



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OFERTA HÍDRICA

SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RÍO ILAVE - PUNO

TESIS

PRESENTADA POR:

JORGE WASHINGTON LAURA SANTOS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2019



DEDICATORIA

A Dios, por su compañía y fortaleza en cada etapa de mi vida y no permitirme desfallecer en el logro de mis sueños.

A mis padres: Edwin y Ninfa, por ser los principales promotores en el logro de mis sueños y metas, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

A mi hermana Sandra por su cariño y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mis abuelos Vicente, Fermina, Nicolas y Maria, por sus sabios consejos y consentimiento.

Jorge Laura



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Agrícola por acogerme en sus aulas durante mi proceso de formación profesional.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola, por impartir sus enseñanzas y experiencias que me hicieron crecer profesionalmente.

Un agradecimiento especial a toda mi familia, por haber creído en mí, por sus consejos y palabras de aliento en su debido momento.

A mis grandes amigos y colegas, quienes me brindaron su dedicación y con quienes compartí diferentes experiencias dentro y fuera de las aulas, en especial a Jhon Wilbert, por su aliento en el proceso de redacción de la tesis.

A mis miembros del jurado por sus críticas, que contribuyeron en la mejora de la redacción de tesis. En particular a mi asesor M.Sc. Ricardo Luis, por su tiempo y profesionalismo en la ejecución de tesis.

Jorge Laura



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN14

ABSTRACT.....15

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES.....16

1.2. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA17

1.3. ANTECEDENTES18

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....20

1.5. OBJETIVOS21

1.5.1. Objetivo general.....21

1.5.2. Objetivos específicos.....21

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. HIDROLOGÍA22

2.2. CICLO HIDROLÓGICO.....22

2.3. OFERTA HÍDRICA24

2.4. MODELOS HIDROLÓGICOS.....24

2.4.1. Clasificación de modelos hidrológicos.....25

2.4.1.1. Modelos físicos25

2.4.1.2. Modelos analógicos25

2.4.1.3. Modelos matemáticos26

2.4.2. Clasificación de acuerdo al nivel de desagregación espacial.26

2.4.2.1. Modelos agregados.....26

2.4.2.2. Modelos distribuidos.26



2.5. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN.....	27
2.6. INDICADORES ESTADÍSTICOS DE EFICIENCIA	27
2.6.1. Coeficiente de Nash-Sutcliffe	27
2.6.2. Coeficiente de Nash para valores logarítmicos.....	28
2.6.3. Coeficiente de correlación de Pearson (r)	28
2.6.4. Raíz del error cuadrático medio relativo (RRMSE).....	29
2.6.5. Volumen relativo del sesgo (RVB).....	29
2.7. SISTEMA INFORMÁTICO DE RS MINERVE.....	30
2.7.1. Modelo SAC-SMA.....	31
2.7.1.1. Formulación matemática	33
2.8. CAMBIO CLIMÁTICO	39
2.9. MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES	41
2.10. DOWNSCALING CLIMÁTICO	43
2.10.1. Downscaling dinámico	44
2.10.2. Downscaling estadístico	45
2.11. ESCENARIO CLIMÁTICO	45
2.12. CORRECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS	
VARIABLES.....	46
2.13. INCERTIDUMBRE DE LOS ESCENARIOS	47
2.14. DATOS GRILLADOS PISCO	47
2.14.1. Precipitación (PISCOp v2.1)	48
2.14.2. Temperatura (PISCOt v1.1).....	48

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	49
3.1.1. Ubicación política.	49
3.1.2. Ubicación geográfica.....	49
3.1.3. Ubicación hidrográfica	49
3.1.4. Límites hidrográficos	50
3.2. MATERIALES	51
3.2.1. Información geográfica	51
3.2.2. Información climática	51
3.2.3. Información hidrométrica.....	54



3.2.4. Programas de computo	55
3.2.5. Equipos de computo.....	55
3.3. METODOLOGÍA	56
3.3.1. Calibración y validación del modelo hidrológico SAC-SMA.....	56
3.3.1.1. Series de precipitación.....	56
3.3.1.2. Series de temperatura.....	57
3.3.1.3. Series de evapotranspiración.....	57
3.3.1.4. Serie de caudales observados	58
3.3.1.5. Modelo SAC – SMA	58
3.3.1.6. Calibración y validación del modelo.....	60
3.3.2. Escalamiento espacial, selección de GCM y corrección de sesgo.....	61
3.3.2.1. Descargas de GCMs	62
3.3.2.2. Escalamiento espacial.....	62
3.3.2.3. Selección de GCMs	63
3.3.2.4. Escalamiento temporal	64
3.3.2.5. Corrección de variables de precipitación y temperatura	64
3.3.3. Proyección y análisis de la variación de la oferta hídrica superficial bajo escenarios de cambio climático.	65

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SAC- SMA.....	66
4.1.1. Análisis exploratorio de datos.....	66
4.1.2. Análisis de sensibilidad de parámetros	68
4.1.3. Calibración y validación.....	71
4.2. ESCALAMIENTO ESPACIAL, SELECCIÓN DE GCM Y CORRECCIÓN DE SESGO.	73
4.2.1. Escalamiento espacial	73
4.2.2. Selección de GCMs.....	74
4.2.3. Escalamiento temporal	77
4.2.4. Corrección de variables de precipitación y temperatura	78
4.2.5. Comportamiento futuro de la precipitación y temperatura.....	79



4.3. PROYECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	86
4.3.1. Proyección de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático.....	86
4.3.2. Análisis de la variación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático	87
4.3.2.1. Variación promedio anual.....	87
4.3.2.2. Variación promedio estacional.....	89
4.3.2.3. Variación promedio mensual	90
V. CONCLUSIONES	93
VI. RECOMENDACIONES	94
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS.....	101
Anexo A: Código en “R Studio” para procesar archivos netCDF de GCMs	101
Anexo B: Resultados del escalamiento espacial de variables de precipitación.....	107
Anexo C: Resultados del escalamiento espacial de variables de temperatura	116
Anexo D: Análisis estadístico de las variables de precipitación y temperatura obtenidos de los GCMs.	119
Anexo E: Registro de caudales históricos registrados en la estación hidrométrica Puente Ilave.	122

Área: Ingeniería y Tecnología

Línea: Recursos Hídricos

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 12 de noviembre 2019



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del ciclo hidrológico.....	23
Figura 2: Clasificación de los tipos de modelos en hidrología.....	25
Figura 3: Modelo conceptual del SAC-SMA	32
Figura 4: Cambios observados en el mundo para la temperatura superficial, nivel del mar y extensión de hielo marino.....	40
Figura 5: Características principales de los modelos que participan en el CMIP5.....	42
Figura 6: Evolución de la capacidad de los modelos climáticos globales.	43
Figura 7: Downscaling espacial.....	44
Figura 8: Forzamiento radiativo total para RCPs.	46
Figura 9: Mapa de ubicación de la cuenca del río Ilave.....	50
Figura 10: Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométrica en la cuenca del río Ilave.....	52
Figura 11: Variación de la precipitación promedio mensual en las estaciones de la cuenca del río Ilave, de enero de 1981 a diciembre de 2016.....	53
Figura 12: Variación de la temperatura promedio mensual en las estaciones de la cuenca del río Ilave, de enero de 1981 a diciembre de 2016.....	53
Figura 13: Variación de la temperatura promedio mensual en las estaciones de la cuenca del río Ilave, de enero de 1981 a diciembre de 2016.....	54
Figura 14: Hidrograma de descargas medias diarias histórica del río Ilave.....	55
Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología empleada en la investigación.....	56
Figura 16: Divisoria de sub cuencas para el área de estudio	59
Figura 17: Adecuación de la cuenca Ilave en el entorno RS MINERVE.	60
Figura 18: Metodología de escalamiento espacial para obtener datos para un punto de interés por el método de interpolación IDW, los recuadros delimitados por líneas negras representan la grilla de los GCMs y el triángulo verde la estación de interés.	63
Figura 19: Índices anuales del vector regional y de las estaciones meteorológicas consideradas en la cuenca del río Ilave (Brunet Moret).....	66
Figura 20: Suma de los índices del vector regional y de las estaciones pluviométricas.....	67
Figura 21: Análisis de sensibilidad del modelo SAC-SMA (a).....	68
Figura 22: Análisis de sensibilidad del modelo SAC-SMA (b).	69



Figura 23: Análisis de sensibilidad del modelo SAC-SMA (c).....	69
Figura 24: Caudales medios diarios observados y simulados, etapa de calibración.....	71
Figura 25: Caudales medios diarios observados y simulados, etapa de validación.....	73
Figura 26: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Ilave.....	74
Figura 27: Curva de variación estacional para la temperatura de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Ilave.....	74
Figura 28: Generación de funciones de transferencia de precipitación para la estación Ilave (b).	78
Figura 29: Ajuste probabilísticos de la precipitación y temperatura mensual de los datos observados y simulados por el CESM1-BGC en la estación Ilave....	79
Figura 30: Precipitación mensual observada y proyectada promedio para el escenario RCP 4.5.	81
Figura 31: Precipitación mensual observada y proyectada promedio para el escenario RCP 8.5.	83
Figura 32: Temperatura mensual observada y proyectada promedio para el escenario RCP 4.5.	84
Figura 33: Temperatura mensual observada y proyectada promedio para el escenario RCP 8.5.	85
Figura 34: Variación anual y mensual del caudal en la cuenca Ilave bajo escenarios de cambio climático.....	87
Figura 35: Hidrogramas de caudal promedio mensual de escenario presente, histórico y futuro cercano.	91
Figura 36: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Capaso.	107
Figura 37: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Capaso.	108
Figura 38: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Ilave.....	109
Figura 39: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Laraquery...	110
Figura 40: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Mazocruz. ...	111



Figura 41: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Puno.	112
Figura 42: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Rincon de la Cruz.	113
Figura 43: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Coypa Coypa.	114
Figura 44: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Chilligua. ...	115
Figura 45: Curva de variación estacional para la temperatura de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Ilave.	116
Figura 46: Curva de variación estacional para la temperatura de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Laraquery.	117
Figura 47: Curva de variación estacional para la temperatura de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Mazocruz.	118



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores referenciales del Coeficiente de Nash-Sutcliffe.	28
Tabla 2: Indicadores estadísticos de eficiencia.....	30
Tabla 3: Rangos y parámetros del modelo SAC-SMA	32
Tabla 4: Parámetros iniciales del modelo SAC-SMA.....	33
Tabla 5: Ubicación política de la cuenca del río Ilave	49
Tabla 6: Ubicación geográfica de la cuenca del río Ilave	49
Tabla 7: Ubicación hidrográfica de la cuenca del río Ilave.....	50
Tabla 8: Límites hidrográficos de la cuenca del río Ilave	50
Tabla 9: Datos de información geográfica	51
Tabla 10: Ubicación de las estaciones meteorológicas de la cuenca del río Ilave.....	51
Tabla 11: Estación hidrométrica puente carretera Ilave.....	54
Tabla 12: Software Utilizados en la Investigación.	55
Tabla 13: Parámetros de las sub cuencas de la cuenca Ilave.....	59
Tabla 14: Parámetros de análisis para la evaluación de homogeneidad.....	67
Tabla 15: Variación de los parámetros del modelo SAC-SMA.....	70
Tabla 16: Indicadores estadísticos de calibración SAC-SMA.....	71
Tabla 17: Parámetros calibrados del modelo SAC-SMA.....	72
Tabla 18: Indicadores estadísticos de validación SAC-SMA.....	73
Tabla 19: Análisis estadístico de las variables de precipitación y temperatura de los resultados de los GCMs para la estación Ilave.	75
Tabla 20: Resumen del análisis estadístico de los GCMs que obtuvieron mejor desempeño para la estaciones de la cuenca del rio Ilave.....	76
Tabla 21: Variación porcentual de la precipitación promedio mensual al futuro cercano y lejano, RCP 4.5.	80
Tabla 22: Variación porcentual de la precipitación promedio mensual al futuro cercano y lejano, RCP 8.5.	82
Tabla 23: Variación de la temperatura (°C) promedio mensual al futuro cercano y lejano, RCP 4.5.....	83
Tabla 24: Variación de la temperatura (°C) promedio mensual al futuro cercano y lejano, RCP 8.5.....	84
Tabla 25: Variación porcentual de caudal promedio anual a futuro cercano y futuro lejano.....	88



Tabla 26: Caudal promedio anual histórico a futuro cercano y a futuro lejano.....	88
Tabla 27: Variación porcentual de caudal promedio estacional a futuros cercano y futuro lejano.....	89
Tabla 28: Caudal promedio estacional histórico a futuro cercano y a futuro lejano en la estación hidrométrica puente Sánchez Cerro.....	89
Tabla 29: Variación porcentual de caudal promedio mensual a futuro cercano y futuro lejano.....	90
Tabla 30: Caudal promedio mensual histórico, presente, a futuro cercano y a futuro lejano en la estación hidrométrica puente Ilave.....	90



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

AAA: Autoridad Administrativa del Agua

ALA: Administración Local de Agua

ALT: Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Lago Titicaca, río Desaguadero, Lago Poopó, Salar de Coipasa.

AOGCMs: Modelos de Circulación General Atmosfera-Océano.

CESM1-BGC: Modelo de Sistema Terrestre Comunitario versión 1 – Biogeoquímico.

DEM: Modelo de Elevación Digital.

ESMs: Modelos de Sistema Terrestre.

GEI: Gases de efecto invernadero.

GCMs: Modelos Climáticos Globales

IDW: Interpolación de Inversa a la Distancia.

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

MINAM: Ministerio del Ambiente.

MVR: Método de Vector Regional.

NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio.

PISCO: Datos Peruanos Interpolados de las Observaciones Climatológicas e Hidrológicas del SENAMHI.

RCP: Vías Representativas de Concentración.

SAC-SMA: Sacramento Soil Moisture Accounting

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

TDPS: Titicaca, Desaguadero, Poopó, Salar de Coipasa.



RESUMEN

El incremento de la temperatura global viene alterando el ciclo hidrológico. Los efectos se reflejarán en la variación de los componentes del balance hidrológico. La investigación se limitó en evaluar la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Ilave mediante Modelos Climático Globales (GCMs). No obstante, para proyectarse al futuro es necesario entender el presente. Por ello se representó los caudales a escala diaria mediante el modelo hidrológico SAC-SMA en tres periodos de tiempo: histórico (1975 – 2005), presente (1991 – 2016) y futuro (2020 - 2100). El modelo fue calibrado y validado dentro del periodo presente obteniendo valores de Nash-Sutcliffe de 0.86 y 0.82, respectivamente. Para representar el clima futuro se evaluó 21 GCMs de la base de datos NEX-GDDP de la NASA en función de cuan bien representen las estadísticas de precipitación y temperatura actual (1981 – 2005). El modelo CESM1-BGC obtuvo los más altos indicadores en el análisis gráfico y los estadísticos de coeficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE). Para corregir los errores sistemáticos del CESM1-BGC se generó funciones de transferencia mensual para cada estación de la cuenca. Se simularon dos Trayectorias Representativas de Concentración (RCP4.5 y RCP8.5) tanto para el futuro cercano (2020-2050) y futuro lejano (2070-2100). La oferta hídrica anual respecto al periodo histórico disminuiría en menos 3% hasta menos 24% a excepción del futuro lejano del RCP 8.5, donde se presentaría un incremento (58%). A nivel mensual, las mayores variaciones se manifestarían en febrero (-8%), marzo (23%), abril (30%) y noviembre (-18%). A nivel de estaciones, tendríamos incremento en otoño (82%) y disminución en invierno (-2%). Finalmente, los hidrogramas mensuales muestra un desplazamiento de los máximos caudales registrados (febrero) hacia el mes de marzo. Para el futuro cercano podemos aseverar un escenario con disminución de caudales, mientras el futuro lejano es aún incierto.

Palabras clave: Cambio Climático, Hidrología, Ilave, Oferta Hídrica, SAC-SMA.



ABSTRACT

The increase in global temperature has been altering the hydrological cycle. The effects will be reflected in the variation of the components of the hydrological balance. The research was limited to evaluating the surface water supply of the Ilave river catchment using Global Climate Models (GCMs). However, to project into the future it is necessary to understand the present. For this reason, flows were represented on a daily scale using the SAC-SMA hydrological model in three time periods: historical (1975 - 2005), present (1991 - 2016) and future (2020 - 2100). The model was calibrated and validated within the present period, obtaining Nash-Sutcliffe values of 0.86 and 0.82, respectively. To represent future climate, 21 GCMs were evaluated from NASA's NEX-GDDP database based on how well they represent current precipitation and temperature statistics (1981-2005). The CESM1-BGC model obtained the highest indicators in the graphic analysis and the coefficient of determination (R^2) and Root Mean Square Error (RMSE) statistics. To correct the systematic errors of the CESM1-BGC, monthly transfer functions were generated for each station in the catchment. Two Representative Concentration Pathways (RCP4.5 and RCP8.5) were simulated for both the near future (2020-2050) and the distant future (2070-2100). The annual water supply with respect to the historical period would decrease by minus 3% to minus 24% with the exception of the distant future of RCP 8.5, where there would be an increase (58%). On a monthly level, the greatest variations would appear in February (-8%), March (23%), April (30%) and November (-18%). At the station level, we would have an increase in autumn (82%) and decrease in winter (-2%). Finally, the monthly hydrographs show a displacement of the maximum flows registered (February) towards the month of March. For the near future we can assert a scenario with decreased flows, while the distant future is still uncertain.

Keywords: Climate Change, Hydrology, Ilave, Water Supply, SAC-SMA.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

El calentamiento global es un fenómeno que desde la década de 1950 se ha acrecentado considerablemente y los efectos se ven reflejado en los diversos componentes del sistema terrestre. “La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado” (IPCC, 2013b, p. 4). Por ello la comunidad científica desde la primera década del siglo XXI ha realizado numerosos esfuerzos para poder caracterizar estos cambios y predecir posibles escenarios futuros.

El principal órgano internacional para la evaluación del cambio climático es el Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC), quienes periódicamente emiten sus resultados mediante informes de evaluación (AR por sus siglas en inglés). Hasta el momento se han emitido cinco informes desde su creación (FAR, SAR, TAR, AR4 y AR5) (IPCC, 2014). Para el clima futuro el AR5 utiliza las vías o trayectorias representativas de concentración (RCP2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5) (Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012), cuyas proyecciones simulan los posibles escenarios de concentración de los gases de efecto invernadero a través del tiempo y se diferencian por la magnitud que alcanzaría la forzante radiativa para finales del siglo XXI (Meinshausen et al., 2011). Estos escenarios han sido la base para el desarrollo de Modelos climáticos Globales.

El encargado de esta labor es el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), que actualmente se encuentra en la fase 5 (CMIP 5). Los modelos que se evalúan son Modelos de Sistema Terrestre (ESMs) o Modelos de Circulación General Atmósfera – Océano (AOGCMs). La información que proporciona su base de datos, presenta diferente resolución de grilla para cada modelo y en general son muy gruesas (2° en promedio) (Taylor et al., 2012). Esta información es ideal para evaluaciones a nivel regional, mas no para una escala local (cuenca). Para ello es necesario hacer una reducción de escala, no obstante, esta labor implica gran capacidad computacional y un conocimiento especializado del tema, siendo una de las principales limitaciones para su aplicación.



Por ello con el fin de ayudar a la comunidad científica en la conducción de estudios de impacto del cambio climático a escala local (cuenca); la plataforma de Intercambio Terrestre de Proyecciones Globales Diarias Reducidas (NEX-GDDP) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) realizó un proceso de escalamiento de grilla más fina (0.25°) de 21 modelos del CMIP5 y dos escenarios futuros (RCP 4.5 y RCP 8.5) (Thrasher & Nemani, 2015). Las variables disponibles son precipitación, temperatura máxima y mínima a escala diaria, para el periodo histórico (1970-2005) y futuro hasta finales del siglo XXI. Esta información es valiosa sobre todo para cuencas del altiplano donde los datos y evidencia científica sobre cambio climático es limitado.

Entendiendo la importancia del recurso hídrico en la cuenca Ilave y teniendo las herramientas y datos disponibles de los GCMs, la presente investigación está enfocada en el entendimiento de los posibles efectos que tendrían el cambio climático en la oferta hídrica superficial a diferentes escalas de tiempo (anual, estacional, y mensual), tanto para el futuro cercano (2020-2050) y lejano (2070-2100) en base dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5).

1.2. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Una de las principales evidencias del efecto del cambio climático es el incremento de la temperatura global (Palomino, 2015, p. 9). Esto representa una amenaza en especial para los cuerpos sólidos de agua. En el Perú, según el Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAM) en los últimos 22 a 35 años se ha perdido el 22 % de la superficie glaciar y se proyecta que para el 2025 los glaciares debajo de los 5 500 m.s.n.m. desaparezcan (Vargas, 2009). Este efecto se viene dando en todo los glaciares del planeta ya sea en mayor o menor medida (Cepeda, 2017); siendo un claro indicador que el clima está evolucionando (Thompson, 2014). Por otro lado la evapotranspiración ha incrementado y consecuentemente el contenido de vapor de agua atmosférico se ha alterado, causando cambios en los patrones de precipitación a gran escala y la frecuencia de eventos extremos (Buytaert & Bievre, 2012).

La cuenca del río Ilave ha sido escenario de numerosos eventos extremos, como lo suscitado en los años 1964 – 1967, 1969 – 1971, 1979 – 1980, 1982 – 1983, 1987 – 1992 y 2003 – 2005, donde la población específicamente rural, sufrió los estragos de la



escasez de precipitaciones y en épocas donde las precipitaciones han sido intensas, han ocasionado inundaciones como lo sucedido en el 2001, dejando como saldo “1290 personas damnificadas, 100 viviendas destruidas, 15 centros educativos afectados y un total de 1438 hectáreas de cultivos destruidos (Neyra, Ugas, & Zegarra, 2009). Entonces si estos fenómenos presentados están asociado al cambio climático, conlleva a preguntarse ¿Cuánto afectaría el cambio climático en la oferta hídrica superficial de la cuenca Ilave en el futuro?

1.3. ANTECEDENTES

A nivel mundial, según el IPCC (2013b), la temperatura de la superficie terrestre y oceánica, combinada y promediada globalmente, muestra un calentamiento de 0.85°C (1880 - 2012) y todos los escenarios futuros (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5), prevén que para fines del siglo XXI excederían 1.5°C; excepto el RCP2.6. Estos cambios tendrían una incidencia diferente en cada región y con importantes incertidumbres en los impactos hidrológicos a escala local. En general apuntan a condiciones más húmedas, con mayores caudales en los ríos, lluvias intensas más largos, particularmente en el sur y el este de Asia, mientras que en África y América del Sur, se prevé sequías más largas, y en la amazonia se presentaría una disminución hasta en 25 % de su caudal (Betts et al., 2018).

A nivel de Sudamérica, según Kitoh et al. (2011), para finales del siglo XXI, la escorrentía y caudal de los ríos presentarían una disminución en la mayoría de regiones producto del incremento de la temperatura y niveles altos de evapotranspiración, aun cuando las precipitaciones incrementen. Esto se respalda en los cambios que se han presentado en el periodo histórico, donde según Yates (1997) existe un incremento consistente en las regiones del noreste y sur. No obstante, hay autores como Marengo (1995) quienes afirman que no hay una tendencia clara o cambio en el caudal promedio de los ríos sudamericanos producto del cambio climático. Es natural que no todas las investigaciones coincidan en los resultados, por muchos factores, como son los modelos con los que fueron evaluados, serie de datos, las herramientas disponibles a la fecha, entre otros. Por ello es sumamente importante continuar con el desarrollo de más investigaciones, con nuevas herramientas disponibles en la actualidad que nos permitan reducir esta incertidumbre.



A nivel de Perú; en el año 2010, en la Segunda Comunicación Nacional del Perú se presentó un resumen de los resultados de las proyecciones del clima realizadas en el país para las cuencas de los ríos Mantaro, Mayo, Piura, Santa y Urubamba. Desde esa fecha, el SENAMHI ha continuado su labor como ente competente construyendo escenarios climáticos tanto a nivel nacional, regional como por cuencas, con el apoyo de otras entidades y la cooperación internacional. Durante el periodo 2010-2015, en el ámbito nacional destaca el estudio de Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en el Perú, a través del cual se obtuvieron proyecciones climáticas locales de las variables de precipitación, temperaturas máximas y mínimas hacia el año 2050. Mientras tanto, en el ámbito regional, se realizaron proyecciones para las regiones de Áncash, Apurímac, Cusco, Huancavelica, Huánuco, Ica, Moquegua, Puno, San Martín, Tacna y Ucayali; y a nivel de cuencas, para los ríos de Ica, Mantaro, Pisco, Santo Tomás y Urubamba (MINAM, 2016).

Para dicho estudio se usaron los escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5 y los modelos climáticos globales CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR; por lo que se logró obtener hasta seis proyecciones posibles (3x2 ESM RCP), para el periodo 2036-2065. Cuyos resultados sobre la precipitación predicen incrementos entre 10 % y 20 %, mientras que para la temperatura máxima y mínima varían entre 2 °C y 3 °C, y 4 °C y 6 °C, respectivamente. En cuanto a disponibilidad hídrica, en los ríos de la costa se presentaría un incremento significativo de hasta en más del 300 % de su escurrimiento potencial, mientras que, en los ríos de la sierra y la selva los promedios de escurrimiento disminuirían hasta en -52 % en el promedio anual (MINAM, 2016).

A nivel regional; en el altiplano, según Felipe, Sánchez y Astorayme (2015), el impacto potencial del cambio climático se haría sentir en la disminución de la disponibilidad de agua hasta en 28% para el año 2050, sobre todo en las cuencas de Ramis, Coata, Huancané e Ilave. En cuanto a la temperatura anual máxima y mínima se prevé incrementos de hasta 3.4 °C y 4.1 °C, respectivamente. En el mismo sentido la evapotranspiración potencial alcanzaría hasta un 16% de incremento anual.

A nivel local; en el periodo histórico de la cuenca del río Ilave de 51 años (1964-2014), la temperatura incremento a una tasa de 0.11°C por década, con tendencia de llegar a 2 °C para el año 2050 en la zona alta; por el contrario la precipitación disminuiría a razón de 40 mm/año en la parte alta e incrementaría en la parte baja en 185 mm/año



(Aguilar, 2017; Noa, 2016). En cuanto a la oferta hídrica; para el 2030, un incremento de la temperatura en 2°C conllevaría a variaciones en los meses de febrero (-42%) y octubre (-27%) (Ticona, 2016) y para finales del siglo XXI, los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 proyectan una disminución anual de -48% y -24%, respectivamente (Lujano, Hidalgo, Tapia, & Lujano, 2016).

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La cuenca del río Ilave es el segundo tributario con mayor aporte de la vertiente del Titicaca y se caracteriza por ser una zona de producción agrícola, pecuaria y piscícola (Swinton & Quiroz, 2003). Alberga a cuatro provincias y doce distritos del departamento de Puno. En esta cuenca el agua superficial juega un rol importante como: (a) el mantenimiento de humedales andinos ya sea de manera natural o con infraestructura de riego (rústico); los cuales son de vital importancia para especies endémicas de alto valor bioecológico y son fuentes de sustento económico para familias dedicadas al pastoreo de alpacas, llamas y más recientemente ovejas (Fonkén, 2015; Verzijl & Quispe, 2013), (b) el suministro de agua potable, tal como el distrito de Ilave con una población de 57,905 habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú, 2015) y (c) actividades productivas (piscícolas e industrial). Los usos descritos están regulados por el marco normativo nacional (Ley de Recursos Hídricos) y limitado por el Plan Director Binacional Perú – Bolivia. No obstante, estas herramientas disponibles han demostrado que no están adecuadas para garantizar la seguridad hídrica y los derechos fundamentales de los ciudadanos en un contexto de escenarios de escases del recurso hídrico como consecuencia del cambio climático.

El Plan Director Binacional firmado entre Perú y Bolivia, establece que el caudal máximo aprovechable en la vertiente del Titicaca es apenas de 20 a 25 m³/s, del cual ambos países exigieron una distribución técnica y equitativa del agua de tal manera que el aprovechamiento de este recurso garantice unos niveles de operación aceptables, tanto desde el punto de vista ambiental como hidráulico (Rast & Rodgers, 1996). Es decir, el estado peruano sólo administra un caudal máximo de 12.5 m³/s. Este límite se ve amenazado por la creciente demanda de agua (poblacional y agrícola principalmente). De acuerdo al Registro Administrativo de los Derechos de Uso de Agua de la Autoridad Administrativa del Agua Titicaca, al 2016 se han superado los 10 m³/s. A nivel de la cuenca Ilave, de acuerdo a la Resolución Directoral N° 425-2019-ANA-AAA.TIT, en dos



subsectores hidráulicos (Conduriri y Mazocruz), las demandas llegaron a ser igual a la disponibilidad hídrica en los meses de agosto a noviembre; es decir, ya no hay agua para atender nuevas demandas. A todo ello se debe tener en cuenta que hay una brecha importante para lograr la formalización de todos los usos de agua en la cuenca; y de los formales, el 95% de los titulares de derechos otorgados no cuentan con instrumentos ni equipos de medición para monitorear el caudal que vienen usando.

Ante este contexto, es necesario entender el comportamiento de la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Ilave en condiciones de cambio climático para una gestión sostenible. Para lo cual una de las herramientas más importantes para el análisis de estos procesos en la actualidad, son los GCMs, por su capacidad de simular la dinámica del sistema climático e investigar las causas del cambio y predecir sus efectos (Gutiérrez & Pons, 2006). Es una labor compleja y las proyecciones climáticas no son fáciles de incorporar en los estudios hidrológicos debido a su baja resolución espacial y la marcada diferencia que existen entre los GCMs (Santos, 2016). Sin embargo, aunque sean imperfectos, son las únicas herramientas eficaces que representan el complejo conjunto de procesos que producirán el cambio climático en el futuro (Ardoin-Bardin et al., 2009).

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del cambio climático en la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Ilave.

1.5.2. Objetivos específicos

- Calibrar y validar el modelo hidrológico SAC-SMA en la cuenca del río Ilave, en el periodo presente (1991-2016).
- Realizar la reducción de escala espacial, selección del GCM y corrección de sesgo de las variables climáticas.
- Analizar la variación de la oferta hídrica superficial de la cuenca Ilave bajo escenarios de cambio climático del futuro cercano (2020 – 2050) y lejano (2070-2100).

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. HIDROLOGÍA

Según Balairon (2009) la hidrología se basa en el estudio del ciclo hidrológico, que, como es sabido se resume en un proceso de evaporación de las aguas, principalmente de los mares para formar las nubes, seguido de otro proceso de precipitación (nieve, lluvia, granizo, etc.) a partir del cual el agua puede correr por la superficie de la tierra hasta alcanzar cauces de torrentes y ríos para llegar al mar, o infiltrarse en el terreno y retornar a la superficie en forma de manantiales, o profundizar y tener recorridos subterráneos, para finalmente llegar al mar, cerrándose el ciclo.

Las ciencias hídricas están relacionadas con las aguas de la tierra; su distribución y circulación, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el ambiente y con los seres vivos y en particular con los seres humanos. Puede considerarse que la hidrología abarca todas las ciencias hídricas. En una forma más estricta, puede definirse como el estudio del ciclo hidrológico, es decir, la circulación ininterrumpida de agua entre la tierra y la atmosfera (Chow, Maidment, & Mays, 1994, p. 1).

2.2. CICLO HIDROLÓGICO

La definición del ciclo hidrológico puede presentar leves variaciones en la literatura científica. No obstante, el principio es el mismo tal como Fattorelli y Fernández (2011) afirman “El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida” (p. 18).

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se les entienda en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema. Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que conforman un todo (Chow et al., 1994). En la Figura 1, se presenta una representación esquemática de ciclo hidrológico.

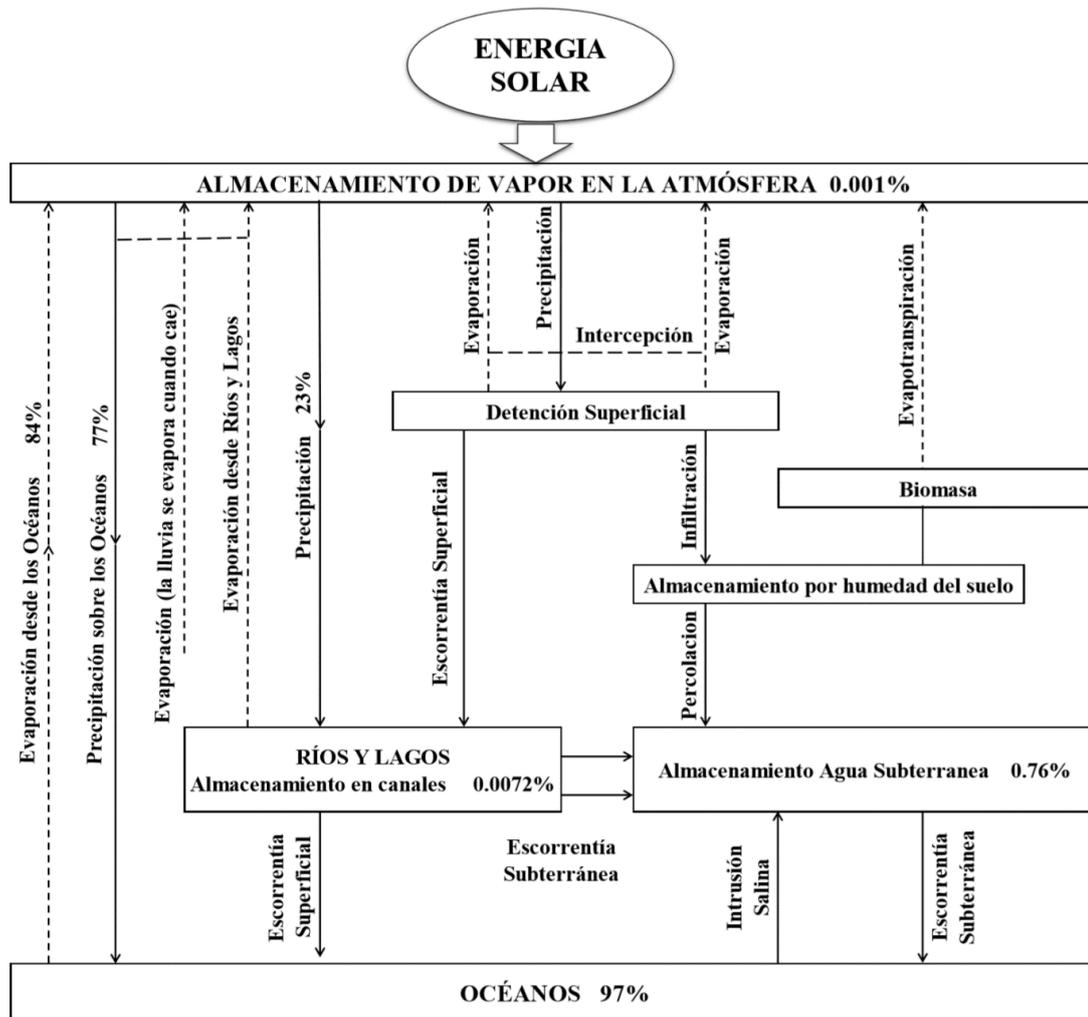


Figura 1: Esquema del ciclo hidrológico

Fuente: Diseño hidrológico (Fattorelli & Fernández, 2011)

La radiación solar, provoca la evaporación constante del agua, que pasa a la atmósfera para volver a la tierra en forma de lluvia, nieve o granizo. Parte de esa precipitación se evapora rápidamente y vuelve otra vez a la atmósfera. Otra parte del agua que se precipita periódicamente fluye a través de la superficie de las cuencas formando arroyos y ríos para iniciar su viaje de retorno al mar. En su tránsito, forman lagos y lagunas o se deposita en almacenamientos artificiales formados por represas y diques. Otra parte del agua que llega a la superficie terrestre en forma de lluvia, se deposita en el suelo donde se convierte en humedad o en almacenamientos subterráneos denominados acuíferos. En condiciones normales, las aguas subterráneas se abren camino gradualmente hacia la superficie y brotan en forma de manantiales para volver a unirse a las aguas superficiales y engrosar los caudales de los ríos. Las plantas y la vegetación, incorporan en sus tejidos parte de la humedad del suelo y de las aguas subterráneas y luego, una parte



se desprende de ellas por transpiración para pasar a integrarse nuevamente a la atmósfera. Este es un ciclo natural que se repite intermitentemente (Aliaga, 2017, p. 10).

2.3. OFERTA HÍDRICA

Es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar. Se basa fundamentalmente en la ecuación del balance hídrico, que es la aplicación del principio de conservación de masas (García et al., 1999, p. 11). Su estimación y variabilidad puede obtenerse por medio de múltiples observaciones in situ o por medio de modelos hidrológicos calibrados.

2.4. MODELOS HIDROLÓGICOS

Un modelo hidrológico puede definirse como una representación matemática del ciclo del agua sobre una determinada porción del territorio, con la finalidad de realizar transformaciones lluvia – escorrentía. Buscan simplificar la complejidad del mundo real por medio de una selección de los aspectos fundamentales que determinan el funcionamiento del sistema hidrológico modelado, de forma que generalmente cuantas más simplificaciones supone un modelo, menos precisos serán sus resultados. Un sistema hidrológico engloba el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que actúan sobre unas variables de entrada convirtiéndolas en otras variables de salida (Clarke, 1973).

Sirven para simular diversas situaciones o extender la información existente, después de ser calibrados y validados. Además, son de gran importancia en el manejo de cuencas ya que se puede simular la respuesta de la cuenca ante cambios en el uso de la tierra, cambio climático y prácticas de conservación de suelos dentro de las cuencas (Rojas, 2009).

Por otro lado, si bien es cierto, la capacidad computacional cada vez permite mejorar los procesos de cálculo y las consideraciones para una modelación con mayor exactitud y realidad; un modelo nunca estará exento de errores y, por lo tanto, no debe ser tomado como un remplazo directo de la realidad. Se emplaza a tomar conciencia en

la necesidad por la medición de las variables hidrológicas en campo y la instalación de nuevas estaciones hidrológicas, y aún más frente a un contexto de cambio climático (Astorayme et al., 2015, p. 123).

2.4.1. Clasificación de modelos hidrológicos.

Existen diversas clasificaciones de acuerdo a las variables y componentes que describen al ciclo hidrológico. Pero en general pueden ser clasificados como modelos agrupados y distribuidos, basado en los parámetros del modelo en función del espacio y tiempo; y modelos determinísticos y estocásticos, teniendo en cuenta otros criterios (Devi, Ganasri, & Dwarakish, 2015).

Según la Organización Meteorológica Mundial, los modelos hidrológicos pueden dividirse en tres grupos, como se muestra en la Figura 2.

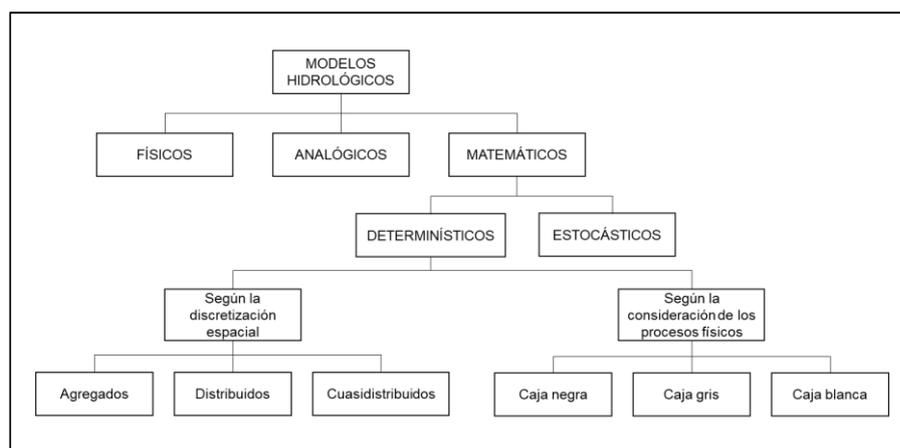


Figura 2: Clasificación de los tipos de modelos en hidrología

Fuente: La utilización de modelos en hidrología (Fernández, Vela, & Castaño, 1997)

2.4.1.1. Modelos físicos

Son representaciones reducidas en escala, que buscan representar el mundo real. Las más comunes aplicaciones de los modelos físicos, son las simulaciones de flujos en canales y obras hidráulicas (Chow et al., 1994).

2.4.1.2. Modelos analógicos

Representan el flujo del agua, mediante otro sistema físico con propiedades similares a las del prototipo. Un modelo de este tipo es el Hele-Shaw, donde usa el movimiento de un fluido viscoso entre dos placas paralelas muy cercanas para modelar el flujo a través de un acuífero o terraplén (Chow et al., 1994).

2.4.1.3. Modelos matemáticos

Se refiere a un conjunto de ecuaciones que representan la respuesta de un componente del sistema hidrológico ante la variabilidad de las condiciones meteorológicas. Un modelo matemático no es un remplazo de las observaciones de campo, su valor reside en la elección y ajuste correcto de expresiones matemáticas para estimar la información hidrológica. Por lo tanto, un modelo matemático debe entenderse como una simplificación de un sistema complejo gobernado por un conjunto de ecuaciones (Clarke, 1973).

El tipo de modelos a desarrollar, depende del tipo de proceso que deseemos modelar (Fernández et al., 1997), ya sea modelos estocásticos o determinísticos. Este último a su vez se puede dividir, según la discretización espacial.

2.4.2. Clasificación de acuerdo al nivel de desagregación espacial.

Los modelos hidrológicos pueden ser estructurados para representar procesos o parámetros de forma espacial promediada, tales son los modelos agregados o alternativamente, de una forma espacial desagregada tales como modelos distribuidos.

2.4.2.1. Modelos agregados.

Un modelo es agregado cuando considera a la cuenca como una unidad simple. De esta forma, un modelo agregado no considera características de variación espacial de respuesta hidrológica, variaciones tales como: las climáticas, de suelos, pendientes y/o cambios de la cubierta vegetal dentro de la cuenca (Astorayme, 2017, p. 9). Esto implica la asunción de linealidad de la respuesta hidrológica.

2.4.2.2. Modelos distribuidos.

En un modelo distribuido, el carácter variable y heterogéneo de la cuenca, se conserva dividiendo la cuenca en un número de unidades de respuesta hidrológica relativamente homogéneas. Cada unidad es considerada como un elemento individual; la respuesta integrada de todas las unidades individuales contribuye a la respuesta total del sistema. A cada unidad se le asigna parámetros que describen las características individuales del clima, suelos y vegetación. De esta forma, un modelo distribuido considera la variación espacial de las características de una cuenca (Astorayme, 2017).

2.5. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

La calibración del modelo consiste en ajustar los parámetros del modelo durante un período de entrenamiento, ya sea manual o automáticamente, de modo que los resultados del modelo coincidan con las observaciones tan de cerca como sea posible. La adecuación del ajuste de los parámetros se basa típicamente en una única función objetivo que representa la similitud entre los resultados del modelo y las observaciones. En el modelado hidrológico, la función objetivo más utilizada es la métrica de eficiencia de Nash-Sutcliffe que minimiza el error cuadrático medio entre flujos de corrientes modelados y observados. Cabe señalar que la calibración del modelo implica cierto nivel de verificación del modelo (o validación en su sentido amplio) ya que un mal desempeño normalmente detendría el proceso de modelado y la necesidad de validación (Arsenault, Brissette, & Martel, 2018, p. 4).

Después de la calibración, se realiza la validación, para garantizar la transferibilidad de los parámetros y la solidez del modelo; mediante una comparación entre los resultados de la calibración del modelo y las observaciones para evaluar la adecuación del modelo. En la comunidad de modelos hidrológicos, la validación tiene un sentido mucho más estricto atribuido al proceso de demostrar la capacidad del modelo de representar los datos observados, fuera de su período de entrenamiento (Arsenault et al., 2018).

2.6. INDICADORES ESTADÍSTICOS DE EFICIENCIA

Para evaluar el desempeño de un modelo hidrológico, en la literatura encontramos el uso de diferentes indicadores estadísticos de eficiencia. Siendo los más citados el coeficiente de Nash- Sutcliffe, coeficiente de correlación de Pearson (r), la raíz relativa del error cuadrático medio (RRMSE), entre otros.

2.6.1. Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Es el más empleado y de amplio uso para evaluar la predicción de las series simuladas en modelos hidrológicos. Se define como la relación entre el error cuadrático medio de los valores simulados y la varianza en los datos observados, restado de la unidad. Sus valor es adimensional y varía de menos infinito a uno (Nash & Sutcliffe, 1970). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \right]$$

Dónde: Y_i^{obs} : Datos observados, Y_i^{sim} : Datos simulados [L^3T^{-1}], Y_i^{mean} : Promedio de datos observados [L^3T^{-1}] y n : número de intervalos temporales.

En la Tabla 1 se tiene un rango propuesto por Moriasi et al. (2007), el cual califica a un modelo en base al coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Tabla 1: Valores referenciales del Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

AJUSTE	Insatisfactorio	Satisfactorio	Bueno	Muy Bueno
Nash	<0.5	0.5 – 0.65	0.65 – 0.75	0.75 – 1

Fuente: Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations (Moriasi et al., 2007)

2.6.2. Coeficiente de Nash para valores logarítmicos

Es una variante del coeficiente de Nash-Sutcliffe, dando énfasis a la evaluación de los caudales en periodos de estiaje (Krause, Boyle, & Bäse, 2005). A través de la transformación logarítmica los valores picos son aplanados y los valores más bajos se mantienen más o menos al mismo nivel mejorando el valor del indicador de eficiencia, reduciendo el problema de las diferencias cuadráticas y la sensibilidad producto de los valores extremos obtenidos de Nash-Sutcliffe.

El coeficiente de Nash-Ln puede tomar valores desde $-\infty$ hasta 1, siendo 1 el valor óptimo.

$$Nash - Ln = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Y_i^{obs}) - \ln(Y_i^{sim}))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Y_i^{obs}) - \ln(Y_i^{mean}))^2} \right]$$

Dónde: Y_i^{obs} : Datos observados [L^3T^{-1}], Y_i^{sim} : Datos simulados [L^3T^{-1}], Y_i^{mean} : Promedio de datos observados y n : número de intervalos temporales.

2.6.3. Coeficiente de correlación de Pearson (r)

El coeficiente de Pearson (r), proporciona una medida de relación lineal entre el modelo y las observaciones (Aghakouchak & Habib, 2010). El r puede tomar valores de -1 a 1, siendo 1 el más óptimo.

$$r = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - \overline{Q_o}) \cdot \sum_{i=1}^n (Q_s^i - \overline{Q_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o^i - \overline{Q_o})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_s^i - \overline{Q_s})^2}} \right] \quad 2.33$$

Dónde: r : Coeficiente de correlación de Pearson, Q_o : Caudal observado [L^3T^{-1}], $\overline{Q_s}$: Caudal promedio simulado [L^3T^{-1}], Q_s : Caudal simulado [L^3T^{-1}], $\overline{Q_o}$: Caudal promedio observado [L^3T^{-1}].

2.6.4. Raíz del error cuadrático medio relativo (RRMSE)

El RRMSE permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores de las descargas simuladas respecto a los observados, los cuales son normalizados por el promedio de las descargas observadas, este error relativo puede tomar valores de 0 a $+\infty$, siendo los valores más bajos los que indican menores errores (Feyen, Vasquez, Christiaens, & Feyen, 2000).

$$RRMSE = \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \cdot \frac{1}{\overline{O}}} \right] \quad 2.33$$

Donde: P_i : valor simulado, O_i : valor observado, \overline{O} : promedio de valores observados, n : número de observaciones.

2.6.5. Volumen relativo del sesgo (RVB)

El RVB, corresponde al error relativo entre las descargas simuladas y las descargas observadas en un periodo común de estudio. Puede tomar valores de entre $-\infty$ a $+\infty$ siendo, cero el valor ideal, negativo al subestimar y positivo al sobreestimar la serie observada (K. Ajami, Gupta, Wagener, & Sorooshian, 2004).

$$RVB = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t})}$$

Donde: $Q_{sim,t}$: Descarga simulada en un tiempo t [L^3T^{-1}], $Q_{ref,t}$: Descarga observada en un tiempo t [L^3T^{-1}]

Los rangos y el valor ideal de los indicadores estadísticos de eficiencia se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Indicadores estadísticos de eficiencia

Estadístico	Rangos	Valor Ideal
Coeficiente de Nash Sutcliffe	$-\infty$ a 1	1
Coeficiente de Nash-logarítmico	$-\infty$ a 1	1
Coeficiente de correlación de Pearson	-1 a 1	1
Raíz relativa del error medio cuadrático	0 a ∞	0
Volumen relativo del sesgo	$-\infty$ a $+\infty$	0

Fuente: RS MINERVE - technical manual v2.16. (Garcia, Paredes, Foehn, Roquier, & Fluixa, 2018)

2.7. SISTEMA INFORMÁTICO DE RS MINERVE

RS MINERVE es una plataforma de modelación hidrológica de distribución gratuita, desarrollada por el Centro de Investigación de Ambientes Alpinos (CREALP por sus siglas en francés) y la Oficina de Ingeniería de HydroCosmos S.A., con la colaboración de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (Suiza), la Universidad Politécnica de Valencia (España) y la Asociación Hydro10, diseñado para la simulación de los procesos lluvia – escorrentía y su propagación.

Se basa en una programación orientada a objetos, permitiendo el modelamiento hidrológico e hidráulico de acuerdo con un esquema conceptual semi-distribuido además de los procesos hidrológicos particulares tales como el deshielo, derretimiento de los glaciares, el flujo superficial y subterránea, los elementos de control hidráulico (por ejemplo, puertas, aliviaderos, desvíos, cruces, turbinas y bombas) también están incluidos.

RS MINERVE integra en su plataforma diferentes modelos hidrológicos como el HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier), SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting), SOCONT (Soil Contribution) y GSM (Glacier Snow Melt). Asimismo, para la propagación de avenidas en ríos tiene implementado y disponible los métodos; tiempo de retardo, onda cinemática, Muskingum-Cunge y Saint-Venant.



2.7.1. Modelo SAC-SMA

El SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting) o modelo hidrológico SACRAMENTO fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos División Norte conjuntamente con el personal del Centro de Predicción Fluvial del Servicio de Meteorológico Nacional de Estados Unidos y el Departamento de Recursos Hídricos, en Sacramento, California en la década de los 70.

Es un modelo determinístico conceptual que requiere información de precipitación y evapotranspiración media diaria para generar descargas del mismo paso de tiempo. Representa las características de la humedad del suelo que se distribuye en una manera físicamente realista en las distintas zonas y estados de la energía del suelo, modelo ideal para la simulación de cuencas grandes mayores a 1000 km². Cuenta con 16 parámetros (Tabla 3) para su calibración aun sin disponer de un submodelo de nieve. Este gran número de parámetros implica un conocimiento profundo de la cuenca a simular, con información sobre la cobertura vegetal o áreas permeables e impermeables. El modelo SAC-SMA (Figura 3) se estructura en tres reservorios complejos, todos ellos influidos por la evapotranspiración (ETO). El primero, de color plomo, está dividido en sectores permeables e impermeables que producen escorrentía superficial cuando la lluvia supera la tasa de infiltración. El reservorio de color celeste representa la capa superior del suelo (zona superior o Upper zone), donde se origina el interflujo, que puede entenderse como la transferencia de agua lateral al caudal base y que solo se produce cuando se satura la zona superior. El tercer reservorio representa la zona inferior del suelo (zona inferior o Lower zone) y está vinculado a los procesos de descarga con respuesta lenta. Finalmente, los tres reservorios originan el caudal total simulado por el modelo (Astorayme, 2017).

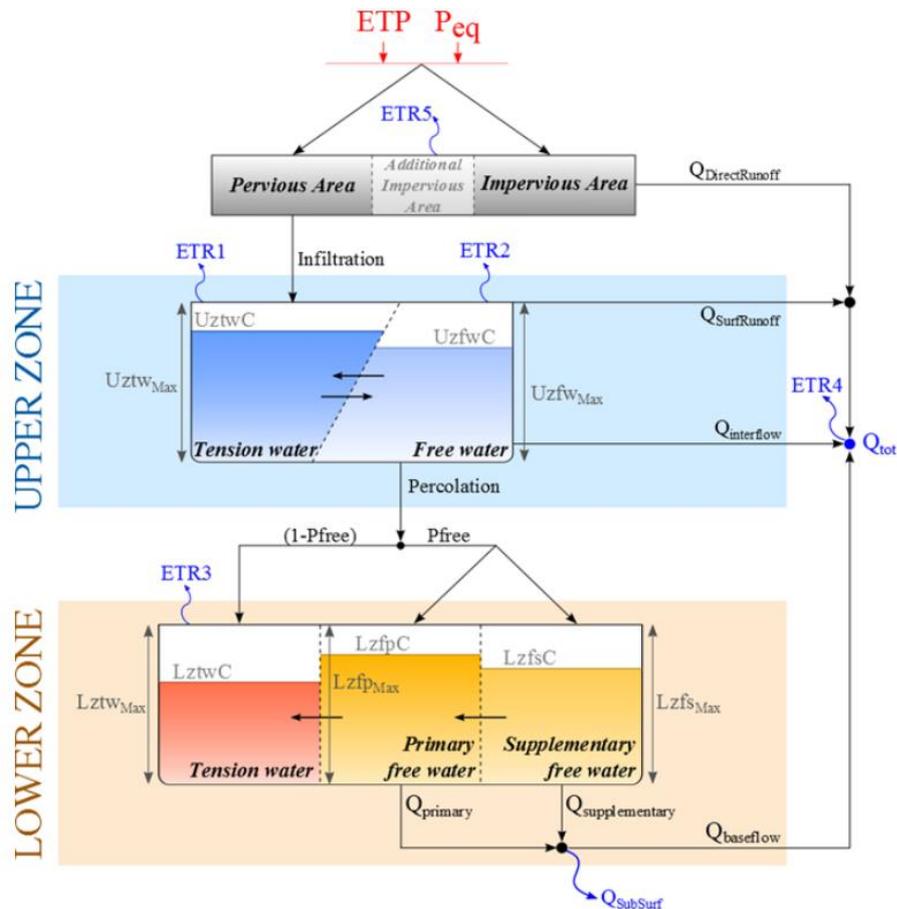


Figura 3: **Modelo conceptual del SAC-SMA**

Fuente: RS MINERVE - technical manual v2.16. (Garcia et al., 2018)

El modelo utiliza 16 parámetros para la calibración, los que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Rangos y parámetros del modelo SAC-SMA

Nombre	Descripción	Unidades
Adimp	Fracción máxima de impermeabilidad adicional	-
Pctim	Fracción permanente de área impermeable	-
Riva	Fracción de cobertura vegetal	-
Uz _{tw} Max	Capacidad de la tensión de agua en la capa superior	mm
Uz _{fw} Max	Capacidad de agua libre en la capa superior	mm
Uzk	Tasa de reducción de interflujo de la capa superior	1/day
Zperc	Coficiente de la relación de percolación	-
Rexp	Parámetro de forma de la curva de percolación	-
Pfree	Fracción de percolación del almacenamiento de aguas en la capa inferior	-
Lz _{tw} Max	Capacidad de la tensión de agua en la capa inferior	mm
Lz _{fp} Max	Libre capacidad del agua primaria de la capa inferior	mm
Lz _{fs} Max	Libre capacidad del agua suplementaria de la capa inferior	mm

Rserv	Fracción del agua libre no transferible a la tensión del agua en la capa inferior	-
Lzpk	Tasa de reducción del almacenamiento del agua primaria de la capa inferior	1/day
Lzsk	Tasa de reducción del almacenamiento del agua suplementaria de la capa inferior	1/day
Side	Proporción de percolación del almacenamiento de aguas en la capa inferior	-

Fuente: RS MINERVE - Technical Manual v2.16. (Garcia et al., 2018)

Tabla 4: Parámetros iniciales del modelo SAC-SMA.

Nombre	Descripción	Unidades
AdimIni	Contenido inicial de agua en tensión del área Adimp	mm
UztwIni	Contenido inicial de agua en tensión de la capa superior	mm
Uzfwini	Contenido inicial de agua libre en la capa superior	mm
LztwIni	Contenido inicial de agua en tensión de la capa inferior	mm
LzfpIni	Contenido inicial de agua libre suplementario de la capa inferior	mm
LzfsIni	Contenido inicial de agua libre suplementario de la capa inferior	mm

Fuente: RS MINERVE - Technical Manual v2.16. (Garcia et al., 2018)

2.7.1.1. Formulación matemática

Parte de la precipitación equivalente que ingresa al modelo es transformada en escorrentía directa, esto es posible pues el modelo considera parte de la cuenca como un área impermeable. Siendo el parámetro P_{ctim} quien define la fracción del área de la cuenca que será impermeable y $Adimp$ el parámetro que permite definir un área impermeable extra. Luego se define el área permeable (Ec. 2.10).

$$P_{area} = 1 + (P_{ctim} + Adimp) \quad 2.10$$

Donde: P_{area} : Fracción de área permeable permanente en la cuenca [-], P_{ctim} : Fracción de área permanente impermeable [-], y $Adimp$: Máxima fracción adicional de área impermeable debido a la saturación [-].

Zona Superior: almacenamiento de agua en tensión

La precipitación restante (que cae en el área permeable) es infiltrada al reservorio, zona superior, esta representa la parte superior del suelo y se divide en dos sectores; agua en tensión y agua libre. Así, se tiene el sector de la zona alta de agua en tensión que esta representada por el agua por adhesión y la cohesión entre los poros del suelo, así como el

agua interceptada por la vegetación. Además, el agua puede ser solo consumida por la evapotranspiración.

La capacidad máxima admisible en este sector es representada por el parámetro $Uztw_{Max}$ (Ec. 2.11) siendo $UztwC$ la capacidad de este sector en cualquier intervalo de tiempo.

El sector de agua en tensión de la zona superior recibe la precipitación infiltrada por el área permeable. Cuando el sector de agua en tensión está lleno de exceso de agua pasa al sector de agua libre en la zona superior (Ec. 2.12). Consecuentemente, cuando existe déficit de agua en el sector de agua en tensión toma agua del sector de agua libre (Ec. 2.13)

$$T = \frac{UztwC}{Uztw_{Max}} \quad 2.11$$

$$F = \frac{UzfwC}{Uzfw_{Max}} \quad 2.12$$

$$Uztr = d \left(\frac{UzfwC \cdot Uztw_{Max} - UztwC \cdot Uzfw_{Max}}{Uzfw_{Max} + Uztw_{Max}} \right) / dt \quad 2.13$$

Dónde: T: Contenido relativo de agua en tensión en la Zona alta [-], F: Contenido relativo de agua libre en la Zona alta [-], $Uztr$: Infiltración transferida de la zona de agua libre a la zona de agua en tensión [L/T], $Uztw_{Max}$: Capacidad máxima del sector de agua en tensión en la zona alta [L], $UztwC$: Capacidad del sector de agua en tensión en la zona alta para cualquier intervalo de tiempo [L], $Uzfw_{Max}$: Capacidad máxima del sector de agua libre en la zona alta [L], y $UzfwC$: Capacidad del sector de agua libre en la zona alta para cada cualquier intervalo de tiempo [L].

Zona superior: almacenamiento de agua libre

El sector de agua libre representa el agua que no está adherida a las partículas del suelo por lo que son libres de moverse por acción de las fuerzas gravitacionales. La capacidad máxima admisible es representada por el parámetro $Uzfw_{Max}$ siendo $UzfwC$ la capacidad de este sector en cualquier intervalo de tiempo. Cabe resaltar que en este sector se genera el flujo hipodérmico o interflujo, siendo Uzk el parámetro que defina la

porción de agua libre que se trasforma en dicho flujo. Además, parte del agua puede ser evapotranspirada o transformada en escorrentía superficial.

El agua que se encuentra en el sector de agua libre, de la zona superior, percola hacia otro reservorio denominado zona inferior. El agua que percola depende de la deficiencia de volumen de humedad en la zona inferior, de las propiedades del suelo y del almacenamiento de agua en este reservorio. El factor DDA define la máxima demanda de percolación (Ecs. 2.15 y 2.16) y la P_{base} representa la tasa de percolación (Ec. 2.14).

$$P_{base} = Lzp_{Max} \cdot Lzpk + Lzfp_{Max} \cdot Lsk \quad 2.14$$

$$DEFR = \frac{(Lzp_{Max} - Lztc) + (LzfpC) + (Lzfs_{Max} - LzfsC)}{Lztc_{Max} + Lzfp_{Max} + Lzfs_{Max}} \quad 2.15$$

$$DDA = P_{base} \cdot (1 + Zperc \cdot DEFR^{Rexp}) \quad 2.16$$

Donde: P_{base} : Tasa de percolación continua bajo condiciones de saturación [L/T], DDA : Máxima demanda de percolación en la zona baja [L/T], $Zperc$: Porción de máxima y mínima tasa de percolación demandada [-], $DEFR$: Deficiencia relativa de agua en la zona baja [-] y $Rexp$: Parámetro de forma de la curva de percolación [-].

La percolación efectiva $PERC$ depende de la proporción entre la capacidad máxima de la zona superior del sector de agua libre y su capacidad para cualquier intervalo de tiempo.

$$PERC = DDA \frac{UzfwC}{Uzfw_{Max}} \quad 2.17$$

$$PERC \leq \frac{d(UzfwC)}{dt} \quad 2.18$$

$$PERC \leq \frac{d[(Lztc_{Max} - Lztc) + (Lzfp_{Max} - LzfpC) + (Lzfs_{Max} - LzfsC)]}{dt} \quad 2.19$$

Dónde: $PERC$: Percolación real [L/T], DDA : Máxima demanda de percolación en la zona baja [L/T], $Uzfw_{Max}$: Capacidad máxima del sector de agua libre en la zona alta [L], y $UzfwC$: Capacidad del sector de agua libre en la zona alta [L].

Cabe resaltar que el interflujo $Q_{inter f}$ se genera en el sector de agua libre en la zona superior y depende del contenido de agua, de la tasa de agotamiento Uzk , como se muestra en la Ec. 2.20.

$$Q_{inter f} = Uzk \cdot UzfwC \cdot Parea \cdot A \quad 2.20$$

Donde: $Q_{inter f}$: Interflujo [L^3/T], Uzk : Tasa de agotamiento de la zona alta [L^3/T], $UzfwC$: Contenido de agua libre en la zona alta [L^3/T], $Parea$: Contenido de agua libre en la zona alta [-], y A : Superficie de la cuenca [L^2].

Cuando el sector de agua libre de la zona alta está completamente lleno y la intensidad de precipitación excede la tasa de percolación y la máxima capacidad de drenaje de interflujo, entonces se genera escorrentía directa o superficial. Por lo tanto, en la zona alta (Ec.2.21) se generan dos tipo de escorrentía: directa Q_{direct} e hipodérmica o interflujo $Q_{inter f}$.

$$Q_{zona alta} = Q_{direct} + Q_{inter f} \quad 2.21$$

Donde $Q_{zona alta}$: Escorrentia zona alta [L^3/T], Q_{direct} : Escorrentia directa [L^3/T], y $Q_{inter f}$: Interflujo o flujo hipodérmico [L^3/T].

Zona baja: Almacenamiento de agua en tensión

La zona baja, está dividida por tres sectores, la primera, sector de agua en tensión de la zona baja y los dos restantes los sectores de agua libre primaria y agua libre suplementaria. La primera zona representa el suelo semi-saturado, el cual caracteriza al volumen de humedad en dos capas de suelos más bajos, este volumen de humedad será transferida por los suelos secos cuando el volumen de humedad alcance esa profundidad. El agua es consumida a través de la evapotranspiración, proporcionalmente a la ETP presente en la zona alta del sector de agua en tensión.

El agua que ingresa a este reservorio (zona baja) viene de la zona alta por percolación, una fracción de esta percolación (P_{free}) irá directamente al sector de agua libre primaria y secundaria de la zona baja, incluso si el sector de agua en tensión no está lleno; mientras el restante ($1-P_{free}$) irá al sector de agua en tensión. Existirá también

trasferencia desde los sectores de agua libre hacia el sector de agua en tensión (solo en esa dirección).

Acerca de las capacidades máximas de estos sectores en la zona baja, se debe mencionar al parámetro $Lztw_{Max}$ que representa al sector de agua en tensión. Además, se tienen a los parámetros $Lzfp_{Max}$ y $Lzfs_{Max}$ que representan la capacidad máxima para los sectores de agua libre primaria y agua libre suplementaria de la zona baja respectivamente. Por otro lado, las variaciones de la capacidad para cualquier intervalo de tiempo de los sectores de agua en tensión, libre primaria y suplementaria están definidas por $LztwC$, $LzfpC$ y $LzfsC$ respectivamente.

Cabe señalar que, si la relación entre el contenido relativo en el sector de agua en tensión es más pequeña que el contenido relativo del sector de agua libre, entonces el exceso de agua en el sector de agua libre es transferido al sector de agua en tensión. La siguiente expresión muestra la ecuación para los tres contenidos relativos en los sectores de la zona baja (Ecs. 2.22 a 2.24).

$$T = \frac{LztwC}{Lztw_{Max}} \quad 2.22$$

$$RFW = Rserv(Lzfp_{Max} + Lzfs_{Max}) \quad 2.23$$

$$F = \frac{LztwC + LzfsC - RFW}{Lztw_{Max} + Lzfs_{Max} - RFW} \quad 2.24$$

Dónde: T : Contenido relativo de agua en el sector de agua libre de la zona baja [-], RFW : Agua libre que no se transfiere la zona de agua en tensión, susceptible a ser flujo base [L], y F : Contenido relativo de agua libre en la zona baja [-], $Rserv$: Fracción de agua libre que no se transfiere al sector de agua en tensión de la zona baja [-].

Por otro lado, si el contenido relativo de agua en tensión es más pequeño que el contenido de agua relativa en toda la zona baja, luego se transferirá agua (DEL) del sector de agua libre suplementaria hacia el sector de agua en tensión (Ecs. 2.25 y 2.26)

$$R = \frac{LzfpC + LzfsC - LztwC - RFW}{Lzfp_{Max} + Lzfs_{Max} - Lztw_{Max} - RFW} \quad 2.25$$

$$DEL = Lztw_{Max} \cdot d(R - T)/dt \quad 2.26$$



Donde DEL : Transferencia de agua libre al sector de agua en tensión de zona baja [L/T], R : Relación entre el agua disponible por evapotranspiración y el agua total contenido en la zona baja [-], y RFW : Agua que no se transfiere al sector de agua en tensión, susceptible a convertirse en flujo base [L].

Zona baja: almacenamiento de agua libre primaria y suplementaria

Acerca de los dos sectores restantes, sector de agua libre primaria y suplementaria, estos representan el subsuelo como por ejemplo los acuíferos. Así, el primero de ellos (sector de agua libre primaria) representa al suelo primario con un muy lento drenaje proveniente del flujo base acumuladas por largos periodos de tiempo (Ec. 2.27). Por otro lado, el sector de agua suplementaria presenta a un tipo de suelo que acumula agua proveniente de lluvia reciente y que alimenta al flujo base (Ec. 2.28).

El flujo entregado por los sectores de agua libre primaria y suplementaria de la zona baja sigue la ley de Darcy y forman el flujo base (Ec. 2.74).

$$Q_{primario} = Lzpk.LzfpC.Parea.A \quad 2.27$$

$$Q_{suplementario} = Lzsk.LzfsC.Parea.A \quad 2.28$$

$$Q_{Zona\ baja} = Q_{primario} + Q_{suplementario} \quad 2.29$$

Donde: $Q_{primario}$: Flujo proveniente del sector de agua libre primario [L^3/T], $Q_{suplementario}$: Flujo suplementario del sector de agua libre suplementario [L^3/T], $Q_{Zona\ baja}$: Flujo proveniente de la zona baja [L^3/T], $Lzpk$: Tasa de deflexión del agua suplementaria en la zona baja [T-1], $Lzsk$: Tasa de deflexión del agua primaria en la zona baja [L], $LzfsC$: Contenido de agua libre suplementaria de la zona baja para cualquier intervalo de tiempo [L], $Parea$: Fracción de área permeable en la cuenca [-], y A : Área de la cuenca [L^2].

Por otro lado, el modelo de Sacramento permite simular la pérdida del flujo base ($Q_{Flujos\ subSurf}$) este flujo no contribuye al caudal base sino se pierde por las fallas geológicas que existen en el subsuelo (Ec. 2.30). Para administrar esta pérdida se tiene el parámetro $Side$ (Ec. 2.31).

$$Q_{Flujos\ subSurf} = Side.Q_{Flujo\ base} \quad 2.30$$

$$Q_{Flujo\ base} = Q_{Zona\ Baja} - Q_{Flujo\ SubSuper\ f} \quad 2.31$$

Donde: *side* : Tasa de la percolación profunda de los sectores de agua libre [-], $Q_{Flujo\ SubSuper\ f}$: Flujo proveniente del sector de agua libre primario [L^3/T], $Q_{Flujo\ base}$: Es el flujo proveniente de la zona baja [L^3/T], y $Q_{Zona\ Baja}$: Es el flujo proveniente de la zona baja [L^3/T].

Finalmente, la descarga total es la suma de estas cuatro salidas (Ec. 2.32)

$$Q_{tot} = Q_{direct} + Q_{EscorrSuper} + Q_{Interf} + Q_{FlujBase} \quad 2.32$$

Dónde: Q_{tot} : Descarga total del modelo SAC [L^3/T], Q_{direct} : Escorrentía directa [L^3/T], $Q_{EscorrSuper}$: Escorrentía Superficial [L^3/T], Q_{Interf} : Interflujo [L^3/T], y $Q_{FlujBase}$: Flujo base [L^3/T]. (Astorayme et al., 2015; Garcia et al., 2018)

2.8. CAMBIO CLIMÁTICO

Se define como la variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (IPCC, 2013b).

El cambio climático engloba al calentamiento global y hace referencia a un rango más amplio de cambios que están ocurriendo en el planeta. Las evidencias del calentamiento de la tierra proceden de múltiples indicadores independientes. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido,

el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado, tal como muestra la Figura 4 (IPCC, 2013b).

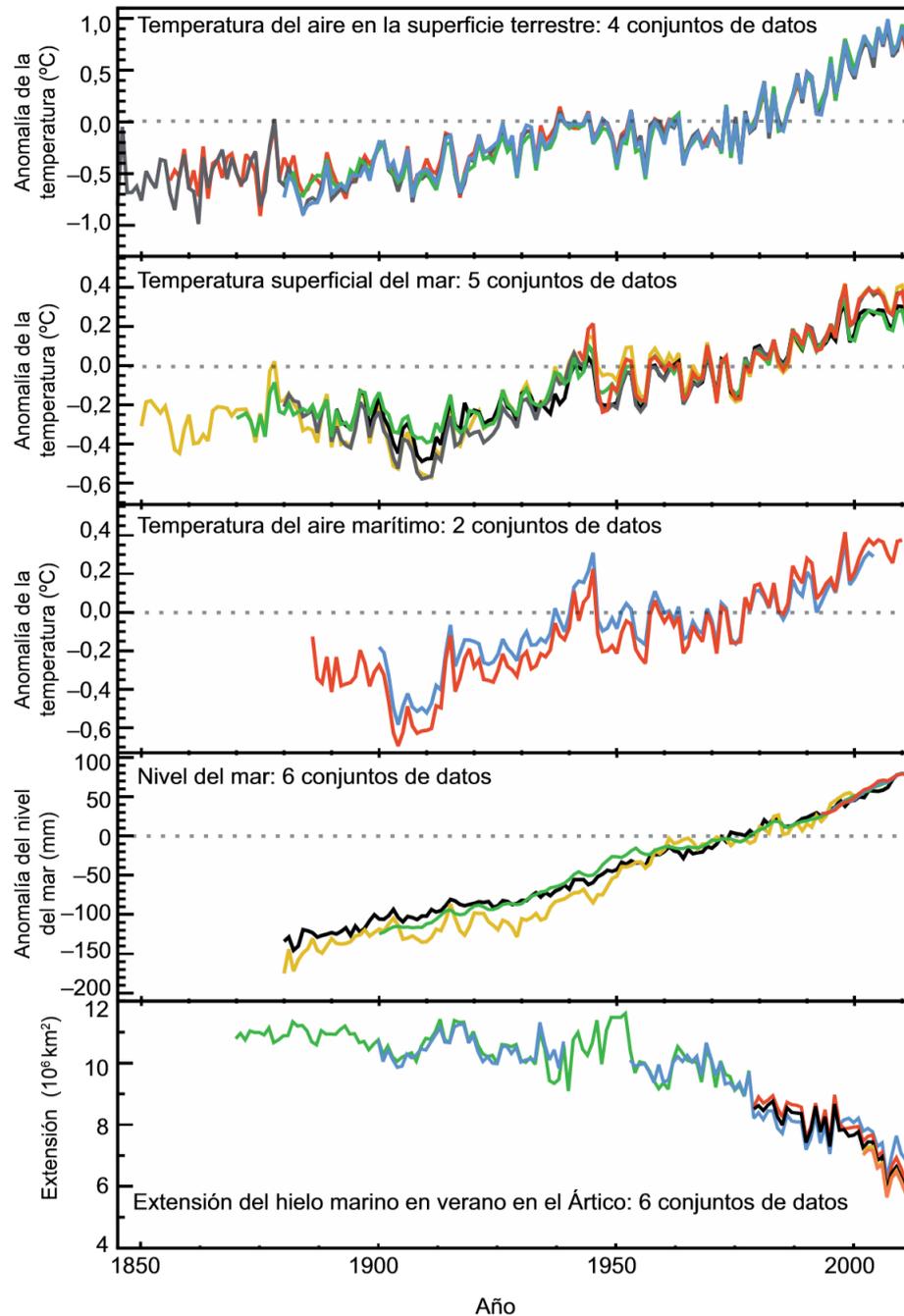


Figura 4: Cambios observados en el mundo para la temperatura superficial, nivel del mar y extensión de hielo marino.

Fuente: Resumen para responsables de políticas. En: cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013b)

2.9. MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES

Son también conocidos como Modelos de Circulación General (GCMs) y representan numéricamente al sistema climático en base a las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes. De acuerdo a cada componente o conjunto de estos, se pueden identificar jerarquías y representar modelos de diversos grados de complejidad que se diferencian en aspectos como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados explícitamente, los procesos físicos, químicos o biológicos; o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas. Son utilizados como herramienta de investigación para el estudio y simulación del clima, en especial para predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales. En la actualidad los GCMs acoplados Atmósfera – Océano (MCGAO), son los que proporcionan la representación más completa del sistema climático (IPCC, 2013b).

Aunque los GCMs son herramientas predictivas valiosas, no pueden explicar la heterogeneidad y variabilidad del cambio climático, debido principalmente a su resolución aproximada. Ya que las características del paisaje, como montañas, cuerpos de agua, infraestructura, cubierta terrestre y componentes del sistema climático, como nubes convectivas y brisas costeras, tienen escalas mucho más finas que 100 a 500 kilómetros, de los que nos proporcionan estos modelos (Trzaska & Schnarr, 2014).

Este tipo de modelos son probabilísticos y requieren un alto costo computacional. Para ello en 1995 se organizó el Proyecto de Inter-comparación de Modelos de Clima Acoplado (CMIP por sus siglas en inglés), para el estudio de la producción de los modelos climáticos, quien proporciona una infraestructura para el diagnóstico, validación, inter-comparación, documentación y el acceso a los datos de los modelos climáticos. Este proyecto se encuentra en la fase 5 (CMIP5) y los modelos que se evalúan son del tipo Sistemas de Modelos Terrestre (ESMs) o Modelos de Circulación General Atmosfera – Océano (AOGCMs), como se muestran en la Figura 5.

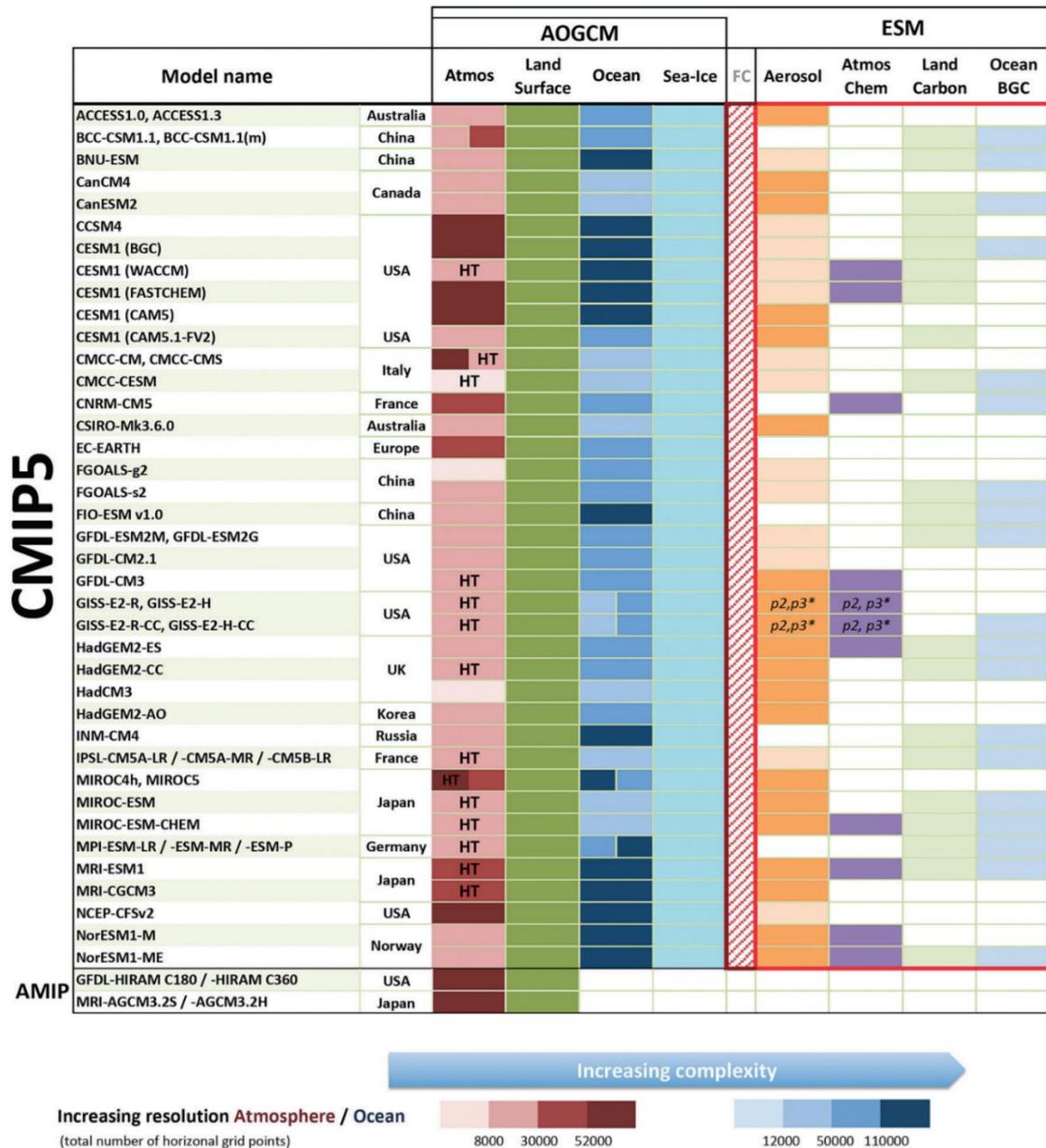


Figura 5: Características principales de los modelos que participan en el CMIP5
Fuente: Evaluation of climate models. In climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (Flato et al., 2013)

La capacidad de los modelos climáticos para simular la temperatura superficial media anual y patrones de precipitación observados han mejorado mucho, respecto a las tres fases recientes del CMIP: CMIP2 (2000), CMIP3 (2005) y CMIP 5 (generación actual de modelos), como se muestra en la Figura 6.

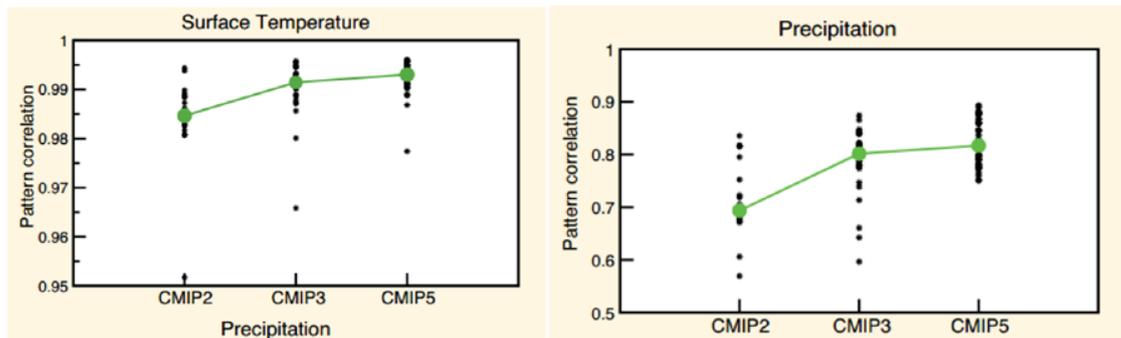


Figura 6: Evolución de la capacidad de los modelos climáticos globales.
Fuente: Evaluation of climate models. In climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC, 2013b)

2.10. DOWNSCALING CLIMÁTICO

“Es un método que deriva información a escala local o regional (10 a 100 km) a partir de modelos a gran escala” (Figura 7) (IPCC, 2013b). Se basa en la suposición de que el clima local está condicionado por interacciones entre características atmosféricas a gran escala (circulación, temperatura, humedad, etc.) y características locales (cuerpos de agua, cadenas montañosas, propiedades de la superficie terrestre, etc.). Es importante advertir que, muchos de los procesos que controlan el clima local, por ejemplo, topografía, vegetación e hidrología, no están incluidos en los GCMs de resolución gruesa (Trzaska & Schnarr, 2014).

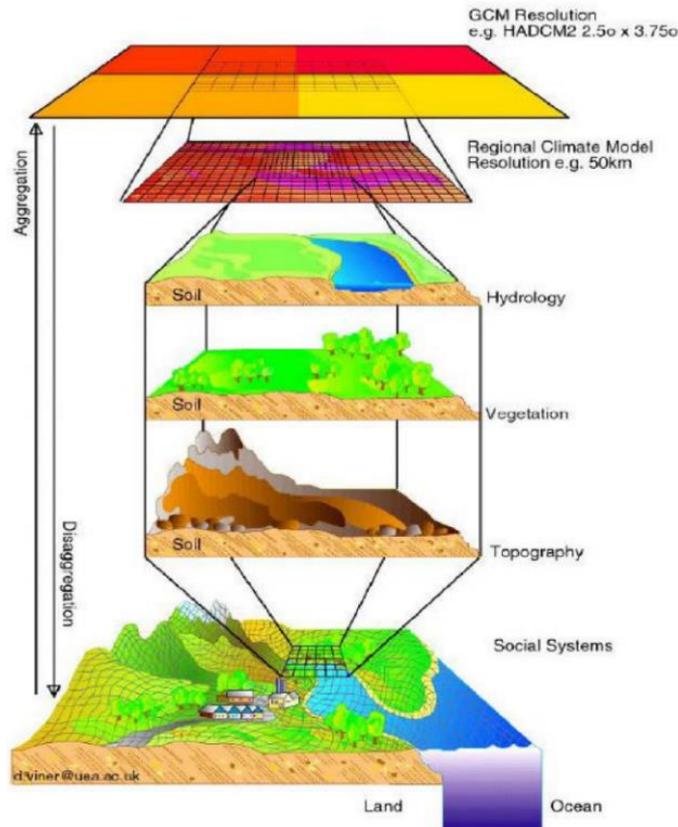


Figura 7: Downscaling espacial

Fuente: A review of downscaling methods for climate change projections. African and Latin American Resilience to Climate Change (ARCC) (Trzaska & Schnarr, 2014)

2.10.1. Downscaling dinámico

Se basa en el uso de un modelo climático regional (RCM), similar a los principios de un GCM, pero con alta resolución. Consideran la información atmosférica a gran escala suministrada por los GCMs e incorporan una topografía más compleja como: el contraste tierra-mar, las heterogeneidades de la superficie y descripciones detalladas de los procesos físicos para generar información climática realista a una resolución espacial de aproximadamente 20–50 kilómetros. Su calidad depende de la precisión del forzado a gran escala del GCM y sus sesgos. A pesar de recuperar importantes características a escala regional que se subestiman en los GCM de resolución gruesa, las salidas de RCM todavía están sujetas a errores sistemáticos y, por lo tanto, a menudo requieren una corrección de sesgo, así como una mayor reducción de escala a resoluciones más finas (Trzaska & Schnarr, 2014).

2.10.2. Downscaling estadístico

Este método es ampliamente usado para mejorar las distribuciones espaciales y/o temporales de variables meteorológica de modelos climáticos globales (Gutmann et al., 2012). Implica el establecimiento de relaciones empíricas entre las variables climáticas históricas locales y atmosféricas a gran escala asumiendo que la relación entre ambos sigue siendo válida bajo diferentes condiciones de forzamiento del clima futuro. Aunque, cabe precisar que se desconoce si las relaciones estadísticas actuales entre las variables a gran escala y a escala regional se mantendrán en el sistema climático futuro (Trzaska & Schnarr, 2014). Sin embargo, aunque dicha relación sea imperfecta es ampliamente utilizado para corregir las variables atmosféricas futuras de los GCMs y poder utilizarlas en la predicción climática a una escala local, naturalmente teniendo en cuenta la incertidumbre en dicho proceso.

2.11. ESCENARIO CLIMÁTICO

Un escenario climático es la representación verosímil del clima futuro, basada en un conjunto coherente de relaciones entre fenómenos meteorológico que se define para investigar las posibles consecuencias del cambio climático (Trzaska & Schnarr, 2014).

Los escenarios se establecen partiendo de la variación del forzamiento radiativo (W/m^2) que es la diferencia entre la radiación que ingresa y egresa de la atmosfera terrestre. Esta variación a la cual es sometida la tierra, altera (entre otros factores) al ciclo del carbono generando una mayor concentración de CO_2 y ocasionando cambios en las condiciones atmosféricas en un lapso prolongado de tiempo, como es el aumento de la temperatura. La temperatura final alcanzada en el escenario a evaluar se define por el trayecto de concentración radiativa que se tuvo desde el presente hasta llegar al escenario futuro, denominado vías representativas de concentración (Representative Concentration's Path, RCP) ya que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama de gases de efecto invernadero, aerosoles, gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre. La denominación de cada RCP hace referencia al forzamiento radiativo obtenido de la trayectoria de concentración proyectado hacia el 2100 y los escenarios futuros son denominados de acuerdo al RCP que los define. El IPCC ha seleccionado cuatro RCPs como base para las predicciones climáticas (León & Huarhua, 2015).

- ❖ RCP 2.6: Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente 3 W/m² antes de 2100 y posteriormente disminuye (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las emisiones después de 2100);
- ❖ RCP 4.5 y RCP 6.0; Dos trayectorias de estabilización intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza aproximadamente a 4.5 W/m² y 6 W/m² después de 2100 (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las concentraciones después de 2150);
- ❖ RCP 8.5: Trayectoria alta, cuyo forzamiento radiativo alcanza valores superiores a 8.5 W/m² en 2100 y sigue aumentando por un tiempo (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las emisiones después de 2100 y sean constantes las concentraciones después de 2250).

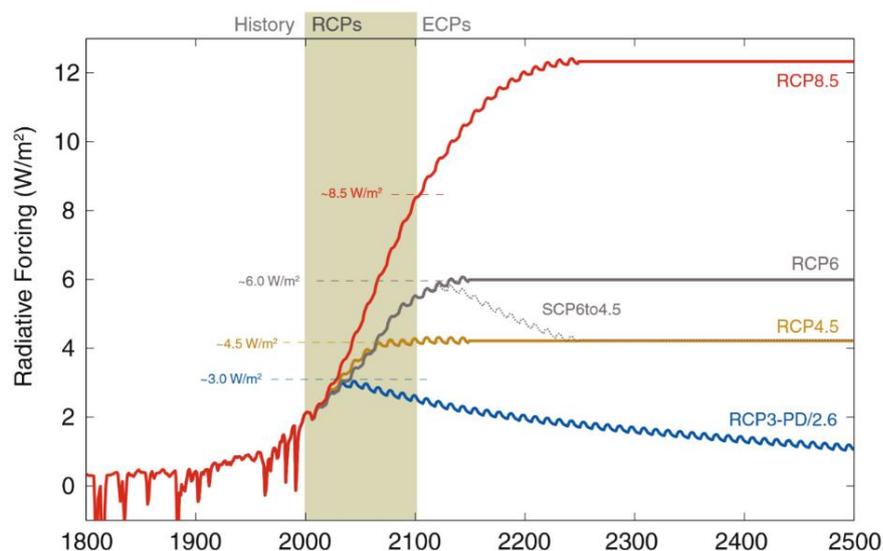


Figura 8: Forzamiento radiativo total para RCPs.

Fuente: The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 (Meinshausen et al., 2011)

2.12. CORRECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS VARIABLES

Las variables climáticas simuladas por los (GCMs) con frecuencia muestran errores sistemáticos con respecto a los datos observados, lo cual limita su uso en estudios de impacto en los recursos hídricos, siendo para ello necesario realizar un post-proceso a la salida de los GCMs. Las técnicas de corrección del error sistemático (sesgo),



comúnmente denominado en la literatura como bias-correction, consiste en sustraer la diferencia entre los datos climatológicos de los GCMs y las observadas, con el fin de lograr una semejanza aceptable entre la curva de duración observada y modelada (Santos, 2016).

Una representación realista de los campos de precipitación en las proyecciones climáticas futuras de los modelos climáticos es crucial para la evaluación de impacto y vulnerabilidad. Por lo tanto, los modeladores utilizan técnicas de corrección de sesgo que corrigen todos los rangos del histograma de intensidad. A menudo, esto implica alguna forma de función de transferencia derivada de las funciones de distribución acumulada observadas y simuladas (cdfs). Al aplicar una corrección derivada del pronóstico posterior a las simulaciones del clima proyectado, uno debe asumir que la corrección aún se cumple para el clima proyectado. Sin embargo, esta suposición es más aceptable si la función de transferencia entre salida de GCM sin procesar y corregida es robusta, que es el caso si depende de menos parámetros que se deriven de los datos (Piani, Haerter, & Coppola, 2010, p. 1).

2.13. INCERTIDUMBRE DE LOS ESCENARIOS

La incertidumbre es un estado de conocimiento incompleto que puede resultar de la falta de información o del desacuerdo sobre lo que se sabe o incluso lo que se puede saber. Puede tener muchos tipos de fuentes, desde la imprecisión en los datos hasta conceptos o terminología ambiguamente definidos, o proyecciones inciertas del comportamiento humano. Por lo tanto, la incertidumbre puede representarse mediante medidas cuantitativas (por ejemplo, una función de densidad de probabilidad) o por declaraciones cualitativas (por ejemplo, que reflejan el juicio de un equipo de expertos) (IPCC, 2013a).

2.14. DATOS GRILLADOS PISCO

La base de Datos Peruanos Interpolados de las Observaciones Climatológicas e Hidrológicas del SENAMHI (PISCO por sus siglas en inglés), es el resultado de la combinación de datos de estaciones terrenas con climatologías, reanálisis y productos satelitales. Donde se proporciona información de datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración a escala diaria y mensual.



2.14.1. Precipitación (PISCOp v2.1)

La información fue desarrollada en base a métodos de interpolación geoestadística y determinística incluyendo tres fuentes de precipitación: los datos nacionales de pluviómetros controlados y de calidad, la base de datos global del proyecto CHIRPS (Climate Hazards Infrared Precipitation with Station data) y climatologías de precipitación fusionadas con medidor de radar. La información se encuentra disponible en <https://piscoprec.github.io/> a una resolución espacial de 0.1° para el periodo de 1981 hasta la actualidad (Aybar et al., 2019). Esta información fue validada y publicada recientemente por la revista científica “Hydrological Sciences Journal”.

2.14.2. Temperatura (PISCOt v1.1)

Tiene datos diarios desde enero de 1981 hasta diciembre de 2016 a una resolución de 10 km. Se generó en base a datos observados de temperatura máxima y mínima del aire a escala diaria, producto de temperatura de suelo (LST) del sensor Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS por sus siglas en ingles) y predictores estáticos espaciales: elevación, longitud, latitud y el índice de disección topográfica (Huerta, Aybar, & Lavado-Casimiro, 2018).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Ilave se ubica en la vertiente del Titicaca. Tiene una extensión aproximada de 7743 km² y fue delimitada tomando en cuenta el punto de aforo del puente carretera Ilave ubicada a 3824 m.s.n.m. La cuenca está conformada por dos subcuencas principales (Huenque y Aguas Calientes) y su cabecera se origina en las nacientes del río Coypa Coypa hasta la desembocadura al lago Titicaca.

3.1.1. Ubicación política.

La cuenca del río Ilave comprende doce distritos y tres provincias del departamento de Puno, tal como se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5: Ubicación política de la cuenca del río Ilave

Cuenca	Departamento	Provincia	Distritos incluidos
río Ilave	Puno	Puno	Puno, Acora, Laraqueri, Plateria, Chucuito y San Antonio
		El Collao	Mazocruz, Conduriri, Capaso e Ilave
		Chucuito	Juli, Huacullani

3.1.2. Ubicación geográfica.

La cuenca del río Ilave está comprendido desde los 3812 msnm hasta los 5400 msnm, que corresponden a la desembocadura del río en el lago Titicaca y al cerro Surupuna, respectivamente.

Tabla 6: Ubicación geográfica de la cuenca del río Ilave

Latitud Sur	Latitud Norte	Este (m)	Este (m)	Norte (m)	Norte (m)	Altitud mínima m.s.n.m.	Altitud máxima m.s.n.m.
15°47'	17°08'	352,353	452,052	8'104,770	8'248,751	3812	5400

3.1.3. Ubicación hidrográfica

La cuenca del río Ilave se encuentra en la vertiente del lago Titicaca y forma parte del sistema endorreico Titicaca – Desaguadero – Poopo – Salar de Coipasa (TDPS).

Tabla 7: Ubicación hidrográfica de la cuenca del río Ilave

Cuenca	Vertiente	Sistema Hídrico
río Ilave	Titicaca	TDPS

3.1.4. Límites hidrográficos

La cuenca del río Ilave, limita con seis cuencas y tres intercuenas, tal como se detalla en la Tabla 8 y muestra en la Figura 9.

Tabla 8: Límites hidrográficos de la cuenca del río Ilave

Este	Oeste	Norte	Sur
Intercuenas (0155 y 0157) y Cuenca (Tambo, Cuenca (Callacame y Mauri Chico)	Cuenca (Locumba)	Cuenca Ilpa e intercuenca 0173	Cuenca Mauri

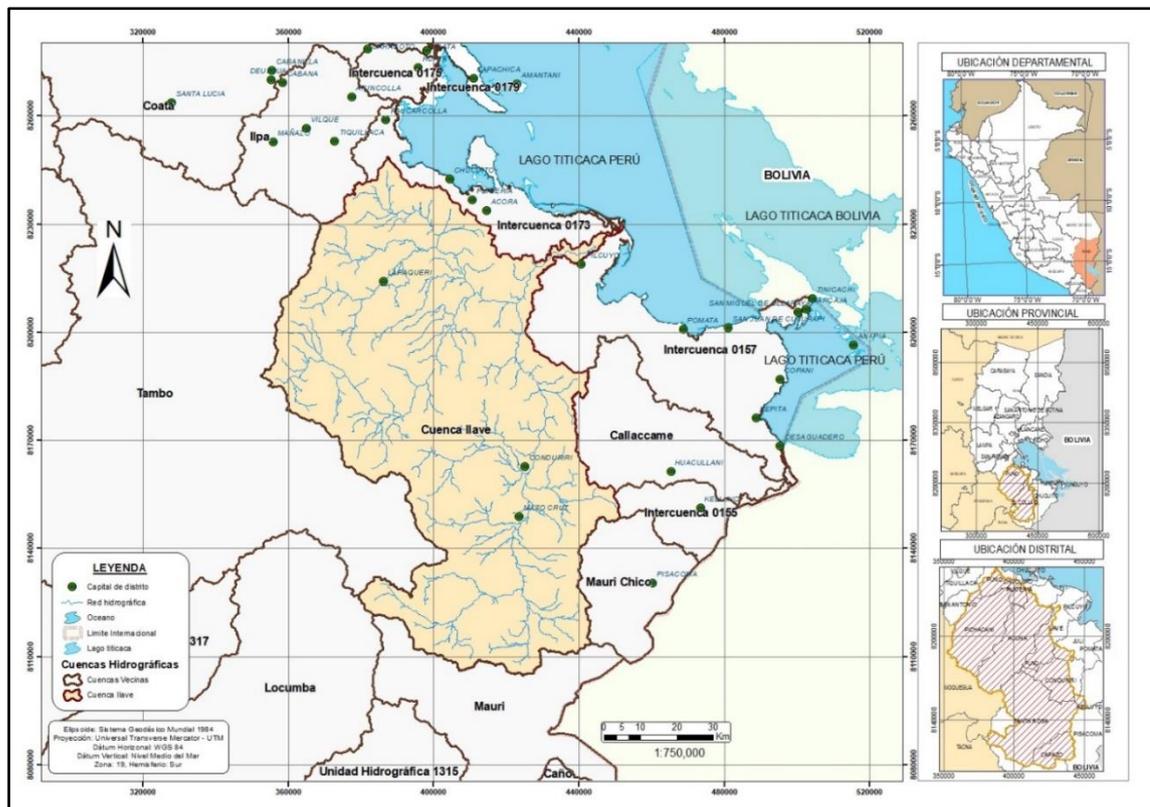


Figura 9: Mapa de ubicación de la cuenca del río Ilave.

3.2. MATERIALES

3.2.1. Información geográfica

Se realizó la clasificación y análisis de la información geográfica recopilada, para su adaptación y uso en el modelo. La Tabla 9, brinda detalles de la información geográfica recopilada.

Tabla 9: Datos de información geográfica

Tipo de Datos	Resolución	Fuente
Modelo de Elevación Digital	30 x 30 m	USGS NASA

3.2.2. Información climática

La información corresponde a 9 estaciones de precipitación (seis dentro de la cuenca) y 03 estaciones de temperatura dentro de la cuenca, los que fueron descargados de la base de datos grillados PISCO del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Se consideraron las mismas coordenadas de las estaciones meteorológicas de observación existentes en la cuenca y sus variables de medición. Las versiones utilizadas son PISCOp v2.1 para la precipitación y PISCOt v1.1 para la temperatura. La ubicación de las estaciones seleccionadas se presenta en la Figura 10 y muestra su información en la Tabla 10.

Tabla 10: Ubicación de las estaciones meteorológicas de la cuenca del río Ilave.

N°	Estación	Ubicación Política			Ubicación Geográfica			Variable
		Dpto.	Provincia	Distrito	Longitud Oeste	Latitud Sur	Altitud (msnm)	
1	Capazo	Puno	Collao	Capazo	69°44'07.80"	17°11'15.80"	4530	P
2	Chilligua	Puno	Collao	Juli	69°40'11.50"	16°32'25.40"	4100	P
3	Ilave	Puno	Collao	Ilave	69°38'42.00"	16°05'17.70"	3880	P y T
4	Laraqueri	Puno	Puno	Pichacani	70°03'59.70"	16°09'16.90"	3900	P y T
5	Mazocruz	Puno	Collao	Mazocruz	69°42'21.90"	16°44'24.40"	4003	P y T
6	Puno	Puno	Puno	Puno	70°00'43.50"	15°49'34.50"	3820	P
7	Rincon de la Cruz	Puno	Puno	Acora	69°48'39.00"	15°59'26.10"	3935	P
8	Coypa Coypa	Puno	Collao	Mazocruz	69°56'00.00"	17°01'00.00"	4450	P
9	Chichillapi	Puno	Collao	Mazocruz	69°44'00.00"	16°55'00.00"	4050	P

Fuente: SENAMHI

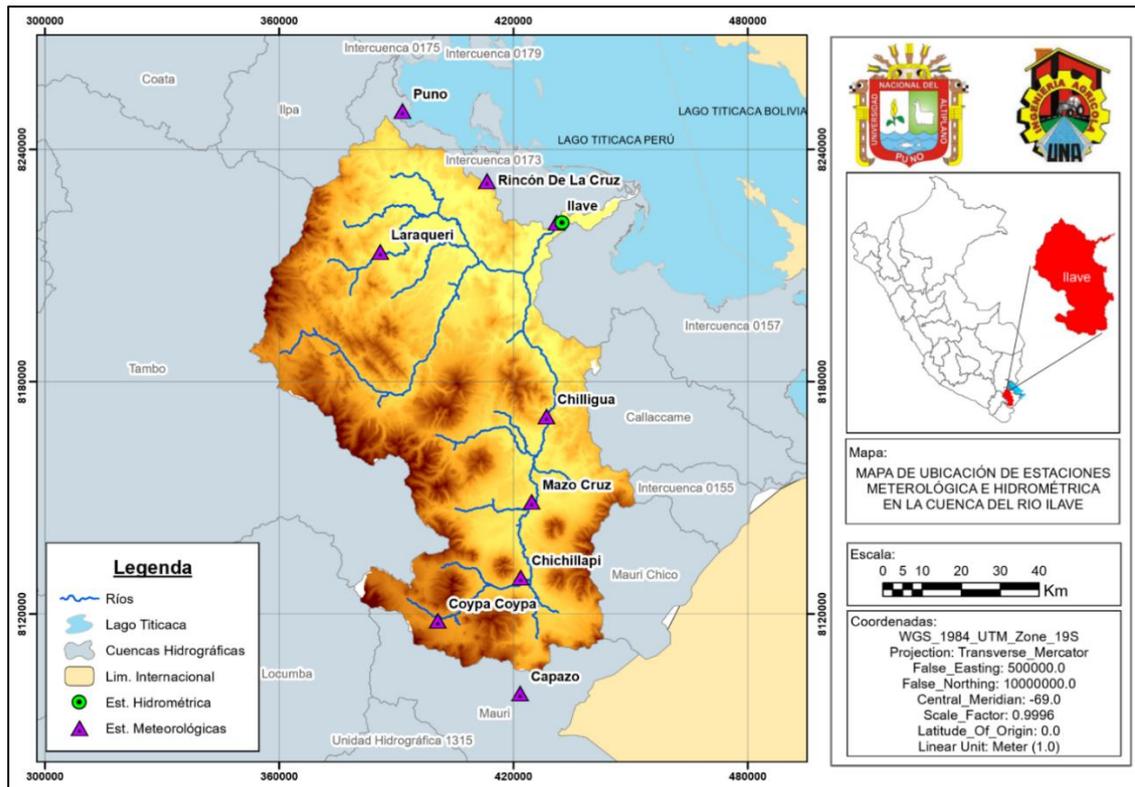


Figura 10: Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométrica en la cuenca del río Ilave.

La información fue descargada a paso de tiempo diario para el periodo 1981 a 2016, mediante código de programación en R Studio. Los datos de precipitación, muestran el comportamiento típico del altiplano con lluvias que inician moderadamente desde el mes de octubre y se intensifican de diciembre hasta marzo, luego los eventos se reducen levemente hasta mayo con precipitaciones mínimas y a partir de junio son imperceptibles hasta agosto. Estos registros definen las temporadas húmedas con altas precipitaciones entre los meses de diciembre a marzo, mientras que las temporadas secas con estiajes casi permanentes entre los meses de mayo a agosto tal como se observa en la Figura 11.

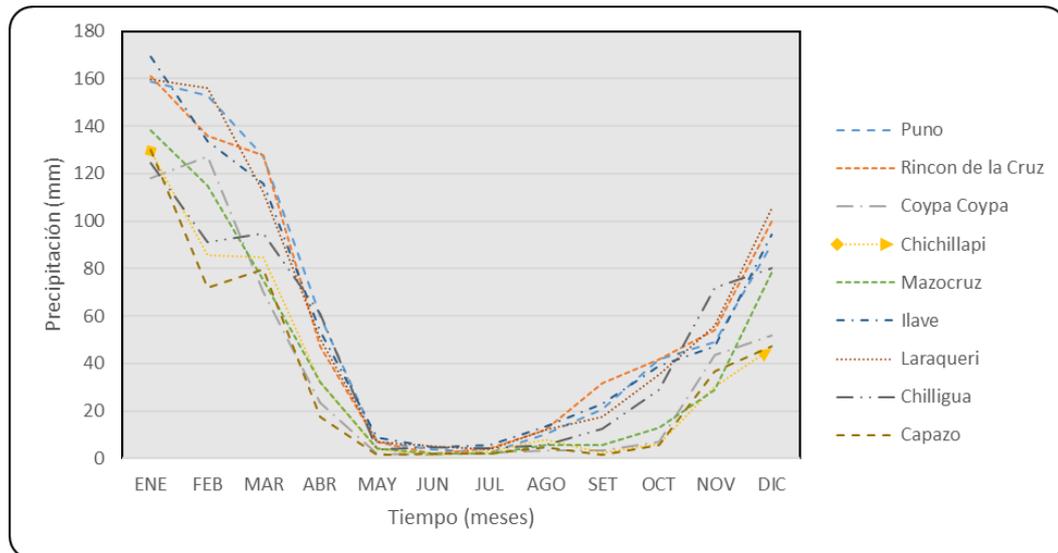


Figura 11: Variación de la precipitación promedio mensual en las estaciones de la cuenca del río Ilave, de enero de 1981 a diciembre de 2016.

En cuanto a la distribución de la temperatura media del aire de la cuenca Ilave, existen algunas variaciones debido a las diferencias de altitud, exposición a los vientos y al sol e influencia del lago Titicaca. En toda la cuenca las temperaturas medias más bajas se producen en el mes de Julio, mientras que las más elevadas se registran en los meses de noviembre a marzo, por lo general centradas en enero, tal como se muestra en la Figura 12.

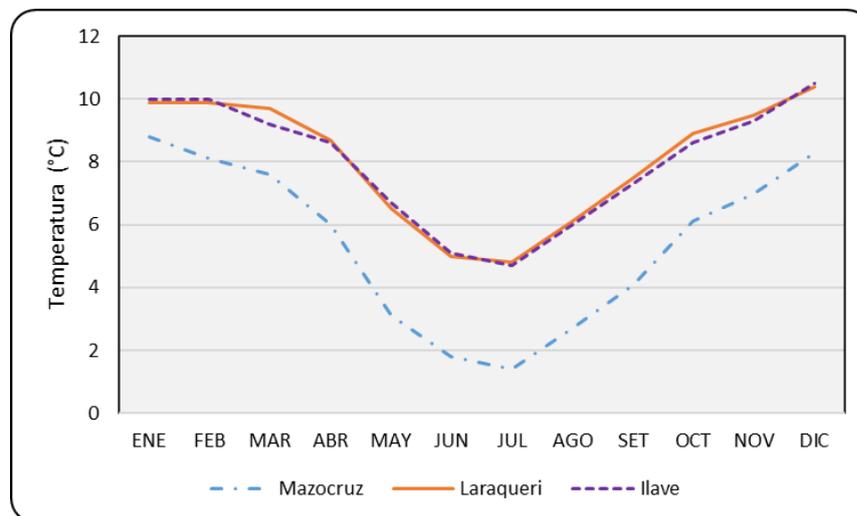


Figura 12: Variación de la temperatura promedio mensual en las estaciones de la cuenca del río Ilave, de enero de 1981 a diciembre de 2016.

Las temperaturas máximas reflejan mayores valores en las zonas de Laraqueri y Mazocruz, donde los valores picos en los meses de octubre y noviembre están por encima de los 15°C; mientras las temperaturas mínimas reflejan que los meses de helada se

presenta de mayo a setiembre, con descensos de hasta en menos 13°C, en la parte alta de la cuenca. El detalle de lo anterior se muestra en la Figura 13.

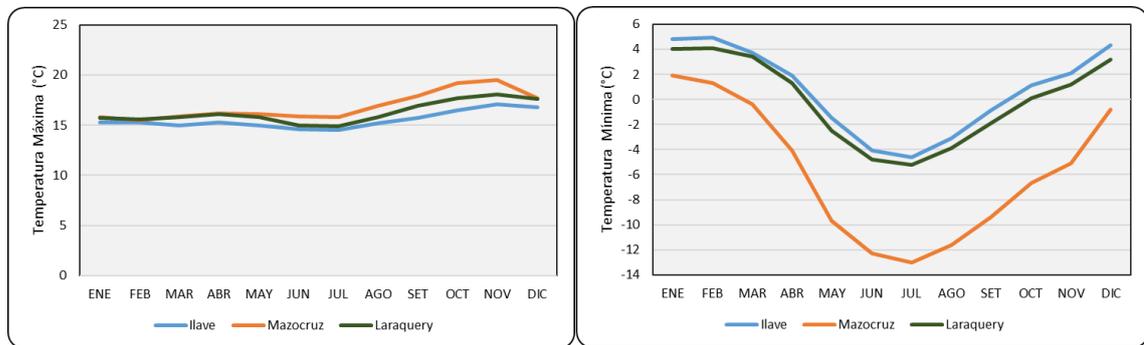


Figura 13: Variación de la temperatura promedio mensual en las estaciones de la cuenca del río Ilave, de enero de 1981 a diciembre de 2016

3.2.3. Información hidrométrica

La información requerida en el presente trabajo de investigación son caudales medios diarios. Para lo cual se consideró los datos de la estación hidrométrica de puente carretera Ilave, para el periodo de 1991 – 2016, cuya información se aprecia en la Tabla 11 y observa en la Figura 14. La estación se encuentra ubicada en el punto de salida de la cuenca, como se muestra en la Figura 10 y es de gran utilidad porque captura el aporte hídrico total.

Tabla 11: Estación hidrométrica puente carretera Ilave.

Nombre	Id Estación	Cuenca	Ubicación Geográfica		
			Latitud	Longitud	Altitud
Puente Carretera Ilave	TITILA001	Ilave	16°05'17.7"	69°37'33.3"	3842

Fuente: SENAMHI

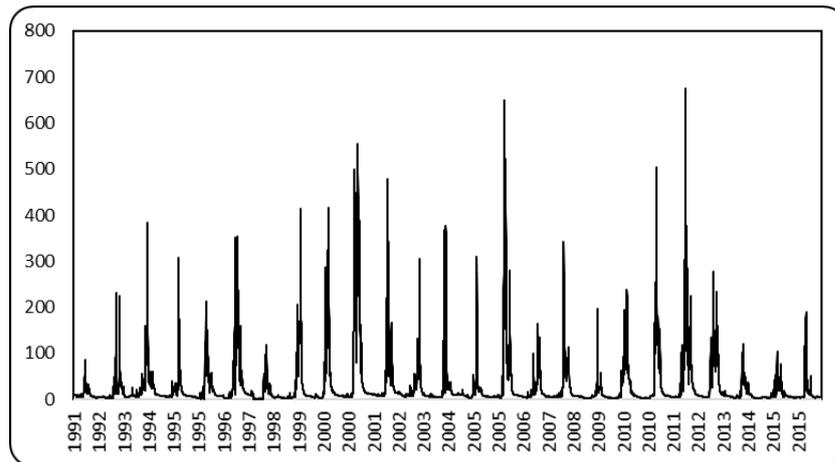


Figura 14: Serie de descargas medias diarias histórica del río Ilave.

3.2.4. Programas de computo

Los cálculos y el manejo de datos se realizaron mediante el uso de los softwares descritos en la Tabla 12.

Tabla 12: Software Utilizados en la Investigación.

Software	Descripción
RS Minerve	Plataforma de modelación hidrológica de distribución gratuita, basado en una programación orientada en objetos, que permitió el modelamiento de SAC-SMA.
ArcGIS	Utilizado para el procesamiento de sistemas de información geográfica con formatos RASTER y SHP.
RStudio	Lenguaje de programación utilizado para la ejecución de códigos de procesamiento de información de los GCMs.
Hydraces v6.1	Software utilizado, para el análisis de consistencia y crítica de datos meteorológicos.
Microsoft Office 2016	Programa informático utilizado para el procesamiento de texto, cálculos numéricos y presentación de gráficos.

3.2.5. Equipos de computo

Dentro de los materiales utilizados en la ejecución de esta investigación se tienen los siguientes:

- Procesador Intel CORE i7-2.50 Ghz
- Impresora
- Material de escritorio
- Disco duro externo de capacidad 1 TB

3.3. METODOLOGÍA

La metodología seguida en el presente trabajo de investigación comprende los siguientes procedimientos: (1) Calibración y validación del modelo hidrológico SAC-SMA, (2) Reducción de escala espacial, selección de GCM y corrección de sesgo de las variables climáticas (3) Proyección y análisis de la oferta hídrica superficial bajo escenarios de cambio climático respecto al periodo histórico, los cuales se resumen en el diagrama de flujo de la Figura 15.

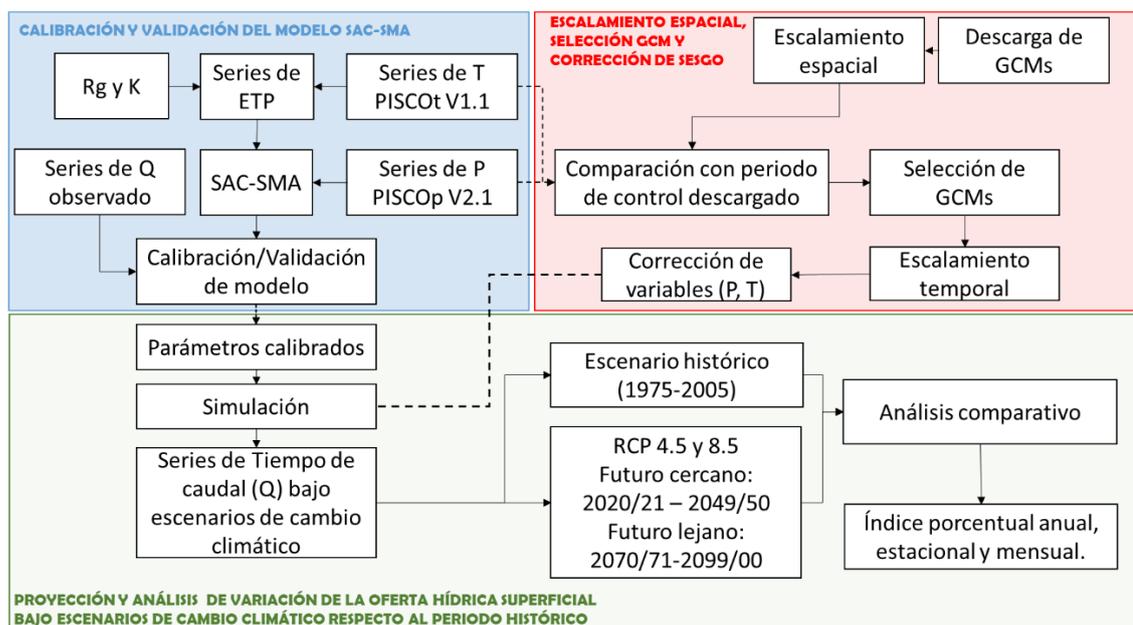


Figura 15: Diagrama de flujo de la metodología empleada en la investigación.

3.3.1. Calibración y validación del modelo hidrológico SAC-SMA.

Para entender el comportamiento hidrológico en el futuro, primero se requiere entender el presente. Para ello se utilizó el modelo hidrológico SAC-SMA, ideal para cuencas mayores a 1000 Km^2 . SAC-SMA requiere como datos de entrada los parámetros físicos de la cuenca (área, ubicación y altitud del centroide de la cuenca) y variables climáticas (precipitación y evapotranspiración) a una escala diaria. Para representar los procesos hidrológicos, el modelo se basa en un sistema de tres tanques y 16 parámetros, los cuales deben ser calibrados y validados.

3.3.1.1. Series de precipitación

Los datos de precipitación fueron descargados a través del producto PISCOp V2.1 para el periodo 1981 - 2016. Se seleccionaron 9 estaciones meteorológicas (6 dentro de

la cuenca), dichas estaciones se encuentran referenciadas en la Tabla 10 y representado en la Figura 11.

Con la finalidad de hacer una crítica de información del producto PISCO y su correcta aplicación se utilizó el Método de Vector Regional (MVR). La hipótesis fundamental se basa en asumir que, para una misma zona climática sometida a un mismo régimen de precipitaciones, los valores totales pluviométricos anuales son pseudo-proporcionales, con una pequeña variación aleatoria de cada año debido a la repartición de las lluvias dentro de la zona.

Los parámetros evaluados son: a) La comparación de las desviaciones estándar de desvíos (DED) entre los índices de las estaciones y las del Vector Regional (VR), donde fuertes valores indican probablemente una mala calidad de la estación, de lo contrario podría encontrarse dentro del margen de una misma zona climática b) Correlación entre la estación y el VR, donde si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos entre sí, mientras valores bajos que el promedio de la zona, indican una alta probabilidad de tener errores o que pertenezcan a otra zona climática.

3.3.1.2. Series de temperatura

Los datos de temperatura fueron obtenidos del producto PISCOt v.1.1., para 03 estaciones (Ilave, Laraqueri y Mazocruz), las cuales fueron seleccionadas considerando que tienen registro histórico de datos observados utilizadas para interpolación de los datos PISCOt v1.1. y se encuentren dentro de la cuenca del río Ilave. La información descargada corresponde a temperaturas máximas y mínimas diarias para el periodo 1981 – 2016, los cuales fueron promediados para el input del modelo SAC-SMA.

3.3.1.3. Series de evapotranspiración

La evapotranspiración potencial se estimó en base a la metodología propuesta por Turc (Turc, 1954), que depende de la radiación solar global media en el suelo ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$). El cálculo lo realiza de manera automática el programa RS MINERVE en base a los datos de temperatura, valores de latitud y longitud de la zona de estudio, mediante la siguiente ecuación:

$$ETP = CoeffETP * K * \frac{T}{T + 15} * (R_g + 50)$$



Dónde: ETP: Evapotranspiración (mm/mes), T : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); K : Constante y R_g : Radiación global.

3.3.1.4. Serie de caudales observados

Los datos fueron obtenidos de la estación hidrométrica puente llave, administrada por el SENAMHI, para el periodo de 1991 – 2016 a paso de tiempo diario. El detalle de la estación se muestra en la Tabla 11.

3.3.1.5. Modelo SAC – SMA

Para la adecuación del modelo propuesto se realizó una especialización del área de estudio en sub cuencas, en base a las unidades hidrográficas considerados en el estudio de (Autoridad Nacional del Agua, 2009), como se muestra en la Figura 16. Los cuales fueron delimitados en el entorno ArcGIS, de donde se obtuvieron los parámetros de área (m^2), centro de gravedad de la cuenca (x e y) en metros y altitud (m.s.n.m.) correspondiente al centro de gravedad de las sub cuencas. Mediante esta información RS MINERVE, asigna una estación virtual a la altitud (z) del centro de gravedad de cada sub cuenca, los cuales fueron obtenidos mediante estadísticas zonales a partir del uso del modelo de elevación digital (DEM) descargado del USGS NASA. El detalle de las sub cuencas se muestra en la Tabla 13.

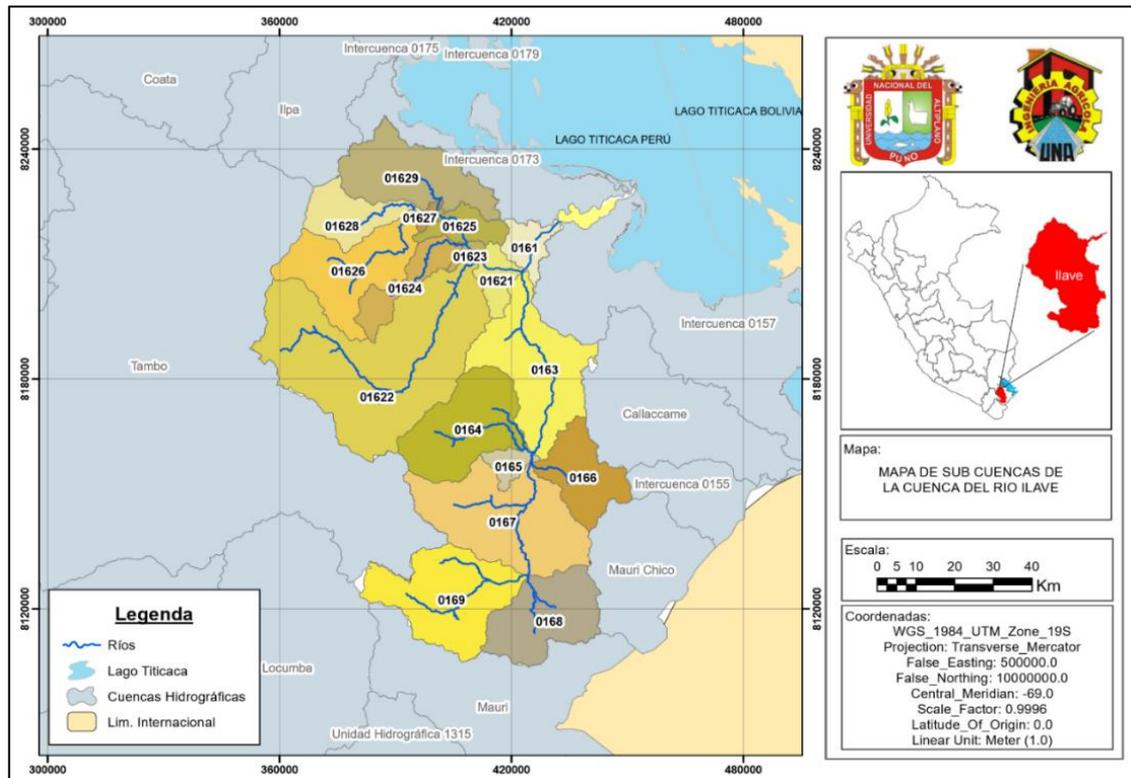


Figura 16: Divisoria de sub cuencas para el área de estudio

Tabla 13: Parámetros de las sub cuencas de la cuenca Ilave

N°	Nombre	Código	Area (m2)	X (m)	Y (m)	Z (msnm)
1	Alto Aguas Calientes	1629	556584700	393982	8233140	4246
2	Medio Alto Aguas Calientes	1627	26735430	398933	8222679	3971
5	Medio Aguas Calientes	1625	154591800	408081	8219625	4130
6	Cutimbo	1628	277567300	378153	8222894	4496
8	Medio Bajo Aguas Calientes	1623	33943980	408807	8212666	4006
9	Bajo Ilave	161	139772200	424370	8214931	4072
10	Loripongo	1626	578600300	378387	8208814	4551
11	Uncallane	1622	1703982000	385173	8186098	4656
12	Bajo Aguas Calientes	1621	137089200	416077	8206304	4186
14	Tunquipa	1624	225540600	392577	8205156	4321
15	Conduriri	164	605278300	407952	8167408	4646
16	Medio Bajo Ilave	163	740237300	426160	8183066	4285
17	Medio Ilave	165	85982230	419331	8157776	4323
18	Ayupalca	166	364381800	438506	8154952	4471
20	Medio Alto Ilave	167	885550000	418355	8143305	4556
22	Llusta	168	515680100	428721	8118021	4654
25	Alto Ilave	169	711168100	403337	8123328	4814

En base a la información generada en el entorno ArcGIS, se realiza la adecuación del área de estudio con un enfoque semidistribuido en el entorno RS MINERVE, donde cada sub cuenca es representada por el modelo hidrológico (SAC-SMA). Cada modelo

recibe información meteorológica a partir de la conexión de la estación virtual asociado previamente mediante la interpolación de Shepard (1968). A partir de ello se generan caudales de salida por cada sub cuenca y se conecta a una unión (junction), que permite el ingreso de caudales provenientes de otras subcuencas, de tal forma que se van acumulando hasta llegar punto de salida de la cuenca. En este punto se usó también el objeto comparador, con el fin de conectar el caudal simulado con el observado, de tal manera que nos permita hacer la comparación de caudales mediante análisis gráfico y estadístico. El esquema de adecuación de la cuenca se muestra en la Figura 17.

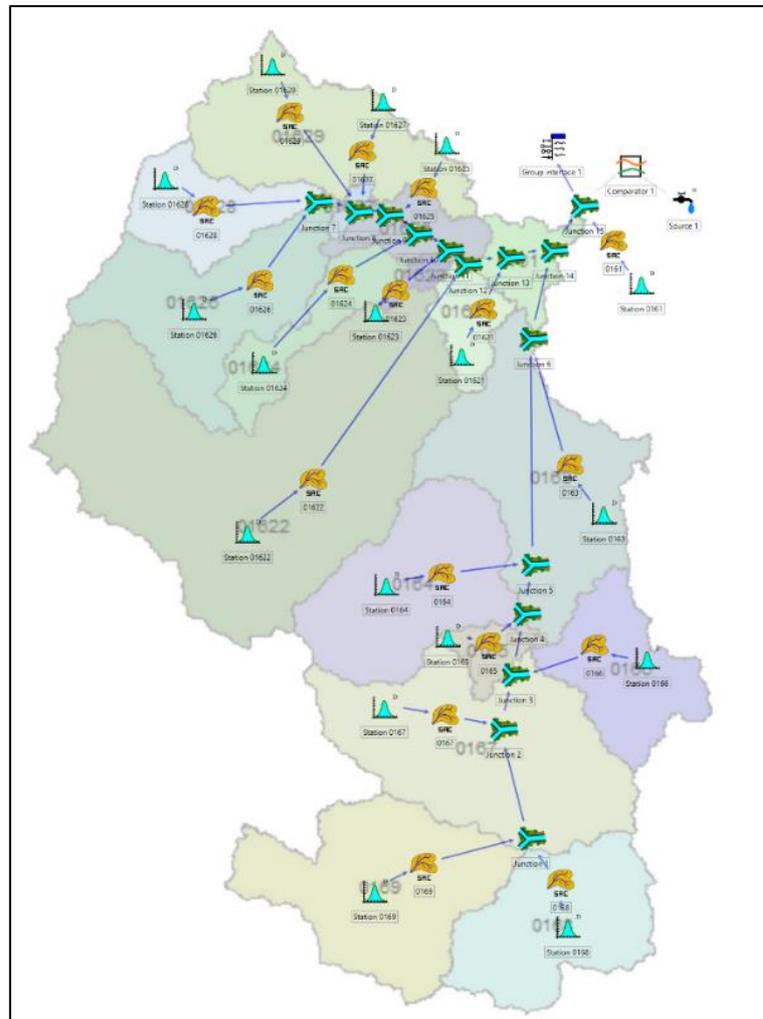


Figura 17: Adecuación de la cuenca Ilave en el entorno RS MINERVE.

3.3.1.6. Calibración y validación del modelo

En el desarrollo del modelo, se tomó el año hidrológico 1991/92 como periodo de calentamiento y el periodo comprendido entre 1992/93 – 2003/04 para la calibración y los años 2004/05 – 2015/16 para la validación.



El periodo de calentamiento es una práctica común en la evaluación de los caudales estimados, por las discrepancias que puedan presentarse al comienzo de un período de simulación debido a la selección de las condiciones iniciales (Mouelhi, Michel, Perrin, & Andréassian, 2006). Los cuales indefectiblemente inciden en los estadísticos de eficiencia.

En cuanto al proceso de calibración, se partió de un análisis de sensibilidad de los parámetros de modelo en base a cuatro estadísticos de eficiencia (Nash-Sutcliffe, Nash-Ln, R^2 y RRMSE) a fin de jerarquizarlos de mayor a menor incidencia en la respuesta hidrológica de la cuenca. A partir de ello se realizó un enfoque combinado de calibración manual y automática, tal como recomienda Boyle, Gupta y Sorooshian (2000).

Para la calibración automática se usó el Toolbox RS expert de RS MINERVE, mediante el método de Suffled Complex – University of Arizona (SCE-UA), propuesto por Duan, Sorooshian y Gupta (1992). Donde la función objetivo se centró en minimizar el error relativo de la raíz cuadrática media (RRMSE) y maximizar los coeficientes de Nash-Sutcliffe (Nash), coeficiente logarítmico de Nash-Sutcliffe (Nash-Ln) y coeficiente de correlación de Pearson. Así mismo siguiendo la recomendación de Garcia et al. (2018), para mejorar el rendimiento en el proceso de calibración, se optimizó el coeficiente de corrección multiplicativo para datos de evapotranspiración (CoeffETP) y coeficiente de corrección aditivo para temperatura (CoeffT).

Una vez concluido el proceso de calibración, con el fin de evaluar el desempeño del modelo SAC-SMA mediante un análisis gráfico y los indicadores estadísticos de eficiencia descritos previamente se realizó la etapa de validación, en el periodo de 2003/04 – 2015/16, manteniendo constante los parámetros previamente determinados en el proceso de calibración.

3.3.2. Escalamiento espacial, selección de GCM y corrección de sesgo

Para estimar el efecto del cambio climático sobre la oferta hídrica superficial es necesario conocer el comportamiento de las variables meteorológicas de precipitación y temperatura asociada a los GCMs, que corresponden a modelos grillados de la atmósfera, océano y superficie terrestre que resuelven ecuaciones de conservación de masa y momentum. En este caso los GCMs utilizados poseen una resolución espacial de $0.25 \times 0.25^\circ$ y un paso temporal diario.

3.3.2.1. Descargas de GCMs

La información de precipitación y temperatura son descargados de la plataforma de NEX de la NASA disponibles en (<https://nex.nasa.gov/nex/>), cuyo servidor nos proporciona 21 GCMs del CMIP5, 2 escenarios climáticos (RCP4.5 y 8.5), salidas de 3 variables (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) con una resolución espacial de 0.25° para un paso temporal diario en formato .nc.

Dicha información fue generada a partir de los outputs de los Modelos Climáticos Globales utilizando un método de degradación espacial por corrección de sesgo desglose (Bias – Correction Spatial Disaggregation, BCSD). El algoritmo compara los resultados modelados con las observaciones climáticas durante un periodo común y utiliza los detalles espaciales proporcionados por conjuntos de datos derivados de observaciones para interpolar las salidas de los GCMs a redes de mayor resolución (Thrasher & Nemani, 2015).

Una vez descargada la información, a fin de representar de manera correcta la climatología de la cuenca, se realizó un escalamiento estadístico en dos etapas, (a) un escalamiento espacial, para poder seleccionar el GCM y (b) un escalamiento temporal, con el fin de generar funciones de transferencia en el periodo presente y poder corregir los datos climáticos en el periodo histórico y futuro del GCM.

3.3.2.2. Escalamiento espacial

El escalamiento espacial se basa en criterios de distancia entre la coordenada de las estaciones meteorológicas con respecto a los puntos de los GCMs. Para la presente investigación se optó por el criterio de interpolación de inverso a la distancia (IDW). Proceso que fue realizado en el programa informático RS Studio, con el código desarrollado por Harold Llauca, el cual se encuentra detallado en el Anexo A. El escalamiento se realizó para el periodo 1975 – 2005 (30 años) a un paso de tiempo diario de precipitación, temperatura máxima y mínima de los 21 modelos climáticos de la base de datos de la NASA-NEX-GDDP. La metodología se muestra en la Figura 18.

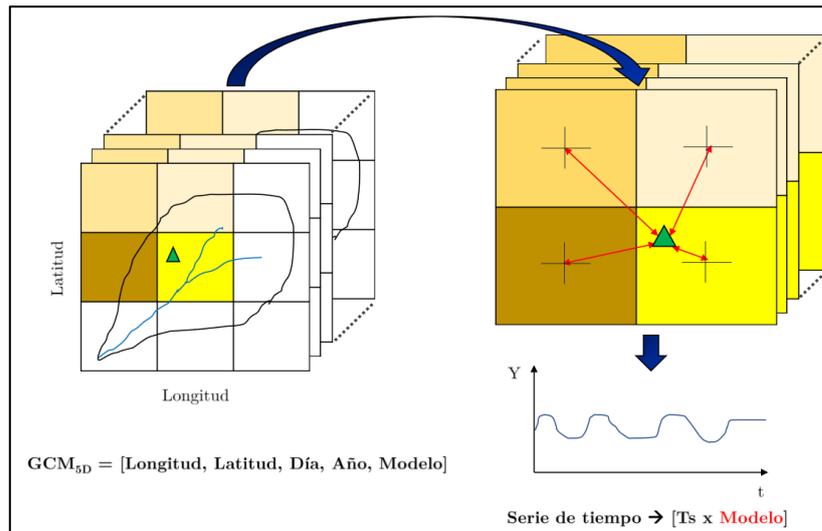


Figura 18: Metodología de escalamiento espacial para obtener datos para un punto de interés por el método de interpolación IDW, los recuadros delimitados por líneas negras representan la grilla de los GCMs y el triángulo verde la estación de interés.

Fuente: Modelos de cambio climático para la evaluación de la disponibilidad hídrica futura (Llauca, 2018)

La aplicación del método IDW para el caso de las variables de temperatura y precipitación, se sustenta en el concepto de zonabilidad climática, es decir en la similitud de las condiciones climáticas del punto para el cual se requiera la determinación de las variables climáticas. El estimado se calcula como la media ponderada de los valores registrados en las estaciones cercanas, a las cuales se les asigna un peso (Andrade & Moreano, 2013).

3.3.2.3. Selección de GCMs

Según Phillips, Deser y Fasullo (2014) afirman: “Los modelos climáticos son una herramienta esencial para estudiar y predecir el cambio climático. Sin embargo, su utilidad depende de cuán realistas simulen las estadísticas del clima actual” (p. 453). En tal sentido, la selección de los GCMs, se realizó en base a su capacidad de representar las variables meteorológica como son la precipitación y temperatura, respecto a la data histórica PISCO. Para ello se utilizaron el método estadístico de error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación R^2 .

- ❖ **Error cuadrático medio (RMSE)**, mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos, es decir cuantifica cuan diferente es un conjunto de valores. Cuanto más pequeño es el valor RMSE, más cercano son los valores predichos y observados (García et al., 2018).

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

Donde: P_i : valores predichos, O_i : valores observados y n : número total de datos.

- ❖ **Coefficiente de determinación (R^2)**, describe la proporción de la varianza en los datos medidos explicada por el modelo. Tiene un rango de 0 a 1, donde valores altos indican menos error de la varianza. Valores mayores a 0.5 son considerados como aceptables (Moriassi et al., 2007).

$$R^2 = \frac{\sum XY - (\sum X \sum Y)/n}{\sqrt{(\sum X^2 - (\sum X)^2/n)(\sum Y^2 - (\sum Y)^2/n)}}$$

Donde: X,Y: variables y n : número de variables.

3.3.2.4. Escalamiento temporal

“Los resultados de la información espacial de los GCMs presentan errores sistemáticos (sesgo) en las salidas de las variables climáticas, que no son acorde a la realidad de una cuenca hidrográfica” (Santos, 2016). Para lo cual el escalamiento temporal o conocido también como corrección de sesgo, presenta una metodología que consiste en la comparación de las curvas de duración mensual a nivel diario en base al registro histórico de las estaciones meteorológicas y los resultados del proceso de escalamiento espacial, con los cuales se generan funciones de transferencia tanto para la variable de precipitación y temperatura. El propósito es lograr que la función de distribución acumulada de datos del GCMs sea igual a la función de distribución acumulada observada (Piani et al., 2010).

$$cdf_{obs}(f(x)) = cdf_{sim}(f(x))$$

Donde: cdf_{obs} : Función de distribución acumulada observada, cdf_{sim} : Función de distribución acumulada simulada.

3.3.2.5. Corrección de variables de precipitación y temperatura

Las funciones de transferencia obtenidas a partir del escalamiento temporal en el periodo presente se consideran válidas para el futuro, permitiendo obtener proyecciones



consistentes de precipitación y temperatura del GCM seleccionado, tanto para el futuro cercano (2020 – 2050) y futuro lejano (2070 – 2100). Este proceso se llevó a cabo mediante condicionales en la herramienta informática Excel.

3.3.3. Proyección y análisis de la variación de la oferta hídrica superficial bajo escenarios de cambio climático.

La proyección de la oferta hídrica superficial tanto para el futuro cercano (2020-2050) y para el futuro lejano (2070-2100), consiste en una serie de simulaciones teniendo como datos de entrada la precipitación y temperatura corregida del GCM y manteniendo constante los parámetros de calibración obtenidos en el periodo presente (1991-2016), es decir, asumimos que dichos parámetros no variarán en el tiempo.

Los resultados que se obtengan a partir de las simulaciones futuras, serán analizados mediante el índice de variación porcentual respecto al periodo histórico, tanto a escala mensual, estacional y anual.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SAC-SMA

Con el fin de lograr una adecuada calibración y validación del modelo, primero es necesario cerciorarnos de la calidad de nuestros datos de entrada y conocer los parámetros de mayor incidencia en la cuenca. Para lo cual se realizó el análisis exploratorio de datos y el análisis de sensibilidad de parámetros.

4.1.1. Análisis exploratorio de datos

El análisis de consistencia y homogeneidad se realizó mediante el método del vector regional de índice pluviométrico anual.

Según la Figura 19, muestra que los índices anuales del Vector Regional y de las estaciones, presentan similar variabilidad y en su mayoría se encuentran dentro los límites de confianza del vector regional, lo cual indica una confiabilidad de la información utilizada. De igual manera los índices acumulados de las estaciones consideradas, no presentan quiebres significativos, es decir presentan una tendencia casi lineal, tal como se ilustra en la Figura 20.

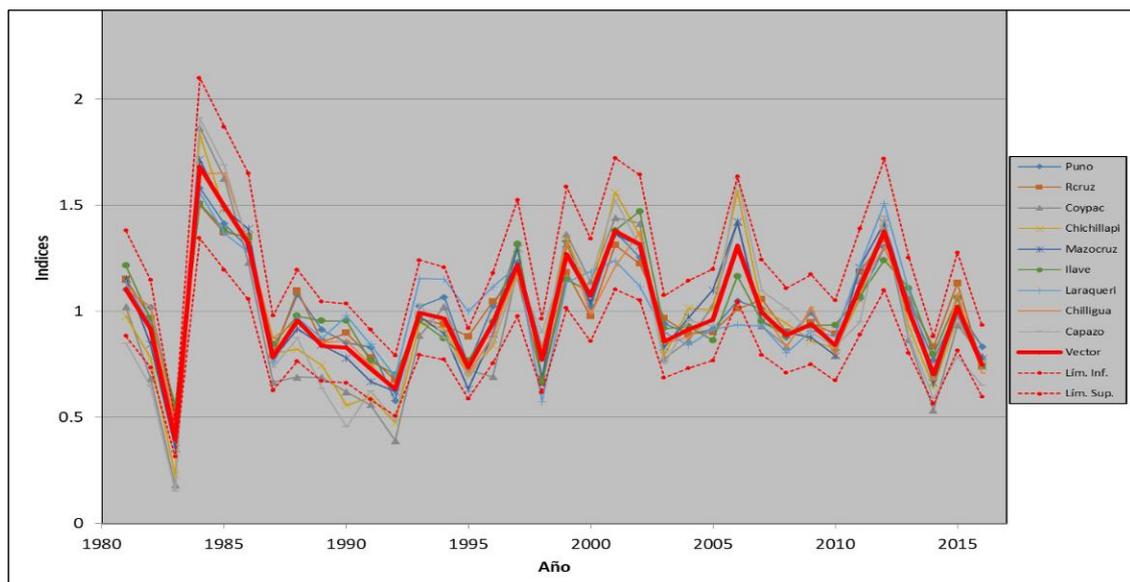


Figura 19: Índices anuales del vector regional y de las estaciones meteorológicas consideradas en la cuenca del río Ilave (Brunet Moret)

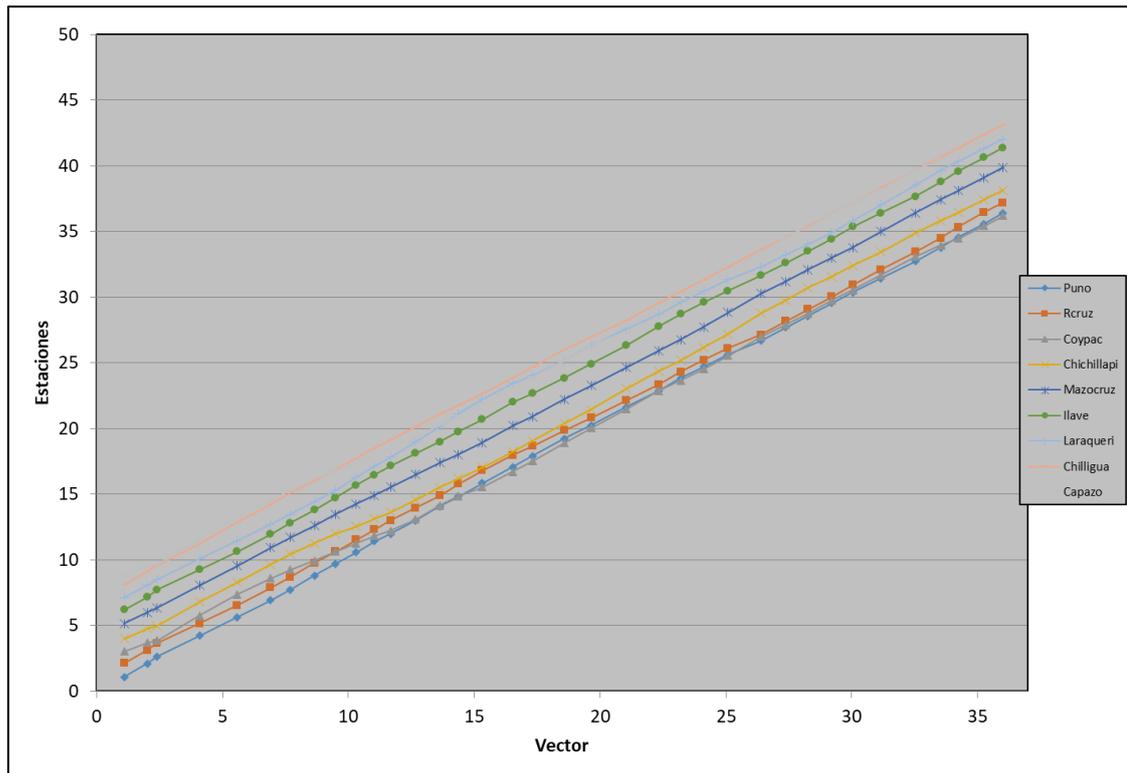


Figura 20: Suma de los índices del vector regional y de las estaciones pluviométricas.

En relación a la crítica de los datos, podemos deducir que las 09 estaciones evidencian una alta proporcionalidad conforme a la correlación entre los índices de Vector Regional y las estaciones (Correl/Vector), que varían entre 0.879 – 0.985, además la desviación estándar de los desvíos (DED) son menores a 0.153, tal como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de análisis para la evaluación de homogeneidad

Estación	Correl. /Vector	D.E. Desvíos
Puno	0.963	0.076
Rincon de la Cruz	0.940	0.096
Coypa	0.965	0.131
Chichillapi	0.968	0.106
Mazocruz	0.985	0.057
Ilave	0.945	0.089
Laraquery	0.879	0.125
Chilligua	0.975	0.058
Capazo	0.943	0.153

4.1.2. Análisis de sensibilidad de parámetros

El análisis de sensibilidad, consistió en la evaluación de los 16 parámetros del modelo SAC-SMA, en base a los estadísticos de Nash Sutcliffe, Nash-In, coeficiente de correlación de Pearson y RRMSE, de acuerdo al rango recomendado por su creador. Los resultados de las variaciones se presentan en la Figura 21, 22 y 23 y detallan en la Tabla 15.

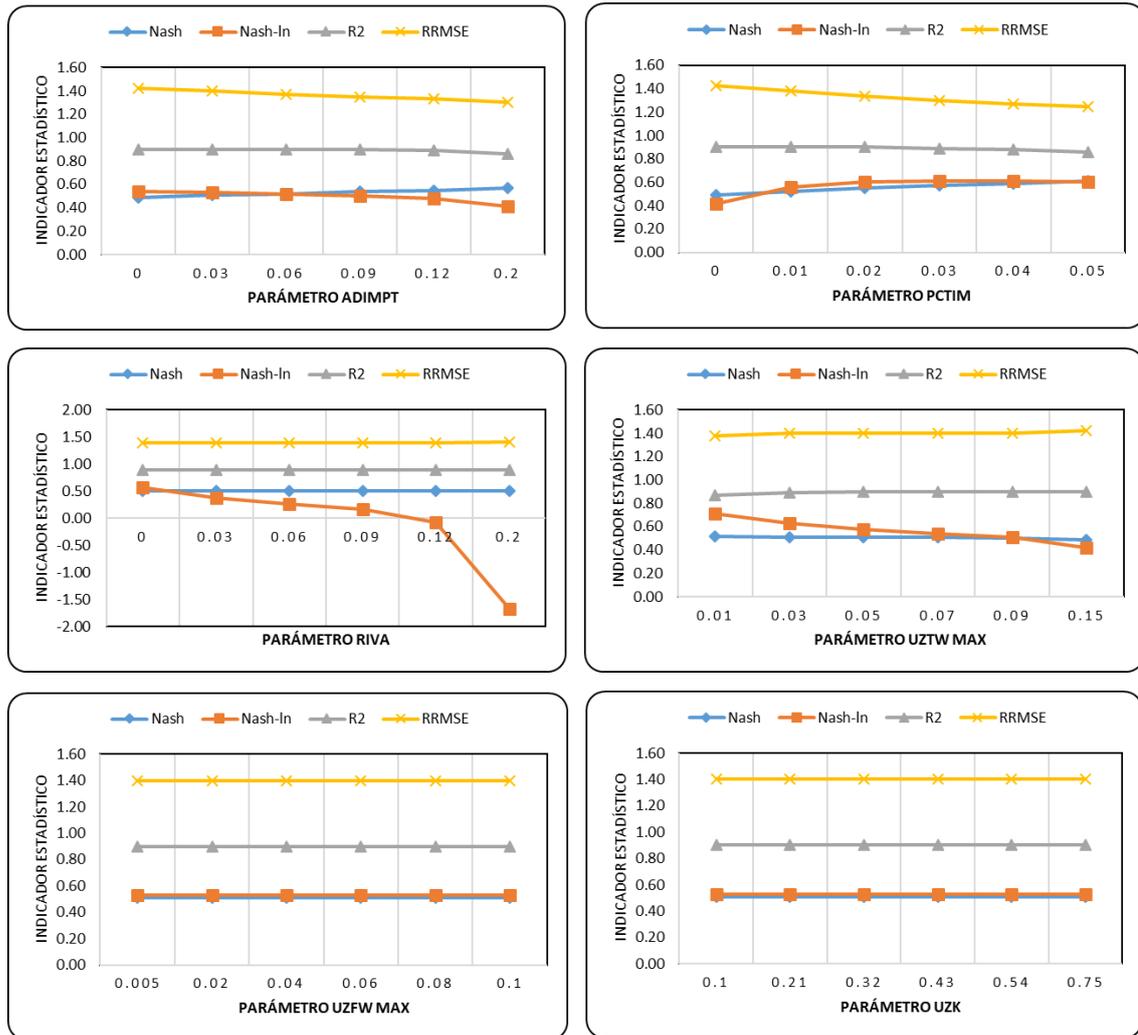
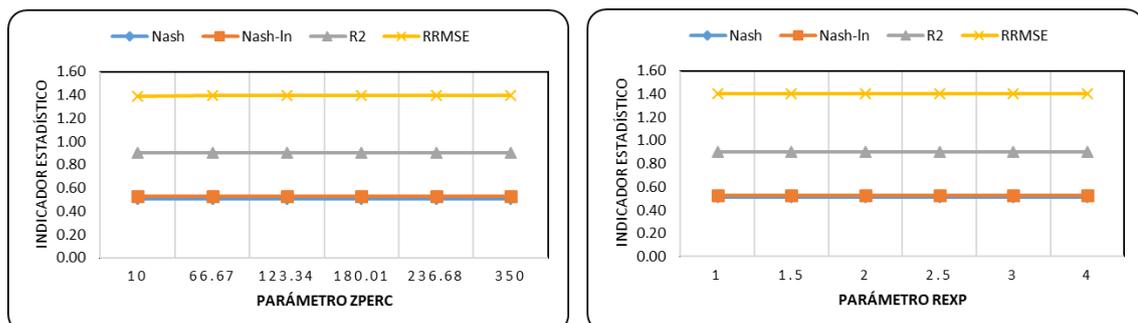


Figura 21: Análisis de sensibilidad del modelo SAC-SMA (a).



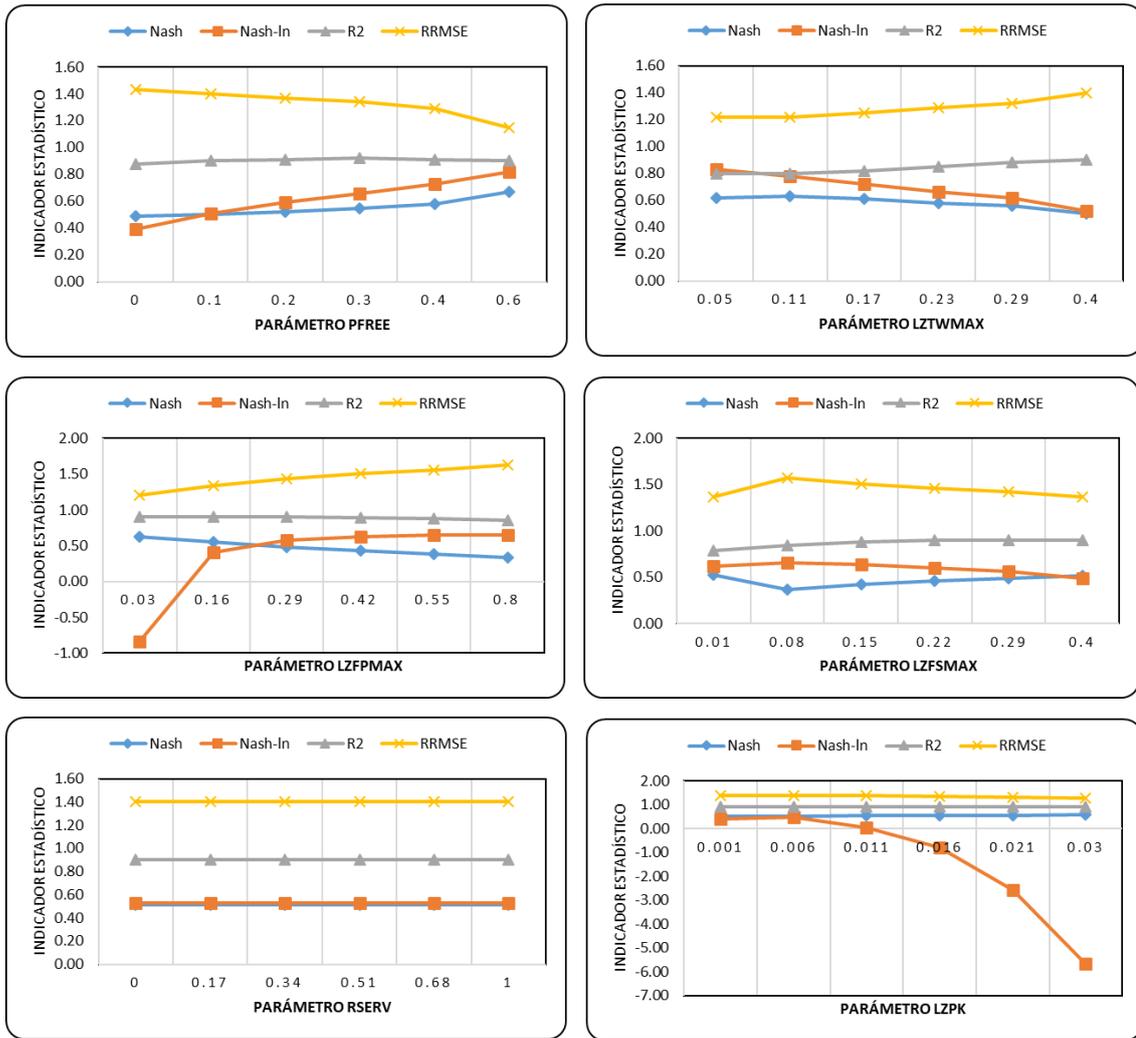


Figura 22: Análisis de sensibilidad del modelo SAC-SMA (b).

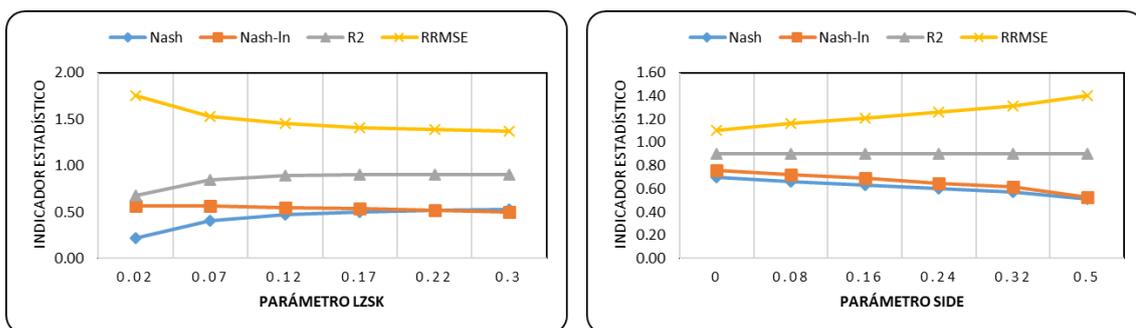


Figura 23: Análisis de sensibilidad del modelo SAC-SMA (c).

Tabla 15: Variación de los parámetros del modelo SAC-SMA

Fracción máxima de área impermeable					Fracción permanente de área impermeable						
Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE	Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE		
Adimpt (-)	0	0.49	0.54	0.9	1.42	Pctim (-)	0	0.49	0.42	0.90	1.43
	0.03	0.51	0.53	0.9	1.40		0.01	0.52	0.56	0.90	1.38
	0.06	0.52	0.52	0.9	1.37		0.02	0.55	0.60	0.90	1.34
	0.09	0.54	0.50	0.9	1.35		0.03	0.57	0.61	0.89	1.30
	0.12	0.55	0.48	0.9	1.33		0.04	0.59	0.61	0.88	1.27
	0.2	0.57	0.41	0.8	1.30		0.05	0.61	0.60	0.86	1.25
Fracción de área vegetación riverena					Capacidad máxima del agua confinada para la zona superior						
Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE	Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE		
Riva (-)	0	0.51	0.57	0.9	1.40	UztwMax (m)	0.01	0.52	0.71	0.87	1.38
	0.03	0.51	0.38	0.9	1.40		0.03	0.51	0.63	0.89	1.40
	0.06	0.50	0.27	0.9	1.40		0.05	0.51	0.58	0.90	1.40
	0.09	0.50	0.17	0.9	1.40		0.07	0.51	0.54	0.90	1.40
	0.12	0.50	-0.07	0.9	1.40		0.09	0.50	0.51	0.90	1.40
	0.2	0.50	-1.68	0.9	1.41		0.15	0.49	0.42	0.90	1.42
Capacidad máxima para el agua libre en la zona superior					Tasa de intercambio de agua de la zona de superior						
Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE	Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE		
UzfwMax (m)	0.005	0.51	0.53	0.9	1.40	Uzk (1/d)	0.1	0.51	0.53	0.90	1.40
	0.02	0.51	0.53	0.9	1.40		0.21	0.51	0.53	0.90	1.40
	0.04	0.51	0.53	0.9	1.40		0.32	0.51	0.53	0.90	1.40
	0.06	0.51	0.53	0.9	1.40		0.43	0.51	0.53	0.90	1.40
	0.08	0.51	0.53	0.9	1.40		0.54	0.51	0.53	0.90	1.40
	0.1	0.51	0.53	0.9	1.40		0.75	0.51	0.53	0.90	1.40
Proporción entre las tasas máximas y mínimas de percolación					Parámetro de forma de la curva de percolación						
Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE	Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE		
Zperc (-)	10	0.51	0.53	0.9	1.39	Rexp (-)	1	0.51	0.53	0.90	1.40
	66.67	0.51	0.53	0.9	1.40		1.5	0.51	0.53	0.90	1.40
	123.3	0.51	0.53	0.9	1.40		2	0.51	0.53	0.90	1.40
	180	0.51	0.53	0.9	1.40		2.5	0.51	0.53	0.90	1.40
	236.7	0.51	0.53	0.9	1.40		3	0.51	0.53	0.90	1.40
	350	0.51	0.53	0.9	1.40		4	0.51	0.53	0.90	1.40
Fracción de percolación que va directamente a la zona inferior de agua libre almacenada					Capacidad de tensión del agua en la zona inferior						
Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE	Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE		
Pfree (-)	0	0.49	0.39	0.9	1.43	LztwMax (m)	0.05	0.62	0.83	0.80	1.22
	0.1	0.50	0.51	0.9	1.40		0.11	0.63	0.78	0.80	1.22
	0.2	0.52	0.59	0.9	1.37		0.17	0.61	0.72	0.82	1.25
	0.3	0.55	0.66	0.9	1.34		0.23	0.58	0.66	0.85	1.29
	0.4	0.58	0.73	0.9	1.29		0.29	0.56	0.62	0.88	1.32
	0.6	0.67	0.82	0.9	1.15		0.4	0.50	0.52	0.90	1.40
Capacidad máxima del agua libre en la zona inferior					Capacidad de agua libre suplementaria de la zona inferior						
Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE	Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE		
LzfpMax (m)	0.03	0.63	-0.84	0.9	1.21	LzfsMax (m)	0.01	0.53	0.62	0.79	1.37
	0.16	0.55	0.41	0.9	1.34		0.08	0.37	0.66	0.84	1.57
	0.29	0.48	0.58	0.9	1.44		0.15	0.42	0.64	0.88	1.51
	0.42	0.43	0.63	0.9	1.51		0.22	0.46	0.60	0.90	1.46
	0.55	0.38	0.65	0.9	1.56		0.29	0.49	0.56	0.90	1.42
	0.8	0.33	0.65	0.9	1.63		0.4	0.52	0.49	0.90	1.37
Fracción del agua almacenada en la zona más baja no transferible					Tasa de agotamiento del almacenamiento de agua libre de la zona baja principal						
Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE	Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE		
Rserv (-)	0	0.51	0.53	0.9	1.40	Lzpk (1/d)	0.001	0.52	0.40	0.91	1.37
	0.17	0.51	0.53	0.9	1.40		0.006	0.51	0.46	0.90	1.39
	0.34	0.51	0.53	0.9	1.40		0.011	0.53	0.04	0.90	1.37
	0.51	0.51	0.53	0.9	1.40		0.016	0.54	-0.79	0.90	1.34
	0.68	0.51	0.53	0.9	1.40		0.021	0.56	-2.56	0.90	1.32
	1	0.51	0.53	0.9	1.40		0.03	0.58	-5.65	0.90	1.29

Tasa de agotamiento del almacenamiento de agua libre de la zona baja suplementaria					Fracción de la percolación profunda que se pierde en la zona libre inferior				
Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE	Parametro	Nash	Nash-In	R	RRMSE
Lzsk (1/d)	0.02	0.22	0.57	0.7	Side (-)	0	0.70	0.76	0.90
	0.07	0.41	0.57	0.9		0.08	0.66	0.72	0.90
	0.12	0.47	0.55	0.9		0.16	0.63	0.69	0.90
	0.17	0.50	0.54	0.9		0.24	0.60	0.65	0.90
	0.22	0.52	0.52	0.9		0.32	0.57	0.62	0.90
	0.3	0.53	0.50	0.9		0.5	0.51	0.53	0.90

4.1.3. Calibración y validación

Los resultados de la calibración se reflejan en la Figura 24, mostrando un comportamiento estable, tanto en los periodos de estiaje como de avenidas. Esta afirmación se respalda por los indicadores de estadísticos de eficiencia de la Tabla 16, donde se aprecia que la eficiencia de Nash es igual a 0.86 y Nash-In igual a 0.81, interpretado con un rendimiento muy bueno según los criterios establecidos por (Moriassi et al., 2007). Además, los errores se encuentran alrededor de 0.76 y presenta un RVB igual a 0.12, es decir sobre estima ligeramente el caudal observado.

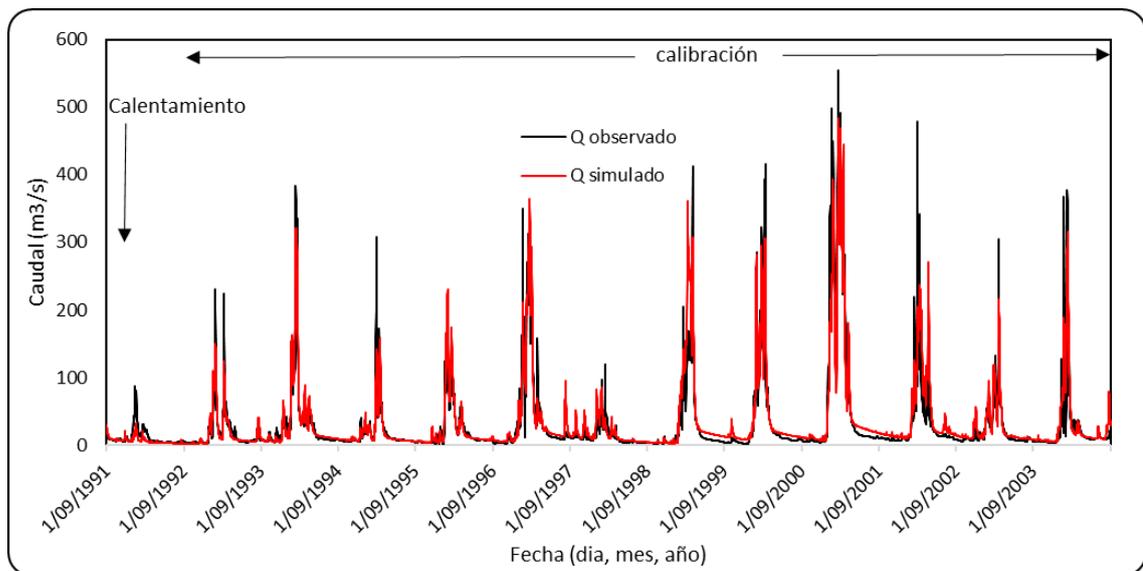


Figura 24: Caudales medios diarios observados y simulados, etapa de calibración.

Tabla 16: Indicadores estadísticos de calibración SAC-SMA

Indicador estadístico	Calibración
	Set1992 - Ago2004
Nash-Sutcliffe	0.86
Nash-In	0.81
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.93
RRMSE	0.76
Volumen relativo de sesgo (RVB)	0.12

En cuanto a los parámetros obtenidos en la etapa de calibración, se muestra en la Tabla 17, donde los parámetros que no anteceden del superíndice (*), son los que se sometieron al proceso de calibración.

Tabla 17: Parámetros calibrados del modelo SAC-SMA

Nombre	Unidad	Valor
(*) Adimp	-	0.03070646
(*) Pctim	-	0.00631134
(*) Riva	-	0.00444578
UztwMax	mm	0.0779201
UzfwMax	mm	0.0477981
Uzk	1/day	0.4765206
Zperc	-	266.1330779
Rexp	-	2.5682787
Pfree	-	0.1241524
LztwMax	mm	0.395025
LzfpMax	mm	0.2300638
LzfsMax	mm	0.3382529
Rserv	-	0.4944524
Lzpk	1/day	0.0045291
Lzsk	1/day	0.1917874
Side	-	0.4992975

Cabe mencionar que los parámetros encontrados no pretenden ser los únicos que se ajusten al modelo, ya que fueron juzgados solo teniendo en cuenta el caudal total de la cuenca; ante la carencia de otros datos observados de los componentes del balance hídrico como por ejemplo el flujo base; que nos permitirían reducir el rango de incertidumbre y representar de una mejor manera el comportamiento hidrológico de la cuenca. Para evaluar la robustez, el modelo fue sometido a un proceso de validación.

En esta última etapa el indicador de eficiencia de Nash se reduce a 0.82 y el Nash-In aumenta a 0.86, demostrando la suficiente capacidad del modelo para la generación de caudales medios diarios de la cuenca del río Ilave. En cuanto al coeficiente de correlación de Pearson mantiene un valor similar al obtenido en la etapa de calibración y el RVB de igual manera indica que el modelo sobrestima ligeramente los caudales observados. Los resultados de los caudales simulados y observados se muestran en la Figura 25 y los indicadores estadísticos de eficiencia en la Tabla 18.

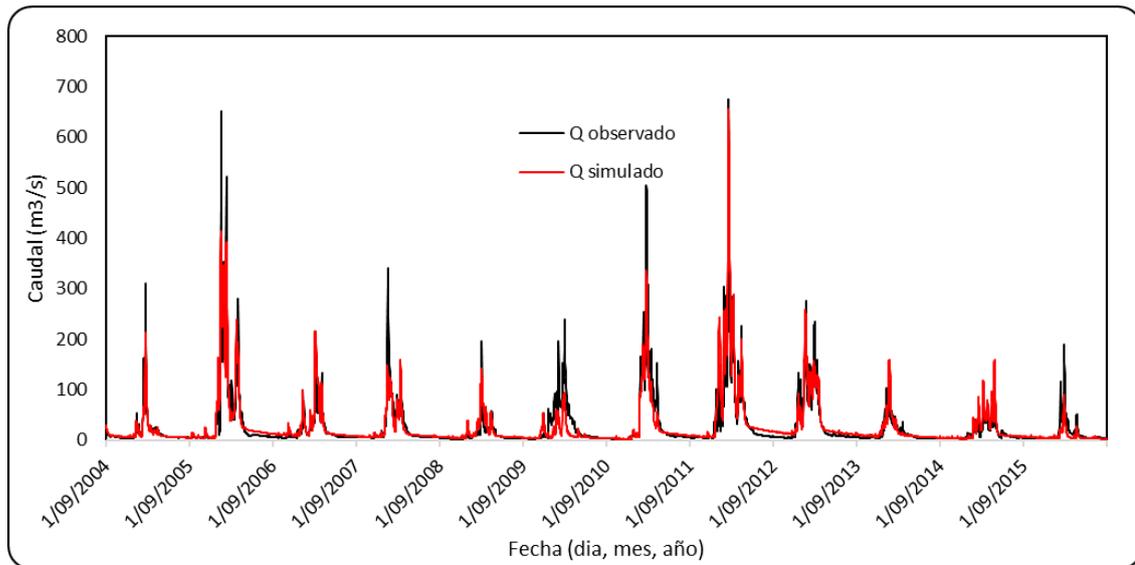


Figura 25: Caudales medios diarios observados y simulados, etapa de validación.

Tabla 18: Indicadores estadísticos de validación SAC-SMA

Indicador estadístico	Validación
	Set2004 - Ago2016
Nash-Sutcliffe	0.82
Nash-In	0.86
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.91
RRMSE	0.84
Volumen relativo de sesgo (RVB)	0.03

4.2. ESCALAMIENTO ESPACIAL, SELECCIÓN DE GCM Y CORRECCIÓN DE SESGO.

4.2.1. Escalamiento espacial

Los resultados del escalamiento espacial de las variables de precipitación y temperatura realizados en periodo histórico (1981 – 2005), se ilustran en la Figura 26 y 27 para la estación Ilave, y en el Anexo B para el resto de estaciones. Donde para el caso de la estación Ilave, los GCMs representan de manera adecuada las variables obtenidas de PISCOp v2.1 y PISCOt v1.1., sin embargo, no siempre fueron así en las demás estaciones donde en su mayoría presentaron una sobrestimación de la precipitación en el mes de diciembre y subestimación en el mes de enero. Mientras que la temperatura muestra un buen ajuste tanto para la estación Ilave y Laraqueri, y una sobreestimación en todo lo meses de año para la estación mazacruz.

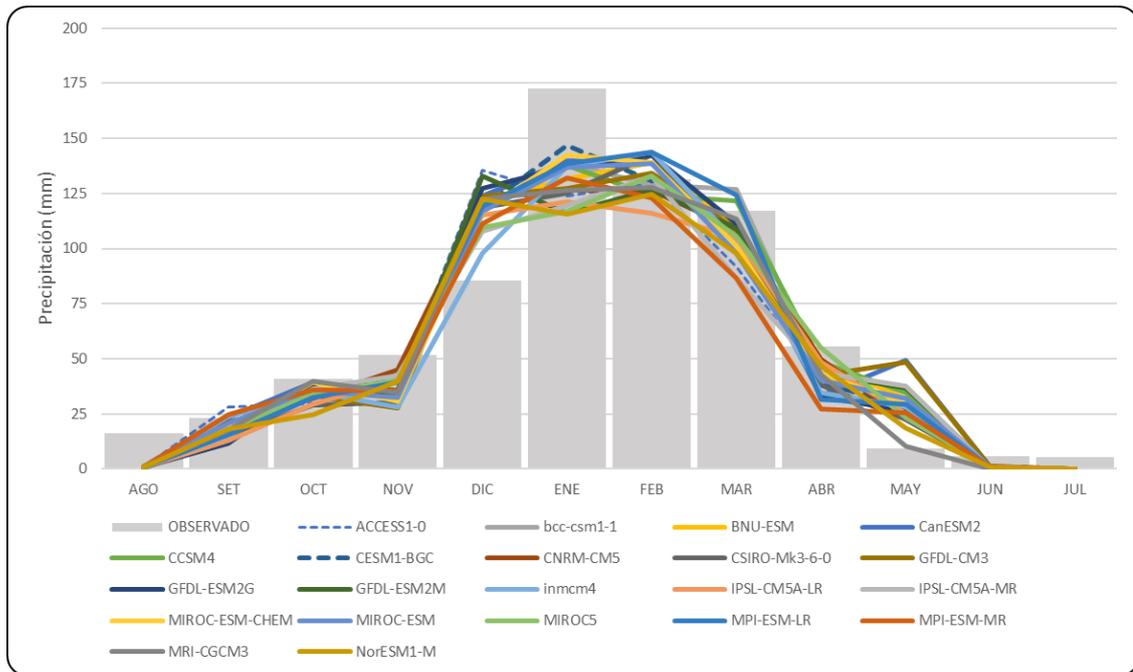


Figura 26: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Ilave.

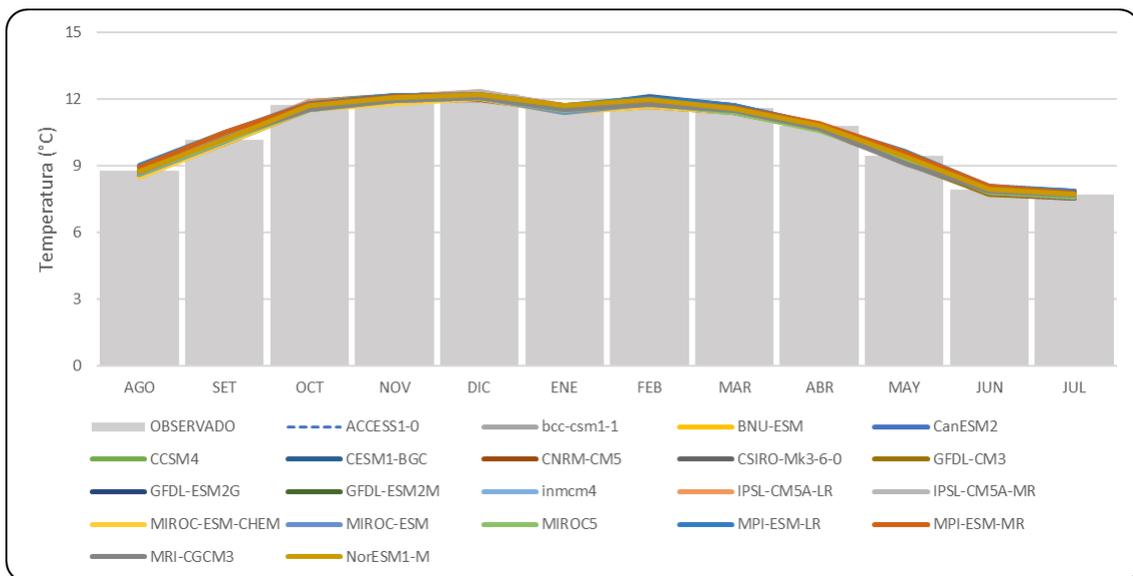


Figura 27: Curva de variación estacional para la temperatura de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Ilave.

4.2.2. Selección de GCMs

Habiendo realizado solo una inspección visual, es muy complejo seleccionar el GCMs que mejor representa las variables de precipitación y temperatura en el periodo de control (histórico), por lo cual no valimos de técnicas estadística del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2). Estos métodos se aplicaron de manera independiente a las 9 estaciones con registro de precipitación y 03 estaciones con

registro de temperatura. Los resultados de salida de la estación Ilave se muestra en la Tabla 19 y de las 8 estaciones restantes se muestran en el Anexo D.

Tabla 19: Análisis estadístico de las variables de precipitación y temperatura de los resultados de los GCMs para la estación Ilave.

GCM	PRECIPITACIÓN		TEMPERATURA		PROMEDIO	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	R ²	RMSE
CESM1-BGC	15.56	0.92	0.07	0.998	0.96	7.82
inmcm4	16.95	0.91	0.08	0.998	0.96	8.51
MIROC-ESM-CHEM	17.09	0.90	0.21	0.998	0.95	8.65
CCSM4	17.70	0.89	0.07	0.999	0.95	8.88
MPI-ESM-LR	18.41	0.89	0.16	0.998	0.94	9.28
bcc-csm1-1	18.02	0.89	0.09	0.998	0.94	9.05
MRI-CGCM3	18.97	0.89	0.16	0.997	0.94	9.57
MIROC-ESM	18.63	0.89	0.16	0.998	0.94	9.39
MPI-ESM-MR	20.39	0.89	0.13	0.997	0.94	10.26
CNRM-CM5	18.75	0.88	0.19	1.000	0.94	9.47
MIROC5	19.40	0.88	0.16	0.999	0.94	9.78
IPSL-CM5A-LR	20.15	0.88	0.10	0.998	0.94	10.13
BNU-ESM	18.88	0.88	0.09	0.999	0.94	9.49
GFDL-ESM2G	19.70	0.88	0.12	0.997	0.94	9.91
CSIRO-Mk3-6-0	20.67	0.87	0.19	0.996	0.93	10.43
IPSL-CM5A-MR	21.69	0.86	0.11	0.997	0.93	10.90
NorESM1-M	22.25	0.85	0.00	1.000	0.93	11.12
CanESM2	21.37	0.84	0.06	0.999	0.92	10.72
GFDL-CM3	22.83	0.82	0.18	0.999	0.91	11.51
ACCESS1-0	23.72	0.81	0.10	0.998	0.91	11.91
GFDL-ESM2M	24.47	0.80	0.11	0.996	0.90	12.29

De la tabla anterior se deduce que el GCMs que mejor representa las variables del periodo histórico es el CESM1-BGC con un R^2 promedio igual a 0.96 y RMSE igual a 7.82. Los resultados del análisis de todas las estaciones se resumen en la Tabla 20.

Tabla 20: Resumen del análisis estadístico de los GCMs que obtuvieron mejor desempeño para la estaciones de la cuenca del río Ilave.

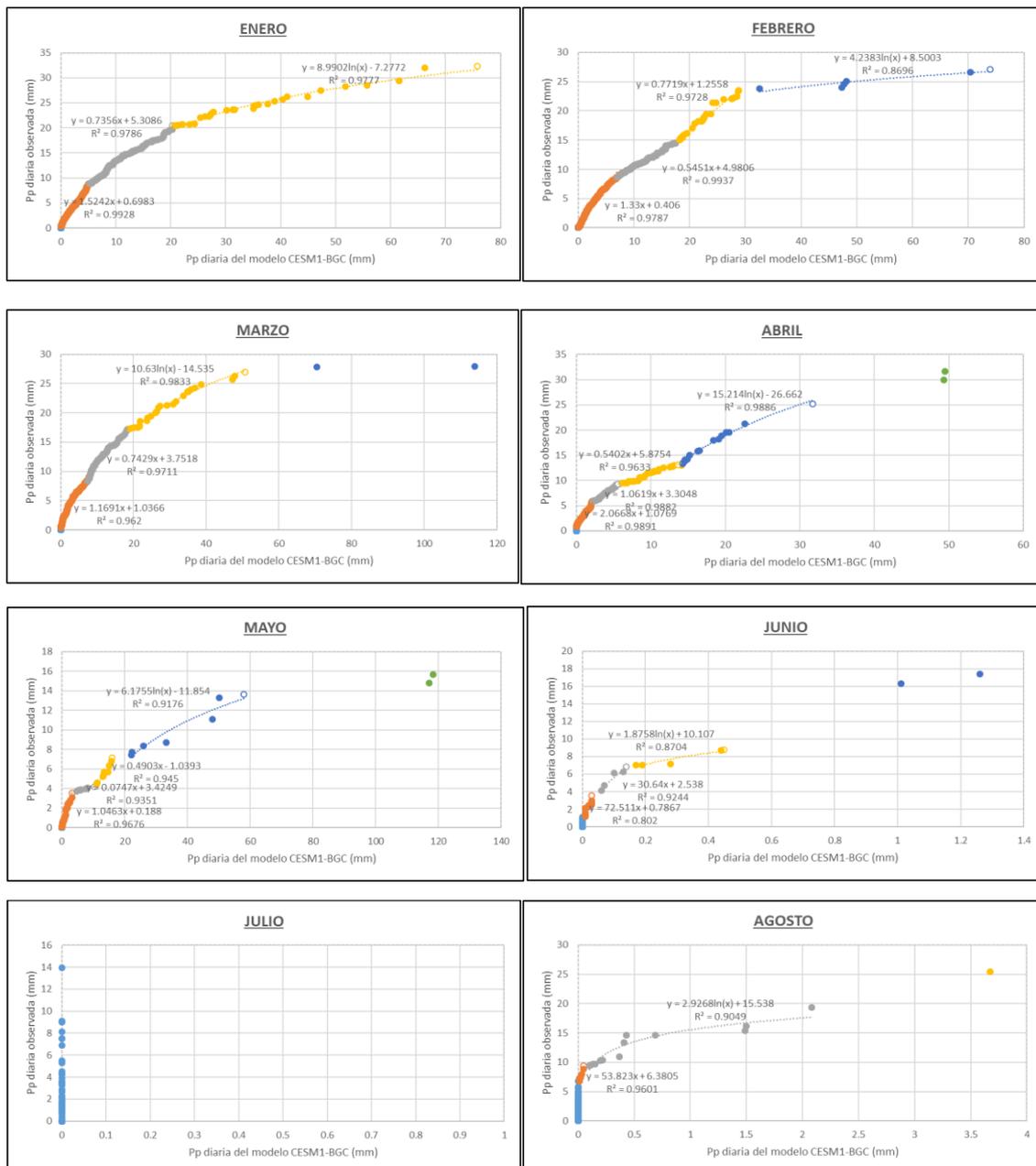
ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN			TEMPERATURA		
	GCMs	RMSE	R ²	GCMs	RMSE	R ²
CAPASO	MPI-ESM-LR	16.927	0.826			
CHICHILLAPI	CCSM4	18.668	0.804			
ILAVE	CESM1-BGC	15.565	0.919	NorESM1-M	0.000	1.00
LARAQUERI	CESM1-BGC	18.474	0.970	MRI-CGCM3	0.562	0.98
MAZOCRUZ	MPI-ESM-MR	15.366	0.910	NorESM1-M	2.646	0.93
PUNO	inmcm4	16.586	0.975			
RINCON DE LA CRUZ	CESM1-BGC	12.038	0.966			
COYPA	inmcm4	17.926	0.899			
CHILLIGUA	CESM1-BGC	21.546	0.791			

De la Tabla 20, podemos deducir que, de los 21 GCMs, en cuanto a la variable de precipitación existen 4 GCMs que obtuvieron mejores desempeños y en cuanto a la variable temperatura 02 GCMs. Es preciso mencionar que la evaluación debe realizarse para cada GCM; vale decir no podemos mezclar todos los datos de los GCMs, que mejor representa en cada estación en un solo procedimiento (modelamiento). El número de GCMs a utilizar dependerá del investigador. En la presente Tesis se consideró el GCM CESM1-BGC, debido a su capacidad de representar el mayor número de estaciones (03) ubicadas dentro de la cuenca del río Ilave.

El CESM1-BGC, es una de las configuraciones del Modelo del Sistema Terrestre Comunitario versión 1 (CESM1), desarrollado por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) de los Estados Unidos con colaboración de científicos de universidades, laboratorios nacionales de este país y organizaciones de investigación. Este modelo tiene una configuración con biogeoquímica activa y un ciclo de carbono pronóstico con limitaciones de nitrógeno. Incluye el ciclo de nutrientes de la tierra y los océanos y la biogeoquímica de nitrógeno en la tierra. La inclusión del ciclo del carbono en el modelo proporciona una información valiosa y completa sobre la posible respuesta de la tierra y el océano al cambio climático (Hurrell et al., 2013).

4.2.3. Escalamiento temporal

Se crearon grupos de datos de variables observadas y del modelo CESM1-BGC, tanto de precipitación y temperatura, de todos los días de cada mes, para el periodo histórico (1981 – 2005). A partir de los cuales se crearon las funciones de distribución acumulada para cada mes en las 9 estaciones meteorológicas; es decir se tuvieron que analizar un total de 108 meses para el caso de precipitación y 36 meses para la temperatura. Las funciones de transferencia para el caso de la estación Ilave se muestran en la Figura 28.



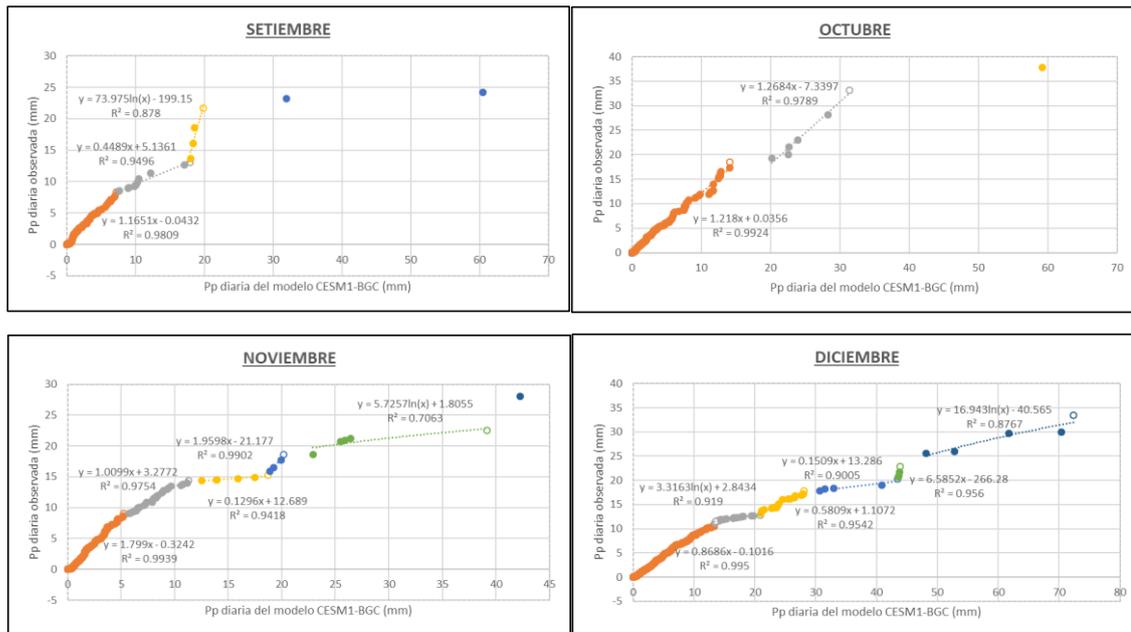


Figura 28: Generación de funciones de transferencia de precipitación para la estación Ilave (b).

4.2.4. Corrección de variables de precipitación y temperatura

En base a las funciones de transferencia se realizó la corrección de las variables, los cuales fueron validados en el periodo histórico (1981 – 2005). En la Figura 29, se verifica que, las funciones de distribución acumulada (cdf) de la precipitación y temperatura de la estación Ilave, se lograron ajustar correctamente a los datos observados. Por lo que en base a estas mismas funciones se corrigen el periodo del futuro cercano (2020 – 2050) y futuro lejano (2070 - 2100).

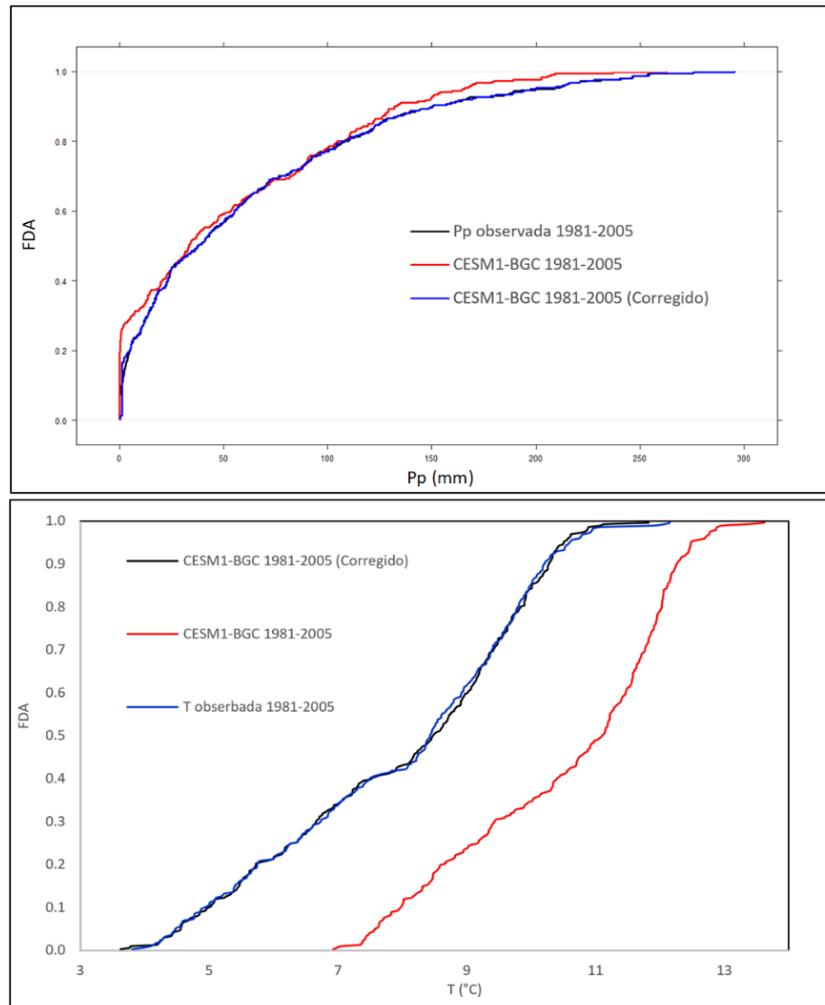


Figura 29: Ajuste probabilísticos de la precipitación y temperatura mensual de los datos observados y simulados por el CESM1-BGC en la estación Ilave.

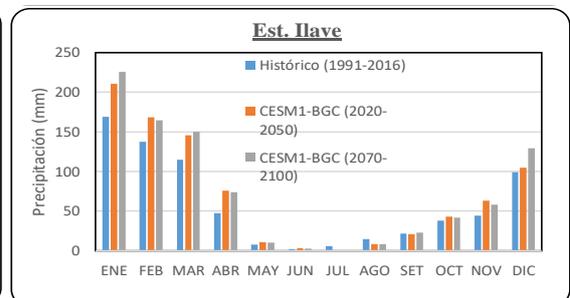
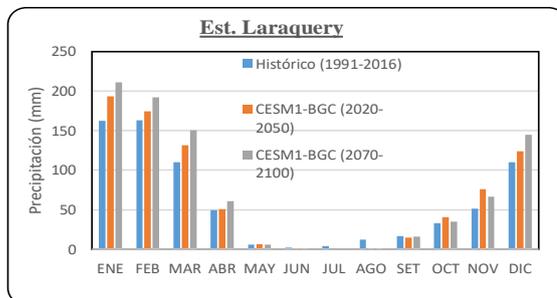
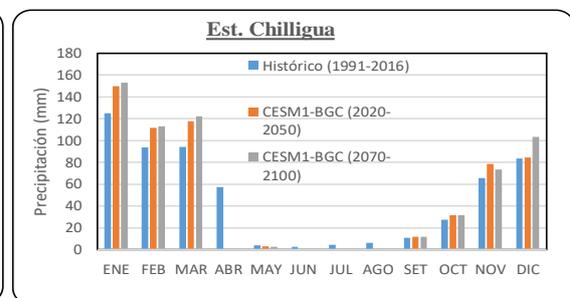
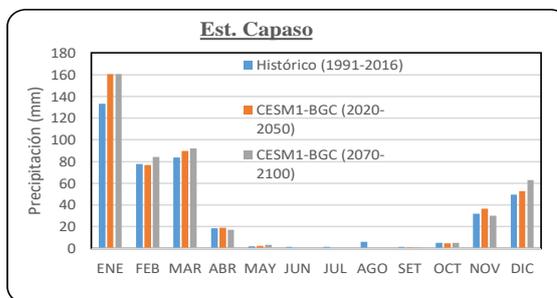
4.2.5. Comportamiento futuro de la precipitación y temperatura

Las proyecciones de la precipitación media describen un aumento en la mayoría de las estaciones meteorológica. En el escenario RCP 4.5, para el futuro cercano (2020-2050) todas las estaciones describen un incremento en la precipitación multianual que van desde 2 % (Chilligua) hasta un 22 % (Ilave y Mazocruz); en el mismo sentido en el futuro lejano (2070-2100), se describen incrementos que van desde un 6% (Chilligua) hasta un 27% (Ilave). El detalle las proyecciones se detallan en la Tabla 21 y Figura 31.

Tabla 21: Variación porcentual de la precipitación promedio mensual al futuro cercano y lejano, RCP 4.5.

FUTURO CERCANO (2020 - 2050) RCP 4.5													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Δ Anual
Capaso	20%	-1%	7%	3%	39%	-100%	-100%	-100%	-29%	-10%	15%	6%	8%
Chilligua	20%	19%	24%	-100%	-22%	-88%	-100%	-99%	6%	14%	20%	1%	2%
Laraquery	19%	7%	20%	3%	12%	-98%	-100%	-99%	-13%	24%	49%	13%	13%
Ilave	25%	23%	27%	59%	38%	34%	-100%	-42%	-1%	13%	43%	6%	22%
Mazocruz	29%	22%	30%	34%	-33%	-87%	-100%	-100%	-6%	31%	39%	11%	22%
Chichillapi	22%	9%	12%	5%	-55%	-94%	-100%	-100%	-13%	19%	32%	6%	10%
Coypa	21%	0%	6%	-13%	-43%	-98%	-100%	-100%	-23%	73%	50%	14%	10%
Rincon de la Cruz	22%	19%	13%	29%	31%	74%	-100%	-47%	-8%	5%	34%	5%	15%
Puno	26%	24%	20%	45%	106%	-91%	-100%	-21%	7%	3%	31%	2%	21%

FUTURO LEJANO (2070 - 2100) RCP 4.5													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Δ Anual
Capaso	21%	8%	10%	-6%	98%	-100%	-100%	-100%	-42%	-1%	-6%	27%	11%
Chilligua	22%	21%	30%	-100%	-34%	-91%	-100%	-97%	6%	14%	12%	23%	6%
Laraquery	30%	18%	37%	22%	-1%	-99%	-100%	-99%	-5%	6%	30%	32%	22%
Ilave	34%	20%	31%	56%	32%	29%	-100%	-43%	6%	10%	31%	31%	27%
Mazocruz	31%	28%	33%	24%	-34%	-89%	-100%	-100%	-10%	32%	27%	33%	26%
Chichillapi	21%	18%	16%	-3%	-56%	-95%	-100%	-100%	-23%	21%	20%	24%	13%
Coypa	21%	9%	10%	-15%	-35%	-98%	-100%	-100%	-32%	76%	23%	34%	13%
Rincon de la Cruz	29%	17%	18%	25%	24%	89%	-100%	-37%	-11%	-3%	28%	25%	18%
Puno	35%	22%	28%	35%	91%	-94%	-100%	-24%	0%	-1%	30%	16%	24%



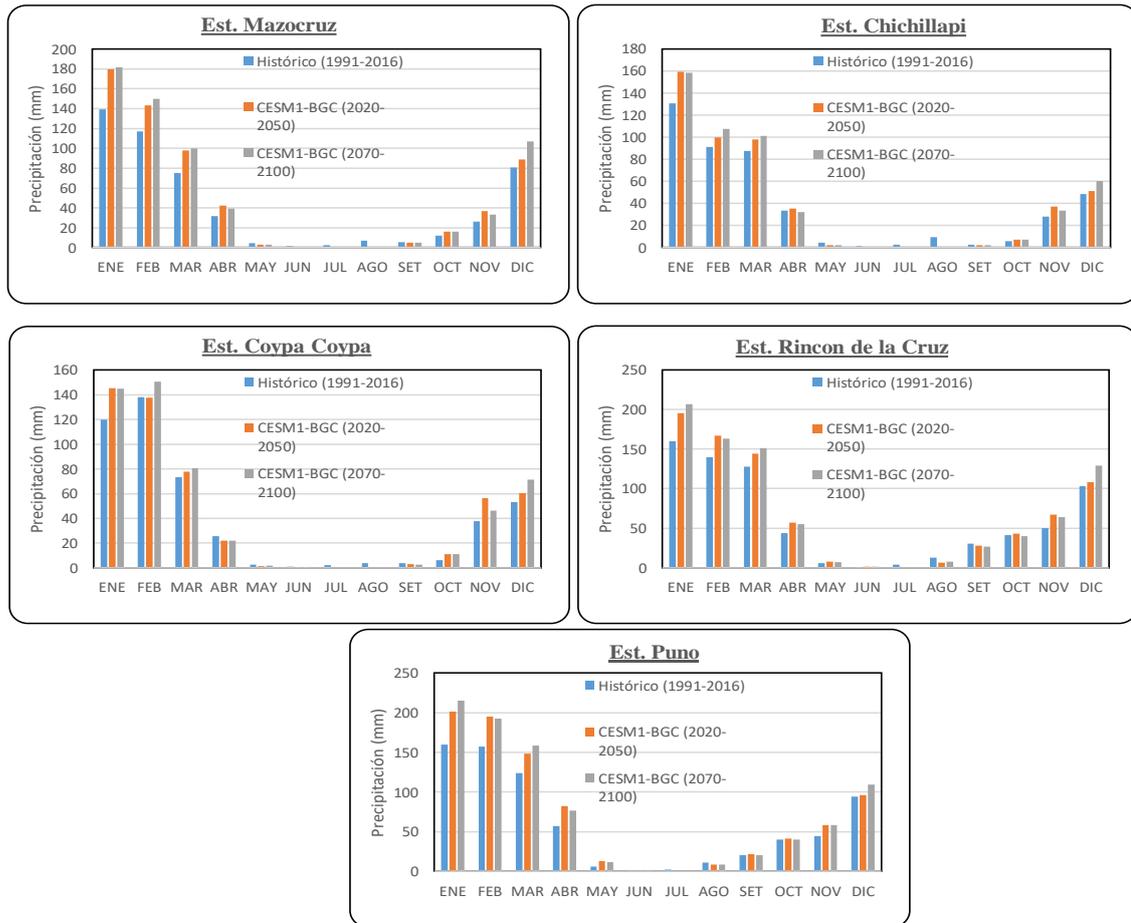


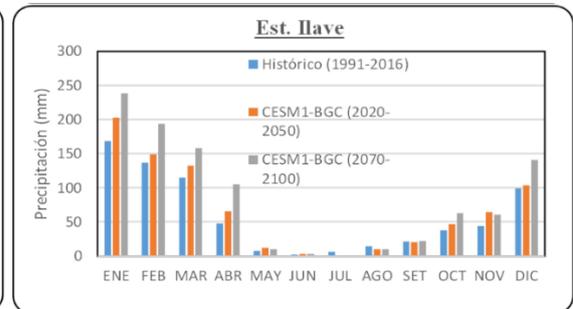
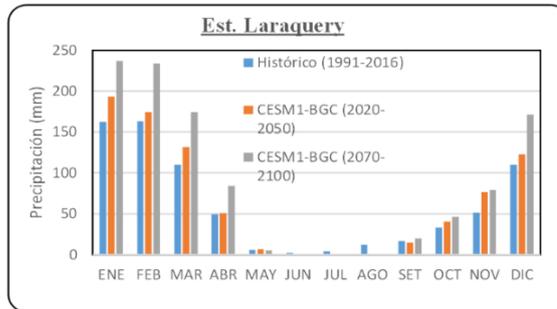
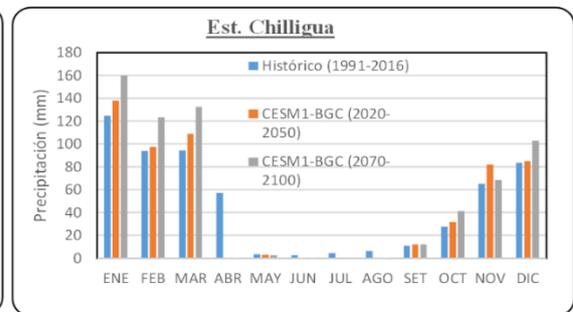
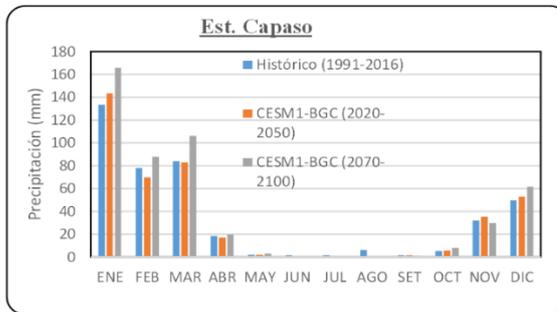
Figura 30: Precipitación mensual observada y proyectada promedio para el escenario RCP 4.5.

En el escenario RCP 8.5, para el futuro cercano (2020-2050) en las estaciones Capaso y Chilligua, describen una disminución en -1% y -3%, respectivamente; mientras en las demás estaciones se presentaría un incremento en la precipitación hasta en 16 % (estación Ilave), en el mismo sentido el futuro lejano (2070-2100), describe incrementos que van desde un 12% (Chilligua) hasta un 46% (Laraqueri). El detalle las proyecciones se detallan en la Tabla 22 y Figura 32.

Tabla 22: Variación porcentual de la precipitación promedio mensual al futuro cercano y lejano, RCP 8.5.

FUTURO CERCANO (2020 - 2050) RCP 8.5													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Δ Anual
Capaso	8%	-11%	-1%	-7%	18%	-100%	-100%	-100%	-9%	4%	10%	6%	-1%
Chilligua	10%	4%	16%	-100%	-21%	-80%	-100%	-98%	11%	15%	26%	1%	-3%
Laraqueri	19%	7%	20%	3%	12%	-98%	-100%	-99%	-13%	24%	50%	12%	13%
Ilave	20%	9%	16%	38%	56%	31%	-100%	-34%	-3%	25%	45%	5%	16%
Mazocruz	18%	7%	19%	17%	-22%	-84%	-100%	-100%	6%	31%	48%	9%	13%
Chichillapi	9%	-3%	5%	-7%	-47%	-98%	-100%	-100%	-5%	26%	35%	6%	2%
Coypa	10%	-10%	-1%	-20%	-3%	-99%	-100%	-100%	-7%	86%	47%	13%	3%
Rincon de la Cruz	17%	7%	5%	12%	47%	198%	-100%	-26%	-13%	11%	38%	5%	10%
Puno	21%	13%	12%	-100%	151%	-92%	-100%	-5%	-2%	23%	40%	1%	6%

FUTURO LEJANO (2070 - 2100) RCP 8.5													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Δ Anual
Capaso	24%	13%	27%	7%	51%	-100%	-100%	-100%	-41%	53%	-7%	24%	17%
Chilligua	28%	32%	40%	-100%	-33%	-98%	-100%	-93%	12%	51%	5%	23%	12%
Laraqueri	46%	43%	59%	70%	-11%	-100%	-100%	-100%	15%	42%	55%	56%	46%
Ilave	41%	41%	38%	121%	31%	28%	-100%	-30%	2%	67%	38%	42%	43%
Mazocruz	38%	36%	49%	82%	-36%	-99%	-100%	-98%	12%	76%	20%	34%	38%
Chichillapi	25%	24%	33%	37%	-57%	-100%	-100%	-100%	3%	90%	9%	26%	23%
Coypa	28%	13%	33%	13%	-6%	-100%	-100%	-100%	-5%	237%	24%	37%	25%
Rincon de la Cruz	38%	41%	24%	78%	31%	123%	-100%	-39%	9%	35%	36%	39%	35%
Puno	55%	55%	42%	-100%	130%	-87%	-100%	-38%	23%	51%	46%	43%	36%



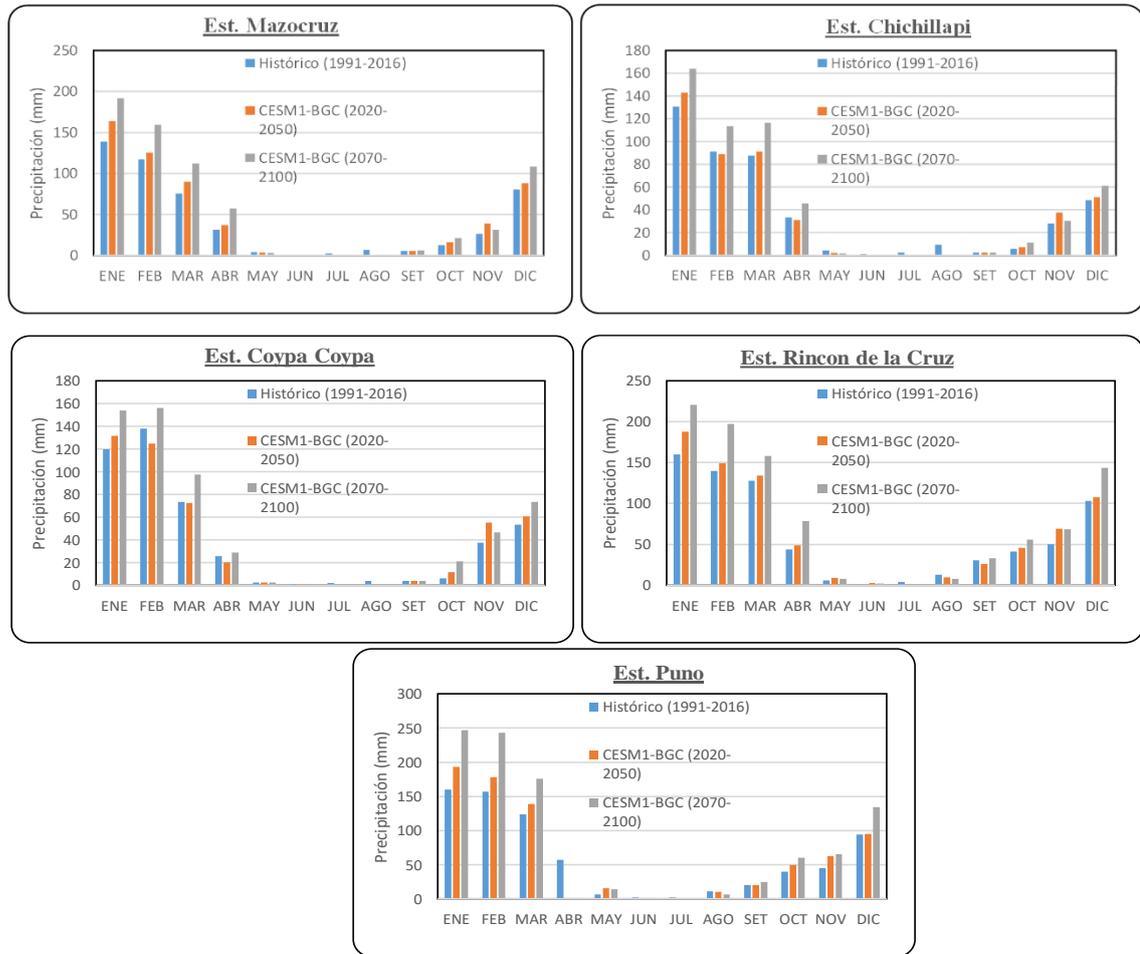


Figura 31: Precipitación mensual observada y proyectada promedio para el escenario RCP 8.5.

En cuanto a temperatura anual ($^{\circ}\text{C}$), para el escenario RCP 4.5, presentaría incrementos que van desde los $+1.2^{\circ}\text{C}$ hasta los $+2.1^{\circ}\text{C}$, como se detalla en la Tabla 23 y muestra en la Figura 33, estos resultados son corroborados por otros (Belizario, 2015).

Tabla 23: Variación de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) promedio mensual al futuro cercano y lejano, RCP 4.5.

FUTURO CERCANO (2020 - 2050) RCP 4.5													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Δ Anual
Laraqueri	+2.1	+2.2	+1.8	+2.3	+2.5	+2.4	+2.4	+2.4	+1.7	+1.8	+1.4	+1.7	+2.1
Llave	+1.3	+1.3	+1.0	+1.4	+1.7	+1.3	+1.4	+1.4	+0.8	+0.8	+0.8	+1.2	+1.2
Mazocruz	+1.2	+0.9	+0.9	+1.4	+1.8	+1.4	+1.5	+1.6	+1.1	+1.1	+0.9	+1.0	+1.2
FUTURO LEJANO (2070 - 2100) RCP 4.5													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Δ Anual
Laraqueri	+1.7	+1.7	+1.5	+1.9	+2.3	+2.1	+2.1	+2.4	+1.5	+1.6	+1.2	+1.4	+1.8
Llave	+2.1	+2.3	+1.7	+2.2	+2.6	+2.2	+2.5	+2.4	+1.5	+1.6	+1.3	+2.0	+2.0
Mazocruz	+1.8	+1.6	+1.5	+2.2	+2.8	+2.4	+2.7	+2.5	+2.2	+2.0	+1.4	+1.7	+2.1

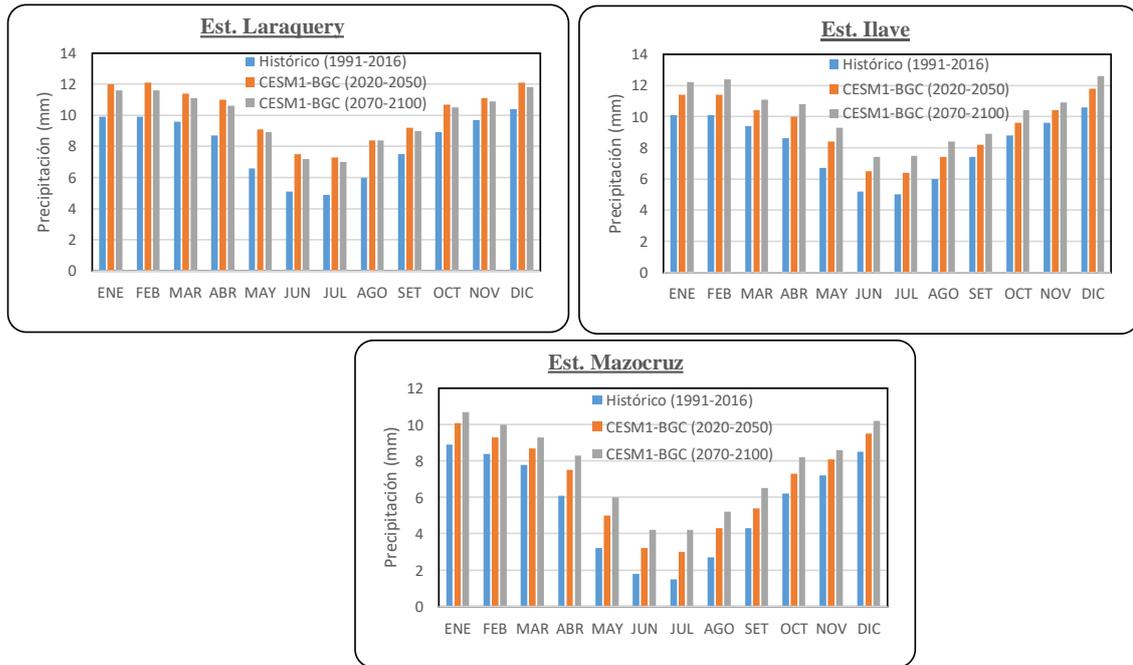


Figura 32: Temperatura mensual observada y proyectada promedio para el escenario RCP 4.5.

En cuanto a la temperatura anual del escenario RCP 8.5, el modelo refleja que habría incrementos que van desde +1.4 °C hasta los 4 °C, como se detalla en la Tabla 24 y muestra en la Figura 33.

Tabla 24: Variación de la temperatura (°C) promedio mensual al futuro cercano y lejano, RCP 8.5.

FUTURO CERCANO (2020 - 2050) RCP 8.5													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Δ ANUAL
Laraqueri	+1.3	+1.4	+1.1	+1.3	+1.8	+1.7	+1.7	+2.0	+1.2	+1.0	+0.9	+1.1	+1.4
Ilave	+1.6	+1.8	+1.3	+1.6	+2.0	+1.8	+2.0	+2.0	+1.1	+1.0	+1.0	+1.5	+1.6
Mazocruz	+1.4	+1.3	+1.2	+1.5	+2.2	+2.0	+2.1	+2.1	+1.6	+1.4	+1.1	+1.3	+1.6
FUTURO LEJANO (2070 - 2100) RCP 8.5													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Δ ANUAL
Laraqueri	+3.0	+2.2	+1.0	+1.6	+0.9	+0.9	+2.5	+0.3	+1.2	+0.8	-0.3	+1.6	+1.3
Ilave	+4.4	+5.2	+3.5	+4.5	+4.8	+4.4	+5.2	+4.1	+2.9	+2.8	+2.0	+4.1	+4.0
Mazocruz	+1.8	+1.6	+1.5	+2.2	+2.8	+2.4	+2.7	+2.5	+2.2	+2.0	+1.4	+1.7	+2.1

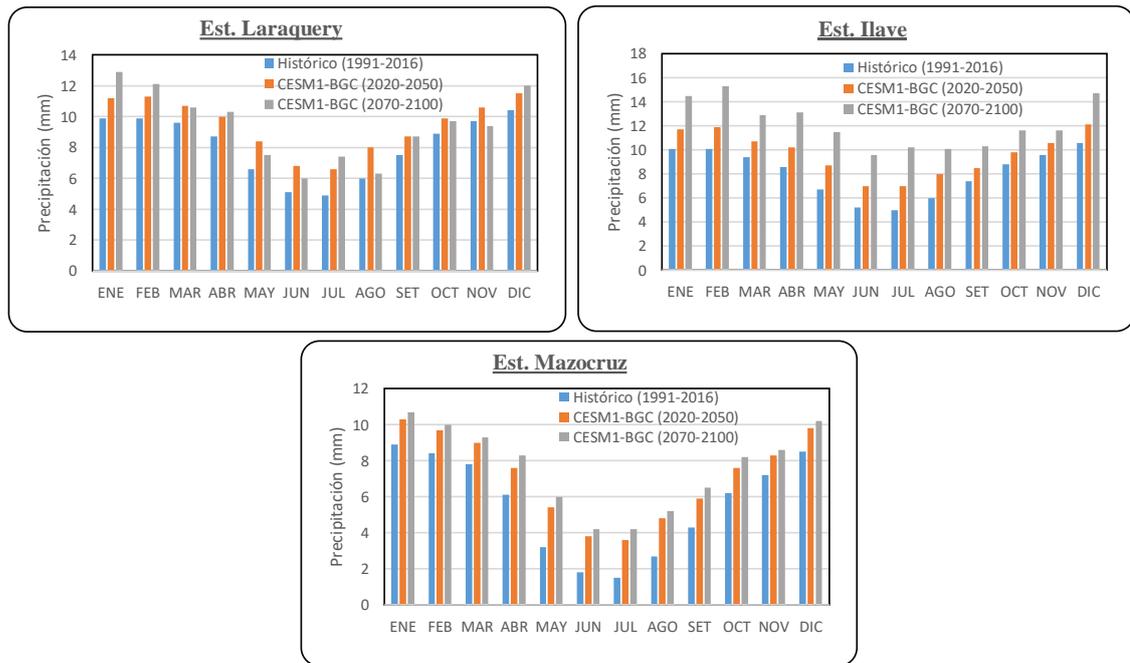


Figura 33: Temperatura mensual observada y proyectada promedio para el escenario RCP 8.5.

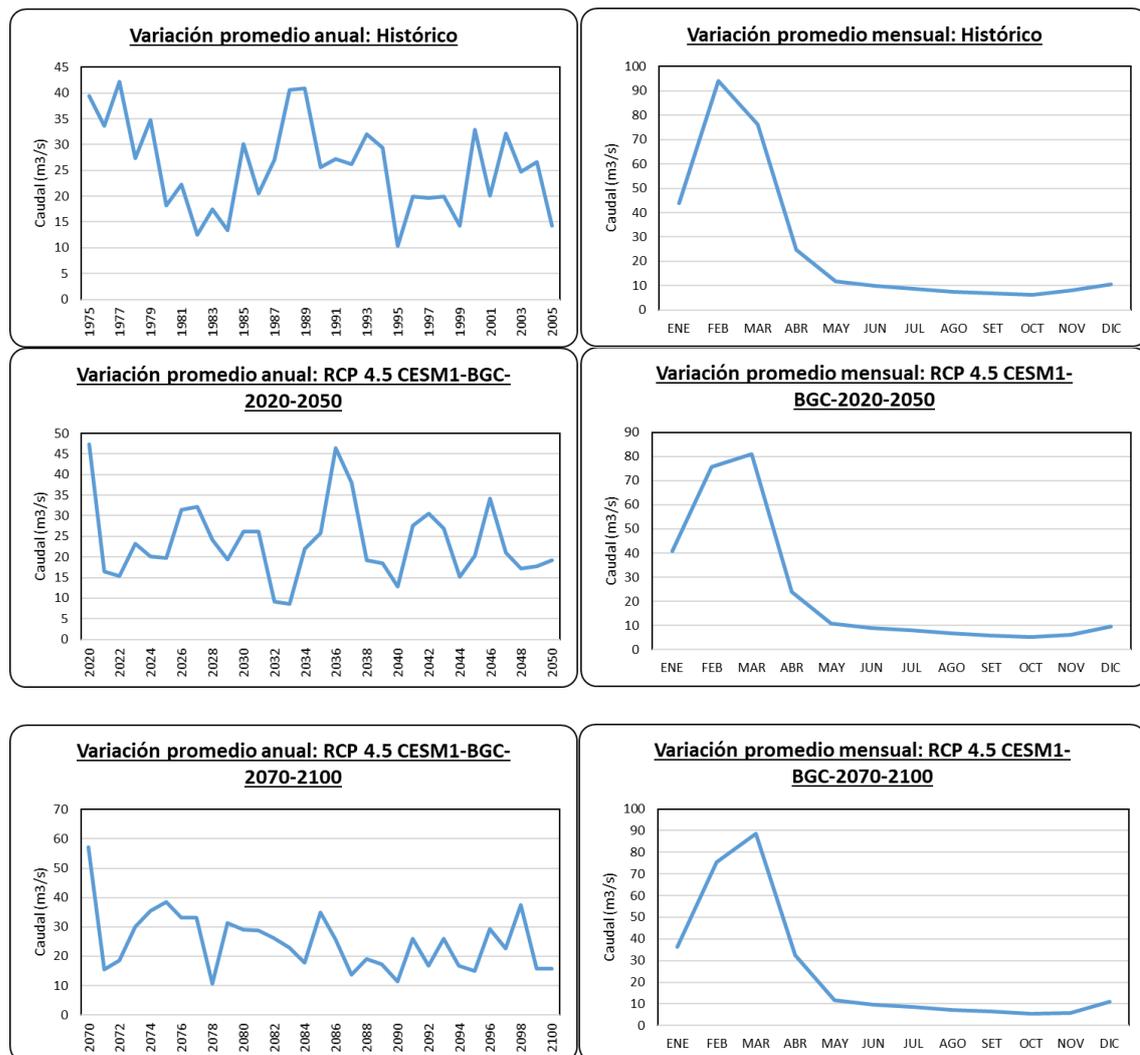
Los resultados obtenidos en este apartado presentan valores menores en comparación con los obtenidos para la vertiente del altiplano para el año 2050 por Felipe et al. (2015) donde refieren que la temperatura mínima tendría incrementos de hasta 4.1°C y las máxima alcanzarían valores de hasta 3.4 °C, pero hay que precisar que los GCMs utilizados por el autor fueron CNRM-CM5 y MPI-ESM, con una resolución de grilla más gruesa (1.4° x 1.4° y 1.8° x 1.8°). En cuanto a la temperatura media en la parte alta de la cuenca, según Aguilar (2017) para el año 2050 se tendría incrementos de hasta +2.7°C, mientras nuestros resultados refieren impactos menores de hasta +1.6°C.

Las proyecciones de la precipitación muestran variaciones menores en las partes altas de la cuenca, donde se presentaría hasta una disminución de -3%, mientras que en la parte media y baja de la cuenca se presentarían los mayores incrementos; similar a lo obtenido por Aguilar (2017).

4.3. PROYECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

4.3.1. Proyección de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático

Los resultados de la simulación de los caudales obtenidos con el SAC-SMA, manteniendo los mismos parámetros de calibración del periodo presente (1981-2016), se muestra en la Figura 35, donde se refleja que los caudales presentan un comportamiento propio de la cuenca con periodos húmedos y secos con tendencia a disminuir, siendo el más notorio el escenario RCP 4.5 del futuro lejano. En cuanto a los hidrogramas mensuales se puede ver un claro desplazamiento de los caudales máximos registrados (normalmente en el mes de febrero) hacia el mes de marzo.



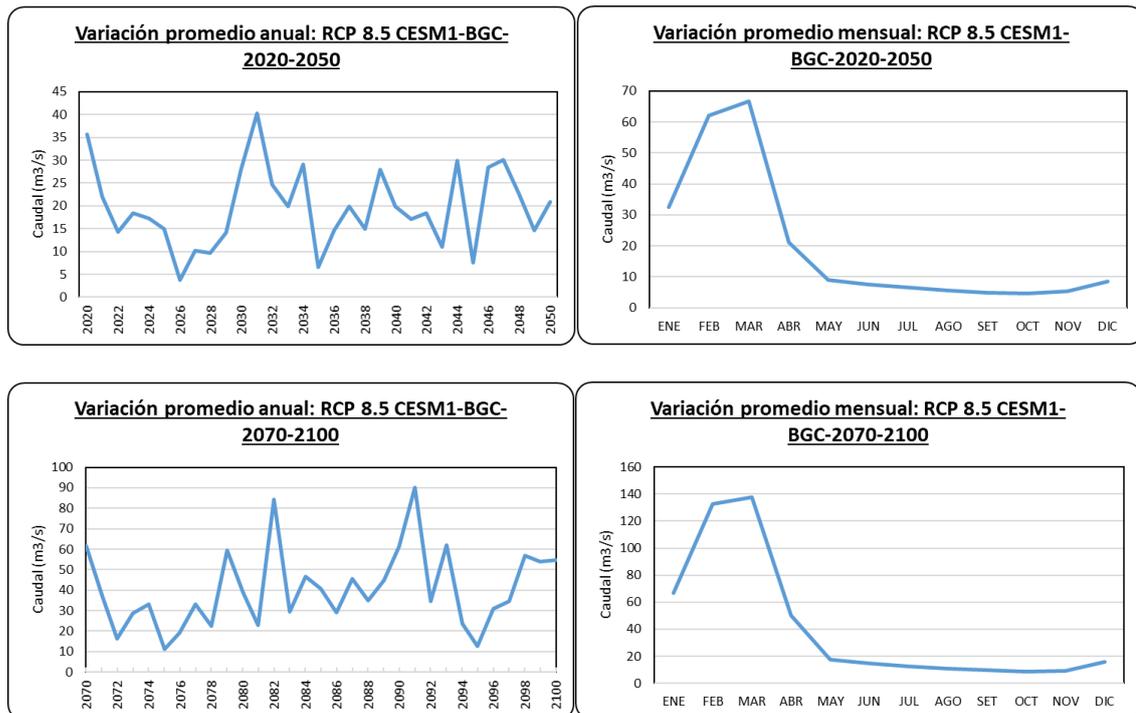


Figura 34: Variación anual y mensual del caudal en la cuenca Ilave bajo escenarios de cambio climático.

4.3.2. Análisis de la variación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático

Los resultados de los probables cambios de la oferta hídrica superficial frente a escenarios de cambio climático, se calcularon mediante el índice de variaciones porcentuales ($\Delta\%$) de los caudales a escala anual, estacional y mensual, mediante la diferencia de los caudales obtenidos para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, para cada periodo futuro (cercano y lejano), respecto al periodo histórico.

4.3.2.1. Variación promedio anual

La variación promedio anual obtuvo resultados negativos a excepción del futuro lejano del escenario RCP 8.5. La menor variación con un -3% se daría en el futuro lejano del escenario RCP 4.5 y la mayor variación con +58% se presentaría futuro lejano del escenario RCP 8.5. Estos resultados se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25: Variación porcentual de caudal promedio anual a futuro cercano y futuro lejano.

Escenario	Δ % Promedio anual	
	Futuro cercano (2020-2050)	Futuro Lejano (2070-2100)
RCP 4.5	-8%	-3%
RCP 8.5	-24%	58%

En la Tabla 26 se presentan los caudales promedio anual en la cuenca del río Ilave (estación hidrométrica puente Ilave) de los escenarios a futuro cercano, futuro lejano y el escenario histórico con lo cual es comparado.

Tabla 26: Caudal promedio anual histórico a futuro cercano y a futuro lejano

Periodo	Escenario	Caudal promedio anual (m ³ /s)
Histórico (1975-2005)	HIST-CESM1-BGC	25.68
Futuro cercano (2020-2050)	CESM1-BGC 4.5	23.26
	CESM1-BGC 8.5	24.91
Futuro Lejano (2070-2100)	CESM1-BGC 4.5	19.57
	CESM1-BGC 8.5	40.52

Según Felipe et al. (2015) en la vertiente del Titicaca se presentaría una disminución de hasta -28% en el horizonte de 2050, para lo cual nuestros resultados indican de igual forma una disminución para los dos escenarios evaluados pero con menores impactos, y específicamente para la cuenca Ilave según Lujano et al. (2016), para finales del siglo XXI, en el escenario RCP 4.5 los caudales disminuirían en -48% mientras que para el caso nuestro la variación no sería tan significativo, mostrando una leve disminución de -3%, por otro lado para el escenario RCP 8.5 prevé una disminución en -24%; sin embargo, nuestros resultados reflejan un posible incremento en 58%.

De lo anterior podemos deducir que para el futuro cercano de la cuenca Ilave tanto en estudios anteriores evaluados con el cuarto informe (AR4) del IPCC (Ticona, 2016), el quinto informe (AR5) (Lujano et al., 2016) y resultados de la presente investigación coinciden en que nos espera un futuro con disminución de la oferta hídrica de la cuenca Ilave. El grado de impacto ya sea en mayor o menor medida, no se puede aseverar con certeza, ya que el futuro es incierto y los GCMs son probabilísticos. Por otro lado, en cuanto respecta al futuro lejano no se podría deducir un claro efecto, lo cual requiere

seguir investigando ya sea con otros modelos climáticos o modelos hidrológicos que no solo dependan de variables climáticas, más bien que incorporen otros parámetros como es el cambio de uso de suelo.

4.3.2.2. Variación promedio estacional

Los resultados de la variación promedio de las cuatro estaciones del año, para el periodo futuro cercano, la menor variación se presentaría en invierno con -2%, y la mayor variación con 18% durante el otoño. Así mismo, para el periodo futuro lejano, la mayor variación con +82% se daría durante el otoño, y el de menor variación con -14%, durante el otoño. Estos resultados obtenidos, así como meses que conforman cada estación se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27: Variación porcentual de caudal promedio estacional a futuros cercano y futuro lejano.

Periodo	Escenario	Δ % Promedio estacional			
		Verano (Dic-Feb)	Otoño (Mar-May)	Invierno (Jun-Ago)	Primavera (Set-Nov)
Futuro Cercano (2020-2050)	RCP 4.5	-15%	3%	-8%	-18%
	RCP 8.5	-17%	18%	-2%	-15%
Futuro Lejano (2070-2100)	RCP 4.5	-30%	-14%	-23%	-29%
	RCP 8.5	45%	82%	46%	29%

En la Tabla 28 se presentan los caudales promedio estacional en la estación hidrométrica Puente río Ilave de los escenarios a futuro cercano, futuro lejano, y del escenario histórico con lo que es comparado.

Tabla 28: Caudal promedio estacional histórico a futuro cercano y a futuro lejano en la estación hidrométrica puente Sánchez Cerro.

Periodo	Escenario	Caudal promedio estacional (m ³ /s)			
		Verano (Dic-Feb)	Otoño (Mar-May)	Invierno (Jun-Ago)	Primavera (Set-Nov)
Histórico	(1975-2005)	49.4	37.6	8.6	7.1
Futuro Cercano (2020-2050)	RCP 4.5	42.1	38.7	7.9	5.8
	RCP 8.5	34.4	32.3	6.6	5.0
Futuro Lejano (2070-2100)	RCP 4.5	40.9	44.3	8.5	6.0
	RCP 8.5	71.8	68.5	12.6	9.1

4.3.2.3. Variación promedio mensual

La variación promedio mensual presenta resultados más detallados, donde se muestra que en los doce meses del futuro cercano (RCP 8.5), presenta una variación negativa, mientras que en el futuro lejano (RCP 8.5) presenta una variación positiva en los doce de los meses del año.

Para el periodo futuro cercano, el escenario con menor variación es en el mes de abril del escenario RCP 4.5 con -3% y el mayor en el mes de febrero del escenario RCP 8.5 con -34%. En el futuro lejano, el escenario con menor variación se daría en el mes de junio del RCP 4.5, con -1% y el de mayor variación en el mes de abril del escenario RCP 8.5, con 104%. Estos resultados se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29: Variación porcentual de caudal promedio mensual a futuro cercano y futuro lejano.

Periodo	Escenario	Δ % Promedio mensual											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Futuro Cercano (2020-2050)	RCP 4.5	-7%	-19%	7%	-3%	-8%	-8%	-8%	-9%	12%	15%	25%	-7%
	RCP 8.5	-26%	-34%	-13%	-15%	-23%	23%	23%	24%	27%	27%	33%	19%
Futuro Lejano (2070-2100)	RCP 4.5	-17%	-20%	17%	32%	-2%	-1%	-2%	-3%	-7%	11%	26%	4%
	RCP 8.5	52%	41%	81%	104%	49%	47%	46%	46%	40%	38%	12%	50%

En el Tabla 30, se presenta los caudales promedio mensual en la estación hidrométrica puente Ilave, para los periodos a futuro cercano y lejano, de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 del modelo climático global CESM1-BGC, y la data histórica observada con los que son comparados para la obtención de la variación mensual.

Tabla 30: Caudal promedio mensual histórico, presente, a futuro cercano y a futuro lejano en la estación hidrométrica puente Ilave.

Periodo	Escenario	Caudal Promedio mensual (m ³ /s)											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Histórica (1975-2005)	Data histórica	43.76	94.11	76.13	24.66	11.87	9.9	8.6	7.43	6.83	6.36	8.09	10.46
Futuro Cercano (2020-2050)	RCP 4.5	40.76	75.80	81.12	23.93	10.94	9.13	7.90	6.76	5.99	5.39	6.07	9.69
	RCP 8.5	32.50	62.18	66.60	21.07	9.10	7.63	6.60	5.63	4.98	4.62	5.45	8.50
Futuro Lejano (2070-2100)	RCP 4.5	36.34	75.45	88.75	32.45	11.67	9.76	8.45	7.23	6.36	5.65	5.99	10.85
	RCP 8.5	66.63	132.99	137.63	50.25	17.68	14.52	12.54	10.86	9.54	8.80	9.07	15.69

Los hidrogramas del caudal promedio mensual para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, tanto para los periodos a futuro cercano y futuro lejano se muestran en la Figura 36. Donde se observa que los meses de avenida (enero a abril), son los que experimentarían los mayores cambios, mientras que en los meses de estiaje (mayo a diciembre), presentarían menores cambios. Esto se debería principalmente por las altas tasas de la evapotranspiración, influenciado por el incremento de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$); donde el promedio obtenido en el periodo histórico de 1200 (mm/año) para el caso del futuro lejano del RCP 4.5 y RCP 8.5, reporta incrementos de 1481(mm/año) y 1660 (mm/año), respectivamente. Los cual confirma lo enunciado por Kitoh et al. (2011).

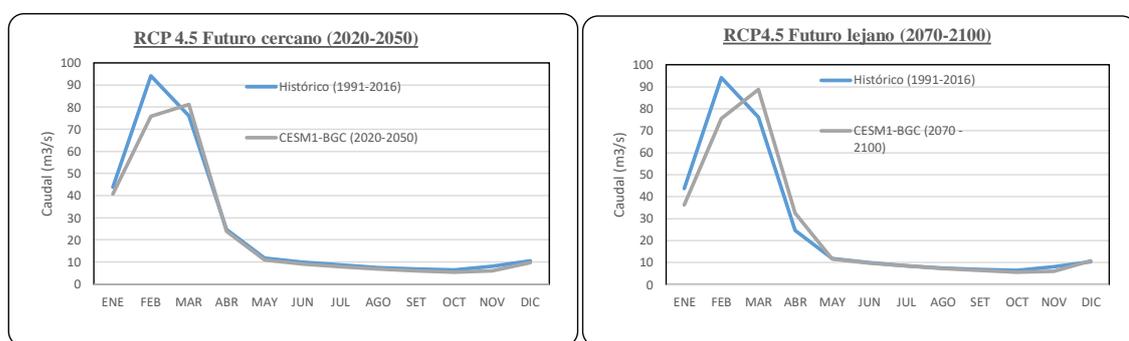


Figura 35: Hidrogramas de caudal promedio mensual de escenario presente, histórico y futuro cercano (a).

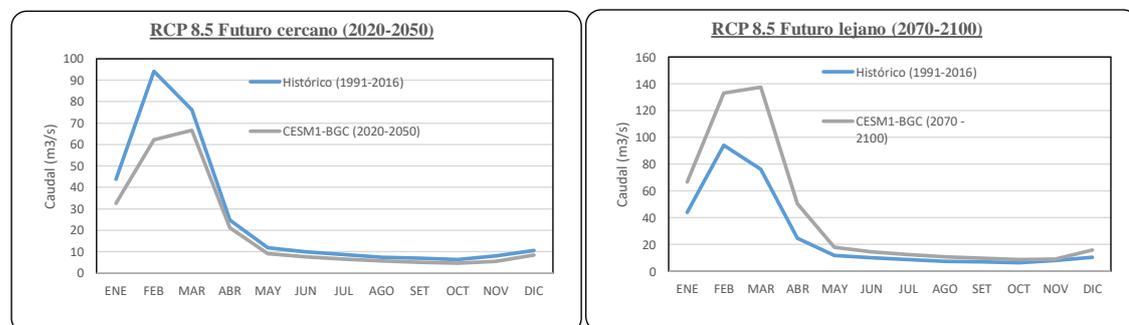


Figura 35: Hidrogramas de caudal promedio mensual de escenario presente, histórico y futuro cercano.

Conforme al promedio de los escenarios que reportan disminución; los meses más impactados serían febrero y noviembre, similar a lo obtenido por Ticona (2016), quien destaca los meses de febrero y octubre. Por otro lado, los hidrogramas reflejan que la mayor variación de caudales son en los meses de avenida, tal como refiere Lujano et al. (2014), según los resultados obtenidos para los escenarios A2 y B2 del cuarto informe (AR4) del IPCC. Las diferencias en la magnitud del impacto en la oferta hídrica obtenida por anteriores bibliografías, pueden obedecer a factores como el modelo hidrológico, la



técnica de corrección de sesgo, los modelos GCMs utilizados, variables utilizadas del GCM entre otros.

V. CONCLUSIONES

Se determinó la oferta hídrica de la cuenca del río Ilave bajo dos escenarios de las trayectorias representativas de concentración (RCP 4.5 y RCP 8.5), a partir de la información futura de precipitación y temperatura obtenidas del modelo climático global CESM1-BGC, los cuales se evaluaron para los periodos a futuro cercano (de enero de 2020 a diciembre de 2050) y a futuro lejano (de enero de 2070 a diciembre de 2100), llegando a las siguientes conclusiones:

- El modelo hidrológico SAC-SMA, simuló en forma eficiente los eventos de avenida y estiaje del caudal observado, tanto en la etapa de calibración y validación, obteniendo valores de Nash-Sutcliffe (0.86, 0.82), Nash-In (0.81, 0.86), coeficiente de correlación de Pearson (R) (0.93, 0.91), RRMSE (0.76, 0.84) y volumen relativo de sesgo (RVB) (0.12, 0.03), que deducen la capacidad suficiente del modelo para simular la cuenca de estudio.
- El escalamiento espacial se realizó para 21 GCMs, de los cuales el modelo CESM1-BGC, obtuvo los mejores resultados en cuatro (03 dentro de la cuenca) de las nueve estaciones consideradas en el modelamiento hidrológico, logrando representar la distribución y estacionalidad de la precipitación y temperatura para el periodo (1981 – 2005). El mismo que se utilizó para el escalamiento temporal de los datos históricos (1975 – 2005) y futuro (2020 – 2100).
- Las proyecciones de la oferta hídrica superficial, indican una probable disminución de -3% hasta -24% en la oferta hídrica anual, a excepción del futuro lejano del RCP 8.5, donde se presentaría un incremento de hasta 58%. A nivel mensual, en promedio las mayores variaciones se mostrarían en los meses de febrero (-8%), marzo (23%), abril (30%) y noviembre (-18%); mientras a nivel estacional, otoño presentaría un incremento de (82%) y disminución en invierno (-2%). En cuanto a los hidrogramas mensuales se tendría un desplazamiento de los caudales máximos registrados normalmente en el mes de febrero hacia el mes de marzo.



VI. RECOMENDACIONES

- Con el fin de reducir la incertidumbre del efecto que tendría el cambio climático en la oferta hídrica superficial, sobre todo para el futuro lejano (finales del siglo XXI), se recomienda evaluar más Modelos Climáticos Globales (GCMs) como es el MPI-ESM-LR, INMCCM4 y el NORESM1-M, considerando más escenarios de rutas representativas de concentración (RCP).
- Teniendo en cuenta las limitaciones del escalamiento estadístico, se recomienda el uso del escalamiento dinámico y nuevas técnicas de corrección de sesgo, que permitan reducir la incertidumbre de los posibles escenarios de la oferta hídrica de la cuenca del río Ilave.
- Utilizar un modelo hidrológico que aparte de la precipitación y temperatura incorpore otras variables cambiantes en el tiempo (cambio de uso de suelo), como es la Herramienta de Evaluación del Suelo y Agua (SWAT).
- Conforme al Plan Director Binacional del Lago Titicaca, bajo una división equitativa el estado peruano solo administra un caudal máximo de 12.5 m³/s, cuyos niveles se ven amenazados por la creciente demanda (poblacional y productivo). Sumado a ello, si se considera los reportes de probable disminución de caudales frente a escenarios de cambio climático darán lugar a permanentes conflictos por el uso del agua. Por ello la formulación de los planes de aprovechamiento de recursos hídricos y la gestión de cuenca, deben considerar un enfoque que involucre la estrategia de adaptación al cambio climático.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghakouchak, A., & Habib, E. (2010). Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes. *Int. J. Engng Ed.*, 26(4), 963–973.
- Aguilar, J. (2017). *Análisis de tendencias de temperatura y precipitación pluvial en la cuenca del río Ilave*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Aliaga, I. (2017). *Modelación Hidrológica de la Cuenca del Río Huallaga, Aguas Arriba del Punto de Control Santa Lorenza*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Andrade, L., & Moreano, R. (2013). Sistema de Información para la Interpolación de datos de Temperatura y de Precipitación del Ecuador. *Revista Politecnica*, 32(1), 70–75.
- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturel, J. E., Mahé, G., Niel, H., & Dieulin, C. (2009). Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 77–89. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.77>
- Arsenault, R., Brissette, F., & Martel, J. L. (2018). The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *Journal of Hydrology*, 566(September), 346–362. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.027>
- Astorayme, M. (2017). *Análisis y evaluación comparativa de modelos hidrológicos agrupados y semidistribuidos aplicados al pronóstico de caudales diarios del río Chillón*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Astorayme, M., García, J., Suarez, W., Felipe, O., Huggel, C., & Molina, W. (2015). Modelización Hidrológica con un Enfoque Semidistribuido en la Cuenca del Río Chillón, Perú. *Revista Peruana Geo Atmosférica RGPA*, 4(4), 109–124.
- Autoridad Nacional del Agua. (2009). *Evaluación de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Ilave*. Ilave.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 0(0), 1. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Balairon, L. (2009). *Gestión de Recursos Hídricos* (reimpresión; Ediciones UPC, Ed.). Barcelona.
- Belizario, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú. *Rev. Investig. Altoandín.*, 17(1), 47–52. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2015.77>
- Betts, R. A., Alfieri, L., Bradshaw, C., Caesar, J., Feyen, L., Friedlingstein, P., ... Wyser, K. (2018). Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5°C and 2°C global warming with a higher-resolution global climate model. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119).



<https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0452>

- Boyle, D. P., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663–3674. <https://doi.org/10.1029/2000WR900207>
- Buytaert, W., & Bievre, B. De. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8), 13. <https://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Cepeda, J. (2017). *Análisis de los caudales nivo-glaciares históricos y proyectados en la cuenca del Río Olivares: Comparación entre el modelo DHSVM y WEAP*. Universidad de Chile.
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada* (13^o; McGraw-Hill, Ed.). Santafé de Bogotá.
- Clarke, R. T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, 19(1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90089-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90089-9)
- Devi, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall - Runoff Models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015–1031.
- Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico* (Segunda ed). España: Biblioteca virtual WASA-GN.
- Felipe, O., Sánchez, T., & Astorayme, M. (2015). *Actualización de los Escenarios de Disponibilidad Hídrica en el Perú en Contexto de Cambio Climático*. Lima-Perú, Peru.
- Fernández, M., Vela, A., & Castaño, S. (1997). *La Utilización de los Modelos en Hidrología*. <https://doi.org/ISSN 0214-4824, N°12, 305-318 p>
- Feyen, L., Vasquez, R., Christiaens, O., & Feyen, J. (2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology & Earth System Sciences*, 4(1), 47–6, 17.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., ... Rummukainen, M. (2013). Evaluation of Climate Models. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Fonkén, M. S. M. (2015). An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes. *Mires and Peat*, 15(December).



- García, J., Paredes, J., Foehn, A., Roquier, B., & Fluixa, J. (2018). *RS MINERVE - Technical Manual v2.16*. (RS MINERVE). Switzerland.
- García, M., Yaneth Contreras, C. T., Darío Sánchez, F. L., Marín, R. R., Guzmán, H. A., Hernando Wilches, J. S., ... Bermúdez Y Darío Ibáñez Q, M. R. (1999). *Sistema de Información Componente Hidrológico Redes, Mediciones, Observaciones y Procesos Básicos*.
- Gutiérrez, J. M., & Pons, M. R. (2006). Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica. *Revista de Cuaternario y Geomorfología*, 20(3–4), 15–28.
- Gutmann, E. D., Rasmussen, R. M., Liu, C., Ikeda, K., Gochis, D. J., Clark, M. P., ... Thompson, G. (2012). A comparison of statistical and dynamical downscaling of winter precipitation over complex terrain. *Journal of Climate*, 25(1), 262–281. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4109.1>
- Huerta, A. ., Aybar, C. ., & Lavado-Casimiro, W. (2018). PISCO temperatura versión 1.1 (PISCOt v.1.1.). In *SENAMHI-DHI-2018* (Vol. 1). Lima-Perú.
- Hurrell, J. W., Holland, M. M., Gent, P. R., Ghan, S., Kay, J. E., Kushner, P. J., ... Marshall, S. (2013). The community earth system model: A framework for collaborative research. In *American Meteorological Society* (Vol. 94). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00121.1>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú. (2015). Población 2000 al 2015.
- IPCC. (2013a). Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)], In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor. *Livestock Research for Rural Development*, 1447–1466. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.031>
- IPCC. (2013b). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattne. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers*. In [R.K. Pachauri, L.A. Meyer and Core Writing Team (eds.)]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- K. Ajami, N., Gupta, H., Wagener, T., & Sorooshian, S. (2004). Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*, 298(1–4), 112–135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.033>
- Kitoh, A., Kusunoki, S., & Nakaegawa, T. (2011). Climate change projections over South America in the late 21st century with the 20 and 60 km mesh Meteorological Research Institute atmospheric general circulation model (MRI-AGCM). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(6), 1–21.



<https://doi.org/10.1029/2010JD014920>

- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- León, Y., & Huarhua, D. (2015). *Impacto del cambio climático en la oferta hídrica superficial de la cuenca de río Piura*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Llauca, H. (2018). Modelos de Cambio Climático Para la Evaluación de la Disponibilidad Hídrica Futura. *Presentación de Curso - Taller.*, p. 17. Lima: Escuela de Pos Grado de la Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Lujano, E., Diaz, R., Lujano, A., & Quispe, J. P. (2014). Evaluación de la disponibilidad hídrica actual y futura en el contexto del cambio climático en las cuencas Ilave y Ramis. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 16 N° 2(65–72), 3–10.
- Lujano, E., Hidalgo, L. S., Tapia, B., & Lujano, A. (2016). Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4.5 y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el Altiplano Peruano. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 18(2), 195–204. <https://doi.org/10.18271/ria.2016.200>
- Marengo, J. A. (1995). Variations and change in south American streamflow. *Climatic Change*, 31(1), 99–117. <https://doi.org/10.1007/BF01092983>
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J., ... van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), 213–241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- MINAM. (2016). El Perú y el Cambio Climático. Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. In *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Lima-Perú.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1–4), 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neyra, C., Ugas, M., & Zegarra, J. (2009). *Informe Final Presupuesto Evaluado : INDECI*. Lima.



- Noa, R. (2016). *Efecto del Cambio Climático Sobre Elementos Termopluviométricos en la Cuenca Hidrográfica Ilave - Puno*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Palomino, H. (2015). *Efecto del Cambio Climático en la Hidrología de la Cuenca Chancay-Huaral*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Phillips, A. S., Deser, C., & Fasullo, J. (2014). Evaluating modes of variability in climate models. *Eos*, 95(49), 453–455. <https://doi.org/10.1002/2014EO490002>
- Piani, C., Haerter, J. O., & Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1–2), 187–192. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0134-9>
- Rast, W., & Rodgers, K. (1996). *Diagnostico Ambiental del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopo-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia-Perú*. Washington-EE.UU.
- Rojas, R. (2009). *Hidrologia Aplicada al Manejo de Cuencas* (Vol. 111). <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>
- Santos, D. (2016). *Oferta Hídrica Superficial del Río Coata-Puno Bajo Escenarios de Cambio Climático*. Lima-Perú.
- Shepard, D. (1968). *A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data*. Cambridge, Massachusetts.
- Swinton, S. M., & Quiroz, R. (2003). Is poverty to blame for soil, pasture and forest degradation in Peru's Altiplano? *World Development*, 31(11), 1903–1919. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2003.06.004>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Thompson, L. G. (2014). Global Climate Change: The Evidence and Our Options Introduction to Climate Change Glaciers as recorders of climate change Glaciers as indicators of climate change Evidence for recent acceleration of the rate of glacier loss Evidence that some glaciers a. *World Future Review*, 4(2114), 122.
- Thrasher, B., & Nemani, R. (2015). NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP). In *NEX-GDDP*. Washington-EE.UU.
- Ticona, A. (2016). *Modelación Hidrológica de Escenarios Futuros de Caudales Medios con la Aplicación del Modelo Hidrológico WEAP en la Cuenca del Río Ilave - Puno*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Trzaska, S., & Schnarr, E. (2014). A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections. African and Latin American Resilience to Climate Change (ARCC). In *United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD*. <https://doi.org/10.4236/ojog.2016.613098>
- Turc, L. (1954). Le Bilan D'eau des sols: Relations entre les précipitations, l'évaporation



- et l'écoulement. In *Annales Agronomiques* (pp. 491–595). Versailles.
- Vargas, P. (2009). El Cambio Climático y Sus Efectos en el Perú. In *BCRP - Serie de Documentos de Trabajo julio 2009*.
- Verzija, A., & Quispe, S. G. (2013). The System Nobody Sees: Irrigated Wetland Management and Alpaca Herding in the Peruvian Andes. *Mountain Research and Development*, 33(3), 280. <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-12-00123.1>
- Yates, D. N. (1997). Climate change impacts on the hydrologic resources of South America: an annual, continental scale assessment. *Climate Research*, 9, 147–155.



ANEXOS

ANEXO A: CÓDIGO EN “R STUDIO” PARA PROCESAR ARCHIVOS NETCDF DE GCMS

```
# Este script procesa archivos netCDF de Modelos de Circulación
General (GCM)
# Creado por Harold Llauca

# Remover variables anteriores y limpiar consola
rm(list=ls())
cat('\f')
library(ncdf4)

# Ingresar directorio de trabajo
path <-
'C:/Users/HAROLD/Desktop/Curso_Cambio_Climatico/Ejercicio_3'
setwd(path)

# Ingresar directorio GCM
path.gcm <-
'C:/Users/HAROLD/Desktop/Curso_Cambio_Climatico/Ejercicio_3/Pp'

# Cargar funcion
source('GCM_extract_region.R')

# Extraer datos para el Perú
x <- GCM_extract_region(path.gcm, c(-82,-68, -19, 0), 'Historical',
'Pp')
x$data # Datos GCM en 5D [lon x lat día x año x modelo]
dim(x$data)

# Exportar datos en formato. Rdata
save(x, file='Pp_GCM_Peru_2003_2005.Rda')

# Downscaling espacial para el pto (-75.53, -12.13)
# Cargar funcion
source('GCM_spatial_down.R')

y <- GCM_spatial_down(x$data, x$lon, x$lat, c(-75.53, -12.13), x$yini)
head(y$est) # Datos a pto de estacion
dim(y$est)

# Exportar datos diarios a .csv (delimitado por tabulacion)
df <- data.frame(y$dates, y$est)
colnames(df) <- c('Fecha', x$model)
write.table(df, file='Pp_GCM_estacion_diario.csv', row.names=F,
sep=";")

# Generar datos mensuales
df.m <- df
meses <- unique(format(as.Date(df$Fecha), "%B-%Y"))
df.m$Fecha <- format(as.Date(df.m$Fecha), "%B-%Y")
df.m <- aggregate(df.m[-1], by=list(df.m$Fecha), FUN=sum)
df.m <- df.m[match(meses, df.m[,1]),]

# Exportar datos mensuales en .csv (delimitado por tabulacion)
colnames(df.m) <- c('Fecha', x$model)
write.table(df.m, file='Pp_GCM_estacion_mensual.csv', row.names=F,
sep=";")
```



```
#####  
#####  
# Title : GCM_extract_region.R  
# Purpose : Read NetCDF files and subset data for an study area  
# Author : Harold Llauca  
#####  
#####  
  
# GCM_extract_region(path, region, period, var)  
# path : Path where netCDF (.nc) files are stored  
# region : Limits of the study area [min.lon, max.lon, min.lat,  
max.lat]  
# period : 'Historical' - Processing historical data  
# 'Future' - Processing future data  
# var : Select a variable to process  
# 'Pp' - Rainfall  
# 'Tmax' - Maximum temperature  
# 'Tmin' - Minimum temperature  
  
GCM_extract_region <- function(path, region, period, var){  
  
  # Initial time  
  start.time <- Sys.time()  
  
  # Verify packages  
  if("ncdf4" %in% rownames(installed.packages()) == FALSE){  
    install.packages("ncdf4")  
  }  
  if("stringr" %in% rownames(installed.packages()) == FALSE){  
    install.packages("stringr")  
  }  
  
  # Load packages  
  library(ncdf4)  
  library(stringr)  
  
  # Read filenames  
  files.all <- list.files(path, pattern='nc$')  
  
  # Extract model's names  
  names <- vector()  
  for (k in 1:length(files.all)){  
    y <- strsplit(files.all, '[_]')  
    y <- strsplit(y[[k]], '[ ]')  
    names[k] <- y[[6]]  
  }  
  model <- unique(names)  
  
  # Extract initial year from all files  
  y <- strsplit(files.all[1], '[_]')  
  y <- strsplit(y[[1]], '[ ]')  
  y.ini <- as.numeric(str_extract(y[[7]], "..."))  
  
  # Assign variables to numbers  
  if (var=='Pp') {id.var <- 1}  
  if (var=='Tmax'){id.var <- 2}  
  if (var=='Tmin'){id.var <- 3}  
  
  # Variable's names  
  if (period=='Historical'){  
    var.type <-c('pr1', 'tasmax1', 'tasmin1')  }  
}
```



```
    location <-c('lon1', 'lat1')
  }
  if (period=='Future'){
    var.type <-c('pr', 'tasmax', 'tasmin')
    location <-c('lon', 'lat')
  }
}

## Extract array dimension
=====
# Extract lat & lon from netCDF
ncin <- nc_open(paste(path, files.all[1], sep='/'))
lon <- nvar_get(ncin, location[1])-360
lat <- nvar_get(ncin, location[2])

# Set extension of the area of study
min.lon <- region[1]
max.lon <- region[2]
min.lat <- region[3]
max.lat <- region[4]

# Subset region
lon.region <- subset(lon, (lon> min.lon) & (lon< max.lon))
lat.region <- subset(lat, (lat> min.lat) & (lat< max.lat))

# Close netCDF
nc_close(ncin)

# Calculate no.years
no.years <- length(files.all[str_detect(files.all,
paste(model[1], '_', sep=''))])

# Create an array [lon x lat x day x year x model]
dta.reg <- array(NA, dim=c(length(lon.region), length(lat.region),
366, no.years, length(model)))

## Read all netCDF files
=====
# Read each GCM model
for (m in 1:length(model)){
  files.model <- files.all[str_detect(files.all,
paste(model[m], '_', sep=''))]
  no.files.model <- length(files.model)

# Read files of an GCM model
  for (w in 1:no.files.model){

## Show message
    count.all <- round(((m)/length(model)*100), 2)
    count.model <- round((w/no.files.model)*100, 2)
    cat('\f')
    print(paste('Total de modelos:...', length(model)), sep='')
    print(paste('Modelos procesados:...', count.all, '%', sep=''))
    print(paste('Procesando modelo N°-', m, ' ', model[m], ':...',
count.model, '%', sep=''))

# Open netCDF
    ncin <- nc_open(paste(path, files.model[w], sep='/'))

# Read netCDF
    lon.gcm <- nvar_get(ncin, location[1])-360
    lat.gcm <- nvar_get(ncin, location[2])
  }
}
}
```



```
lon.reg <- subset(lon.gcm, (lon.gcm > min.lon) & (lon.gcm <
max.lon))
lat.reg <- subset(lat.gcm, (lat.gcm > min.lat) & (lat.gcm <
max.lat))

if (var == 'Pp') {
  dta <- ncvar_get(ncin, var.type[id.var]) * 86400
} else {
  dta <- ncvar_get(ncin, var.type[id.var]) - 273
}

# Subset data for the study area [lat x lon x day x year x
model]
if (period == 'Historical') {
  lon.gcm]
  dta <- dta[, match(lat.reg, lat.gcm), match(lon.reg,
lon.gcm)]
  dta <- aperm(dta, c(3, 2, 1))

dta.reg[c(1:dim(dta)[1]), c(1:dim(dta)[2]), c(1:dim(dta)[3]), w, m] <- dta
}

if (period == 'Future') {
  dta <- dta[match(lon.reg, lon.gcm),
match(lat.reg, lat.gcm), ]

dta.reg[c(1:dim(dta)[1]), c(1:dim(dta)[2]), c(1:dim(dta)[3]), w, m] <- dta
}
}
}

# Output variables
Yreturn <- list(data=dta.reg, lat=lat.region, lon=lon.region,
model=model, yini=y.ini, var=var, per=period)
return(Yreturn)

# Show computing time
end.time <- Sys.time()
time.taken <- end.time - start.time
print(round(time.taken))
alarm()
}
```



```
#####  
#####  
# Title : GCM_spatial_down.R  
# Purpose : Spatial downscaling using an IDW interpolation  
# Author : Harold Llauca  
#####  
#####  
  
# GCM_spatial_down(input, lon.reg, lat.reg, coord, year.ini)  
# input : Input array [lon x lat x day x year x model]  
# lon.reg : Vector of longitudes of the study area  
# lat.reg : Vector of latitudes of the study area  
# coord : Vector with station coordinates [lon, lat]  
# year.ini : Initial year to compute leap years  
  
GCM_spatial_down <- function(input, lon.reg, lat.reg, coord,  
year.ini) {  
  
  # Create an empty matrix to store data [day x year x model]  
  dta.gcm <- array(NA, dim=c(365, dim(input)[4], dim(input)[5]))  
  
  # Read files for each model  
  for (m in 1:dim(input)[5]) {  
  
    # Create an empty matrix to store data [day x year]  
    dta.gcm.ex <- matrix(NA, nrow=365, ncol=dim(input)[4])  
  
    # Read each model files  
    for (w in 1:dim(input)[4]) {  
  
      # Input data  
      dta <- input[, , w, m]  
  
      # Read station coordinates  
      lon.est <- coord[1]  
      lat.est <- coord[2]  
  
      # Calculate lat/lon differences  
      dlat <- abs(lat.reg - lat.est)  
      dlon <- abs(lon.reg - lon.est)  
  
      # Subset lat/lon cells  
      min.lat1 <- which(dlat==min(dlat))  
      min.lat2 <- which(dlat==min(dlat[dlat!=min(dlat)]))  
      min.lon1 <- which(dlon==min(dlon))  
      min.lon2 <- which(dlon==min(dlon[dlon!=min(dlon)]))  
  
      # Calculate lat/lon distances  
      dist.lat <- dlat[c(min.lat1, min.lat2, min.lat2, min.lat1)]  
      dist.lon <- dlon[c(min.lon1, min.lon1, min.lon2, min.lon2)]  
  
      # Extract the 4 closest points  
      A <- dta[min.lon1, min.lat1, ]  
      B <- dta[min.lon1, min.lat2, ]  
      C <- dta[min.lon2, min.lat2, ]  
      D <- dta[min.lon2, min.lat1, ]  
  
      # Apply an IDW interpolation  
      dist <- (dist.lat^2 + dist.lon^2)^0.5  
      dist.inv <- 1/dist^2  
      dta.est <- (A*dist.inv[1] + B*dist.inv[2] +
```



```
C*dist.inv[3] + D*dist.inv[4])/sum(dist.inv)

# Fix leap years
time <- dta[1,1,]
no.years <- length(time[!is.na(time)])

if (no.years==366){
  dta.gcm.ex[,w] <- dta.est[-60]
} else {
  dta.gcm.ex[,w] <- dta.est[-366]
}
}

# Store data [day x year x model]
dta.gcm[c(1:dim(dta.gcm.ex)[1]),c(1:dim(dta.gcm.ex)[2]),m] <-
dta.gcm.ex
}

# Save data in a [time x model] matrix
dta.gcm.est <- matrix(NA, nrow=365*dim(input)[4],
ncol=dim(input)[5])
for (ww in 1:dim(input)[5]){
  dta.gcm.vec <- na.omit(as.vector(dta.gcm[, ,ww]))
  dta.gcm.est[c(1:length(dta.gcm.vec)),ww] <- round(dta.gcm.vec,2)
}

# Create dates
dates <- seq(as.Date(paste(year.ini, '1/1', sep='/')),
as.Date(paste(year.ini+dim(input)[4]-1, '12/31', sep='/')), by='day')

# Remove leaps
dates <- dates[format(dates, "%m %d") != "02 29"]

Yreturn <- list(est=dta.gcm.est, dates=dates)
return(Yreturn)
}
```

ANEXO B: RESULTADOS DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL DE VARIABLES DE PRECIPITACIÓN.

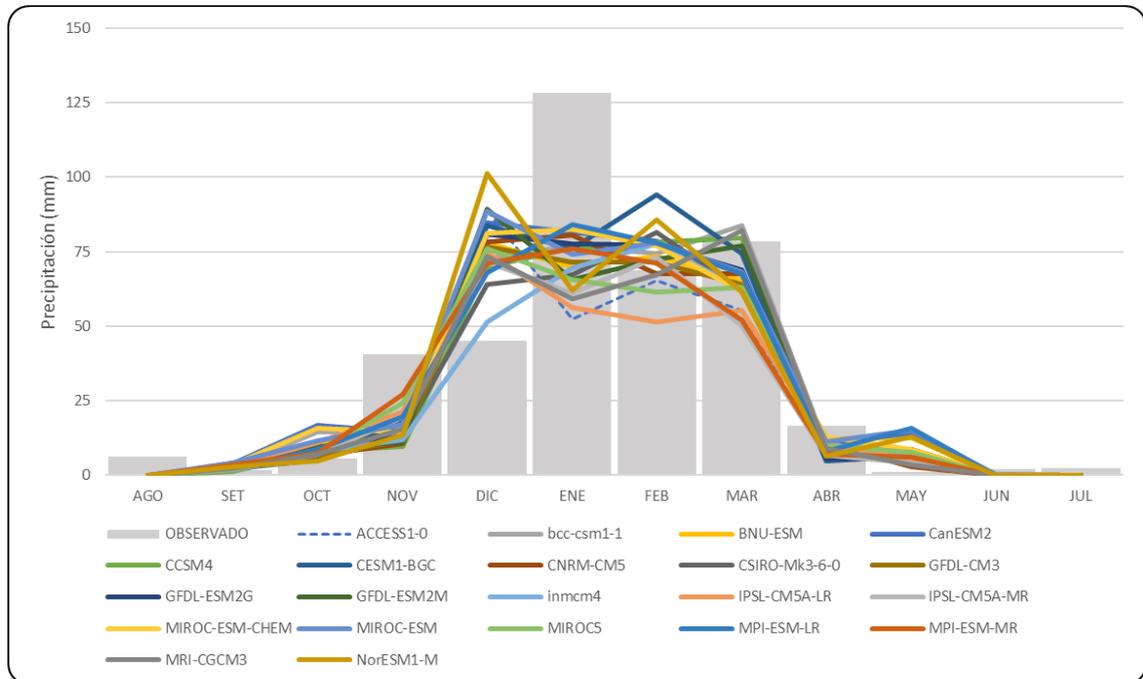


Figura 36: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Capaso.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN CAPASO												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	6.16	1.64	5.47	40.43	45.19	128.25	68.65	78.54	16.48	1.17	1.92	2.32
ACCESS1-0	0.00	4.45	7.52	18.10	88.92	52.34	65.42	55.28	5.36	9.05	0.00	0.00
bcc-csm1-1	0.00	2.94	14.49	14.74	72.68	76.95	74.44	83.88	9.72	8.77	0.12	0.00
BNU-ESM	0.00	3.27	10.02	15.90	77.94	69.94	73.52	65.23	12.26	12.54	0.23	0.00
CanESM2	0.00	3.75	16.70	14.55	84.87	81.52	78.70	67.63	10.62	14.24	0.32	0.00
CCSM4	0.00	1.33	8.00	9.69	69.89	76.45	78.41	79.68	9.61	4.72	0.00	0.00
CESM1-BGC	0.00	2.21	5.17	17.70	83.67	76.15	94.27	74.24	4.89	6.46	0.00	0.00
CNRM-CM5	0.00	2.67	6.68	10.72	78.41	80.53	67.56	67.50	10.69	2.84	0.00	0.00
CSIRO-Mk3-6-0	0.00	2.22	7.73	13.37	64.09	67.19	81.57	61.65	7.63	4.90	0.09	0.00
GFDL-CM3	0.00	2.21	6.85	11.67	76.73	71.45	71.54	63.94	7.15	8.83	0.03	0.00
GFDL-ESM2G	0.00	2.47	8.75	13.25	80.81	77.66	77.17	68.86	5.61	5.45	0.01	0.00
GFDL-ESM2M	0.00	2.89	9.61	10.91	89.42	65.81	72.54	77.05	9.22	5.58	0.02	0.00
inmcm4	0.00	2.34	8.15	11.86	51.57	69.45	77.71	62.32	10.65	6.15	0.00	0.00
IPSL-CM5A-LR	0.00	3.05	11.00	21.19	74.74	56.38	51.45	55.38	10.49	5.12	0.40	0.00
IPSL-CM5A-MR	0.00	2.00	7.18	19.55	71.55	61.15	73.26	49.97	6.89	4.10	0.02	0.00
MIROC-ESM-CHEM	0.00	3.44	15.80	14.41	81.18	82.54	76.87	61.66	12.84	8.83	0.12	0.00
MIROC-ESM	0.02	4.02	11.69	17.05	88.49	74.14	78.06	68.36	11.23	15.24	0.22	0.00
MIROC5	0.00	2.90	8.06	24.23	75.98	65.66	61.31	63.01	10.08	7.68	0.00	0.00
MPI-ESM-LR	0.02	2.49	8.82	19.85	67.84	84.02	77.91	67.74	8.06	15.77	0.08	0.00
MPI-ESM-MR	0.00	3.54	7.26	27.08	71.20	76.09	71.13	52.13	7.08	6.11	0.10	0.00
MRI-CGCM3	0.00	2.10	7.09	15.51	73.52	59.31	67.43	82.30	9.10	3.66	0.00	0.00
NorESM1-M	0.00	2.73	4.85	13.54	101.11	62.01	85.72	61.43	6.41	12.86	0.04	0.00

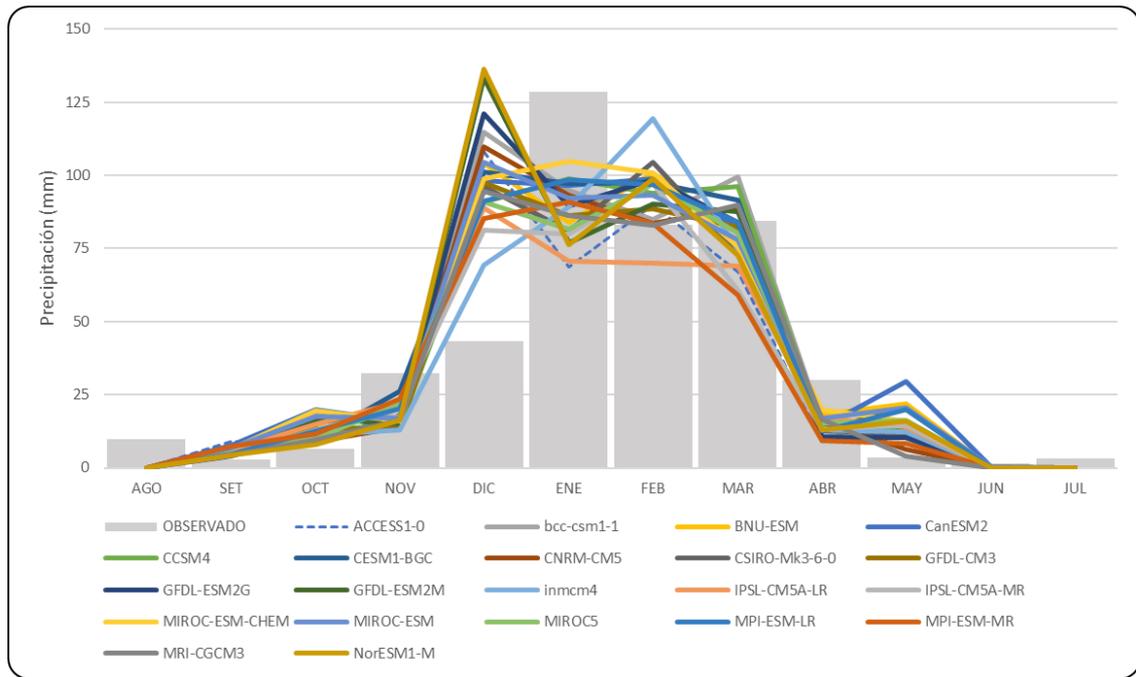


Figura 37: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Capaso.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN CHICILLAPI												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	9.83	2.91	6.33	32.49	43.42	128.58	83.09	84.53	29.95	3.46	1.66	3.24
ACCESS1-0	0.02	8.87	9.38	18.28	108.26	68.61	89.99	67.16	10.36	10.69	0.04	0.00
bcc-csm1-1	0.03	5.72	18.72	17.12	114.89	94.76	84.83	99.56	15.43	15.89	0.16	0.00
BNU-ESM	0.12	5.56	14.52	17.19	104.22	84.09	100.96	80.30	18.29	21.93	0.17	0.00
CanESM2	0.11	7.47	19.81	15.93	98.17	96.56	98.84	82.09	14.00	29.64	0.19	0.00
CCSM4	0.02	4.49	13.18	14.37	90.80	99.00	93.89	96.25	14.51	12.54	0.03	0.00
CESM1-BGC	0.00	6.94	9.88	26.14	101.29	97.33	97.37	91.57	9.89	11.06	0.01	0.00
CNRM-CM5	0.01	5.51	9.12	13.98	109.77	93.20	83.75	88.94	15.81	6.43	0.04	0.00
CSIRO-Mk3-6-0	0.00	4.06	11.67	14.72	96.36	80.99	104.65	73.36	12.48	11.78	0.10	0.00
GFDL-CM3	0.01	6.06	13.23	13.21	97.37	86.26	88.61	82.35	13.13	20.40	0.02	0.00
GFDL-ESM2G	0.01	4.55	15.96	16.77	121.22	89.68	98.56	84.05	10.57	10.41	0.02	0.00
GFDL-ESM2M	0.01	5.42	16.67	15.13	133.47	76.85	90.10	87.71	16.27	14.01	0.01	0.00
inmcm4	0.00	5.38	11.12	13.08	69.40	89.22	119.38	74.80	12.98	12.12	0.03	0.00
IPSL-CM5A-LR	0.04	6.13	14.90	22.45	88.77	70.65	69.93	68.94	17.25	14.02	0.15	0.00
IPSL-CM5A-MR	0.01	4.20	12.89	20.94	81.20	79.81	97.07	60.78	13.14	14.74	0.02	0.00
MIROC-ESM-CHEM	0.03	6.22	19.46	15.77	98.95	104.72	100.69	75.68	19.92	15.82	0.06	0.00
MIROC-ESM	0.05	6.79	17.47	16.83	104.57	92.30	93.18	78.05	16.89	20.57	0.33	0.00
MIROC5	0.01	4.70	10.39	21.72	90.79	81.71	97.04	80.18	15.35	16.14	0.01	0.00
MPI-ESM-LR	0.03	4.82	12.62	20.31	91.31	98.51	96.88	84.01	12.73	20.05	0.07	0.00
MPI-ESM-MR	0.01	7.15	11.77	23.61	85.33	90.99	83.57	58.90	9.23	8.36	0.08	0.00
MRI-CGCM3	0.01	4.28	9.62	16.29	94.63	86.22	82.90	89.78	16.63	3.88	0.01	0.00
NorESM1-M	0.02	4.41	7.92	16.30	136.29	76.15	98.91	72.78	12.78	16.02	0.16	0.00

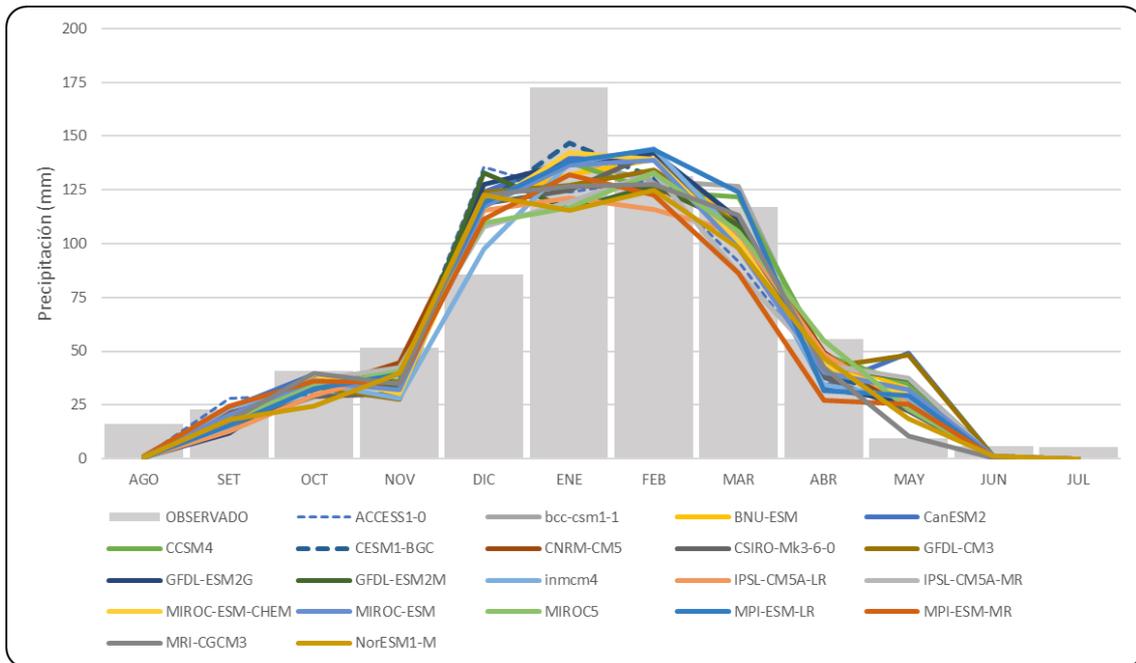


Figura 38: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Ilave.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN ILAVE												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	16.20	23.04	40.94	51.66	85.46	172.54	131.34	117.22	55.77	9.35	5.80	5.57
ACCESS1-0	0.89	28.07	29.77	35.72	135.58	124.05	129.94	91.87	40.10	26.81	0.91	0.00
bcc-csm1-1	1.16	17.82	37.77	35.06	123.89	138.50	129.19	126.75	42.34	29.19	1.19	0.00
BNU-ESM	0.88	15.81	34.34	34.99	121.13	131.85	139.22	109.89	48.03	31.96	0.80	0.00
CanESM2	1.21	23.51	39.34	32.49	123.80	139.69	138.56	105.44	33.25	49.14	0.81	0.00
CCSM4	0.41	15.15	38.63	36.07	119.64	137.84	124.38	121.63	48.35	34.70	0.29	0.00
CESM1-BGC	0.47	23.82	35.48	40.82	118.58	146.92	130.71	108.96	39.31	28.21	0.18	0.00
CNRM-CM5	1.29	21.31	32.16	44.82	122.94	126.63	126.50	108.55	49.68	22.30	1.22	0.00
CSIRO-Mk3-6-0	0.54	15.20	28.76	30.35	118.44	125.07	142.28	102.46	38.11	22.38	0.65	0.00
GFDL-CM3	1.14	17.91	33.26	27.59	123.79	127.30	134.38	108.58	42.33	48.44	0.85	0.00
GFDL-ESM2G	0.73	11.81	38.61	35.37	127.51	137.46	142.35	111.32	32.92	26.37	0.79	0.00
GFDL-ESM2M	0.99	14.48	36.65	33.11	132.92	115.93	127.07	108.95	43.30	36.92	0.78	0.00
inmcm4	0.75	23.59	35.21	27.96	97.66	137.41	143.98	103.16	34.46	28.26	0.25	0.00
IPSL-CM5A-LR	0.83	12.93	29.19	40.63	115.25	121.16	115.94	105.10	48.46	25.28	0.69	0.00
IPSL-CM5A-MR	1.00	15.01	36.44	42.55	107.72	119.58	133.08	86.48	43.74	37.49	0.39	0.00
MIROC-ESM-CHEM	1.49	18.18	39.31	30.52	116.63	142.35	139.18	101.13	43.31	29.36	0.71	0.00
MIROC-ESM	1.03	20.63	35.48	32.27	117.05	136.72	138.59	97.99	40.18	32.21	1.00	0.00
MIROC5	0.25	17.65	34.00	40.41	109.57	116.93	132.94	105.82	55.02	23.35	0.83	0.00
MPI-ESM-LR	0.86	15.51	32.61	39.19	119.04	138.45	143.66	124.06	31.50	29.59	0.28	0.00
MPI-ESM-MR	0.96	24.52	36.04	35.27	111.29	131.95	122.80	86.38	27.33	25.38	0.74	0.00
MRI-CGCM3	1.01	17.62	39.59	34.61	122.67	126.51	127.76	113.36	42.63	10.37	0.15	0.00
NorESM1-M	0.62	18.03	24.50	39.76	122.55	115.56	124.75	97.93	46.70	18.52	1.01	0.00

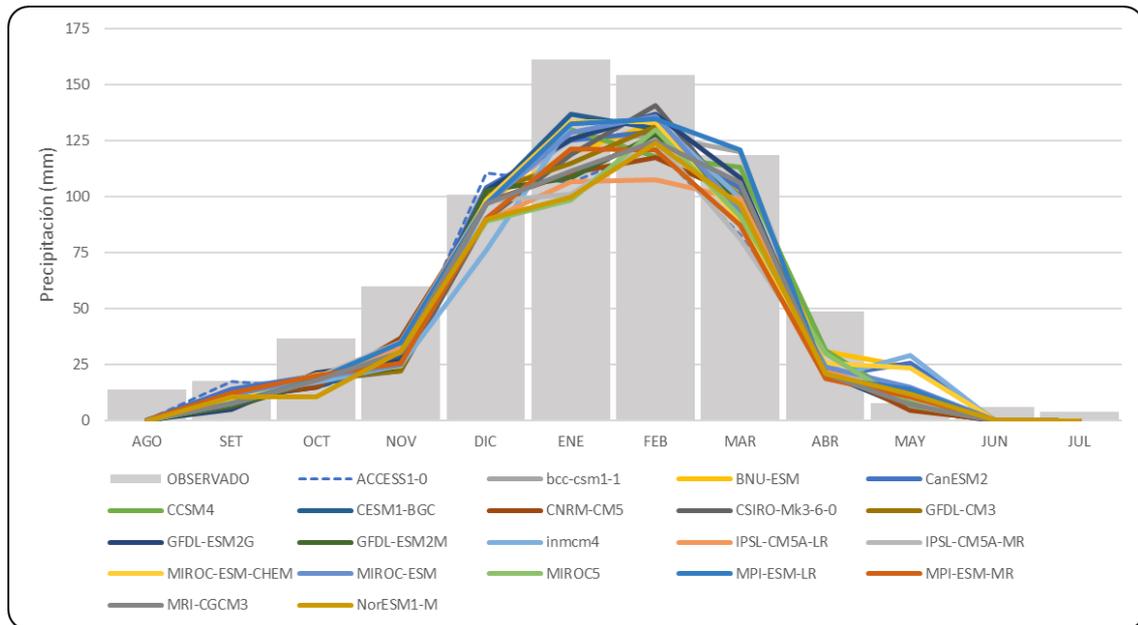


Figura 39: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Laraqueri.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN LARAQUERI												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	14.02	17.69	36.62	59.97	100.93	161.04	154.41	118.63	48.70	7.92	6.05	3.78
ACCESS1-0	0.04	17.41	14.55	26.29	110.70	106.05	121.65	82.79	23.86	8.79	0.07	0.00
bcc-csm1-1	0.12	10.07	20.41	25.71	98.61	125.49	127.24	120.18	23.07	10.41	0.08	0.00
BNU-ESM	0.10	9.52	19.93	29.16	98.35	118.96	132.76	101.68	30.87	24.04	0.05	0.00
CanESM2	0.09	13.91	20.19	28.72	104.17	125.36	128.97	103.80	19.66	25.71	0.05	0.00
CCSM4	0.02	6.18	16.96	25.64	96.84	130.11	117.96	113.07	31.37	8.07	0.01	0.00
CESM1-BGC	0.02	9.64	15.07	28.06	98.94	136.80	130.38	99.87	20.89	5.38	0.00	0.00
CNRM-CM5	0.06	10.07	15.01	36.70	97.56	110.38	117.62	100.16	23.09	4.64	0.07	0.00
CSIRO-Mk3-6-0	0.04	6.05	18.09	22.19	89.64	118.74	140.72	95.26	23.62	10.50	0.04	0.00
GFDL-CM3	0.10	11.14	18.93	22.30	102.10	114.63	131.12	100.38	21.81	10.11	0.05	0.00
GFDL-ESM2G	0.08	5.03	21.22	26.46	102.58	125.40	136.71	108.39	19.43	12.72	0.04	0.00
GFDL-ESM2M	0.10	6.39	18.09	23.84	102.89	108.27	127.82	97.96	22.06	14.10	0.04	0.00
inmcm4	0.05	11.61	17.25	24.93	75.92	132.36	134.78	99.42	18.64	29.22	0.01	0.00
IPSL-CM5A-LR	0.05	7.58	18.01	32.01	88.90	106.80	107.45	99.10	22.77	10.26	0.04	0.00
IPSL-CM5A-MR	0.03	7.80	19.30	34.95	97.83	101.25	125.34	81.20	25.11	10.08	0.01	0.00
MIROC-ESM-CHEM	0.10	10.30	20.53	24.40	98.63	133.41	133.27	88.89	25.54	23.51	0.04	0.00
MIROC-ESM	0.15	11.36	19.04	24.59	96.74	128.69	135.95	93.83	23.95	15.05	0.08	0.00
MIROC5	0.01	7.95	18.30	30.33	89.05	98.55	129.77	91.34	29.80	6.62	0.05	0.00
MPI-ESM-LR	0.09	7.76	18.35	34.61	96.55	132.66	134.74	120.76	19.36	14.03	0.02	0.00
MPI-ESM-MR	0.11	12.29	19.87	25.77	90.47	121.45	120.71	87.13	18.61	10.51	0.05	0.00
MRI-CGCM3	0.07	7.78	17.69	30.36	96.90	111.41	124.54	106.22	20.92	7.16	0.00	0.00
NorESM1-M	0.02	10.67	10.72	30.77	89.72	99.93	123.96	96.13	20.96	11.85	0.07	0.00

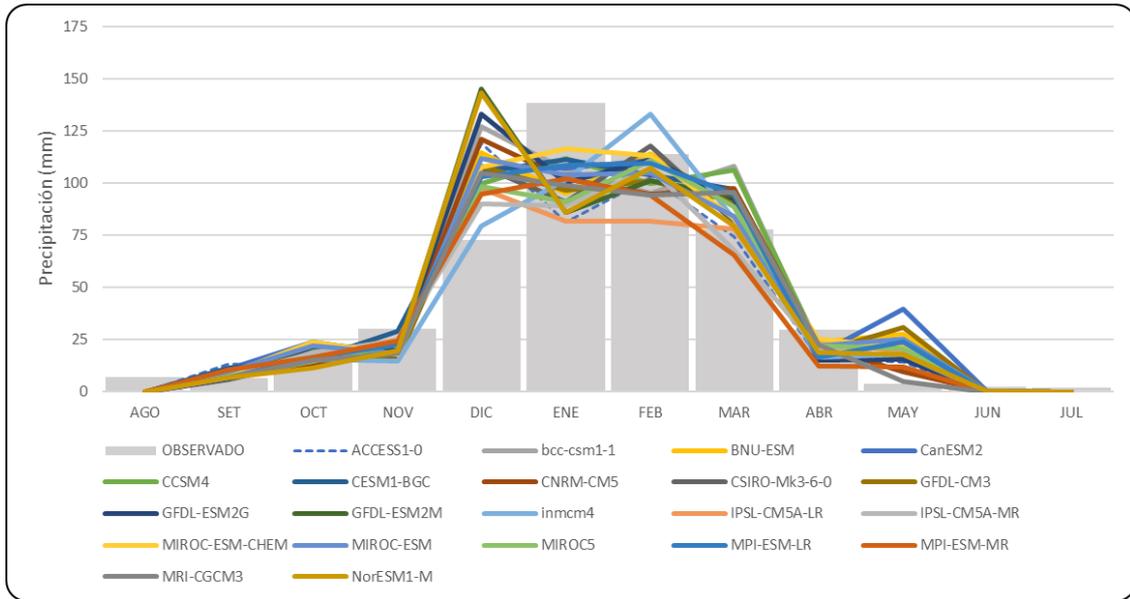


Figura 40: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Mazocruz.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN MAZOCRUZ												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	7.11	6.46	13.86	30.29	72.62	138.44	113.76	77.90	29.67	4.04	2.55	2.05
ACCESS1-0	0.04	13.40	12.60	20.44	118.96	81.30	102.46	74.15	15.94	14.27	0.18	0.00
bcc-csm1-1	0.07	8.37	23.06	19.78	127.15	106.31	95.29	107.94	20.79	21.11	0.38	0.00
BNU-ESM	0.19	7.80	19.00	19.47	114.59	95.06	114.17	88.77	24.17	27.88	0.28	0.00
CanESM2	0.16	11.01	24.06	18.16	107.25	107.27	110.70	89.51	17.81	39.58	0.28	0.00
CCSM4	0.05	7.37	19.90	18.73	99.92	111.61	99.75	106.30	21.93	20.55	0.07	0.00
CESM1-BGC	0.03	11.49	15.57	29.07	105.21	111.28	104.06	96.80	15.90	15.94	0.03	0.00
CNRM-CM5	0.05	8.65	13.33	18.05	120.83	102.03	94.88	97.41	22.17	9.88	0.23	0.00
CSIRO-Mk3-6-0	0.02	6.15	15.29	16.81	107.98	91.18	117.83	81.08	17.48	16.44	0.18	0.00
GFDL-CM3	0.03	9.13	18.20	15.18	108.06	96.56	101.01	91.05	19.00	30.89	0.09	0.00
GFDL-ESM2G	0.02	6.38	21.68	19.72	133.08	100.24	111.40	92.23	15.43	15.49	0.10	0.00
GFDL-ESM2M	0.02	7.69	22.09	18.29	145.18	85.75	100.98	93.89	22.66	21.89	0.10	0.00
inmcm4	0.01	8.76	15.73	14.87	79.45	101.49	132.88	82.43	16.42	18.20	0.06	0.00
IPSL-CM5A-LR	0.07	8.23	18.33	24.95	97.56	81.61	81.75	77.99	23.75	19.28	0.17	0.00
IPSL-CM5A-MR	0.07	6.67	18.78	24.27	89.93	89.16	106.95	67.78	20.36	22.17	0.08	0.00
MIROC-ESM-CHEM	0.13	8.75	23.80	17.77	107.82	116.30	113.35	83.31	25.40	21.03	0.18	0.00
MIROC-ESM	0.08	9.69	22.10	18.50	111.87	103.73	104.86	83.84	22.02	25.20	0.52	0.00
MIROC5	0.03	7.16	14.81	23.15	98.25	91.10	110.92	88.66	22.31	20.93	0.14	0.00
MPI-ESM-LR	0.05	7.06	16.63	22.44	102.79	108.58	109.60	94.48	16.54	23.89	0.10	0.00
MPI-ESM-MR	0.04	10.74	16.46	24.55	94.86	102.02	94.30	65.48	12.35	11.87	0.18	0.00
MRI-CGCM3	0.14	6.78	15.03	18.21	104.90	98.90	94.20	95.48	22.43	5.15	0.03	0.00
NorESM1-M	0.05	6.81	11.33	19.64	143.29	86.09	107.29	79.60	19.12	17.91	0.32	0.00

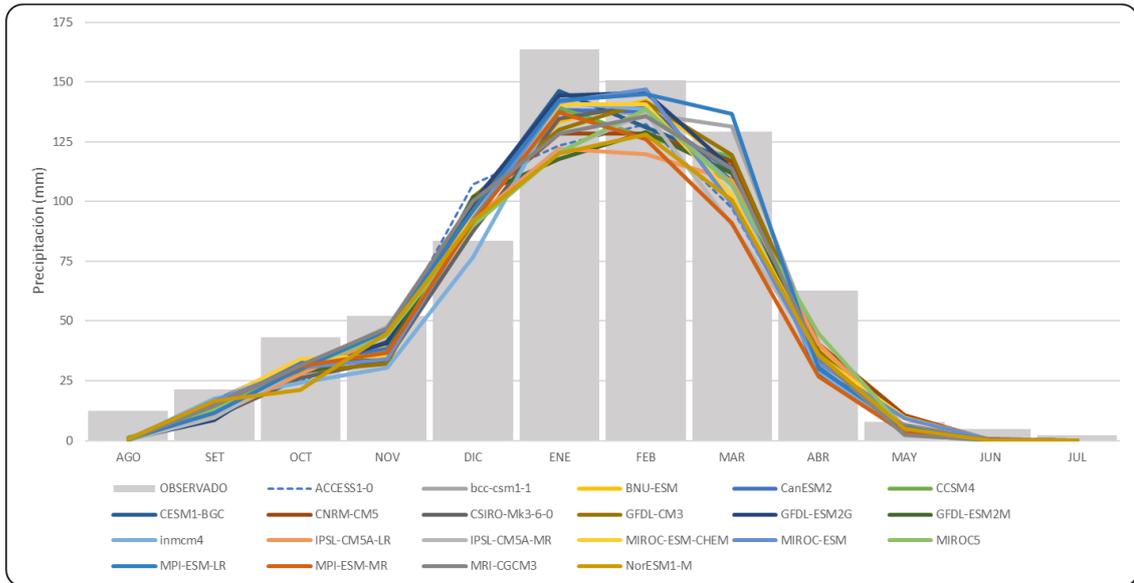


Figura 41: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Puno.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN PUNO												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	12.50	21.46	43.18	52.24	83.73	163.65	150.64	129.12	62.87	7.91	4.73	2.34
ACCESS1-0	0.72	15.95	24.47	41.72	107.06	123.42	132.46	97.43	33.32	6.54	0.10	0.00
bcc-csm1-1	0.53	15.06	30.17	38.06	98.31	138.37	136.70	131.29	36.86	9.75	0.22	0.00
BNU-ESM	0.42	13.17	28.42	39.31	96.16	133.31	142.35	115.01	39.49	6.04	0.36	0.00
CanESM2	0.62	16.45	32.98	38.31	100.99	138.18	137.69	112.40	28.35	10.34	0.32	0.00
CCSM4	1.43	9.97	30.20	36.94	99.96	139.16	126.88	118.69	37.43	5.20	0.02	0.00
CESM1-BGC	0.86	13.59	28.29	41.33	98.05	146.41	131.03	116.85	30.33	4.93	0.10	0.00
CNRM-CM5	0.49	14.41	28.82	45.24	97.83	128.34	128.25	116.69	40.34	10.70	0.02	0.00
CSIRO-Mk3-6-0	0.34	9.98	26.21	33.79	87.60	134.82	140.67	108.61	37.00	3.98	0.81	0.00
GFDL-CM3	0.81	13.68	28.67	32.01	101.92	130.12	141.76	119.55	37.37	3.73	0.17	0.00
GFDL-ESM2G	0.57	8.57	31.54	40.67	99.51	144.19	145.71	113.73	27.64	5.13	0.34	0.00
GFDL-ESM2M	0.62	10.30	28.04	36.47	101.77	117.96	129.20	111.94	33.53	6.26	0.41	0.00
inmcm4	0.53	17.54	24.17	30.47	76.75	141.41	138.81	107.99	29.30	3.15	0.03	0.00
IPSL-CM5A-LR	0.60	10.17	28.00	44.01	92.50	122.23	119.78	108.92	40.37	5.95	0.42	0.00
IPSL-CM5A-MR	0.43	9.64	30.06	47.63	90.79	120.83	136.91	90.36	35.77	5.44	0.04	0.00
MIROC-ESM-CHEM	0.69	15.91	34.11	35.48	93.83	140.59	140.79	102.47	35.30	9.53	0.23	0.00
MIROC-ESM	0.63	16.64	30.63	34.18	92.63	141.67	146.81	98.80	32.45	9.35	0.25	0.00
MIROC5	0.17	12.97	30.42	43.90	89.98	120.37	138.50	106.82	44.80	4.59	0.03	0.00
MPI-ESM-LR	0.56	11.59	30.27	46.18	96.40	142.39	144.96	136.71	30.02	5.81	0.07	0.00
MPI-ESM-MR	0.55	14.91	30.98	36.70	91.57	137.18	125.97	91.10	26.85	3.51	0.49	0.00
MRI-CGCM3	0.34	14.47	31.48	47.14	100.33	128.56	135.56	113.87	35.07	2.43	0.02	0.00
NorESM1-M	0.71	16.55	21.11	45.05	92.13	120.26	127.99	100.49	35.79	5.10	0.13	0.00

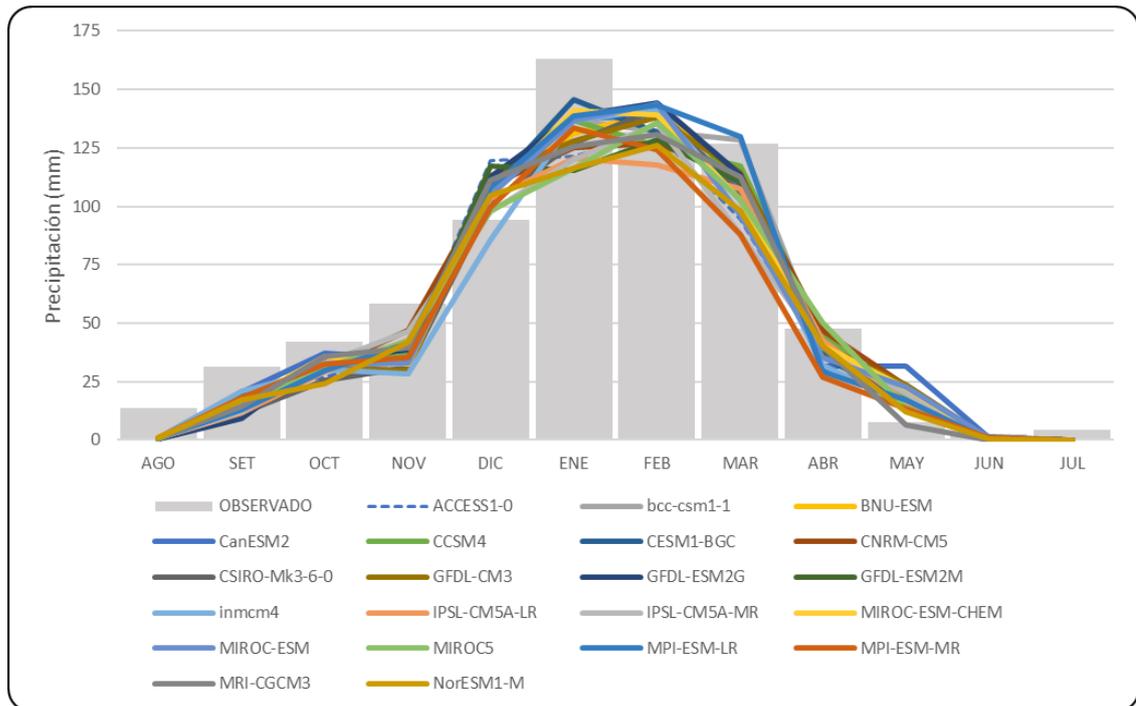


Figura 42: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Rincón de la Cruz.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN RINCÓN DE LA CRUZ												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	13.86	31.32	42.17	58.35	94.07	163.07	131.99	126.69	47.74	7.46	2.56	4.47
ACCESS1-0	1.03	20.66	27.08	37.86	119.62	121.67	131.44	94.49	35.28	18.52	0.43	0.00
bcc-csm1-1	0.98	16.64	33.16	35.88	109.61	137.03	132.31	128.52	39.17	21.87	0.70	0.00
BNU-ESM	0.70	13.69	29.76	36.72	108.62	131.21	140.76	113.21	45.40	17.83	0.77	0.00
CanESM2	1.07	20.31	37.17	34.77	112.30	138.29	137.72	108.75	31.61	31.65	0.68	0.00
CCSM4	0.55	12.99	34.89	36.21	107.71	136.71	125.55	117.44	44.55	18.75	0.12	0.00
CESM1-BGC	0.65	18.99	30.92	39.69	107.14	145.63	131.86	112.16	35.90	16.73	0.20	0.00
CNRM-CM5	1.07	17.35	30.62	47.14	109.09	125.34	126.89	113.75	46.92	23.12	0.39	0.00
CSIRO-Mk3-6-0	0.57	11.66	25.52	31.29	101.60	127.05	141.88	105.20	38.09	12.93	1.38	0.00
GFDL-CM3	0.99	15.65	31.27	29.80	112.86	127.94	138.10	114.68	40.53	23.81	0.50	0.00
GFDL-ESM2G	0.64	9.42	35.29	38.45	112.42	138.80	144.42	113.50	30.61	15.90	0.72	0.00
GFDL-ESM2M	0.74	11.40	32.69	34.48	117.34	115.52	128.55	110.26	36.64	21.59	0.81	0.00
inmcm4	0.87	21.07	30.28	28.53	85.49	136.84	141.57	102.43	32.17	14.75	0.10	0.00
IPSL-CM5A-LR	0.79	11.59	29.20	42.91	103.47	120.67	117.56	107.52	43.00	16.24	0.81	0.00
IPSL-CM5A-MR	0.88	12.25	33.20	46.44	97.53	120.21	135.55	88.10	39.69	19.86	0.16	0.00
MIROC-ESM-CHEM	1.26	16.00	35.91	32.75	105.15	141.15	139.02	103.05	40.60	22.41	0.57	0.00
MIROC-ESM	0.89	17.68	32.18	33.17	104.76	136.76	143.64	96.23	35.40	22.91	0.71	0.00
MIROC5	0.27	15.38	31.09	42.44	98.36	116.48	135.98	102.78	50.09	13.83	0.28	0.00
MPI-ESM-LR	0.89	12.90	29.94	41.60	107.87	138.65	143.49	129.63	29.30	17.11	0.17	0.00
MPI-ESM-MR	1.01	18.34	32.42	35.16	99.70	133.51	124.19	88.08	26.81	13.59	0.91	0.00
MRI-CGCM3	0.80	14.45	35.60	39.73	111.21	125.45	130.79	112.72	40.04	6.56	0.06	0.00
NorESM1-M	0.79	17.33	24.41	41.74	104.68	116.22	126.16	98.26	40.44	11.99	0.51	0.00

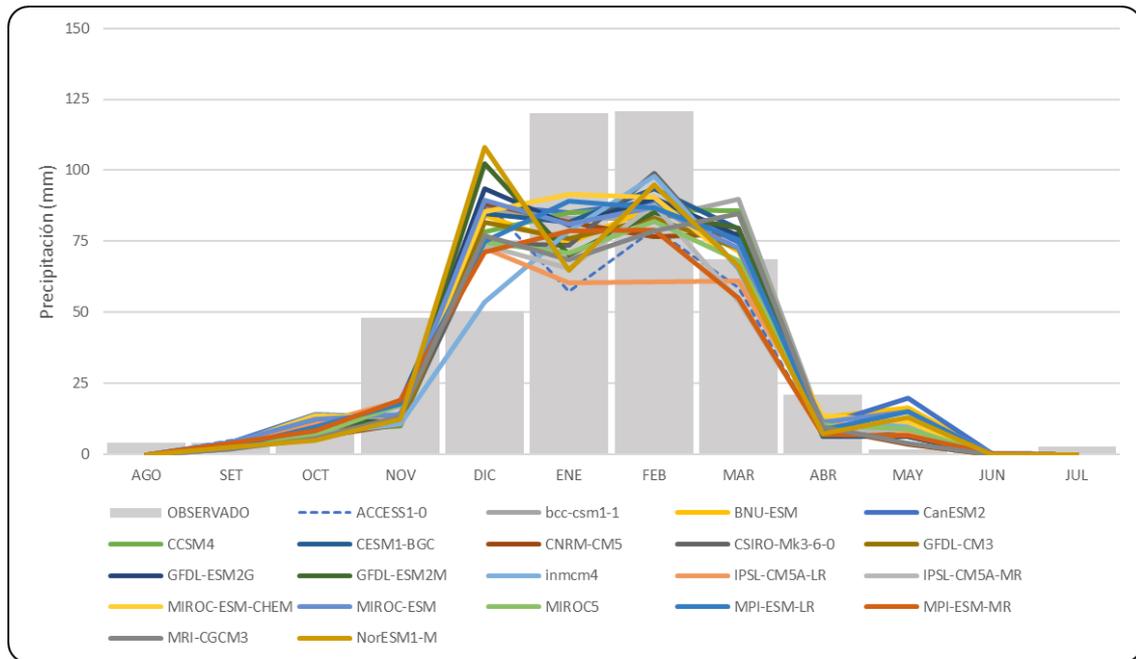


Figura 43: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Coypa Coypa.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN COYPA COYPA												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	4.02	4.01	7.03	48.08	50.59	119.99	120.65	68.82	20.91	1.80	1.58	2.92
ACCESS1-0	0.00	5.10	6.56	14.78	89.37	57.32	79.39	58.87	6.27	7.58	0.01	0.00
bcc-csm1-1	0.00	3.35	13.70	13.11	86.54	82.92	83.12	89.93	10.26	9.64	0.07	0.00
BNU-ESM	0.00	3.43	10.29	13.93	84.01	74.27	87.58	71.52	12.98	16.46	0.10	0.00
CanESM2	0.00	4.42	13.98	13.17	87.79	85.13	89.26	74.77	10.35	19.76	0.14	0.00
CCSM4	0.00	1.93	8.39	10.18	78.50	85.18	86.19	85.63	9.40	7.15	0.01	0.00
CESM1-BGC	0.00	2.88	5.43	18.46	84.84	81.61	93.44	79.41	6.21	6.43	0.00	0.00
CNRM-CM5	0.00	2.67	5.97	10.85	88.54	81.70	76.53	77.63	9.41	3.56	0.01	0.00
CSIRO-Mk3-6-0	0.00	2.30	9.57	11.45	74.27	73.57	98.86	65.58	8.64	7.10	0.07	0.00
GFDL-CM3	0.00	3.26	8.12	10.51	81.57	75.98	82.99	72.59	7.44	12.40	0.01	0.00
GFDL-ESM2G	0.00	2.52	10.39	12.58	93.44	80.84	90.28	76.99	7.00	6.17	0.01	0.00
GFDL-ESM2M	0.00	2.94	11.26	11.09	102.43	70.35	85.22	79.81	9.11	7.21	0.01	0.00
inmcm4	0.00	2.89	7.03	10.83	53.81	78.79	97.97	65.65	9.61	10.74	0.00	0.00
IPSL-CM5A-LR	0.00	3.37	10.75	18.67	72.56	60.28	60.63	60.99	11.17	8.13	0.16	0.00
IPSL-CM5A-MR	0.00	2.05	8.15	17.28	73.50	65.43	87.91	54.06	7.45	8.91	0.01	0.00
MIROC-ESM-CHEM	0.00	3.73	13.62	13.16	85.51	91.70	90.44	66.91	13.68	11.30	0.04	0.00
MIROC-ESM	0.01	4.17	12.29	14.20	89.60	80.98	87.31	72.61	11.27	15.04	0.16	0.00
MIROC5	0.00	2.46	6.96	17.49	74.51	70.90	82.09	68.34	10.50	9.12	0.00	0.00
MPI-ESM-LR	0.01	2.74	9.62	17.69	75.03	89.04	86.95	75.79	8.62	15.13	0.06	0.00
MPI-ESM-MR	0.00	3.97	8.51	19.16	71.11	78.55	78.99	54.96	6.84	6.55	0.08	0.00
MRI-CGCM3	0.00	2.09	5.77	13.55	76.84	68.62	78.60	84.77	9.74	3.82	0.00	0.00
NorESM1-M	0.00	2.58	4.97	12.55	107.98	64.96	94.84	66.05	7.43	13.24	0.04	0.00

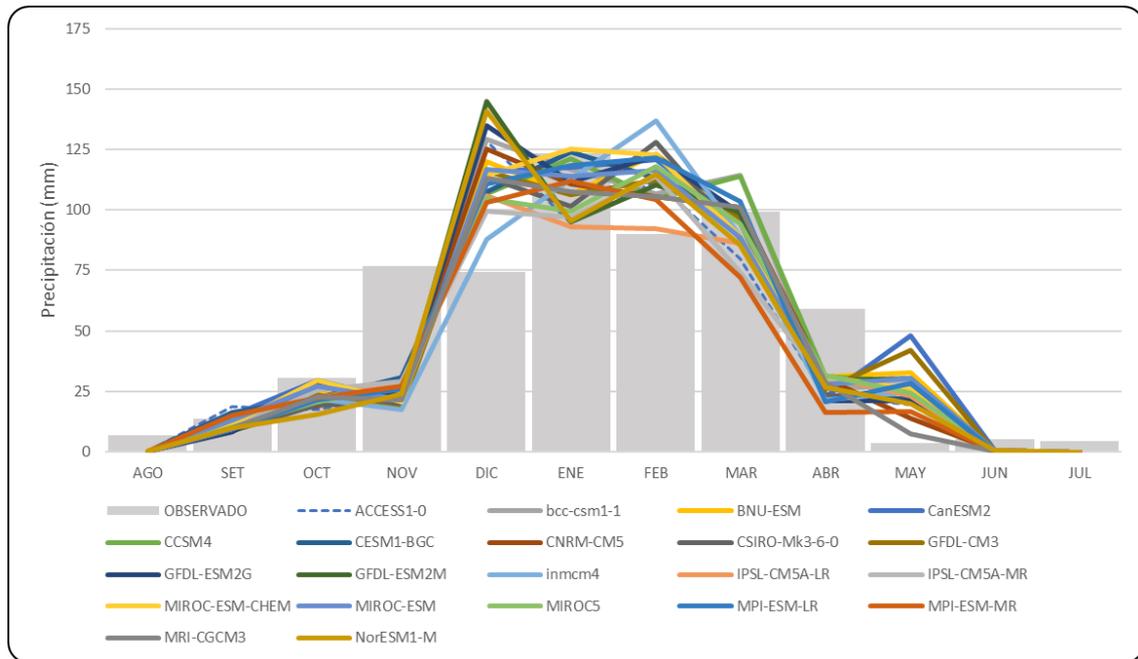


Figura 44: Curva de variación estacional para la precipitación de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Chilligua.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN CHILLIGUA												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	6.95	13.66	30.55	76.88	74.26	123.42	90.20	99.35	58.95	3.56	5.29	4.65
ACCESS1-0	0.17	18.63	17.61	23.95	128.45	94.69	111.79	79.98	22.98	19.49	0.44	0.00
bcc-csm1-1	0.30	11.35	28.36	23.24	129.17	116.88	106.85	114.25	27.19	26.18	0.75	0.00
BNU-ESM	0.38	10.36	24.32	22.86	120.00	106.30	123.00	95.44	31.30	32.73	0.52	0.00
CanESM2	0.38	15.03	29.67	21.33	115.98	117.71	120.61	94.78	22.66	47.93	0.54	0.00
CCSM4	0.11	10.22	27.64	23.54	106.83	121.09	104.88	113.77	31.07	28.99	0.13	0.00
CESM1-BGC	0.10	16.17	22.29	30.70	107.43	123.86	113.33	98.69	23.09	22.13	0.06	0.00
CNRM-CM5	0.27	12.42	19.04	23.47	125.14	110.61	105.52	101.24	30.38	13.99	0.57	0.00
CSIRO-Mk3-6-0	0.12	8.70	19.56	19.78	113.61	101.50	128.11	88.07	23.43	20.68	0.33	0.00
GFDL-CM3	0.23	12.19	23.41	17.92	115.97	106.38	112.53	96.64	25.97	41.95	0.27	0.00
GFDL-ESM2G	0.14	8.34	27.73	23.19	134.97	111.62	122.33	98.59	20.98	21.07	0.29	0.00
GFDL-ESM2M	0.18	10.14	27.61	21.67	144.99	95.13	110.48	99.20	29.77	30.19	0.29	0.00
inmcm4	0.12	12.87	21.83	17.58	87.65	112.67	137.04	89.24	21.46	24.91	0.12	0.00
IPSL-CM5A-LR	0.22	10.12	22.37	28.64	105.79	92.99	92.44	86.26	31.31	23.32	0.36	0.00
IPSL-CM5A-MR	0.27	9.61	25.38	29.09	99.34	97.14	113.93	74.06	28.77	29.21	0.17	0.00
MIROC-ESM-CHEM	0.46	11.65	29.44	20.59	114.33	125.11	122.74	89.15	31.34	26.05	0.42	0.00
MIROC-ESM	0.28	13.14	27.11	21.58	116.81	114.11	116.38	88.78	27.92	30.30	0.81	0.00
MIROC5	0.08	10.38	20.87	27.05	104.57	99.33	117.88	94.44	31.43	24.27	0.39	0.00
MPI-ESM-LR	0.21	9.63	21.58	25.86	110.88	118.48	121.42	103.63	20.80	28.39	0.17	0.00
MPI-ESM-MR	0.23	15.00	22.16	27.23	103.04	111.82	104.49	72.00	16.38	16.89	0.38	0.00
MRI-CGCM3	0.41	9.84	22.71	21.37	113.12	107.56	105.34	101.14	28.83	7.41	0.05	0.00
NorESM1-M	0.14	9.99	15.40	23.92	140.87	95.65	114.74	85.45	26.75	19.97	0.57	0.00

ANEXO C: RESULTADOS DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL DE VARIABLES DE TEMPERATURA

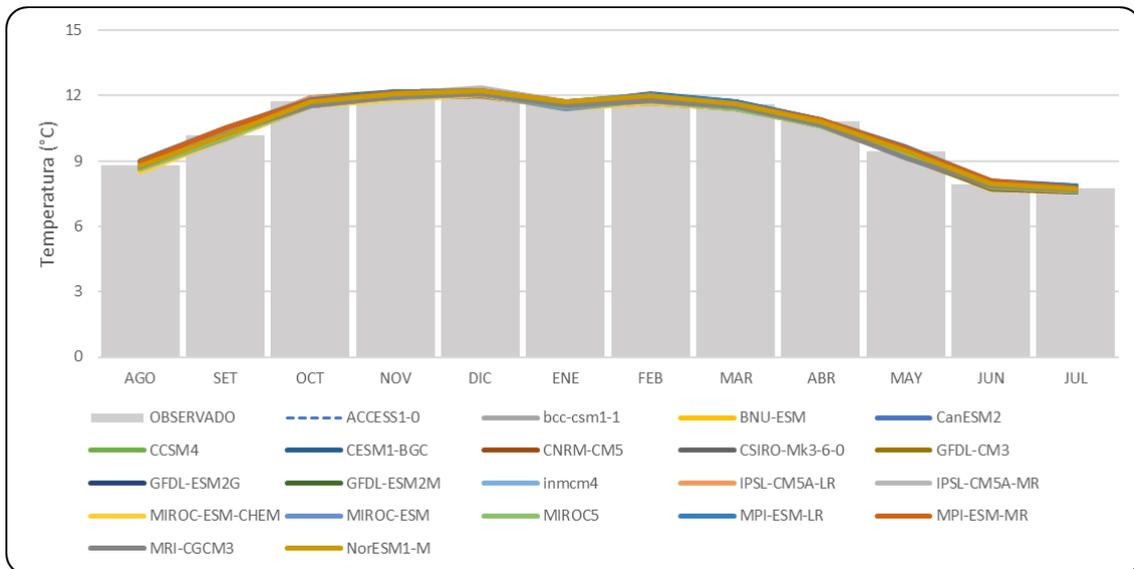


Figura 45: Curva de variación estacional para la temperatura de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Ilave.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN ILAVE												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	8.78	10.20	11.73	12.09	12.22	11.73	11.99	11.61	10.82	9.46	7.94	7.73
ACCESS1-0	8.83	10.23	11.64	12.07	12.11	11.59	11.78	11.48	10.74	9.47	7.93	7.60
bcc-csm1-1	8.82	10.24	11.76	12.07	12.09	11.54	11.95	11.49	10.71	9.38	7.96	7.75
BNU-ESM	8.79	10.15	11.63	11.99	12.14	11.52	11.92	11.59	10.74	9.35	7.86	7.68
CanESM2	8.81	10.18	11.68	12.16	12.20	11.59	11.99	11.64	10.86	9.44	7.89	7.85
CCSM4	8.82	10.30	11.68	12.06	12.26	11.62	11.89	11.57	10.71	9.45	7.95	7.76
CESM1-BGC	8.81	10.36	11.66	12.15	12.27	11.64	11.93	11.61	10.74	9.37	7.92	7.80
CNRM-CM5	8.60	10.01	11.53	11.93	11.98	11.51	11.79	11.40	10.66	9.32	7.74	7.57
CSIRO-Mk3-6-0	8.74	10.27	11.52	11.96	12.12	11.46	11.66	11.40	10.66	9.19	7.84	7.58
GFDL-CM3	8.60	10.00	11.58	11.94	12.11	11.52	11.77	11.46	10.63	9.19	7.73	7.65
GFDL-ESM2G	8.94	10.47	11.77	12.11	12.26	11.63	12.11	11.71	10.88	9.49	8.05	7.88
GFDL-ESM2M	8.77	10.32	11.90	12.16	12.22	11.65	12.01	11.72	10.71	9.24	7.96	7.79
inmcm4	8.77	10.26	11.64	12.08	12.22	11.55	11.91	11.66	10.82	9.32	7.89	7.70
IPSL-CM5A-LR	8.93	10.42	11.90	12.10	12.34	11.73	12.00	11.63	10.82	9.51	7.98	7.73
IPSL-CM5A-MR	8.89	10.50	11.77	12.09	12.36	11.71	12.02	11.68	10.85	9.51	8.08	7.73
MIROC-ESM-CHEM	8.50	10.04	11.56	11.81	12.05	11.41	11.69	11.40	10.61	9.35	7.84	7.64
MIROC-ESM	8.64	10.09	11.69	11.92	12.10	11.41	11.83	11.42	10.64	9.37	7.82	7.74
MIROC5	8.66	10.13	11.55	11.95	12.07	11.50	11.79	11.41	10.61	9.32	7.83	7.61
MPI-ESM-LR	9.02	10.51	11.81	12.17	12.23	11.74	12.06	11.74	10.87	9.67	8.11	7.88
MPI-ESM-MR	8.96	10.51	11.78	12.13	12.22	11.72	11.90	11.63	10.91	9.62	8.08	7.78
MRI-CGCM3	8.72	10.26	11.54	11.96	12.08	11.54	11.75	11.51	10.69	9.15	7.85	7.69
NorESM1-M	8.78	10.20	11.73	12.09	12.22	11.73	11.99	11.61	10.82	9.46	7.94	7.73

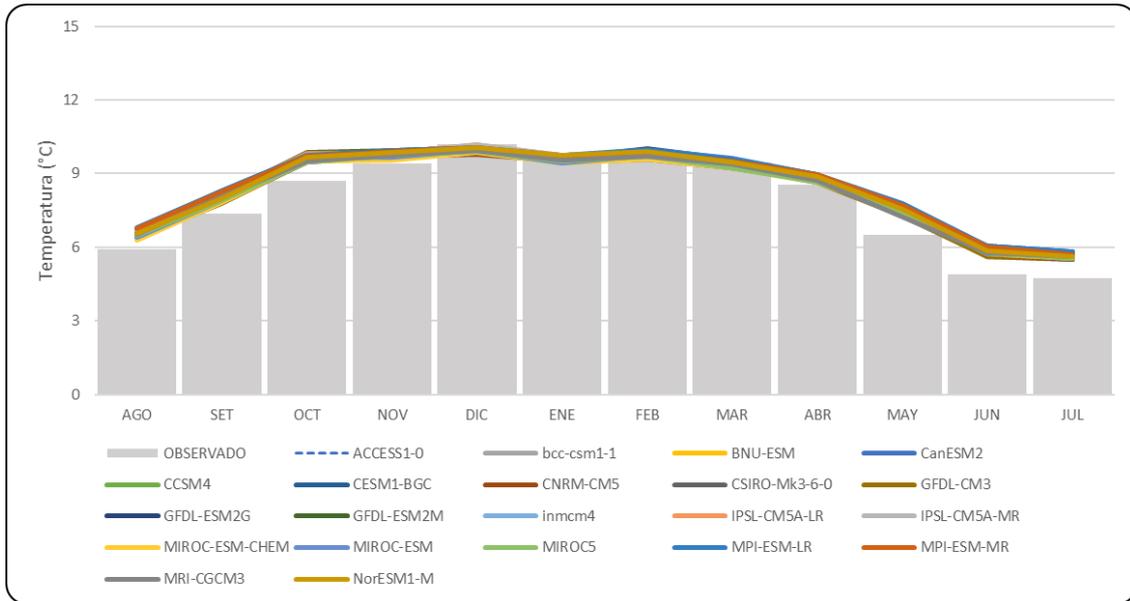


Figura 46: Curva de variación estacional para la temperatura de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Laraqueri.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN LARAQUERY												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	5.93	7.35	8.72	9.40	10.19	9.74	9.64	9.45	8.55	6.51	4.88	4.76
ACCESS1-0	6.62	8.04	9.62	9.87	9.93	9.60	9.69	9.32	8.78	7.55	5.84	5.53
bcc-csm1-1	6.60	8.03	9.69	9.84	9.92	9.57	9.86	9.34	8.77	7.47	5.89	5.65
BNU-ESM	6.58	7.95	9.56	9.75	9.96	9.55	9.84	9.45	8.80	7.43	5.80	5.58
CanESM2	6.58	7.98	9.63	9.94	10.04	9.62	9.91	9.50	8.94	7.51	5.81	5.76
CCSM4	6.64	8.10	9.62	9.83	10.11	9.64	9.82	9.45	8.78	7.53	5.87	5.70
CESM1-BGC	6.61	8.16	9.60	9.90	10.11	9.65	9.85	9.49	8.82	7.48	5.85	5.73
CNRM-CM5	6.40	7.81	9.46	9.69	9.80	9.50	9.69	9.25	8.72	7.39	5.64	5.50
CSIRO-Mk3-6-0	6.52	8.02	9.50	9.74	9.95	9.47	9.58	9.23	8.69	7.30	5.76	5.50
GFDL-CM3	6.40	7.80	9.52	9.70	9.92	9.53	9.66	9.30	8.67	7.28	5.64	5.57
GFDL-ESM2G	6.72	8.28	9.74	9.90	10.09	9.64	10.00	9.57	8.96	7.54	6.07	5.82
GFDL-ESM2M	6.57	8.14	9.85	9.92	10.04	9.65	9.90	9.57	8.78	7.31	5.88	5.70
inmcm4	6.57	8.03	9.56	9.86	10.05	9.54	9.77	9.46	8.85	7.40	5.79	5.61
IPSL-CM5A-LR	6.72	8.16	9.81	9.85	10.16	9.75	9.91	9.46	8.86	7.59	5.92	5.62
IPSL-CM5A-MR	6.68	8.28	9.69	9.84	10.18	9.74	9.92	9.52	8.90	7.59	6.02	5.64
MIROC-ESM-CHEM	6.29	7.82	9.49	9.56	9.86	9.42	9.59	9.25	8.66	7.43	5.76	5.53
MIROC-ESM	6.43	7.89	9.63	9.69	9.93	9.43	9.73	9.27	8.70	7.45	5.76	5.65
MIROC5	6.47	7.91	9.48	9.73	9.91	9.51	9.70	9.25	8.65	7.41	5.77	5.55
MPI-ESM-LR	6.81	8.29	9.75	9.94	10.07	9.75	9.96	9.62	8.94	7.77	6.04	5.80
MPI-ESM-MR	6.74	8.27	9.72	9.91	10.06	9.71	9.82	9.51	8.97	7.72	6.01	5.70
MRI-CGCM3	6.53	8.05	9.50	9.75	9.92	9.57	9.69	9.39	8.74	7.24	5.77	5.62
NorESM1-M	6.58	7.97	9.68	9.85	10.05	9.75	9.90	9.46	8.87	7.54	5.87	5.62

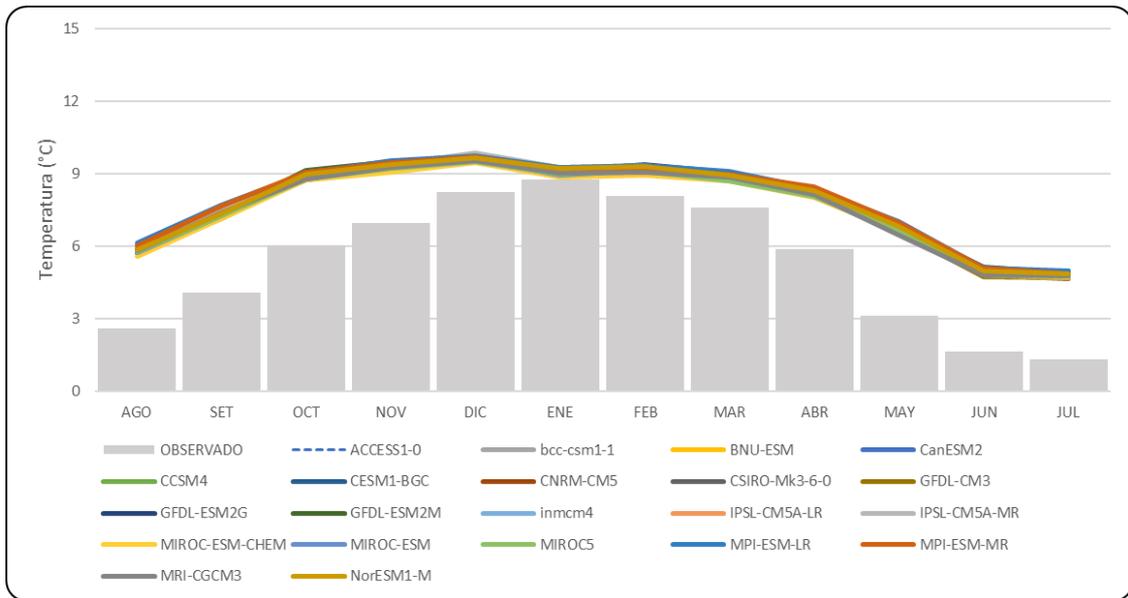


Figura 47: Curva de variación estacional para la temperatura de los 21 GCMs después de realizar el escalamiento espacial con la estación Mazocruz.

DATOS PROMEDIOS MENSUALES DEL ESCALAMIENTO ESPACIAL PARA LA ESTACIÓN MAZOCRUZ												
MESES	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
OBSERVADO	2.60	4.08	6.03	6.95	8.23	8.75	8.08	7.59	5.87	3.10	1.64	1.32
ACCESS1-0	5.95	7.45	8.88	9.38	9.53	9.07	9.07	8.79	8.18	6.74	4.96	4.70
bcc-csm1-1	5.90	7.37	8.98	9.38	9.55	9.06	9.25	8.81	8.17	6.72	4.97	4.85
BNU-ESM	5.87	7.28	8.85	9.28	9.58	9.02	9.21	8.90	8.19	6.67	4.90	4.77
CanESM2	5.90	7.32	8.90	9.46	9.68	9.07	9.24	8.97	8.36	6.77	4.92	4.98
CCSM4	5.95	7.46	8.85	9.31	9.71	9.13	9.19	8.93	8.19	6.75	4.93	4.86
CESM1-BGC	5.87	7.50	8.87	9.37	9.73	9.12	9.25	8.96	8.25	6.72	4.92	4.87
CNRM-CM5	5.72	7.23	8.83	9.32	9.50	8.97	9.14	8.73	8.13	6.68	4.80	4.67
CSIRO-Mk3-6-0	5.78	7.40	8.74	9.27	9.60	8.96	8.96	8.72	8.11	6.55	4.85	4.68
GFDL-CM3	5.68	7.15	8.79	9.22	9.56	9.03	9.04	8.76	8.06	6.57	4.72	4.69
GFDL-ESM2G	6.01	7.54	9.00	9.45	9.72	9.14	9.39	9.05	8.38	6.83	5.15	4.91
GFDL-ESM2M	5.90	7.39	9.14	9.47	9.68	9.20	9.29	9.05	8.20	6.62	4.98	4.90
inmcm4	5.87	7.37	8.84	9.45	9.78	9.04	9.17	8.89	8.23	6.65	4.84	4.79
IPSL-CM5A-LR	5.97	7.43	9.06	9.43	9.78	9.19	9.28	8.90	8.21	6.79	4.94	4.79
IPSL-CM5A-MR	5.95	7.61	8.97	9.38	9.85	9.23	9.32	8.97	8.32	6.81	5.07	4.80
MIROC-ESM-CHEM	5.57	7.11	8.74	9.04	9.45	8.87	8.93	8.68	8.02	6.62	4.82	4.71
MIROC-ESM	5.72	7.24	8.93	9.24	9.59	8.94	9.15	8.77	8.12	6.70	4.87	4.83
MIROC5	5.76	7.26	8.76	9.23	9.51	8.96	9.08	8.69	8.05	6.63	4.83	4.73
MPI-ESM-LR	6.15	7.67	9.02	9.51	9.72	9.23	9.33	9.08	8.37	7.01	5.09	4.98
MPI-ESM-MR	6.03	7.65	9.04	9.46	9.70	9.18	9.19	8.97	8.44	6.98	5.11	4.87
MRI-CGCM3	5.81	7.36	8.78	9.25	9.53	9.00	9.07	8.85	8.14	6.46	4.83	4.77
NorESM1-M	5.84	7.32	8.97	9.38	9.65	9.19	9.29	8.95	8.29	6.80	4.96	4.84

ANEXO D: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA OBTENIDOS DE LOS GCMS.

CAPASO			CHICHILLAPI			PUNO		
MODELO	RMSE	R ²	MODELO	RMSE	R ²	MODELO	RMSE	R ²
MPI-ESM-LR	16.93	0.83	CCSM4	18.67	0.80	inmcm4	16.59	0.98
inmcm4	19.94	0.80	MPI-ESM-LR	18.84	0.79	CSIRO-Mk3-6-0	15.76	0.97
MPI-ESM-MR	19.25	0.80	inmcm4	19.39	0.78	BNU-ESM	14.48	0.97
CNRM-CM5	19.31	0.78	MPI-ESM-MR	19.40	0.78	MIROC5	16.78	0.97
CCSM4	19.25	0.77	MIROC-ESM-CHEM	20.14	0.77	MIROC-ESM-CHEM	15.17	0.96
bcc-csm1-1	19.02	0.77	CESM1-BGC	20.85	0.77	CESM1-BGC	14.92	0.96
MIROC-ESM-CHEM	19.67	0.75	MRI-CGCM3	20.43	0.75	IPSL-CM5A-LR	18.83	0.96
GFDL-ESM2G	20.27	0.74	IPSL-CM5A-MR	20.94	0.74	CCSM4	15.48	0.96
CSIRO-Mk3-6-0	21.24	0.74	MIROC5	20.96	0.73	bcc-csm1-1	13.88	0.96
MIROC5	21.53	0.74	CanESM2	21.98	0.73	MPI-ESM-LR	13.71	0.96
GFDL-CM3	21.34	0.73	CNRM-CM5	23.00	0.71	CNRM-CM5	16.06	0.96
CanESM2	20.47	0.73	GFDL-CM3	22.07	0.71	GFDL-ESM2G	15.11	0.96
BNU-ESM	21.39	0.72	MIROC-ESM	22.65	0.70	MIROC-ESM	16.07	0.96
CESM1-BGC	21.60	0.71	CSIRO-Mk3-6-0	23.25	0.69	MRI-CGCM3	16.22	0.95
IPSL-CM5A-MR	23.49	0.69	bcc-csm1-1	24.75	0.69	NorESM1-M	19.91	0.95
MIROC-ESM	22.09	0.68	IPSL-CM5A-LR	23.08	0.68	MPI-ESM-MR	19.86	0.95
MRI-CGCM3	22.92	0.68	BNU-ESM	23.99	0.67	GFDL-CM3	16.17	0.95
IPSL-CM5A-LR	24.78	0.67	GFDL-ESM2G	26.90	0.64	CanESM2	16.02	0.95
GFDL-ESM2M	23.95	0.64	ACCESS1-0	27.30	0.57	IPSL-CM5A-MR	20.04	0.95
ACCESS1-0	27.34	0.55	GFDL-ESM2M	31.18	0.53	GFDL-ESM2M	20.00	0.93
NorESM1-M	27.55	0.54	NorESM1-M	32.39	0.51	ACCESS1-0	20.47	0.92

RINCON DE LA CRUZ			COYPA COYPA			CHILLIGUA		
MODELO	RMSE	R ²	MODELO	RMSE	R ²	MODELO	RMSE	R ²
CESM1-BGC	12.04	0.97	inmcm4	17.93	0.90	CESM1-BGC	21.55	0.79
CCSM4	13.62	0.95	MPI-ESM-MR	20.72	0.86	CCSM4	22.12	0.78
inmcm4	15.99	0.95	MPI-ESM-LR	18.32	0.84	MRI-CGCM3	22.67	0.77
MPI-ESM-LR	13.92	0.95	CSIRO-Mk3-6-0	19.91	0.83	IPSL-CM5A-LR	21.89	0.76
bcc-csm1-1	13.52	0.95	MIROC-ESM-CHEM	19.08	0.82	MIROC5	22.65	0.75
MPI-ESM-MR	18.08	0.95	IPSL-CM5A-MR	22.37	0.82	CNRM-CM5	24.14	0.75
IPSL-CM5A-LR	17.20	0.95	MIROC5	21.59	0.81	MPI-ESM-MR	23.33	0.75
MRI-CGCM3	15.38	0.94	CESM1-BGC	19.67	0.81	MPI-ESM-LR	24.54	0.74
MIROC-ESM-CHEM	14.71	0.94	CCSM4	20.60	0.79	MIROC-ESM-CHEM	24.67	0.74
GFDL-ESM2G	15.11	0.94	CanESM2	21.11	0.77	IPSL-CM5A-MR	23.29	0.73
CNRM-CM5	15.09	0.94	GFDL-CM3	22.48	0.77	bcc-csm1-1	25.90	0.72



BNU-ESM	15.08	0.94	BNU-ESM	21.97	0.77	MIROC-ESM	25.05	0.71
NorESM1-M	18.72	0.93	MIROC-ESM	21.68	0.76	inmcm4	26.05	0.70
CSIRO-Mk3-6-0	17.40	0.93	GFDL-ESM2G	22.12	0.75	BNU-ESM	26.06	0.70
MIROC5	17.47	0.93	MRI-CGCM3	23.64	0.74	CSIRO-Mk3-6-0	26.85	0.69
MIROC-ESM	16.76	0.92	bcc-csm1-1	22.34	0.74	GFDL-ESM2G	28.31	0.69
CanESM2	15.90	0.92	CNRM-CM5	23.24	0.74	GFDL-CM3	26.96	0.66
IPSL-CM5A-MR	19.04	0.92	IPSL-CM5A-LR	27.00	0.73	CanESM2	27.66	0.66
GFDL-CM3	16.97	0.92	ACCESS1-0	26.80	0.68	ACCESS1-0	27.74	0.65
ACCESS1-0	19.65	0.90	GFDL-ESM2M	26.00	0.66	NorESM1-M	29.51	0.64
GFDL-ESM2M	19.71	0.90	NorESM1-M	26.78	0.64	GFDL-ESM2M	30.19	0.62

ESTACIÓN LARAQUERI

MODELO	PRECIPITACIÓN		TEMPERATURA		PROMEDIO	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	R ²	RMSE
CESM1-BGC	18.47	0.97	0.65	0.979	0.97	9.56
CCSM4	19.53	0.96	0.65	0.977	0.97	10.09
MPI-ESM-MR	23.17	0.96	0.74	0.970	0.97	11.96
CNRM-CM5	22.82	0.96	0.52	0.975	0.97	11.67
MRI-CGCM3	22.13	0.95	0.56	0.980	0.97	11.35
MPI-ESM-LR	16.92	0.96	0.78	0.972	0.97	8.85
CSIRO-Mk3-6-0	21.29	0.96	0.55	0.974	0.97	10.92
IPSL-CM5A-LR	25.54	0.96	0.70	0.972	0.97	13.12
MIROC-ESM	19.42	0.96	0.59	0.968	0.96	10.00
BNU-ESM	19.68	0.95	0.59	0.978	0.96	10.14
GFDL-ESM2G	19.01	0.95	0.75	0.974	0.96	9.88
MIROC5	24.68	0.95	0.56	0.975	0.96	12.62
IPSL-CM5A-MR	25.27	0.94	0.71	0.976	0.96	12.99
GFDL-CM3	21.94	0.94	0.51	0.978	0.96	11.23
MIROC-ESM-CHEM	19.80	0.95	0.54	0.971	0.96	10.17
inmcm4	21.30	0.94	0.60	0.979	0.96	10.95
NorESM1-M	25.65	0.94	0.64	0.977	0.96	13.15
bcc-csm1-1	19.17	0.95	0.65	0.968	0.96	9.91
CanESM2	20.03	0.94	0.65	0.976	0.96	10.34
GFDL-ESM2M	23.61	0.93	0.66	0.970	0.95	12.14
ACCESS1-0	25.76	0.91	0.63	0.969	0.94	13.19



MODELO	ESTACIÓN MAZOCRUZ					
	PRECIPITACIÓN		TEMPERATURA		PROMEDIO	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	R ²	RMSE
MIROC-ESM-CHEM	14.10	0.91	2.44	0.928	0.92	8.27
inmcm4	14.38	0.90	2.60	0.925	0.91	8.49
CESM1-BGC	14.92	0.89	2.65	0.931	0.91	8.79
MPI-ESM-MR	15.37	0.91	2.76	0.913	0.91	9.06
IPSL-CM5A-MR	16.86	0.88	2.71	0.930	0.91	9.79
CCSM4	15.89	0.88	2.64	0.932	0.91	9.27
MPI-ESM-LR	15.25	0.89	2.80	0.921	0.91	9.02
MRI-CGCM3	17.22	0.86	2.53	0.932	0.90	9.87
MIROC5	17.01	0.86	2.51	0.927	0.89	9.76
MIROC-ESM	17.42	0.85	2.56	0.922	0.89	9.99
CanESM2	18.37	0.84	2.66	0.927	0.88	10.51
CSIRO-Mk3-6-0	18.38	0.84	2.52	0.922	0.88	10.45
BNU-ESM	19.50	0.82	2.58	0.933	0.88	11.04
GFDL-CM3	19.35	0.82	2.47	0.933	0.88	10.91
CNRM-CM5	19.77	0.82	2.52	0.922	0.87	11.15
IPSL-CM5A-LR	20.93	0.82	2.67	0.924	0.87	11.80
GFDL-ESM2G	22.16	0.79	2.74	0.928	0.86	12.45
bcc-csm1-1	22.13	0.79	2.63	0.923	0.86	12.38
ACCESS1-0	22.46	0.76	2.61	0.918	0.84	12.54
NorESM1-M	26.24	0.71	2.65	0.933	0.82	14.44
GFDL-ESM2M	27.54	0.68	2.67	0.930	0.81	15.10



ANEXO E: REGISTRO DE CAUDALES HISTÓRICOS REGISTRADOS EN LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA PUENTE ILAVE.

Caudales medios mensuales (m³/s) observados en la estación hidrométrica puente carretera Ilave en el periodo 1991 - 2016

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1991									8.8	7.1	7.6	8.4	
1992	40.1	19.5	13.9	5.9	4.5	4.3	4.1	4.9	3.9	4.1	4.7	6.9	9.7
1993	59.1	25.8	58.9	22.5	9.0	4.5	6.3	10.3	7.2	9.8	12.0	27.5	21.1
1994	54.1	179.9	39.5	33.1	18.4	9.9	8.1	7.4	6.5	5.9	7.4	13.9	32.0
1995	24.7	38.1	76.0	19.0	9.7	7.3	7.1	5.6	4.9	3.4	5.0	7.4	17.4
1996	56.3	89.1	37.7	31.6	14.0	7.9	7.6	7.0	3.4	2.8	6.8	15.9	23.3
1997	100.2	215.8	100.8	46.3	17.7	11.6	9.5	12.7	1.2	1.1	1.4	1.0	43.3
1998	36.5	41.0	17.2	10.5	4.0	4.7	4.3	3.4	3.1	2.8	4.4	3.7	11.3
1999	8.7	81.4	137.2	107.0	14.7	8.4	6.8	5.5	3.8	7.0	3.4	4.1	32.3
2000	57.2	165.4	149.9	23.9	14.2	9.8	7.4	8.0	5.7	7.3	5.1	9.5	38.6
2001	258.5	300.7	287.3	66.6	20.7	13.6	12.2	11.0	10.1	8.5	7.9	8.9	83.8
2002	10.3	83.5	157.3	57.2	24.2	13.5	13.4	10.2	6.8	9.5	9.9	12.8	34.1
2003	26.5	41.6	91.0	28.6	9.9	7.0	6.1	8.7	5.4	4.8	4.3	5.9	20.0
2004	66.1	131.8	25.8	20.9	9.9	9.1	11.2	11.6	9.0	7.2	3.7	3.8	25.8
2005	17.3	92.1	23.7	17.9	7.9	6.0	5.5	4.9	5.2	5.0	6.0	11.3	16.9
2006	188.0	171.2	81.3	70.0	11.3	9.7	7.9	6.5	5.1	4.4	7.5	9.7	47.7
2007	27.8	24.2	81.4	35.7	11.5	6.6	6.2	5.4	5.5	5.2	6.2	8.7	18.7
2008	109.0	68.4	66.4	17.0	8.2	6.7	6.0	5.7	3.7	2.9	2.3	3.8	25.0
2009	6.2	14.0	42.6	31.8	8.4	4.5	3.6	3.2	2.7	2.6	5.0	22.4	12.2
2010	58.7	108.5	82.4	25.8	10.3	7.3	5.2	3.6	2.7	2.6	2.2	5.9	26.3
2011	41.5	216.0	126.5	55.9	14.1	7.9	7.6	6.0	5.0	5.2	5.6	26.2	43.1
2012	90.16	262.11	121.35	98.18	28.68	12.80	8.46	6.87	5.60	4.64	5.75	54.36	58.2
2013	113.39	115.33	87.37	16.71	10.40	8.89	7.00	5.62	4.40	4.08	5.52	14.77	32.8
2014	68.38	32.44	16.85	10.11	5.23	3.45	3.17	3.07	3.74	4.14	3.19	4.75	13.2
2015	12.10	26.33	41.48	33.24	13.15	10.79	6.28	5.26	4.15	3.83	4.05	3.86	13.7
2016	5.21	71.81	25.56	17.79	6.98	3.76	5.38	4.21					

Fuente: SENAMHI

Media	61.44	104.64	79.57	36.13	12.28	8.00	7.06	6.67	5.10	5.05	5.47	11.82	29.19
Desv Std	58.98	81.24	61.21	26.32	5.99	2.99	2.52	2.72	2.10	2.27	2.40	11.26	17.21
Maxima	258.5	300.7	287.3	107.0	28.7	13.6	13.4	12.7	10.1	9.8	12.0	54.4	83.8
Minima	5.2	14.0	13.9	5.9	4.0	3.5	3.2	3.1	1.2	1.1	1.4	1.0	9.7



Caudales medios mensuales (m³/s) históricos calculados por el modelo SAC-SMA en la estación hidrométrica puente carretera Llave para el periodo 1991 - 2016

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Prom
1991									13.1	7.6	8.3	7.2	
1992	15.4	8.8	5.3	4.1	3.2	2.8	2.6	2.7	1.8	1.8	3.8	6.6	4.9
1993	73.9	28.4	49.5	15.2	7.4	6.4	5.5	17.1	6.3	8.1	7.0	23.9	20.7
1994	64.9	190.8	46.7	42.6	17.5	12.8	11.1	9.6	8.6	7.3	8.4	14.7	36.2
1995	24.6	27.2	89.6	14.4	9.0	7.8	6.7	5.8	5.1	4.3	10.2	8.9	17.8
1996	69.1	115.0	33.6	28.0	11.6	9.5	8.3	8.3	7.1	5.4	10.9	10.9	26.5
1997	89.0	227.4	100.3	38.7	21.3	16.1	14.0	35.6	18.0	15.7	25.8	11.1	51.1
1998	54.2	28.6	15.7	12.5	7.3	6.6	5.5	4.7	4.0	3.7	4.6	3.3	12.6
1999	11.6	95.1	228.0	109.6	21.4	17.7	15.4	13.4	12.8	17.6	9.1	9.1	46.7
2000	62.9	177.8	140.7	25.3	18.3	15.9	13.8	12.0	10.6	11.8	8.1	11.2	42.3
2001	190.5	257.2	282.3	80.6	29.4	25.2	22.0	19.2	16.6	14.9	13.1	11.8	80.2
2002	13.1	77.1	172.9	118.8	35.0	18.6	27.5	17.4	13.1	11.9	17.5	21.5	45.4
2003	30.0	62.8	98.3	26.0	13.4	11.4	9.9	9.1	8.3	6.6	5.8	8.4	24.2
2004	84.0	144.7	20.6	18.1	11.5	10.0	13.8	29.2	12.3	7.3	6.3	6.4	30.3
2005	15.7	78.1	22.5	13.5	7.2	6.2	5.4	4.6	7.0	4.6	9.1	16.2	15.8
2006	215.7	163.7	98.2	58.3	20.3	17.1	14.9	12.9	11.5	10.2	14.3	10.4	54.0
2007	36.8	28.4	112.0	36.3	12.0	10.3	9.0	7.7	7.2	6.1	7.4	8.8	23.5
2008	82.3	52.6	59.2	12.5	9.8	8.5	7.4	6.7	5.5	5.1	4.1	9.1	21.9
2009	12.2	32.1	62.4	25.3	7.6	6.4	5.7	4.8	4.3	3.7	16.4	11.7	16.0
2010	22.5	45.1	25.3	7.3	7.8	5.1	4.2	3.6	3.0	2.9	2.2	7.2	11.4
2011	32.6	189.2	86.2	28.3	14.2	12.1	10.7	9.1	8.3	6.9	6.7	26.9	35.9
2012	147.46	308.73	139.42	103.5	27.53	22.82	19.86	17.31	15.63	13.28	11.98	39.83	72.3
2013	126.51	107.05	89.61	19.90	16.67	14.65	12.67	11.48	9.62	8.48	7.77	17.78	36.8
2014	79.14	31.45	11.09	8.87	7.10	6.15	5.38	4.90	4.12	4.02	3.27	2.93	14.0
2015	14.10	34.69	60.35	64.45	17.80	8.60	7.66	7.10	6.57	5.48	4.69	4.04	19.6
2016	4.77	31.04	9.57	9.83	3.84	3.28	3.96	2.35					

Fuente: Elaboración Propia.

Media	62.92	101.72	82.37	36.87	14.32	11.28	10.51	11.07	8.82	7.79	9.07	12.39	31.7
Desv Std	56.47	83.66	69.34	33.51	8.15	5.92	6.12	8.09	4.38	4.24	5.29	8.33	19.2
Maxima	215.7	308.7	282.3	118.8	35.0	25.2	27.5	35.6	18.0	17.6	25.8	39.8	80.2
Minima	4.8	8.8	5.3	4.1	3.2	2.8	2.6	2.3	1.8	1.8	2.2	2.9	4.9



Caudales medios mensuales (m^3/s) proyectados para el escenario RCP 4.5 del modelo climático global CESM1-BGC en la estación hidrométrica puente carretera Ilave para el futuro cercano 2020 - 2050

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
2020	116.5	227.0	83.6	37.7	19.4	16.8	14.6	12.6	11.0	9.9	10.2	9.7	47.4
2021	27.5	43.6	65.2	10.7	8.5	7.4	6.4	5.5	4.6	4.2	4.6	8.9	16.4
2022	61.4	34.5	33.5	12.1	6.7	5.7	4.9	4.2	3.8	3.1	3.9	9.8	15.3
2023	79.7	41.3	58.5	26.5	15.0	8.5	7.3	6.2	6.4	5.0	8.8	16.4	23.3
2024	28.9	63.1	39.3	57.3	10.0	8.5	7.3	6.3	5.6	4.8	5.5	5.9	20.2
2025	52.2	21.5	74.5	21.7	8.8	7.5	6.4	5.5	5.1	4.6	5.1	24.0	19.7
2026	59.4	76.8	130.0	29.9	13.5	11.7	10.2	8.7	7.6	7.0	7.0	15.6	31.4
2027	59.8	113.3	99.2	32.2	13.8	11.9	10.3	8.9	7.7	6.6	7.9	15.6	32.3
2028	63.4	97.8	47.4	20.8	12.3	9.4	8.2	7.0	6.1	5.2	5.7	7.0	24.2
2029	29.3	44.5	76.9	28.6	11.0	8.2	7.1	6.1	5.5	5.6	4.5	5.2	19.4
2030	38.6	100.2	83.4	27.3	11.9	10.0	8.7	7.4	6.5	6.0	5.3	8.5	26.1
2031	47.6	147.6	38.0	15.2	10.9	9.3	8.1	6.9	6.3	5.7	9.4	8.0	26.1
2032	14.1	27.6	32.3	9.5	5.2	4.3	3.7	3.2	2.7	2.4	2.3	3.0	9.2
2033	16.6	30.1	21.9	10.0	3.7	3.1	2.7	2.2	1.9	2.2	5.6	4.5	8.7
2034	25.7	62.1	97.6	11.7	8.8	7.6	6.6	5.6	5.6	4.5	6.2	21.8	22.0
2035	29.5	59.1	131.5	20.1	11.9	10.2	8.8	7.6	6.7	5.9	8.3	9.4	25.8
2036	52.5	166.7	202.4	30.3	19.2	16.6	14.4	12.5	11.0	9.7	9.8	12.6	46.5
2037	66.5	125.2	137.7	37.2	17.1	14.7	12.8	11.0	9.5	8.3	8.8	7.4	38.0
2038	23.4	52.9	80.3	18.5	9.5	8.3	7.2	6.1	5.4	4.9	5.9	8.4	19.2
2039	17.0	44.1	96.6	14.9	9.1	7.7	6.7	5.7	5.1	5.1	5.2	4.7	18.5
2040	31.5	24.4	39.0	24.5	6.2	5.3	4.6	3.8	3.5	3.2	3.9	4.3	12.9
2041	30.13	70.59	135.19	27.66	12.74	10.75	9.31	8.02	7.25	6.18	7.03	6.24	27.6
2042	41.75	124.21	103.72	26.47	13.70	11.65	10.11	8.65	7.49	6.56	6.43	6.82	30.6
2043	41.99	108.30	81.14	25.77	12.32	10.53	9.15	7.81	6.68	6.29	6.26	6.41	26.9
2044	21.58	27.67	50.02	37.68	8.71	6.65	5.75	4.87	4.35	4.31	4.07	7.36	15.3
2045	51.35	59.57	59.71	17.92	8.72	7.47	6.46	5.51	4.70	4.47	4.29	13.64	20.3
2046	23.87	142.56	106.45	50.61	15.02	12.85	11.13	9.55	8.45	7.99	8.44	13.90	34.2
2047	35.9	38.3	93.9	17.4	10.1	8.7	7.5	6.5	5.6	5.0	5.6	17.1	21.0
2048	24.3	65.1	60.9	10.3	8.2	7.1	6.1	5.2	4.6	4.3	3.8	5.8	17.1
2049	20.0	40.4	85.2	19.6	8.6	7.3	6.3	5.4	4.7	3.9	4.5	6.7	17.7
2050	31.6	70.0	69.7	12.0	8.6	7.3	6.3	5.4	4.7	4.1	4.0	5.8	19.1

Fuente: Elaboración Propia.

Media	40.76	75.80	81.12	23.93	10.94	9.13	7.90	6.76	5.99	5.39	6.07	9.69	23.6
Desv Std	22.08	48.84	38.91	11.68	3.73	3.19	2.77	2.42	2.10	1.84	2.03	5.22	9.3
Maxima	116.5	227.0	202.4	57.3	19.4	16.8	14.6	12.6	11.0	9.9	10.2	24.0	47.4
Minima	14.1	21.5	21.9	9.5	3.7	3.1	2.7	2.2	1.9	2.2	2.3	3.0	8.7



Caudales medios mensuales (m³/s) proyectados para el escenario RCP 4.5 del modelo climático global CESM1-BGC en la estación hidrométrica puente carretera llave para el futuro cercano 2070 - 2100													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
2070	170.3	226.5	104.2	50.0	25.1	19.4	16.8	14.5	12.4	11.4	17.1	19.1	57.2
2071	15.9	58.5	45.9	12.7	10.4	7.4	6.4	5.4	4.9	4.3	5.7	9.4	15.6
2072	24.1	16.5	81.1	37.1	9.7	7.5	6.5	5.5	5.2	5.0	8.9	17.1	18.7
2073	29.8	114.2	64.8	77.3	14.3	12.0	10.4	9.1	8.2	7.1	6.7	7.0	30.1
2074	26.5	85.4	189.8	36.5	16.2	13.9	12.0	10.3	8.8	7.6	7.7	9.8	35.4
2075	32.1	67.1	182.3	83.0	20.5	15.7	13.6	11.8	10.0	8.9	8.4	8.8	38.5
2076	35.4	47.9	170.5	50.1	15.6	13.5	11.7	10.0	8.5	7.9	7.7	20.0	33.2
2077	36.1	120.4	132.5	24.6	15.1	13.1	11.3	9.8	9.1	7.6	6.7	11.3	33.1
2078	18.4	27.8	28.0	7.7	5.2	4.5	3.9	3.2	2.6	2.6	3.8	19.9	10.6
2079	42.1	146.2	97.8	19.3	13.2	11.2	9.7	8.3	7.1	6.6	6.3	7.6	31.3
2080	14.1	29.1	116.8	109.0	15.2	12.7	11.0	9.4	8.2	7.0	6.2	10.8	29.1
2081	47.5	115.7	76.2	25.4	12.3	10.6	9.2	7.9	7.0	6.1	6.0	20.7	28.7
2082	64.6	103.4	58.0	24.0	11.6	10.1	8.8	7.4	6.7	5.8	4.8	9.3	26.2
2083	26.2	64.8	107.5	17.7	10.7	9.3	8.0	6.8	5.8	5.9	4.9	6.1	22.8
2084	23.1	73.7	23.9	36.0	7.9	6.7	5.8	4.9	4.3	4.0	3.8	20.4	17.9
2085	39.2	95.2	139.9	56.3	15.3	13.2	11.4	9.9	8.6	7.9	8.0	13.0	34.8
2086	30.0	86.0	107.5	15.5	11.8	10.2	8.8	7.5	6.9	5.5	5.7	14.1	25.8
2087	29.9	39.9	30.7	23.3	6.9	5.8	5.0	4.2	4.0	3.2	3.4	9.0	13.8
2088	28.7	46.8	96.9	11.6	9.0	7.7	6.6	5.7	4.9	4.0	4.3	4.0	19.2
2089	34.0	45.9	73.7	9.7	7.9	6.8	5.9	5.2	4.7	4.3	4.3	5.6	17.3
2090	25.2	25.8	45.8	9.0	5.6	4.6	4.0	3.3	3.1	2.9	3.0	3.3	11.3
2091	17.97	64.66	130.05	33.94	11.94	10.14	8.76	7.55	6.46	5.94	6.21	8.79	26.0
2092	23.32	47.49	66.86	17.82	8.24	7.07	6.10	5.16	4.36	3.90	5.96	5.07	16.8
2093	31.84	70.37	114.27	25.91	11.58	10.07	8.71	7.52	6.38	5.82	5.17	14.42	26.0
2094	33.20	33.22	48.88	37.87	8.50	7.21	6.28	5.32	4.57	3.89	6.82	6.71	16.9
2095	18.48	51.41	28.32	39.10	7.86	6.17	5.28	4.47	4.44	3.38	4.33	7.83	15.1
2096	56.31	123.33	88.55	17.28	12.31	10.67	9.24	7.90	6.77	5.90	5.61	7.08	29.2
2097	34.0	64.1	71.4	45.3	10.8	9.3	8.0	6.9	5.7	5.1	4.7	5.5	22.6
2098	48.2	134.5	159.8	24.9	16.2	13.9	12.0	10.3	9.2	7.9	6.5	7.7	37.6
2099	35.4	50.5	47.0	11.4	7.9	6.7	5.8	4.9	4.3	4.1	3.9	6.8	15.7
2100	34.4	62.5	22.4	16.5	7.2	5.5	4.7	4.0	3.5	3.4	3.1	20.2	15.6
Fuente: Elaboración Propia.													
Media	36.34	75.45	88.75	32.45	11.67	9.76	8.45	7.23	6.36	5.65	5.99	10.85	24.91
Desv Std	27.32	44.30	47.80	23.53	4.39	3.53	3.07	2.67	2.28	2.02	2.60	5.48	10.07
Maxima	170.3	226.5	189.8	109.0	25.1	19.4	16.8	14.5	12.4	11.4	17.1	20.7	57.2
minima	14.1	16.5	22.4	7.7	5.2	4.5	3.9	3.2	2.6	2.6	3.0	3.3	10.6



Caudales medios mensuales (m³/s) proyectados para el escenario RCP 8.5 del modelo climático global CESM1-BGC en la estación hidrométrica puente carretera llave para el futuro cercano 2020 – 2050.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
2020	97.6	139.1	73.5	20.5	15.5	13.4	11.6	10.0	8.8	8.1	14.9	14.8	35.6
2021	96.9	59.3	41.0	11.8	10.0	8.6	7.5	6.4	5.6	4.7	4.9	8.1	22.1
2022	25.1	21.6	63.9	19.0	7.1	6.1	5.3	4.5	4.2	3.3	3.8	6.7	14.2
2023	51.1	68.4	27.4	27.0	10.0	7.0	6.1	5.2	4.4	4.1	4.5	5.2	18.4
2024	17.6	51.6	78.3	14.0	8.2	7.0	6.1	5.2	4.7	4.0	3.9	6.4	17.2
2025	19.7	37.3	53.4	28.6	7.3	6.3	5.5	4.6	4.5	3.9	4.5	4.1	15.0
2026	5.0	14.9	7.3	2.7	1.9	1.7	1.4	1.2	1.1	1.1	1.1	6.2	3.8
2027	20.3	46.7	21.2	5.8	4.5	3.5	3.0	2.5	2.1	2.1	3.2	6.7	10.1
2028	24.8	32.4	23.8	6.9	3.9	3.4	3.0	2.5	2.0	1.9	2.9	7.8	9.6
2029	26.4	14.2	44.2	43.0	9.7	5.8	5.0	4.3	3.9	5.9	3.7	3.8	14.2
2030	39.4	64.7	114.6	44.8	13.5	10.8	9.4	8.0	6.9	6.1	5.7	12.3	28.0
2031	45.9	209.0	98.0	36.1	16.8	14.3	12.4	10.7	9.8	8.5	8.6	14.1	40.4
2032	39.5	51.3	123.4	15.5	12.0	10.4	9.0	7.9	6.9	6.0	6.8	7.7	24.7
2033	37.5	78.4	61.3	11.4	9.2	7.9	6.9	5.9	5.3	4.5	4.4	5.8	19.9
2034	32.4	77.1	142.9	19.3	12.7	11.0	9.5	8.1	7.3	6.4	6.8	15.0	29.0
2035	15.6	19.5	7.2	5.9	3.8	3.1	2.7	2.1	2.3	1.6	4.4	9.7	6.5
2036	30.2	41.2	54.9	9.0	6.2	5.4	4.6	3.9	3.6	3.0	3.5	10.5	14.7
2037	29.1	29.0	86.8	41.5	9.8	8.2	7.1	6.1	5.2	4.9	7.2	4.9	20.0
2038	16.4	36.4	55.5	17.7	6.7	5.7	5.0	4.2	3.7	3.8	7.9	16.0	14.9
2039	35.5	128.8	84.6	20.0	11.9	10.3	8.9	7.6	6.5	6.2	6.8	7.4	27.9
2040	25.8	55.8	83.7	18.6	9.4	8.2	7.0	6.0	5.3	5.4	6.1	8.0	20.0
2041	40.65	80.74	33.56	10.93	7.70	6.50	5.59	4.79	4.11	3.95	3.21	4.02	17.1
2042	27.47	84.13	46.51	18.41	8.12	7.08	6.03	5.13	4.51	3.81	4.34	4.54	18.3
2043	18.05	29.12	28.07	22.72	5.33	4.51	3.84	3.26	2.96	3.76	5.36	5.47	11.0
2044	34.21	72.08	135.1	47.17	13.46	11.49	9.97	8.57	7.43	7.06	6.38	6.90	30.0
2045	10.07	17.34	23.98	15.63	4.67	3.87	3.27	2.84	2.43	2.23	2.43	2.45	7.6
2046	11.03	48.89	142.6	58.23	12.71	10.93	9.48	8.10	7.35	7.47	8.42	15.22	28.4
2047	58.2	102.0	110.1	16.9	13.4	11.5	10.0	8.6	7.4	6.5	7.1	9.7	30.1
2048	28.0	93.7	75.4	12.6	10.4	8.9	7.7	6.6	5.8	5.3	4.7	11.0	22.5
2049	34.0	47.8	34.1	18.4	7.0	5.9	5.0	4.3	3.7	3.3	6.7	5.5	14.6
2050	13.7	74.9	88.0	13.1	9.1	7.7	6.6	5.6	4.7	4.4	4.8	17.6	20.8

Fuente: Elaboración Propia.

Media	32.50	62.18	66.60	21.07	9.10	7.63	6.60	5.63	4.98	4.62	5.45	8.50	19.57
Desv Std	21.14	41.57	39.34	13.63	3.63	3.13	2.73	2.37	2.08	1.90	2.52	4.12	8.66
Maxima	97.6	209.0	142.9	58.2	16.8	14.3	12.4	10.7	9.8	8.5	14.9	17.6	40.4
Minima	5.0	14.2	7.2	2.7	1.9	1.7	1.4	1.2	1.1	1.1	1.1	2.5	3.8



Caudales medios mensuales (m³/s) proyectados para el escenario RCP 8.5 del modelo climático global CESM1-BGC en la estación hidrométrica puente carretera Ilave para el futuro cercano 2070 – 2100.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
2070	166.2	182.1	217.3	43.9	24.4	21.2	18.4	15.9	13.8	12.3	10.6	11.2	61.5
2071	35.2	109.4	145.0	62.9	17.8	15.3	13.3	11.5	10.0	8.6	8.2	12.6	37.5
2072	27.0	40.6	52.8	16.5	8.1	6.9	5.9	5.1	4.6	4.3	12.1	10.1	16.2
2073	65.2	144.9	47.6	15.5	11.5	9.9	8.5	7.3	6.3	6.0	10.5	9.9	28.6
2074	68.5	139.7	96.5	17.7	13.7	11.8	10.2	8.9	7.7	6.4	6.2	8.3	33.0
2075	20.4	12.6	22.6	32.0	6.1	4.8	4.2	3.6	3.7	5.1	5.9	14.3	11.3
2076	17.3	47.3	78.7	33.8	8.7	7.6	6.5	5.6	5.4	4.4	3.8	13.3	19.4
2077	56.5	103.0	124.7	36.7	16.2	12.0	10.4	9.0	8.3	6.9	6.5	8.0	33.2
2078	31.2	63.9	59.3	41.9	9.9	8.5	7.4	6.4	5.5	4.6	4.9	24.7	22.4
2079	175.0	146.9	204.1	59.7	25.9	20.6	17.3	15.0	13.3	11.6	12.2	12.9	59.5
2080	72.0	89.3	148.5	60.2	18.0	14.8	12.8	11.1	9.9	8.2	7.6	15.3	39.0
2081	27.5	55.7	83.0	43.9	12.8	9.7	8.3	7.2	6.2	6.1	5.7	11.0	23.1
2082	239.3	319.6	243.5	53.8	34.0	24.3	21.1	18.3	16.0	14.1	13.1	13.4	84.2
2083	84.5	85.0	87.4	18.9	13.8	11.9	10.3	8.9	7.7	7.1	6.9	13.0	29.6
2084	83.9	145.6	188.1	32.0	18.5	16.1	13.9	12.2	11.0	9.1	8.4	20.1	46.6
2085	38.7	205.1	117.4	35.8	18.0	14.9	12.9	11.2	9.7	9.0	7.4	8.1	40.7
2086	38.4	61.5	113.7	50.2	13.7	11.6	10.0	8.6	7.3	7.7	6.6	19.6	29.1
2087	33.5	135.9	209.9	47.6	25.7	16.7	14.4	12.5	10.8	10.3	9.3	21.5	45.7
2088	35.5	150.6	114.5	21.2	15.5	13.1	11.3	9.8	8.7	8.0	13.7	19.1	35.1
2089	83.4	155.9	134.6	22.8	16.8	14.5	12.6	10.9	9.4	8.0	12.6	57.7	44.9
2090	170.7	169.4	170.8	86.4	23.7	20.3	17.6	15.2	13.1	12.9	15.3	17.7	61.1
2091	131.5	380.6	286.9	110.4	31.91	27.42	23.79	20.61	18.25	18.73	17.34	15.67	90.3
2092	61.09	108.9	109.1	32.32	16.21	13.75	11.88	10.32	8.89	7.47	6.81	30.44	34.8
2093	56.20	159.4	291.9	101.53	25.73	22.13	19.14	16.62	14.51	13.08	11.56	11.59	62.0
2094	20.55	119.7	61.00	15.98	11.96	10.23	8.84	7.61	6.64	6.38	8.26	6.53	23.6
2095	22.34	42.82	35.14	12.83	6.09	5.19	4.37	3.80	3.66	4.81	4.14	7.28	12.7
2096	32.32	143.9	95.85	25.63	15.18	11.09	9.54	8.33	7.09	8.02	6.26	7.43	30.9
2097	31.9	149.1	102.6	48.6	15.2	13.2	11.4	10.0	8.6	8.6	7.5	10.6	34.8
2098	19.8	114.8	271.0	143.9	25.1	21.2	18.4	15.9	13.8	12.2	10.8	15.8	56.9
2099	75.7	176.0	151.9	118.2	22.7	19.5	16.9	14.6	13.1	11.6	10.6	18.7	54.1
2100	44.2	163.6	201.0	115.1	24.8	19.8	17.1	14.8	12.9	11.1	10.4	20.3	54.6

Fuente: Elaboración Propia.

Media	66.6	132.9	137.6	50.25	17.68	14.5	12.5	10.8	9.54	8.80	9.07	15.6	40.5
Desv Std	54.9	75.60	74.46	34.88	7.18	5.69	4.94	4.27	3.71	3.34	3.32	9.59	19.2
Maxima	239.3	380.6	291.9	143.9	34.0	27.4	23.8	20.6	18.2	18.7	17.3	57.7	90.3
Mínima	17.3	12.6	22.6	12.8	6.1	4.8	4.2	3.6	3.7	4.3	3.8	6.5	11.3



Caudales medios mensuales (m^3/s) históricos calculados por el modelo climático global CESM1-BGC en la estación hidrométrica puente carretera llave para el periodo 1975 - 2005.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1975	96.5	89.6	167.5	22.7	18.0	15.5	13.5	11.7	10.3	9.3	8.1	10.9	39.5
1976	45.0	106.8	82.3	61.7	24.0	13.5	11.6	10.1	9.0	9.0	14.4	16.5	33.7
1977	90.3	208.0	97.8	20.5	17.2	15.0	13.0	11.3	9.9	9.0	7.7	7.5	42.2
1978	35.4	139.4	47.8	20.9	12.2	10.4	8.9	7.7	7.5	8.7	9.3	20.7	27.4
1979	115.4	140.2	46.5	29.9	14.2	12.2	10.6	9.2	8.0	7.3	14.8	9.6	34.8
1980	36.1	69.5	53.9	10.5	8.9	7.7	6.7	5.8	5.7	4.5	4.1	4.3	18.1
1981	28.8	104.6	66.8	13.4	9.8	8.5	7.3	6.3	5.9	5.1	5.1	4.9	22.2
1982	11.9	31.8	47.9	11.1	5.8	5.1	4.4	3.8	3.3	3.5	4.6	17.6	12.6
1983	19.0	40.0	72.7	30.1	9.0	7.5	6.5	5.6	5.4	4.7	4.4	4.9	17.5
1984	31.5	51.2	31.3	11.4	6.7	5.5	4.8	4.1	3.7	3.1	3.3	3.6	13.4
1985	58.1	152.6	60.5	17.4	13.8	10.4	9.1	7.9	7.0	7.2	10.5	6.6	30.1
1986	23.5	62.6	67.3	28.0	9.6	8.4	7.3	6.3	6.9	5.6	10.7	10.1	20.5
1987	18.7	30.3	146.8	24.8	12.0	10.4	9.0	7.8	8.0	7.1	16.3	33.5	27.1
1988	39.8	138.8	127.6	81.3	19.3	16.0	13.9	12.0	11.4	9.2	9.2	9.1	40.6
1989	69.6	184.2	121.0	21.7	17.4	15.0	13.0	11.2	10.3	9.1	9.5	8.7	40.9
1990	44.0	105.9	72.7	14.1	11.5	10.0	8.7	7.5	6.7	5.8	12.1	7.9	25.6
1991	25.4	149.2	60.6	13.9	11.4	9.9	8.6	7.4	6.7	5.9	12.1	15.8	27.2
1992	50.6	89.9	79.2	15.7	11.3	9.9	8.6	7.4	7.3	6.6	12.6	14.7	26.1
1993	44.1	117.3	106.7	38.9	14.6	12.7	11.0	9.6	8.3	7.5	7.3	6.6	32.1
1994	31.9	114.9	106.9	14.9	13.0	11.0	9.6	8.3	7.3	6.5	12.0	17.2	29.5
1995	25.0	19.0	27.1	12.1	5.6	4.8	4.1	3.6	4.9	9.8	4.4	3.5	10.3
1996	9.22	57.19	79.49	38.22	9.80	8.30	7.19	6.20	5.41	5.04	6.32	6.62	19.9
1997	40.51	52.60	51.33	35.34	9.81	7.98	6.89	5.92	5.10	4.87	7.75	8.05	19.7
1998	16.25	65.82	68.58	25.90	9.28	7.96	6.90	5.98	5.25	4.83	6.12	16.54	20.0
1999	22.54	49.94	44.71	11.55	6.91	5.93	5.16	4.42	3.82	3.19	3.48	9.07	14.2
2000	61.00	137.3	82.90	37.86	13.76	11.88	10.31	8.91	8.23	7.08	9.24	6.73	32.9
2001	25.90	64.30	71.16	21.07	9.56	8.22	7.14	6.15	5.54	4.92	5.55	12.39	20.2
2002	91.2	109.1	87.3	22.0	13.4	11.5	10.0	8.7	7.6	7.3	6.3	12.0	32.2
2003	43.7	106.7	66.5	20.6	11.3	9.8	8.5	7.3	6.6	5.7	5.2	5.8	24.8
2004	82.9	80.0	77.9	17.2	11.7	10.2	8.9	7.7	6.7	5.8	5.3	5.2	26.6
2005	22.7	48.4	39.1	19.8	7.2	6.0	5.2	4.4	3.9	4.0	3.1	7.7	14.3

Fuente: Elaboración Propia.

Media	43.76	94.11	76.13	24.66	11.87	9.90	8.60	7.43	6.83	6.36	8.09	10.46	25.68
Desv Std	27.25	47.03	32.56	15.24	4.16	3.06	2.66	2.32	2.04	1.94	3.68	6.32	8.87
Maxima	115.4	208.0	167.5	81.3	24.0	16.0	13.9	12.0	11.4	9.8	16.3	33.5	42.2
Minima	9.2	19.0	27.1	10.5	5.6	4.8	4.1	3.6	3.3	3.1	3.1	3.5	10.3