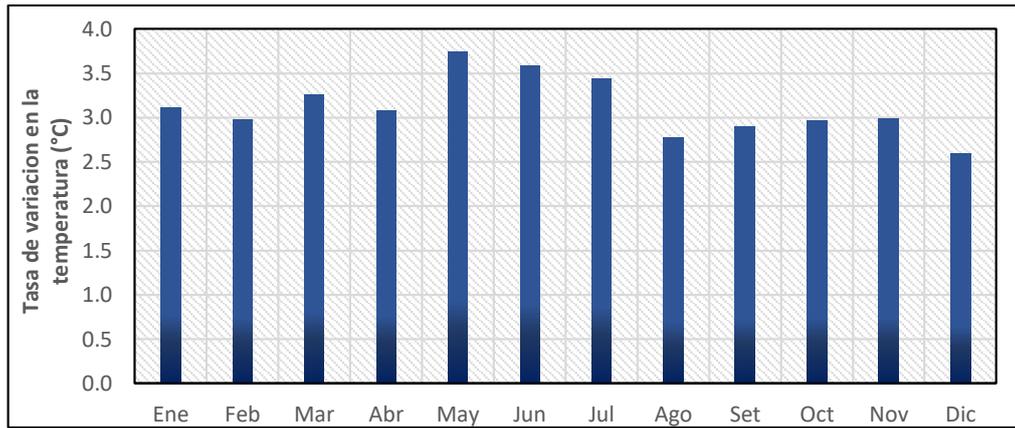


Figura 158: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CANESM2-RCP4.5

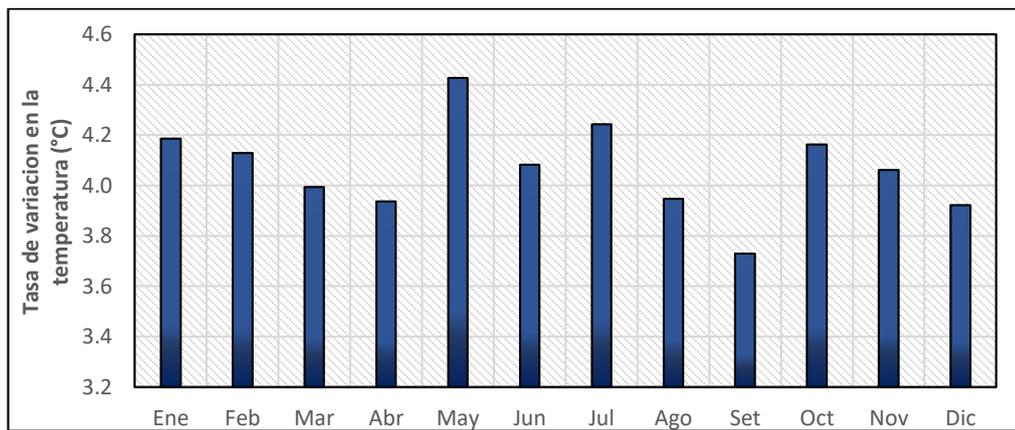


Figura 159: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CANESM2-RCP8.5

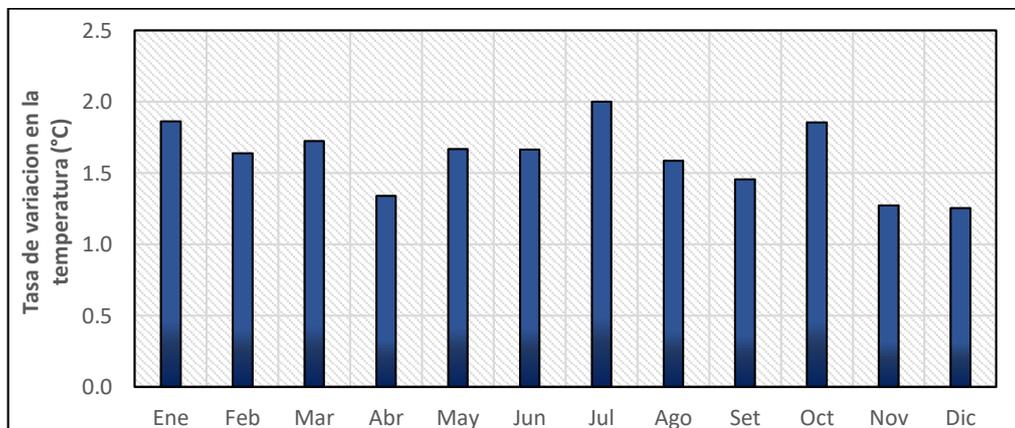


Figura 160: Variación de la temperatura en un futuro lejano, CNRM-CM5-RCP4.5

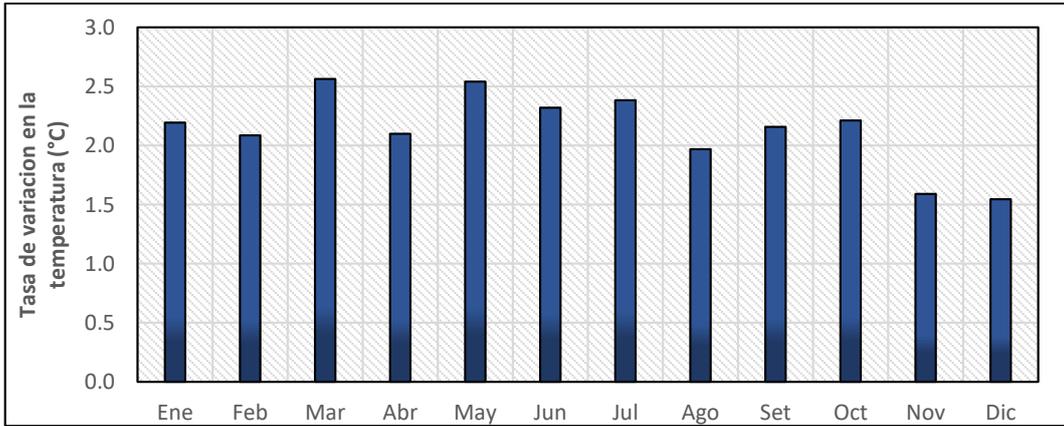


Figura 161: Variación de la temperatura en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP4.5

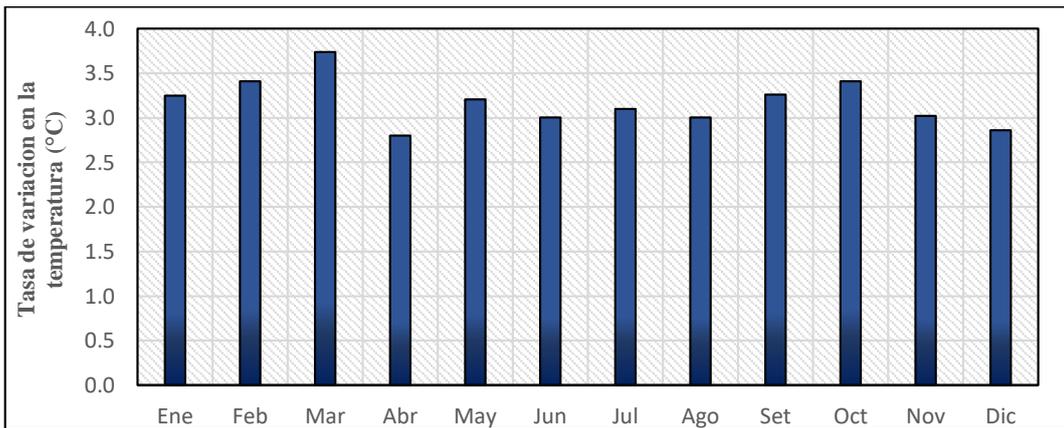


Figura 162: Variación de la temperatura en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP8.5

ANEXO 18: TASA DE VARIACIÓN MULTIANUAL MENSUAL DE LOS CAUDALES (2051-2099)

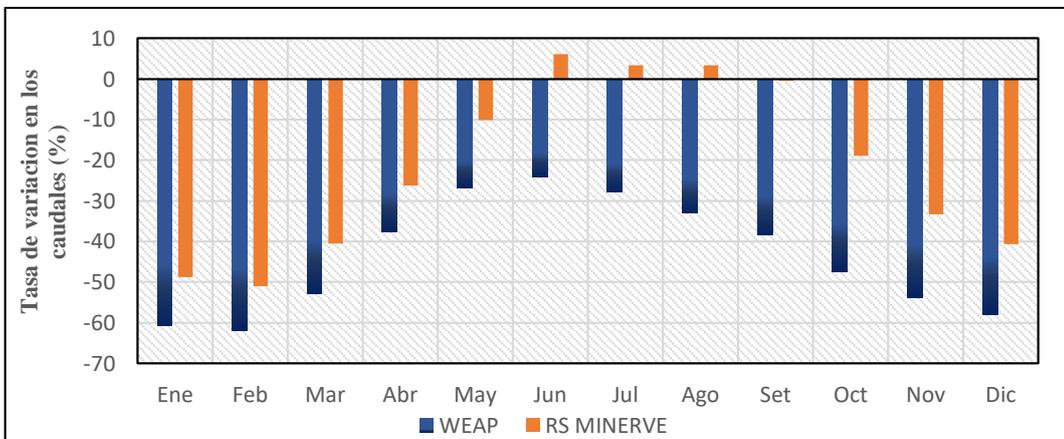


Figura 163: Variación de los caudales en un futuro lejano, CANESM2-RCP4.5

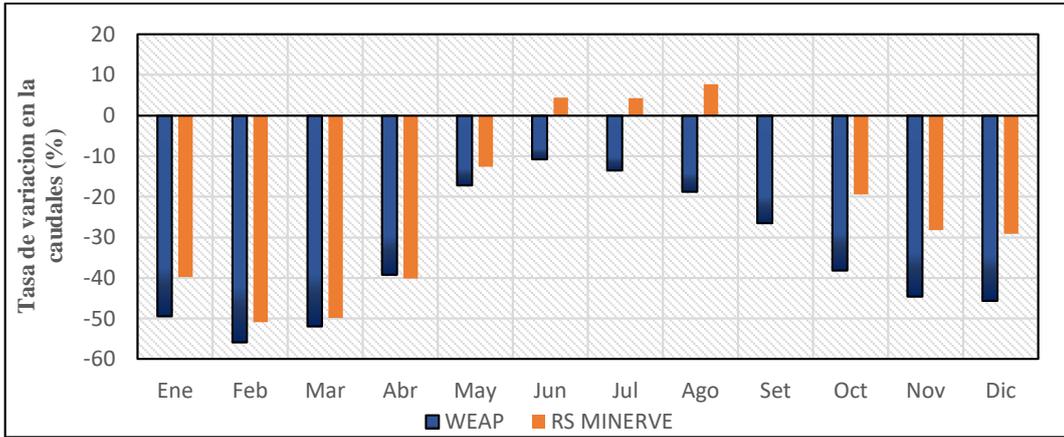


Figura 164: Variación de los caudales en un futuro lejano, CANESM2-RCP8.5

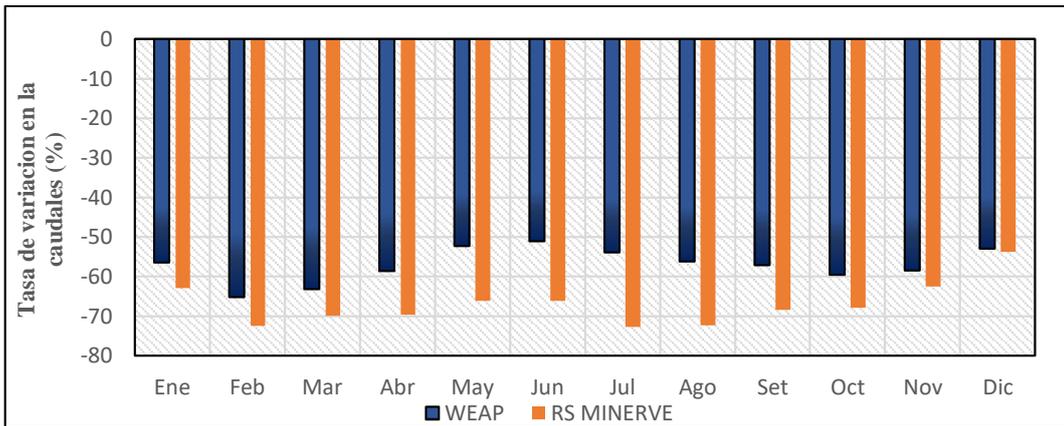


Figura 165: Variación de los caudales en un futuro lejano, CNRM-CM5-RCP4.5

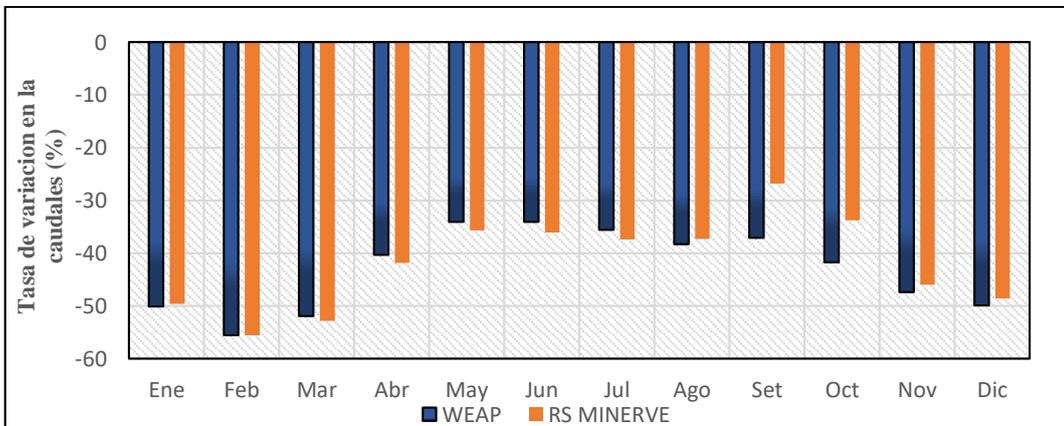


Figura 166: Variación de los caudales en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP4.5

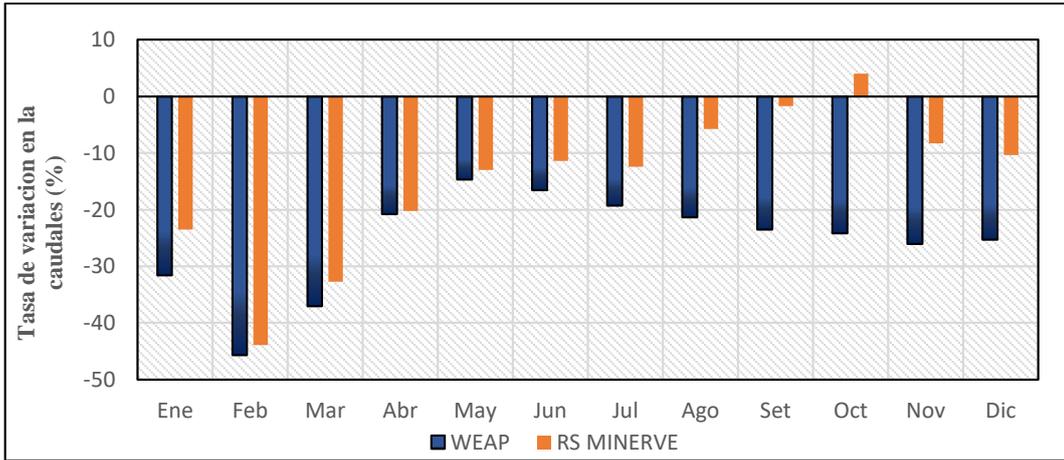


Figura 167: Variación de los caudales en un futuro lejano, MPI-ESM-MR-RCP8.5