

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE  
ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO: CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA CAHUA**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR  
ERIK WILLIAM CHACON PILLPA**

**ASESOR  
Dra. ADA LIZ ARANCIBIA SAMANIEGO**

**Lima- Perú**

**2024**

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”**

Chacón Pillpa Erik William

echaconp@uni.pe

Cel: 964117919

## **DEDICATORIA**

Todos los esfuerzos desarrollados en esta ardua tarea son dedicados a mis padres Silvia Pillpa Martínez y William Chacón Laurente, quienes estuvieron presentes día a día mediante su amor, confianza, apoyo incondicional y guía durante toda mi formación como persona. Asimismo, dedico a mi hermano Michael Chacón Pillpa por cada uno de sus consejos, y brindarme la fortaleza para culminar la investigación.

Asimismo, quiero dedicar estos esfuerzos a mi novia Dalia Quispe Ramos y mis seres queridos que han sido los pilares de fuerza y apoyo incondicional, que han comprendido mis ausencias y sacrificios, por lo que este logro también es de ustedes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer primeramente a Dios por sobre todas las cosas y ser mi guía en cada uno de mis pasos. Agradezco a mis padres Silvia Pillpa Martínez y William Chacón Laurente por su enorme apoyo y guía durante mi vida, a mi hermano por ayudarme a tomar las mejores decisiones a mi novia Dalia Quispe Ramos por ser pilar fundamental en mi vida y en general a todos mis familiares.

Agradecer a mi asesora de investigación la Dra. Ada Arancibia Samaniego, por todos los consejos y guías para culminar un proyecto tan importante para mi vida. Agradecer al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, por permitir desarrollar el proyecto de Investigación del Impacto del cambio climático en la reserva hídrica y sus efectos en el incremento de eventos extremos, que gracias a un equipo muy sólido conformado por Erick Claros y Froilán Rodas, se lograron resultados muy satisfactorios. A quienes también agradezco por su apoyo brindado al cuestionar, analizar y confrontar cada incertidumbre hallado en la investigación.

Agradecer a la empresa Statkraft Perú por su valiosa cooperación y generosa disposición de datos de forma segura, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de la investigación.

## ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	4
<b>Abstract</b> .....	6
<b>Prólogo</b> .....	7
<b>Lista de tablas</b> .....	9
<b>Lista de figuras</b> .....	11
<b>Lista de símbolos y siglas</b> .....	14
<b>Capítulo I: Introducción</b> .....	16
1.1. Generalidades.....	16
1.2. Descripción del problema de investigación.....	16
1.3. Objetivos del estudio .....	18
1.3.1. Objetivo General.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos .....	18
1.4. Hipótesis del estudio.....	18
1.4.1. Hipótesis General.....	18
1.4.2. Hipótesis Específicas.....	18
1.5. METODOLOGIA.....	18
<b>Capítulo II: Marcos teórico y conceptual</b> .....	20
2.1. Marco teórico .....	20
2.1.1. Sistema Climático y Cambio Climático .....	20
2.1.1.1. Gases de efecto invernadero y forzamiento radiativo.....	20
2.1.1.2. Cambio Climático y escenarios de cambio climático .....	23
2.1.1.3. Escenarios de cambio climático - AR6.....	26
2.1.2. Modelos Climáticos.....	27
2.1.2.1. Modelos de circulación General (GCM) .....	27
2.1.2.2. Modelos climáticos regionales RCM.....	30
2.1.2.3. Incertidumbre de los modelos.....	31
2.1.2.4. Reducción de Escala del clima.....	32
2.1.2.4.1. Método de escalamiento estadístico .....	32
2.1.2.4.2. Método de escalamiento dinámico .....	35
2.1.3. Hidrología .....	35
2.1.4. Modelo hidrológico .....	38
2.1.4.1. Regionalización de la precipitación y temperatura.....	39

2.1.4.2. Modelo Hidrológico GR4J.....	41
2.1.4.3. Calentamiento, Calibración y Validación del modelo .....	45
2.1.4.3.1. Criterios de ajuste y evaluación de desempeño.....	45
2.1.4.4. Modelos hidrológicos en el software R estudio.....	47
2.1.5. Impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica .....	48
2.1.6. Generación de energía Hidroeléctrica .....	49
2.1.7. Operación de un sistema eléctrico .....	50
2.1.7.1. Procedimientos Técnicos PR 13 y PR14 .....	50
2.1.7.2. Modelado de la función de Producción .....	51
2.2. Marco conceptual .....	53
2.2.1. Proyecciones climáticas .....	53
2.2.2. Precipitación Media.....	54
2.2.3. Temperatura Media.....	54
2.2.4. Evapotranspiración .....	54
2.2.5. Escorrentía .....	55
2.2.5.1. Factor x5 representado por el kc.....	55
2.3. Operación de la central hidroeléctrica .....	56
2.3.1. Caudal turbinado .....	56
2.3.2. Restricciones a las unidades generación hidroeléctrica .....	56
2.3.3. Potencia generada.....	57
2.3.4. Tasa de cambio en la Producción hidroeléctrica .....	57
<b>Capítulo III: Desarrollo de la investigación .....</b>	<b>58</b>
3.1. Zona de estudio.....	58
3.2. Objeto de estudio .....	59
3.3. Información Meteorológica.....	59
3.3.1. Precipitación.....	61
3.3.2. Temperatura.....	62
3.3.3. Estación de aforo – Puente Cahua.....	62
3.3.4. Características del tipo de cobertura vegetal .....	64
3.3.5. Selección de modelos de circulación general (GCM) -CMIP5.....	65
3.3.6. Selección de modelos climáticos del WCRP – CMIP5.....	67
3.4. Metodología.....	67
3.4.1. Descripción del modelamiento climático .....	68
3.4.2. Descripción del modelamiento hidrológico.....	69

3.4.3.	Descripción del modelo de generación de energía Hidroeléctrica .....	71
3.5.	Resultados.....	74
3.5.1.	Análisis de las variables meteorológicas.....	74
3.5.2.	Resultados del análisis de los Modelos de cambio climático.....	77
3.5.3.	Proceso de escalamiento de las variables meteorológicas.....	80
3.5.4.	Resultados del análisis del Modelo hidrológico.....	82
3.5.5.	Modelo de Generación de la central Hidroeléctrica.....	92
	<b>Capítulo IV: Análisis y discusión de resultados</b> .....	<b>98</b>
4.1.	Análisis y validación del proceso de interpolación de las variables climáticas.....	98
4.2.	Análisis de los modelos climáticos (GCM) .....	99
4.3.	Análisis del modelamiento hidrológico.....	102
4.4.	Análisis de la escorrentía futura.....	103
4.5.	Generación Hidroeléctrica .....	107
4.6.	Impacto en la generación hidroeléctrica.....	110
	<b>Conclusiones</b> .....	<b>112</b>
	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>114</b>
	<b>Referencia bibliográficas</b> .....	<b>115</b>
	<b>Anexos</b> .....	<b>126</b>

## RESUMEN

La generación hidroeléctrica en el Perú aporta más del 50% de la energía eléctrica producida en el Sistema Interconectado Nacional – SEIN, así que una variación en la capacidad de generación de las hidroeléctricas tendrá un impacto importante en el SEIN. Siendo la generación hidroeléctrica susceptible a los efectos del cambio climático, debido a los cambios en los patrones de escorrentía, surge la necesidad de estudiar los posibles impactos por las variaciones en la climatología.

En la presente investigación se analiza los impactos del cambio climático en la generación hidroeléctrica para una central hidroeléctrica dentro del SEIN, ubicada en una cuenca de la vertiente del Pacífico, en este caso la Central Hidroeléctrica Cahua. Por lo que, se desarrolló una metodología compuesta por tres partes: Análisis climatológico de los modelos de cambio climático; análisis del sistema hidrológico de la cuenca en estudio y análisis de la generación de energía hidroeléctrica. En la primera parte se analiza las variables de precipitación y temperatura de los modelos climático GCM, evaluados en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, a escala diaria. La segunda parte consiste en el montaje y calibración del modelo hidrológico (GR4J) de la cuenca, para el que se obtuvo resultados satisfactorios con índices de desempeño de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.9117 y Kling-Gupta Efficiency (KGE) de 0.9298. En la última parte, se planteó un modelo de generación de energía hidroeléctrica para una planta en particular, en función de la disponibilidad hídrica y sus reglas de operación, cuyo resultado de eficiencia fue de 0.88, considerando que es aceptable.

Mediante la integración de estas tres partes se obtuvo resultados de la precipitación, temperatura, escorrentía y generación de energía, en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, para los periodos futuro cercano (2040-2070) y futuro lejano (2070-2100), encontrando que probablemente no haya variaciones importantes del caudal medio mensual, y en promedio se podría generar una disminución de 10.40% (RCP4.5) y de 7.92% (RCP8.5). Los resultados de la producción de energía indicarían probables incrementos para ambos escenarios de cambio climático, el cual podría llegar hasta un 25.55% (RCP4.5) y 23.07% (RCP8.5), esto se debe a que, la generación de energía no se vería afectada durante periodos de sequía, ya que el caudal necesario para la máxima eficiencia no disminuye. Sin

embargo, durante periodos de avenidas, podría haber decrementos en la escorrentía

Estos resultados, son válidos para las condiciones y asunciones indicadas en el presente trabajo.

## ABSTRACT

Hydroelectric generation in Peru contributes more than 50% of the electrical energy produced in the National Interconnected System - SEIN, so a variation in the generation capacity of hydroelectric plants will have a significant impact on the SEIN. Since hydroelectric generation is susceptible to the effects of climate change, due to changes in runoff patterns, there is a need to study the possible impacts of climate variations.

This research analyzes the impacts of climate change on hydroelectric generation for a hydroelectric power plant within the SEIN, located in a basin of the Pacific slope, in this case the Cahua Hydroelectric Power Plant. Therefore, a methodology composed of three parts was developed: climatological analysis of climate change models; analysis of the hydrological system of the basin under study and analysis of hydroelectric power generation. The first part analyzes the precipitation and temperature variables of the GCM climate models, evaluated in the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, with a daily frequency. The second part consists of the assembly and calibration of the hydrological model (GR4J) of the basin, for which satisfactory results were obtained with Nash-Sutcliffe performance indexes (NSE) of 0.9117 and Kling-Gupta efficiency (KGE) of 0.9298. In the last part, a hydroelectric power generation model was proposed for a particular plant, based on its operating rules, whose efficiency result was 0.88, which is considered acceptable.

By integrating these three parts, results were obtained for precipitation, temperature, runoff and energy generation, in the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, for the near future (2040-2070) and far future (2070-2100) periods, finding that there will probably be no significant variations in the average monthly flow, and on average a decrease of 10.40% (RCP4.5) and 7.92% (RCP8.5) could be generated. The results of energy production would indicate probable increases for both climate change scenarios, which could reach up to 25.55% (RCP4.5) and 23.07% (RCP8.5), this is due to the fact that the flow for turbinning at maximum efficiency would not decrease during low water periods compared to flood periods, which could present decreases, therefore, energy generation would not be affected.

These results are valid for the conditions and assumptions indicated in the present work.

## PRÓLOGO

El panel intergubernamental sobre cambio climático, indica que, en muchas regiones del mundo, los cambios en los patrones de precipitación, derretimiento de hielo, nieve, entre otras variables, afectan el ciclo hidrológico, impactando en la disponibilidad de los recursos hídricos. Asimismo, existe una alta probabilidad de que la esorrentía media anual llegue a un pico y posteriormente tendrá un ritmo decreciente para finales del siglo. Siendo el Perú un país con condiciones fisiográficas complejas, que le confieren una diversidad climática, entre otras condiciones, será afectado por el cambio climático.

Por otro lado, el Perú basa su producción de energía eléctrica en centrales hidroeléctricas, las que componen más del 50% de la matriz eléctrica. La mayor parte de las hidroeléctricas están ubicadas en la zona andina, las que estarían más expuestas a los impactos del cambio climático.

Al respecto, muchos investigadores que han estudiado el impacto climático en la generación hidroeléctrica indican que podría reducir la capacidad hidroeléctrica en 61% a 74% para los periodos 2040-2069 a nivel global. Muchos de los estudios, incluyen el análisis de sistemas interconectados, principalmente hidrotérmicos.

El presente trabajo realiza el análisis a nivel de una Central hidroeléctrica en específico, acotada por las reglas de operación de la planta, que se limitan por su operación dentro del Sistema Interconectado Nacional y las condiciones hidrológicas y sedimentológicas.

Para el presente estudio, se analizaron 5 modelos climáticos globales del "Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados fase 5" (CMIP5) con una frecuencia diaria, en los escenarios de "Trayectorias de concentración representativa" 4.5 y 8.5, los cuales fueron escalados mediante métodos estadísticos.

Por otra parte, se modeló y validó un modelo hidrológico, el GR4J, cuyos resultados brindaron un índice de desempeño de 0.91 bajo el criterio de Nash Sutcliffe. Los parámetros de precipitación y temperatura de los modelos climáticos, proyectados a nivel diario hasta el 2100, aplicados al modelo hidrológico, resultaron en una ligera disminución con una tasa de cambio anual de 13% en el escenario RCP4.5 y de 7.69% en el escenario RCP8.5.

En cuanto al modelo de generación de energía hidroeléctrica, se obtuvo un resultado aceptable de 0.88 de correlación entre la información histórica y los generados por el modelo, considerando las reglas de operación y disponibilidad hídrica. Aplicando los caudales futuros bajo los escenarios de cambio climático en el modelo de generación, se podría generar un incremento de la producción de energía de hasta 25.55% en el escenario RCP4.5 y de 23.07% para el escenario RCP8.5 en el futuro cercano, y en el futuro lejano el incremento de la producción de energía podría llegar hasta 22.62% y 19.07% respectivamente para cada escenario.

El gran aporte de este trabajo, además de la metodología presentada y el tratamiento de la información de los modelos climáticos es la modelación de la generación de energía a nivel de una central hidroeléctrica. Es importante resaltar este logro, pues la generación hidroeléctrica dentro de un sistema interconectado depende no solo la disponibilidad hídrica, sino de otros factores como demandas y tarifas.

Los resultados brindados en la presente investigación dan un valioso aporte en la preparación de planes de adecuación al cambio climático.

LA ASESORA

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Relación entre los escenarios desarrollados por cada grupo del trabajo del AR6.....	26
Tabla 2	Modelos incluidos en el Coupled Model Intercomparison Project Phase 5.....	30
Tabla 3	Métodos de Corrección por sesgo para precipitación y temperatura .....	33
Tabla 4	Parámetros del modelo GR4J en el rango regular.....	44
Tabla 5	Umbrales establecidos para los criterios de eficiencia.....	46
Tabla 6	Valores referenciales para el criterio de Nash-Sutcliffe.....	47
Tabla 7	Información de estaciones empleadas (Meteorológica).....	61
Tabla 8	Delimitación de la cuenca por coordenadas .....	65
Tabla 9	Información descargada del KNMI, los círculos en blanco muestran la disponibilidad de la información, los círculos sombreados la información descargada y los NA que no se dispone de la información.....	66
Tabla 10	Parámetros de cada turbina tipo Francis.....	73
Tabla 11	Rendimiento de la precipitación de los modelos GCM frente a los datos precipitación observada, los valores sombreados son los primeros 15 modelos seleccionados. ....	79
Tabla 12	Rendimiento de la temperatura de los modelos GCM frente a los datos de temperatura observada, los valores sombreados son los mejores modelos seleccionados .....	80
Tabla 13	Los mejores cinco modelos climáticos.....	81
Tabla 14	Tipo de cobertura vegetal y coeficiente de cultivo (kc).....	83
Tabla 15	Eficiencia de la simulación hidrológica $K_c = 1$ , de acuerdo con el criterio KGE y NSE. ....	85
Tabla 16	Parámetros calibrados del modelo GR4J, $K_c = 1$ .....	86
Tabla 17	Eficiencia de la simulación hidrológica $K_c = 0.069$ , de acuerdo con el criterio KGE y NSE. ....	87
Tabla 18	Parámetros calibrados del modelo GR4J, $K_c = 0.069$ .....	87
Tabla 19	Eficiencia de la simulación hidrológica $K_c = 0.52$ , de acuerdo con el criterio KGE y NSE.....	88
Tabla 20	Parámetros calibrados del modelo GR4J, $K_c = 0.52$ .....	88
Tabla 21	Rendimiento del proceso de interpolación con el modelo GR4J. ....	98
Tabla 22	Rendimientos para cada caso del modelamiento hidrológico. ....	102

Tabla 23	Parámetros del modelo hidrológico GR4J, para cada caso de evaluación.....	103
Tabla 24	Tasa de cambio de la esorrentía futura en el escenario RCP4.5, con respecto al caudal modelado y observado .....	104
Tabla 25	Tasa de cambio de la esorrentía futura en el escenario RCP8.5, con respecto al caudal modelado y observado .....	105
Tabla 26	Tasa de cambio de la producción de energía futura en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para futuro cercano (FC) y futuro lejano (FL). .....	109

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de la estructura de trabajo.....	19
Figura 2	El forzamiento radiativo entre 1750 y 2011 para diferentes agentes del forzamiento siendo predominante los gases de efecto invernadero (GEI), con un alto nivel de confianza en el cálculo. ....	21
Figura 3	Forzamiento radiativo de la atmósfera debido a los gases de efecto invernadero de larga duración, respecto de 1750, y actualización de 2019 del índice anual de gases de efecto invernadero de la NOAA. ....	23
Figura 4	Forzamiento radiativo para las Trayectorias de concentración representativa (RCP) similares a las concentraciones total de - equivalentes en (ppm) en 2100.....	24
Figura 5	Emisiones de los principales gases de efecto invernadero según los PCR. El área gris indica los percentiles 98 y 90 (gris claro/oscura).....	24
Figura 6	Ciclo Hidrología.....	36
Figura 7	Representación de la operación de un sistema hidrológico .....	36
Figura 8	La cuenca como un sistema hidrológico adaptado.....	37
Figura 9	Diagrama del modelo GR4J de cuatro parámetros. ....	42
Figura 10	Eficiencia de la turbina Francis en función del caudal turbinado y altura neta .....	53
Figura 11	Zona de estudio .....	58
Figura 12	Bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cahua.....	59
Figura 13	Ubicación de estaciones de precipitación (P), temperatura (T) y caudal (Q).....	60
Figura 14	Registro de estaciones Meteorológicas (Precipitación). ....	61
Figura 15	Registro de estaciones Meteorológicas (Temperatura), .....	62
Figura 16	Estación hidrométrica.....	63
Figura 17	Registro de caudales diarios - Estación Puente Cahua.....	63
Figura 18	Tipos de cobertura vegetal en la cuenca.....	64
Figura 19	Cobertura de Matorral Arbustivo y Pajonal andino característicos de la cuenca de Pativilca.....	65
Figura 20	Diagrama de la metodología de trabajos en los tres casos de Análisis. ....	67
Figura 21	Metodología de análisis de los modelos climáticos. ....	69
Figura 22	Metodología para el análisis del sistema hidrológico.....	70
Figura 23	Metodología de aplicación en la evaluación de cambio climático.....	71

Figura 24	Metodología para el análisis de la función de producción .....	72
Figura 25	Esquema de resultados .....	74
Figura 26	En la grafica a) grillado de la cuenca en 0.05°X0.05 distribuidas por altitud, b) precipitación media anual grillada de la cuenca interpolada por el método IDW y corregida por altitud.c) Precipitación media anual por método IDW. d) Precipitación media anual interpolada por el método KED.....	75
Figura 27	El grafico a) muestra el método de interpolación IDW para la temperatura, el grafico b) muestra la interpolación IED por corrección por altitud, fecha 14-06-2019.....	76
Figura 28	Series de tiempo para las variables de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, media de la cuenca por el método de interpolación IED.....	77
Figura 29	Análisis de rendimiento de los 32 modelos climáticos en función de la variable de precipitación. ....	78
Figura 30	Análisis de rendimiento de 15 modelos climáticos GCM en función de la variable temperatura. ....	79
Figura 31	Resultado del escalamiento estadístico de la precipitación.....	81
Figura 32	Resultado del escalamiento estadístico de la temperatura. ....	81
Figura 33	Diagrama topológico de la cuenca del rio Pativilca. ....	83
Figura 34	Calibración inicial del modelo GR4J.....	84
Figura 35	Resultados de la simulación del modelo hidrológico GR4J con Kc=1.....	85
Figura 36	Resultados de la simulación del modelo hidrológico GR4J con Kc=0.069.....	86
Figura 37	Resultados de la simulación del modelo hidrológico GR4J, Kc=0.52. ....	87
Figura 38	Serie de caudales proyectados hasta el 2100 en el modelo CMCC-CM, en el escenario RCP4.5 .....	89
Figura 39	Serie de caudales proyectados hasta el 2100 en el modelo CMCC-CM, en el escenario RCP8.5. ....	90
Figura 40	Proyección de la escorrentía para el periodo futuro cerca y lejano, kc=0.069 – RCP4.5.....	91
Figura 41	Proyección de la escorrentía para el periodo futuro cerca y lejano, kc=0.069 – RCP8.5.....	91
Figura 42	Relación caudal disponible y producción de energía diaria en los dos grupos de generación.....	93
Figura 43	Reglas de operación de la central Hidroeléctrica .....	93

Figura 44	Producción de generación eléctrica media mensual observada y simulada. ....	94
Figura 45	Producción de energía futura media mensual simulada en el escenario CMCC-CM. ....	95
Figura 46	Proyección de la generación de energía hidroeléctrica .....	96
Figura 47	Proyección de los GCMs de la precipitación futura. ....	99
Figura 48	Proyección de los GCMs de la temperatura futura. ....	101
Figura 49	Proyección de la escorrentía futura en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, kc=0.069.....	104
Figura 50	Proyección de la generación de energía hidroeléctrica en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.....	108

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

### SÍMBOLOS

$T_{obs,m}$ ,  $T_{raw,m}$  y  $T_{cor,m,d}$ : Temperatura observada, temperatura bruta del modelo climático y temperatura corregida.

$P_{obs,m}$ ,  $P_{raw,m}$  y  $P_{cor,m,d}$ : Precipitación observada, precipitación bruta del modelo climático y precipitación corregida.

$ecdf_{doy,i}^{mod,cal.}$ : Distribución de densidad acumulativa empírica.

$P_{t,i}$ : Precipitación escalada por el método de Quantile Mapping

$T_{tarjet(j)}$  y  $T_{i(j)}$ : Temperatura en una grilla de la cuenca y temperatura en la estación meteorológica.

$P_{tarjet(j)}$  y  $P_{i(j)}$ : Precipitación en una grilla de la cuenca y precipitación en la estación meteorológica.

$EP$  y  $Ta$ : Evapotranspiración y temperatura media diaria en la cuenca.

$\theta_{tem}$ ,  $\theta_{prec}$ : Gradiente altitudinal de la temperatura y precipitación

$X1$ ,  $X2$ ,  $X3$ ,  $X4$  y  $X5$ : Parámetros del modelo hidrológico GR4J.

$Q_t$ ,  $Q_d$  y  $Q_r$ : Caudal simulado del modelo, caudal del flujo subterráneo y caudal del reservorio en movimiento

$P_i$ ,  $P_{obs}$ ,  $hn$  y  $Q_t$ : Producción de energía simulada, producción de energía observada, altura neta y caudal turbinado.

$P_{min(i)}$ ,  $P_{max(i)}$  y  $Q_{cs,max(i)}$ : Potencia mínima, potencia y Caudal máximos en el río por incremento de concentración de sólidos.

## **SIGLAS**

GCM:	Modelos de circulación general
RCP:	Trayectorias de concentración representativas
SEIN:	Sistema Interconectado Nacional
CMIP5:	Quinta fase del Proyecto de Inter comparación de modelos acoplados
KGE:	Criterio de Kling-Gupta Efficiency
GR4J:	Modelo hidrológico de escorrentía – lluvia
IPCC:	Panel Intergubernamental sobre cambio climático
SRES:	Escenarios de emisiones de cambio climático del CMIP4
AR5:	Quinto informe del Panel intergubernamental sobre Cambio Climático
GEI:	Gases de efecto invernadero
OMM:	Organización Meteorológica Mundial
NOAA:	Administración Nacional Atmosférica y Oceánica
KNMI:	Explorador climático del Instituto Meteorológico Real de los Países Bajos
RCM:	Modelos climáticos regionales
LS:	Escalamiento Lineal
QM:	Quantile mapping
NSE:	Criterio Nash - Sutcliffe
AirGR:	Paquete de modelos GR para software R estudio.
MW:	Mega watts
COES:	Comité de operación económica del SEIN
PR:	Procedimiento técnico del COES
IDW:	Proceso de interpolación de las variables meteorológicas
Kc:	Coeficiente de cultivo
FC:	Futuro cercano
FL:	Futuro lejano

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. GENERALIDADES

La generación eléctrica en las centrales hidroeléctricas está limitada por la disponibilidad hídrica asociada a las implicaciones de variabilidad, cambio climático u otros fenómenos naturales. Este recurso escaso y estratégico, así como la energía son indispensables para el desarrollo económico y social del país. Por lo que, hoy en día tienen alta relevancia, tanto por el aumento de la población, el desarrollo económico como también aumento de la demanda de energía y agua a nivel mundial.

El crecimiento de la demanda eléctrica de acuerdo con el World Energy Outlook 2022 (IEA, 2022) varía en tres escenarios: las nuevas políticas, precio de los combustibles y la implementación de tecnologías más eficientes. En el escenario de nuevas políticas la demanda se incrementa más del 70%, de 20150 TWh (2013) a 34500 TWh (2040), con una tasa de crecimiento anual del 2%.

Por otra parte, el cambio climático presenta grandes desafíos para la producción y transmisión de energía, por el aumento progresivo de la temperatura, fenómenos meteorológicos extremos y cambios en los patrones de precipitaciones. Por lo que, mediante acciones políticas, se acordó estabilizar la temperatura promedio en 2°C. Este cambio producirá un efecto en las inversiones futuras a fin de mantener la temperatura (Nations, 2015).

En ese sentido, la importancia de estudiar los impactos del cambio climático en las centrales hidroeléctricas bajo dos enfoques; la primera es evaluar los efectos a lo largo de su vida útil y la segunda es considerar esta evaluación en futuros diseños de obras hidráulicas.

### 1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La energía hidroeléctrica es la fuente de generación eléctrica que desempeña un papel fundamental en la descarbonización del sistema eléctrico (IEA, 2020) y actualmente representa un 45% del suministro de electricidad en Latinoamérica y probablemente para el 2040, siga siendo significativo a fin de equilibrar las energías renovables. Asimismo, la generación hidroeléctrica en el mercado peruano representa un 69% de la producción de energía del sistema eléctrico interconectado nacional (SEIN) (MINEM, 2021). Por lo que, el cambio climático representa un desafío cada vez mayor en las operaciones del sector hidro

energético, dado el aumento de la temperatura, las fluctuaciones en los patrones de lluvias, el derretimiento de los glaciares y la creciente ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos (IEA, 2021). Estas variaciones, impactan en la generación hidroeléctrica, ya que aumenta la variabilidad de caudales y afectan la estacionalidad. Por lo que, las centrales hidroeléctricas pueden verse afectadas por el cambio climático durante su vida útil (Chen et al., 2019) e impactar en la generación de energía eléctrica a nivel nacional.

Asimismo, el sector eléctrico a nivel global está experimentando grandes cambios, tal es, el caso de la caída de demanda de energía instantánea en la India producida en el día mundial del ahorro de energía, el cual fue de aproximadamente a toda la demanda de energía de Pakistán. Este evento puso a prueba a los operadores de energía durante unos 9 minutos de estabilizar el sistema eléctrico. Este reto se pudo superar gracias a la flexibilidad de energía hidroeléctrica, y pudo satisfacer el aumento de la demanda de energía (IHA, 2020). Caso similar ocurrió en Perú producto del estado de emergencia nacional, la demanda de energía cayó en un 23% respecto al periodo del 2019, por lo que la energía hídrica llegó a cubrir más del 90% de la generación en el mes de abril del 2020 (Osinerning, 2020), en ese sentido, la generación de energía hidroeléctrica seguirá siendo la fuente de energía de regulación en el sistema eléctrico, es ahí, la importancia de evaluar los efectos del cambio climático en la generación de energía, si bien es cierto se han desarrollado estudios en varias centrales hidroeléctricas con metodologías del cuarto informe del IPCC. Las nuevas metodologías pueden influir en los resultados y amerita ser revisados a detalle, ya que se estima que la proyección de energía a instalarse en el SEIN al 2040 es de 18 477 MW de los cuales la generación de energía hidroeléctrica representará el 36% (MINAM, 2016)

Estas evaluaciones del impacto climático sobre las centrales hidroeléctricas permitirá tomar las medidas necesarias para el aumento de su resiliencia, para así contar con activos adecuados a las condiciones climáticas cambiantes (Caceres et al., 2021).

De lo expresado en los párrafos anteriores, se plantea la siguiente pregunta: ¿De qué manera podría el cambio climático impactar en la generación de energía hidroeléctrica, en este caso la Central hidroeléctrica de Cahua?

### 1.3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Se presenta los objetivos principales a ser desarrollados:

#### 1.3.1. Objetivo General

Determinar los posibles impactos del cambio climático en la generación de energía en la central hidroeléctrica Cahua, de acuerdo con quinto informe del Panel intergubernamental sobre cambio climático (IPCC).

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las variaciones entre las variables de precipitación y temperatura en el periodo histórico (1990 – 2020), la estimada en los periodos futuro cercano (2040-2070) y futuro lejano (2070-2100).
- Determinar un modelo hidrológico que relacione las precipitaciones y temperaturas con los caudales registrados.
- Determinar las variaciones entre la potencia energética media (2010-2020) y la estimada en los periodos futuro cercano (2040-2070) y futuro lejano (2070-2100).

### 1.4. HIPÓTESIS DEL ESTUDIO

#### 1.4.1. Hipótesis General

El cambio climático modificara la generación de energía hídrica de la central hidroeléctrica Cahua, en un futuro cercano (2040-2070).

#### 1.4.2. Hipótesis Específicas

- Existe una posible variación de la Potencia hidroeléctrica para el periodo futuro cercano (2040-2070) y periodo futuro lejano (2070-2100).

### 1.5. METODOLOGIA

La metodología plantada para el estudio de los efectos del cambio climático en la Central hidroeléctrica se subdivide en tres grupos de trabajo:

1. Análisis climatológico de modelos de circulación global (GCM) y evaluación de sesgos de las variables de precipitación y temperatura.
2. Construir un modelo hidrológico calibrado y validado para una serie de caudales históricos.
3. Construir un modelo de generación hidroeléctrica.

En este estudio, se utiliza el modelo hidrológico GR4J que es un modelo lluvia escorrentía agregado, de 4 parámetros (Perrin et al., 2003) y adicionalmente se incorpora un quinto parámetro, considerando las recomendaciones de Ruelland et al. (2014), para mejorar la eficiencia del modelo hidrológico y finalmente tener un modelo calibrado y validado.

Para la evaluación del cambio climático, se analiza 32 modelos de circulación global a nivel mensual para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, y se seleccionan los mejores modelos que se ajustan a la data histórica por los métodos de Bias y coeficiente de correlación. A los modelos seleccionados se aplica el escalamiento estadístico a las variables de precipitación y temperatura a nivel diario, obteniendo como resultado las variables proyectadas hasta el 2100 para cada modelo de circulación global.

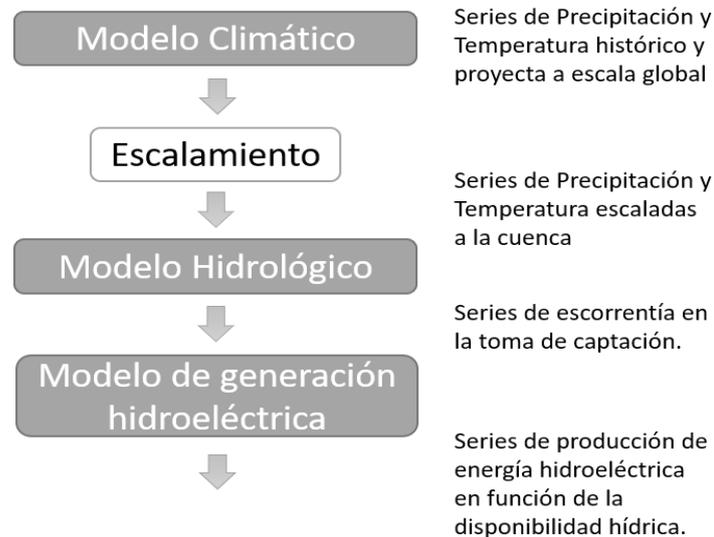


Figura 1 Esquema de la estructura de trabajo, fuente: propia

Las variables de precipitación y temperatura proyectados son ingresadas al modelo hidrológico calibrado, y de esa forma obtener los caudales proyectados para cada modelo de circulación global y en cada escenario.

Se elabora las reglas de operación a fin de determinar el modelo de generación hidroeléctrica y ser calibrado con la data histórica. Los caudales proyectados son ingresados al modelo de generación y obtener la variación de generación hidroeléctrica.

## CAPÍTULO II: MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Este capítulo detalla la revisión bibliográfica científica en el ámbito del cambio climático y los efectos en la generación de energía hídrica. Finalmente, realiza una evaluación de los factores que afectan la producción de energía.

### 2.1. MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1. Sistema Climático y Cambio Climático

El sistema climático es el resultado de la combinación de observaciones, estudios de retroalimentación y simulaciones de modelos, basada en mediciones directas físicas, biogeoquímicas y en la teledetección desde estaciones terrestres y satélites. Los cambios en el sistema climático comenzaron a medirse a nivel global a partir de mediados del siglo XIX, complementada con las reconstrucciones paleoclimáticas que se remontan a siglos o millones de años. En conjunto proporcionan una visión global de la variabilidad y cambios en la atmósfera, los océanos, la criósfera (superficie de la tierra donde el agua se encuentra en estado sólido: hielo de mar, glaciares, etc.) y la superficie terrestre.

En el quinto informe (AR5) del Panel Intergubernamental sobre cambio climático (IPCC), analiza las observaciones de cambios en el sistema climático en siete aspectos, cambios en la temperatura, en el presupuesto energético y contenido calorífico, en la circulación y los modos de variabilidad, en el ciclo del agua y criósfera, el nivel del mar, en los valores extremos, el ciclo de carbono y otros ciclos biogeoquímicos (IPCC, 2014b).

Se tiene un alto nivel de certeza que la actividad humana ha modificado y continúa modificando el sistema climático ya sea de forma directa (mediante la emisión de gases o partículas) o indirecta (por medio de la química atmosférica). Estos cambios tienen una repercusión en el balance energético de la tierra, siendo el forzamiento radiativo un parámetro de medición expresado en  $Wm^{-2}$ . Actualmente el forzamiento radiativo se debe principalmente a la contribución de los gases de efecto invernadero.

##### 2.1.1.1. Gases de efecto invernadero y forzamiento radiativo

Los gases de efecto invernadero (GEI), presente en la atmósfera contiene los siguientes gases primarios vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), Óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ) y ozono ( $O_3$ ). Estos gases absorben y emiten

radiación en diferentes longitudes de onda de acuerdo al espectro de radiación terrestre y esta propiedad ocasiona el efecto invernadero (IPCC, 2013a) .

El aumento progresivo de los GEI entre 1970 y 2010 ha tenido mayores incrementos absolutos en el periodo 2000 a 2010, a pesar de tener una serie de políticas públicas para adaptación y mitigación al cambio climático. Ello debido principalmente a la contribución de las emisiones de  $CO_2$  en torno al 78%, provenientes de la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2014b).

Actualmente, a pesar de las medidas de confinamiento debidas al COVID-19, no se contrarrestó los niveles de gases de efecto invernadero (OMM, 2020b) es más las concentraciones de  $CO_2$  tuvieron un repentino incremento respecto el 2019 (OMM & WMO, 2020) llegando a 410 partes por millón (ppm), mostrando que la velocidad de incremento no tiene precedentes en el registro histórico. Y en referencia a los otros gases la concentración molar del metano ( $CH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ) alcanzaron los niveles de  $1877 \pm 0.2$  ppm y  $332 \pm 0.1$  ppm respectivamente.

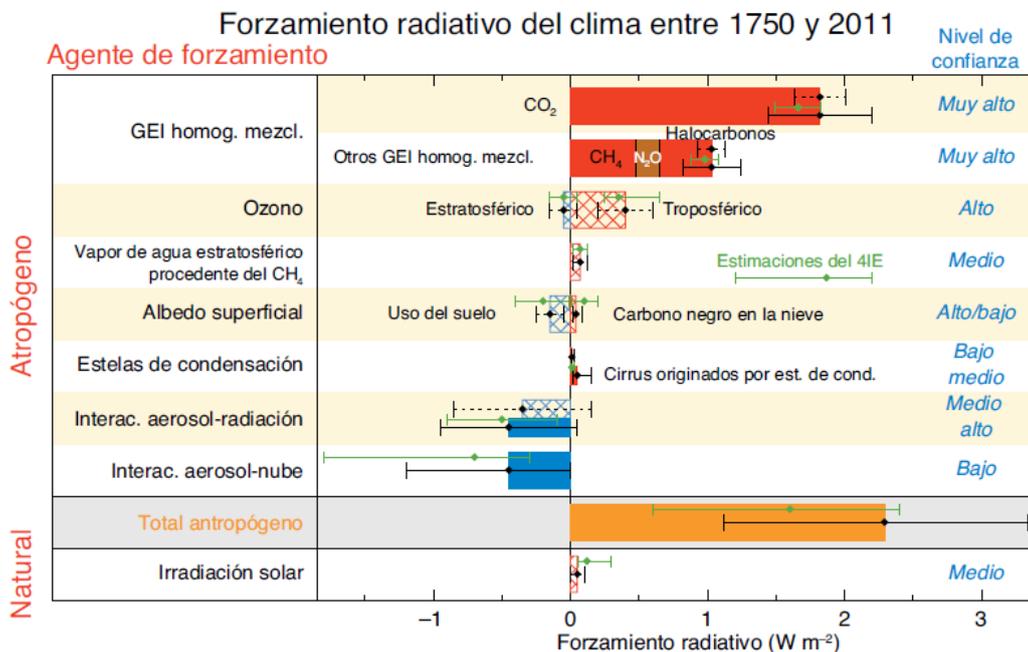


Figura 2 El forzamiento radiativo entre 1750 y 2011 para diferentes agentes del forzamiento siendo predominante los gases de efecto invernadero (GEI), con un alto nivel de confianza en el cálculo (IPCC, 2013b).

Las emisiones de gases de efecto invernadero se basan en la medición directa de la atmósfera y en los registros de los núcleos de hielo (IPCC, 2013b). Y las

variaciones de las concentraciones de los GEI, da a lugar al forzamiento radiativo como se muestra en la Figura 2.

El forzamiento radiativo de cada gas, expresado en  $Wm^{-2}$  (IPCC, 2014a) es la variación de la irradiación neta en la Tropopausa (6 a 7 km de la superficie de la tierra), producto de una variación de las concentraciones de los gases atmosféricos como el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), Óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ) y ozono ( $O_3$ ). Estas variaciones son medidas respecto del valor fijo no perturbado en las propiedades de la troposfera (7km a 20km de la superficie de la tierra) del año 1750 (IPCC, 2007).

Según la OMM, el incremento particular de  $CO_2$ , ha generado un aumento en el forzamiento radiativo de todos los gases de efecto invernadero entre el 2005 a 2011 en  $0.20 Wm^{-2}$  del rango  $[0.18 \text{ a } 0.22] Wm^{-2}$  llegando a  $2.83 Wm^{-2}$  del rango  $[2.54 \text{ a } 3.12] Wm^{-2}$ , mientras que el forzamiento radiativo únicamente para el  $CO_2$  en la era industrial (1750-2011) era de  $1.82 Wm^{-2}$  en el rango  $[1.63 \text{ a } 2.01] Wm^{-2}$ . En referencia a los otros gases como el metano ( $CH_4$ ) tuvo un incremento el 2% respecto del Cuarto informe de evaluación que fue  $0.48 [0.43 \text{ a } 0.53] Wm^{-2}$ , llegando a  $0.492 Wm^{-2}$  al 2011 (IPCC, 2007). Por lo que la tasa de crecimiento media es de  $0.3 Wm^{-2}$  por decenio (IPCC, 2013b, pag.53). Sin embargo, la incertidumbre del forzamiento radiativo depende de sus propiedades radiativas y del balance de transferencia radiativo. Actualmente el forzamiento radiativo llega a  $3.183 Wm^{-2}$ , como efecto combinado de los gases de efecto invernadero de larga duración y los otros gases (James.H & Stephen.A, 2021). Como se evidencia en la NOAA, el dióxido de carbono  $CO_2$  contribuyo con aproximadamente el 80%, por lo que es el gas más contribuyente respecto a los otros gases, sin embargo, el metano y los halógenos (CFC), se están convirtiendo en contribuyentes relativamente importantes.

Sin embargo hasta el 2019, el Programa de la vigilancia de la Atmosfera Global de la OMM, detecto que el metano ( $CH_4$ ) es el causante de aproximadamente el 16% del forzamiento radiativo (OMM, 2020b).

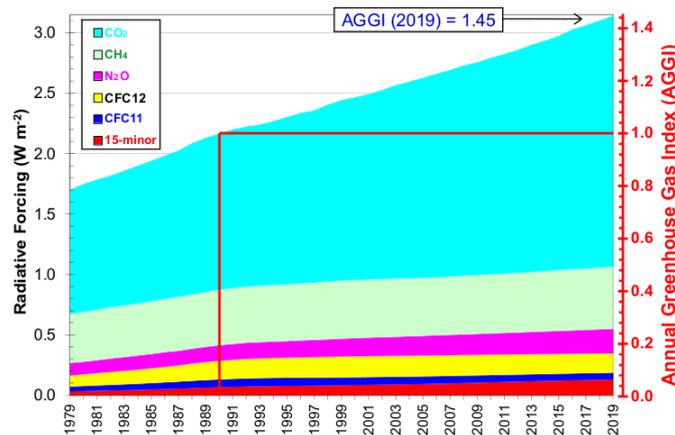


Figura 3 Forzamiento radiativo de la atmósfera debido a los gases de efecto invernadero de larga duración, respecto de 1750, y actualización de 2019 del índice anual de gases de efecto invernadero de la NOAA. (OMM & WMO, 2020)

Los niveles de forzamiento radiativo en los siguientes gases como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>) y Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) se han incrementado en 148%, 260% y 123% respectivamente para el 2019 (OMM & WMO, 2020) (James.H & Stephen.A, 2021).

#### 2.1.1.2. Cambio Climático y escenarios de cambio climático

El cambio climático es producto de la influencia humana y se evidencia en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), que ha tenido un incremento acelerado desde que el ser humano se industrializó (1750) (IPCC, 2014d). Asimismo, la organización Meteorológica Mundial (OMM) pone en manifiesto que el cambio climático es evidente de muchas formas, predominando el incremento de la temperatura media anual, que en el 2019 estuvo alrededor de  $1.1 \pm 0.1$  °C por encima del valor referencial del periodo 1850-1990 (OMM, 2020a). Definiéndolo como un “cambio sistemático en las propiedades estadísticas del clima durante un periodo prolongado”, que refleja una tendencia creciente o decreciente en los patrones meteorológicos (OMM, 2018). Adicionalmente, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), lo define como la variación del valor medio de las variables climáticas esenciales (atmósfera, océano, criósfera y nivel del mar) o en la variabilidad de sus propiedades durante periodos largos (IPCC, 2018). Y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), lo define como “cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana”. La contribución del grupo de trabajo II al quinto informe de evaluación (GTII IE5) del IPCC muestran que los

impactos del cambio climático afectan los sistemas humanos y naturales, generando una vinculación y una dependencia de su causa (IPCC, 2014a).

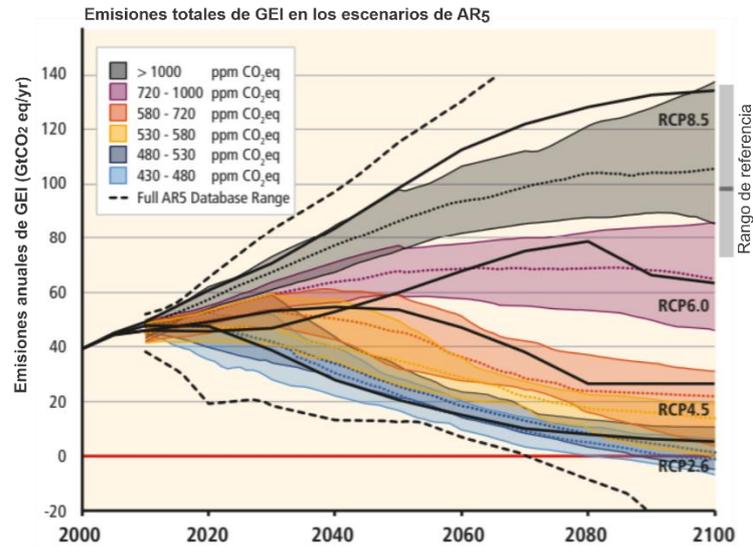


Figura 4 Forzamiento radiativo para las Trayectorias de concentración representativa (RCP) similares a las concentraciones total de - equivalentes en (ppm) en 2100 (IPCC, 2014c)

Asimismo la contribución del grupo de trabajo III en el quinto informe de evaluación del IPCC utiliza un conjunto de cuatro escenarios que denominado Trayectorias de concentración representativas (RCP) (IPCC, 2014d), como se muestra en la figura 4. Estos escenarios representan una serie de políticas de mitigación de cambio climático basado en los cambios futuros en el sistema climático como la atmosfera, los océanos, la criósfera, el nivel del mar, el ciclo de carbono y otros ciclos biogeoquímicos, en síntesis, están reflejadas en las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (GEI).

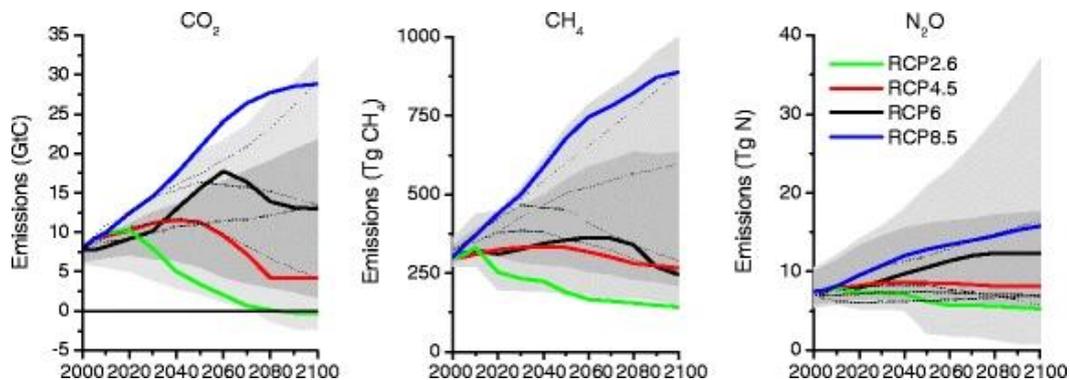


Figura 5 Emisiones de los principales gases de efecto invernadero según los PCR. El área gris indica los percentiles 98 y 90 (gris claro/oscuro) (Vuuren et al., 2011)

Las trayectorias de concentración representativas (RCP) se caracterizan por su nivel de forzamiento radiativo para el 2100, calculados a partir de modelos

climáticos simples del ciclo de carbono, denominado Modelo de evaluación del cambio climático por efecto de los gases de efecto invernadero *MAGICC* (IPCC, 2014b). Las trayectorias de RCP oscilan entre 2.6 a  $8.5 \text{ Wm}^{-2}$  y tratan de representar las respuestas a las políticas de mitigación del cambio climático para finales del siglo XXI. Por lo que, el escenario RCP2.6 [ $2.6 \text{ Wm}^{-2}$ ] se caracteriza por un bajo forzamiento expresando políticas muy fuertes que mitigan el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero por ende decae la tendencia de este incremento de GEI, los escenarios RCP 4.5 [ $4.5 \text{ Wm}^{-2}$ ] y RCP 6.0 [ $6.0 \text{ Wm}^{-2}$ ] tiene un forzamiento estable y más realista a las políticas actuales y el escenario RCP 8.5 [ $8.5 \text{ Wm}^{-2}$ ] por un alto forzamiento, por lo que las tendencias de la producción de GEI es mucho más a lo esperado. Los escenarios RCP expresados en forzamientos radiativos son comparados con las concentraciones totales de  $\text{CO}_2$  - equivalentes en (ppm) al 2100, que van desde los 430 ppm hasta más de 1000 ppm (IPCC, 2014c), como se puede evidenciar en la Figura 4. Resultando, que las emisiones de  $\text{CO}_2$  armonizan con los escenarios RCP como se muestra en la Figura 5, teniendo una diferencia de 2 a 4% para los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5 y una diferencia de 10% para el escenario RCP 6.0. En ese sentido, el forzamiento radiativo para cada RCP, debe entenderse que son únicamente nominales, ya que en la quinta fase del Proyecto de Inter comparación de modelos acoplados (CMIP5) los modelos de cambio climático se han desarrollado en base a las diferentes concentraciones de  $\text{CO}_2$  definidas para el 2100.

El escenario RCP 8.5 representa una amplia gama de políticas no climáticas, mostrándose como el caso más desfavorable. En el escenario RCP 6.0, se asemeja a un escenario de políticas climáticas y el escenario RCP 4.5 se compara con varias políticas climáticas y escenarios de bajas emisiones, mientras que en el escenario RCP 2.6, representa un rango de escenarios muy bajos, lo que implica políticas climáticas muy estrictas (Vuuren et al., 2011).

En el presente estudio se aplica los modelos del CMIP5, considerando los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, dado que este primer escenario asemeja una serie de políticas climáticas actuales y el segundo escenario a políticas no climáticas, además que el forzamiento radiativo en ambos escenarios tienen una diferencia muy baja con las concentraciones de  $\text{CO}_2$ .

### 2.1.1.3. Escenarios de cambio climático - AR6

A diferencia de los escenarios climáticos (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) evaluados en el AR5, el primer grupo de trabajo (WGI) en el sexto reporte (AR6) del IPCC (2023) evaluó la respuesta climática de cinco escenarios basados en el comportamiento socio - económico (SSP), que engloba un rango de posibles factores antropogénicos, como los gases de efecto invernadero (GEI). Los escenarios con emisiones de GEI altas y muy altas son los SSP3-7.0 y SSP5-8522 respectivamente y el escenario con emisiones moderadas de GEI es el SSP2-4.5, el cual asume que las emisiones de CO<sub>2</sub> se mantendrá en los niveles actuales, hasta mediados del siglo. Los escenarios de muy bajas y bajas emisiones son el SSP1-1.9 y el SSP1-2.6 respectivamente que conducen a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a 0 para el periodo de 2050 y 2070, respectivamente.

Para un entendimiento de los escenarios SSP, se denominan SSPx-y, donde SSPx se refiere a una trayectoria socioeconómica que describe las tendencias socioeconómicas y “y” se refiere al nivel de forzamiento radiativo ( $Wm^{-2}$ ), tal como es expresado en los escenarios RCP. (IPCC, 2023)

En la Tabla 1 se muestra la relación entre los escenarios climáticos desarrollados por los grupos de trabajo I y II en el AR6 y AR5, respectivamente, tales que, para las categorías C3, C6 y C8, se tiene una relación directa del nivel de forzamiento radiativo de 2.6, 4.5 y 8.5  $Wm^{-2}$ .

Category in WGIII	Category description	GHG emissions scenarios (SSPx-y*) in WGI & WGII	RCPy** in WGI & WGII
C1	limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot***	Very low (SSP1-1.9)	
C2	return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot***		
C3	limit warming to 2°C (>67%)	Low (SSP1-2.6)	RCP2.6
C4	limit warming to 2°C (>50%)		
C5	limit warming to 2.5°C (>50%)		
C6	limit warming to 3°C (>50%)	Intermediate (SSP2-4.5)	RCP 4.5
C7	limit warming to 4°C (>50%)	High (SSP3-7.0)	
C8	exceed warming of 4°C (>50%)	Very high (SSP5-8.5)	RCP 8.5

\* See footnote 27 for the SSPx-y terminology.  
 \*\* See footnote 28 for the RCPy terminology.  
 \*\*\* Limited overshoot refers to exceeding 1.5°C global warming by up to about 0.1°C, high overshoot by 0.1°C-0.3°C, in both cases for up to several decades.

Tabla 1 Relación entre los escenarios desarrollados por cada grupo del trabajo del AR6: fuente: IPCC, (2023)

En la presente investigación de forma complementaria se muestra los resultados de la escorrentía en los escenarios del AR6 (ver anexos). Sin embargo, este análisis no forma parte de los alcances de la investigación.

### 2.1.2. Modelos Climáticos

Los modelos climáticos representan la principal herramienta de análisis a fin de evaluar la respuesta del sistema climático ante diferentes escenarios, ya que simulan el clima histórico, la integración de los sistemas climáticos, las predicciones de variabilidad y el cambio climático a escala de corto plazo y emite las proyecciones de cambio climático a largo plazo (IPCC, 2013a). Además, los modelos se evalúan de forma individual y colectiva. La evaluación consiste en la comparación de los resultados de cada modelo con los datos observados y el análisis de las diferencias.

En el quinto informe del IPCC (AR5), se ejecutó el proyecto CMIP5, que muestra diferentes modelos y las instituciones donde fueron desarrollados, como se evidencia en la Tabla 2.

Actualmente el CMIP en su sexta versión CMIP6, proporciona una descripción más detallada del diagnóstico, evaluación y caracterización del clima (CMIP6, n.d.) el conjunto de modelos específicos en el CMIP6, se basan en las simulaciones históricas y abarca una amplia gama de aspectos, como por ejemplo que los modelos son escalados, bien definidos y útiles en el contexto del multimodelo y no se solapan con otros experimentos del CMIP6. En total se cuenta con 33 modelos de diferentes países e instituciones (Eyring et al., 2018) y pueden ser descargados del siguiente enlace: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>. Cabe precisar que para finales del 2022, el IPCC ha culminado con los análisis y resultado de los modelos climático, los cuales se muestran en la síntesis (AR6) (IPCC, 2023).

En la presente investigación dado la reciente publicación de modelos del CMIP6 en el AR6, se realiza un análisis de la escorrentía futura a nivel mensual, el cual puede ver en los anexos.

#### 2.1.2.1. Modelos de circulación General (GCM)

Los modelos de Circulación General (GCM) son los modelos climáticos más usados para comprender y pronosticar el clima, además de representar la herramienta más completa para simular la respuesta del sistema climático ante diferentes forzamientos. Los modelos GCM integran los modelos atmosfera – océano de circulación global - *Atmosphere–Ocean General Circulation Models* (AOGCMs) y los modelos del sistema terrestre - *Earth System Models (ESM)*, el primero fue evaluado en el cuarto informe del IPCC (AR4). La función de los

modelos AOGCMs es comprender las relaciones físicas del sistema climático (atmosfera, océano, tierra y hielo marino) y los *ESM* representan a los modelos más avanzados.

Los diferentes modelos climáticos GCM (IPCC, 2013a), descritos por el CMIP5, grupo de trabajo que respalda el diagnóstico, la validación, la documentación y acceso a modelos desarrollado por las diferentes instituciones, para el análisis sistemático de la comunidad científica.

Estos modelos climáticos son desarrollados a escala espacial de 0.25 grados (equivalente a 25km x 25km) y se presentan en resoluciones temporales como: anuales, mensuales, diarias e inclusive horarias. La base de datos de los modelos del CMIP5 no están restringidas y sus resultados pueden ser descargados del siguiente enlace: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/> (CMIP5, 2013).

Centros	País	Modelos
CSIRO-BOM->CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia), and BOM	Australia	ACCESS1.0 ACCESS1.3
BCC->Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China	BCC-CSM1.1 BCC-CSM1.1(m)
GCESS->College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	China	BNU-ESM
CCCma->Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá	CanAM4 CanCM4 CanESM2
NCAR->National Center for Atmospheric Research	USA	CCSM4
NSF-DOE-NCAR->National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research	USA	CESM1(BGC) CESM1(CAM5) CESM1(CAM5.1, FV2) CESM1(FAST CHEM) CESM1(WACCM)
CMCC->Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italia	CMCC-CESM CMCC-CM CMCC-CMS
CNRM-CERFACS->Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique	Francia	CNRM-CM5

CSIRO-QCCCE->Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	Australia	CSIRO-Mk3.6.0
EC-EARTH -> EC-EARTH consortium	Europa	EC-EARTH
LASG-CESS->LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University	China	FGOALS-g2
LASG-IAP->LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences	China	FGOALS-gl FGOALS-s2
FIO ->The First Institute of Oceanography, SOA, China	China	FIO-ESM
NASA GMAO->NASA Global Modeling and Assimilation Office	USA	GEOS-5
NOAA GFDL ->Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-CM2.1 GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M GFDL-HIRAM-C180 GFDL-HIRAM-C360
NASA GISS->NASA Goddard Institute for Space Studies	USA	GISS-E2-H GISS-E2-H-CC GISS-E2-R GISS-E2-R-CC
MOHC (additional realizations by INPE) ->Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)	UK	HadCM3 HadCM3Q HadGEM2-A HadGEM2-CC HadGEM2-ES
NIMR/KMA->National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration	Korea	HadGEM2-AO
INM->Institute for Numerical Mathematics	Rusia	INM-CM4
IPSL->Institute Pierre-Simón Laplace	Francia	IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR
MIROC->Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japón	MIROC4h MIROC5
MIROC->Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	Japón	MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM

MPI-M->Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Inglaterra	MPI-ESM-LR MPI-ESM-MR MPI-ESM-P
MRI->Meteorological Research Institute	Japón	MRI-AGCM3.2H MRI-AGCM3.2S MRI-CGCM3
NICAM ->Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model Group	USA	NICAM.09
NCC->Norwegian Climate Centre	Noruega	NorESM1-M NorESM1-ME

Tabla 2 Modelos incluidos en el Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (IPCC, 2013a)

El desarrollo científico y tecnológico permitió incrementar la resolución espacial de los modelos de circulación global (GCM), siendo estos modelos la herramienta más utilizada en la simulación y proyección del cambio climático (OMM, 2008). Sin embargo, la mayoría de los modelos tienen resoluciones espaciales gruesas y estas deben reducirse para los estudios a nivel regional. Por lo que, se aplica diferentes técnicas estadísticas de escalamiento denominado “*downscaling*”, como lo describe el estudio de Qin et al. (2020).

Otra de las herramientas utilizada para el análisis del clima es KNMI Climate Explorer desarrollado por el Instituto Meteorológico Real de los Países Bajos. Esta herramienta permite obtener información de los modelos GCM a una escala temporal mensual en función del campo de interés, los datos obtenidos son comparados, correlacionados y generar datos derivados para finalmente seleccionar los modelos GCM con mayor representatividad en la cuenca.

Los modelos se pueden descargar del siguiente enlace:

[https://climexp.knmi.nl/selectfield\\_cmip5.cgi?id=someone@somewhere\(Climat Explorer: Select a Monthly Field, n.d.\)](https://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip5.cgi?id=someone@somewhere(Climat Explorer: Select a Monthly Field, n.d.))

#### 2.1.2.2. Modelos climáticos regionales RCM

Los modelos climáticos regionales – “*Regional Climate Models*” (RCM) es un tipo de modelo climático delimitado en un área específica, con una resolución que puede ir desde unos 50 Km hasta unos pocos kilómetros. Este modelo se diferencia de los modelos AOGCMs por su nivel de resolución y que mayormente no simulan la interacción de océano y hielo marino.

La función principal de los modelos RCM es reducir las simulaciones dinámicas de los modelos globales a fin de proporcionar información más detallada (IPCC,

2013a) y a medida que la escala se reduce la variabilidad climática aumenta, por lo que, los modelos tienen un alto grado de incertidumbre (Giorgi, 2008).

Tanto los modelos GCM y RCM pueden producir ambigüedad en los resultados, debido a sus resoluciones, este hecho es verificado en varios estudios como los muestra Coppola et al. (2021), Llopart et al. (2019) y Urrutia & Vuille (2009). En América del Sur se han realizado estudios utilizando estos dos conjuntos, resultando que en el escenario RCP 8.5 la variable de precipitación muestra las mismas tendencias para finales del siglo XXI, sin embargo hay dispersión de los cambios relativos en la precipitación de +14% (en el noreste de Brasil en verano) a -36% (en la cordillera de los andes en invierno) (Llopart et al., 2019). Mientras en el escenario RCP 4.5 las tendencias son más débiles, en general se espera que en la región de la cordillera de los Andes y la Patagonia las condiciones sean más secas para el futuro durante el invierno.

#### 2.1.2.3. Incertidumbre de los modelos

A nivel regional y global, las señales de cambio climático se ven afectadas por los cambios en el sistema climático y el nivel de forzamientos radiativos, asimismo a medida que se incrementa la resolución espacial, la variabilidad en los parámetros climáticos se incrementa, haciendo que las señales de cambio climático hasta la variabilidad natural sean cada vez más compleja de identificar (Giorgi, 2008). Como resultado, las proyecciones de los cambios climáticos se caracterizan por ser altamente complejos y tener un alto grado de incertidumbre.

Es importante el entendimiento de las fuentes de incertidumbre asociada a las proyecciones del cambio a fin de cuantificar los futuros impactos. Las fuentes de incertidumbre, de acuerdo al IPCC AR5 (2013b), se debe a las limitaciones en las mediciones, especialmente de fenómenos poco habituales que son difíciles de evaluar la causalidad de procesos complejos. Dichos procesos abarcan sistemas físicos, biológicos y humanos, asimismo, la interacción de influencias climáticas y no climáticas que cambian con el paso del tiempo, dan lugar a incertidumbres constantes. En general, la incertidumbre en la modelación del clima futuro se debe a la limitada comprensión de procesos muy complejos y la dificultad inherente a la representación matemática de los mismos. De igual forma en el IPCC AR6 (2021), reafirma que la incertidumbre se debe a los procesos físicos complejos en cada modelo.

A pesar de la precisión que se requiere tener en cada modelo, a la fecha los modelos acoplados del IPCC en cada reporte son las herramientas más completas y disponibles a los investigadores para predecir el comportamiento del clima futuro y sus posibles impactos.

#### 2.1.2.4. Reducción de Escala del clima

La información del clima para el estudio en regiones específicas puede ser obtenida directamente de los modelos climáticos (GCM, AOGCMs u otros modelos), sin embargo, su resolución horizontal es baja. A fin de resolver esto, se realizan los escalamientos estadístico y dinámico (para modelos climáticos regionales) (IPCC, 2013a), por lo que, se espera que la representación del clima mejore en una región determinada. Si bien la reducción de escala de los modelos globales brinda un valor añadido, es importante señalar el papel del escalamiento de los modelos regionales, ya que tienen una mejor resolución y es utilizarlo en terrenos complejos como zonas urbanas (Argüeso et al., 2014) a lo largo de la costa (Bozkurt et al., 2020), considerando que su proceso es más complejo.

En cualquiera de los dos métodos de escalamiento, la información depende del modelo climático por lo que se debe de analizar cada modelo de forma individual, para finalmente hacer una combinatoria.

##### 2.1.2.4.1. Método de escalamiento estadístico

El método de escalamiento estadístico es un proceso que permite la construcción de escenarios climáticos con temporalidades a nivel diario, mensual y anual, utilizando para ello información estadística o derivada de series de tiempo históricas.

El método puede ser aplicado con diferentes enfoques dependiendo de las variables a examinar, como la precipitación, temperatura, el comportamiento temporal y procesos físicos. Este método permite realizar el análisis de eventos extremos, huracanes, escorrentía, la erosión del suelo, el rendimiento de los cultivos (Zhang et al., 2007)(Prudhomme & Davies, 2009) y los impactos en la generación hidroeléctrica (Chilkoti et al., 2017), entre otros, luego de su aplicación.

La reducción de escala estadística puede aplicarse eficientemente en los modelos GCM en una escala temporal y espacial, como fue utilizado en varios estudios (Ahmed et al., 2013)(Ali & Khan, 2021)(Fang et al., 2014), ya que corrige el sesgo (bias) de los datos de temperatura máxima y mínima y de precipitación, resultando

que la corrección mejora el nivel de predicción de la magnitud y captura el patrón espacial de los índices climáticos (Ahmed et al., 2013).

Bias correction for precipitation	Bias correction for temperature
Linear scaling (LS)	Linear scaling (LS)
Local intensity scaling (LOCI)	Variance scaling (VARI)
Power transformation (PT)	Distribution mapping for temperature using Gaussian distribution (DM)
Distribution mapping for precipitation using gamma distribution (DM)	
Quantile mapping (QM)	

Tabla 3 Métodos de Corrección por sesgo para precipitación y temperatura (Fang et al., 2014)

En la tabla 3 se muestra los diferentes métodos de escalamiento estadístico propuesto por Fang et al. (2014) para las variables de precipitación y temperatura, lo cuales son aplicados en función de la utilización de cada uno de ellos como se describe seguidamente.

#### a. Escalamiento lineal (LS)

El escalamiento lineal se aplica sobre la precipitación y temperatura, su función es correlacionar perfectamente la media mensual de los valores corregidos con los valores observados. La precipitación se corrige por un factor y la temperatura con un término de forma mensual (Fang et al., 2014), como lo describen las siguientes ecuaciones:

$$P_{cor,m,d} = P_{raw,m,d} \times \frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{raw,m})} \quad (1)$$

$$T_{cor,m,d} = T_{raw,m,d} + \mu(T_{obs,m}) - \mu(T_{raw,m}) \quad (2)$$

Donde  $\mu$  representa el valor medio de la precipitación observada ( $P_{obs,m}$ ),  $P_{raw,m}$  es la precipitación bruta,  $P_{cor,m,d}$  es la precipitación corregida y  $P_{raw,m,d}$  es la precipitación bruta en el mes (m) y día (d). Similar para el caso de la temperatura  $\mu$  es la media de la temperatura observada y bruta ( $T_{obs,m}$ ,  $T_{raw,m}$ ), resultando la temperatura corregida  $T_{cor,m,d}$ .

#### b. Método de Quantile mapping (QM)

Este método es utilizado para corregir los sesgos en la variable de precipitación y es generalmente aplicado sobre todas las posibles distribuciones de precipitación, desarrollado a partir de un proceso empírico – estadístico basado en cuantiles (Themeßl et al., 2012). Este método corrige eficazmente los sesgos en la media, desviación estándar y frecuencia de los días húmedos, así como los cuantiles. Teniendo la capacidad de generar nuevos extremos y de solo modificar moderadamente las proyecciones en los parámetros de cambio climático.

EL Quantile Mapping se aplica diariamente y para cada celda de la cuadrícula del modelo, lo que da como resultado una serie temporal corregida ( $Y_{t,i}^{cor}$ ), mostrada en la ecuación 7, usando una función de corrección (CF) definida en la ecuación 8

$$Y_{t,i}^{cor} = X_{t,i}^{raw} + CF_{t,i} \quad (3)$$

$$CF_{t,i} = ecdf_{doy,i}^{obs,cal^{-1}}(P_{t,i}) - ecdf_{doy,i}^{mod,cal^{-1}}(P_{t,i}) \quad (4)$$

$$P_{t,i} = ecdf_{doy,i}^{mod,cal}(X_{t,i}^{raw}) \quad (5)$$

Donde CF es representado como la diferencia entre la inversa ecdf entre el observado (obs) y el modelado (mod) para un día respectivo (doy) en el periodo de calibración (cal) con una probabilidad P. P es el resultado del modelo climático en bruto  $X_{t,i}^{raw}$  con el ecdf respectivo en el periodo de calibración.

### c. Método de escalamiento por varianza (VARI)

Este método se aplica para la temperatura fue desarrollado para corregir la media y la varianza de variables distribuidas normalmente como la temperatura (Teutschbein & Seibert, 2012), la corrección del sesgo se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$T_{cor,m,d} = [T_{raw,m,d} - \mu(T_{raw,m})] \times \frac{\sigma(T_{obs,m})}{\sigma(T_{raw,m})} + \mu(T_{obs,m}) \quad (6)$$

El estudio realizado por Fang et al. (2014) evalúa los diferentes métodos de corrección por sesgo y la sensibilidad de los parámetros. Resultando que la precipitación es la variable más sensible para la simulación de caudales, seguida de la temperatura y la radiación solar, mientras que la humedad relativa no es sensible. En ese sentido es importante la selección del modelo de corrección para la precipitación y temperatura. Del estudio de Fang, los métodos PT y QM obtienen

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO:  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA

buenos resultados y valores similares, mientras que el método LOCI debe ser tomado cuidadosamente ya que subestima las precipitaciones extremas y el método LS no es adecuado para la evaluación de impactos hidrológicos cuando hay gran variación en la distribución de la precipitación. En el caso de la temperatura los diferentes métodos muestran resultados similares. Por lo que para este estudio se considera el método Quantile Mapping (QM) para corrección de la precipitación y el escalamiento lineal (LS) para la temperatura a fin de reducir la escala de simulación de los modelos GCM.

#### 2.1.2.4.2. Método de escalamiento dinámico

La resolución de los modelos de circulación regional RCM, se han ido incrementando de unos 50 km a 25 km en el grillado. Estos modelos permiten una representación espacial y temporal con más detalle y están fuertemente influenciados por procesos a pequeña escala. El método de escalamiento dinámico tiene la desventaja que computacionalmente es más caro que el método de escalamiento estadístico. Adicionalmente, los factores limitantes en las simulaciones dinámicas RCM, es la calidad de las condiciones de contorno y las parametrizaciones físicas (Mannig et al., 2013)

#### 2.1.3. Hidrología

El ciclo hidrológico se define como la presencia y movimiento del agua en la tierra y la atmosfera, permanentemente en movimiento cambiando de estado líquido, gaseoso, a hielo y viceversa. Este fenómeno es muy complejo ya que presenta muchas variables con relaciones difícilmente de ser conocidas, una representación simplificada se muestra en la Figura 6. El sistema hidrológico se conforma como un conjunto de partes que interactúan entre sí, como la precipitación, evapotranspiración, escorrentía y otras fases del ciclo hidrológico.

La radiación solar provoca el fenómeno de evapotranspiración que convierte el agua líquida en estado gaseoso, llevándola a la atmosfera para luego retornar a la tierra en forma de lluvia, nieve o granizo producto de un cambio de temperatura o presión. Parte de la precipitación se evapora inmediatamente y el resto forma la escorrentía superficial y subsuperficial. El flujo superficial es la precipitación no infiltrada, interceptada o evaporada, que fluye por la cuenca destinada a un medio acuoso, el flujo subsuperficial representa la escorrentía previamente infiltrada y no almacenada en el medio subterráneo por ende representa un flujo hacia un medio acuoso (Ordoñez Galvez, 2011).

El flujo superficial en su tránsito forma medios acuosos que puede ser representado por ríos, lagos, océanos u otro medio que transporta o acumula agua. Por otro lado, el flujo subsuperficial, en condiciones normales puede abrirse camino gradualmente hacia el exterior en forma de manantial.

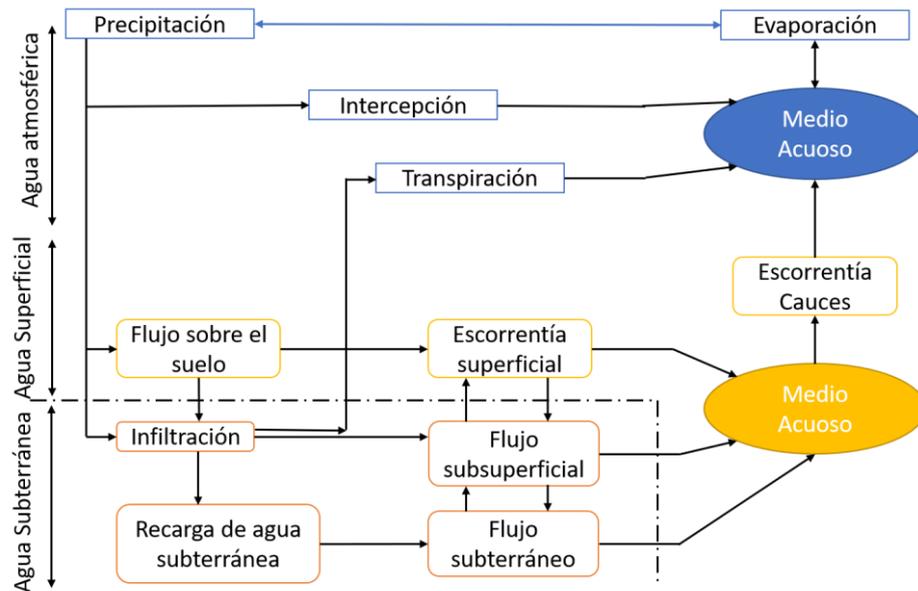


Figura 6 Ciclo Hidrología; Fuente: Contribuyendo al desarrollo de una cultura de agua y la GIRH, Foro Peruano del Agua, fuente: Estrela, (1992)

En resumen, el ciclo hidrológico implica grandes movimientos de agua de un lugar a otro, estos desplazamientos entre depósitos se denomina balance hídrico global.

El balance hídrico es la ley más importante en la hidrología, aunque su expresión es simple, como se describe en la siguiente ecuación, intervienen procesos complejos como la evapotranspiración e infiltración, que son muy difíciles de medir.

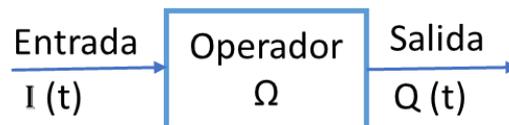


Figura 7 Representación de la operación de un sistema hidrológico, fuente: Chow (1994)

La estructura del sistema hidrológico para flujos superficiales o subsuperficiales es por donde el agua puede pasar como materia prima desde el punto de partida (entrada) hasta el punto de salida. El ingreso y salida se pueden expresar en el tiempo,  $I(t)$  y  $Q(t)$  respectivamente, donde  $t$  es el tiempo y  $\Omega$  es la función de transformación como se indica en la Figura 7.

La cuenca como sistema hidrológico es una superficie de suelo que drena las aguas a un punto dado con el objetivo de estudiar el sistema y predecir su salida. El sistema hidrológico está encerrado por la frontera que se dibuja alrededor de la cuenca, proyectando divisorias de aguas que va desde la parte alta hacia el punto de interés. La precipitación ( $P(t)$ ) representa la entrada al sistema hidrológico, distribuida en el espacio teniendo como resultado el caudal de salida ( $Q(t)$ ).

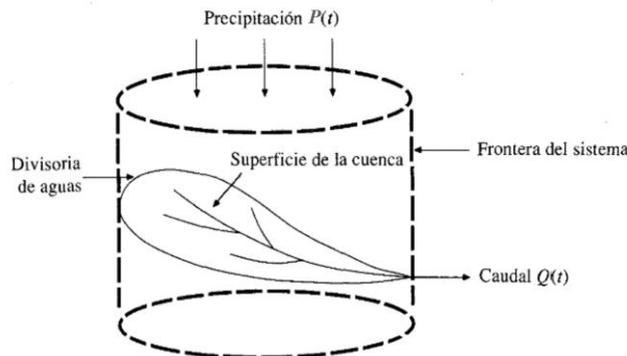


Figura 8 La cuenca como un sistema hidrológico adaptado, fuente: Chow, (1994)

La precipitación es uno de los parámetros importantes en el sistema hidrológico que varía en espacio y tiempo de acuerdo con el patrón de la circulación atmosférica, representado por lluvia que cae a la superficie de la cuenca. La información de lluvia se registra en las estaciones pluviométricas en términos de altura de agua con incrementos en tiempos sucesivos. Un mejor análisis del sistema hidrológico se da, cuando se tiene varias estaciones pluviométricas y distribuidas uniformemente en la cuenca, actualmente se cuentan con nuevas tecnologías que permiten determinar las precipitaciones de forma distribuida en el espacio, lo que mejora las predicciones de caudal en el punto de interés, sin embargo, requiere ser calibrada con las estaciones físicas.

Otros parámetros importantes para evaluar el comportamiento del sistema hidrológico son la temperatura y evapotranspiración. Este primer valor puede ser registrado en estaciones termográficas distribuidas dentro y fuera de la frontera de la cuenca y asimismo el registro de la temperatura puede ser obtenida a través de información satelital. La evapotranspiración por lo contrario a la precipitación y temperatura presenta muy pocas estaciones de registro, por lo que, es comúnmente calculado indirectamente por diferentes metodologías, siendo una de las más simplificadas el método de Oudin et al. (2005), ya que no requiere muchas variaciones climáticas, tal es el caso, que se basa en la temperatura, radiación

y la aplicación de los factores de ajuste, como se puede mostrar en la siguiente expresión:

$$EP = \frac{R_e}{\lambda \rho} * \frac{T_a + K_2}{K_1} \quad \text{si} \quad T_a + K_2 > 0 \quad EP = 0 \quad (7)$$

Donde  $EP$  es la evapotranspiración potencial expresada en (mm/día),  $R_e$  es la radiación solar ( $MJm^{-2}dia^{-1}$ ) que depende de la latitud y del día juliano,  $\lambda$  es el calor de flujo latente ( $2.45 MJkg^{-1}$ ),  $\rho$  es la densidad del agua ( $kgm^{-3}$ ),  $T_a$  es la temperatura media diaria ( $^{\circ}C$ ) y los factores  $K_1$  y  $K_2$  son valores fijos que se ajustan para la totalidad de la cuenca.

#### 2.1.4. Modelo hidrológico

Los modelos hidrológicos se presentan como una de las principales herramientas que mejor pueden representar el funcionamiento y comportamiento del sistema hidrológico, además de poder extrapolar condiciones futuras a partir de condiciones actuales (Cabrera, 2012).

Los modelos son imperfectos, sin embargo, es la herramienta aproximada que permite al estudio de una gama de condiciones y emitir la respuesta del sistema hidrológico.

De acuerdo con Chow (1994), los modelos hidrológicos pueden ser físicos o matemáticos / abstractos, siendo este último determinístico que reproduce la misma salida para una determina entrada, o estocástico que para un conjunto de entradas reproduce resultados con cierta aleatoriedad y se evalúa la incertidumbre. Asimismo, Gosain et al.(2005), clasifica a los modelos matemáticos como empíricos, conceptuales o determinísticos, siendo los modelos conceptuales los más usados, evaluando la cuenca de tres maneras: como modelos agregados, semi-distribuidos y distribuidos.

El modelo hidrológico agregado representa la cuenca como una sola unidad, con parámetros y precipitación constantes en el espacio, y está asociada a grandes sesgos de escala espacial y no facilita la incorporación de estructuras hidráulicas. Los modelos hidrológicos semi-distribuidos dividen la cuenca en subcuencas, por lo que, los parámetros y la precipitación son variables y el cálculo hidrológico son por cada unidad, este modelo facilita la incorporación de estructuras hidráulicas con fines del estudio. Finalmente, el modelo hidrológico distribuido divide la

cuenca en mallas (rectangulares, triangulares, etc.), por lo que, la variabilidad espacial de los parámetros es para cada celda, asimismo es complejo para estos modelos la incorporación de estructuras hidráulicas.

Las variables de entrada son definidas en cada modelo hidrológico y generalmente son datos como precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, y como resultado de los modelos generalmente se dan caudales, aunque algunas veces altura de nieve. Cada modelo presenta variables de estado, que caracteriza el estado del sistema modelado como el grado de saturación de los tanques de filtración, o la altura de la nieve en las zonas glaciares. Y también presentan parámetros con un valor constante, que le dan el sentido físico al modelo, el cual puede ser medida o calibrada, a fin de que, el modelo hidrológico sea lo más parecido a la realidad.

#### 2.1.4.1. Regionalización de la precipitación y temperatura.

Una de las problemáticas en modelamiento de sistema hidrológico de cuencas montañosas es el cierre del balance hídrico, ya que, es afectado por la presencia de nieve generando mayores escorrentías anuales, que a las estimaciones de la precipitación a real anual. Por lo que, la regionalización de las variables climáticas es una evaluación crítica para cuencas de gran altitud como en este caso. (Denis Ruelland, 2020)

El objetivo de regionalizar las variables climáticas es contar con información a escala más pequeña en forma grillada, mediante métodos de interpolación tomando como base las estaciones meteorológicas. Este proceso de interpolaciones es ampliamente estudiado bajo diferentes métodos deterministas y geoestadísticos diseñados para el modelamiento hidrológico, en la presente investigación se aplicaron 3 métodos, los cuales brindaron buenos resultados.

##### a. Interpolación de distancia inversa ponderada (IDW)

La metodología de distancia a la inversa, toma en cuenta las estaciones cercanas al punto de interés con mayor ponderación y tienden a ser parecidas a dichas estaciones, por lo que,  $z(u_\alpha)$  es el valor registrado en la estación meteorológica,  $\lambda_\alpha(u)$  es la diferencia inversa de la separación entre la estación conocida y el punto de interés,  $n(u)$  es el número de estaciones conocidas alrededor del punto de interés y  $\omega$  es la ponderación cuadrática (Dodson & Marks, 1997).

$$Z_{IDW}(u) = \frac{1}{\sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u)} \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) z(u_{\alpha}), \text{ siendo } \lambda_{\alpha}(u) = \frac{1}{|u - u_{\alpha}|^p} \quad (8)$$

b. Interpolación de Kriging con derivada externa (KED)

El método de interpolación de Kriging con derivada externa es una extensión del método de interpolación de Kriging, tal que, predice las variables que están mal correlacionadas en el espacio determinado con una tendencia local. La evaluación se divide en dos grupos de datos, los primarios que tienen a una regresión lineal con la información muestreada en el área de estudio, y el KED utiliza información secundaria como la elevación para considerar la media local como una característica principal  $Z$ , y posteriormente realizar el método de Kriging a los residuos correspondientes (Drogue et al., 2002).

$$Z_{KED}(u) - m_{KED}(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{KED}(u) [z(u_{\alpha}) - m_{KED}(u)], \quad (9)$$

siendo  $m_{KED}(u) = a_0(u) + a_1(u)y(u)$

Donde  $y(u)$  son los datos de elevación en cada punto de interés de la grilla, y  $a_0$  y  $a_1$  son los coeficientes de regresión estimados a partir de un conjunto de datos de interés y datos de elevación, aplicando una regresión lineal simple.

c. Interpolación de IDW con derivada externa (IED)

Este método de interpolación tiene énfasis en corregir el método de interpolación por distancia a la inversa ponderada, mediante el factor de elevación.

$$Z_{IED}(u) - m_{IED}(u) = \frac{1}{\sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u)} \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{IED}(u) [z(u_{\alpha}) - m_{IED}(u)], \quad (10)$$

siendo  $m_{IED}(u) = a_0(u) + a_1(u)y(u)$

La formulación del método IED es similar al método KED, que se basa en la determinación de los coeficientes de regresión lineal, entre el conjunto de datos de distancia y elevación.

### 2.1.4.2. Modelo Hidrológico GR4J

El modelo de escorrentía – lluvia GR4J a paso diario propuesto por Perrin et al. (2003), se muestra la estructura del modelo en la Figura 9, el cual combina los reservorios de producción, reservorio de agua en movimiento, un par de diagramas unitarios, y la interacción con el medio subterráneo, lo que permite un comportamiento global de la cuenca. La variable  $P_k$  es la precipitación promedio de la cuenca en un intervalo de tiempo  $k$  y  $EP$  es la evapotranspiración potencial media en el mismo tiempo, ambos representan la entrada al modelo. Adicionalmente, se considera un quinto parámetro en el modelo GR4J, de acuerdo con el estudio desarrollado por Ruelland et al. (2014), por lo que, este valor es equivalente al coeficiente de cultivo, de esa manera reproducir la naturaleza de la superficie de la cuenca.

Para determinar la precipitación neta  $P_n$  y la evapotranspiración neta  $EP_n$ , se presenta las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } P_k \geq EP, \text{ entonces } P_n = P_k - EP \quad \text{y} \quad EP_n = 0 \quad (11)$$

$$\text{Si } P_k < EP, \text{ entonces } P_n = 0 \quad \text{y} \quad EP_n = EP - P_k \quad (12)$$

Si  $P_n$  es diferente de cero, parte de la precipitación  $P_k$  se asigna al tanque de producción denominado  $P_s$ , calculado con la siguiente expresión:

$$P_s = \frac{X_1(1 - (\frac{S_k}{X_1})^2) * \tanh(\frac{P_n}{X_1})}{1 + \frac{S_k}{X_1} * \tanh(\frac{P_n}{X_1})} \quad (13)$$

Donde  $S_k$  es el nivel en el reservorio de producción, en el intervalo de tiempo  $k$ , y  $X_1$ , (mm) es el parámetro de capacidad de almacenamiento del reservorio de producción.

Si la evapotranspiración neta  $EP_n$  es diferente de cero, una parte del tanque de producción se evapora denominándose  $EP_s$ , el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$EP_s = \frac{s_k(2 - (\frac{S_k}{X_1})) * \tanh(\frac{EP_n}{X_1})}{1 + (1 - \frac{S_k}{X_1}) * \tanh(\frac{EP_n}{X_1})} \quad (14)$$

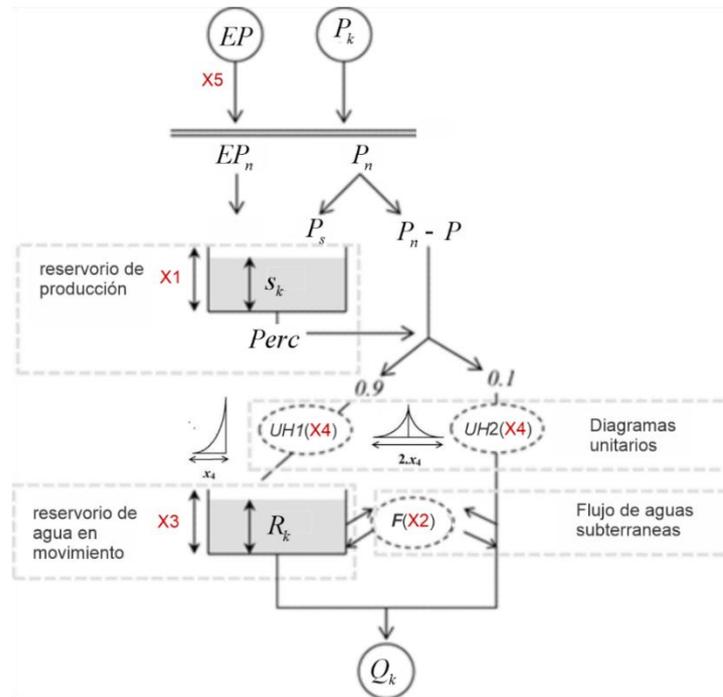


Figura 9 Diagrama del modelo GR4J de cuatro parámetros, fuente Perrin et al., (2007).

El resultado del volumen de almacenamiento  $S'$  en el tanque de producción, queda expresado de la siguiente forma:

$$S' = s_k + P_s - EP_s \quad (15)$$

En el tanque de producción se produce una percolación  $Perc$ , calculada con la siguiente expresión:

$$Perc = S' * \{1 - [1 + (\frac{4}{9} * \frac{S'}{X_1})^4]^{\frac{1}{4}}\} \quad (16)$$

Como resultado de los procesos anteriores, la cantidad de precipitación  $P_r$  que llega al segundo tanque está dada por la siguiente expresión:

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad (17)$$

La precipitación  $P_r$  se divide en dos componentes, el primero absorbe el 90% del flujo en un hidrograma unitario  $HU1$  y se almacena en el reservorio de agua gravitacional, el otro 10% en el diagrama unitario  $HU2$  el cual es sintético. Ambos diagramas unitarios dependen del parámetro  $X4$  (días) que representa el tiempo en cada diagrama unitario expresado en intervalos.

Para determinar un punto en la ordenada del hidrograma, se define a través de la curva S, denominado para ambos hidrogramas  $SH1$  y  $SH2$ , cada una de ellas en función del tiempo como se muestra en las siguientes expresiones:

$$\text{Para } t \leq 0, \quad SH1(t) = 0 \quad (18)$$

$$\text{Para } 0 < t \leq X_4, \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{2.5} \quad (19)$$

En el hidrograma  $SH2$  se define de la siguiente manera

$$\text{Para } t \leq 0, \quad SH2(t) = 0 \quad (20)$$

$$\text{Para } 0 < t \leq X_4, \quad SH2(t) = \frac{1}{2} * \left(\frac{t}{X_4}\right)^{2.5} \quad (21)$$

$$\text{Para } 0 < t \leq 2X_4, \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} * \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{2.5} \quad (22)$$

$$\text{Para } t \geq X_4, \quad SH2(t) = 1 \quad (23)$$

El valor de la ordena de cada histograma se calcula de la siguiente forma:

$$UH1 = SH1(j) - SH1(j-1) \quad (24)$$

$$UH2 = SH2(j) - SH2(j-1) \quad (25)$$

Los caudales de salida de cada histograma unitario se definen por las variables  $Q_0(t)$  y  $Q_1(t)$  en el intervalo de tiempo  $k$ , que corresponde a la convolución de precipitación:

$$Q_0(t) = 0.9 * \sum_{j=1}^l UH1(j) * P_r(t-j+1) \quad (26)$$

$$Q_1(t) = 0.1 * \sum_{j=1}^m UH2(j) * P_r(t-j+1) \quad (27)$$

Donde  $l = \text{int}(X_4) + 1$  y  $m = \text{int}(2.X_4) + 1$ ,  $\text{int}$  es el valor entero.

La función de intercambio (F) con las aguas subterráneas se expresa, mediante la siguiente expresión:

$$F = X_2 * \left(\frac{R_t}{X_3}\right)^{3.5} \quad (28)$$

Donde  $R_t$  es el nivel inicial en reservorio,  $X_3$  es la capacidad del tanque y  $X_2$  el coeficiente de intercambio de agua, el cual puede ser positivo en caso de aporte o negativo por pérdida de agua hacia el medio subterráneo.

El nivel en el reservorio de transferencia con el incremento del  $Q_9(t)$ , se define como  $R'$ .  $R' = \max.(0; R_t + Q_9(t) + F)$ , teniendo que el caudal de salida del reservorio se expresa de la siguiente forma:

$$Q_r = R' * \{1 - [1 + (\frac{R'}{X_3})^4]^{0.25}\} \quad (29)$$

Quedando que el nivel de reservorio  $R_{t+1} = R' - Q_r$ .

El caudal de salida  $Q_d$  producto de la transferencia de flujo, y salida  $Q_1(t)$  del histograma  $UH_2$ , queda expresado:

$$Q_d = \max.(0; Q_1(t) + F) \quad (30)$$

El caudal final del modelo hidrológico  $Q_t$ , se expresa en la siguiente expresión:

$$Q_t = Q_r + Q_d \quad (31)$$

El rango de valores que Perrin et al. (2007) recomienda para cada parámetro se encuentre en los siguientes rangos:

parámetros	Rango	Descripción	Rango Regular
X1	mm	Capacidad del reservorio de producción	0.1 a 1.2
X2	mm	Coeficiente de intercambio subterráneo	-0.005 a 0.003
X3	mm	Capacidad del reservorio de transferencia	0.02 a 0.3
X4	días	Tiempo base del hidrograma unitario HU1	1.1 a 2.9

Tabla 4 Parámetros del modelo GR4J (Perrin et al., 2007) en el rango regular

El estudio desarrollado por Ruelland et al. (2014) para cuencas semiáridas cuya cobertura de vegetación se encuentra en el fondo de los valles, muestra que el coeficiente  $X_5$  presenta valores bajos entre 5 a 11.9%.

### 2.1.4.3. Calentamiento, Calibración y Validación del modelo

Uno de los pasos importantes en la modelación del sistema hidrológico es la calibración y validación de los parámetros del modelo considerando, tomando como base la información histórica. Mediante el proceso calibración se determina los parámetros óptimos del modelo hidrológico, a fin de que este pueda reproducir caudales simulados con alto grado de precisión y exactitud en referencia a los caudales observados.

La calibración inicia con el proceso de calentamiento, ajustando los parámetros iniciales del modelo para un periodo de evaluación de un año como mínimo. Este proceso se puede realizar de forma manual o empleando algoritmos automatizados. El resultado de este proceso puede dar un conjunto de parámetros que satisfacen las ecuaciones planteadas. Sin embargo, solo algunos parámetros le dan el sentido físico lógico, por lo que mediante la evaluación visual se analiza la tendencia de los picos y valles, y de esa forma se selecciona los parámetros adecuados para el modelo hidrológico.

El proceso de validación consiste en demostrar el grado de precisión y exactitud del modelo hidrológico para un intervalo de tiempo posterior al periodo de calibración de esa forma, se da por aceptado los parámetros escogidos (Knudsen et al., 1986).

#### 2.1.4.3.1. Criterios de ajuste y evaluación de desempeño

Los criterios numéricos de ajuste y evaluación de desempeño de modelos hidrológicos, más utilizados se describen a continuación:

##### a. Coeficiente de calibración (r)

El coeficiente expresa la relación entre dos variables, caudal observado  $Q_{obs}$  y caudal simulado  $Q_{sim}$ , como se muestra en la siguiente expresión:

$$r = \frac{S_{obs,sim}}{\sqrt{S_{obs} * S_{sim}}}, \quad S_{obs,sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim}) \quad (32)$$

$$S_{obs} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \quad \text{y} \quad S_{sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 \quad (33)$$

donde  $S_{obs, sim}$  es la covarianza de sesgo  $S_{obs}$  y  $S_{sim}$  son la varianza del caudal observado y simulado. El coeficiente  $r$  puede variar en  $0 < r < 1$ , siendo 1 el mejor ajuste (Cabrera, 2009).

b. El criterio Kling-Gupta Efficiency (KGE)

El criterio de KGE propuesto por Gupta et al. (2009) está en función de tres parámetros (variabilidad, sesgo y correlación), como se muestra:

1.  $\alpha = \frac{\sigma_{obs}}{\sigma_{sim}}$ : como la relación entre la desviación estándar de los caudales observados y caudales simulados, como valor optimo es 1.
2.  $\beta = \frac{\mu_{obs}}{\mu_{sim}}$ : como la relación entre la media de los caudales observados y caudales simulados, como valor optimo es 1.
3.  $\rho$ : es el coeficiente de correlación de Pearson, como valor optimo es 1.

Los tres parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\rho$  son unificados en el criterio KGE en cual se muestra, en la siguiente expresión:

$$KGE = 1 - \sqrt{(1-\alpha)^2 + (1-\beta)^2 + (1-\rho)^2} \tag{34}$$

El valor optimo el KGE igual a 1, los umbrales óptimos de los parámetros de KGE se establecen en la Tabla 5.

Requisito de eficiencia del modelo	$\alpha$	$\beta$	$\rho$
Muy alto	0,95 << 1,05	0,95 << 1,05	> 0,9
Elevado	0,90 << 1,10	0,90 << 1,10	> 0,8
Moderar	0,85 << 1,15	0,85 << 1,15	> 0,7
Bajo	0,80 << 1,20	0,80 << 1,20	> 0,6

Tabla 5 Umbrales establecidos para los criterios de eficiencia. fuente: (Andréassian et al., 2014)

c. Criterio de Nash-Sutcliffe (NSE)

Actualmente el criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los criterios más usados en el modelamiento hidrológico, por que ayuda a evaluar el modelo en términos de sesgo, aleatoriedad y otros componentes (Nash & Sutcliffe, 1970), expresado por la siguiente relación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{sim}^t - Q_{obs}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (35)$$

Donde  $Q_{sim}$  es el caudal simulado,  $Q_{obs}$  el caudal observado y  $\bar{Q}_{obs}$  la media del caudal observado en el tiempo  $t$ . El valor más alto del criterio  $NSE$  es 1. Por lo que, Molnar, (2011) propuso algunos valores sugeridos como criterio de decisión.

NSE	Descripción
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy Bueno
>0.8	Excelente

Tabla 6 Valores referenciales para el criterio de Nash-Sutcliffe, fuente: (Molnar, 2011)

#### 2.1.4.4. Modelos hidrológicos en el software R estudio

R estudio es un software gratuito de código abierto que facilita la colaboración e investigación para la ciencia de datos, y actualmente esta herramienta es ampliamente aplica en la modelización de sistemas hidrológicos, tales como los modelos agrupados GR, Hydromad, Topmodel (Buytaert, 2011), entre otros.

Estos modelos hidrológicos son cargados en paquetes, como el airGR (Coron et al., 2017) el cual incorpora varios modelos de la familia de modelos GR, desarrollado en Irstea (Francia).

Los modelos hidrológicos GR son ampliamente utilizados para la evaluación de recursos hídricos, estimación y prevención de máximas avenidas y caudales bajos, uso de suelo y la evaluación de cambio climático (Coron et al., 2017). Adicionalmente, incluye el módulo de evapotranspiración basado en la fórmula de Oudin y un esquema de optimización.

En la siguiente web <https://webgr.inrae.fr/> se pueden encontrar ejemplos de aplicación de los modelos GR.

El entorno informático estadístico (*R*) es ampliamente usado en la comunidad hidrológica y disponible gratuitamente. Además, proporciona la posibilidad de realizar el procesamiento en series temporales, por lo que, facilita la incorporación del paquete *airGR* en el sistema.

El paquete *airGR* cumple dos funciones principales: facilitar el uso de modelos hidrológicos y la incorporación de modelos externos, algoritmos de calibración y criterios de eficiencia. El uso del paquete se basa en tres familias de funciones: *RunModel ()*, *ErrorCrit ()* y *Calibration ()*.

La función *RunModel ()*, se utiliza para llamar al modelo y realizar la simulación con determinados parámetros.

La función *ErrorCrit ()*, se utiliza para determinar un determinado criterio de eficiencia. Los criterios incluyen error medio cuadrado (RMSE), eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y la eficiencia de Kling-Gupta (KGE).

La función calibración se utiliza para calibrar el modelo con algoritmos y función objetivo seleccionado.

En el siguiente enlace web se proporciona el uso del paquete: <https://hydrogr.github.io/airGR/>.

#### 2.1.5. Impacto del cambio climático en la generación hidroeléctrica

El cambio climático puede afectar la generación de energía hidroeléctrica dado los cambios en la magnitud de las precipitaciones, temperatura, y, por ende, cambios en la escorrentía.

Estudios del impacto climático en las centrales hidroeléctricas en Perú para finales del siglo XXI han determinado un incremento en la capacidad instalada de 6.7% (RCP 4.5) y 9.3% (RCP 8.5), ello debido a una disminución considerable del área glaciar para finales del siglo (Caceres et al., 2021). Otros estudios específicos que evalúan el impacto en los recursos hídricos como el desarrollado por Rosas et al. (2018) en la cuenca de Cañete en la cordillera peruana de los andes, muestra una disminución generalizada en los aportes hídricos para finales del siglo XXI (un 1.6% de un aumento en el caso optimo hasta un 24% de disminución en el caso más pesimista), el estudio menciona que las proyecciones climáticas futuras sugieren una gran incertidumbre en las previsiones, el cual se plasma en los resultados de los impactos en los recursos hídricos. En la cuenca Chancay – Huaral estudiado por Olsson et al. (2017) indica un aumento de la temperatura

media anual en 3.1°C (RCP 4.5) y 4.3 °C (RCP 8.5) y la suma de las precipitaciones un aumento en un 20% (RCP 4.5) y un 28% (RCP 8.5) resultando un aumento en la escorrentía en la temporada humedad y una disminución en la temporada seca , sin embargo, la variabilidad de los GCM aún es considerado por lo que demuestra la necesidad de una adecuada gestión hídrica.

La evaluación del impacto climático en la generación de energía hidroeléctrica está en función del modelo de generación de energía, basado en el caudal turbinado, altura efectiva, densidad del agua, gravedad, eficiencia de la turbina y generador. Cada central hidroeléctrica tiene su particularidad por lo que se debe establecer reglas de operación dadas las condiciones hidrológicas, capacidad y restricciones de la turbina y generador. Asimismo, el modelo se basa en maximizar la generación de energía.

Como resultado de la proyección de la escorrentía de los diferentes modelos para los escenarios seleccionados (RCP 4.5 y 8.5), se estima la proyección de la generación de energía hidroeléctrica en función del modelo de generación.

#### 2.1.6. Generación de energía Hidroeléctrica

La energía hidráulica es aquella que se obtiene por medio de la generación de energía cinética y potencial de corrientes de agua, saltos o mareas. En el caso de una central hidroeléctrica la energía potencial se generada, debido a la diferencia de niveles entre la cámara de carga o embalse y los grupos de generación, y la masa de agua que es desviada de un cauce natural. Esta energía es transformada en energía mecánica por la rotación del rodete en la turbina y es transmitida por el eje del generador, para ser transformada en energía eléctrica y que luego pasa a la subestación eléctrica.

La potencia de una central hidroeléctrica varía en función de la capacidad instalada y puede ir de pocos mega watts (MW) hasta miles de MW como es el caso de Paraguay, Brasil o China.

En el Perú y en otros países como Chile, el sistema eléctrico nacional es administrado por un ente regulador entre la oferta y demanda. Maximizando la generación de energía de las diferentes fuentes de energía como eólica, solar, térmica, hidroeléctrica, entre otras. Por lo que, cada una de las fuentes de generación de energía obedece a las operaciones que se realiza en el sistema eléctrico nacional, mas no operan de forma particular.

### 2.1.7. Operación de un sistema eléctrico

El Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES-SINAC), es el ente coordinador de las operaciones a corto, mediano y largo plazo del Sistema Interconectado Nacional (SEIN) al mínimo costo y maximizando la generación de las diferentes fuentes de generación eléctrica.

El SEIN es el conjunto de líneas de transmisión, subestaciones eléctricas conectadas entre sí, con cada una de fuentes de generación de energía (hidroeléctricas, térmicas, eólicas, solares, etc.), el cual permite la transferencia de energía eléctrica

El modelo de generación, transmisión y distribución que maneja el COES a través del SEIN, tiene una alta complejidad dado las múltiples generadoras que intervienen en el sistema. Por lo que, en la presente investigación, con fines académicos se realizara la simulación de generación de una central hidroeléctrica tomando como base los procedimientos técnicos del COES (PR 13 y 14), haciendo ciertas asunciones. El modelo simplificado de generación hidroeléctrica considera la eficiencia de las unidades de generación, el factor de productividad y restricciones en las unidades de generación.

#### 2.1.7.1. Procedimientos Técnicos PR 13 y PR14

El 2014 el COES propone modificar el procedimiento técnico PR 13 “Determinación de la energía firme de las unidades generadoras de las empresas integrantes del COES”, y el PR 14 “Verificación de la energía firme de un generador vs sus compromisos de venta”, ya que ambos procedimientos no contemplaban ciertas disposiciones que regulen situaciones especiales y pueden llevar a más de una interpretación. Por lo que, se aprueba el nuevo procedimiento PR 13 que contempla ambos procedimientos anteriores cuyo objetivo es determinar la energía firme de los generadores y verificar cada año. En el caso de las centrales hidroeléctricas la operación tiene como objetivo maximizar su generación anual, considerando los caudales naturales, volumen de los reservorios, reservorios de regulación estacional, restricciones de riego, agua potable, caudal ecológico, restricciones medioambientales, capacidad de la infraestructura de la Central Hidroeléctrica y pérdidas por filtración y evapotranspiración (COES-SINAC, 2015).

### 2.1.7.2. Modelado de la función de Producción

El modelado de la función de producción se rige al comportamiento físico de las unidades de generación de la central hidroeléctrica, las cuales se conforma por las turbinas, quienes son las encargadas de transformar la energía potencial en energía mecánica y los generadores transformar esta energía en energía eléctrica, por lo que la unidad de generación se compone de la turbina y generador.

La producción eléctrica en forma simplificada se representa como la transformación de la energía potencial almacenada en reservorios a una cota superior y descarga en las unidades de generación a una cota inferior como se muestra en la ecuación 45.

$$P_i = Ep_i * \eta t_i * \eta g_i \quad (36)$$

Donde  $P_i$  es la energía producida en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  expresado en (MW),  $Ep_i$  es la energía potencial del cuerpo de agua que se encuentra almacenada en los reservorios, y que es capaz de accionar las unidades de generación,  $\eta t_i$  es la eficiencia de la turbina del generador  $i$  y  $\eta g_i$  la eficiencia del generador.

La energía potencial gravitatoria  $Ep_i$  se expresa como el producto del caudal turbinado  $Q_i$  expresado en  $m^3/s$ , aceleración de gravedad  $g$  expresado en  $m/s^2$  y la altura neta  $hn_i$ , que en forma práctica se define como la diferencia de cotas entre el reservorio y la unidad de generación (Finardi, 2003).

$$Ep_i = g * \rho * Q_i * hn_i \quad (37)$$

Por lo que, la función de producción de cada unidad de generación queda expresada como el producto de las eficiencias, gravedad, densidad del agua, caudal y altura neta.

$$P_i = \eta t_i * \eta g_i * g * \rho * Q_i * hn_i \quad (38)$$

#### a. Altura neta

La altura neta es la diferencia de energías de masa entre la entrada y salida de la turbina, expresado por las presiones estáticas y las energías cinéticas entre la entrada y salida. De acuerdo al procedimiento técnico PR N°18 del COES (COES,

2017) y en el código CEI 60041, transformando la energía hidráulica en función del caudal y área se tiene lo siguiente:

$$hn = (Ze - Zs) + (Pe - Ps) + \frac{(ve^2 - vs^2)}{2g} \quad (39)$$

$$hn = (Ze - Zs) + (Pe - Ps) + \frac{Q^2}{2g} * \left( \frac{1}{At^2} - \frac{1}{Ad^2} \right) \quad (40)$$

Donde  $Ze$  y  $Zs$  es la altura en la entrada y salida,  $Pe$  y  $Ps$  las presiones promedio de entrada y salida,  $At$  y  $Ad$  área de las secciones en la entra y salida. Por consideración las presiones de salida es 0.

b. Eficiencia de las unidades de generación – turbina y generador

Eficiencia de la turbina

En la transmisión de la energía mecánica hacia el generador producto de la rotación del eje de la turbina se genera pérdidas manométricas debido al rozamiento, el choque y cambio de dirección del agua al ingresar a los alabes de la turbina (Pérez Díaz, 2008). La eficiencia o rendimiento de la turbina  $\eta_t$  se define como la relación entre la potencia de salida  $Ps$  y potencia de entrada  $Pe$  :

$$\eta_t = \frac{Ps}{Pe} = \frac{Pe - \text{Perdidas}}{Pe} * 100\% \quad (41)$$

La eficiencia para grandes turbinas está en el rango de 88 a 96%.

Asimismo, la eficiencia de la turbina de acuerdo con el fabricante se define por el diagrama de colinares en función del caudal turbinado y la altura neta como se muestra en la Figura 10. El diagrama se representa por la siguiente ecuación matemática:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 hn + \beta_2 Q + \beta_3 hn^2 + \beta_4 Q^2 + \beta_5 hnQ \quad (42)$$

Por efecto prácticos de la investigación se tomará en cuenta la eficiencia que el operador recomienda.

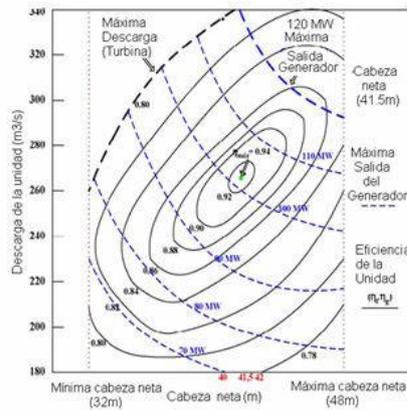


Figura 10 Eficiencia de la turbina Francis en función del caudal turbinado y altura neta (Javier Diaz, 2008)

### Eficiencia del generador

La transformación de la energía mecánica a energía eléctrica desarrollada en el generador no ocurre de forma directa, ya que, en el proceso se generan pérdidas por el bobinado debido a las fricciones en el sistema de excitación, pérdidas en los cojinetes y sistema de ventilación. Los generadores modernos tienen un alto rendimiento entre 90% a 98%.

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se describen los principales conceptos que se utilizan en la investigación siendo estos: Proyecciones climáticas, variables independientes como la precipitación, temperatura y evapotranspiración y variables dependientes como la escorrentía superficial, potencia de generación hidroeléctrica y tasa de cambio.

### 2.2.1. Proyecciones climáticas

Las proyecciones climáticas es el intento de obtener la evolución del clima en el futuro, para diferentes escenarios de emisiones o de concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles, que generalmente se obtiene de modelos climáticos, lo cuales se basan en supuestos relativos que pueden o no materializarse (IPCC, 2014a).

Estos escenarios se representan por las trayectorias de concentración representativa (RCP). Los RCP se muestran en cuatro escenarios (RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5) que se conducen por las características del forzamiento radiativo en función los cambios del futuro de la población, así como, los factores económicos, político y tecnológicos. Las trayectorias de concentración representativa fueron

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO:  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA

utilizadas en la elaboración de las proyecciones climáticas de cada Modelo de Circulación General (GCM) en el CMIP5.

a. Escenario RCP 4.5 y RCP 8.5

En la presente investigación se aplicaron los escenarios RCP 4.5 y 8.5, ya que han sido aplicado en muchos estudios de cambio climático (Caceres et al., 2021), (Rosas et al. 2018), (Olsson et al. 2017), entre otros. El primer escenario representa un forzamiento radiativo de estabilización intermedia con una aproximación a  $4.5 \text{ W/m}^2$  y se asemeja a las actuales políticas de cambio climático. El segundo escenario representa las condiciones climáticas más desfavorables en línea a no aplicar políticas de cambio climático, lo que probablemente en la mayor parte de las regiones terrestres se produzcan incrementos de temperatura al menos con el doble de frecuencia (actualmente ocurren cada 20 años).

#### 2.2.2. Precipitación Media

Este fenómeno meteorológico es entrada para el análisis del sistema hidrológico y aplicado en dos formas como precipitación diaria y precipitación media mensual. Este primer valor es utilizado directamente en el modelamiento hidrológico, de acuerdo con el procedimiento del método aplicado. El segundo valor como precipitación media mensual se utiliza en el análisis climatológico en función de los modelos de circulación general (GCM).

#### 2.2.3. Temperatura Media

La temperatura atmosférica es uno de los elementos meteorológicos más importantes en el análisis del sistema hidrológico y análisis climático. Los conceptos aplicados en el estudio son la temperatura media diaria y la temperatura media mensual, cada una utilizada en el análisis hidrológico y análisis climático respectivamente.

La aplicación a una temporalidad mensual se utiliza para la selección de los mejores modelos de circulación general (GCM) y a nivel diaria como parámetro de entrada en el modelo hidrológico.

#### 2.2.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración es otra de las variables de entrada para el análisis del sistema hidrológico. A diferencia de la temperatura o precipitación se cuenta con

escasos registros históricos, por lo que, esta variable es inferida mediante diferentes relaciones empíricas. Para el presente trabajo, considerando que la zona de estudio se encuentra en una cuenca de la vertiente del pacifico del Perú, se empleara la expresión de Oudin et al. (2005), ya que, las condiciones son áridas y semiáridas al igual que el estudio desarrollado por Ruelland et al. (2014).

También vale la pena mencionar que esta expresión fue empleada por Rau et al. (2018), para el análisis de la evapotranspiración relacionada con la temperatura y su gradiente altitudinal en 26 cuencas de la vertiente del pacifico del Perú.

#### 2.2.5. Escorrentía

La determinación del caudal de salida del sistema hidrológico se puede modelizar mediante métodos empíricos, conceptuales o determinísticos. En la presente investigación se aplica un modelo conceptual, considerando la modeliza de la cuenca de forma distribuida en el espacio.

Adicionalmente, un modelo hidrológico apropiado para el análisis de la cuenca es el modelo hidrológico GR4J, por la mínima cantidad de parámetros que requiere, y son las que se cuenta para el estudio. Este modelo es ampliamente usado en la evaluación de cambio climático (Bodian et al., 2018), adicionalmente el modelo se encuentra incorporado en el software R estudio mediante el paquete AirGR versión 1.5.0.12 R package (Coron et al., 2017), como se desarrolló en el estudio Golian & Murphy (2020) y Givati et al. (2019) para cambio climático. Las variables de entrada para el modelo hidrológico son la precipitación y evapotranspiración. El modelo hidrológico GR4J es calibrado y validado en contraste con el registro histórico de caudales.

##### 2.2.5.1. Factor $x_5$ representado por el $k_c$

En la presente investigación se incorpora un quinto parámetro al modelo hidrológico GR4J, como fue aplicado por Ruelland et al. (2014), que controla la evapotranspiración potencial, por medido del coeficiente de cultivo  $k_c$ , con el fin de representar cuencas semiáridas. Por lo tanto, el modelo hidrológico completo se tiene que calibrar con cinco parámetros.

De lo estudios desarrollados por Ruelland et al. (2014) el valor de  $x_5$  se encuentra en el rango de 5.0 a 11.9 %.

### 2.3. Operación de la central hidroeléctrica

La central hidroeléctrica en estudio pertenece al sistema eléctrico interconectado Nacional (SEIN), el cual es administrado por el COES – SINAC, cuyas ordenes son mandatorias sobre las diferentes fuentes de generación de energía, subestaciones eléctricas, líneas de transmisión y distribuidoras, con el objetivo de mantener el balance de energía entre la oferta y demanda. En la presente investigación se analiza los impactos del cambio climático en la generación de energía de una central hidroeléctrica, por lo que las consideraciones en su funcionamiento responden a las necesidades de maximizar la generación de energía al mínimo costo, basada en los procedimientos técnicas PR 13 y 14.

La generación de energía hidroeléctrica, adicionalmente al cumplimiento de los procedimientos técnicos mencionados, tiene limitaciones y restricciones operativas como el caudal disponible, los caudales turbinados máximos y mínimos y restricciones de la turbina y generador. Todas estas medidas son tomadas en cuenta para la elaboración de una función de generación de energía, la cual pueda replicar de forma aproximada el comportamiento histórico.

#### 2.3.1. Caudal turbinado

El caudal turbinado es la unidad de volumen de agua registrado en un periodo de tiempo que genera una potencia registrada. Esta unidad, además de depender de la disponibilidad hídrica, ya que varía desde un valor mínimo y máximo, también esta delimito por una franja de operación. Estas restricciones de operación tratan de controlar los efectos de cavitación y vibración de los equipos.

Generalmente estas restricciones se traducen en una curva de capacidad o capacidad, que no es otra cosa un diagrama de Potencia – Caudal y es suministrado por el fabricante o determinada por la experiencia operativa. En la presente investigación se utilizan restricciones planteadas que acotan el caudal turbinado.

#### 2.3.2. Restricciones a las unidades generación hidroeléctrica

Las restricciones en la generación de energía hidroeléctrica son particulares a cada planta, dado los límites que estable el operador. Estos límites están relacionados con el caudal turbinado máximo y mínimo, límites de generación hidroeléctrica y límites de caudal por alta concentración de sólidos, los cuales se

definen en las siguientes ecuaciones binarias (i, t), siendo i cada grupo de generación y t el periodo.

$$Q_{\min(i)} \leq Q_{(i,t)} \leq Q_{\max(i)} \quad (43)$$

$$P_{\min(i)} \leq P_{(i,t)} \leq P_{\max(i)} \quad (44)$$

$$Q_{(i,t)} \leq Q_{CS.\max(i)} \quad (45)$$

Estas restricciones permiten delimitar el modelo de generación considerando la disponibilidad hídrica. Donde  $Q_{\min(i)}$  y  $Q_{\max(i)}$  es el caudal mínimo y máximo para ser turbinado,  $P_{\min(i)}$  y  $P_{\max(i)}$  es la potencia mínima y máxima en cada grupo de generación y  $Q_{CS.\max(i)}$  es el caudal en el río Pativilca máximo a ser turbinado por incremento de concentración de sólidos.

### 2.3.3. Potencia generada

La potencia generada por cada unidad de generación hidroeléctrica está representada por una función de producción, el cual se menciona líneas arriba (ecuación 47). La potencia depende del rendimiento de la turbina y el generador, así como de la altura neta y el caudal turbinado, esta última variable representa la diferencia de agua almacenada entre el inicio y fin para un periodo determinado.

### 2.3.4. Tasa de cambio en la Producción hidroeléctrica

La tasa de cambio en la producción hidroeléctrica se representa mediante la siguiente expresión:

$$T_{cp} = \left( \frac{P_{obs(i)} - P_{fut(i)}}{P_{obs(i)}} \right) * 100 \quad (46)$$

Donde  $T_{cp}$  es la tasa de cambio en (%),  $P_{fut(i)}$  la potencia media en el futuro para el mes (i) y  $P_{obs(i)}$  la potencia media observada en el mes (i).

### CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente CAPÍTULO se describe la zona de estudio y sus principales parámetros hidrológicos y geomorfológicos. Así como el objeto de estudio, siendo el punto de interés del área delimitada geográficamente. Posteriormente se detalla la metodología adoptada en el análisis climático, modelamiento hidrológico y modelamiento de las operaciones de la central hidroeléctrica.

#### 3.1. Zona de estudio

La zona de estudio tiene un área de 2906 km<sup>2</sup>, delimitando toda la cuenca a partir del punto de interés que es la Central Hidroeléctrica Cahua. Geográficamente está comprendida entre los 9°49'36.62" y 10° 41' 52.584" latitud sur y los meridianos 76°50'47.975" y 77°16'52.86 de longitud Oeste. Altitudinalmente, se extiende desde los 812 m.s.n.m hasta más de los 4950 m.s.n.m en la Cordillera Occidental de los Andes. La cuenca del río Pativilca se encuentra en las provincias de Cajatambo y Barranca, y parte de la cuenca involucra el departamento de Ancash comprendiendo las provincias de Recuay y Bolognesi, como se puede apreciar en la Figura 11.

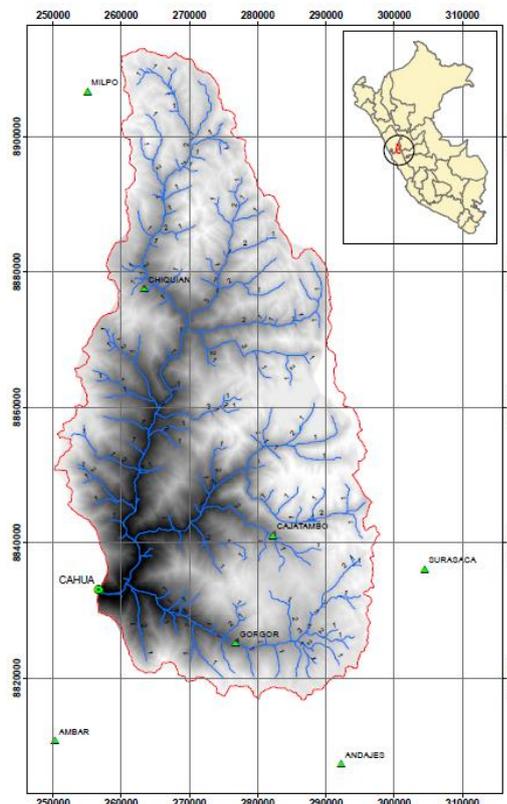


Figura 11 Zona de estudio, fuente: propia

La cuenca tiene características de fuerte pendiente con afloramiento rocoso en la mayor cantidad de área cuya pendiente oscila entre 1:0.7 a 1:1.4.

### 3.2. Objeto de estudio

La central hidroeléctrica Cahua trabaja con dos grupos de generación, con turbinas tipo Francis de eje vertical, una altura bruta de 218.2 m, una potencia nominal de 20.89 MW y una potencia máxima de 22.87 MW, con eficiencias de 84% y 90.1% según carga y un caudal de diseño de 11m<sup>3</sup>/s para cada grupo de generación (Carranza, 2008).

La generación aprovecha los aportes del río Pativilca y Rapay, cuyas aguas son captadas en la Bocatoma Cahua y desviadas mediante un túnel de conducción hacia la casa de máquinas donde cuenta con la infraestructura para el proceso de generación, transformación y transmisión.

La bocatoma tiene una capacidad de captación de 24 m<sup>3</sup>/s y fue diseñada para soportar una avenida máxima extraordinaria de 1200 m<sup>3</sup>/s. Dado la alta concentración de sólidos del río, la infraestructura cuenta con 8 naves desarenadoras con capacidad de decantar partículas de hasta 2.5 mm y un caudal de purga de 22 m<sup>3</sup>/s, como se muestra en la figura 12.



Figura 12 Bocatoma de la Central Hidroeléctrica Cahua, fuente: propia

### 3.3. Información Meteorológica

Se obtuvo la información meteorológica de 16 estaciones y una estación hidrométrica aguas abajo de la central hidroeléctrica. Los registros de esta

*IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO:  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA*

información se encuentran en la base del SENAMHI y la ANA, que colecta la información a nivel diario.

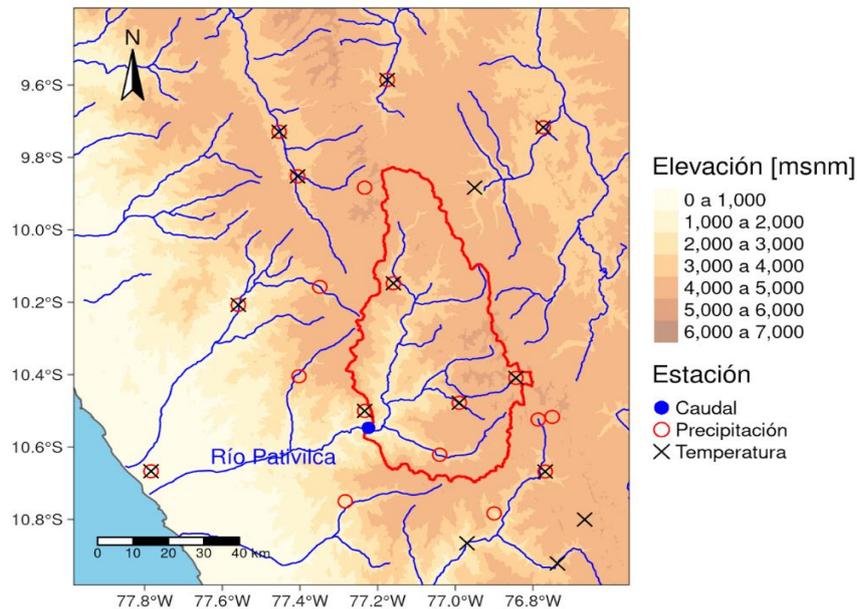


Figura 13 Ubicación de estaciones de precipitación (P), temperatura (T) y caudal (Q).

La distribución de las estaciones se visualiza en la Figura 13, en el estudio considera estaciones fuera de la cuenca a fin de una mejor estimación de las variables climáticas en las zonas altas y límites de la cuenca, debido a que dentro de la cuenca se dispone de pocas estaciones, en la siguiente tabla se muestra la lista de estaciones e información básica.

N°	Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Elevación [msnm]	Tipo de Estación	Datos	Registro (años)
1	CAHUA	-77.22	-10.55	812	Hidrométricas	Caudal	20
2	ACO	-77.23	-10.5	2490	Meteorológicas	Precipitación Temperatura	7
3	AMBAR	-77.28	-10.75	2100	Meteorológicas	Precipitación	30
4	ANDAJES	-76.9	-10.78	3950	Meteorológicas	Precipitación	48
5	CAJATAMBO	-76.99	-10.48	3432	Meteorológicas	Precipitación Temperatura	48
6	CHAMANA	-77.56	-10.21	1260	Meteorológicas	Precipitación Temperatura	38
7	CHAVIN	-77.18	-9.59	3140	Meteorológicas	Precipitación Temperatura	33
8	CHIQUIAN	-77.16	-10.15	3386	Meteorológicas	Precipitación Temperatura	52
9	DOS DE MAYO	-76.77	-9.72	3442	Meteorológicas	Precipitación Temperatura	17
10	GORGOR	-77.04	-10.62	3025	Meteorológicas	Precipitación	39
11	OCROS	-77.4	-10.4	3249	Meteorológicas	Precipitación	54

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO:  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA

12	OYON	-76.77	-10.67	3667	Meteorológicas	Precipitación Temperatura	52
13	PACHACOTO	-77.41	-9.85	3723	Meteorológicas	Precipitación Temperatura	4
14	RECUAY	-77.45	-9.73	3431	Meteorológicas	Precipitación Temperatura	50
15	LAGUNA SURASACA	-76.79	-10.52	4385	Meteorológicas	Precipitación	25
16	COCHAQUILLO	-76.040	-10.55	3200	Meteorológica	Temperatura	12

Tabla 7 Información de estaciones empleadas (Meteorológica), fuente: Senamhi y ANA

Para la caracterización climática, el periodo de evaluación fue 1981-2020 en las estaciones de precipitación y temperatura. La información de la estación hidrométrica es a partir del año 2000.

### 3.3.1. Precipitación

En la cuenca delimitada únicamente se cuenta con 4 estaciones meteorológicas que registran la precipitación, por lo que, se toma en cuenta las estaciones que se ubican fuera del límite de frontera del sistema hidrológico, llegando a un total de 13 estaciones pluviométricas, ubicadas a diferentes altitudes. De acuerdo con la distribución espacial la estación Laguna Surasaca se encuentra sobre los 4000 m.s.n.m. y cuenta con información desde el año 1996, como se visualiza en la Figura 14.

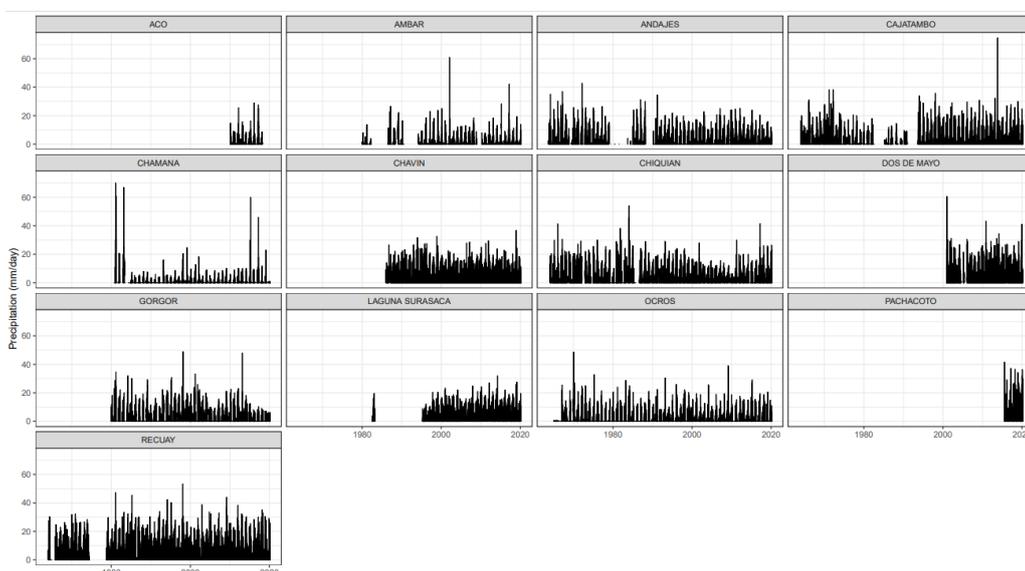


Figura 14 Registro de estaciones Meteorológicas (Precipitación). fuente: Senamhi, elaboración propia

Se cuenta con 12 estaciones meteorológicas que se ubican entre los 2000 m.s.n.m a 4000 m.s.n.m. que tienen un comportamiento casi uniforme cuyos valores llegan a los 50 mm como se muestra en la Figura 14, y en la estación Chamana que se

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO:  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA

ubica a los 1260 m.s.n.m presenta un pico que pueden llegar hasta los 50mm, sin embargo, en su régimen normal se mantiene en los 15mm.

### 3.3.2. Temperatura

La cantidad de estaciones meteorológicas que registran la temperatura dentro y fuera de la frontera de la cuenca son 10, distribuidas como se muestra en la Figura 15. Del total de estaciones, 8 estaciones se encuentran entre los 3000 m.s.n.m a 4000 m.s.n.m, registrando una temperatura promedio que varía entre 4.92°C a 13.37°C, la estación Aco ubicada a los 2490 m.s.n.m presenta una temperatura promedio de 17.32°C y solo la estación de Chamana ubicada a 1260 m.s.n.m presenta una temperatura promedio de 19.16°C.

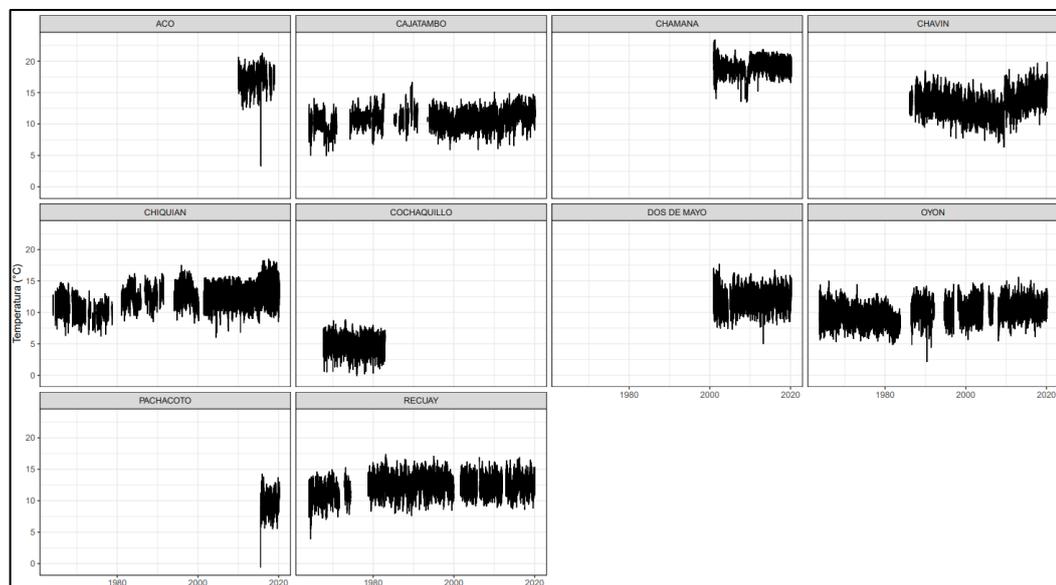


Figura 15 Registro de estaciones Meteorológicas (Temperatura), fuente: Senamhi, elaboración propia

### 3.3.3. Estación de aforo – Puente Cahua

El punto de interés para la presente investigación es las Central hidroeléctrica de Cahua, para lo cual se ha identificado una estación hidrométrica llamado “estación puente Cahua” se ubica a 5km aguas abajo de la central hidroeléctrica, en la región Lima, provincia de Oyon en el distrito de Cahua a una altitud de 812 m.s.n.m.

En la siguiente ilustración se observa la fotografía actualizada de la estación hidrométrica, registrada en la visita de campo.



Figura 16 Estación hidrométrica – Fuente: propia

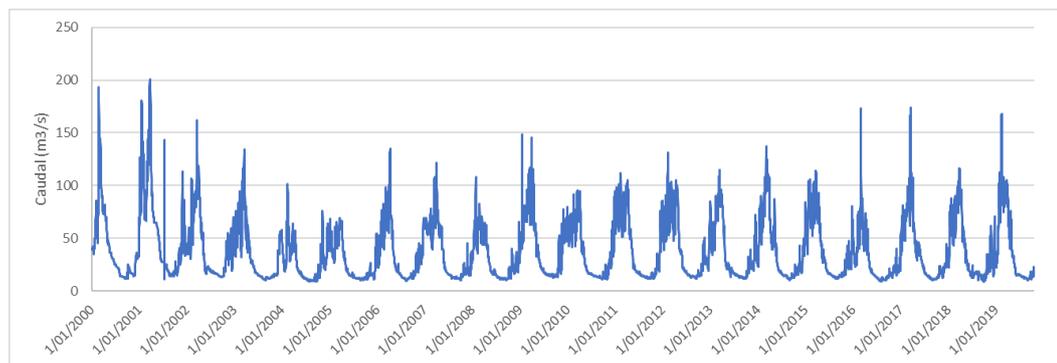


Figura 17 Registro de caudales diarios - Estación Puente Cahua, fuente: ANA elaboración propia

El registro de caudales se muestra en la Figura 17 provenientes de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) hasta el 2023, contemplando que la empresa generadora, brinda dicha información a la entidad gubernamental.

Los caudales registrados en la estación puente Cahua ubicada aguas abajo de la central hidroeléctrica Cahua contempla, las caudales naturales de la cuenca Pativilca y el volumen de agua que se descarga de la Presa Viconga (ver diagrama topológico Figura 33). Dado que no se dispone de la información del flujo de descarga de la presa y considerando que el volumen máximo almacenado representa el 2% de agua en un periodo de año, no se ha incorporado en el análisis del modelamiento hidrológico, los aportes de la presa, por consiguiente, se considera los caudales registrados como naturalizados.

### 3.3.4. Características del tipo de cobertura vegetal

La cuenca en estudio al estar ubicada entre los 812 m.s.n.m y más de 4500 m.s.n.m. presenta una serie de coberturas vegetal siendo la más predominante el pajonal andino y matorral arbustivo, como se muestra en la Figura 18, cuya representación es el 46% del área de la cuenca que se extiende entre los 3500 a más 4500 m.s.n.m., el cual se ubica en la frontera de la cuenca.

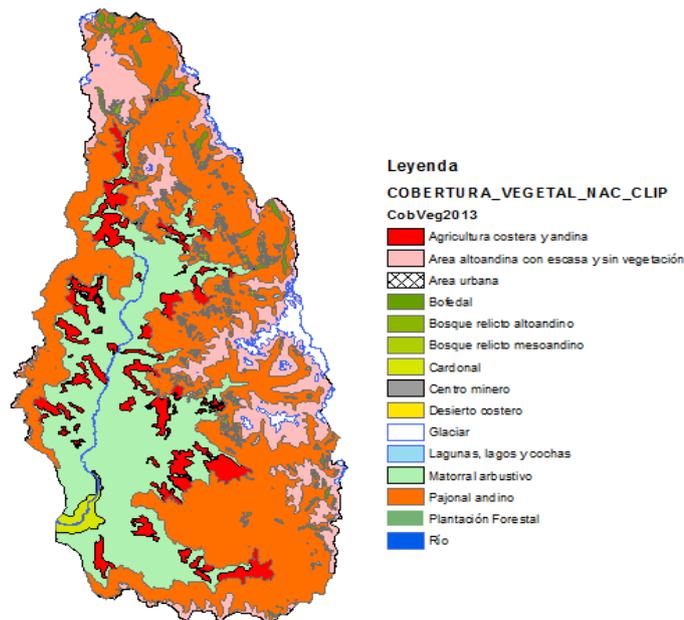


Figura 18 Tipos de cobertura vegetal en la cuenca. Fuente: mapa nacional de cobertura vegetal del MINAN

Los otros tipos de cobertura vegetal son: áreas altoandinas con escasa y sin vegetación, Agricultura costera y andina, bosques relicto altoandina, bofedales, entre otros, de los mencionados los dos primeros representan el 14% y 8% respectivamente y solo un 6% los otros tipos de cobertura.

En la figura 19 se visualiza los dos tipos de cobertura vegetal más representativos de la cuenca, en el lado izquierdo se muestra una formación geológica bastante accidentada con pronunciadas gradientes altitudinales, y lo característico del matorral arbustivo es la poca capacidad de retención de flujo. En el segundo caso del pajonal andino con una baja densidad foliar, presenta una estructura abierta y porosa con una capacidad de retención del agua bastante alta con una capacidad rápida de saturación.

El análisis de la cobertura vegetal es relevante para el modelamiento hidrológico, ya que en el modelo GR4J considerado para el estudio, se incorpora un quinto parámetro el cual es representado por el coeficiente de cultivo (Kc) de la cuenca.



Figura 19 Cobertura de Matorral Arbustivo (fuente: (IHA & SAWI, n.d.) y Pajonal andino (fuente: propia) característicos de la cuenca de Pativilca

### 3.3.5. Selección de modelos de circulación general (GCM) -CMIP5

Mediante el explorador web del KNMI se descarga la información de 32 modelos climáticos GCM, la cual dispone de las siguientes variables meteorológicas como la temperatura media (tas), temperatura mínima (tas min), temperatura máxima (tas máx.), precipitación media mensual (pr), Evapotranspiración (evsp) y otras variables climáticas. De esta gama de variables para el estudio, se utiliza la precipitación media mensual (pr) y la temperatura media (tas) como se puede observar en la Tabla 9.

Es claro que no todos los modelos climáticos presentan la información completa de los escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, por lo que, se utiliza la información de los modelos climáticos disponibles en los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

El proceso de descarga de la información requiere de la delimitación de la cuenca, que se muestra en la Tabla 8.

Latitud	-10.697 °N	-9.8268 °N
Longitud	-77.281 °E	-76.846 °E

Tabla 8 Delimitación de la cuenca por coordenadas

Nº	model	exp	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
1	ACCESS1-0	tas	NA	●	NA	●
		pr	NA	●	NA	●
2	ACCESS1-3	tas	NA	●	NA	●
		pr	NA	●	NA	●
3	bcc-csm1-1	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
4	BNU-ESM	tas	○	●	NA	●
		pr	○	●	NA	●
5	CanESM2	tas	○	●	NA	●
		pr	○	●	NA	●
6	CCSM4	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
7	CESM1-BGC	tas	NA	●	NA	●
		pr	NA	●	NA	●
8	CESM1-CAM5	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
9	CMCC-CM	tas	NA	●	NA	●
		pr	NA	●	NA	●
10	CMCC-CMS	tas	NA	●	NA	●
		pr	NA	●	NA	●
11	CNRM-CM5	tas	○	●	NA	●
		pr	○	●	NA	●
12	CSIRO-Mk3-6-0	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
13	EC-EARTH	tas	○	●	NA	●
		pr	○	●	NA	●
14	GOALS-g2	tas	○	●	NA	●
		pr	○	●	NA	●
15	FIO-ESM	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
16	GFDL-CM3	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
17	GFDL-ESM2G	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
18	GFDL-ESM2M	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
16	GISS-E2-H p1	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
17	GISS-E2-H p2	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
18	GISS-E2-H p3	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
19	GISS-E2-R p1	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
20	GISS-E2-R p2	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
21	GISS-E2-R p3	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
22	HadGEM2-AO	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
23	HadGEM2-CC	tas	NA	●	NA	●
		pr	NA	●	NA	●
24	HadGEM2-ES	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
25	inmcm4	tas	NA	●	NA	●
		pr	NA	●	NA	●
29	IPSL-CM5A-LR	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
26	IPSL-CM5A-MR	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
31	IPSL-CM5B-LR	tas	NA	●	NA	●
		pr	NA	●	NA	●
27	MIROC5	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
28	MIROC-ESM	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
29	MIROC-ESM-CHEM	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●
30	MPI-ESM-LR	tas	○	●	NA	●
		pr	○	●	NA	●
31	MPI-ESM-MR	tas	○	●	NA	●
		pr	○	●	NA	●
32	MRI-CGCM3	tas	○	●	○	●
		pr	○	●	○	●

Tabla 9 Información descargada del KNMI, los círculos en blanco muestran la disponibilidad de la información, los círculos sombreados la información descargada y los NA que no se dispone de la información. Fuente KNMI, (2013)

### 3.3.6. Selección de modelos climáticos del WCRP – CMIP5

El presente trabajo fue desarrollado en el marco de trabajo del AR5 en el CMIP5, por lo que, los modelos climáticos GCM se descargan y analizan a nivel diario a fin de evaluar la escorrentía y la producción de energía futura.

Si bien el KNMI brinda los modelos climáticos en una delimitación del tamaño de la cuenca, este proceso generaría errores al no considerar la cuadrícula completa, en ese sentido, el World Climate Research Programme (WCRP) del Proyecto de Inter comparación de modelos acoplados en la fase 5, brindan los modelos climáticos globales en todo el globo terráqueo con una resolución de 50km x 50km. En el siguiente enlace <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>, los modelos que serán descargados de forma completa del WCRP.

### 3.4. Metodología

La investigación se basa en un análisis cuantitativo fundamentado en tres procesos importantes; el primero es el análisis de la climatología, para ello se aplican técnicas de selección de los mejores modelos climáticos que representan la cuenca y se desarrolla un proceso de escalamiento de las variables climáticas como precipitación y temperatura; en el segundo proceso se emplea técnicas de modelación hidrológica a fin de comprender el ciclo hidrológico de la cuenca, para posteriormente estimar los efectos del cambio climático en la escorrentía de la cuenca. Como tercer proceso se aplican técnicas para el modelamiento de generación de energía hidroeléctrica a fin de analizar los posibles cambios, como resultado las escorrentías proyectadas para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 en el futuro cercano (2040-2070) y futuro lejano (2070-2100). Estos procesos se muestran en la Figura 20.

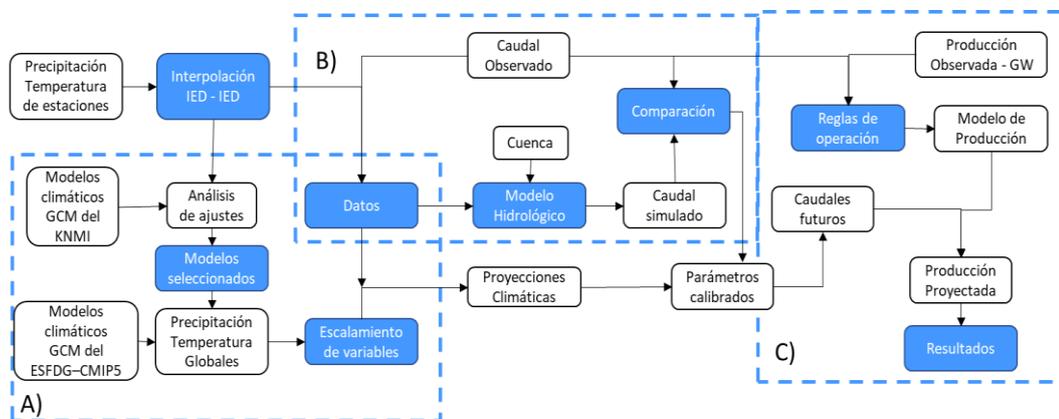


Figura 20 Diagrama de la metodología de trabajos en los tres casos de Análisis. Fuente: propio.

### 3.4.1. Descripción del modelamiento climático

A fin de determinar los futuros escenarios de cambio climático de la cuenca en estudio, se consideró seis procedimientos.

- Seleccionar los escenarios de cambio climático a trabajar (RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5). En este paso se analiza las condiciones actuales y la representación de cada escenario climático, que para fines de la investigación el escenario RCP 4.5 brinda tendencias actuales en función de las políticas climáticas actuales, mientras que el escenario RCP 8.5 muestra condiciones extremas, donde no se aplican las políticas climáticas y hay un incremento exponencial de los GEI.
- Descargar la información de las variables climáticas (Precipitación y Temperatura) con una temporalidad mensual de 32 modelos Climáticos de diferentes instituciones, mediante explorador climático del Real Instituto Metrológico de los Países Bajo (KNMI) <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>. Mediante esta herramienta te permite acceder fácilmente a la información de cada modelo climático en la delimitación de la cuenca, como un valor medio representativo del tamaño indicado en coordenadas geográficas, para cada variable.
- Determinar la semejanza de las variables climáticas nativas de cada modelo climático con los datos observados de la cuenca, inicialmente con la variable de precipitación de los 32 modelos climáticos, para seleccionar los 15 mejores modelos y finalmente el análisis comparativo con la variable de temperatura para seleccionar los 7 mejores modelos GCM más representativos para la cuenca.

Mediante los métodos de Bias y coeficiente de correlación, se determinan los siete mejores modelos que se aproximan a la información histórica, aplicando el criterio de Dahri et al. (2020), se selecciona los modelos con coeficientes que más se aproximen a 1.

- Seleccionado los 7 mejores modelos climáticos, se descarga la información de cada variable climática (precipitación y temperatura) con una frecuencia diaria de cada modelo climático y escenario de cambio climático seleccionado. Mediante la siguiente plataforma <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>, en el CMIP5.
- Dado que la información que te brinda cada modelo es a nivel global, se tiene que extraer la información en el área delimitado por la cuenca, considerando el

tipo de resolución del modelo, que para fines de la investigación es de 50km x 50km.

En la Figura 21 se muestra el procedimiento de análisis antes descrito, el cual tiene que ser realizado para cada escenario RCP 4.5 y 8.5.

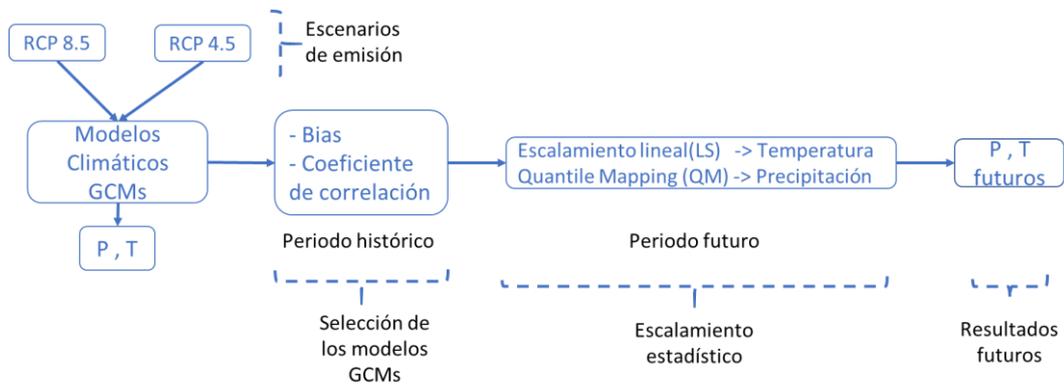


Figura 21 Metodología de análisis de los modelos climáticos, fuente: propio.

- La última etapa para obtener los resultados del análisis climático es el escalamiento estadístico o “Downscaling estadístico”, para ello, los métodos aplicados para cada variable es de forma independiente como lo muestra (Fang et al., 2014). Siendo el método más apropiado para el escalamiento de la variable temperatura el escalamiento lineal o “Linear Scaling (LS)”, cuya naturaleza es mantener la media de los valores corregidos. Para el escalamiento estadístico de la variable de precipitación, se ha determinado que el método más apropiado que representa la variabilidad es el Quantile Mapping (QM), tal como fue aplicado por Olsson et al. (2017) en la cuenca de Chancay – Huaral. Con la aplicación de estos dos métodos se obtiene la información de las variables climáticas temperatura y precipitación, escaladas para la cuenca en función de cada escenario RCP 4.5 y 8.5.

### 3.4.2. Descripción del modelamiento hidrológico

El modelamiento hidrológico empleado para determinar la esorrentía de salida del sistema hidrológico es el modelo GR4J.

En la Figura 22 se muestra las etapas del análisis hidrológico, que parte con el análisis de la información climática disponible en las estaciones meteorológicas.

La información de precipitación y temperatura es analizada con una temporalidad diaria, donde los datos dudosos son eliminados y cabe precisar que la información

faltante no es completada. La evapotranspiración es calculada indirectamente por el método de Oudin et al. (2005).

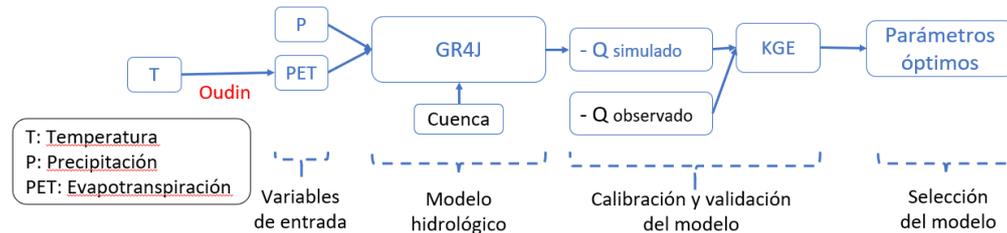


Figura 22 Metodología para el análisis del sistema hidrológico

La distribución espacial seleccionada para el sistema hidrológico es un modelo distribuido con mallas rectangulares de 5km x 5km, en cada celda la información meteorológica es almacenada, para ello, se aplica el proceso de interpolación IDW, IED y KED, y se selecciona el modelo que presenta mejor eficiencia.

El modelo escorrentía - lluvia GR4J desarrollado por Perrin et al. (2003), se utilizó para simular los valores diarios en la cuenca delimitada. El modelo se compone de dos reservorios uno de producción y el otro de transferencia, con las variables de entrada de precipitación y evapotranspiración como se muestra en la Figura 9. Para tener un modelo que represente el comportamiento hidrológico se calibra los 4 parámetros (X1, X2, X3 y X4), adicionalmente se incorpora un quinto parámetro X5 que representa el coeficiente de cultivo. Esta metodología de incorporar un quinto parámetro fue aplicado por Ruelland et al. (2014) en la cuenca de Elqui al norte de la cordillera de los andes chilenos.

El modelo inicialmente debe ser precalentado con 3 años de información climática, para obtener los parámetros iniciales calibrados. Posteriormente, el modelo se corre con 10 años de información meteorológica para obtener un modelo calibrado. Finalmente, el modelo se valida con 10 años de información, para lo cual se obtiene una alta eficiencia. Los criterios de ajuste y evaluación de desempeño aplicados en el modelo es el criterio de Kling-Gupta Efficiency (KGE) y el Nash Sutcliffe (NSE) como se muestra en las ecuaciones N° 43 y 44.

Contemplando un modelo hidrológico calibrado y validado, se ingresa la información climática (precipitación y temperatura) de cada modelo de circulación general (GCM) en los dos escenarios de cambio climático, para obtener la escorrentía futura hasta finales del siglo XXI, como se muestra en la Figura 23.

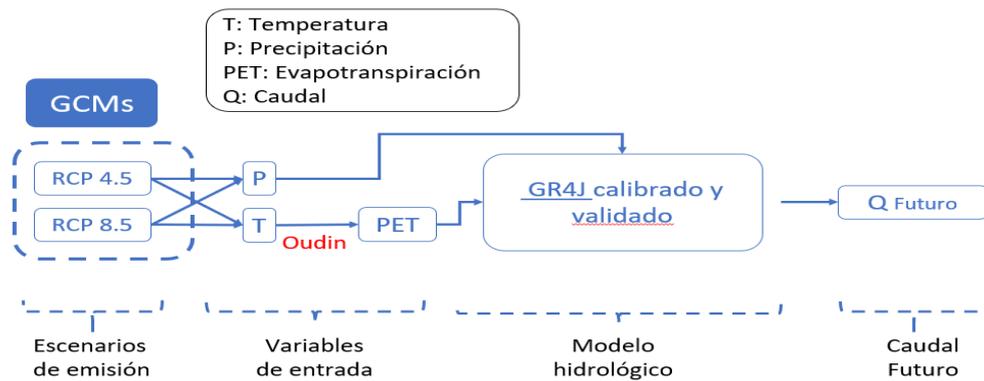


Figura 23 Metodología de aplicación en la evaluación de cambio climático

### 3.4.3. Descripción del modelo de generación de energía Hidroeléctrica

El modelamiento de la función de producción de una central hidroeléctrica se basa en la máxima eficiencia, considerando las restricciones operativas que esta misma presenta, por sus condiciones de disponibilidad hídrica, máxima generación, caudal turbinado y límites de concentración de sedimentos.

El modelo de producción aplicado en el estudio considera las siguientes condiciones como invariables en el tiempo, por ejemplo, la demanda que en definitiva es un condicionante directo de la operación del sistema Interconectado Nacional, la eficiencia de la turbina y generador, las normativas actuales, reglas operativas y que los procesos de mantenimiento en la Central Hidroeléctrica no afectan la generación.

La función producción de la planta hidroeléctrica es representada de forma simplificada como se muestra en la ecuación N°45 y 47, cuyas variables están en función de la temporalidad.

Los parámetros iniciales como la eficiencia del generador y la turbina son consultados al operador, y se considera de manera invariable en el tiempo con fines académicos, ya que en la práctica depende de la curva de capacidad, el cual es proporcionado por el fabricante como se muestra en la Figura 10.

En la Figura 24 se observa el flujo desarrollado para determinar la función de producción, este proceso inicia con la discretización de horas no trabajadas por los grupos de generación dado efectos de falla, condiciones climáticas adversas o salidas intempestivas fuera de servicio por el requerimiento del COES, los cuales no ingresan en el modelamiento. Dado que estas variables influyen en el modelo.

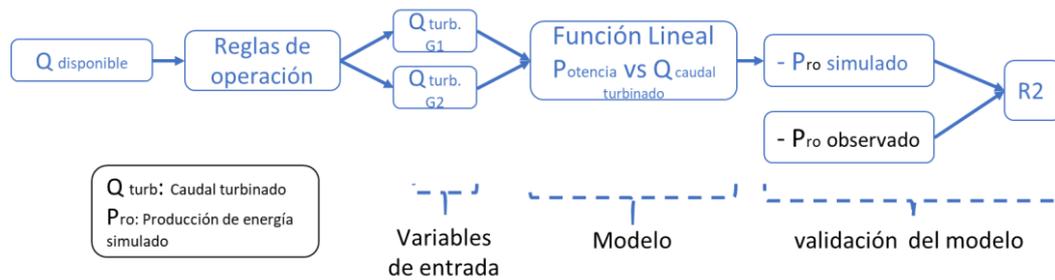


Figura 24 Metodología para el análisis de la función de producción

En el estudio se analiza los efectos de parada de planta por incremento de la concentración de sedimentos en el río, lo cual implica una restricción operativa, los otros efectos de parada se considera estáticos. Con el análisis de la capacidad de los grupos de generación se determina el caudal turbinado en función de la disponibilidad hídrica, estableciendo finalmente las reglas de operación de la central hidroeléctrica. Las cuales fueron consultas con el operador, definiendo los caudales mínimos y máximos turbinados en cada grupo de generación, la potencia mínima y máxima, los límites al caudal disponible por incremento de la concentración de sólidos en el río, en las siguientes ecuaciones se muestra las restricciones:

$$2 \text{ m}^3/\text{s} \leq Qt_{(i,t)} \leq Qt_{i_{max}} \quad (47)$$

En la ecuación N°51 se muestra el caudal mínimo turbinado de  $2\text{m}^3/\text{s}$  y el caudal máximo definido para el grupo G1 es de  $12.3\text{m}^3/\text{s}$  y del G2  $12\text{m}^3/\text{s}$  considerando la priorización en ese orden.

$$4 \text{ MW} \leq P_{(i,t)} \leq 22.5 \text{ MW}_{max} \quad (48)$$

$$Qc.s_{(i,t)} \leq 95 \text{ m}^3/\text{s} \quad (49)$$

En la ecuación N°57 se muestra la potencia mínima y máxima de cada grupo de generación de acuerdo con las memorias técnicas del operador. En la ecuación N°58 se delimita el caudal máximo permitido en el río antes de restringir la planta debido al incremento de la concentración de sólidos (estos valores son netamente académicos y son acorde a los datos reales de la planta). Estas restricciones se establecen en un flujograma condicional, asumiendo que los equipos operan las 24 horas, lo que implica incertidumbres en el resultado final.

Con las reglas de operación establecidas se simula la generación de energía hidroeléctrica en cada grupo de generación, en función de cada uno de los

caudales turbinados. Contemplando el registro histórico de generación de energía en la central hidroeléctrica en estudio (la información se encuentra disponible en el despacho diario del COES - <https://www.coes.org.pe/portal/>), se realiza el análisis comparativo con la producción simulada mediante el criterio de coeficiente de calibración y con ello se determina el desempeño de la función de producción.

La energía producida por cada grupo de generación está en función de la eficiencia de la turbina y el generador, estos parámetros que se obtuvieron de los ensayos de potencia que se encuentran disponibles en el COES (CENERGIA, 2016), son 90.65% y 97.38% respectivamente, asimismo los valores invariables en el modelamiento son la gravedad y densidad del agua, que de acuerdo con la norma EN60041 son 998.18 kg/m<sup>3</sup> y 9.779 m/s<sup>2</sup>.

El cálculo de la altura neta de acuerdo con el procedimiento técnico PR N°18 se define con la ecuación N°47, los resultados de estas ecuaciones son definidas para cada grupo de generación. Los parámetros de cada turbina, que se aplica en la ecuación N°47 los cuales se muestran en la Tabla 10.

Parametros	GR1	GR2
Pe (m)	210.23	210.44
Ps (m)	-0.514	0.32
Ze (m.s.n.m.)	875.55	875.55
Zs (m.s.n.m.)	872.12	872.11
De (m)	1.2	1.20
Ds (m)	1.245	1.25

Tabla 10 Parámetros de cada turbina tipo Francis: fuente CENERGIA, (2016)

Donde Pe y Ps son la presión de entrada y salida, Ze y Zs son el azimut tomado en la cámara de carga y la turbina, y De y Ds las dimensiones de la tubería en la entrada y llegada a la turbina. En las ecuaciones N°59 y 60 se define la altura neta para cada grupo de generación, donde hn es la altura neta y Qt es el caudal turbinado en cada grupo.

$$hn_{(Gr1)} = 214.17 + 0.05482 \times Qt_{Gr1} \quad (50)$$

La ecuación de altura neta del segundo grupo de generación:

$$hn_{(Gr2)} = 214.20 + 0.05482 \times Qt_{Gr2} \quad (51)$$

Con los parámetros definidos se integran en la ecuación N°47, resultando el modelo de producción de generación de energía hidroeléctrica.

### 3.5. Resultados

Los resultados de la presente investigación se esquematizan en la Figura 25. Primeramente, se muestra los resultados del procesamiento de las variables meteorológicas, como la precipitación, temperatura y evapotranspiración a nivel diario. Seguidamente se presentan los resultados de las variables climáticas escaladas de cada modelo de circulación general (GCM) en los escenarios RCP 4.5 y 8.5. Por otro lado, se muestra los resultados del modelo hidrológico GR4J calibrado y validado, el cual replica el comportamiento físico del sistema hidrológico. Como paso final, se presentan los resultados del modelo de generación de energía hidroeléctrica que replica el comportamiento de los grupos de generación de la central hidroeléctrica a nivel diario.

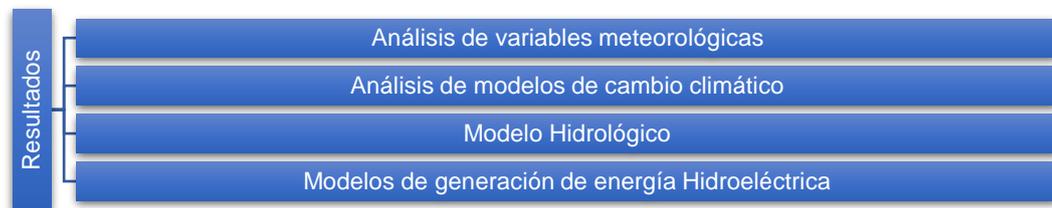


Figura 25 Esquema de resultados, fuente: propio

#### 3.5.1. Análisis de las variables meteorológicas

##### a) Precipitación

A partir de la información pluviométrica de las 13 estaciones presentadas en la Tabla 7, se realizó 3 tipos de interpolación. La primera que se muestra en la gráfica b es la interpolación IED denominada ponderación de distancia inversa con deriva externa, para lo cual se aplica la ponderación de distancia inversa (IDW) corregida por altitud, la segunda metodología es la interpolación IDW mostrada en la gráfica c, cuyos valores están relacionados con la distancia a la inversa entre cada grilla y las estaciones meteorológicas, y el tercer método es Kriging con derivada externa (KED), el cual se basa en un análisis estadístico de la serie de datos para estimar la serie de los datos desconocidos.

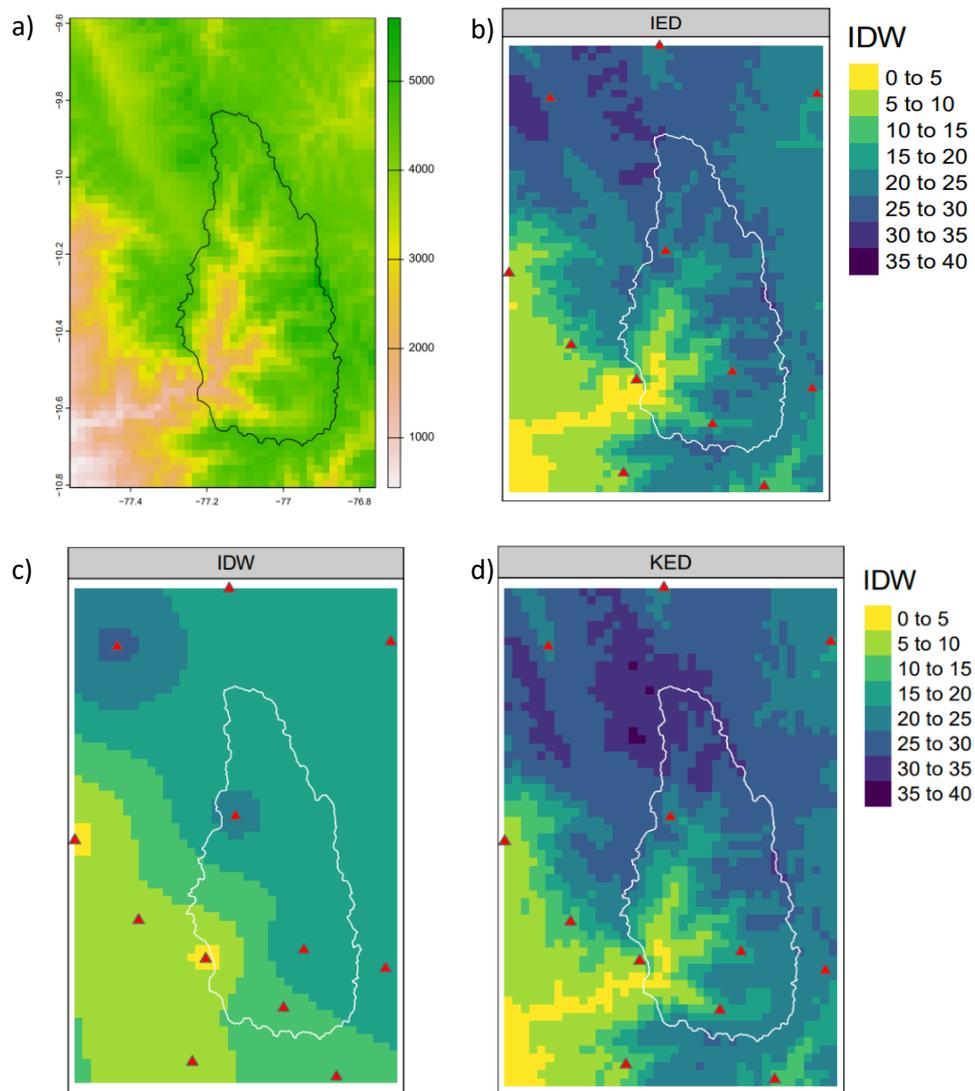


Figura 26 En la gráfica a) grilla de la cuenca en  $0.05^{\circ} \times 0.05$  distribuidas por altitud, b) precipitación media anual grilla de la cuenca interpolada por el método IDW y corregida por altitud. c) Precipitación media anual por método IDW. d) Precipitación media anual interpolada por el método KED. Fuente: propia.

Los métodos IED y KED aplican la corrección por altitud mediante un ráster de elevación que se muestra en la gráfica a, que corrige el variable de precipitación de acuerdo con la topografía. Según el estudio desarrollado por Denis Ruelland, (2020), de acuerdo con el relieve topográfico es adecuado utilizar los métodos de interpolación de corrección por altitud, en este caso es viable utilizar el método IED o KED.

#### b) Temperatura – Evapotranspiración

A partir de las 10 estaciones meteorológicas que registran la temperatura media diaria, como se muestra la Tabla 7, se aplica los métodos de interpolación IDW y la extensión del método IDW de corrección por altitud, ciertamente el método de

*IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO:  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA*

Kriging no es oportuno ser aplicado, ya que, las estaciones meteorológicas no cuentan con suficiente información como se muestra en la Figura 15, que a diferencia de la precipitación si se cuenta con una mayor cantidad de información.

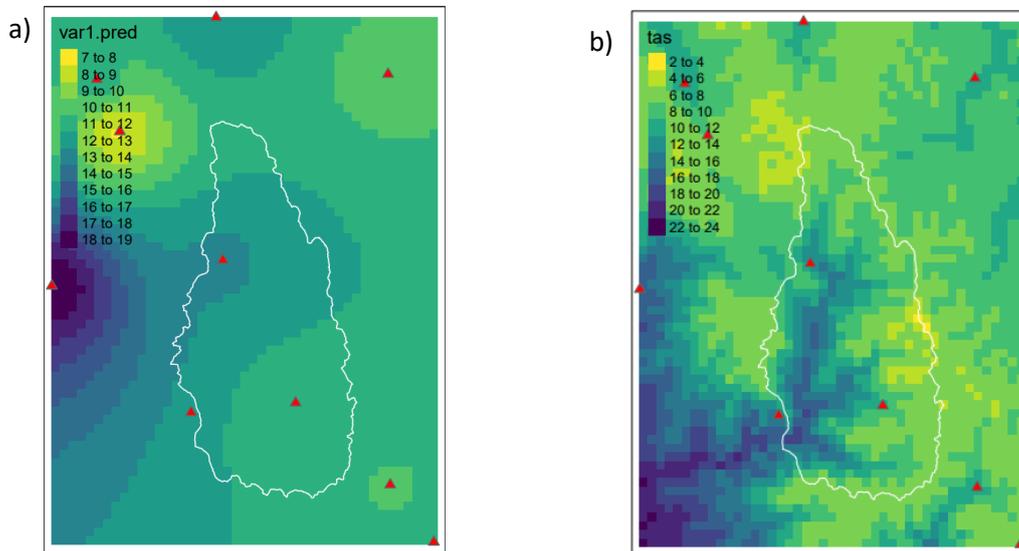


Figura 27 el grafico a) muestra el método de interpolación IDW para la temperatura, el grafico b) muestra la interpolación IED por corrección por altitud, fecha 14-06-2019, fuente propia.

Los resultados de cada método de interpolación para la temperatura presentan una importante diferencia de la distribución de la temperatura en cada grilla, tal que, la interpolación IED es acorde al gradiente altitudinal de la cuenca, caso diferente ocurre con solo la interpolación IDW. En ese sentido, para el análisis del modelamiento hidrológico se toma en consideración el valor medio de la cuenca por el método de interpolación IED.

Como dato de entrada en el proceso de interpolación del modelo hidrológico se considera el método de interpolación IED para la variable de precipitación y temperatura.

La zona de estudio no cuenta con estaciones meteorológicas que registran la evapotranspiración, por lo que mediante un artificio matemático recomendado por Oudin et al. (2005) y ampliamente utilizado en muchos estudios se obtiene la evapotranspiración por medio de la temperatura utilizando la ecuación N°11, donde se definen los parámetros  $K1 = 100$  y  $K2 = 5$  de acuerdo al estudio de Rau et al. (2018).

El registro histórico del valor medio en la cuenca a nivel diario de la temperatura media diaria, evapotranspiración calculada y precipitación por el método de interpolación IED se muestra en la Figura 28.

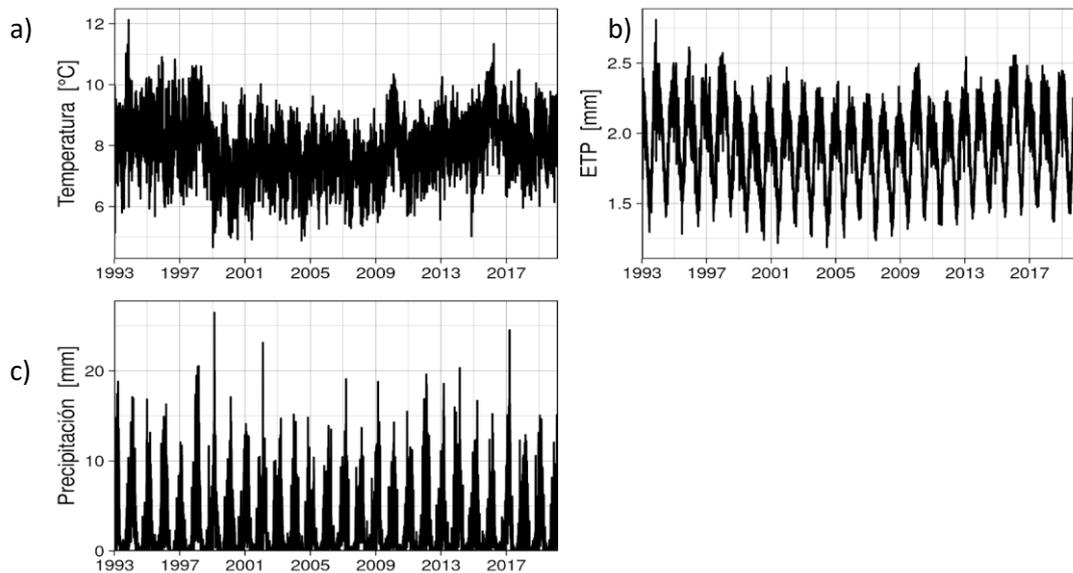


Figura 28 Series de tiempo para las variables de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, media de la cuenca por el método de interpolación IED.

Los resultados de la precipitación muestran un comportamiento variable a lo largo de la serie de datos, evidenciando las temporadas secas y húmedas, mientras que la temperatura y evapotranspiración potencial tienen tendencias casi uniformes. Las series de valores calculados son utilizadas como variables de ingreso para el modelo hidrológico. Adicionalmente, los valores de precipitación y temperatura media de la cuenca a nivel mensual, se utiliza como referencia de comparación con las variables climáticas de los modelos GCM como se detalla más adelante.

### 3.5.2. Resultados del análisis de los Modelos de cambio climático

El análisis de los modelos climáticos tiene como objetivo, obtener los mejores modelos que representen el comportamiento meteorológico de la cuenca en estudio. El análisis de modelos de circulación general (GCM) se inicia con la evaluación de los valores de precipitación y temperatura a escala mensual y luego se seleccionan los modelos GCM que serán escalados a nivel diario. A continuación, se detallan los resultados obtenidos de estos procesos.

#### a) Análisis climático de la precipitación y temperatura media mensual

Para la evaluación de cada modelo climático, se analiza la correlación entre las variables climáticas de cada modelo y los datos observados de las variables de

precipitación y temperatura. Se analiza por los métodos de bias corrección y el coeficiente de correlación  $r^2$ .

De los 32 modelos GCM se hace una primera selección sobre la base del análisis de la precipitación, por ser la variable que presenta mayor variabilidad, para luego analizar la temperatura, ya que, esta variable tiene tendencias más homogéneas. Para el análisis se emplearon los valores correspondientes al periodo 1981-2005, el cual es comparado con el valor medio mensual observada de la cuenca.

Los resultados de la correlación y el método de bias entre la precipitación media mensual observada y la precipitación media mensual de cada modelo GCM se muestra en la Figura 29. El criterio de selección de los modelos GCM es el coeficiente de correlación  $R^2$  con una tendencia a 1 y por los valores más bajos con una tendencia a 0 para el método de Bias Correction, teniendo mayor relevancia el coeficiente de correlación  $R^2$ .

Así, por ejemplo, se observa en la Figura 29 que el modelo CMCC.CM presenta un coeficiente de correlación de 0.998 indicando una tonalidad clara, asimismo por el método de Bias correction el valor determinado es 0.424, por lo que este modelo sería el más apropiado a utilizar considerando que los valores no están escalados, caso contrario ocurre con el modelo GISS.E2.H.p2 que presenta un coeficiente de correlación  $R^2$  igual a 0.425 y presenta un valor de Bias correction cercano a 0 lo cual no es seleccionado, dado que presenta una baja correlación. Cabe precisar que la información climática no es escalada con el fin de mantener la naturaleza de los datos.

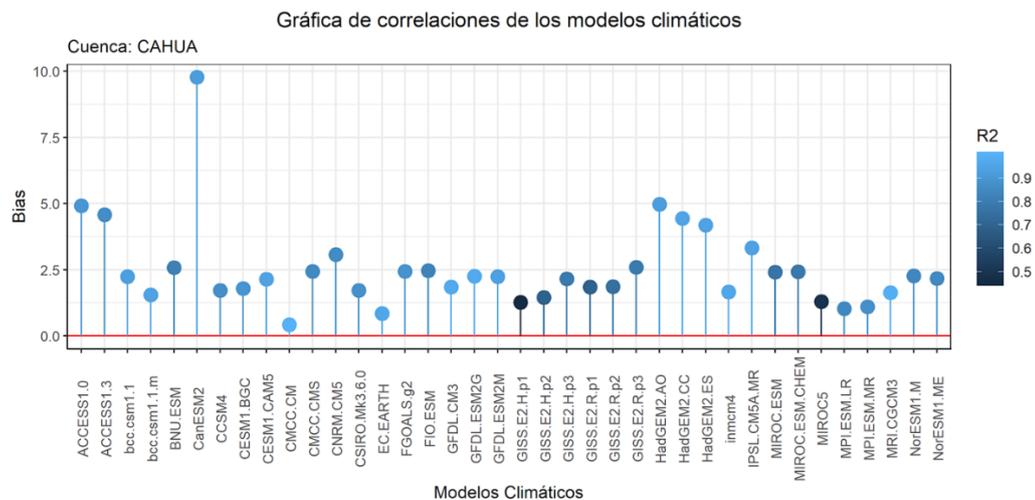


Figura 29 Análisis de rendimiento de los 32 modelos climáticos en función de la variable de precipitación. Fuente: propia.

En la Tabla 11 se muestra los 15 modelos seleccionados en función del coeficiente de correlación  $r^2$  más cercano a 1 y el coeficiente de Bias más cercano a 0.

N°	GCM	R2	BIAS
1	bcc.csm1.1	0.929	2.237
2	CCSM4	0.867	1.725
3	CESM1.BGC	0.888	1.793
4	CESM1.CAM5	0.942	2.139
5	CMCC.CM	0.998	0.424
6	CSIRO.Mk3.6.0	0.874	1.719
7	EC.EARTH	0.955	0.85
8	GFDL.CM3	0.97	1.839
9	GFDL.ESM2G	0.967	2.257
10	GFDL.ESM2M	0.937	2.243
11	GISS.E2.R.p2	0.747	1.856
12	inmcm4	0.956	1.669
13	MPI.ESM.LR	0.843	1.025
14	MPI.ESM.MR	0.871	1.105
15	MRI.CGCM3	0.985	1.634

Tabla 11 Rendimiento de la precipitación de los modelos GCM frente a los datos precipitación observada, los valores sombreados son los primeros 15 modelos seleccionados. Fuente: propia.

Aplicando el mismo criterio de correlación para la variable de temperatura media mensual observada y la temperatura media de los modelos GCM con los métodos de coeficiente de correlación y Bias Correction, se seleccionan los modelos con alto desempeño.

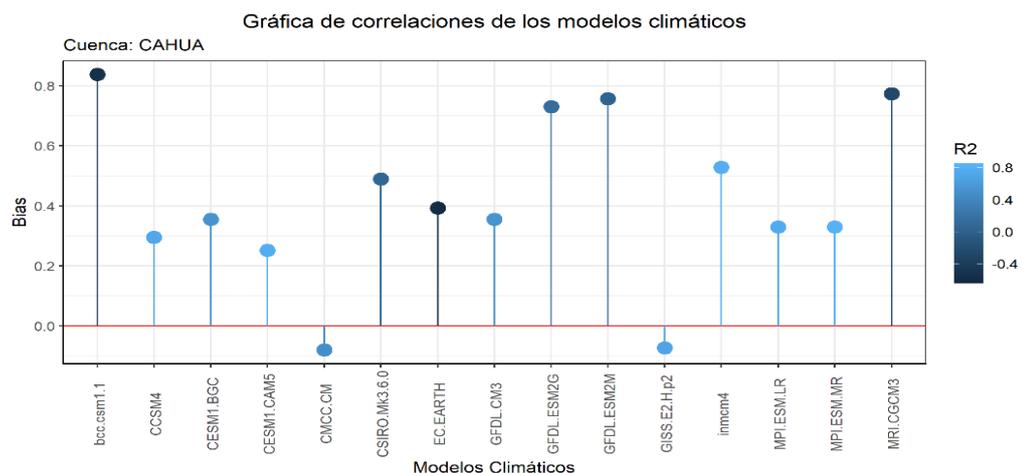


Figura 30 Análisis de rendimiento de 15 modelos climáticos GCM en función de la variable temperatura, fuente: propia.

Nº	GCM	R2	BIAS
1	bcc.csm1.1	- 0.55	0.84
2	CCSM4	0.72	0.3
3	CESM1.BGC	0.52	0.36
4	CESM1.CAM5	0.77	0.25
5	CMCC.CM	0.48	- 0.08
6	CSIRO.Mk3.6.0	0.07	0.49
7	EC.EARTH	- 0.61	0.39
8	GFDL.CM3	0.52	0.36
9	GFDL.ESM2G	0.14	0.73
10	GFDL.ESM2M	0.04	0.76
11	GISS.E2.H.p2	0.69	- 0.07
12	inmcm4	0.77	0.53
13	MPI.ESM.LR	0.76	0.33
14	MPI.ESM.MR	0.81	0.33
15	MRI.CGCM3	- 0.28	0.77

Tabla 12 Rendimiento de la temperatura de los modelos GCM frente a los datos de temperatura observada, los valores sombreados son los mejores modelos seleccionados, fuente: propia.

En la Figura 30 y la Tabla 12, se muestra los 15 modelos GCM seleccionados anteriormente de los cuales con el análisis de correlación para la variable de temperatura se determinan 7 modelos con alto desempeño que se muestran en la Tabla 12 de forma sombreada.

### 3.5.3. Proceso de escalamiento de las variables meteorológicas

El proceso de escalamiento o downscaling de la variables meteorológicas se aplica en 5 modelos GCM (CMCC.CM, GFDL-CM3, inmcm4, MPI-ESM.R y MRI.CGCM3) con alto nivel de desempeño (los otros dos modelos no pudieron ser aplicados, ya que no contaban con información completa - CESM1.CAM5 y GISS.E2.p2), para ello toda la información es descargada del CMIP5 (2013), con una temporalidad diaria. De acuerdo con otros estudios como el de Chilkoti et al., (2017), Bodian et al., (2018), Karun et al., (2019), Dahri et al., (2020) y entre otros, se considera como mínimo 5 modelos climáticos para evaluación de cambio climático. Para el presente estudio se muestra los modelos en la Tabla 13.

Centros	País	Modelos	Instituciones
<b>CMCC</b>	<b>Italia</b>	CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
<b>NOAA GFDL</b>	<b>USA</b>	GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
<b>INM</b>	<b>Rusia</b>	INMCM4	Institute for Numerical Mathematics

<b>MPI-M</b>	<b>Inglaterra</b>	MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
<b>MRI</b>	<b>Japón</b>	MRI.CGCM3	Meteorological Research Institute

Tabla 13 Los mejores cinco modelos climáticos

Seleccionado los cinco modelos de circulación general (GCM) se corrige la información en escala espacial, mediante el proceso de escalamiento como valor promedio para la cuenca.

La nueva información generada consiste en la corrección del sesgo a partir de las variables climáticas de cada GCM, en base a la información observada. Fang et al. (2014) realiza un análisis detallado sobre distintos métodos de escalamiento estadístico, de los cuales resalta el método “Quantile Mapping (QM)” para la variable precipitación, y el método Linear Scaling (LS) para la variable temperatura, los mismo que fueron aplicados en el presente estudio.

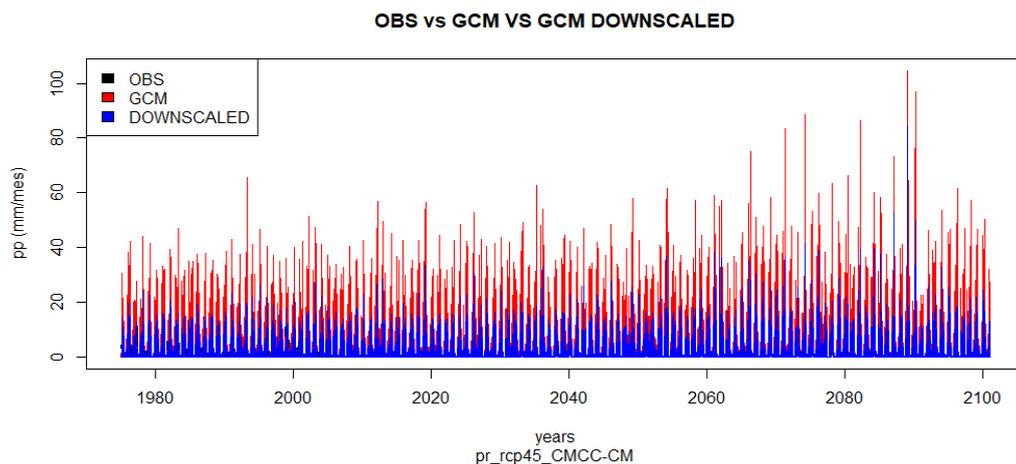


Figura 31 Resultado del escalamiento estadístico de la precipitación, fuente: propia.

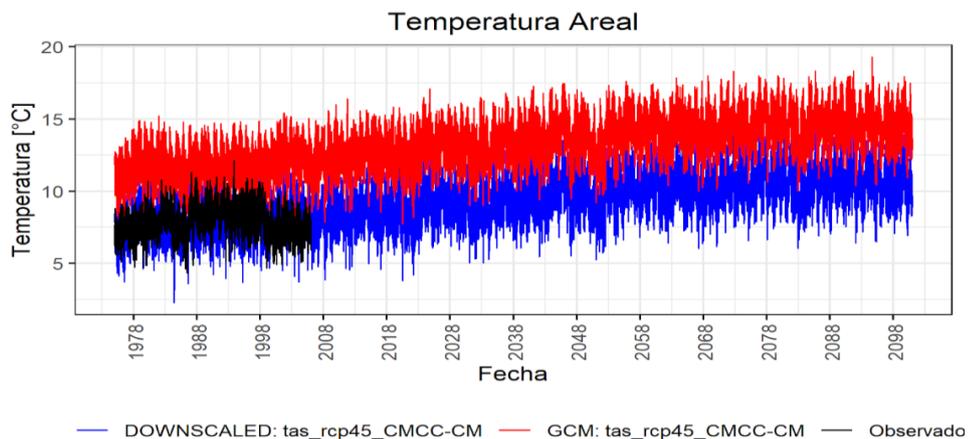


Figura 32 Resultado del escalamiento estadístico de la temperatura, fuente: propia.

Se obtuvieron resultados satisfactorios como se puede observar en la Figura 31 y Figura 32 para el modelo CMCC-CM, las líneas rojas representan al modelo sin corrección, de color negro los datos históricos, y en azul se muestran los resultados del modelo corregido con el escalamiento estadístico, estos últimos son las variables por utilizar en los modelos hidrológicos.

En la Figura 31 se observa el escalamiento estadístico de la variable precipitación por el método de Quantile Mapping (QM), con la aplicación de las ecuaciones 7, 8 y 9, ello tiene la finalidad de representar la variabilidad de la precipitación y en la Figura 32 es mucho más claro el proceso de escalamiento de la variable temperatura media diaria, por el método de escalamiento lineal con la aplicación de la ecuación 1 y 2. Este método es apropiado para la variable temperatura ya que mantiene los valores promedios.

El proceso de escalamiento para la variable precipitación y temperatura, que se muestra para el modelo CMCC-CM, se desarrolla para los otros modelos mostrados en la Tabla 13, los cuales se muestra en los anexos.

#### 3.5.4. Resultados del análisis del Modelo hidrológico

El modelo hidrológico seleccionado para el presente estudio pertenece a la familia GR, que representa un modelo precipitación – escorrentía. En el capítulo II se muestra a detalle el modelo GR4J y los cuatro parámetros del modelo a ser calibrados, cabe precisar que en la investigación se incorpora un quinto parámetro que controla la evapotranspiración representada por el coeficiente de cultivo  $k_c$ . Las variables de entrada para el modelo hidrológico son la precipitación y evapotranspiración media para toda la cuenca y la variable de salida es la escorrentía registrada aguas abajo de la central hidroeléctrica.

En la Figura 33 se visualiza el diagrama topológico, donde se identifica el embalse Viconga, cuyo aporte a la cuenca no se considera en el estudio, ya que, aporta solo un 2% del volumen total anual de agua en la cuenca. Además, considerando la poca indisponibilidad de información del embalse, este no ha sido integrado en el modelo hidrológico.

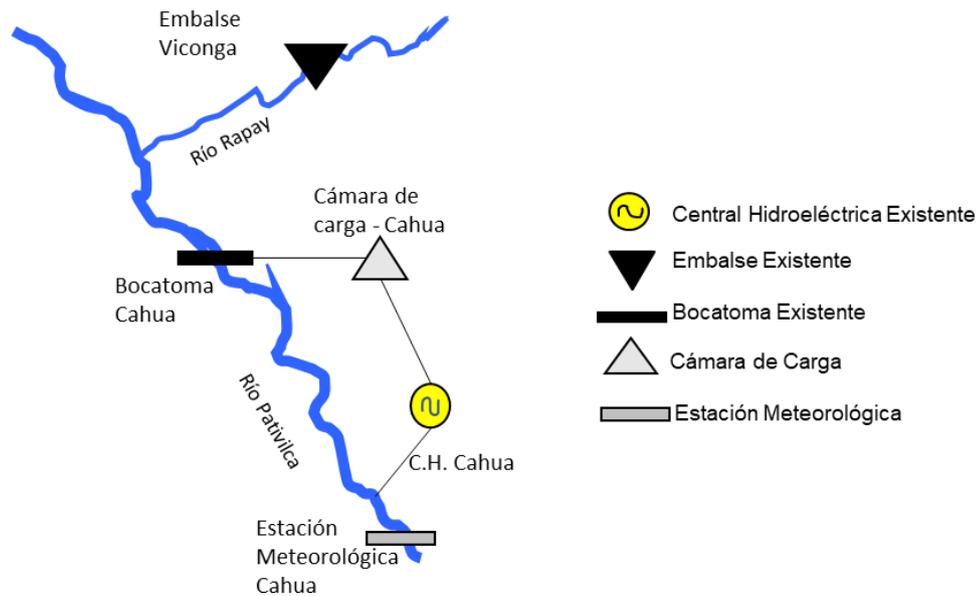


Figura 33 Diagrama topológico de la cuenca del río Pativilca, fuente: propia.

#### a) Análisis del coeficiente de cultivo

En el modelo GR4J una variable de entrada es la evapotranspiración, por lo que en la presente investigación se incorpora un quinto parámetro que modifica la evapotranspiración denominado X5, para el cual Ruelland et al. (2014) lo considera equivalente al coeficiente de cultivo. Con este parámetro se pretende reproducir el contexto semiárido de la cuenca.

Para el análisis del coeficiente de cultivo se consideraron las características del tipo de cobertura vegetal mostrado en el punto (3.3.4), donde se describe el porcentaje que representa cada tipo de cobertura vegetal, en la siguiente Tabla 14 se muestra el coeficiente de cultivo (Kc) considerado a cada tipo de cultivo según la (FAO, 2021).

Cobertura Vegetal	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje	kc
Pajonal andino	1,330.73	46%	0.70
Matorral arbustivo	780.22	27%	0.40
Área altoandina con escasa y sin vegetación	407.67	14%	0.40
Agricultura costera y andina	218.55	8%	0.50

Tabla 14 Tipo de cobertura vegetal y coeficiente de cultivo (kc), fuente: propia.

Los resultados del análisis del coeficiente de cultivo en la cuenca, aplicando el promedio ponderado respecto de las áreas se determina que el coeficiente  $K_c$  para toda la cuenca es 0.52.

b) Calibración y validación de modelo hidrológico

Una de las principales cualidades por las que se aplica el modelo GR4J en el estudio, es la de requerir pocos parámetros de entrada, lo que implica un menor gasto computacional al momento de calibrar los cuatro parámetros del modelo y una menor incertidumbre en la toma de datos. Los resultados del proceso de calibración y validación del modelo hidrológico GR4J, en los casos de estudio se muestra las Figura 35, Figura 36 y Figura 37, para cada coeficiente de cultivo.

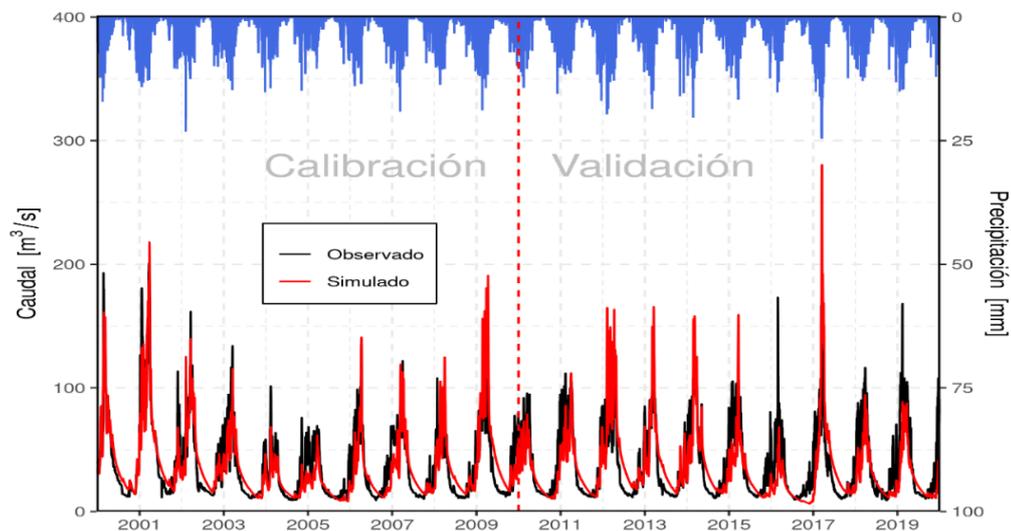


Figura 34 Calibración inicial del modelo GR4J, fuente: propia.

En la Figura 34 se muestra los periodos de calibración (2000-2010) y validación (2010-2020) del modelo hidrológico, considerando que el periodo de precalentamiento fue entre los años 1997 al 2000. Los resultados del proceso de calibración y validación del modelamiento hidrológico se realizó para tres casos, los cuales están relacionados a la variación del quinto parámetro del modelo GR4J, los casos son: En el caso N°1 se muestra los resultados del modelo hidrológico considerando que no hay variación de la evapotranspiración calculada, por lo que, el coeficiente de cultivo  $K_c=1$ , en el caso N°2 los resultados del modelo hidrológico muestran una máxima eficiencia, siendo el valor del coeficiente de cultivo igual a 0.069, el cual se encuentra dentro del rango recomendado por Ruelland et al. (2014), entre 0.05 a 0.119, para zonas áridas de Chile ubicado entre los 765 a 6214 m.s.n.m., similar al área en estudio, el caso N°3 para el

modelamiento hidrológico es tomando en cuenta el valor calculado del coeficiente de cultivo igual a 0.52.

Se presenta los resultados del modelamiento hidrológico para cada caso:

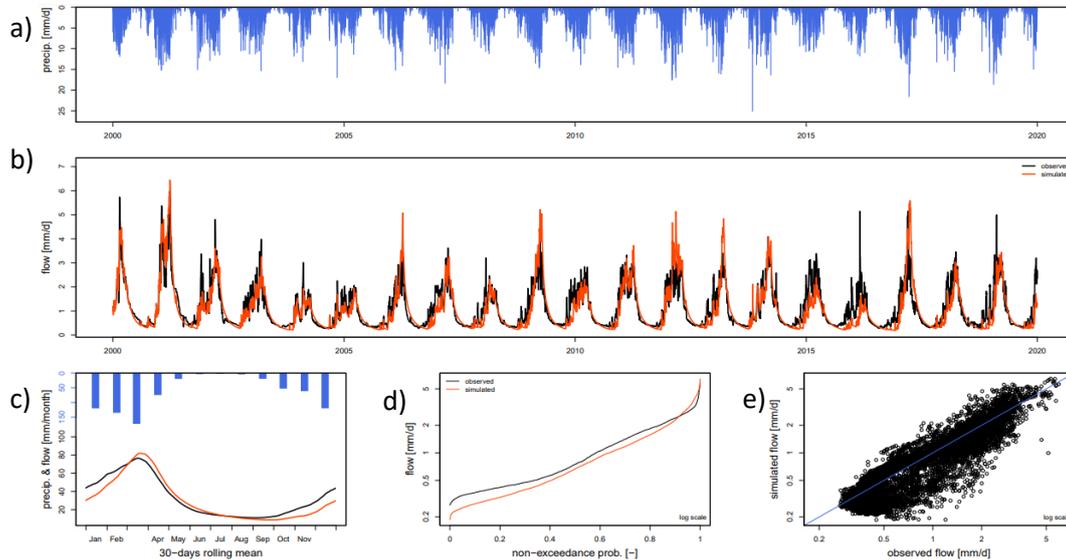


Figura 35 Resultados de la simulación del modelo hidrológico GR4J con  $K_c=1$ , fuente: propia.

En la Figura 35 se muestra los resultados del proceso de calibración del modelo GR4J considerando un  $K_c=1$ , como se puede observar el comportamiento del caudal observado y simulado mantiene la tendencia de los picos y en algunos periodos sobre estima la precipitación como es en el año 2017. En los valles se observa que, en la mayoría de los periodos, los valores simulados están por debajo de los valores observados. En las tres graficas (c, d y e) de la Figura 35 se observa el comportamiento a nivel mensual como promedio de los años observados, tal que, entre los meses de octubre a febrero se muestra que los caudales simulados están por debajo del caudal promedio mensual, adicionalmente entre el mes de marzo y abril evidencia un ligero incremento del caudal pico. En la curva doble masa entre los caudales observados y simulados evidencia una notable diferencia, el cual, se puede deducir que el modelo hidrológico tiende a ajustarse principalmente en los extremos y en ultimo grafico una relación simple entre caudal observado y caudal simulados, evidenciando una función lineal.

Periodo	KGE	NSE
Calibración (2000-2010)	0.8835	0.8172
Validación (2010-2019)	0.7761	0.6231

Tabla 15 Eficiencia de la simulación hidrológica  $K_c=1$ , de acuerdo con el criterio KGE y NSE, fuente: propia.

En la Tabla 15 se presentan los valores del criterio de Kling-Gupta Efficiency (KGE) y Nash Sutcliffe (NSE) obtenidos del proceso de calibración y validación del modelo GR4J mediante el paquete airGR aplicado en el software de procesamiento R estudio. Indicando valores satisfactorios (mejor ajuste igual a 1).

	X1	X2	X3	X4
Parámetros	2.49122E-06	-0.00178612	0.82748402	2.1006
Rango de valores Recomendados	0.1 a 1.2	-0.005 a 0.003	0.02 a 0.3	1.1 a 2.9

Tabla 16 Parámetros calibrados del modelo GR4J,  $K_c=1$ , fuente: propia.

Los parámetros calibrados del modelo se muestran en la Tabla 16 los cuales se encuentran dentro del rango de valores recomendados por Perrin et al. (2007) con una desviación del parámetro X1.

Si bien es los valores de KGE obtenidos para  $K_c=1$  son aceptables, se podrían obtener mejores valores modificando el parámetro X5. Luego de un proceso de calibración manual se obtuvo un valor de  $K_c=0.069$ , este valor calculado se encuentra en el rango referido por Ruelland et.al (2014).

La representación física del caudal en los periodos de calibración y validación como se muestra en la Figura 36, es similar a los caudales picos del modelamiento anterior considerando un  $K_c=1$ , sin embargo, los valles tienen una mejor tendencia y aproximación a los caudales observados y con mayor claridad se puede observar en las tres graficas inferiores (c, d y e).

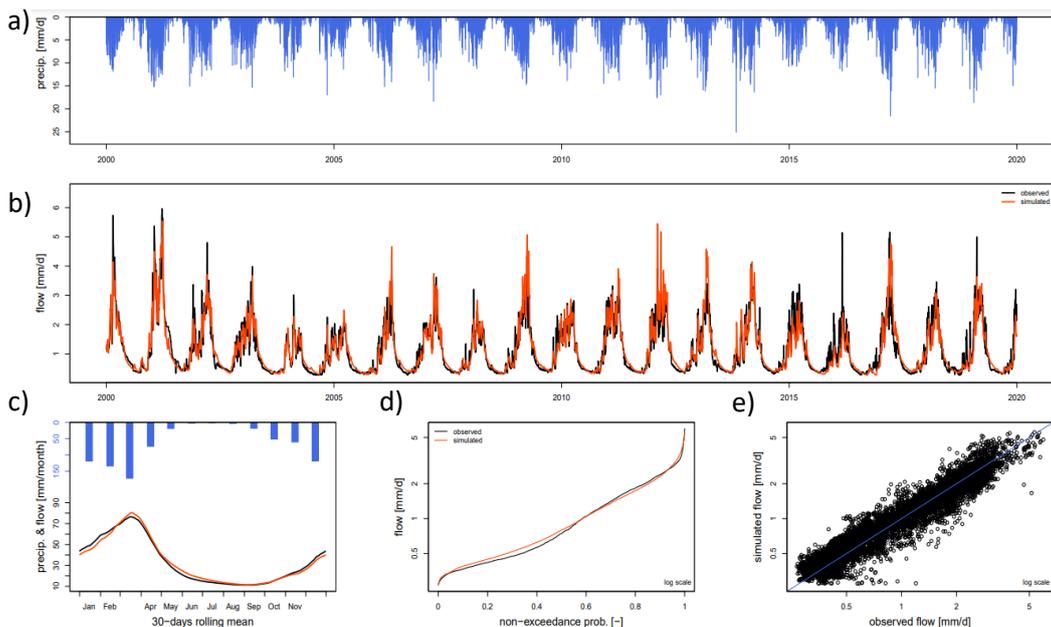


Figura 36 Resultados de la simulación del modelo hidrológico GR4J con  $K_c=0.069$ , fuente: propia.

En la Figura 36-c) se observa un buen ajuste en los valles como en los picos, con una ligera variación en el mes de noviembre y diciembre, asimismo la curva duración mostrados en la Figura 36-d), muestra un ajuste aceptable a lo largo de la curva y a diferencia de la anterior función lineal de la Figura 36-e), se muestra una mejor distribución de los datos.

Periodo	KGE	NSE
Calibración (2000-2010)	0.9298	0.9117
Validación (2010-2019)	0.9162	0.8376

Tabla 17 Eficiencia de la simulación hidrológica  $K_c = 0.069$ , de acuerdo con el criterio KGE y NSE, fuente: propia.

Los rendimientos mostrados en la Tabla 17, presentan valores más altos que los evidenciados en la Tabla 15, por lo que el parámetro calibrado X5 incrementa la eficiencia del modelo hidrológico GR4J.

	X1	X2	X3	X4
Parámetros	1.2034077	-0.0006418	0.09721909	2.400641
Rango de valores Recomendados	0.1 a 1.2	-0.005 a 0.003	0.02 a 0.3	1.1 a 2.9

Tabla 18 Parámetros calibrados del modelo GR4J,  $K_c = 0.069$ , fuente: propia.

Los parámetros calibrados del modelo hidrológico considerando el  $K_c = 0.069$ , se muestra en la Tabla 18, para este caso la variable X1 tiene una ligera desviación del rango recomendable por Perrin et al. (2007). Por lo que, se puede inferir que estos resultados, pueden dar una mejor estimación del caudal futuro con las variables de entrada de los modelos de cambio climático.

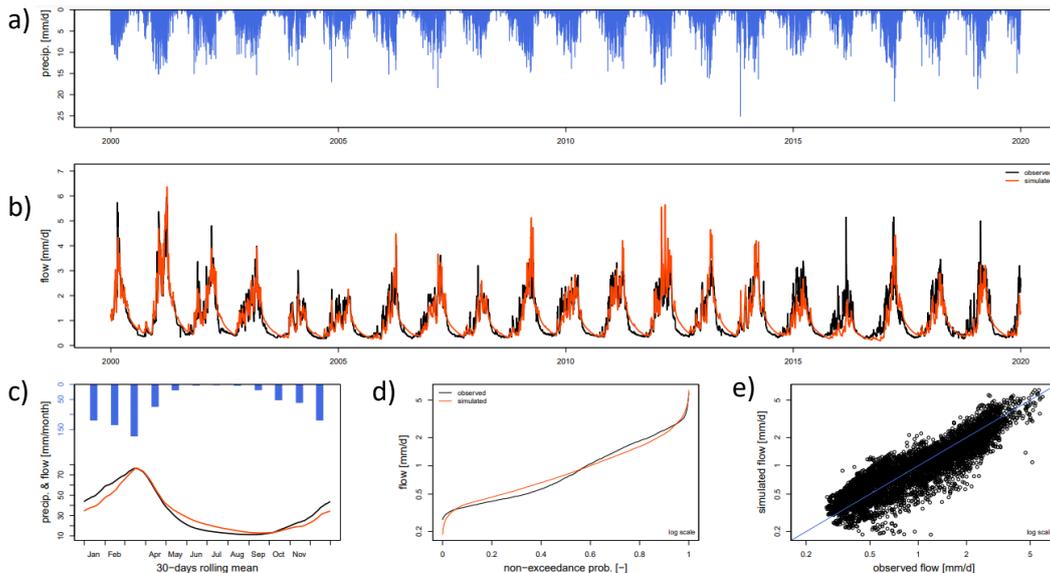


Figura 37 Resultados de la simulación del modelo hidrológico GR4J,  $K_c = 0.52$ , fuente: propia.

En el tercer caso del modelamiento hidrológico es considerando un coeficiente de cultivo calculado  $K_c=0.52$ , que representa el quinto parámetro incorporado en el modelo hidrológico que controla la evapotranspiración, cuyo resultado indica que la cobertura vegetal, no tan árida. Los resultados del modelamiento hidrológico se muestran en la Figura 37, que similar al anterior caso los picos tienen una buena representación y los valles en los periodos secos se asemejan a los registros históricos, sin embargo, en este caso hay una sobre estimación de los caudales simulados.

Los rendimientos del modelo hidrológico calibrado se muestran en la Tabla 19, obteniendo rendimientos altos lo cual valida el modelo hidrológico.

Periodo	KGE	NSE
Calibración (2000-2010)	0.9234	0.8843
Validación (2010-2019)	0.8596	0.7420

Tabla 19 Eficiencia de la simulación hidrológica  $K_c=0.52$ , de acuerdo con el criterio KGE y NSE, fuente: propia

En la Tabla 20 se muestra los parámetros calibrados del modelo, que al igual que los anteriores parámetros mencionados, el parámetro X1 se encuentra fuera del rango recomendable por Perrin et al. (2007), y para este caso solo el parámetro X2 presenta una desviación del rango de valores recomendados.

	X1	X2	X3	X4
Parámetros	1.51020397	-0.110222	54.59815	2.53003
Rango de valores Recomendados	0.1 a 1.2	-0.005 a 0.003	0.02 a 0.3	1.1 a 2.9

Tabla 20 Parámetros calibrados del modelo GR4J,  $K_c=0.52$ , fuente: propia.

### Proyección de caudales

Los resultados de la proyección de caudales futuros en los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, se muestra en la Figura 38 y Figura 39, los cuales muestran el promedio mensual de 30 años de información en el futuro cercano (2040-2070) y futuro lejano (2070-2100), considerando la mejor eficiencia del modelo hidrológico GR4J de 0.9298, presentado en el caso con  $k_c=6.9\%$  como coeficiente de cultivo.

Estos resultados de la esorrentía futura tienen como dato de entrada las variables de precipitación y temperatura del proceso de escalamiento en cada modelo GCM. Precisar que el modelo hidrológico GR4J, toma en cuenta la evapotranspiración, por lo que, la variable de temperatura es convertida a evapotranspiración por el

método de Oudin et al. (2005). Como paso final en la obtención de los resultados de la proyección de futura de la escorrentía, ingresa los parámetros de calibración que se muestran en la Tabla 18.

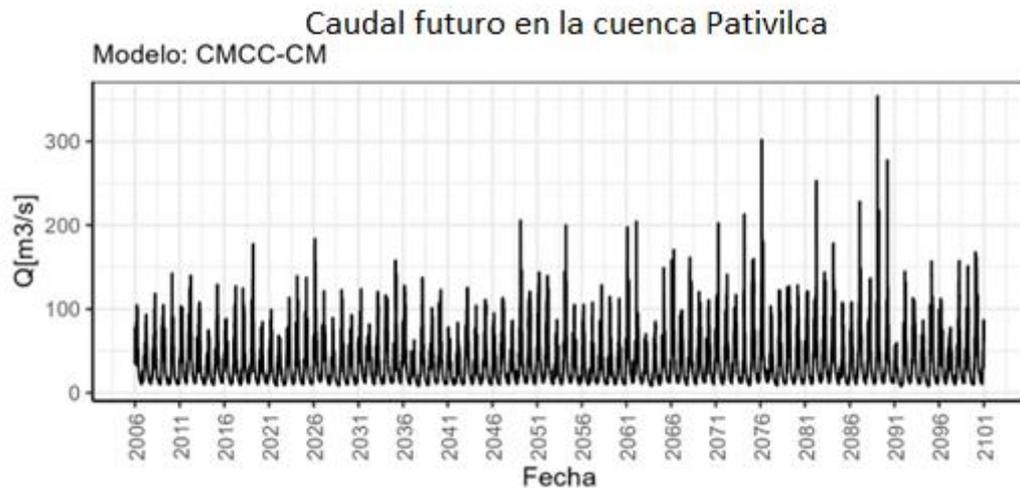


Figura 38 Serie de caudales proyectados hasta el 2100 en el modelo CMCC-CM, en el escenario RCP4.5, fuente: propia.

Los resultados de la escorrentía en la estación Cahua hasta el 2100 para el modelo GCM CMCC-CM en el escenario RCP4.5, se muestra en la Figura 38, indicando caudales diarios que podrían superar los 300m<sup>3</sup>/s, en el periodo de avenidas para el año 2088. Adicionalmente, en el periodo 2005 y 2020, los caudales máximos simulados no superan los 200m<sup>3</sup>/s, caso similar ocurre con el registro histórico que se muestra en la Figura 17.

Este resultado muestra un modelo del conjunto de 5 modelos seleccionados para el análisis futuro de la escorrentía, por lo que, estos resultados se muestran en los anexos a fin de ser evaluados por el lector.

Los resultados de la escorrentía futura en el escenario RCP8.5 hasta el 2100 con una frecuencia diaria se muestran en la Figura 39, lo cual, las variables climáticas como precipitación y temperatura están influenciadas por el incremento sustancial de gases de efecto invernadero. Resultando, que en el futuro lejano (2070-2100) se podría presentar incrementos importantes en la cuenca, que inclusive podría llegar hasta los 600m<sup>3</sup>/s.

Estos incrementos de caudal están relacionados con los saltos o picos de precipitación que se generara por el proceso de escalamiento. Por lo que, tienen

una alta incertidumbre, en ese sentido, se realiza un agrupamiento de los caudales diarios a caudales mensuales.

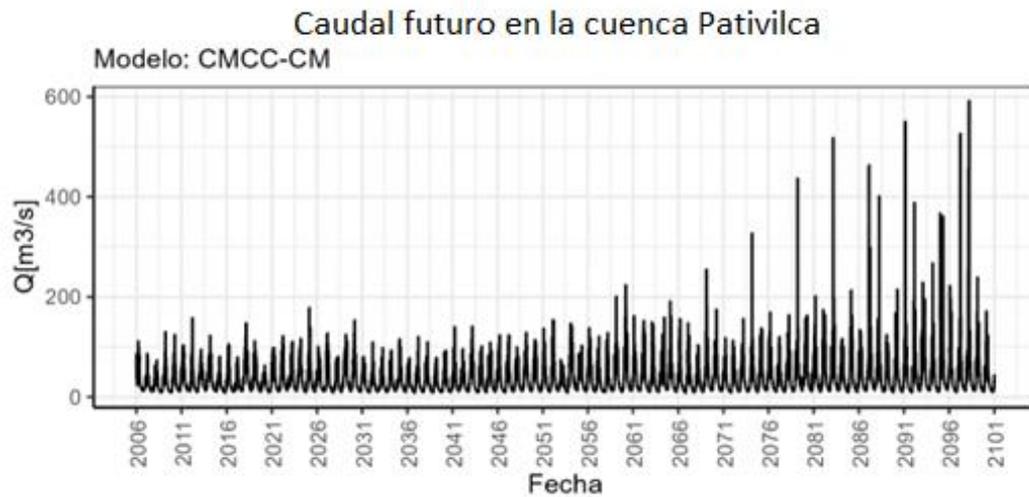


Figura 39 Serie de caudales proyectados hasta el 2100 en el modelo CMCC-CM, en el escenario RCP8.5, fuente: propia.

El agrupamiento de los caudales diarios a caudales mensuales en los escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5, para los periodos futuro cercano (2040-2070) y futuro lejano (2070-2100) se muestra en la Figura 40.

Los resultados de la escorrentía promedio mensual indicarían una reducción, tanto para el futuro cercano como futuro lejano, en ambos escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5). Tal que, en el escenario RCP4.5 el promedio anual del caudal observado es  $37.72\text{m}^3/\text{s}$ , y el promedio anual del caudal del promedio de los 5 modelos GCM en el futuro cercano es  $33.03\text{m}^3/\text{s}$ , y en el futuro lejano es  $34.47\text{m}^3/\text{s}$ . Mientras, que en el escenario RCP8.5 los caudales promedio mensuales de los modelos GCM indicarían para el futuro cercano de  $35.20\text{m}^3/\text{s}$  y para el futuro lejano  $37.51\text{m}^3/\text{s}$ . Estos resultados muestran la tendencia reflejada en la Figura 40.

Adicionalmente, en el escenario RCP4.5 para el futuro cercano se evidenciaría un caudal máximo mensual simulado de  $81.85\text{m}^3/\text{s}$  correspondiente al modelo GCM inmcm4 y caudal mínimo de  $64.67\text{m}^3/\text{s}$  en el modelo MPI.ESM.MR para el mes de marzo, fecha en que genera el caudal pico. En cuanto al futuro lejano estos valores tienen un incremento, tal que, el caudal máximo es  $84.4\text{m}^3/\text{s}$  y el caudal mínimo es  $68.12\text{m}^3/\text{s}$ , para el mismo mes de marzo.

En los periodos de estiaje, para el futuro cercano en el mismo escenario de cambio climático, se podría generar los mínimos caudales en los meses de agosto y setiembre, siendo estos de  $12.05\text{m}^3/\text{s}$  y  $12.86\text{m}^3/\text{s}$  respectivamente. Mientras que, en el futuro lejano, los cuales mínimos se generarían en los mismos meses siendo  $12.12\text{m}^3/\text{s}$  y  $13.14\text{m}^3/\text{s}$  respectivamente.

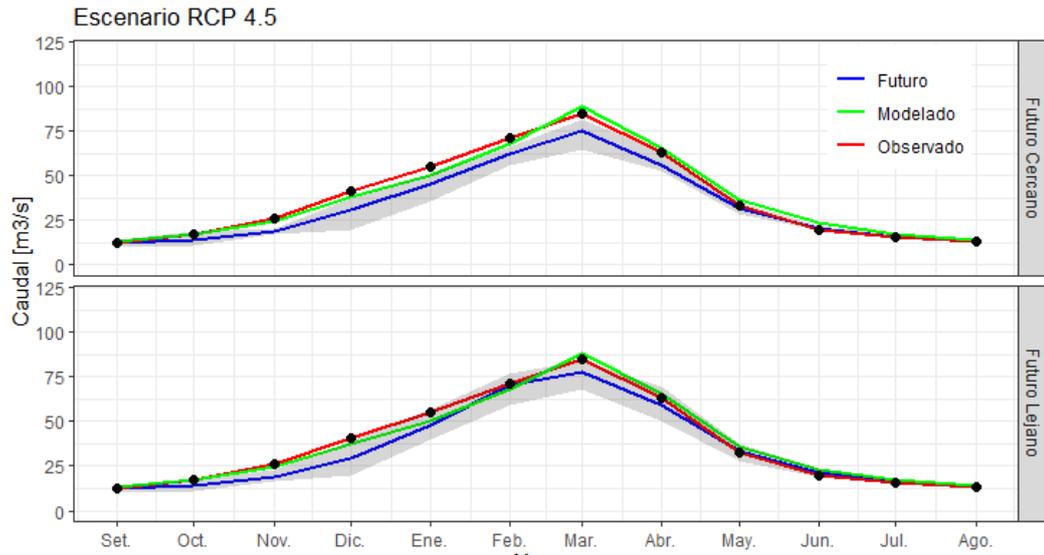


Figura 40 Proyección de la escorrentía para el periodo futuro cerca y lejano,  $k_c=0.069$  – RCP4.5, fuente: propia.

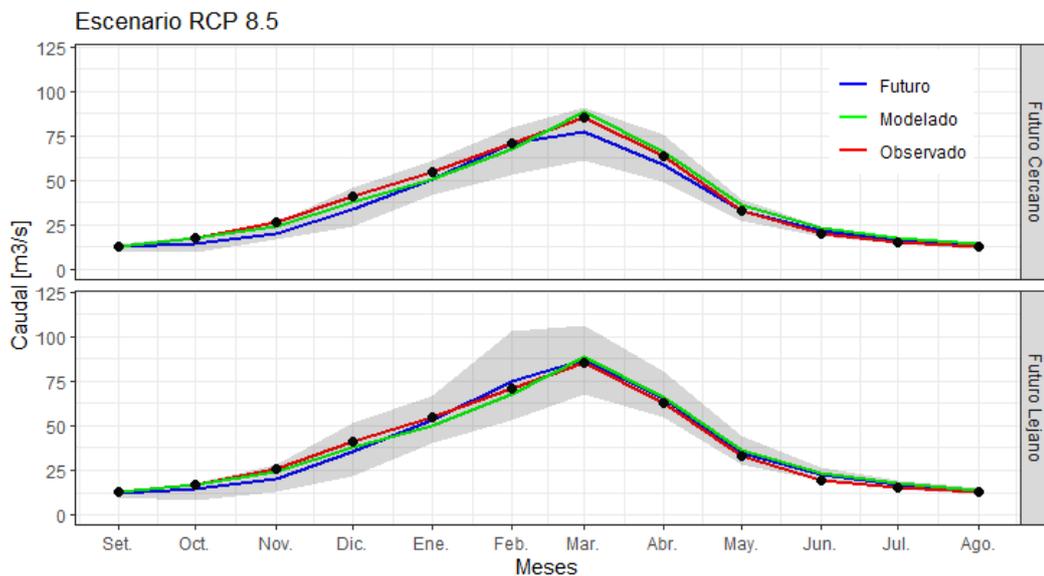


Figura 41 Proyección de la escorrentía para el periodo futuro cerca y lejano,  $k_c=0.069$  – RCP8.5, fuente: propia.

En el escenario RCP8.5, la tendencia del promedio de caudales simulados por los modelos GCM se aproximan a los valores observados (ver capítulo V, se discute las variaciones porcentuales). Adicionalmente, el rango de variación de los

caudales simulados es mucho más amplio, tal que, en el futuro cercano el cual máximo es  $91.03\text{m}^3/\text{s}$ , siendo el observado  $85.25\text{m}^3/\text{s}$ , mientras que en el futuro lejano el caudal máximo es  $106.49\text{m}^3/\text{s}$ , como se puede observar en la Figura 41.

En el periodo de estiaje al igual que el escenario RCP4.5, los mínimos caudales promedios que se generaría por los modelos GCM, se podría dar en los meses de agosto y setiembre, siendo este valor de  $12.5\text{m}^3/\text{s}$  y  $13.26\text{m}^3/\text{s}$  respectivamente para el futuro cercano, y de  $12.40\text{m}^3/\text{s}$  y  $13.54\text{m}^3/\text{s}$  respectivamente para el futuro lejano.

### 3.5.5. Modelo de Generación de la central Hidroeléctrica

La función de producción de la central hidroeléctrica Cahua desarrollada en el estudio, trata de representar el comportamiento de generación eléctrica en función de la disponibilidad hídrica del río Pativilca, tomando en cuenta las reglas de operación planteadas para la central hidroeléctrica, así como los procedimientos técnicos del COES (Pr 13 y 14), que buscan maximizar la generación de energía hidroeléctrica.

En la Figura 42 se muestra el comportamiento de la producción diaria en los dos grupos de generación en (MW/día) en función de la disponibilidad hídrica entre los años del 2010 al 2019, claramente se evidencia una zona de inflexión dada la capacidad instalada de la planta. La máxima generación diaria que suma ambos grupos de generación es  $1089.1\text{ MW}$  con un caudal turbinado máximo de  $24\text{ m}^3/\text{s}$ , como se muestra en la Figura 42. A partir del máximo caudal turbinado se evidencia una mayor distribución de la generación de energía, ello dado las restricciones horarias en cada grupo por disposición del COES u otros agentes externos, y en mayor medida se muestra el punto A con una baja producción de energía a pesar de contar con el caudal suficiente. Esto podría explicarse debido a factores externos como paradas programadas, fallas en los equipos, fallas externas o fenómenos naturales que involucra la salida de servicio de planta, siendo uno de los más comunes las avenidas que generan incrementos de la concentración de partículas sólidas en el flujo del río, tal es que, cuando la concentración de sólidos supera los  $3\text{ gr/l}$  se restringe la generación, con el fin de evitar daños considerables en los rodetes de las turbinas. Generalmente, este incremento de partículas en el río sucede cuando el caudal en el río Pativilca, supera aproximadamente los  $95\text{ m}^3/\text{s}$ , una de las consideraciones del operador es restringir la generación de energía.

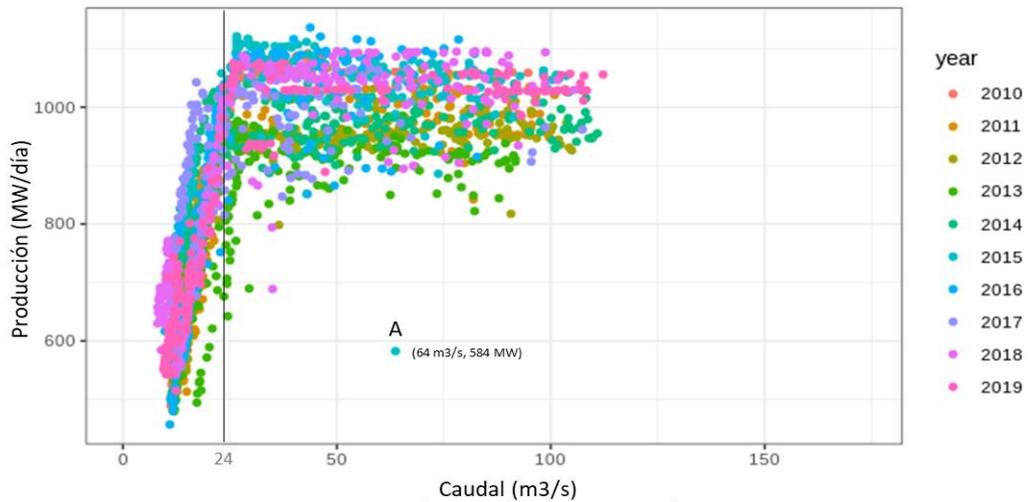


Figura 42 Relación caudal disponible y producción de energía diaria en los dos grupos de generación, fuente: propia.

Considerando el comportamiento real de la producción de energía frente a la escorrentía en el río Pativilca, se toma en cuenta las restricciones para establecerlas en las reglas de operación, tal es así, que el modelo simplificado de producción de energía considera una función lineal creciente entre los caudales de 5 m<sup>3</sup>/s a 24 m<sup>3</sup>/s y una producción constante máxima para caudales entre 24 m<sup>3</sup>/s a 95 m<sup>3</sup>/s, y para mayores a este último valor se restringe la generación de la planta.

#### a) Reglas de operación de la Central Hidroeléctrica

Los resultados de la integración de las restricciones de operación en cada uno de los grupos de generación de energía se muestran en la Figura 43, priorizando la operación del grupo N°1.

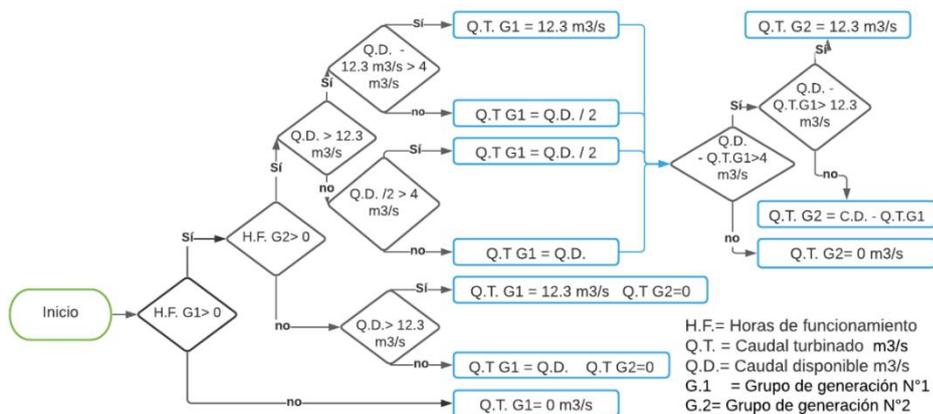


Figura 43 Reglas de operación de la central Hidroeléctrica, fuente: propia.

Con la aplicación de las reglas de operación propuesta para cada grupo de generación de acuerdo con el flujograma de la Figura 43, se determina el caudal turbinado en cada grupo de generación en función de la disponibilidad hídrica.

#### b) Calibración del modelo de generación hidroeléctrica

La función de generación de energía que se muestra en la ecuación N°47, y teniendo en cuenta los parámetros ya definidos, se corre el modelo en el periodo de evaluación (2010-2019), para ello, la variable de entrada es el caudal disponible en el río Pativilca con una temporalidad diaria. En la Figura 44 se muestra la potencia real como producción promedio mensual de 10 años de información registrada en los dos grupos de generación, el cual es comparado con la potencia simulada (Los cálculos de la modelación de generación hidroeléctrica se encuentra en los anexos).

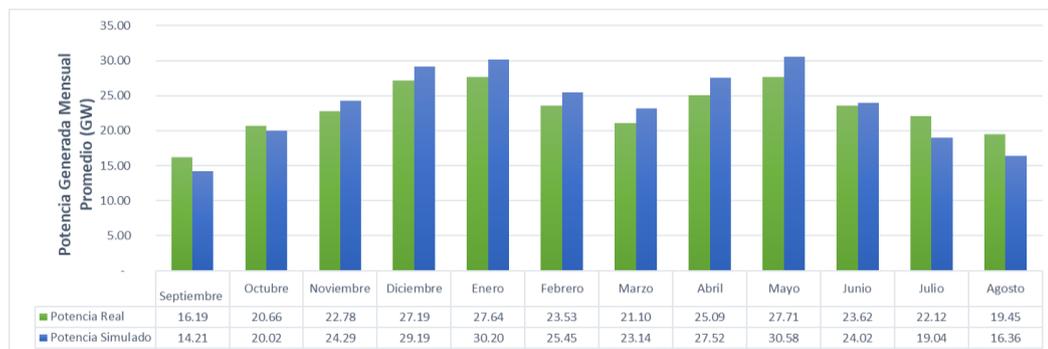


Figura 44 Producción de generación eléctrica media mensual observada y simulada, fuente: propia.

Mediante un análisis comparativo entre la potencia real y la potencia simulada se determina que el coeficiente de correlación es 0.82, por lo que, se acepta el planteamiento del modelo simplificado de generación de energía.

El comportamiento de la producción de energía a nivel mensual evidencia que durante los meses de estiaje se reduce la generación debido a la disponibilidad hídrica en la cuenca, y en los meses de avenida se llega a generar en su máxima capacidad mostrando adicionalmente limitaciones.

#### c) Proyección de generación hidroeléctrica

Los resultados de la generación de energía hidroeléctrica futura, integra los resultados de la selección de los modelos climáticos GCM, los resultados de la escorrentía futura y finalmente con los parámetros del modelo de producción de

energía desarrollado, se obtiene la energía futura para cada modelo de circulación global.

Los resultados de la producción de energía como promedio mensual entre el 2005 y 2100, para el modelo CMCC-CM en los dos escenarios de cambio RCP4.5 y RCP8.5 se muestra en la Figura 45.

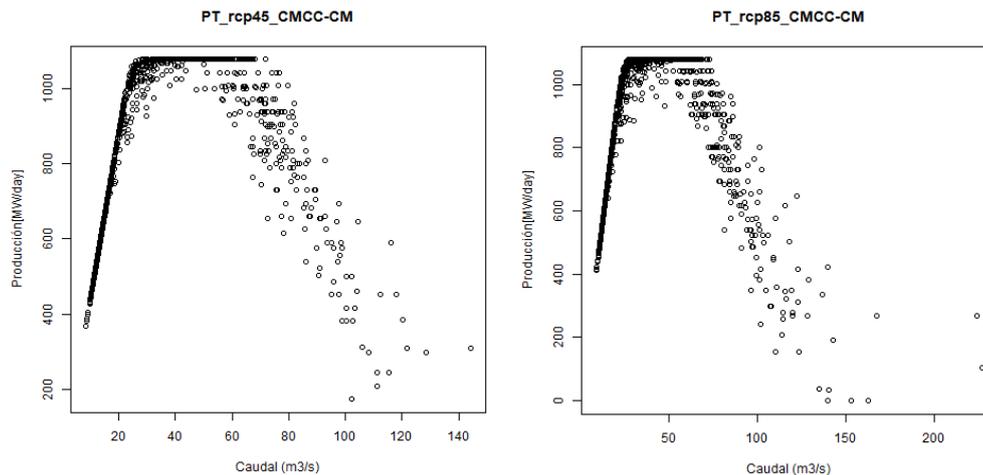


Figura 45 Producción de energía futura media mensual simulada en el escenario CMCC-CM, fuente: propia.

Tanto en el escenario RCP4.5 y RCP8.5, posiblemente se presente restricciones en la generación de energía para caudales superiores a 95m<sup>3</sup>/s, como se definió en las reglas de operación, esto se debe al incremento de concentración de sedimentos.

Considerando la alta eficiencia del modelo hidrológico, generado por la incorporación del quinto parámetro igual a 0.069, se presenta los resultados de la producción de energía mensual acumulativa en los periodos futuro cercano (2040-2070) y futuro lejano (2070-2100) en ambos escenarios de cambio climático.

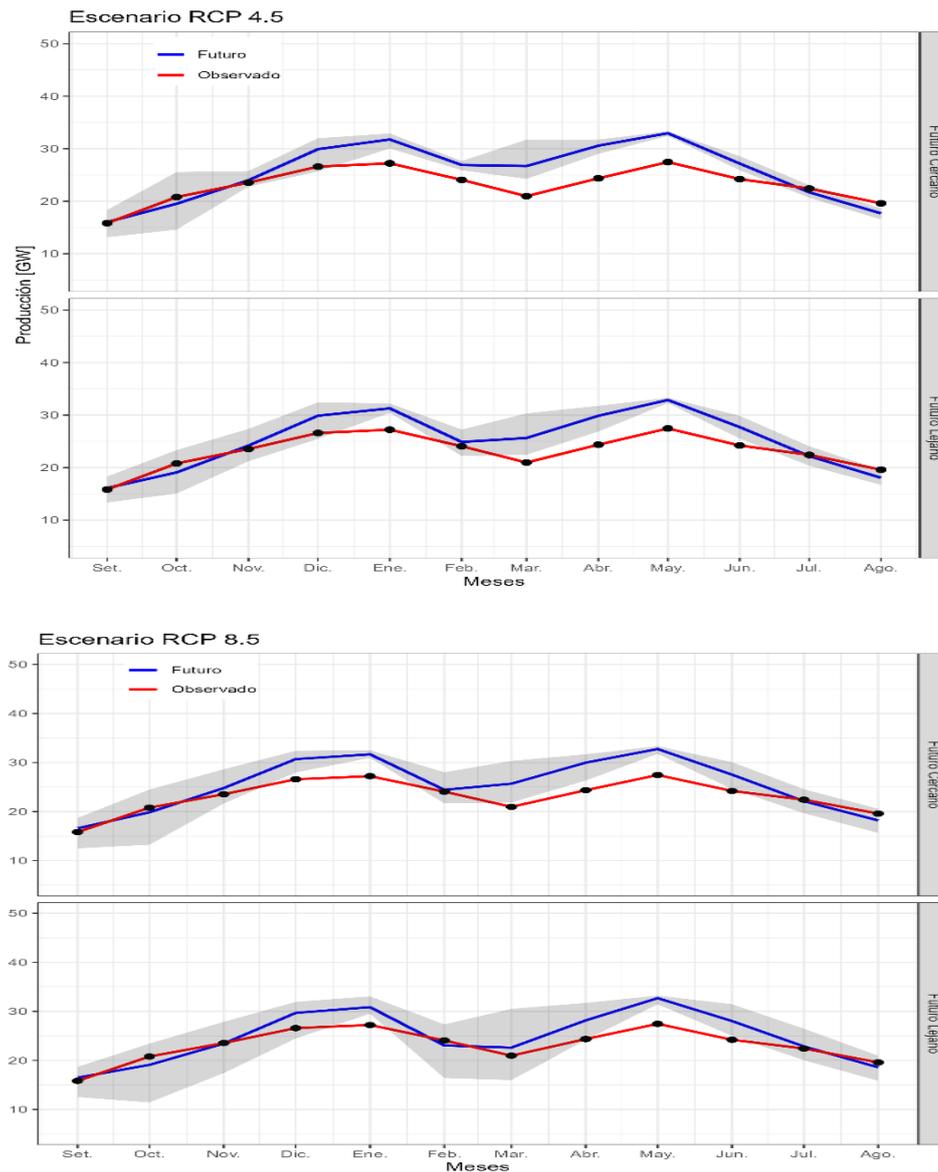


Figura 46 Proyección de la generación de energía hidroeléctrica, fuente: propia

Los resultados indicarían una mayor producción de energía promedio mensual en todos los meses salvo en el mes de setiembre y octubre, como se muestra en la Figura 46. Los resultados indicarían una producción máxima promedio mensual de 33.31 GW en el escenario RCP 4.5 para el futuro cercano y futuro lejano 33.29 GW.

En el escenario RCP 8.5 se podría producir incrementos de la producción de energía, sin embargo, el rango de variación de la producción para cada modelo GCM es mayor, tal que, durante el periodo de avenidas se podría producir reducciones de generación, dado una de las reglas de operación de operación, es

que, cuanto mayor sea la escorrentía se generaría mayores restricciones de planta por incremento de la concentración de sedimentos.

Estos resultados indicarían que posiblemente entre el mes de febrero y marzo se podría producir una mínima energía de 21.65 GW y 21.83 WG respectivamente, en el modelo inmcm4 para el futuro cercano, y en el futuro lejano se podría generar como mínimo 16.41 GW y 15.98 GW en el modelo CMCC.CM respectivamente para cada mes. Estos valores se encuentran por debajo de los valores promedios observados de 24.06 GW y 20.93 GW.

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se desarrolla una discusión detallada de los resultados obtenidos.

El primer análisis se refiere a la evaluación del proceso de interpolación de las variables climáticas de precipitación y temperatura, y la influencia en el proceso del modelo hidrológico GR4J.

El segundo análisis está enfocado en la tendencia escorrentía futura, producto del modelamiento hidrológico, considerando la mejor eficiencia del modelo hidrológico GR4J.

El tercer análisis se refiere a la tendencia producción de energía futura, dado las variaciones de la escorrentía futura, considerando los resultados del segundo análisis.

### 4.1. Análisis y validación del proceso de interpolación de las variables climáticas

Los resultados del proceso de interpolación de las variables climáticas de precipitación y temperatura en función de los métodos IDW, IED y KED que se muestran en la Figura 26 y Figura 27 respectivamente, son analizados a fin de determinar la mejor combinación de los métodos adecuados, para ser analizados en los próximos análisis.

En la Tabla 21 se resume el índice de rendimiento del modelo hidrológico GR4J, de acuerdo con las combinaciones con los métodos de interpolación IED, KED e IDW, para las variables de precipitación y temperatura como dato de entrada en el modelo hidrológico. Resultado, que mediante el método IED se tienen una buena representatividad del sistema hidrológico.

pr-tas	IED-IED	KED-IED	KED-IDW	IED-IDW	IDW-IDW
NASH	0.9117	0.9044	0.9041	0.9115	0.9016
KGE	0.9214	0.9198	0.9188	0.9205	0.8874

Tabla 21 Rendimiento del proceso de interpolación con el modelo GR4J, fuente: propia.

Los resultados mostrados en el capítulo IV fueron desarrollados, teniendo como base el proceso de interpolación IED para las variables climáticas. Desde el proceso de escalamiento de los modelos GCM y modelamiento hidrológico. Si bien es cierto, los otros resultados brindan en similitud de altos rendimientos, mediante juicio de experto y análisis de los valores de acuerdo con los niveles de

elevación de la cuenca, hacen sentido utilizar los métodos de interpolación extendidos de IED o KED. Por lo que, para este caso de estudio se considera el método IED adecuado.

#### 4.2. Análisis de los modelos climáticos (GCM)

##### a) Análisis de tendencias de la precipitación futura

Las proyecciones de la precipitación futura para los modelos de cambio climático GCM en cada escenario se muestran en la Figura 47, producto del proceso de escalamiento con la serie de valores medios en la cuenca.

En el escenario RCP 4.5 tanto para el futuro cercano (2040-2070) como futuro lejano (2070-2100) durante el periodo de estiaje, las variaciones de la precipitación de cada modelo oscilan en un rango 0.11mm, mientras que durante el periodo de avenidas estas variaciones del valor medio de los modelos GCM respecto del valor observado llega a 0.53 mm.

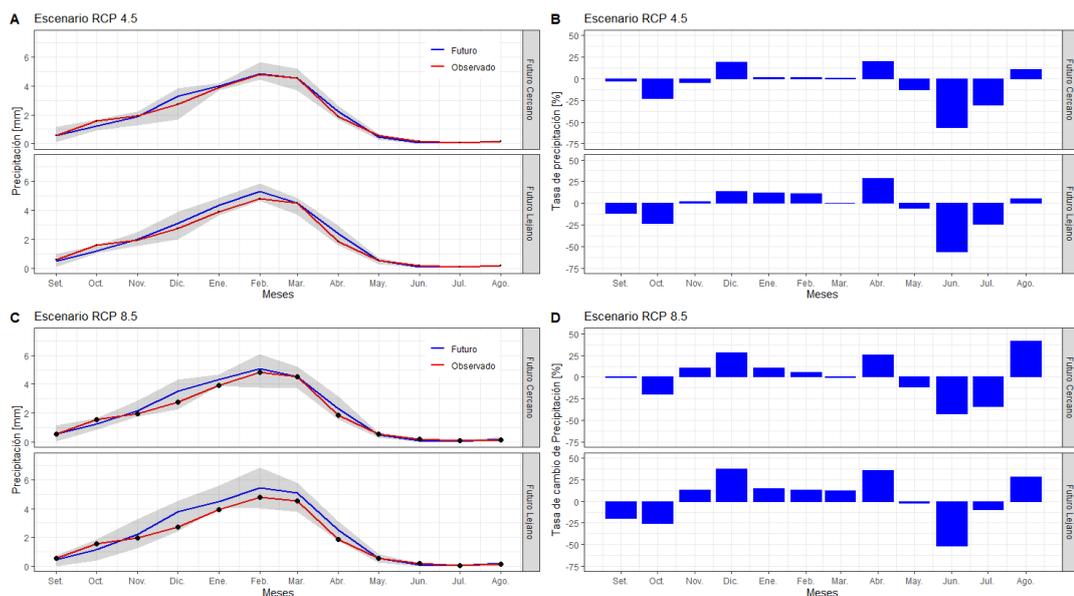


Figura 47 Proyección de los GCMs de la precipitación futura, fuente: propia.

Si bien la tasa de cambio durante el periodo de estiaje llega hasta un 56.04%, de variación en el mes de junio, esto se debe a una diferencia de 0.11mm de 0.19mm como valor observado, claramente esta diferencia no es notable en la Figura 47-A, ni en la gráfica C, por lo que, respecto a la precipitación máxima observada representaría un 2.4%.

Durante el periodo de avenidas en grado de variación de la media proyectada de los modelos GCM respecto de los valores observados, indicarían 0.53mm como

máximo, representando esto un 19% en el mes de diciembre para futuro cercano y en el futuro lejano se produciría una variación de 0.53m como máximo en el mes de abril, representando un 28% para dicho mes.

En el escenario RCP 8.5, tal como se define en el marco teórico, en este escenario no se ejecutarían políticas de cambio climático, lo cual podría generar efectos en el comportamiento de las variables climáticas como la precipitación. Estos resultados indicarían una tendencia de incremento de la precipitación, principalmente durante la temporada de avenidas, tal que, la variación máxima entre las precipitaciones proyectadas respecto de los observados sería 0.76mm, dado en el mes de diciembre, lo que equivale un 28% para el futuro cercano, y de 1.03mm para el mismo mes se generaría un incremento de 38%, como se muestra en la Figura 47-D.

Las variaciones de la precipitación futura en el periodo de estiaje indicarían una mayor variación, a pesar, de que los valores máximos llegarían a 0.08mm y 0.11mm para el futuro cercano y lejano respectivamente, los cuales representan un 42% y 53% en el mes de junio.

En cuanto al rango de oscilación de los modelos GCM, es claro que durante el periodo de avenidas sería generarían mayores dispersiones llegando 2.17mm y 1.9mm para el futuro cercano y lejano respectivamente en el escenario RCP4.5. En cuanto al escenario RCP 8.5, estas variaciones serían 2.31mm y 2.82mm respectivamente para cada periodo futuro. Lo que indicaría una mayor variación en este último escenario, con tendencia a incremento durante la temporada de avenida, mientras que durante el periodo de estiaje se esperaría disminuciones de la precipitación.

Por otro lado, el estudio de cambio climático desarrollado por Olsson et al. (2017) en la cuenca de Chancay, indicaría que la precipitación promedio de los modelos GCMs analizados, tendrían una tendencia positiva tanto para el periodo húmedo como seco bajo el escenario RCP4.5. Estos resultados tendrían una similitud a lo desarrollado en la investigación, así como lo descrito en el IPCC (2013c). Sin embargo, en los resultados obtenidos, aun los valores mínimos se encuentran por debajo de los valores observados.

#### b) Análisis de tendencias de la temperatura futura

Los efectos del incremento de gases de efecto invernadero, como lo describe correctamente el IPCC (2013b), ha tenido un incremento sustancial a partir de la segunda mitad del siglo XIX, para lo cual, los escenarios analizados en esta investigación indicaran el comportamiento de la temperatura promedio en la cuenca hasta finales del siglo XXI.

En el primer escenario RCP4.5 como se describe en el marco teórico, las proyecciones estarían bajo el cumplimiento de las políticas actuales, de acuerdo con las tendencias actuales. En ese sentido, se esperaría incrementos de la temperatura de 1°C para el futuro cercano (2040-2070) y de 1.47°C para el futuro lejano (2070-2100). Estos resultados estarían alineados con el acuerdo de Paris (Nations, 2015), de limitar el incremento de temperatura para finales del siglo en 2°C.

En el escenario RCP8.5, como se describe en el marco teórico no se aplicarían las medidas de mitigación de cambio climático, lo cual, incidirían en el incremento de gases de efecto invernadero, en consecuencia, se generaría incremento de la temperatura global. En tanto, los resultados de la investigación indicarían que en promedio se incrementaría la temperatura para el futuro cercano en 1.68°C y en el futuro lejano se daría en 3.51°C.

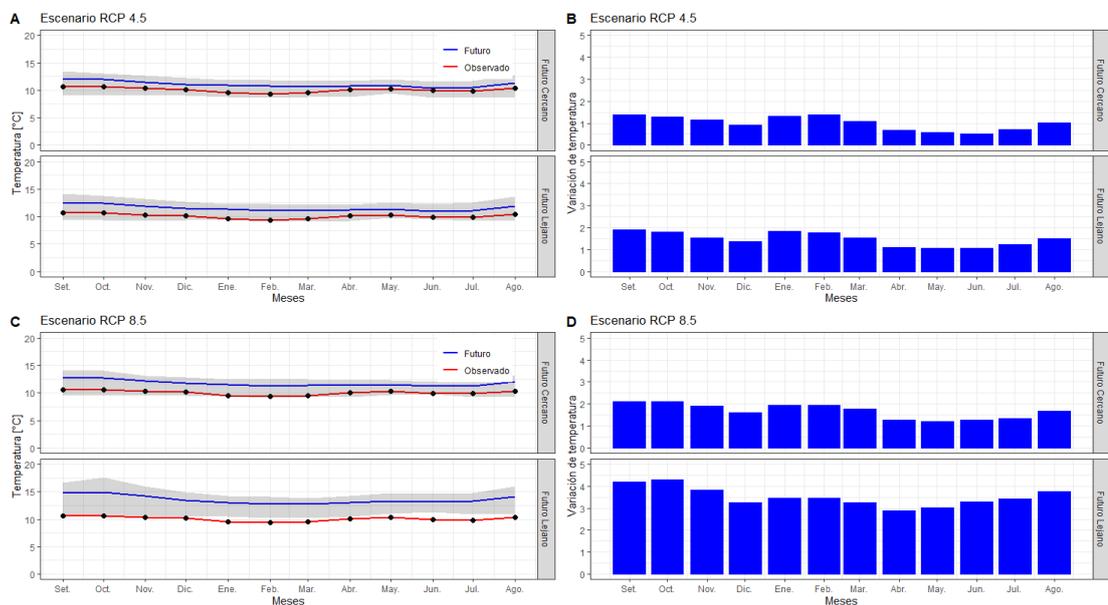


Figura 48 Proyección de los GCMs de la temperatura futura, fuente: propia.

En los estudios por Olsson et al. (2017) en la cuenca de Chancay, indicarían que el incremento de la temperatura en el escenario RCP4.5 bajo el proceso de

escalamiento por Bias Correction estará entre 0.3 a 2.5°C (el promedio de los GCM 1.5°C), mientras que en el escenario RCP8.5 entre 0.4 a 2.7°C (el promedio de los GCM 1.9°C).

En general, las tendencias indican incremento de la temperatura promedio para ambos escenarios de cambio climático, con mayor rango de variación en el escenario RCP 8.5, llegando a 6.90°C entre el mínimo y máximo, mientras que en el escenario RCP4.5 la variación máxima sería de 4.77°C.

#### 4.3. Análisis del modelamiento hidrológico

Los análisis de la esorrentía futura en función de los tres casos ( $Kc=1$ ,  $Kc=0.52$  y  $Kc=0.069$ ) del modelamiento hidrológico GR4J, se muestra a continuación, para lo cual, se tiene énfasis en los rendimientos del modelo y los parámetros de calibración que ingresan al modelo para la proyección de caudales futuros.

Si bien los rendimientos en cada uno de los casos son altos como se muestra en la Tabla 22, es importante indicar, que de no considerar este quinto parámetro de coeficiente de cultivo en el modelo hidrológico GR4J, los resultados hubieran indicado disminuciones importantes en la esorrentía futura y producción de energía. En ese sentido, con la metodología proporcionada por D. Ruelland et al. (2014), se incluye este factor multiplicativo en la evapotranspiración, a fin de representar las características del tipo de suelo, que en ese caso es una cuenca de alta montaña, con gran porcentaje de pajonal andino.

	KGE	NSE
<b>kc=0.069</b>	0.9298	0.9117
<b>kc=0.52</b>	0.9234	0.8843
<b>kc=1</b>	0.8835	0.8172

Tabla 22 Rendimientos para cada caso del modelamiento hidrológico, fuente: propia.

De acuerdo con D. Ruelland et al. (2014) este parámetro de la cuenca debe estar entre 5% a 11.9%, que para el estudio se determinó que con un 6.9% se obtiene el mejor rendimiento del modelo. Adicionalmente, considerando que la investigación es académica, se calcula un coeficiente de cultivo igual a 0.52. Finalmente, a fin de considerar que este factor no es incluido en el modelo se toma el coeficiente de cultivo igual a 1.

Parámetros	X1	X2	X3	X4
<b>kc=0.069</b>	1.203408	- 0.000642	0.097219	2.400641

<b>kc=0.52</b>	1.510204	- 0.000110	0.054598	2.530030
<b>kc=1</b>	0.000002	- 0.001786	0.827484	2.100600
Rango de valores Recomendados	0.1 a 1.2	-0.005 a 0.003	0.02 a 0.3	1.1 a 2.9

Tabla 23 Parámetros del modelo hidrológico GR4J, para cada caso de evaluación, fuente: propia.

Los parámetros calibrados de cada caso del modelo hidrológico se muestran en la Tabla 23, cuyos valores difieren principalmente del parámetro X1, tanto que para el  $kc=1$ , el valor se encuentra fuera del rango recomendado por Perrin et al., (2007), mientras que el  $kc=0.52$ , se encuentra también fuera por 0.31 respecto al valor recomendado, y el para el  $kc=0.069$  ligeramente fuera también del rango recomendado. En cuanto a los otros parámetros X2, X3 y X4 se entran dentro del valor recomendado.

#### 4.4. Análisis de la escorrentía futura

Como se discutió anteriormente, el modelo hidrológico que presenta un mejor ajuste al registro histórico de caudales es el que considera el coeficiente de cultivo igual a 0.069, para lo cual, los parámetros calibrados brindan una alta eficiencia del modelo, estos son considerados en la proyección de caudales futuros. Contemplando como dato de entrada la serie de valores de precipitación y temperatura escaladas de cada modelo GCM.

Los resultados de la temperatura futura, como se muestra en la Figura 48, indicarían un incremento tanto para el escenario RCP4.5 y RCP8.5. La incidencia de esta variable con la escorrentía futura tienen poca incidencia, ya que, al transformar esta variable en evapotranspiración por el método de Oudin et al. (2005), es controlado por el coeficiente de cultivo, que reduce su valor en un 6.9%.

Por otro lado, los resultados de la precipitación futura de los modelos GCM indicarían que probablemente el valor medio mensual tenga incrementos, sin embargo, la variación de estos resultados se encuentra alrededor de los valores observados. Por lo que, no se puede confiar de la tendencia media.

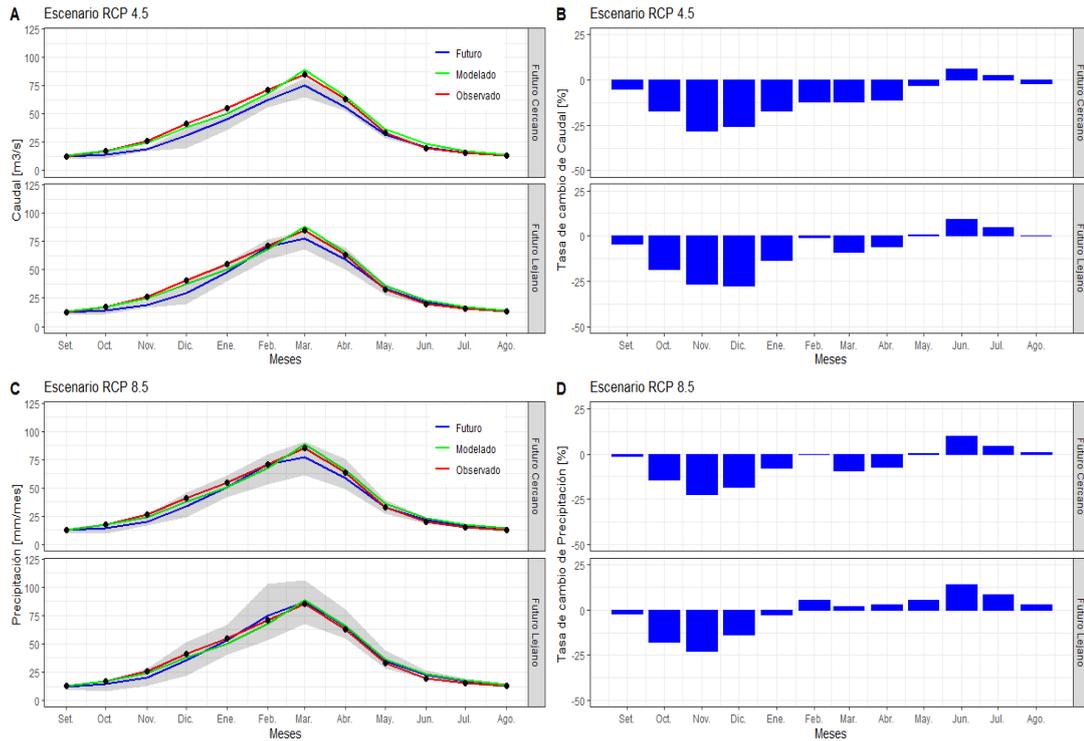


Figura 49 Proyección de la escorrentía futura en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5,  $k_c=0.069$ , fuente: propia

Los resultados de la escorrentía futura se analiza la variación, mediante la tasa de cambio entre la media de los caudales proyectados por los modelos GCM, en el futuro cercano (2040-2070) y el futuro lejano (2070-2100), con los caudales observados y simulados del proceso de modelamiento hidrológico, como se muestra en la Figura 49.

La tendencia de la tasa de cambio indica que probablemente haya disminuciones entre los meses de setiembre a abril en el escenario RCP 4.5, los cuales podrían llegar hasta 28.35% en el mes de noviembre para el futuro cercano. Mientras, en el escenario RCP8.5 estas disminuciones se podrían darse entre setiembre a enero principalmente, llegando hasta 22.77% en el mismo mes para el futuro lejano. Estos resultados de la tasa de cambio podrían tener incidencia por el proceso de modelamiento hidrológico, en ese sentido, en la Tabla 24 y Tabla 25, se muestra la tasa de cambio con respecto al modelado.

TC - FC	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
Q - Observado	-4.91%	-16.90%	-28.35%	-25.46%	-16.90%	-12.12%	-11.98%	-11.09%	-3.18%	5.83%	2.30%	-2.07%	-10.40%
Q - Modelado	-7.94%	-16.90%	-22.79%	-19.09%	-9.21%	-7.73%	-15.28%	-14.80%	-11.94%	-10.61%	-9.82%	-8.53%	-12.89%

TC - FL	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
Q - Observado	-4.38%	-18.56%	-26.60%	-27.43%	-13.46%	-0.98%	-9.20%	-6.02%	0.70%	9.02%	4.62%	0.01%	-7.69%
Q - Modelado	-7.41%	-18.58%	-20.89%	-21.23%	-5.45%	3.97%	-12.60%	-9.94%	-8.41%	-7.95%	-7.77%	-6.54%	-10.23%

Tabla 24 Tasa de cambio de la escorrentía futura en el escenario RCP4.5, con respecto al caudal modelado y observado, fuente: propia.

TC - FC	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
Q - Observado	-1.35%	-14.53%	-22.30%	-18.20%	-7.72%	-0.20%	-9.37%	-7.49%	0.02%	9.70%	4.41%	0.95%	-5.51%
Q - Modelado	-4.48%	-14.55%	-16.26%	-11.23%	0.82%	4.80%	-12.76%	-11.36%	-9.03%	-7.35%	-7.95%	-5.69%	-7.92%
TC - FL	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
Q - Observado	-2.17%	-17.95%	-22.77%	-13.95%	-2.76%	5.50%	2.11%	3.12%	5.56%	13.92%	8.30%	3.12%	-1.50%
Q - Modelado	-5.27%	-17.96%	-16.77%	-6.61%	6.25%	10.79%	-1.72%	-1.20%	-3.99%	-3.79%	-4.51%	-3.67%	-4.04%

Tabla 25 Tasa de cambio de la escorrentía futura en el escenario RCP8.5, con respecto al caudal modelado y observado, fuente: propia.

Los valores que se muestran sombreados con un gris más oscuro son lo que están influenciado por el modelamiento hidrológico, en mayor medida que los que tienen un sombreado más tenue. Mientras, los valores que no se encuentran sombreado y que corresponde a los periodos de estiaje estarían influenciados por los modelos climáticos GCM.

Por otra parte, la tasa de cambio promedio anual difiere entre el observado y modelado, tal que, en el escenario RCP4.5 sería de -10.40% y -12.89% respectivamente para cada tipo de valor en el futuro cercano, mientras que, en el futuro lejano estos valores serían de -7.69% y -10.23% respectivamente para cada tipo de valor de referencia.

En cuanto al escenario RCP8.5 se podría presentar que el promedio anual de la tasa de cambio sea menor, tal que, en el escenario RCP4.5 los valores para el futuro cercano serían de -5.51% y -7.92% respectivamente para cada valor (observado – modelado). Mientras que, para el futuro lejano estas variaciones serían menores de -1.5% y -4.04%, como se muestra en las tablas anteriores.

Bajo estas variaciones de los caudales futuros, probablemente la escorrentía promedio futura no tenga impactos, por el incremento de la temperatura u otros efectos del cambio climático. Esto dado que, en promedio las variaciones se encuentran dentro del rango de oscilación de los caudales futuros.

Por otra parte, en la cuenca vecina de Chancay – Huaral (separado por la cuenca Huaura), se desarrolló el estudio de escalamiento de proyecciones climáticas, mediante el modelo hidrológico WEAP (Humedad – suelo), el cual fue elaborado por Olsson et al., (2017). Los resultados de esta investigación indican que posiblemente los efectos del cambio climático en la escorrentía tengan incrementos de hasta 31% en la cuenca, los cuales están influenciados por el potencial acumulación de nieve que utiliza en el modelo, y que está considerando el derretimiento en la variable de precipitación (Jack Sieber & David Purkey, 2015), adicionalmente, para el desarrollo de este estudio se empleó otras variables como

velocidad de viento y humedad relativa. Mientras, que en la presente investigación no se contó con información completa para poder aplicar este modelo, por lo que, a fin de disminuir la incertidumbre en el proceso se utilizó el modelo GR4J, un modelo que utiliza una serie de ecuaciones para simular el balance de agua y obtener un caudal de salida, utilizando dos parámetros de entrada.

Otra de las diferencias con el estudio por Olsson et al., (2017), es que fueron desarrollados con una frecuencia mensual, por lo que, no es apropiado realizar el análisis comparativo entre ambos estudios. Sin embargo, en el anexo I se muestra los resultados del impacto del cambio climático en la escorrentía con una frecuencia mensual, considerando los nuevos escenarios del AR6. Los resultados indicarían, dentro del rango de incertidumbre correspondiente, incrementos de la escorrentía cercanos a los valores obtenidos por Olsson et al., (2017).

Adicionalmente, otro estudio de cambio climático cercano a la cuenca es el modelamiento de escorrentía de deshielo de glaciares bajo escenarios de cambio climático en la subcuenca del río Santa, el cual fue desarrollado por Calizaya et al., (2021), cuyo resultado de la escorrentía futura en el escenario RCP4.5 posiblemente se generen incrementos durante el periodo de avenidas y disminuciones en el periodo de estiaje, mientras que en el escenario RCP8.5, los caudales futuros durante el periodo de avenidas se encuentra por debajo del registro histórico, caso contrario en el periodo de estiaje.

Bajo estos estudios que fueron desarrollados en cuencas cercanas a la cuenca de Pativilca, se podría indicar que los resultados finales de la escorrentía futura dependen en gran medida del proceso de calibración y validación del modelo hidrológico y de los parámetros de entrada que ingresan en cada modelo, ya que, a medida que el proceso más complejo y contempla más variables, la incertidumbre se incrementa. Por lo que, con certeza no se puede concluir si la tendencia es creciente o decreciente.

Por otro lado, es probable que se presenten picos que superen los 300m<sup>3</sup>/s en el escenario RCP4.5, y en otros casos caudales que lleguen hasta los 600m<sup>3</sup>/s en el escenario RCP8.5, como se muestra en la Figura 38 y Figura 39. Si bien esos resultados no se pueden aseverar con certeza la ocurrencia, si se pudiera recomendar tomar medidas ante posibles incrementos de caudales en el futuro, considerando los resultados de los modelos de cambio climático, siendo esto la herramienta más cercana para proyectar la climatología futura.

En conclusión, el modelamiento hidrológico considerando el coeficiente de cultivo igual a 0.069 presenta un alto rendimiento, así como la tendencia de los valores promedios mensuales modelados tienen una similitud alta a los caudales observados, adicionalmente que este factor se encuentra en el rango de valores recomendados por D. Ruelland et al. (2014), así como los parámetros calibrados se encuentran en el rango recomendado por Perrin et al., (2007). En ese sentido, es recomendable desarrollar modelos con alta eficiencia a fin de disminuir las incertidumbres en las proyecciones de escurrimiento futura. Para lo cual, en la presente investigación se cumple con el objetivo de desarrollar un modelo hidrológico que represente el sistema hidrológico de manera simplificada.

En cuanto a los escenarios de cambio climático, la tasa de cambio promedio anual indicaría una disminución máxima de -10.40% respecto de los caudales observados, en ambos escenarios de cambio climático, considerando también que la eficiencia del modelo hidrológico es 0.91, se podría concluir que probablemente la escurrimiento no tenga impactos en la tendencia mensual, sin embargo, aún hay un amplio rango de incertidumbre.

#### 4.5. Generación Hidroeléctrica

El modelo de generación de energía hidroeléctrica desarrollado en el estudio como se muestra en el capítulo 4.4 de resultados, presenta resultados confiables, frente a otros procesos de modelamiento de generación de energía, ya que estos métodos son complejos, puesto que incorporan la oferta y la demanda en el sistema interconectado nacional administrado por el COES, así como periodos de mantenimiento en otras plantas.

Este proceso de modelamiento energético de la central hidroeléctrica, bajo las reglas de operación consideradas en el presente estudio, indican un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.82, lo cual es alto. Adicionalmente, el concepto de este modelamiento es involucrar la mínima cantidad, ya que, cuanto más complejo es el proceso, la incertidumbre se amplía.

Tomando en cuenta los resultados de alta eficiencia del modelamiento hidrológico para la proyección de la escurrimiento futura, se obtienen los resultados del caudal en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, que se muestran en la Figura 40 y Figura 41 respectivamente. El cual ingresa como dato de entrada en el modelo de generación de energía planteado, resultando un comportamiento similar a los

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO:  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA

resultados observador en las Figura 44 y Figura 45 de caudal y producción de energía. Bajo estos resultados se da por validado el modelo de generación de energía, teniendo en cuenta los límites de este modelo.

a) Producción de energía futura

En este capítulo, el análisis consta en evaluar la variación porcentual de la producción de energía futura respecto al registro histórico de la información como se muestra en las gráficas B y D de la Figura 50.

Los resultados de la producción de energía futura que se muestran en la Figura 46 en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, indicarían un incremento de generación desde el mes de noviembre hasta el mes de julio, para ambos casos.

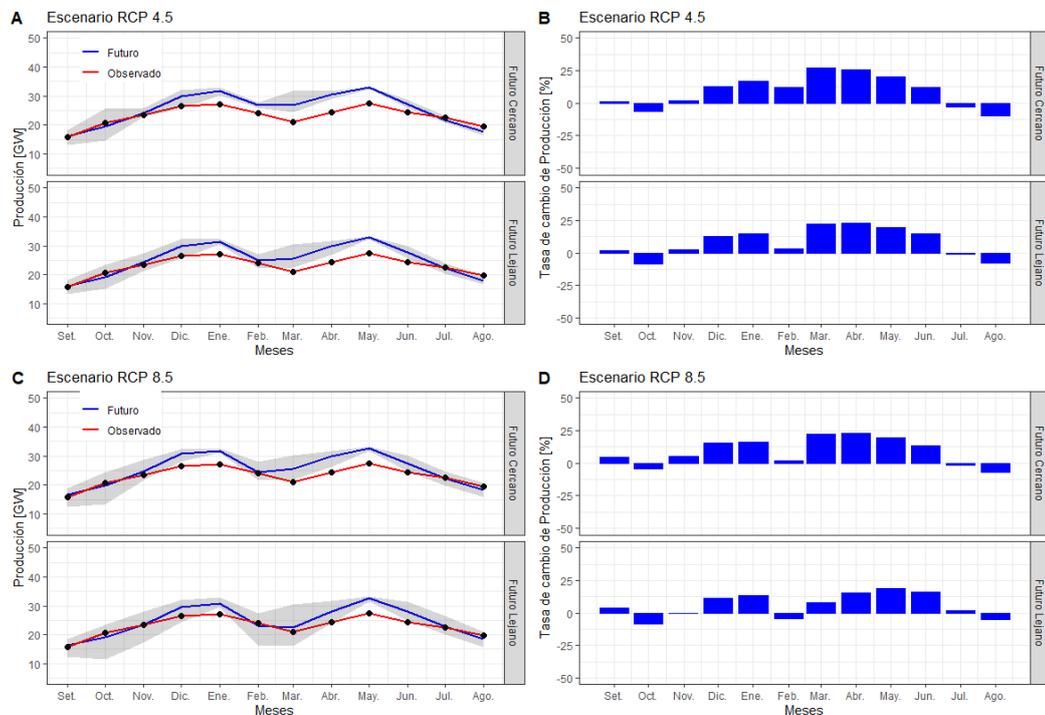


Figura 50 Proyección de la generación de energía hidroeléctrica en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5

Si bien la escorrentía media mensual futura que se muestra en la Figura 49 en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 indicarían, que en promedio los caudales estarían por debajo del caudal observado y modelado, los resultados del proceso de modelamiento probablemente tengan un incremento, esto dado que el máximo caudal turbinado requiere los equipos de generación para una máxima eficiencia es  $24\text{m}^3/\text{s}$ . Por lo que, entre los meses de diciembre a junio se cumpliría este

requerimiento, sin embargo, durante este periodo de avenidas principalmente entre los meses de febrero y marzo, también se podrían generar restricciones de generación por incremento de sólidos en suspensión.

La tendencia media de la producción de energía mensual en el escenario RCP4.5 indicaría que, entre los meses de octubre a julio, probablemente se tenga incrementos de la producción de energía de hasta un 27.35%, durante el periodo de avenidas en el futuro cercano, y de 22.62% en el futuro lejano. Una de las principales diferencias es que, durante el mes de febrero va disminuyendo, tal que, en el escenario RCP8.5 se podría generar hasta una disminución en -4.23%, e inclusive más del valor promedio, como se muestra en la gráfica C de la Figura 50.

TC - FC	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
RCP4.5	1.30%	-6.15%	1.93%	12.50%	16.67%	11.77%	27.35%	25.55%	20.02%	12.26%	-3.18%	-9.74%	9.19%
RCP8.5	4.82%	-4.56%	5.36%	15.45%	16.37%	1.57%	22.53%	23.07%	19.30%	13.74%	-1.34%	-7.13%	9.10%

TC - FL	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
RCP4.5	1.81%	-8.23%	2.77%	12.40%	14.91%	3.38%	22.31%	22.62%	19.74%	14.49%	-1.04%	-7.84%	8.11%
RCP8.5	4.17%	-8.18%	-0.45%	11.63%	13.35%	-4.23%	7.83%	15.61%	19.07%	15.78%	1.90%	-5.13%	5.95%

Tabla 26 Tasa de cambio de la producción de energía futura en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para futuro cercano (FC) y futuro lejano (FL), fuente: propia.

Si bien el escenario RCP 8.5 indica que, ante el incremento de las emisiones de gases de efecto, no se tomaran medidas políticas para mitigar este efecto. Los resultados la producción de energía en este caso poco probable, indicaría incrementos en menor medida para el periodo de avenidas a comparación del escenario RCP4.5, esto se debe a una de las reglas operativas que para caudales mayores a 95 m<sup>3</sup>/s se limita la generación de energía, ya que, la concentración de sólidos afectaría los rodets. En ese sentido como se muestra en los resultados no se esperaría incrementos sustanciales en los periodos de avenida, sin embargo, el rango de variación de los modelos climáticos en el futuro lejano indicaría que se podría presentar mayores restricciones de la producción.

En conclusión, la producción de energía futura probablemente tenga incrementos, tanto para el futuro cercano como lejano, siendo uno de los meses críticos febrero, ya que, se generarían restricciones de planta por los altos caudales y más aún en el escenario RCP8.5, que podría tener caudales hasta los 600m<sup>3</sup>/s.

#### 4.6. Impacto en la generación hidroeléctrica

El impacto del cambio climático en la generación de energía hidroeléctrica se desarrolló para cada modelo de circulación general (GCM) en los escenarios RCP 4.5 y 8.5, y como se ha visto en el análisis meteorológico de cada variable (precipitación y temperatura), tienen una tendencia creciente, principalmente la temperatura, que podría variar hasta 4.77°C en el escenario RCP8.5 en el futuro lejano, mientras que en el escenario RCP4.5 variaría hasta 2.5°C en el futuro lejano.

En cuanto a la precipitación futura probablemente se presente una tendencia positiva en el periodo húmedo, mientras que en el periodo de estiaje se podría generar disminuciones. Entre estas dos estaciones, se tiene más incertidumbre los resultados del periodo húmedo, ya que capturar los valores picos en la variabilidad es poco certero, sin embargo, en los valles se atenúa estos valores.

En cuanto a los 3 casos del modelamiento hidrológico ( $K_c=1$ ,  $K_c=0.069$  y  $K_c=0.52$ ), es notable la variación de los resultados en el modelamiento, sin embargo, bajo las recomendaciones de parámetros por los desarrolladores, el caso que mejor representa el sistema hidrológico es con el coeficiente de cultivo igual a 0.069. Por lo que, los parámetros calibrados del modelo brindaran la representación más próxima de los caudales futuros en los escenarios de cambio climático.

Los resultados de la esorrentía futura indicarían en promedio una probable disminución, sin embargo, la franja de incertidumbre que se muestra en las gráficas A y C de la Figura 49, es probable también que existan caudales futuros que se encuentren por encima de los valores observados, y más aún en el escenario RCP8.5. Por lo que, teniendo en cuenta que la tasa de cambio es menor a un 13% y considerando que eficiencia del modelo hidrológico es 0.91, existe un porcentaje de error, en tal sentido, es probable que no se generen impactos en la esorrentía media mensual.

La función de generación planteada en la presente investigación es un modelo simplificado, que trata de representar la operación de una central hidroeléctrica en el sistema interconectado nacional (SEIN), por lo que, los resultados deben ser considerados referenciales, ya que, no toma en cuenta la interacción del crecimiento de la demanda y el aporte de energía de otras plantas de generación de energía, adicionalmente no se considera aportes de nuevas fuentes de

energías renovables en el sistema. Sin embargo, el modelo propuesto logra representar adecuadamente, la producción de energía.

La generación de energía futura en promedio indicaría incrementos en la mayoría de los meses, como se muestra en la Figura 50, sin embargo, durante el periodo de avenidas probablemente se genere impactos significativos en la infraestructura, dado que, posiblemente haya caudales que superen los 300m<sup>3</sup>/s e inclusive podrían llegar hasta los 600m<sup>3</sup>/s, y ello no solo podría restringir la generación por el periodo que dura las avenidas, sino, también la restricción podría llegar a ser por el periodo de mantenimiento. En ese sentido, se recomienda mantener adecuadamente el cauce del río a fin de aliviar lo máximo posible las máximas avenidas.

Es importante considerar los resultados de la investigación de forma referencial, ya que, el modelo presentado fue desarrollado con el enfoque académico.

## CONCLUSIONES

El impacto del cambio climático en la generación de energía hidroeléctrica, podrían generar incrementos en la producción de energía de hasta un 25.55% en el escenario RCP4.5 y en menor medida incrementos de 23.07% en el escenario RCP8.5 para el futuro cercano (2040-2070). Además, para el futuro lejano (2070-2100) los incrementos de la producción de energía podrían llegar a 22.62% y 19.07%, respectivamente para cada escenario de cambio climático (RCP4.5 y RCP8.5).

Respecto a las variaciones de precipitación y temperatura, la primera variable podría tener incrementos durante periodo de avenidas y disminuciones en el periodo de estiaje, de hasta un 56.04% en el mes de junio, para el escenario climático RCP 4.5. Mientras, que en el escenario RCP 8.5 se podría generar una variación de 53% en un futuro lejano (2070-2100), con respecto al periodo histórico. Con respecto a la temperatura, se esperaría un aumento promedio de temperatura en un 1°C para el futuro cercano y de 1.47°C para futuro lejano, en el escenario RCP4.5. Mientras, que en el escenario RCP8.5, se esperaría incrementos de la temperatura media para el futuro cercano de 1.68°C y en el futuro lejano podría llegar a 3.51°C.

El modelo hidrológico GR4J, definido con los parámetros:  $X1=1.2034$ ,  $X2=-0.000642$ ,  $X3=0.097219$ ,  $X4=2.400641$  y  $X5=0.069$ , representaría el ciclo hidrológico de la cuenca Pativilca, alcanzando índices de desempeño de KGE de 0.9298 y un NSE de 0.9117. Respecto del parámetro  $X5$ , esto ha sido incorporado, dado la recomendación de D. Ruelland et al. (2014), por tratarse de una cuenca de alta montaña.

La esorrentía promedio futura probablemente no tendrá impactos significativos para ambos escenarios de cambio climático (RCP4.5 y RCP8.5), para el futuro cercano y futuro lejano, ya que, los resultados de la tasa de cambio anual serían menores a un 13% (RCP4.5), e inclusive en el escenario RCP8.5 esta variación sería un 7.69%. Sin embargo, se aprecia que, existirían ligeros incrementos en algunas épocas del año.

Los resultados del impacto del cambio climático en la generación de energía futura indicarían un incremento de la producción de energía para ambos escenarios de cambio climático, tal que, podría llegar hasta un 25.55% en el escenario RCP4.5

y de 23.07% en el escenario RCP8.5 para el futuro cercano, y en el futuro lejano se podría llegar este incremento hasta 22.62% y 19.07% respectivamente para cada escenario.

## RECOMENDACIONES

Para comprender el comportamiento del clima futuro en cada escenario de cambio climático, se recomienda disponer de por lo menos 20 a 30 años de información climatología.

Para la selección del modelo hidrológico se recomienda considerar los siguientes aspectos: disponibilidad de información respecto a la extensión de datos, por ejemplo, el modelo hidrológico GR4J solo requiere dos parámetros de entrada como la precipitación y evapotranspiración. Si bien existe otros modelos hidrológicos, estos requieren otros parámetros.

Se recomienda que en la cuenca se instalen evaporímetros a fin de registrar valores, ya que esta variable es importante en la calibración del modelo hidrológico, como el GR4J.

Si bien los resultados del modelo de producción de energía eléctrica presentan un índice de desempeño aceptable (0.88), sería recomendable evaluar el impacto del cambio climático, considerando las reglas de operación de todo el sistema interconectado nacional. Al respecto, esto incluye el balance oferta y demanda, y la complementariedad de otras fuentes de generación de energía (eólica, solar entre otras)

Dado que el cambio climático en la cuenca de Pativilca podría expresarse como una ligera disminución de la esorrentía futura, esto se manifiesta como un riesgo a otros agentes económicos como la agricultura, industrias, etc. Por lo que, se recomienda avanzar con planes de Gestión de Integral de cuencas hidrográficas, así como, el que fue desarrollado en la publicación de CEPAL (2014) “La economía del cambio climático en el Perú”.

Si bien los resultados de la presente investigación indicarían un incremento en la producción de energía futura de la central hidroeléctrica en estudio, aún existe muchas variables que deben ser consideradas para un entendimiento holístico como los impactos en las infraestructuras hidráulicas (Bocatomas), sedimentos, equipos electromecánicos, costos marginales, entre otros. Para lo cual, se recomienda analizar como un sistema, por lo que, la investigación brinda la oportunidad de explorar la evaluación de cambio climático en otros componentes.

**REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS**

- Ahmed, K. F., Wang, G., Silander, J., Wilson, A. M., Allen, J. M., Horton, R., & Anyah, R. (2013). Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast. *Global and Planetary Change*, *100*, 320–332. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.003>
- Ali, S. R., & Khan, J. N. (2021). Bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in central kashmir. *Indian Journal of Ecology*, *48*(1), 281–286.
- Andréassian, V., Bourgin, F., Oudin, L., Mathevet, T., Perrin, C., Lerat, J., Coron, L., & Berthet, L. (2014). Seeking genericity in the selection of parameter sets: Impact on hydrological model efficiency. *Water Resources Research*, *50*(10), 8356–8366. <https://doi.org/10.1002/2013WR014761>
- Argüeso, D., Evans, J. P., Fita, L., & Bormann, K. J. (2014). Temperature response to future urbanization and climate change. *Climate Dynamics*, *42*(7–8), 2183–2199. <https://doi.org/10.1007/S00382-013-1789-6/METRICS>
- Bodian, A., Dezetter, A., Diop, L., Deme, A., Djaman, K., & Diop, A. (2018). Future Climate Change Impacts on Streamflows of Two Main West Africa River Basins: Senegal and Gambia. *Hydrology* 2018, Vol. 5, Page 21, 5(1), 21. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY5010021>
- Bozkurt, D., Bromwich, D. H., Carrasco, J., Hines, K. M., Maureira, J. C., & Rondanelli, R. (2020). Recent Near-surface Temperature Trends in the Antarctic Peninsula from Observed, Reanalysis and Regional Climate Model Data. *Advances in Atmospheric Sciences*, *37*(5), 477–493. <https://doi.org/10.1007/S00376-020-9183-X/METRICS>
- Buytaert, W. (2011). *topmodel: implementation of the hydrological model TOPMODEL*. <https://cran.r-project.org/web/packages/topmodel/index.html>
- Cabrera, J. (2009). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Imefen.Uni.Edu.Pe*, *1*, 1–7. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos distribuidos. *Rhama*, *8*. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_1.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf)
- Caceres, A. L., Jaramillo, P., Matthews, H. S., Samaras, C., & Nijssen, B. (2021). Hydropower

- under climate uncertainty: Characterizing the usable capacity of Brazilian, Colombian and Peruvian power plants under climate scenarios. *Energy for Sustainable Development*, 61, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.02.006>
- Calizaya, E., Mejía, A., Barboza, E., Calizaya, F., Corroto, F., Salas, R., Vásquez, H., & Turpo, E. (2021). Modelling snowmelt runoff from tropical andean glaciers under climate change scenarios in the santa river sub-basin (Peru). *Water (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/w13243535>
- Carranza, F. (2008). *Mejoramiento De Potencia De La Central Hidroeléctrica Cahua*.
- CENERGIA. (2016). Estudio de determinación de la potencia efectiva de la central Hidroeléctrica de Cahua, COES - Ensayo de potencia efectiva. *Centro de Conservación de Energía y Del Ambiente*.
- CEPAL. (2014). *La economía del cambio climático en el Perú*. 1–152. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37419/1/S1420992\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37419/1/S1420992_es.pdf)
- Chen, L., Chang, J., Wang, Y., & Zhu, Y. (2019). Assessing runoff sensitivities to precipitation and temperature changes under global climate-change scenarios. *Hydrology Research*, 50(1), 24–42. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.192>
- Chilkoti, V., Bolisetti, T., & Balachandar, R. (2017). Climate change impact assessment on hydropower generation using multi-model climate ensemble. *Renewable Energy*, 109, 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.041>
- Chow, V. Te. (1994). Índice 9. In *Potencia*.
- Climate Explorer: Select a monthly field*. (n.d.). Retrieved July 14, 2021, from [https://climexp.knmi.nl/selectfield\\_cmip5.cgi?id=someone@somewhere](https://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip5.cgi?id=someone@somewhere)
- CMIP5. (2013). *CMIP5 Data Search | CMIP5 | ESGF-CoG*. <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>
- CMIP6. (n.d.). Retrieved July 15, 2021, from <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>
- COES. (2017). *Nuevo Procedimiento Técnico del COES N°18 "Determinación de la Potencia Efectiva de Centrales Hidroeléctricas"*.

- COES SINAC. (2015). DETERMINACIÓN DE LA ENERGIA FIRME Y VERIFICACIÓN DE LA COBERTURA DE LA ENERGÍA ANUAL COMPROMETIDA. *Osinergmin*, 18.
- Coppola, E., Raffaele, F., Giorgi, F., Giuliani, G., Xuejie, G., Ciarlo, J. M., Sines, T. R., Torres-Alavez, J. A., Das, S., Sante, F. di, Pichelli, E., Glazer, R., Müller, S. K., Omar, S. A., Ashfaq, M., Bukovsky, M., Im, E.-S., Jacob, D., Teichmann, C., ... Rechid, D. (2021). Climate hazard indices projections based on CORDEX-CORE, CMIP5 and CMIP6 ensemble. *Climate Dynamics* 2021, 1–91. <https://doi.org/10.1007/S00382-021-05640-Z>
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., & Andréassian, V. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling and Software*, 94, 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>
- Dahri, Z. H., Ludwig, F., Moors, E., Ahmad, S., Ahmad, B., Ahmad, S., Riaz, M., & Kabat, P. (2020). Climate change and hydrological regime of the high-altitude Indus basin under extreme climate scenarios. *Science of The Total Environment*, 768, 144467. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144467>
- Dodson, R., & Marks, D. (1997). Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Climate Research*, 08(1), 1–20. <https://doi.org/10.3354/CR008001>
- Drogue, G., Humbert, J., Deraisme, J., Mahr, N., & Freslon, N. (2002). A statistical–topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall. *International Journal of Climatology*, 22(5), 599–613. <https://doi.org/10.1002/JOC.671>
- Eyring, V., Flato, G., Meehl, J., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R., & Taylor, K. (2018). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev*, 9. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fang, G. H., Yang, J., Chen, Y. N., & Zammit, C. (2014). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 11, 12659–12696. <https://doi.org/10.5194/hessd-11-12659-2014>
- FAO. (2021). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinacion de los

requerimientos de agua de los cultivos. *ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE*.

Finardi, E. C. (2003). *Alocação de unidades geradoras hidrelétricas em sistemas hidrotérmicos utilizando relaxação lagrangeana e programação quadrática seqüencial*. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/85210>

Frans, C., Istanbuloglu, E., Lettenmaier, D. P., Naz, B. S., Clarke, G. K. C., Condom, T., Burns, P., & Nolin, A. W. (2015). Predicting glacio-hydrologic change in the headwaters of the Zongo River, Cordillera Real, Bolivia. *Water Resources Research*, 51(11), 9029–9052. <https://doi.org/10.1002/2014WR016728>

Gaudard, L., Romerio, F., Dalla Valle, F., Gorret, R., Maran, S., Ravazzani, G., Stoffel, M., & Volonterio, M. (2014). Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps. *Science of the Total Environment*, 493, 1211–1221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.012>

Giorgi, F. (2008). Regionalización de la información sobre el cambio climático para la evaluación de impactos y la adaptación a los mismos. *Boletín de La OMM* 57, 86-92.

Givati, A., Thirel, G., Rosenfeld, D., & Paz, D. (2019). Climate change impacts on streamflow at the upper Jordan River based on an ensemble of regional climate models. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 92–109. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2018.12.004>

Golian, S., & Murphy, C. (2020). Evaluation of Sub-Selection Methods for Assessing Climate Change Impacts on Low-Flow and Hydrological Drought Conditions. *Water Resources Management*, 35(1), 113–133. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02714-1>

Gosain, A. K., Rao, S., Srinivasan, R., & Gopal Reddy, N. (2005). Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. *Hydrological Processes*, 19(3), 673–682. <https://doi.org/10.1002/HYP.5622>

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.08.003>

Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss.

*IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO: CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA*

- Nature Climate Change*, 8(2), 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- IEA. (2020). *Energía hidroeléctrica - Combustibles y tecnologías* - IEA. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydropower>
- IEA. (2021). *Climate Impacts on Latin American Hydropower – Analysis* - IEA. <https://www.iea.org/reports/climate-impacts-on-latin-american-hydropower>
- IEA. (2022). *Global Energy and Climate Model*. 129 p.
- IHA, I. H. A. (2020). *Indian hydro sector hailed for restoring power amid Covid-19 vigil*. <https://www.hydropower.org/news/indian-hydro-sector-hailed-for-restoring-power-amid-covid-19-vigil>
- IPCC. (2000). *SPECIAL REPORT ON EMISSIONS SCENARIOS*.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 104, pp.
- IPCC. (2013a). Evaluation of climate models. *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 9781107057, 741–866. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.020>
- IPCC. (2013b). Preguntas frecuentes Cambio climático 2013 Bases físicas Resumen para responsables de políticas. 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://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_SPANISH.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf)
- IPCC. (2013c). 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. *Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.*, 1–30.
- IPCC. (2014a). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes,

- preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. In *Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-IntegrationBrochure\\_es.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-IntegrationBrochure_es.pdf)
- IPCC. (2014b). Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. In *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- IPCC. (2014c). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415416>
- IPCC. (2014d). Climate Change 2014 Synthesis Report. In *Journal of Crystal Growth* (Vol. 218, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(00\)00575-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00575-3)
- IPCC.(2018).Glosario.283.  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15\\_Glossary\\_spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf)
- IPCC, A. A. of the I. P. on C. C. (2023). Synthesis report - Summary for Policymakers. *SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)*, 335(7633), 1318.
- IPCC, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. T., K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. P., B. Rama, & N.M. Weyer (eds.). (2019). *Summary for Policymakers — Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>
- Jack Sieber, M. ., & David Purkey, P. . (2015). WEAP Water Evaluation And Planning System USER GUIDE. *Environment*, August, 343.  
<http://www.weap21.org/WebHelp/index.html>
- James.H, B., & Stephen.A, M. (2021). *THE NOAA ANNUAL GREENHOUSE GAS INDEX (AGGI)*. <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>
- Javier Diaz. (2008). *Technical efficiency as a new approach to hydroelectric generation in the short term*.  
[https://www.researchgate.net/publication/262449267\\_Technical\\_efficiency\\_as\\_a](https://www.researchgate.net/publication/262449267_Technical_efficiency_as_a)

new\_approach\_to\_hydroelectric\_generation\_in\_the\_short\_term

- Karun, C., Dam, I. I. I., Study, C., Beheshti, M., Heidari, A., & Saghafian, B. (2019). *Susceptibility of Hydropower Generation to Climate*.
- KNMI. (2013). *Climate Explorer: KNMI Climate Change Atlas*. IPCC WG1 AR5 Annex I "Atlas". [http://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](http://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py)
- Knudsen, J., Thomsen, A., & Refsgaard, J. C. (1986). WATBALA Semi-Distributed, Physically Based Hydrological Modelling System. *Hydrology Research*, 17(4–5), 347–362. <https://doi.org/10.2166/NH.1986.0026>
- Llopart, M., Reboita, M. S., & Rocha, R. P. da. (2019). Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. *Climate Dynamics* 2019 54:1, 54(1), 99–116. <https://doi.org/10.1007/S00382-019-04990-Z>
- Mannig, B., Müller, M., Starke, E., Merckenschlager, C., Mao, W., Zhi, X., Podzun, R., Jacob, D., & Paeth, H. (2013). Dynamical downscaling of climate change in Central Asia. *Global and Planetary Change*. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.05.008>
- Markoff, M. S., & Cullen, A. C. (2008). Impact of climate change on Pacific Northwest hydropower. *Climatic Change*, 87(3–4), 451–469. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9306-8>
- MINAM, M. del ambiente. (2016). El Perú y el Cambio Climático. *Tercera Comunicación Nacional Del Perú a La Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático*.
- MINEM. (2021). Principales Indicadores del Sector Eléctrico Nacional a Enero 2020. *Ministerio de Energía y Minas Dirección de Estudios y Promoción Eléctrica, 2021, 2*. <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/03-informe-tecnico-variacion-de-precios-feb-2021.pdf>
- Minville, M., Brissette, F., Krau, S., & Leconte, R. (2009). Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower. *Water Resources Management*, 23(14), 2965–2986. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9418-1>
- Molnar, P. (2011). Calibration". Watershed Modelling. *Institute of Environmental*

*Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.*

- 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/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nations, U. (2015). *El Acuerdo de París | Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Olsson, T., Kämäräinen, M., Santos, D., Seitola, T., Tuomenvirta, H., Haavisto, R., & Lavado-Casimiro, W. (2017a). Downscaling climate projections for the Peruvian coastal Chancay-Huaral Basin to support river discharge modeling with WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13(September 2016), 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.011>
- Olsson, T., Kämäräinen, M., Santos, D., Seitola, T., Tuomenvirta, H., Haavisto, R., & Lavado-Casimiro, W. (2017b). Downscaling climate projections for the Peruvian coastal Chancay-Huaral Basin to support river discharge modeling with WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 26–42. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2017.05.011>
- OMM. (2008). Adaptación a la variabilidad del clima y al cambio climático. *La Revista de La Organización Meteorológica Mundial*. 57 (2), 142 P.
- OMM. (2018). *WMO-N°100: Guía de prácticas climatológicas*.
- OMM. (2020a). Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2019. No 1248. In *Organización Meteorológica Mundial*. <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Declaracion de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2014.pdf>
- OMM. (2020b, November). *Las concentraciones de dióxido de carbono siguen en niveles récord a pesar de las medidas de confinamiento debidas a la COVID-19 | Organización Meteorológica Mundial*. <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/las-concentraciones-de-dióxido-de-carbono-siguen-en-niveles-récord-pegar>
- OMM, & WMO. (2020). *WMO Greenhouse Gas Bulletin. No 16: 23 nov 2020*. <https://ig3is.wmo.int>

- Ordoñez Galvez, J. J. (2011). Ciclo hidrológico, Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico". *Sociedad Geográfica de Lima*.
- Osinerming. (2020). Reporte semestral de monitoreo del mercado de electricidad. *Primer Semestre*.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1–4), 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- Pérez Díaz, J. I. (2008). *Modelos de explotación a corto plazo de centrales hidroeléctricas : Aplicación a la generación hidroeléctrica con velocidad variable*.
- Perrin, C., Michel, C., & Andre, V. (2003). *Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation*. 279, 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2007). *Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)*.
- Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., & Carey, M. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004>
- Prudhomme, C., & Davies, H. (2009). Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: Future climate. *Climatic Change*, 93(1–2), 197–222. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9461-6>
- Qin, P., Xu, H., Liu, M., Du, L., Xiao, C., Liu, L., & Tarroja, B. (2020). Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation. *Journal of Hydrology*, 580(July 2019), 123922. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123922>
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Frappart, F., Ruelland, D., Lavado, W., Dewitte, B., & Felipe, O. (2018). Hydroclimatic change disparity of Peruvian Pacific drainage catchments. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1–2), 139–153. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2263-x>

- Rosas, M., Vanacker, V., Huggel, C., Rosas, M., Vanacker, V., & Huggel, C. (2018). Climate change impact on long-term capacity of hydropower reservoirs in Andean regions. Case of study: Cañete river, Peru. *EGUGA*, 20, 9940. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..20.9940R/abstract>
- Ruelland, D., Dezetter, A., & Hublart, P. (2014). Sensitivity analysis of hydrological modelling to climate forcing in a semi-arid mountainous catchment. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 363(October), 145–150.
- Ruelland, Denis. (2020). Should altitudinal gradients of temperature and precipitation inputs be inferred from key parameters in snow-hydrological models? *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2609–2632. <https://doi.org/10.5194/HESS-24-2609-2020>
- Schaefli, B., Hingray, B., & Musy, A. (2007). Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: Quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1191–1205. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1191-2007>
- Schmidli, J., Frei, C., & Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, 26(5), 679–689. <https://doi.org/10.1002/joc.1287>
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456–457, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Thiemeßl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2), 449–468. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4>
- Urrutia, R., & Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2), 2108. <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>

- Van Vliet, Michelle T.H.; Wiberg, David; Leduc, S., & Riahi, K. (a). (2016). Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nature Climate Change*, 6(4), 375–380. <https://doi.org/10.1038/nclimate2903>
- Van Vliet, M. T. H., van Beek, L. P. H., Eisner, S., Flörke, M., Wada, Y., & Bierkens, M. F. P. (2016). Multi-model assessment of global hydropower and cooling water discharge potential under climate change. *Global Environmental Change*, 40, 156–170. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.07.007>
- Vicuna, S., Leonardson, R., Hanemann, M. W., Dale, L. L., & Dracup, J. A. (2007). Climate change impacts on high elevation hydropower generation in California's Sierra Nevada: A case study in the Upper American River. *Climatic Change*, 87(1 SUPPL), 123–137. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9365-x>
- Vuuren, D. P. van, Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 2011 109:1, 109(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/S10584-011-0148-Z>
- Yalew, S. G., van Vliet, M. T. H., Gernaat, D. E. H. J., Ludwig, F., Miara, A., Park, C., Byers, E., De Cian, E., Piontek, F., Iyer, G., Mouratiadou, I., Glynn, J., Hejazi, M., Dessens, O., Rochedo, P., Pietzcker, R., Schaeffer, R., Fujimori, S., Dasgupta, S., ... van Vuuren, D. P. (2020). Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. *Nature Energy*, 5(10), 794–802. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0664-z>
- Zhang, X., Zwiers, F. W., Hegerl, G. C., Lambert, F. H., Gillett, N. P., Solomon, S., Stott, P. A., & Nozawa, T. (2007). Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448(7152), 461–465. <https://doi.org/10.1038/nature06025>

## ANEXOS

<b>ANEXO I:</b> Información Meteorológica.....	127
<b>ANEXO II:</b> Escalamiento estadístico de precipitación y temperatura.....	129
<b>ANEXO II:</b> Información de producción de energía .....	134
<b>ANEXO IV:</b> Disponibilidad hídrica – AR6 .....	136

**ANEXO I: Información Meteorológica**

*Información de la precipitación mensual media (mm) en la cuenca bajo el método de interpolación IED*

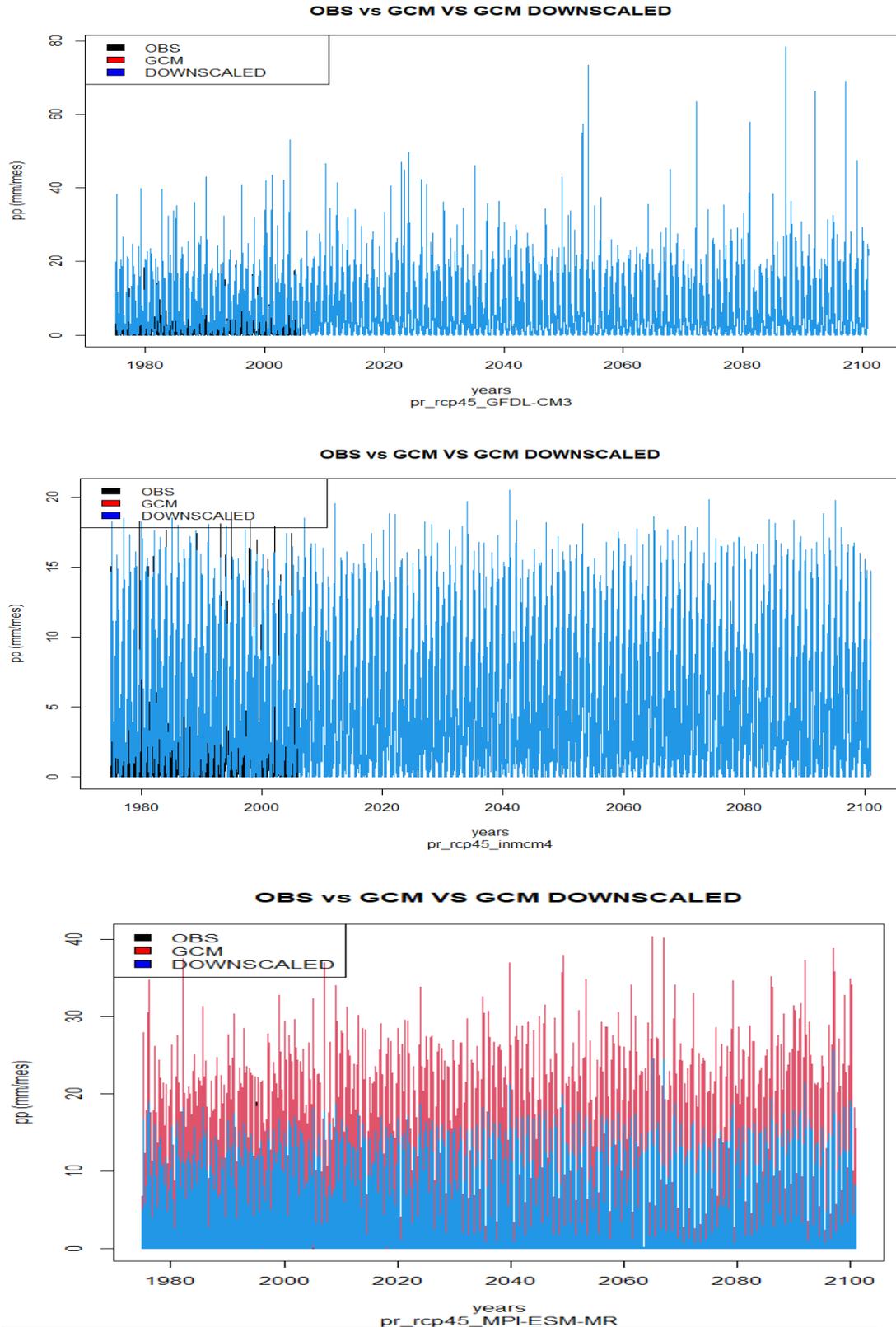
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1963									3.62	7.83	44.49	20.02
1964	37.75	76.69	130.73	49.97	29.59	-	-	1.08	15.32	33.15	39.57	20.12
1965	44.14	102.93	133.05	42.17	4.81	0.46	1.97	4.82	14.66	30.52	16.16	81.99
1966	100.01	70.31	76.97	44.31	9.42	-	-	0.07	5.56	90.45	37.34	49.73
1967	107.67	177.69	143.50	33.72	14.18	1.84	5.53	5.30	13.30	77.53	24.96	25.07
1968	99.81	52.35	89.34	8.84	21.10	2.57	0.33	7.92	7.09	39.48	66.47	39.55
1969	44.64	95.62	132.87	45.00	2.91	0.51	0.90	4.75	7.83	34.60	99.05	157.66
1970	141.04	72.51	110.18	94.17	33.63	4.38	0.18	5.14	62.31	66.83	76.91	95.83
1971	79.50	116.30	185.94	39.64	2.07	0.59	-	21.25	30.08	31.18	66.53	121.87
1972	120.56	114.56	205.38	56.48	3.71	-	0.10	0.96	9.52	13.47	14.48	59.06
1973	120.51	111.42	134.03	79.87	14.12	0.55	0.69	3.37	34.31	88.38	57.41	130.05
1974	108.76	165.39	120.35	36.92	0.83	3.52	-	0.11	0.07	1.99	13.72	8.75
1975	74.90	119.97	184.22	31.98	20.81	5.47	-	8.95	11.65	12.61	28.45	63.77
1976	131.11	148.86	108.42	14.16	0.08	11.17	1.52	0.05	3.05	-	-	22.79
1977	106.30	131.11	64.87	14.43	23.54	-	1.14	-	4.28	11.06	51.02	56.21
1978	62.42	73.76	72.47	26.24	0.94	-	6.42	1.67	11.00	16.46	31.15	32.92
1979	31.41	96.75	140.72	42.17	5.51	0.33	-	1.96	5.12	10.97	10.46	21.78
1980	52.10	14.05	45.55	8.17	1.08	0.37	-	0.95	1.14	72.95	100.71	61.98
1981	88.98	185.20	172.82	31.20	0.35	-	-	16.00	1.05	86.66	146.49	36.96
1982	92.52	107.56	66.23	19.07	0.48	-	1.74	4.40	7.32	72.81	68.15	36.88
1983	73.08	45.65	40.75	15.25	2.15	11.68	0.45	-	2.55	15.27	37.81	47.27
1984	354.22	272.41	216.28	46.89	15.81	9.22	2.99	-	9.66	47.61	72.65	62.57
1985	70.91	95.28	85.77	37.38	9.18	0.62	1.54	-	12.83	5.68	5.79	58.76
1986	50.54	44.40	70.51	60.40	3.63	0.30	1.36	1.22	12.93	5.98	28.61	93.28
1987	109.15	82.23	44.48	31.63	5.67	0.89	2.64	3.73	16.31	15.90	56.15	86.97
1988	149.19	63.19	78.19	84.15	12.43	0.30	-	1.87	9.29	22.15	44.36	70.45
1989	157.72	124.49	78.70	27.43	5.19	7.65	0.30	3.00	11.40	52.34	16.24	9.54
1990	84.39	38.66	50.28	16.63	7.23	7.70	1.28	0.76	9.97	90.40	68.88	44.82
1991	65.64	64.68	143.27	59.41	43.81	8.06	1.13	1.07	15.29	51.23	39.21	35.36
1992	9.87	49.42	79.34	43.86	11.29	6.41	0.28	13.00	12.15	46.95	22.10	30.69
1993	135.30	130.91	180.55	128.89	14.39	0.65	2.56	4.22	18.07	59.13	109.06	103.58
1994	184.00	192.78	173.71	90.87	13.70	1.35	0.04	1.64	22.07	14.73	31.84	83.52
1995	78.29	88.50	134.90	65.83	18.09	5.50	4.19	1.35	17.61	39.56	61.87	112.22
1996	133.49	164.26	163.48	70.26	14.35	0.21	-	4.97	6.93	37.50	33.05	82.61
1997	105.66	157.97	71.59	43.66	11.07	1.63	1.62	5.29	29.69	37.12	87.32	189.89
1998	218.19	190.94	171.54	62.98	8.08	4.77	-	4.45	12.56	72.83	31.02	64.46
1999	142.69	249.48	135.27	70.15	34.25	7.88	1.12	0.88	24.29	46.44	51.83	123.42
2000	131.93	189.48	135.81	73.93	37.99	2.86	3.19	16.98	18.50	56.60	37.95	166.27
2001	228.43	148.63	265.26	45.36	21.90	6.60	3.95	1.03	35.78	55.20	127.73	83.41
2002	70.57	141.37	198.12	99.21	17.58	7.75	3.21	0.41	22.28	103.99	94.62	118.19
2003	114.02	105.53	155.21	65.88	16.11	1.16	2.40	6.09	6.86	31.52	30.19	160.07
2004	43.11	121.93	103.77	46.58	7.20	10.94	3.46	1.24	46.20	72.87	85.24	112.68
2005	74.65	77.69	151.52	49.62	11.06	0.16	0.07	7.07	6.50	39.84	20.78	109.38
2006	95.74	128.00	193.28	107.98	4.39	9.97	0.99	6.82	23.10	50.80	82.14	123.26
2007	123.84	71.64	193.21	106.11	27.05	1.66	0.70	0.78	4.51	69.06	42.30	49.45
2008	150.04	148.37	105.77	57.16	4.44	4.22	3.59	4.37	11.50	78.94	45.94	74.34
2009	162.48	177.76	230.58	100.22	29.47	1.45	6.98	9.36	12.10	70.15	86.32	137.79
2010	106.72	113.53	153.47	54.82	4.68	2.58	0.98	0.91	27.20	32.05	73.46	184.41
2011	167.40	107.24	168.39	93.97	13.50	0.48	7.17	3.73	14.61	23.91	92.51	176.74
2012	117.53	196.82	176.47	135.50	18.74	2.29	2.39	1.81	37.08	45.66	81.05	127.40
2013	70.94	177.83	204.61	39.61	24.52	3.74	2.44	7.77	9.70	93.71	78.61	120.72
2014	134.35	168.77	178.46	43.60	30.79	0.62	4.10	5.33	23.54	36.47	45.81	126.42
2015	127.08	84.08	140.15	73.47	38.60	1.85	0.49	3.76	6.53	31.39	60.27	100.00
2016	32.60	117.17	105.71	74.56	7.57	4.21	2.32	3.45	26.05	32.80	6.95	96.97
2017	157.31	173.60	252.72	85.01	43.97	2.26	0.29	3.33	15.99	48.15	32.26	88.33
2018	141.14	89.83	172.56	89.59	23.83	5.93	2.16	5.78	12.92	47.20	50.96	66.40
2019	152.37	164.70	172.35	52.90	14.01	3.99	4.42	-	27.83	33.53	55.25	176.84
2020	117.70	132.20	182.14	70.26	29.49	3.93	1.58	2.74	20.76	33.08	35.77	107.96
2021	116.33	130.49	183.74	69.52	30.77	4.10	1.35	2.53	21.06	30.81	32.18	105.64
2022	114.95	128.78	185.34	68.78	32.05	4.28	1.11	2.31	21.37	28.54	28.59	103.32

*Información de la temperatura media mensual (mm) en la cuenca bajo el método de interpolación IED*

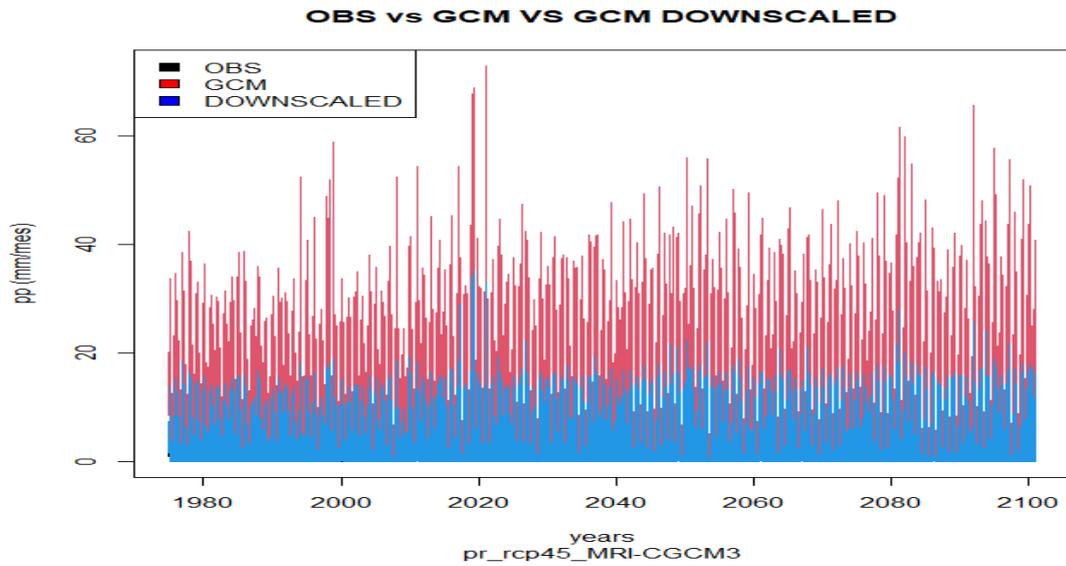
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1975	7.31	7.58	7.45	7.51	7.24	6.89	6.58	7.49	7.40	7.63	7.02	6.90
1976	7.25	6.89	7.39	8.17	7.45	7.05	7.36	7.11	7.67	8.29	8.00	8.10
1977	8.06	7.27	7.95	7.90	7.31	7.18	7.29	7.85	8.17	8.19	7.64	8.14
1978	7.48	8.11	7.40	8.19	7.84	7.75	7.56	7.76	7.69	7.48	7.93	8.05
1979	7.78	7.16	7.04	7.73	8.33	7.41	6.66	7.82	8.15	7.22	7.13	7.14
1980	6.75	6.33	8.39	8.19	8.31	8.81	7.74	8.29	8.81	8.45	8.22	7.92
1981	7.84	7.19	7.38	8.12	8.20	8.12	7.93	7.29	7.26	7.17	7.16	7.60
1982	7.13	6.91	7.69	11.97	12.94	8.05	8.32	8.81	8.57	8.34	8.16	8.66
1983	20.60	7.77	9.50	8.47	7.80	7.24	7.17	7.23	7.68	28.18	21.52	20.91
1984	43.09	40.91	56.93	12.43	30.61	49.38	35.91	51.73	86.75	106.06	66.03	114.32
1985	100.60	12.74	88.93	105.03	68.90	42.95	54.64	46.31	82.06	55.10	12.58	13.35
1986	12.98	9.69	12.29	12.70	14.28	74.11	9.13	6.95	8.00	7.54	7.95	8.90
1987	9.22	9.70	9.32	8.77	9.68	9.51	7.79	9.74	10.50	9.21	9.96	9.10
1988	8.29	9.37	8.47	8.04	8.69	7.84	7.52	7.58	8.02	7.81	8.30	7.38
1989	8.49	8.58	8.14	10.51	10.63	9.48	10.18	10.13	9.71	9.11	8.78	7.50
1990	8.68	8.52	9.05	9.21	6.83	7.90	8.55	8.48	8.44	8.33	8.52	8.25
1991	10.12	8.75	9.28	9.86	8.88	7.43	7.24	6.92	10.54	9.10	8.55	8.42
1992	8.64	9.91	14.67	12.50	11.94	9.52	8.70	9.01	11.52	13.51	11.23	11.08
1993	12.00	12.80	12.86	13.64	12.33	9.90	8.75	8.88	12.17	13.54	13.84	11.53
1994	9.89	11.12	10.52	11.65	11.70	10.69	9.82	9.52	9.09	8.42	8.70	9.28
1995	8.10	7.56	7.97	9.35	10.19	8.63	8.27	8.73	10.35	9.54	8.83	7.85
1996	6.96	8.14	8.05	9.41	9.43	8.74	9.19	9.30	10.76	10.54	8.44	9.19
1997	7.70	9.20	9.50	10.48	12.44	7.86	11.23	11.88	9.07	10.03	11.33	12.16
1998	12.00	11.52	11.74	10.94	10.52	9.76	10.32	8.42	8.48	9.43	7.58	7.89
1999	7.75	7.91	8.44	10.62	9.38	8.09	8.07	9.10	9.28	10.04	7.62	7.55
2000	6.75	7.45	7.54	9.28	8.69	7.21	6.72	8.33	7.16	8.11	7.26	8.17
2001	7.77	8.50	8.24	7.85	8.20	8.78	9.04	9.84	10.22	10.59	9.10	10.27
2002	10.05	9.65	9.54	9.51	10.27	9.27	9.22	10.09	9.82	9.69	9.72	9.99
2003	9.93	9.63	9.23	9.82	9.71	8.94	8.96	9.29	9.73	10.46	10.51	9.56
2004	9.38	9.65	10.34	9.33	9.82	8.61	8.24	8.70	9.21	10.00	9.80	9.84
2005	9.62	10.89	9.53	10.30	9.95	9.55	9.31	10.00	10.50	10.33	10.03	9.32
2006	9.81	9.75	9.25	8.95	9.00	9.51	9.81	10.28	10.11	10.40	9.89	10.03
2007	10.90	10.20	9.85	9.93	9.33	8.81	8.54	9.23	10.34	10.26	10.25	9.59
2008	9.66	8.84	8.55	8.92	8.72	9.15	8.33	9.74	10.59	10.90	11.00	10.46
2009	10.29	10.07	10.19	10.74	10.19	9.74	9.73	10.36	11.00	10.53	10.46	9.99
2010	10.73	11.38	11.06	11.15	10.39	9.73	9.24	9.68	10.15	9.90	9.29	8.61
2011	9.00	8.77	8.82	9.71	9.65	9.18	8.93	9.73	10.22	9.40	9.95	9.43
2012	9.45	9.01	10.02	9.47	9.78	9.47	9.89	8.90	10.53	10.26	10.22	9.64
2013	11.21	10.11	10.25	10.54	9.82	9.47	9.25	9.98	11.03	10.82	9.80	10.40
2014	10.47	9.91	9.57	10.40	9.72	10.79	10.48	10.18	10.71	10.85	10.32	10.20
2015	10.63	10.54	10.37	11.20	11.07	11.15	10.12	10.60	11.49	11.51	11.45	12.36
2016	12.55	12.96	12.38	11.83	11.36	10.35	9.94	10.84	11.00	11.01	11.05	10.75
2017	9.74	9.55	9.78	10.24	9.72	10.05	9.91	10.15	10.91	11.16	11.06	10.25
2018	9.70	10.23	10.51	10.18	10.31	9.50	9.41	9.23	9.74	10.50	10.98	10.97
2019	10.81	10.84	10.80	10.75	10.62	10.38	9.87	10.24	10.91	10.29	10.85	10.23
2020	8.62	10.24	8.71	9.42	9.35	8.31	8.92	9.21	8.78	8.55	9.71	8.63
2021	8.46	10.25	8.55	9.30	9.25	8.15	8.86	9.14	8.60	8.35	9.66	8.48

## ANEXO II: Escalamiento estadístico de precipitación y temperatura

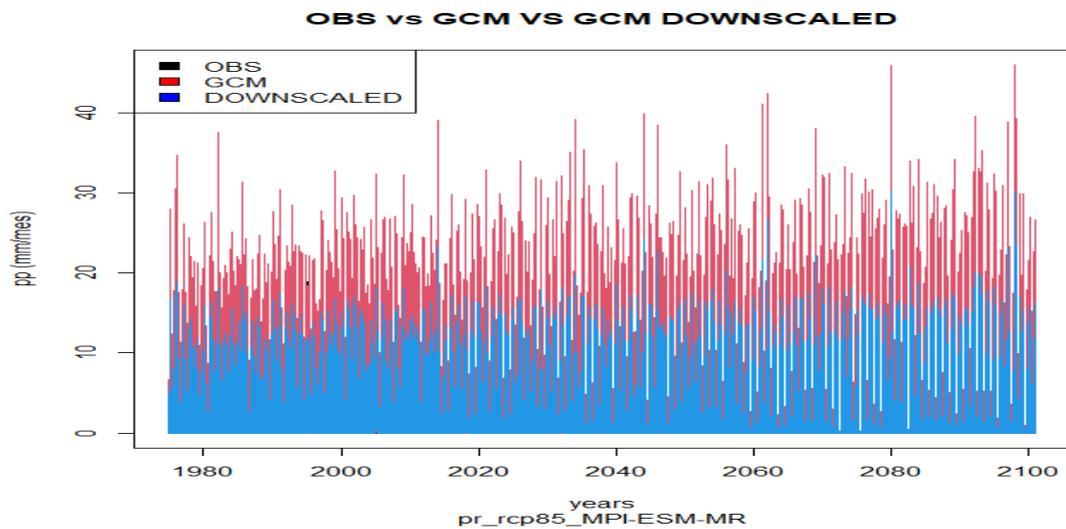
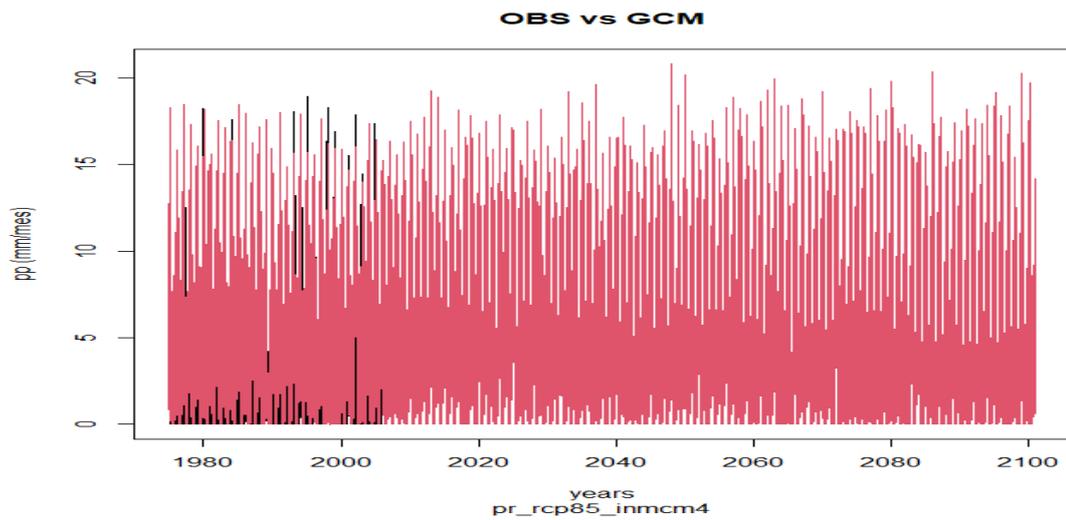
Información de la precipitación escalada por el método de Quantile Mapping en el escenario RCP4.5

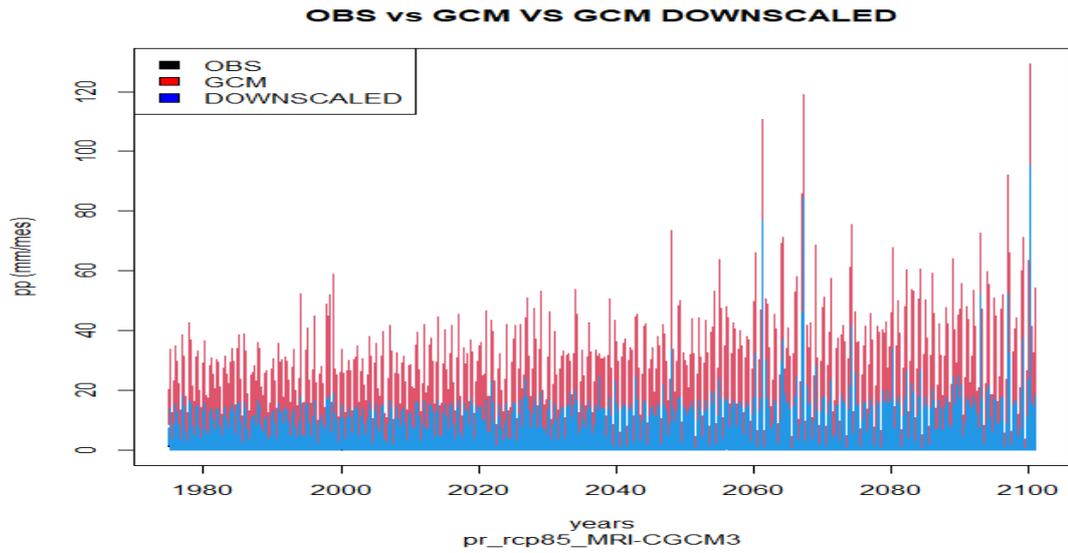


IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO:  
CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA

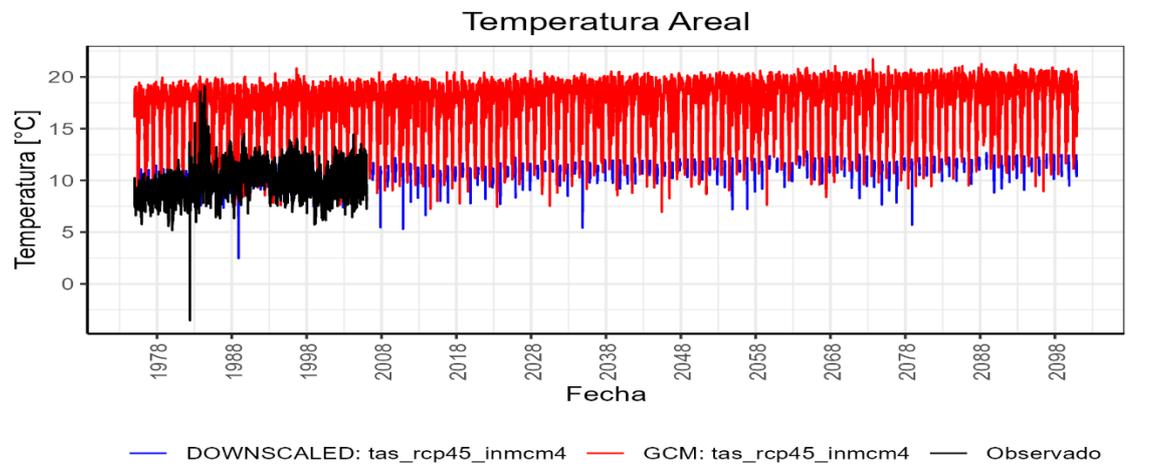
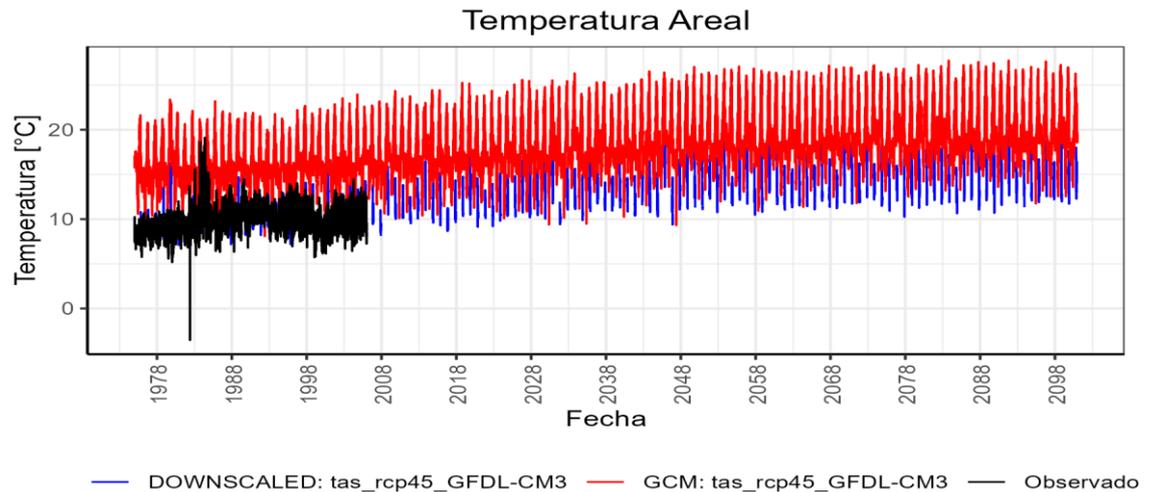


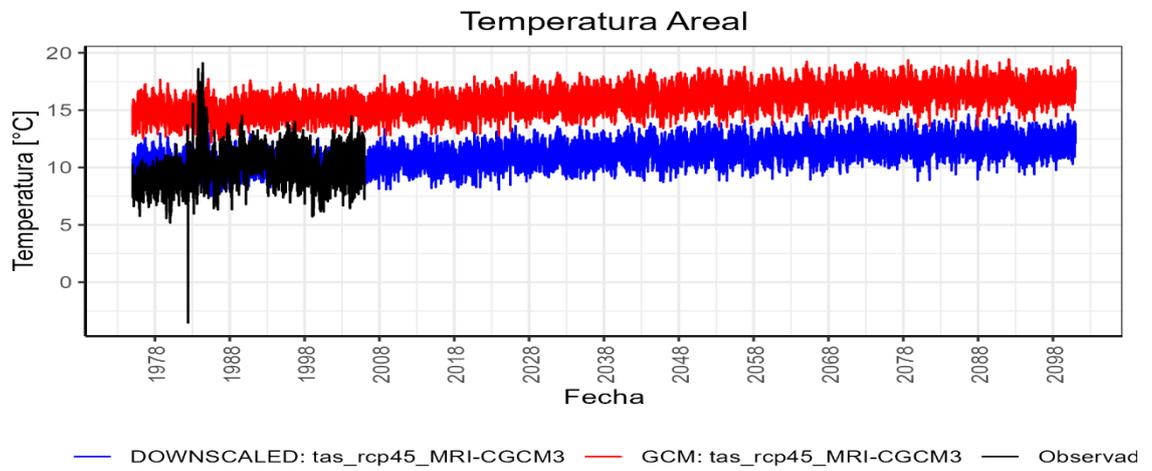
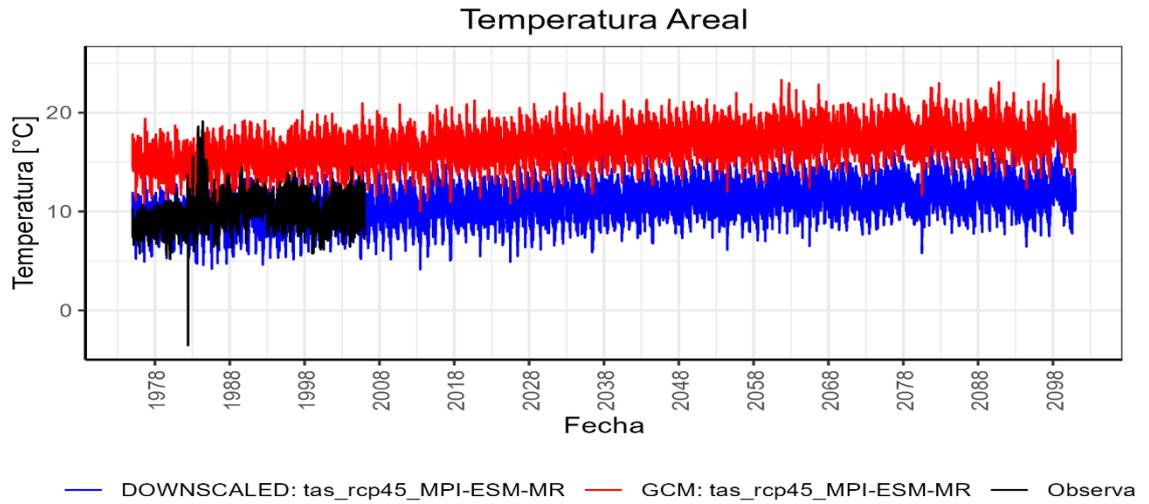
Información de la precipitación escalada por el método de Quantile Mapping en el escenario RCP8.5



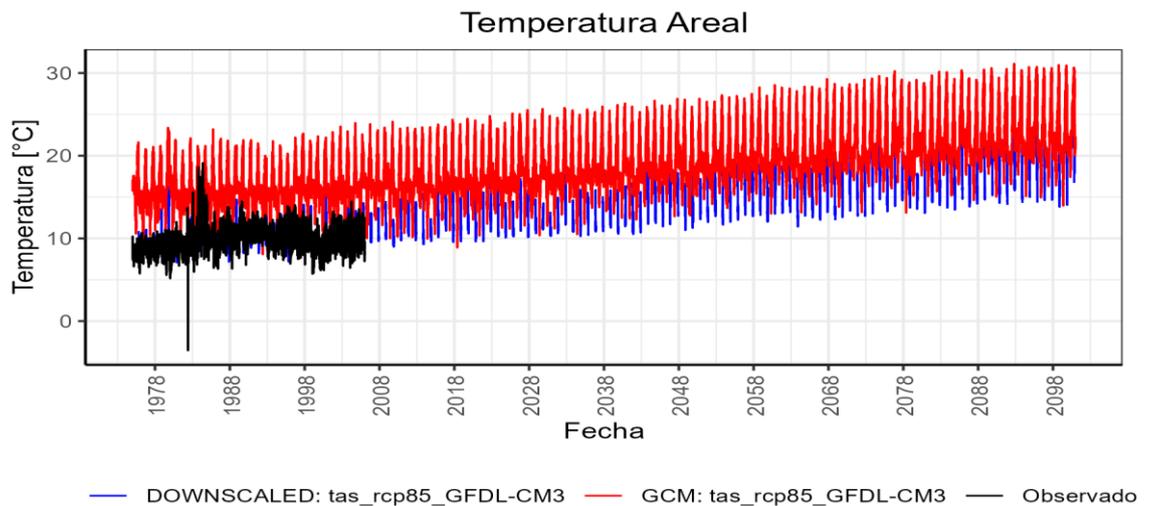


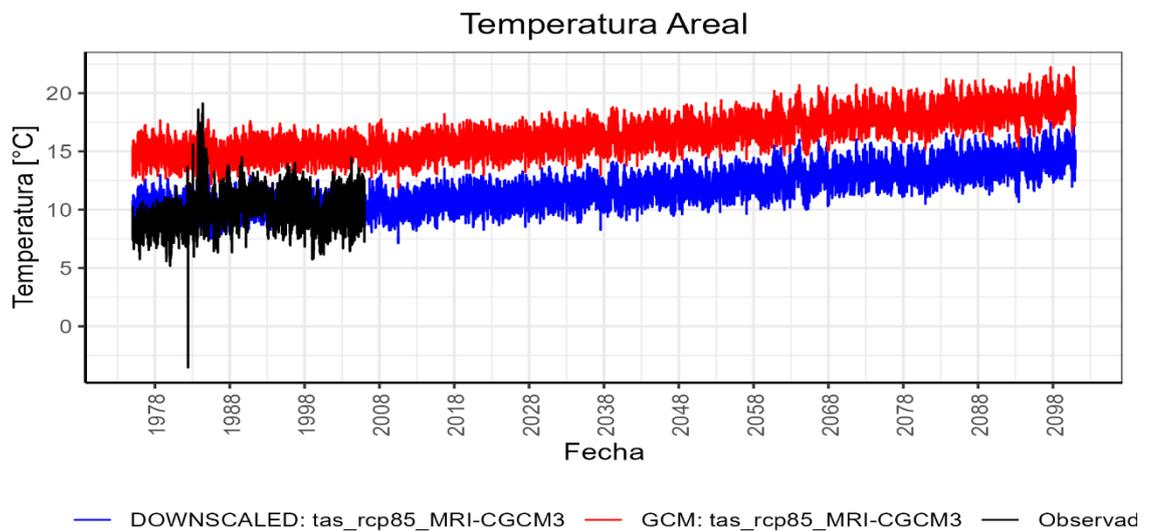
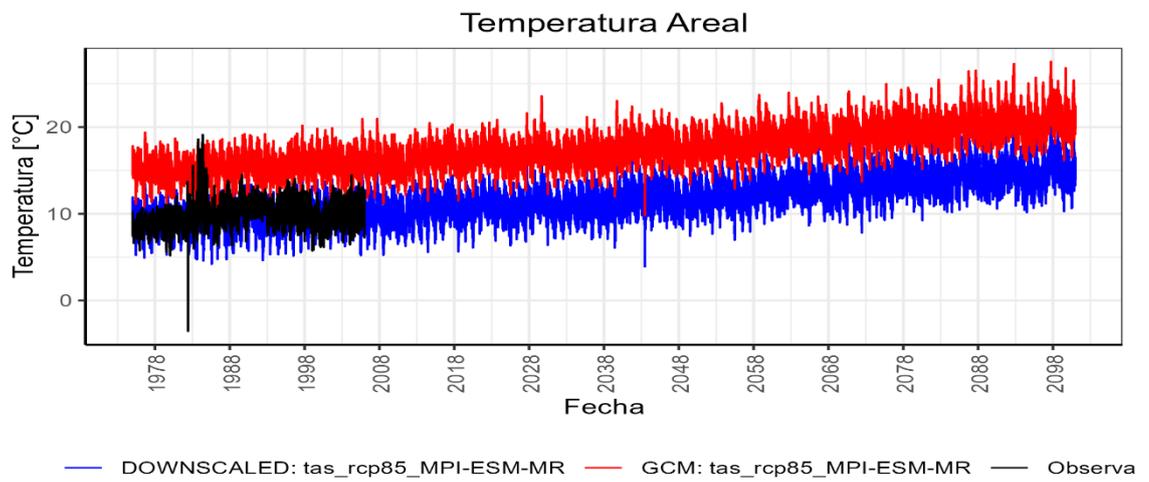
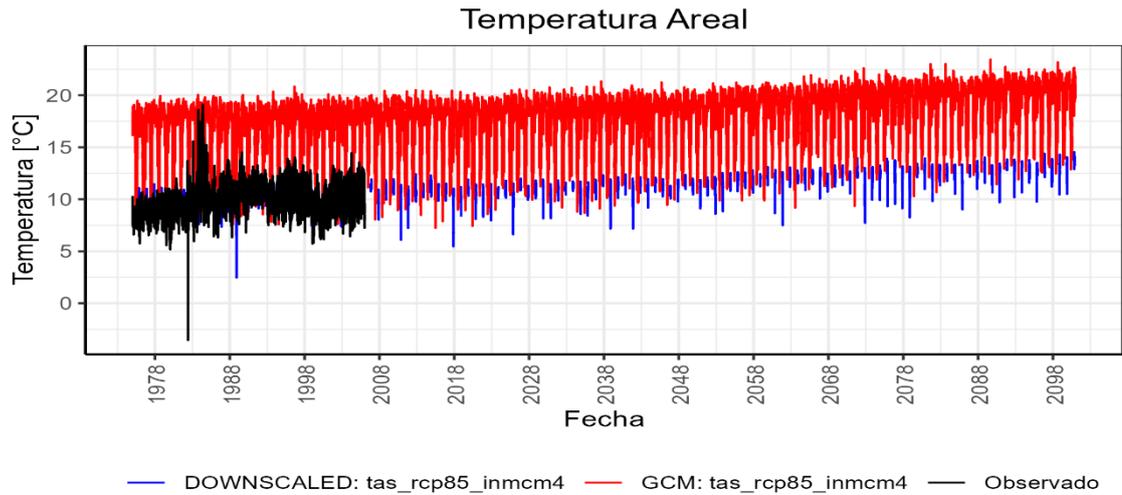
Información de la temperatura escalada por el método de Linear Scaling, RCP4.5





Información de la temperatura escalada por el método de Linear Scaling, RCP8.5



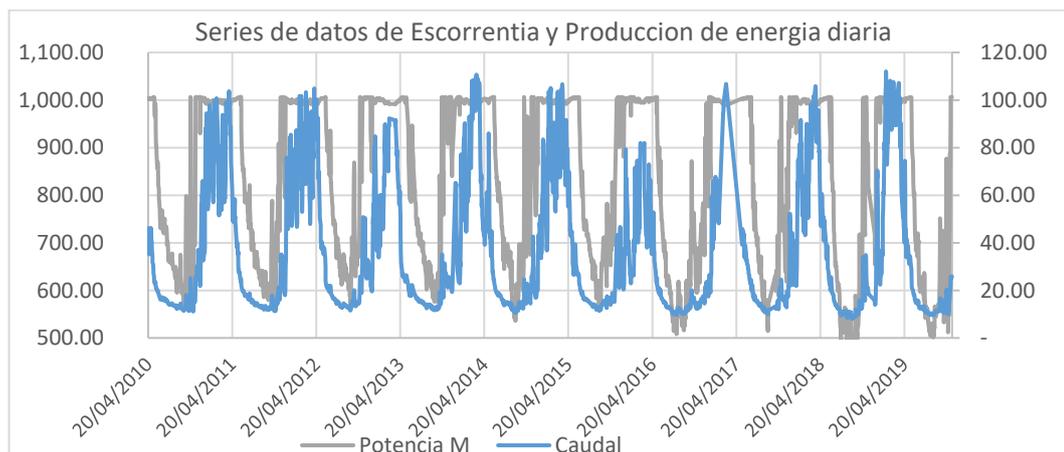


**ANEXO III: Información de producción de energía**

**Producción mensual de energía en GWh de la central hidroeléctrica de Cahua.**

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2,010	-	-	-	29.2	30.6	22.0	22.1	20.2	18.2	20.4	26.6	32.0
2,011	29.8	26.1	27.5	23.9	28.4	24.8	21.1	19.2	17.7	19.0	24.1	25.7
2,012	27.3	22.1	30.5	27.8	28.8	24.7	20.6	20.8	18.3	20.5	25.9	27.8
2,013	27.1	23.6	11.2	26.7	22.6	21.4	22.0	22.7	18.3	23.7	25.0	19.8
2,014	28.6	26.4	27.0	28.7	28.0	25.0	23.3	17.2	15.9	28.1	27.0	29.0
2,015	31.8	28.3	28.0	30.0	33.3	26.7	26.8	18.3	17.0	16.4	22.6	29.4
2,016	23.0	30.0	17.4	27.6	26.6	20.5	17.1	16.9	18.4	20.7	20.1	28.4
2,017	21.5	7.8	2.9	0.8	19.4	28.4	28.6	21.4	3.9	18.1	22.2	27.5
2,018	28.7	28.3	23.2	29.4	32.5	22.3	19.9	20.3	17.0	19.9	21.4	25.1
2,019	31.0	19.3	22.2	26.9	26.8	20.5	19.8	17.6	17.1	19.8	12.9	-

**ANEXO G: Seria de registros diarios de la producción de energía (MWh) y Caudal (m3/s)**



Producción mensual de energía simulada en GWh de la central hidroeléctrica de Cahua.

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2,010	-	-	-	29.9	31.6	22.8	20.7	18.6	16.4	19.3	27.7	33.0
2,011	31.4	28.6	31.3	27.0	31.4	24.6	21.1	18.0	16.3	18.3	27.5	28.8
2,012	31.3	24.4	33.3	31.5	33.2	25.6	19.8	18.5	17.0	22.2	30.0	31.6
2,013	32.5	29.2	13.4	31.5	30.6	23.8	19.8	18.8	16.3	26.2	30.2	22.6
2,014	32.3	29.3	30.6	32.7	32.7	26.0	20.5	16.0	14.8	24.2	26.8	30.9
2,015	33.8	29.1	29.2	32.3	32.9	26.0	21.3	17.1	16.3	16.1	23.2	30.2
2,016	23.5	29.9	19.5	29.3	27.9	19.0	15.0	14.0	14.3	20.4	19.6	28.4
2,017	23.0	9.1	3.3	1.0	21.6	29.6	21.6	15.9	3.6	18.1	22.1	31.6
2,018	31.9	29.2	23.9	31.3	33.5	23.4	14.1	13.1	11.7	18.8	22.5	25.8
2,019	32.2	20.3	23.7	28.8	30.4	19.3	16.5	13.6	15.4	16.6	13.3	-

**ANEXO IV: Disponibilidad hídrica – AR6****Análisis y evaluación de la disponibilidad hídrica bajo los modelos de cambio climático del sexto reporte del Panel Intergubernamental sobre cambio Climático -2023**

A continuación, se presenta el análisis:

En la sexta fase del proyecto de inter - comparación de modelos acoplados (CMIP6) se analiza un conjunto de experimentos multimodales coordinados conocidos como proyectos de Intercomparación de modelos. A fin de establecer una solidez en los modelos climáticos del CMIP6, se evalúa mediante un “Diagnostico, Evaluación y Caracterización del Clima”, el rendimiento de cada modelo en términos de estado medio, variabilidad y respuesta de forzamiento.

Los modelos climáticos seleccionados son los que se muestran en la siguiente tabla:

Centros	País	Modelos	Instituciones
<b>CMCC</b>	<b>Italia</b>	CMCC-CM2_SR5	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
<b>NOAA GFDL</b>	<b>USA</b>	GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
<b>INM</b>	<b>Rusia</b>	INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics
<b>MPI-M</b>	<b>Inglaterra</b>	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
<b>MRI</b>	<b>Japon</b>	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute

*Tabla F- 1 Modelos climáticos AOGCM - AR6*

Estos modelos climáticos globales tienen resoluciones de 100Km, los cuales son extraídos para la zona de estudio distribuidos en cuatro cuadrantes que encierran la cuenca.

Las variables de precipitación y temperatura de cada modelo de cambio climático son escaladas bajo los métodos estadísticos, desarrollados en la investigación, los cuales serán integrados al modelo hidrológico para obtener los caudales futuros a nivel mensual.

**Modelo Hidrológico GR2M**

El modelo hidrológico aplicado para la evaluación de cambio climático es el modelo GR2M, por su similitud con el GR4J y por ser apropiado para un análisis a nivel mensual. Este modelo utiliza dos funciones matemáticas de producción y transferencia.

Para un entendimiento más claro, se describe el funcionamiento del modelo como se muestra en la Figura F- 1 Modelo hidrológico GR2M: Fuente Perrin et al. (2007)

, donde P es la precipitación media de la cuenca, P<sub>1</sub> es la escorrentía superficial, E es la evapotranspiración, P<sub>2</sub> es la percolación profunda, S almacenamiento del reservorio suelo cuando se inicia el periodo de análisis, R es el almacenamiento de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis y Q el caudal de salida. X<sub>1</sub> es la capacidad máxima de almacenamiento del suelo y en un inicio es asumido 60mm (J Cabrera, 2013) .

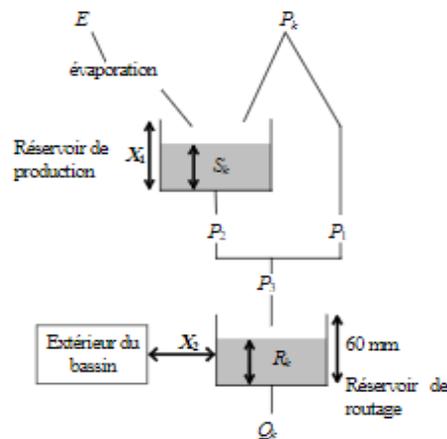


Figura F- 1 Modelo hidrológico GR2M: Fuente Perrin et al. (2007)

Función de producción:

$$s_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}}, \text{ y } \varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$$

(52)-D

De acuerdo con un balance hidrológico y asumiendo que no hay pérdidas de aguas antes de la infiltración, la escorrentía superficial (P<sub>1</sub>) se define:

$P_1 = P + S - S_1$ , el volumen del reservorio suelo es afectado por la evapotranspiración quedando un volumen S<sub>2</sub>:

$$s_2 = \frac{S_1(1 - \psi)}{1 + \psi(1 - \frac{S}{X_1})}, \text{ y } \psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$$

(53)-D

Una parte del volumen S<sub>2</sub> es transferido al reservorio gravitacional y el restante se convierte en el volumen inicial S:

$$S = \frac{S_2}{\left(1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right)^{1/3}}, \text{ el volumen de agua cambia } P_2 = S_2 - S$$

(54)-D

Función de transferencia

La precipitación efectiva que ingresa al reservorio gravitacional:  $P_3 = P_1 + P_2$

(55)-D

El volumen inicial del reservorio gravitación es R, que se calculara de la siguiente forma:  $R_1 = R + P_3$ , dado que hay una variación de volúmenes a nivel superficial el volumen R se corrige por un factor  $X_2$ :

$R_2 = R_1 * X_2$ , el flujo de agua se define como caudal de salida Q:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60}$$

(56)-D

### Escenario SSP2.45 y SSP5.85

Las trayectorias socioeconómicas compartidas SSP, contemplan las trayectorias de concentración representativas (RCP) que fue desarrollado en el AR5, ya que estos vinculan el desarrollo socioeconómico.

El escenario SSP2-4.5 indica que las emisiones de CO2 se mantendrá en función a los niveles actuales para mediados del siglo, estando en el límite superior de “mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C respecto de los niveles preindustriales” según el acuerdo de Paris (2015) (Nations, 2015).

En el escenario SSP5-8.5, hace referencia a un escenario sin políticas climáticas, tal que, las emisiones de CO2 se duplican para mediados del siglo. Asimismo, se estima que la temperatura se incremente en más de 4°C para finales del siglo.

### Modelamiento hidrológico GR2M

Como datos de entrada al modelo hidrológico se mensualiza la información diaria presentada anteriormente, tanto la precipitación como temperatura, los cuales han sido interpoladas por el método IED, que representa la extensión del método de interpolación IWD.

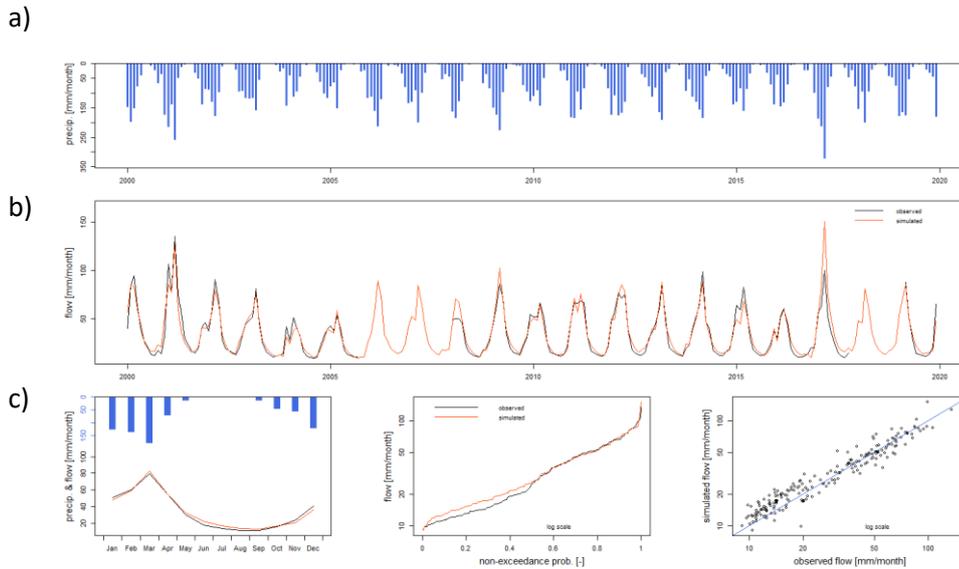


Figura F- 2 Resultados de la simulación del modelo hidrológico GR2M

El proceso de calentamiento se da en los tres primeros años de información desde el año 1997 al 2000, la calibración entre los años 2000 y 2010 y la validación en los 10 últimos años de información.

Como se puede observar en la Tabla F- 2 Eficiencia de la simulación hidrológica con una frecuencia mensual

-b en los periodos de estiaje hay una ligera sobrestimación de los valores simulado respecto los valores observados, y los caudales picos si presentan un mejor ajuste, tal que el rendimiento del modelo se muestra en la Tabla F- 2 Eficiencia de la simulación hidrológica con una frecuencia mensual

Periodo	NSE	KGE
Calibración (2000-2010)	0.9147	0.9466
Validación (2010-2019)	0.7858	0.8770

Tabla F- 2 Eficiencia de la simulación hidrológica con una frecuencia mensual

Los índices de rendimiento del modelo hidrológico GR2M son altos, por encima de los rendimientos del modelo hidrológico GR4J, por lo que se da por validado el proceso de calibración y validación del modelo con los siguientes parámetros:

	X1	X2
Parámetros	1450.988	1.1675

Tabla F- 3 Parámetros del modelo GR2M calibrado

Mediante este modelo calibrado y validado se pueden realizar las proyecciones de escorrentía.

## Escalamiento de los modelos climáticos

Los modelos climáticos del CMIP6 son analizados con una frecuencia mensual, para lo cual, la información base es corregida mediante el método de “Quantile Mapping (QM)” para la variable de precipitación y el método de “Linear Scaling (LS)” para la variable de temperatura.

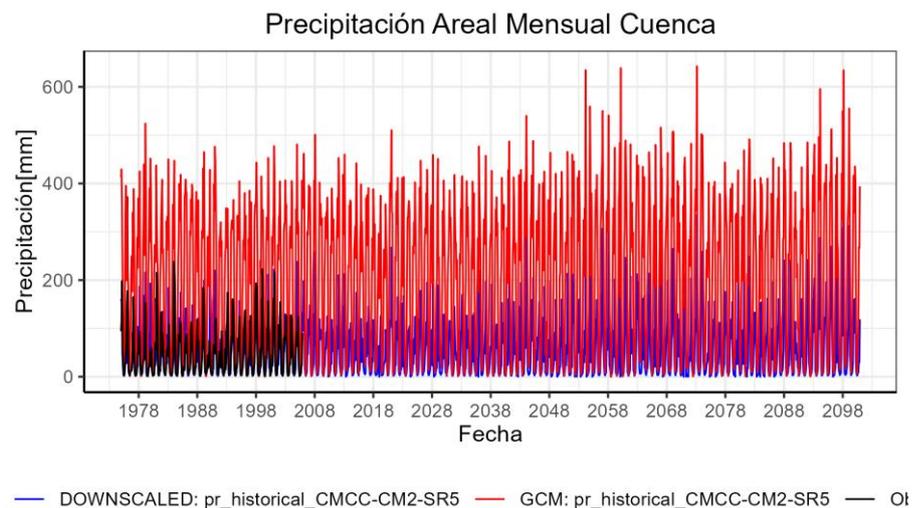


Figura F- 3 Resultados del escalamiento estadístico de la precipitación - Modelo CMCC-CM2-SR5

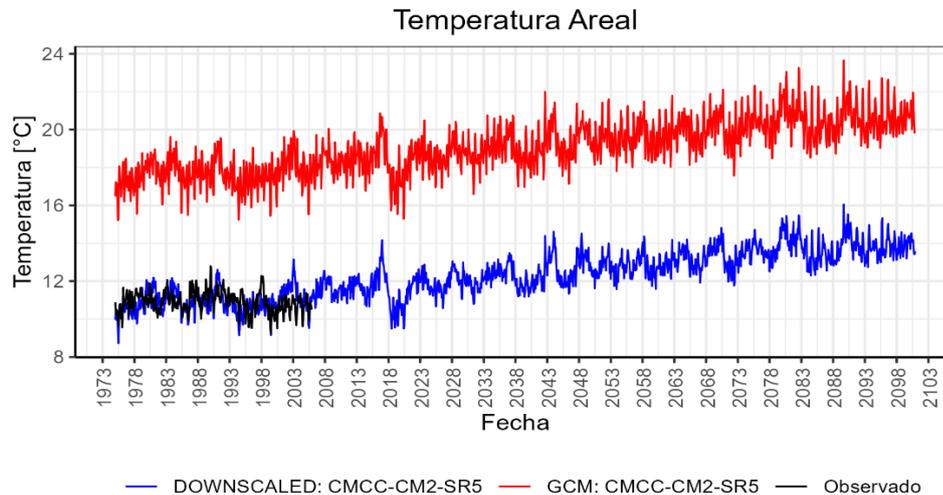


Figura F- 4 Resultados del escalamiento estadístico de la temperatura - Modelo CMCC-CM2-SR5

Los resultados del proceso de escalamiento del modelo CMCC-CM2.SR5, para cada variable se muestra en las Figuras F-3 y F-4.

## Proyección de la escorrentía futura con los modelos climáticos del CMIP6

Los resultados de la tendencia promedio de la escorrentía con los nuevos modelos climáticos del AR6, se encuentran por debajo de la escorrentía observada, tal que, la tasa de cambio mostradas en las gráficas B y D de la Figura F- 5 Proyección de la escorrentía futura en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5 -8.

, presentarían una disminución entre los meses de noviembre a abril, para ambos SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

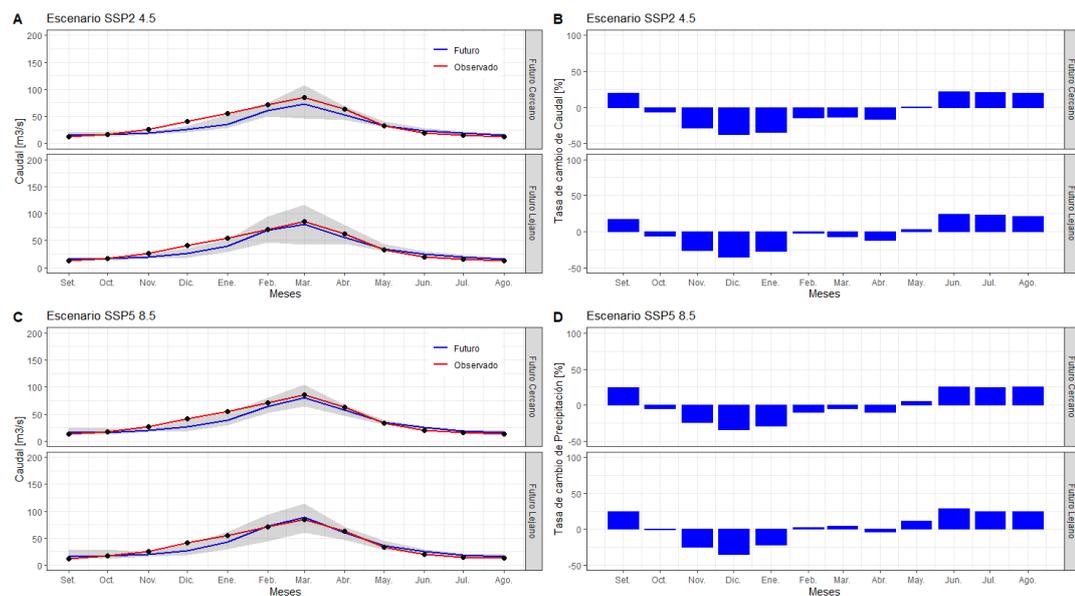


Figura F- 5 Proyección de la escorrentía futura en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5 -8.

Si bien los resultados de la tasa de cambio en el escenario SSP2-4.5 para el futuro cercano indicarían tanto una disminución como incremento, que va desde -37.89% hasta 21.46%, en promedio anual la tasa de cambio es -5.73% respecto a los valores observados. En el futuro lejano, estas variaciones van desde -21.90% hasta 14.82%, teniendo un promedio de -1.99%.

TC - FC	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
SSP2-4.5	19.44%	-5.86%	-28.34%	-37.89%	-34.70%	-14.13%	-13.77%	-16.12%	0.24%	21.46%	20.83%	20.04%	-5.73%
SSP5-8.5	24.00%	-4.35%	-23.77%	-33.72%	-28.97%	-10.15%	-5.23%	-9.60%	5.62%	25.75%	24.13%	25.84%	-0.87%

TC - FL	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
SSP2-4.5	2.26%	-12.64%	-21.90%	-18.45%	-4.81%	3.43%	-8.62%	-0.13%	8.78%	14.82%	9.19%	4.14%	-1.99%
SSP5-8.5	24.66%	-0.46%	-25.06%	-34.44%	-21.32%	2.62%	4.33%	-3.18%	10.98%	28.81%	25.00%	24.28%	3.02%

Tabla F- 4 Tasa de cambio de la escorrentía futura bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, para el futuro cercano (FC) y Futuro lejano (FL)

Mientras que en el escenario SSP5-8.5 para el futuro cercano, las variaciones van desde -33.72% hasta 25.84%, con un promedio anual de -0.87%. En el futuro

lejano, las variaciones irían desde -25.06% hasta 28.82%, teniendo un promedio de 3.02%.

La diferencia entre los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 con los nuevos escenarios, es que, la variación entre el caudal mínimo y máximo de los modelos climáticos es mayor con los escenarios del AR6, como se puede visualizar en la siguiente tabla.

Δmax-min FC	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
SSP2 -4.5	8.56	10.6	4.22	12.68	24.59	24.32	61.74	25.68	11.32	7.21	4.67	2.98	16.55
RCP4.5	3.92	8.38	3.04	17.59	15.63	10.12	17.18	11.11	6.05	2.71	1.76	1.53	8.25
Δ-escenarios	4.64	2.22	1.18	-4.91	8.96	14.2	44.56	14.57	5.27	4.5	2.91	1.45	

Δmax-min FL	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
SSP2 -4.5	6.43	7.32	8.91	17.37	23.1	48.92	73.06	34.81	13.82	9.18	6.55	4.19	21.14
RCP4.5	3.77	6.61	6.68	19.59	16.82	17.07	16.28	19.97	9.86	4.5	2.7	2.08	10.49
Δ-escenarios	2.66	0.71	2.23	-2.22	6.28	31.85	56.78	14.84	3.96	4.68	3.85	2.11	

Tabla F- 5 Variación de la escorrentía entre el máximo y mínimo en el forzamiento radiativo 4.5W/m<sup>2</sup>, para el futuro cercano y futuro lejano

Tanto para el futuro cercano como futuro lejano, el rango de variación de los caudales futuros es mayor en los nuevos escenarios de cambio climático, considerando un forzamiento radiativo de 4.5W/m<sup>2</sup>. Esta diferencia de caudal puede llegar hasta 56.78m<sup>3</sup>/s en el futuro lejano y de 44.56m<sup>3</sup>/s para el futuro cercano.

Δmax-min FC	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
SSP5 -8.5	12.61	12.49	5.77	21.23	22.65	28.6	41.1	20.12	8.96	5.39	3.51	5.16	15.63
RCP8.5	4.78	9.09	9.70	21.79	18.84	26.38	30.02	26.26	11.51	5.84	3.56	3.70	14.29
Δ-escenarios	7.83	3.40	- 3.93	- 0.56	3.81	2.22	11.08	- 6.14	- 2.55	- 0.45	- 0.05	1.46	

Δmax-min FL	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Anual
SSP5 -8.5	15.99	18.17	8.7	19.64	31.79	49.27	54.01	23.49	16.93	9.27	6.39	6.93	21.72
RCP8.5	4.68	9.30	14.97	29.92	26.12	49.60	38.61	25.52	15.77	7.80	4.91	3.71	19.24
Δ-escenarios	11.31	8.87	- 6.27	- 10.28	5.67	- 0.33	15.40	- 2.03	1.16	1.47	1.48	3.22	

Tabla F- 6 Variación de la escorrentía entre el máximo y mínimo en el forzamiento radiativo 8.5W/m<sup>2</sup>, para el futuro cercano y futuro lejano

En cuanto a la diferencia entre el máximo y mínimo de los caudales proyectados en los escenarios con el forzamiento radiativo de 8.5 W/m<sup>2</sup>, se muestra en la tabla F-6, que a diferencia del caso anterior la dispersión es mucho menor, e inclusive en algunos meses la variación de la escorrentía en el escenario RCP8.5 es mayor que el escenario SSP5-8.5.

En conclusión, el análisis de la escorrentía futura bajo los modelos del AR5 y evaluados con una frecuencia diaria, indicarían que posiblemente la tendencia sea decreciente, siendo en el escenario RCP4.5 en promedio la tasa de cambio anual

sea como máximo -12.9%, mientras que en el escenario RCP8.5 un -7.9%. Por otro lado, en los nuevos escenarios del AR6 la tasa de cambio anual sería de -5.73% en el escenario SSP2-4.5 y -1.99% en el escenario SSP5-8.5. Si bien los estos valores son cercanos al caudal observado y contemplando que cada proceso incide en el grado de incertidumbre, se podría indicar que la escorrentía promedio no tendría impactos significativos.