

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“EVALUACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EFECTO EN
LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA FUTURA DE LA CUENCA
CAPLINA – TACNA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

FROILAN RODAS GUIZADO

ASESOR

MSc. JUAN WALTER CABRERA CABRERA

Lima –Perú

2022

© 2022, 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.”

Rodas Guizado, Froilan

frodasg@uni.pe

Cel: 999626250

DEDICATORIA

A mi madre quien me apoyó en todo momento

AGRADECIMIENTOS

Al Msc. Ing. Juan Walter Cabrera Cabrera, asesor de la presente tesis, por la orientación, paciencia, y el apoyo incondicional durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, por los valiosos aportes durante mi formación universitaria.

A mi compañero Erick Kevin Claros Chagua, por el apoyo durante la adquisición de información y aportes en la presente investigación.

Al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, por el apoyo económico durante el desarrollo de la presente investigación.

Al Dr. Pedro Christopher Rau Lavado, por las valiosas recomendaciones durante el desarrollo de la presente investigación.

Finalmente, a mis padres y hermanos, por la confianza depositada en mi formación universitaria, y por la motivación durante el desarrollo de la presente tesis.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
PRÓLOGO	7
LISTA DE TABLAS:	9
LISTA DE FIGURAS:	10
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS	12
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 GENERALIDADES	14
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	16
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	20
2.1 MARCO TEÓRICO	20
2.1.1. Cambio climático	20
2.1.1.1. Definición del cambio climático	20
2.1.1.2. IPCC	20
2.1.1.3. Quinto reporte (AR5)	21
2.1.1.4. Balance energético de la tierra	21
2.1.1.5. Impactos del cambio climático	22
2.1.2. Modelos climáticos	23
2.1.2.1. Modelos climáticos globales (GCM).....	23
2.1.2.2. Modelos climáticos regionales (RCM)	26
2.1.2.3. Escenarios de emisión	27

2.1.2.4.	Proyecto de intercomperación de modelos acoplados (CMIP)	28
2.1.2.5.	Incertidumbre de los modelos climáticos	28
2.1.2.6.	Técnicas de escalamiento.....	29
2.1.2.7.	Escalamiento estadístico.....	29
2.1.2.8.	Escalamiento dinámico	30
2.1.2.9.	Proyección climática.....	31
2.1.3.	Métodos de interpolación	31
2.1.3.1.	IDW	31
2.1.3.2.	Kriging.....	32
2.1.3.3.	Natural neighbour	32
2.1.3.4.	IDW más corrección por altitud	32
2.1.4.	Modelo hidrológico	33
2.1.4.1.	Ciclo hidrológico	33
2.1.4.2.	Cuenca hidrográfica	34
2.1.4.3.	Concepto de sistemas.....	35
2.1.4.4.	Clasificación de los modelos hidrológicos	35
2.1.4.5.	Criterio de calibración.....	36
2.1.4.6.	Incertidumbre de los modelos hidrológicos	38
2.1.4.7.	Modelos GR (Genie Rural).....	38
2.1.4.8.	Modelo GR2M.....	39
2.2	MARCO CONCEPTUAL.....	41
2.2.1.	Disponibilidad hídrica	41
2.2.2.	Clima.....	42
2.2.3.	Precipitación	42
2.2.4.	Temperatura	42
2.2.5.	Producto PISCO.....	43
2.2.6.	Evapotranspiración.....	43

2.2.6.1. Método de Oudin	43
2.2.7. Caudal de escorrentía superficial	44
2.2.8. Tasa de cambio	44
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	45
3.1 IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	45
3.1.1. Ubicación y descripción del sitio	45
3.1.1.1. Ubicación	45
3.1.1.2. Delimitación de cuenca	47
3.1.2. Información disponible	50
3.2 METODOLOGÍA	54
3.2.1. Primera etapa: Análisis climático	54
3.2.2. Segunda etapa: Modelo hidrológico	55
3.2.3. Tercera etapa: Tasa de Cambio	56
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	58
4.1 SELECCIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS	58
4.2 ESCALAMIENTO ESTADÍSTICO	60
4.3 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE DE LOS GCMs	63
4.4 MODELAMIENTO HIDROLÓGICO.....	64
4.4.1. Variables de entrada	64
4.4.2. Periodos de referencia	65
4.4.3. Calibración y validación del modelo.....	65
4.4.4. Relación precipitación – caudal	68
4.5 TENDENCIAS CLIMÁTICAS FUTURAS	68
4.5.1. Tendencia futura de la precipitación media mensual	70
4.5.2. Tendencia futura de la temperatura media mensual.....	72
4.5.3. Tendencia futura del caudal medio mensual.....	74
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	78

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXOS	84

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación, es evaluar los efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca del río Caplina en la región Tacna. Los impactos del cambio climático van incrementando con el transcurrir de los años, y de acuerdo a los reportes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), estima que los recursos hídricos serán los más afectados en América Latina. Esto hace que el Perú se convierta en un país sumamente vulnerable en este aspecto y más aun con la mala distribución poblacional de las ciudades costeras y la distribución espacial de los recursos hídricos, tal como es el caso de Tacna, donde desde años atrás el gobierno declaró agotados los recursos superficiales de los ríos Caplina, Sama y Locumba quienes alimentan a la ciudad principal de Tacna.

Por este motivo el meollo de esta tesis es cuantificar la variación futura del caudal superficial de río Caplina. Para ello se planteó una metodología que consta principalmente de tres procesos: 1. El análisis climático; 2. Modelamiento hidrológico, 3. Evaluación de la variación de caudal futuro. Para el primer proceso se hizo uso de los modelos climáticos globales (GCMs) considerando dos escenarios de emisión: RCP4.5 y RCP8.5, para lo cual se evaluó 32 modelos, de ellos se eligió los 14 modelos más adecuados para la cuenca Caplina. El segundo proceso fue obtener un modelo hidrológico eficiente a paso mensual (GR2M), para el cual el modelo se calibró con un valor de Nash-Sutcliffe (NSE) igual a 0.6261. Finalmente, con las variables climáticas obtenidas por los GCMs se ingresó al modelo hidrológico calibrado para obtener los caudales futuros.

A partir de estos resultados se encontró que la disponibilidad hídrica sufre alteraciones considerables: para los meses entre febrero-agosto existe una disminución hasta en un 38,8% (RCP4.5) y hasta un 41,3% (RCP8.5), mientras que para los meses comprendidos entre septiembre-enero existe un incremento en la oferta hídrica hasta en un 91,5% (RCP4.5) y hasta un 79,2% (RCP8.5). Sin embargo, existe una disminución en el caudal medio anual, tal es así que para el futuro cercano (2020-2040) disminuye en 5,3% (RCP4.5) y en 3,6% (RCP8.5), para el futuro medio (2041-2070) disminuye en 6,3% (RCP4.5) y en 8,8% (RCP8.5) y finalmente para el futuro lejano (2071-2100) disminuye en 6,7% (RCP4.5) y en un 2,0% (RCP8.5).

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the effects of climate change on the future water availability of the Caplina river basin in the Tacna region. The impacts of climate change are increasing over the years, and according to the reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), it is estimated that water resources will be the most affected in Latin America. This makes Peru an extremely vulnerable country in this regard and even more so with the poor population distribution of coastal cities and the spatial distribution of water resources, such as Tacna, where for years the government declared exhausted the surface resources of the Caplina, Sama and Locumba rivers that feed the main city of Tacna.

For this reason, the core of this thesis is to quantify the future variation of the Caplina river surface flow. For this, a methodology was proposed that consists mainly of three processes: 1. Climate analysis; 2. Hydrological modeling, 3. evaluation of future flow variation. For the first process, Global climate models (GCMs) were used considering two emission scenarios: RCP4.5 and RCP8.5, for which 32 models were evaluated, of which the 14 most suitable models for the Caplina basin were chosen. The second process was to obtain an efficient hydrological model at monthly pace (GR2M), for which the model was calibrated with a Nash–Sutcliffe (NSE) value equal to 0.6261. Finally, with the climatic variables obtained by the GCMs, the calibrated hydrological model was entered to obtain future flows.

Based on these results, it was found that water availability suffers considerable alterations: for the months between February–August, there is a decrease of up to 38,8 % (RCP4.5) and up to 41,3 % (RCP8.5), while for the months between September–January there is an increase in the water supply of up to 91,5 % (RCP4.5) and up to 79,2 % (RCP8.5). However, there is a decrease in the average annual flow, so much so that for the near future (2020–2040) it decreases by 5,3 % (RCP4.5) and 3,6 % (RCP8.5), for the mid-future (2041–2070) decreases by 6,3 % (RCP4.5) and by 8,8 % (RCP8.5) and finally for the distant future (2071–2100) decreases by 6,7 % (RCP4.5) and 2,0 % (RCP8.5).

PRÓLOGO

El sur del Perú es una región caracterizada por la aridez y frecuente ocurrencia de sequías. Esta característica se agudiza en las regiones más cercanas a la frontera sur con Chile, considerada como el inicio del Desierto de Atacama, donde la falta del recurso hídrico ha llevado a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) a declarar en diferentes oportunidades el estrés hídrico en la región, prohibiendo todo tipo de nuevas autorizaciones de uso de agua, con el fin de asegurar el abastecimiento poblacional y preservar las áreas agrícolas existentes.

Recientemente, se ha observado que el comportamiento hidrológico de la región pareciera estar cambiando debido, quizá, a las condiciones de clima cambiante presentes en el planeta. El incremento en la frecuencia de ocurrencia de inundaciones y de sequías, de mayor intensidad o severidad, es solamente uno de los cambios que pareciera estar sufriendo la región y que está afectando directamente los planes de gestión en la región; por este motivo se hace necesaria una evaluación de la disponibilidad hídrica en las cuencas afectadas bajo escenarios de cambio climático.

La presente investigación analiza las series de precipitaciones, temperaturas y descargas en la cuenca del río Caplina bajo escenarios de cambio climático, basado en los escenarios de emisión descritos en el Quinto Reporte del IPCC. Para este fin se utilizó datos de cinco estaciones climáticas y una hidrológica, así como datos del producto grillado PISCO para completar las series de temperaturas.

Para este estudio, se seleccionaron 14 modelos climáticos incluidos en el "Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5" (CMIP5), en base a la correlación y al sesgo presentado respecto a la data histórica en el periodo de referencia 1981-2005. Asimismo, se analizaron dos escenarios de emisión, la Trayectoria de Concentración Representativa 4.5 y 8.5 (RCP4.5 y RCP8.5, por sus siglas en inglés), las cuales representan escenarios de emisiones intermedio y crítico, en ese orden. Luego de un proceso de escalamiento estadístico, se obtuvieron series climáticas proyectadas de precipitación y temperatura hasta el año 2100.

Por otro lado, se calibró el modelo precipitación-escorrentía GR2M usando registros históricos para, posteriormente aplicarlo a la información climática proyectada y generar descargas mensuales proyectadas hasta el año 2100. Los resultados mostraron una reducción en las descargas proyectadas durante los meses de febrero a agosto, que alcanzan un 41.3% para el escenario RCP8.5, y un incremento para los meses de setiembre a enero, que alcanza el 79.2% para el mismo escenario RCP8.5.

Los resultados encontrados representan un valioso aporte para la elaboración de futuros planes de mitigación frente a eventos extremos y al cambio climático, así como para la elaboración de planes de gestión del recurso hídrico en la cuenca, los cuales beneficiarán a la población y reducirán las posibles pérdidas económicas en la región.

EL ASESOR

LISTA DE TABLAS

Tabla N°	Título	Pag N°
1	Lista y resolución de los GCM atmosférico y oceánico	24
2	Trayectorias de concentración representativas (RCP)	27
3	Métodos de corrección de sesgo para precipitación y temperatura	29
4	Calificaciones de NSE para evaluar el rendimiento de modelos a paso de tiempo mensual	37
5	Parámetros de la cuenca Caplina	49
6	Estaciones meteorológicas y años de registro	50
7	Resumen de la media mensual del caudal, evapotranspiración, precipitación y temperatura de la cuenca Caplina en el periodo: 1981 – 2016	53
8	Lista de los GCM analizados y seleccionados para la variable precipitación	59
9	BIAS y factor de correlación de los modelos seleccionados para las variables precipitación y temperatura	60
10	Comparación del valor del Bias y del factor de correlación de los GCMs originales vs los GCMs con escalamiento estadístico	61
11	Periodos de referencia y cantidad de información alimentada al modelo GR2M	65
12	Eficiencia del modelo GR2M en la cuenca del río Caplina	67
13	Parámetros del modelo GR2M para la cuenca del río Caplina	68
14	Variación porcentual de la precipitación del periodo de calibración y validación en el modelo hidrológico GR2M	68
15	Valores de la tasa de cambio de la precipitación futura	72
16	Valores de la variación de la Temperatura (°C) futura	73
17	Valores de la tasa de cambio del caudal futuro	76

LISTA DE FIGURAS:

Fig. N°	Título	Pag N°
1	Energía anual media global, unidades W/m ²	22
2	Impactos observados atribuidos al Cambio Climático	23
3	Representación del Reino Unido en un GCM, RCM y observada	27
4	El ciclo hidrológico del agua	34
5	Cuenca como un sistema hidrológico	34
6	Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de las variables	36
7	Estructura del modelo GR2M	39
8	Ubicación de la Cuenca Caplina	46
9	Mapa de aridez del Perú	47
10	Delimitación de la cuenca Caplina	48
11	Curva Hipsométrica de la cuenca Caplina (estación Calientes)	49
12	Topografía de la Cuenca, precipitación y temperatura media anual entre 1981 – 2016	51
13	A, comparación de la precipitación PISCO con la precipitación registrada por las estaciones y B, muestra la comparación de la temperatura PISCO con la temperatura registrada por las estaciones	52
14	Resumen de la media mensual del caudal, evapotranspiración, precipitación y temperatura de la cuenca Caplina en el periodo: 1981 – 2016	53
15	Esquema metodológico para la evaluación de disponibilidad hídrica futura en el contexto del cambio climático	57
16	Esquema metodológico para el análisis climático	55
17	Esquema metodológico para el modelo hidrológico GR2M	55
18	Esquema metodológico para la generar caudales futuros	56
19	Esquema metodológico para la evaluación de la disponibilidad hídrica futura	56

Fig. N°	Título	Pag N°
20	Selección de modelos climáticos globales en base a la precipitación observada	58
21	Selección de modelos climáticos globales en base a la Temperatura media observada	59
22	Envolvente de los GCMs seleccionados, mostrados de color gris; y los datos observados – PISCO mostrado de color azul, en el periodo 1981-2005	62
23	Ejemplo de la aplicación del mapeo de cuantiles (QM) para la precipitación del modelo climático global EC-EARTH, escenario RCP 4.5	62
24	Ejemplo de la aplicación del escalamiento lineal (LS) para la temperatura del modelo climático global EC-EARTH, escenario RCP 4.5	63
25	Variables usadas en el modelo hidrológico GR2M	64
26	Visualización de resultados del modelo GR2M para el periodo de calibración en la cuenca del río Caplina	66
27	Visualización de resultados del modelo GR2M para el periodo de Validación en la cuenca del río Caplina	67
28	Visualización de resultados del caudal para el periodo de calibración y validación en la cuenca del río Caplina	67
29	Caudal, precipitación y temperatura media anual histórica y proyectada para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5	69
30	Comportamiento de la precipitación futura	71
31	Comportamiento de la temperatura futura	73
32	Comportamiento del caudal futuro	76

LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS

E	: Evapotranspiración
P	: Precipitación
PET	: Evapotranspiración Potencial
Q	: Caudal de escorrentía superficial
r	: Correlación lineal
R	: Volumen de agua del reservorio gravitacional
S	: Volumen de agua del reservorio inicial
T	: Temperatura
X1	: Capacidad del reservorio
X2	: Coeficiente adimensional de intercambios subterráneos
α	: Relación entre la desviación estándar de datos simulados y observados
β	: Relación entre la media de datos simulados y observados
θ	: Factor de corrección
μ	: Media estadística
σ	: Desviación estándar
ANA	: Autoridad Nacional del Agua
AR5	: Quinto reporte de evaluación del cambio climático
CHIRPS	: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CMIP5	: Proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5 del
CMNUCC	: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FR	: Forzamiento radiactivo
GCM	: Modelos climáticos globales
GEI	: Gases de efecto invernadero
GR	: Genie Rural
IDW	: Ponderación de distancia Inversa
IPCC	: Panel intergubernamental sobre el cambio climático
KGE	: Kling-Gupta
KNMI	: Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos
LS	: Escalamiento lineal

MINAGRI	: Ministerio de Agricultura y Riego
NSE	: Nash-sutcliffe
OMM	: Organización Meteorológica Mundial
PBI	: Producto bruto interno
PET	: Proyecto Especial Tacna
PISCO	: Peruvian Interpoted data of Senamhi's Climatological and Hydrological Observations
PNUMA	: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
QM	: Mapeo de Cuantiles
R2	: Coeficiente de correlación
RCM	: Modelos climáticos regionales
RCP	: Trayectorias de concentración representativa
RMSE	: Raíz del error medio cuadrático
Senamhi	: Servicio nacional de meteorología e hidrología
UTM	: Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El cambio climático se define como la variación del estado del clima, y que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios; es así que distintos sectores buscan respuestas sobre el comportamiento del clima futuro y cómo esta los puede afectar; motivados por la búsqueda de dichas respuestas, se crearon diversas instituciones a nivel mundial, siendo el más importante el panel intergubernamental del cambio climático (IPCC), quienes en su último reporte (AR5) estiman que los impactos más significativos para América Latina es sobre los ríos y lagos, los mismo que están directamente relacionados con la oferta hídrica.

Es así que el cambio climático tiene efectos directos sobre la oferta hídrica futura, sin embargo, los impactos son propios para cada región del mundo, el cual está sujeto al comportamiento futuro de las variables climáticas de interés hidrológico como la precipitación y temperatura, y para conocer dicho comportamiento futuro se usa una serie de modelos avanzados de interacción Océano-Atmosfera denominados: modelos climáticos globales (GCM, por sus siglas en inglés). Actualmente los GCM se trabaja bajo unos escenarios de trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (RCP, por sus siglas en inglés).

En simples palabras, para la evaluación del cambio climático y su interés en el efecto hidrológico, los GCM permiten obtener la precipitación y temperatura futura, y con el uso de un modelo hidrológico se obtiene el caudal futuro en la cuenca de interés, es allí donde se puede cuantificar el efecto sobre la disponibilidad futura.

En el Perú ya se viene observando una serie de cambios en el comportamiento natural del clima y en los caudales de los ríos, además se ha identificado ciudades con desbalance hídrico, tal como es el caso de la ciudad de Tacna, a raíz de ello el gobierno peruano en el año 2009 declaró agotados los recursos hídricos superficiales de las cuencas Caplina, Sama y Locumba, los cuales son administrados por el Proyecto Especial Tacna (PET), el mismo que fue encargado a realizar distintos proyectos con la finalidad de llevar la cantidad de agua necesaria para el abastecimiento poblacional y para realizar la actividad agrícola

principalmente. Sin embargo, una disminución del recurso hídrico futuro de las cuencas en mención ocasionaría consecuencias negativas.

Siendo claro la problemática encontrada, en esta investigación se busca evaluar los posibles efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca Caplina en la ciudad de Tacna.

El trabajo de investigación está estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1: contiene la descripción del problema de investigación, los objetivos y los antecedentes investigativos.

Capítulo 2: proporciona información del marco teórico y conceptual, en el marco teórico se presenta la búsqueda de información relacionada con el presente trabajo; en el marco conceptual se presenta los principales conceptos (palabra clave) relacionadas con las variables utilizadas en la presente investigación.

Capítulo 3: corresponde al desarrollo de la investigación, en el cual se realiza la identificación de la zona de estudio y presenta la información disponible; así mismo, se expone la metodología utilizada para alcanzar los objetivos de la investigación.

Capítulo 4: proporciona el análisis y resultados de la investigación, entre ellos, los modelos climáticos globales seleccionados para la cuenca en estudio, los resultados del escalamiento estadístico, los resultados del modelamiento hidrológico y se hace el análisis de las tendencias climáticas futuras.

Finalmente se presenta las conclusiones y recomendaciones de la tesis.

Asimismo, se adjunta las referencias consultadas para el desarrollo de la presente investigación y se anexa el resumen de las variables empleadas.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La escasez del recurso hídrico en la ciudad de Tacna ha conducido a los usuarios a buscar nuevas fuentes alternativas para incrementar la oferta, es así que en el 2002 se formuló un proyecto con el objetivo de evaluar y ordenar los recursos hídricos en la cuenca de los ríos Caplina y Uchusuma, con el cual se logró desarrollar importantes inversiones para mitigar la vigente problemática.

En el 2009 el gobierno peruano a través del decreto supremo N°004-2009-AG declaró agotados los recursos superficiales de los ríos Caplina, Sama y Locumba, en el departamento de Tacna, a raíz de un desbalance hídrico de 8.5 m³/s (MINAGRI, 2009). Actualmente el proyecto especial Tacna (PET), es la encargada de realizar la gestión de los recursos hídricos a través de diversas obras de almacenamiento, conducción y distribución; los mismos que reportan una disminución de recurso hídrico en las estaciones secas y un incremento del recurso hídrico en las épocas húmedas y que muchas veces causan inundación; las frecuencias de estas anomalías son cada vez más recurrentes. Sumado a ello la temperatura media anual de la cuenca Caplina presenta un incremento en los últimos años. Estas anomalías podrían estar asociados a los efectos del cambio climático.

En la actualidad esta problemática sigue vigente, en mayo del 2019 el PET hizo un requerimiento para el mejoramiento y ampliación de la infraestructura, en el mismo que reporta que el déficit sigue vigente y el proyecto busca menguar esta realidad. Es ahí donde se identifica que la planificación sobre la gestión del recurso hídrico sigue siendo una necesidad de primera importancia para la ciudad de Tacna, y para lograr una planificación eficiente es necesario conocer el caudal disponible del río en los próximos años, enmarcado al contexto del cambio climático.

A raíz de esta situación es necesario evaluar los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica futura en la cuenca Caplina, para conseguir una gestión eficiente que ayude en las decisiones de los tomadores políticos.

Pregunta de investigación: ¿Cuál son los posibles efectos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica futura en la cuenca Caplina?

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1. Objetivo general

Evaluar los posibles efectos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica futura en la cuenca del río Caplina.

1.3.2. Objetivos específicos

- Calibrar y validar el modelo hidrológico a escala mensual GR2M en el periodo 1981 – 2016.
- Proyectar el comportamiento de la precipitación y temperatura para diferentes periodos futuros (2020 – 2100), en base a los escenarios de emisión RCP 4.5 y 8.5, usando los modelos climáticos globales del CMIP5
- Evaluar la disponibilidad hídrica para un futuro cercano, medio y lejano en la cuenca del río Caplina.

1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El cambio climático es un problema actual de primera importancia que afecta el desarrollo económico, social y ambiental, y se manifiesta con distintos efectos a lo largo del territorio terrestre. Las causas que provocan el cambio climático están principalmente asociado a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, los cuales causaron registros alarmantes desde la década de 1950, año a partir del cual las emisiones van incrementado en el transcurrir del tiempo, en concordancia con el crecimiento económico y demográfico a nivel mundial (IPCC, 2014b).

La atención sobre el cambio climático se encuentra en su mayor apogeo, y distintos sectores buscan respuestas sobre el comportamiento del clima futuro. Es así, que muchos investigadores en paralelo, a los reportes del panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC por sus siglas en inglés) vienen desarrollando estudios sobre esta temática desde 1988, y en la actualidad se encuentran en el quinto reporte o AR5, el mismo que se apoya con el proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5 (CMIP5 por sus siglas en inglés), con la finalidad de agrupar una serie de modelos climáticos globales

(GCM), los mismos que permiten obtener registros futuros de distintas variables climáticas, especialmente de la precipitación y temperatura.

En el Perú, existen algunos estudios sobre cambio climático, como lo realizado por Olsson (2017) en la cuenca de la costa peruana Chancay – Huaral, en donde analiza los efectos del cambio climático para el periodo futuro 2051-2080, para lo cual, utilizó diferentes modelos climáticos globales (GCM) del CMIP5 bajo dos escenarios de emisión; RCP4.5 y RCP8.5. En donde prevé un incremento de la temperatura media anual de 3.1°C (RCP4.5) y en 4.3°C (RCP8.5), y un incremento de la precipitación media anual en un 20% (RCP4.5) y en 28% (RCP8.5); con respecto al comportamiento futuro de las descargas del río, usó el modelo hidrológico WEAP a paso de tiempo mensual, encontrando lo siguiente: los mayores aumentos de la descarga del río ocurrirán en las temporadas de lluvias (noviembre – abril), con incrementos de hasta el 31% en el mes de diciembre, y para la estación seca, algunos GCMs prevén una disminución de las descargas del río. Otro aspecto importante que demuestra dicho estudio, es la necesidad de tomar las medidas de adaptación en el manejo de los recursos hídricos para mitigar los impactos del cambio climático.

Otro estudio realizado por Zulkafli (2016) en la cuenca amazónica del Perú, en donde hizo uso de los GCM del CMIP5 para el análisis climático, en cuanto al modelamiento hidrológico usó el modelo distribuido JULES, el estudio revela una serie de inundaciones para la estación húmeda con incrementos del caudal en 7.5% (RCP4.5) y 12% (RCP8.5), el mismo que afectaría directamente en los procesos reproductivos de las especies del río Amazonas, así como a los bosques pantanosos y a la socioeconómica en la llanura aluvial.

En la región Tacna del sur del Perú, Cabrera (2011) cuantificó los posibles efectos del cambio climático en la ocurrencia de sequías agrícolas durante el periodo 2010-2099 en el distrito de Candarave, en la investigación se usó el modelo climático global Hadcm3 del CMIP3 basados en el cuarto informe o AR4 del IPCC, en cuanto al modelamiento hidrológico empleó el modelo agregado abcd modificado, el estudio evidencia una disminución del caudal del río en un 6.06% para el periodo 2010-2039, 10.49% para el periodo 2040-2069 y en 23.17% para el periodo 2070-2099.

Otro estudio realizado por Vargas (2009) prevé que el cambio climático tenga un efecto significativo en la económica del país; es así que un aumento de 2 °C en la temperatura máxima y 20% en la variabilidad de precipitaciones al 2050, generaría unas pérdidas en el año 2050 superiores al 20% del PBI potencial. Otros estudios ubican al Perú como el tercer país más vulnerable a nivel mundial después de Honduras y Bangladesh (informe del Tyndall/Center, 2004); en el mismo informe se reporta que en los próximos 40 años a consecuencia del cambio climático; todos los glaciares tropicales peruanos ubicados a menos de 5000 msnm podrían desaparecer y que se contará con el 60% del agua que se disponía en ese entonces, el mismo que generaría una gran escasez del recurso hídrico, afectando principalmente a las ciudades cuya fuente principal de agua provienen de los ríos que los atraviesa.

De acuerdo a los estudios expuestos, para estudiar la disponibilidad hídrica futura en el contexto del cambio climático la metodología más aceptada y optima consiste en hacer uso de los modelos climáticos globales (GCM por sus siglas en inglés) o los modelos climáticos regionales (RCM por sus siglas en inglés), los cuales son una serie de modelos avanzados de interacción Océano-Atmósfera que permiten obtener principalmente variables meteorológicas como la precipitación y temperatura previo un análisis de escalamiento estadístico que consiste en mejorar la calidad de la información en base a la información observada; por otro lado, se hace uso de modelos hidrológicos en donde se alimenta de las variables dadas por los modelos climáticos junto a los parámetros de la cuenca, permiten obtener los caudales de escorrentía; dicha metodología fue aplicado en diversos estudios; como en las cuencas altas de Marruecos (Marchane et al., 2017), en las cuencas del norte de Túnez (Dakhlaoui et al., 2017), en la cuenca de Sudano-Sahelian en el Oeste de África (Ruelland et al., 2012), entre otros estudios.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1. Cambio climático

2.1.1.1. *Definición del cambio climático*

A lo largo de la historia, el planeta fue capaz de mantener un equilibrio energético, el cual consiste en equilibrar la radiación solar que ingresa con la radiación emitida, sin embargo, desde la década de los años 1950 se viene registrando un atrapamiento de la radiación, el mismo que origina una alteración al equilibrio energético, las causas son directamente relacionadas con la actividad antropogénica, es así, que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmosfera global y que va más allá de la variabilidad climática natural” (IPCC, 2014a).

De acuerdo al IPCC el cambio climático puede deberse a procesos naturales o a forzamiento externos, tales como los ciclos solares, erupciones volcánicas, uso del suelo, o cambios antropogénicos que alteran la composición atmosférica. Actualmente para cuantificar el cambio climático se usa el término Forzamiento Radiactivo (FR) medido en unidades de vatios por metro cuadrado (W/m^2), el mismo que físicamente se define como “el cambio en el flujo de energía causado por un elemento impulsor y se mide en la parte superior de la atmosfera” (IPCC, 2014a), cuando el FR es cero, el planeta se encuentra en un equilibrio energético, y cuando este es mayor que cero se genera el cambio climático y es la fase por donde atraviesa el planeta.

2.1.1.2. *IPCC*

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es un organismo intergubernamental establecido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), y desde el año 1998, ha proporcionado a los tomadores políticos; evaluaciones científicas periódicas sobre el cambio climático, sus implicaciones y posibles riesgos futuros, así como, presentar opciones de adaptación y mitigación. El primer informe de evaluación fue publicado en 1990, y por su gran acogida y

aceptación en la comunidad política y científica, hoy en día se han convertido en obras de referencia (IPCC, 2014b). Los reportes son denominados informes de evaluación (AR, por sus siglas en inglés) entre ellos: FAR, SAR, TAR, AR4 y el último informe simbolizado como AR5.

2.1.1.3. *Quinto reporte (AR5)*

Este informe de evaluación fue publicado en el 2014, en donde se expone e integran las conclusiones realizadas por el IPCC sobre la evaluación del cambio climático; en donde confirman que la influencia humana en el sistema climático es clara y va en aumento, y aseguran con un nivel de confianza del 95% que la actividad humana es actualmente la causa principal del calentamiento global, también definen los escenarios de emisión, se identifica los impactos generalizados sobre cada componente, y se plantea medidas y estrategias de mitigación y adaptación (IPCC, 2014b); actualmente el IPCC viene desarrollando el AR6 y se tiene proyectado publicar en el año 2022.

2.1.1.4. *Balance energético de la tierra*

El equilibrio energético entre la radiación solar y la emisión de radiación infrarroja de la tierra permite mantener estable el sistema climático, pues si la radiación entrante fuese mayor que la saliente generaría un calentamiento y de lo contrario un enfriamiento, toda alteración en el balance de radiación, ya sea por causas naturales o de origen antropogénico, ocasiona un forzamiento radiactivo y este a la vez genera el cambio climático (Español, 2009).

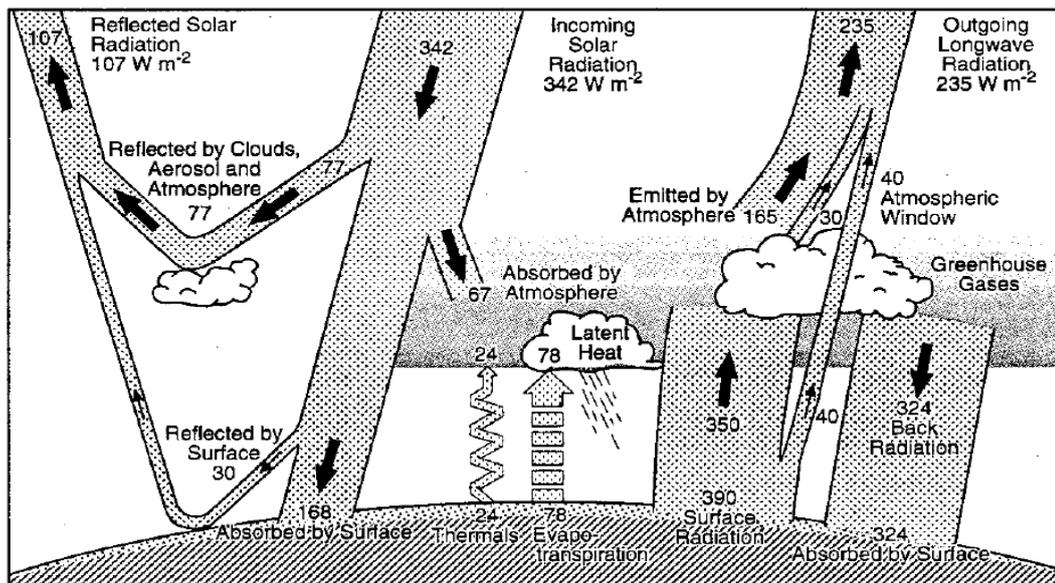


Figura 1: Energía anual media global, unidades W/m²

Fuente: (Kiehl & Trenberth, 1997)

Un estudio realizado por (Kiehl & Trenberth, 1997), cuantifica y describe el comportamiento de la radiación entrante y saliente, el cual se resume en la Figura 1, donde globalmente la tierra absorbe energía solar igual a 168 W/m² y debido al efecto invernadero un valor de 324 W/m² (encargado de mantener una temperatura promedio igual a 15 °C) en suma la tierra absorbe 492 W/m². Por otro lado, la tierra emite 390 W/m² de energía infrarroja, 24 W/m² de calor sensible y 78 W/m² de calor latente, en suma, la tierra emite un total de 492 W/m², en donde se demuestra un equilibrio energético. Sin embargo, a consecuencia del efecto invernadero la energía atrapada por esa capa es cada vez mayor, el 2009 el calor neto de absorción fue de 0.9 W/m², que ya desde años atrás está provocando el calentamiento de la tierra (Español, 2009).

2.1.1.5. Impactos del cambio climático

En los últimos años los impactos del cambio climático son más evidentes, y el sector con mayor sensibilidad son los sistemas naturales, las anomalías en precipitación o el derretimiento del nieve y hielo están alterando los sistemas hidrológicos, que afecta principalmente la distribución de los recursos hídricos, en la Figura 2 se identifica los impactos generalizados atribuidos al cambio climático, de allí se observa que para América Latina los impactos observados en relación al cambio con los Ríos, lagos, inundaciones y sequías, y se afirma con nivel de

confianza muy alto que es por contribución alta del cambio climático (IPCC, 2014b).

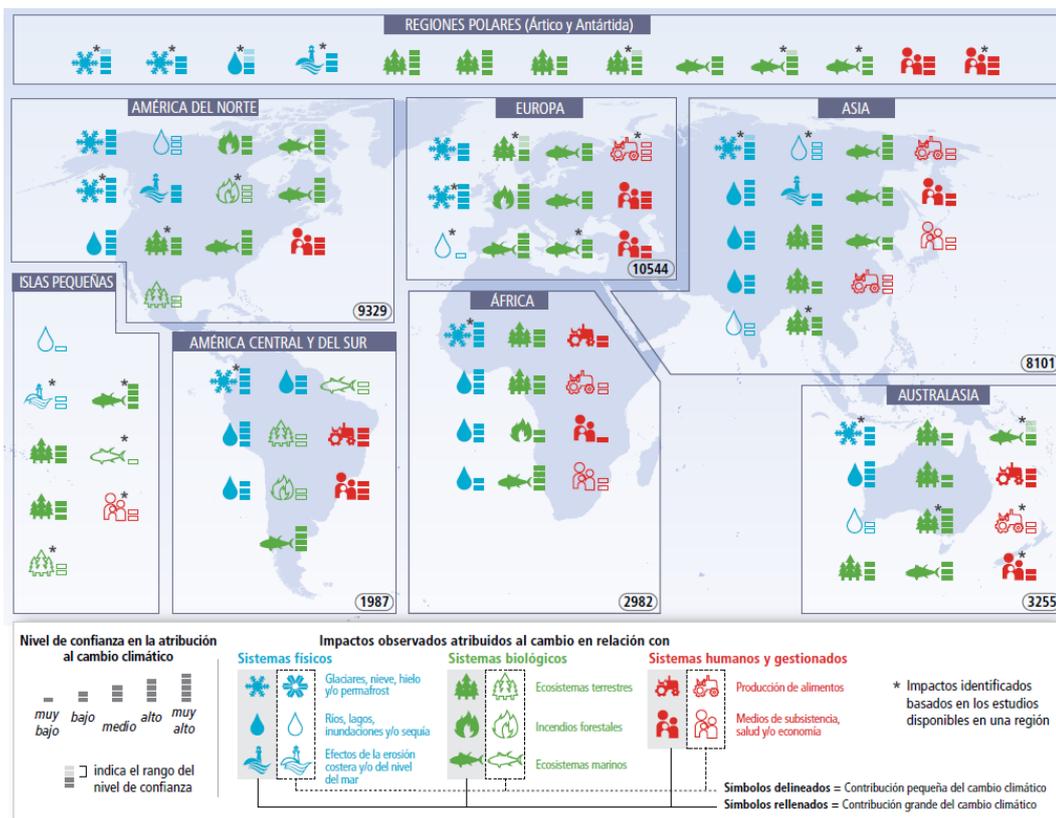


Figura 2: Impactos observados atribuidos al Cambio Climático

Fuente: (IPCC, 2014b)

2.1.2. Modelos climáticos

Los modelos climáticos son herramientas para evaluar la respuesta del sistema climático ante el cambio climático, estos se basan en procesos físicos para simular la transferencia de energía y materiales a través del sistema climático; se hace uso de ecuaciones matemáticas para caracterizar cómo la energía y la materia interactúan en diferentes partes del océano, la atmósfera y la tierra (IPCC, 2014a).

2.1.2.1. Modelos climáticos globales (GCM)

También es conocido como modelos de circulación general, permiten realizar proyecciones del clima futuro sobre un intervalo de tiempo determinado; son modelos probabilísticos y manejan una gran cantidad de datos, de allí también que los costos computacionales de estos modelos son elevados; la salida de los

parámetros está en escala mensual, otra característica es que un modelo tiene hasta 1 millón de puntos en 20 niveles verticales, y las ecuaciones se resuelven cada 10 minutos, durante periodos de tiempo que dependen de la simulación, aproximadamente entre 10 a 1000 años.

El acceso a la información es de libre descarga a través del enlace: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>, en la Tabla 1 se enumera los GCM atmosférico y oceánico, y se muestra la resolución de la cuadrícula de cada modelo. Para la grilla atmosférica la resolución tabulada es válida para la resolución ecuatorial, para latitudes altas puede ocurrir desviaciones. Los modelos oceánicos tienen su propia cuadrícula más fina, y la resolución no es constante (ENES, 2019).

Tabla 1: Lista y resolución de los GCM Atmosférico y oceánico

Modelo	Grilla Atmosférica		Grilla Oceánica	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
ACCESS1.0	1.25	1.875	lat(i,j)	lon(i,j)
ACCESS1.3	1.25	1.875	lat(i,j)	lon(i,j)
BCC-CSM1.1	2.7906	2.8125	0.3333, 1	1
BCC-CSM1.1(m)	2.7906	2.8125	0.3333, 1	1
BNU-ESM	2.7906	2.8125	0.3344, 1	1
CCSM4	0.9424	1.25	lat(i,j)	lon(i,j)
CESM1(BGC)	0.9424	1.25	lat(i,j)	lon(i,j)
CESM1(CAM5)	0.9424	1.25	lat(i,j)	lon(i,j)
CESM1(FASTCHEM)	0.9424	1.25	only time-independent ocean data	
CESM1(WACCM)	1.8848	2.5	lat(i,j)	lon(i,j)
CFSv2-2011	1	1	0.5	0.5
CMCC-CESM	3.4431	3.75	lat(i,j)	lon(i,j)
CMCC-CM	0.7484	0.75	lat(i,j)	lon(i,j)
CMCC-CMS	3.7111	3.75	lat(i,j)	lon(i,j)
CNRM-CM5	1.4008	1.40625	lat(i,j)	lon(i,j)
CNRM-CM5-2	1.4008	1.40625	lat(i,j)	lon(i,j)
CSIRO-Mk3.6.0	1.8653	1.875	0.9327, 0.9457	1.875

Tabla 1 (continuación): Lista y resolución de los GCM Atmosférico y oceánico

Modelo	Grilla Atmosférica		Grilla Oceánica	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
CSIRO-Mk3L-1-2	3.1857	5.625	only time-independent ocean data	
CanAM4	2.7906	2.8125	no ocean data	
CanCM4	2.7906	2.8125	0.9303, 1.1407	1.40625
CanESM2	2.7906	2.8125	0.9303, 1.1407	1.40625
EC-EARTH	1.1215	1.125	lat(i,j)	lon(i,j)
FGOALS-g2	2.7906	2.8125	0.5, 1	1
FGOALS-gl	4.1026	5	1	1
FGOALS-s2	1.659	2.8125	0.5, 1	1
GEOS-5	2	2.5	1	1
GFDL-CM2.1	2.0225	2.5	0.3344, 1	1
GFDL-CM3	2	2.5	0.3344, 1	1
GFDL-ESM2G	2.0225	2	0.375, 0.5	1
GFDL-ESM2M	2.0225	2.5	0.3344, 1	1
GISS-E2-H	2	2.5	1	1
GISS-E2-H-CC	2	2.5	1	1
GISS-E2-R	2	2.5	1	1.25
GISS-E2-R-CC	2	2.5	1	1.25
HadCM3	2.5	3.75	1.25	1.25
HadGEM2-A	1.25	1.875	no ocean data	
HadGEM2-AO	1.25	1.875	0.3396, 1	1
HadGEM2-CC	1.25	1.875	0.3396, 1	1
HadGEM2-ES	1.25	1.875	0.3396, 1	1
INM-CM4	1.5	2	0.5	1
IPSL-CM5A-LR	1.8947	3.75	lat(i,j)	lon(i,j)
IPSL-CM5A-MR	1.2676	2.5	lat(i,j)	lon(i,j)
IPSL-CM5B-LR	1.8947	3.75	lat(i,j)	lon(i,j)
MIROC-ESM	2.7906	2.8125	0.5582, 1.7111	1.40625

Tabla 1 (continuación): Lista y resolución de los GCM Atmosférico y oceánico

Modelo	Grilla Atmosférica		Grilla Oceánica	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
MIROC-ESM-CHEM	2.7906	2.8125	0.5582, 1.7111	1.40625
MIROC4h	0.5616	0.5625	0.1875	0.28125
MIROC5	1.4008	1.40625	0.5, 0.5	1.40625
MPI-ESM-LR	1.8653	1.875		
MPI-ESM-MR	1.8653	1.875		
MPI-ESM-P	1.8653	1.875		
MRI-AGCM3-2H	0.562	0.5625	no ocean data	
MRI-AGCM3-2S	0.188	0.1875		
MRI-CGCM3	1.1215	1.125	0.5, 0.5	1
MRI-ESM1	1.1215	1.125	0.5, 1.125	1
NorESM1-M	1.8947	2.5	lat(i,j)	lon(i,j)
NorESM1-ME	1.8947	2.5	lat(i,j)	lon(i,j)

Fuente: (ENES, 2019).

Los componentes de los modelos climáticos están definidos por tres grandes procesos (IPCC, 2014a):

- Radiativo: maneja la entrada y absorción de la radiación solar y la emisión de radiación infrarroja
- Dinámico: el movimiento de la energía en todo el mundo (de bajas y altas latitudes)
- Procesos de superficie: Inclusión de la tierra – océano – hielo y el consiguiente cambio en el albedo, emisividad, y los intercambios entre atmosfera y la superficie.

2.1.2.2. Modelos climáticos regionales (RCM)

Una limitación de los GCM es la resolución bastante gruesa, el cual provoca que la incertidumbre en la predicción de las variables climáticas sea considerable, ante este problema se originan los modelos climáticos regionales, los cuales tienen una resolución bastante fina y hace que la precisión de predicción de las variables climáticas sea bastante precisa, las resoluciones de las cuadrículas están en el orden de 50 a 25km y representan mejor a la información observada, tal como se muestra en Figura 3. (Climateprediction.net, 2019).

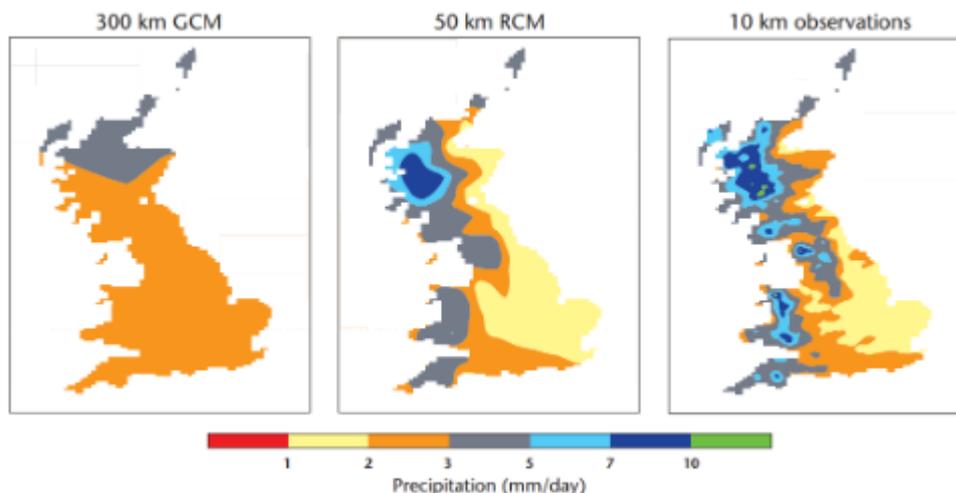


Figura 3: Representación del Reino Unido en un GCM, RCM y observada

Fuente: (Climateprediction.net, 2019)

2.1.2.3. Escenarios de emisión

Los escenarios de emisión concentran series de emisión y concentración de los gases de efecto invernadero, gases químicamente activos, uso del suelo y la cubierta terrestre, dichos escenarios son denominados; trayectorias de concentración representativas (RCP) (Moss et al., 2008). Cada trayectoria de concentración representa a muchos posibles escenarios que conducirán a la ocurrencia del forzamiento radiactivo (IPCC, 2014a).

El termino trayectoria, fue definido tomando en cuenta la concentración a largo plazo, pero también incluye el camino a seguir (Moss et al., 2008), las trayectorias definidas y aceptadas por el IPCC reportadas en el quinto informe se encuentra en la Tabla 2.

Tabla 2: Trayectorias de concentración representativas (RCP)

Escenario	FR al 2100	Tendencia del FR	[CO ₂] en 2100
RCP2.6	2.6 w/m ²	Decreciente después del 2100	421 ppm
RCP4.5	4.5 w/m ²	Estable posterior al 2100	538 ppm
RCP6.0	6.0 w/m ²	Estable posterior entre el 2100 y 2150	670 ppm
RCP8.5	8.5 w/m ²	Creciente hasta el 2100 y constantes después del 2250	939 ppm

Fuente: Adaptado de (IPCC, 2014a)

2.1.2.4. *Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP)*

El Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), es un proyecto que estudia la producción de los modelos climáticos, proporciona una infraestructura para el diagnóstico, validación, la intercomparación, la documentación y el acceso a los datos de los modelos climáticos.

Estos modelos climáticos globales tienen la capacidad para simular la temperatura superficial media anual y precipitaciones observadas en base a las tres fases recientes, CMIP2 (2000), CMIP3 (2005) y CMIP5 (generación actual de modelos). Los modelos actuales son evaluados en el quinto informe (AR5) del IPCC, la resolución horizontal más fina es la atmosfera de alrededor de 70 km, pero el promedio es de aproximadamente 200 km.

En el proyecto CMIP5, se han realizado simulaciones a corto plazo (10-30 años) o a largo plazo (siglo y más) y para cada modelo se realizó un experimento de control y otro de aumento de CO₂ en 1% por año. Los modelos con capaces de producir la variabilidad de los parámetros climáticos simulados, es así, que los experimentos del CMIP5 utilizaron varios estados iniciales, métodos de inicialización y detalles de física, para ello los miembros del conjunto se nombran en la nomenclatura r*i*p, r para la realización, i para la inicialización y p para la física, seguidos de un número entero, por ejemplo, r1i1p1 (ENES, 2019).

2.1.2.5. *Incertidumbre de los modelos climáticos*

La confiabilidad de los GCM es muy variada para diversos lugares del mundo, y depende de la variable en estudio, por ejemplo, la temperatura simulada por los GCM tiene un alto nivel de confianza, pero a pesar de ello, el calentamiento global se observa en resultados teóricos, a diferencia del calentamiento regional que si es observado en la actualidad. En cuanto a la variable de precipitación la confiabilidad es bastante relativa, algunos modelos podrían simular muy bien el comportamiento y otros modelos climáticos podría estar bastante distorsionado (Rau, 2017).

Para mejorar la predicción de los GCM, es necesario realizar correcciones de sesgo antes que se utilicen para investigaciones de recursos hídricos (Fang et al., 2015); esta técnica de mejorar la calidad de información es denominada: técnicas de escalamiento.

2.1.2.6. Técnicas de escalamiento

El escalamiento llamado también downscaling, es el procedimiento que permite obtener información de gran escala a un nivel de escala local (GISPROGRAM, n.d.); Generalmente la resolución de los GCM está en el rango 0.2° - 4° como se muestra en la Tabla 1, el cual no es adecuado utilizar la información a ese nivel de escala, ya que genera un sesgo considerable con respecto a la información observada; es así que las técnicas de escalamiento a partir de los GCM y la información observada, generan nuevas informaciones capaces de representar la realidad. Existen dos tipos de escalamiento: Estadístico y dinámico.

2.1.2.7. Escalamiento estadístico

Consiste en realizar dos pasos: el primero es encontrar una relación estadística entre la variable climática observada y la simulada por los GCM, cabe resaltar que la relación entre ellos se debe realizar en el mismo periodo de tiempo; el segundo paso es aplicar la relación encontrada a los valores simulados (Hoar & Doug, 2008). Para el estudio sobre recurso hídrico, las variables de interés dadas por los GCM son la precipitación y temperatura, y las técnicas más comunes de escalamiento estadístico son las que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: métodos de corrección de sesgo para precipitación y temperatura

Corrección de sesgo para precipitación	Corrección de sesgo para temperatura
*Escalamiento Lineal (LS)	*Escalamiento Lineal (LS)
*Escalamiento de intensidad local (LOCI)	*Escalamiento de la varianza (VARI)
*Trasformación de potencia (PT)	*Mapeo de distribución para temperatura usando la función de distribución gaussiana (DM)
*Mapeo de distribución para precipitación usando la función de distribución gamma (DM)	
*Mapeo de cuantiles (QM)	

Fuente: (Fang et al., 2015)

De acuerdo al estudio realizado por (Fang et al., 2015), se realiza un análisis de sensibilidad en el modelo hidrológico WEAP en función a los distintos métodos de corrección de sesgo de las variables meteorológicas (precipitación y temperatura), concluye que el método más estable para el escalamiento estadístico de la variable precipitación es el mapeo de cuantiles (QM), y para la temperatura el

escalamiento lineal (LS), es por ello que se aplicó los métodos mencionados en la presente investigación, los mismos que se detallan a continuación:

- Escalamiento Lineal (LS) para precipitación y temperatura

El método LS tiene como objetivo hacer coincidir exactamente la media de los valores corregidos con la de los observados (Lenderink et al., 2007). La corrección se realiza con las diferencias entre los datos observados y los datos brutos (salida de los GCM). La corrección para datos a escala mensual, la precipitación se hace a través de un multiplicador (ver ecuación 1), y para la temperatura con un término aditivo (ver ecuación 2).

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

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

Donde, $P_{cor,m}$ y $T_{cor,m}$ son la precipitación y temperatura corregida en el mes m , $P_{sim,m}$ y $T_{sim,m}$ son la precipitación y temperatura simulada, y el símbolo μ , representa la media.

- Mapeo de cuantiles (QM) para precipitación

Es un método de corrección de sesgo no paramétrico y generalmente es aplicable para todas las posibles distribuciones estadísticas, al cual se ajusta la variable de interés, además, utiliza la función de probabilidad completa, cuyo objetivo principal es garantizar que los valores extremos estén representados de forma adecuada; por ejemplo, para la variable de precipitación se ha demostrado que el método QM puede representar eficazmente el sesgo en la media, desviación estándar y la frecuencia de los días húmedos (Themeßl et al., 2012).

Para la precipitación, el ajuste usando QM puede expresarse en términos del CDF empírico (ecdf) y su inverso (ecdf⁻¹) como se muestra en la ecuación 3.

$$P_{cor,m} = ecdf_{obs,m}^{-1}(ecdf_{sim}(P_{sim,m})), \quad (3)$$

2.1.2.8. Escalamiento dinámico

El escalamiento dinámico requiere de ejecución de modelos climáticos de alta resolución en un subdominio regional, el cual se apoya en información observada. Estos modelos utilizan principios físicos para reproducir climas locales, la

desventaja es que computacionalmente son intensos y costosos (GISPROGRAM, n.d.). El escalamiento dinámico es usado para producir modelos climáticos regionales o locales.

2.1.2.9. Proyección climática

La proyección climática es la respuesta simulada del sistema climático (interacción entre la atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera), esto basado en diversos escenarios de emisión o de concentración futuras de gases de efecto invernadero, en donde se usa los modelos climáticos para realizar las simulaciones. (IPCC, 2014a), por ejemplo, en la presente investigación se realizará la proyección de la precipitación y temperatura usando diferentes modelos climáticos en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

2.1.3. Métodos de interpolación

La interpolación consiste en obtener valores de una variable dentro de una región, en lugares donde no sean registrado valores reales; generalmente los métodos de interpolación se basan en que los valores de las variables buscadas, son similares a los valores medidos en los puntos de muestra vecinos que los valores de muestra más distante (Lanza et al., 2001). Existen muchos métodos de interpolación, sin embargo, los más usados en hidrología son el IDW, Kriging y Natural neighbour.

2.1.3.1. IDW

La ponderación de distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés) es un método propuesto por Shepard (1968), el cual considera que cuanto más se aleja la posición de estimación de la posición de un valor observado, menor es su influencia en el valor interpolado (da Silva et al., 2019), la fórmula de IDW está dado por la ecuación 4 y 5.

$$F(r) = \sum_{k=1}^N W(r_k) f(r_k), \quad (4)$$

Donde: $r = (x, y)$, es la posición del punto de estimación; $F(r)$, es el valor interpolado en el punto r ; N , es el número de observaciones (ejemplo: Estaciones meteorológicas); $f(r_k)$, es el valor observado en la estación con posición $r_k = (x_k, y_k)$; y $W(r_k)$, es el peso de la estación el cual está dado por ecuación 5.

$$W(r_k) = \frac{d_k(r)^{-p}}{\sum_{k=1}^N d_k(r)^{-p}}, \quad (5)$$

Donde: $d_k(r) = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$, es la distancia euclidiana entre el punto r y r_k ; y p , es el parámetro que indica la tasa de disminución de la influencia de las observaciones con la distancia: los valores más altos de p implican una disminución más rápida de la influencia con la distancia.

2.1.3.2. *Kriging*

Este método tiene un procedimiento similar a IDW, con la diferencia en el cálculo de los pesos, el cual este método determina a partir de relaciones espaciales y estadísticas obtenidas a través de la gráfica del semivariograma empírico dado por la ecuación 6:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{k=1}^{N(h)} [f(r_k) - f(r_k + h)]^2, (6)$$

Dónde: $N(h)$, es el número de pares de muestra $(f(r_k), f(r_k + h))$ separado por una distancia h . La función empírica $\gamma(h)$ es la función de ajuste funcional (modelo de variograma).

2.1.3.3. *Natural neighbour*

El método de interpolación de vecino natural es una técnica propuesta por Sibson (1980), el cual se basa en el promedio ponderado de áreas alrededor de cada punto de muestreo (da Silva et al., 2019), dichas áreas se terminan generando diagramas de Voronoi (Thiessen) alrededor de cada punto, llamados puntos generadores, de modo que cada punto dado por φ_k está más cerca de su punto generador que de cualquier otro; por lo tanto, cada punto añadido r_k tiene asociado un polígono, el cual se interseca con los polígonos de los puntos observados y la fracción del área robada viene dada por la ecuación 7, finalmente la interpolación del vecino natural se obtiene reemplazando el peso de la ecuación 7 en la ecuación 4.

$$W_k(r) = \frac{A(\varphi_k \cap \varphi_r)}{\sum_{i=1}^N A(\varphi_i \cap \varphi_r)}, (7)$$

2.1.3.4. *IDW más corrección por altitud*

Es un método derivado de la interpolación IDW propuesta por Valery (2010), en donde considera una corrección por la gradiente altitudinal para ello se hace uso del modelo de elevación digital (DEM) de la cuenca en estudio, dicha metodología permite obtener la precipitación y temperatura para estudios acerca de oferta

hídrica (Valéry et al., 2010), dichos factores de corrección se muestran en la ecuación 8 y 9, para obtener el valor interpolado de la precipitación se debe multiplicar el factor a la ecuación 4, mientras que para obtener el valor de la temperatura interpolada se debe añadir el factor a la ecuación 4.

$$\text{Factor de corrección para precipitación} = e^{\theta_{precip} \times \Delta Z}, \quad (8)$$

$$\text{Factor de corrección para temperatura} = \theta_{temp} \times \Delta Z, \quad (9)$$

Donde: θ_{precip} y θ_{temp} , son los factores de precipitación y temperatura respectivamente, su valor es variable dependiendo al lugar de estudio, $\theta_{precip} = 4 \times 10^{-4} m^{-1}$ fue usado por Rau et al., 2019 para cuencas de la costa peruana, donde para dicho valor le corresponde un incremento del 20% de la precipitación local por cada 500m de variación de elevación. Y $\theta_{temp} = -6.5^\circ C/km$ para temperatura.

2.1.4. Modelo hidrológico

2.1.4.1. Ciclo hidrológico

Denominado también el ciclo del agua, describe el flujo de las moléculas de agua desde la superficie de la tierra hacia la atmosfera y viceversa, y algunas veces desde el subsuelo. Este sistema es impulsado por la energía solar, el cual produce un intercambio continuo de humedad entre la tierra, océano y atmosfera (Graham et al., 2010).

En la Figura 4, se muestra los principales procesos del ciclo hidrológico, de ellos la evaporación (cambio de líquido a gas) es el más influyente, ya que proporciona el 90% de la humedad en la atmósfera y es liberada por los océanos, mares y otros cuerpos de agua; los otros 10% se encuentra en la atmosfera y es liberada por las plantas a través de la transpiración, también existen procesos como la sublimación (sólido a gas). Juntos, la evaporación, la transpiración y la sublimación, más las emisiones volcánicas, representan casi todo el vapor existente en la atmósfera, finalmente este vapor asciende, llegando a lugares de baja temperatura en donde se condensa y produce la precipitación, este último es el mecanismo principal para el transporte del agua desde la atmosfera hacia la

superficie terrestre, y allí sucede procesos de filtración, percolación y flujo subterráneo, completando así el ciclo del agua.

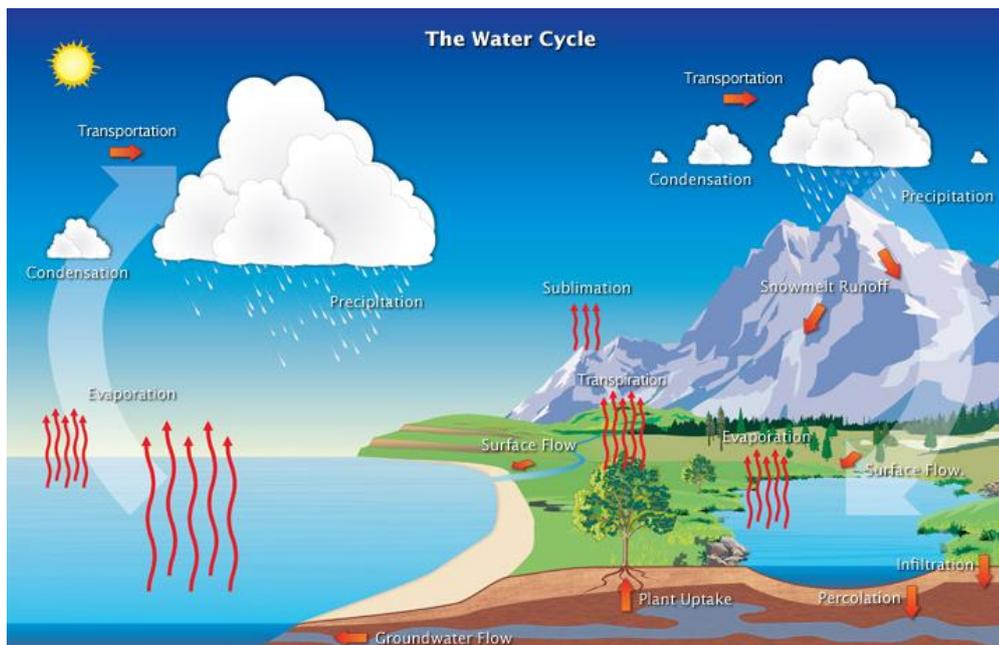


Figura 4: El ciclo hidrológico del agua

Fuente: (Graham et al., 2010)

2.1.4.2. Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica, es una superficie de la tierra que limita por las partes más elevadas, llamadas divisorias de aguas, y el agua que cae dentro de la cuenca drena hacia un punto en común (Chow, 1994), ver Figura 5.

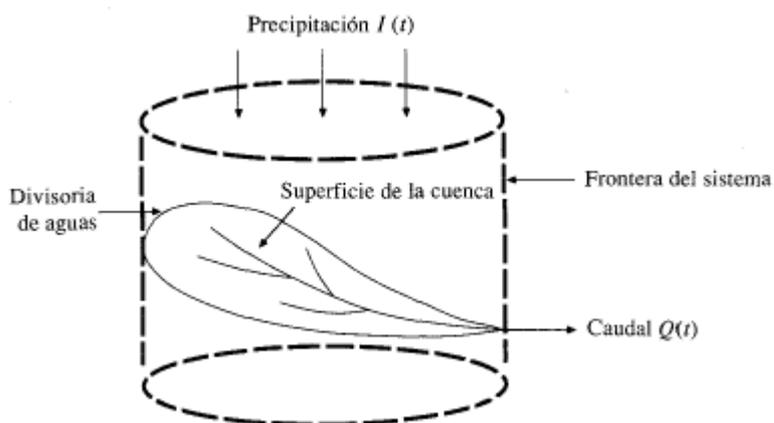


Figura 5: Cuenca como un sistema hidrológico

Fuente: (Chow, 1994)

2.1.4.3. *Concepto de sistemas*

Es un conjunto de partes conectadas entre sí (entradas y salidas), los cuales ayudan a representar de forma simplificada algún fenómeno complejo. Por ejemplo el proceso de precipitación escorrentía, se puede representar como un sistema hidrológico en una cuenca, tal como muestra la Figura 5, el cual muestra como entrada a la precipitación, distribuida en la superficie de la cuenca, y como salida al caudal de escorrentía y en una pequeña proporción la infiltración y el flujo sub superficial, dicho sistema está limitado por las divisorias de agua (Chow, 1994).

2.1.4.4. *Clasificación de los modelos hidrológicos*

Un modelo hidrológico es la representación del comportamiento de un sistema hidrológico y pueden dividirse en dos categorías: modelos físicos y modelos abstractos. Los modelos físicos son una representación a escala reducida, que usan otro sistema físico con propiedades similares a las del prototipo. Los modelos abstractos representan el sistema de forma matemática, donde contiene un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y salida. Los modelos abstractos de acuerdo a la naturaleza de las variables se clasifican en determinístico y estocástico (ver Figura 6), donde la primera no considera aleatoriedad (pronostican) y la segunda produce salidas parcialmente aleatorias manteniendo el rango de la media y desviación estándar de las entradas (predicen). A su vez los modelos determinísticos de acuerdo a su distribución espacial se clasifican en modelos agregado, semidistribuido y distribuido, esta clasificación toma en cuenta la clasificación del suelo y los procesos de flujo superficial y subterráneo, en donde los modelos agregados son aplicados a cuencas pequeñas con características geomorfológicas homogéneas, mientras que para cuencas con cierta heterogeneidad se usan los modelos semidistribuidos, ya que subdivide en cuencas más pequeñas (sub cuencas) de acuerdo a un similar comportamiento hidrológico; los modelos distribuidos se usan para representar mejor las variaciones del suelo, y otras características, en el cual se divide a la cuenca en elementos mucho más pequeños denominados grillas y para cada grilla se realiza el análisis de balance hídrico y requiere de una mayor cantidad de datos (Chow, 1994).

A ello se le suma los siguientes tipos de modelos:

- Continuos: es cuando el fenómeno es continuo en el tiempo

- Discretos: es cuando los cambios de estado se dan en intervalos discretos.
- Concentrado: cuando no toma en cuenta la variabilidad espacial.
- Distribuido: cuando las variables y parámetros del modelo dependen del espacio y tiempo.
- Conceptual: cuando las funciones utilizadas toman en cuenta los procesos físicos.
- Empírico: es cuando los valores calculados se ajustan a los datos observados.

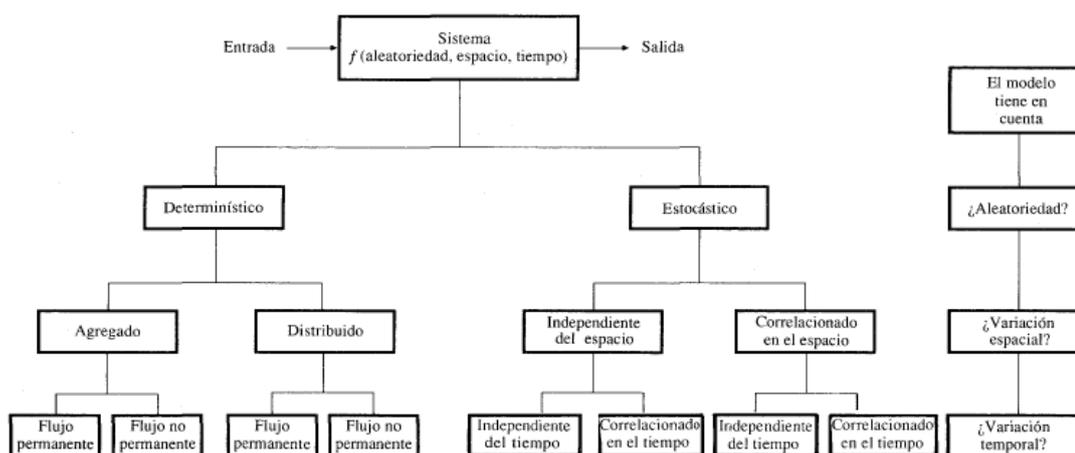


Figura 6: Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de las variables.

Fuente: (Chow, 1994)

2.1.4.5. Criterio de calibración

Los modelos hidrológicos tienen un número limitado de parámetros para calibrar, esto limita en cierta manera la optimización y la robustez de los modelos. De allí que los algoritmos de optimización son relativamente simples, en la presente investigación se usará el paquete airGR programado en el lenguaje R, el cual es un algoritmo predeterminado para el criterio de optimización y desarrollado en Irstea (Michel, 1991). Para la calibración y validación de los modelos se usa los criterios de eficiencia, el paquete incluye tres criterios:

- Raíz del error medio cuadrático (RMSE)

Este índice indica el error entre los valores simulados y observados en las mismas unidades de las variables, cuando el RMSE es 0 indica un ajuste perfecto.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}, \quad (21)$$

Donde: Q_{sim_i} es la variable simulada en el tiempo i , y Q_{obs_i} es el valor de la variable observada en el paso de tiempo i .

- Nash-Sutcliffe (NSE)

El criterio de Nash-Sutcliffe es un valor normalizado, que determina la magnitud relativa de la varianza residual (“ruido”) en comparación con la varianza de los datos medidos (Nash & Sutcliffe, 1970). El índice NSE se calcula como muestra la ecuación 22, y para la calibración y validación de modelos hidrológicos ampliamente usado, y de acuerdo al valor se evalúa la eficiencia del modelo como muestra la Tabla 4.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{prom_i})^2} \right], \quad (22)$$

Donde: Q_{prom_i} es el promedio de los valores observados.

Tabla 4: Calificaciones de NSE para evaluar el rendimiento de modelos a paso de tiempo mensual

Calificación de Rendimiento	NSE
Muy bueno	< 0.75 ; 1]
Bueno	< 0.65 ; 0.75]
Regular	< 0.50 ; 0.65]
Malo	≤ 0.50]

Fuente: Adaptado de Moriasi et al., 2007

- Kling-Gupta (KGE)

El índice de Kling-Gupta es otra metodología que ayuda a reducir los problemas de calibración de los modelos hidrológicos (Gupta et al., 2009), de ahí que la aplicación en esta rama es bastante usada en los últimos años para la evaluación e identificación del desempeño de los modelos.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}, \quad (23)$$

Donde:

r en la correlación lineal entre la variable simulada y observada.

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}, \quad (24)$$

$$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}, \quad (25)$$

2.1.4.6. Incertidumbre de los modelos hidrológicos

De acuerdo a Cabrera (2011), existe cuatro principales fuentes de incertidumbre:

- Errores aleatorios o sistemáticos en los datos de entrada

En los modelos GR las variables de entrada son la precipitación y evapotranspiración, la escasa cantidad de estaciones generan una fuente de error considerable, en caso de la evapotranspiración es aún más incierto ya que no se cuenta con estaciones y se tiene que calcular con formulaciones matemáticas.

- Errores aleatorios o sistemáticos en el valor registrado

Existe escasa cantidad de estaciones automáticas, y la gran mayoría son de las estaciones requieren de tomar registros de forma manual, el cual es otra fuente de error ya que no se registra el valor verdadero y en el horario exacto.

- Errores debido a valores de parámetros no óptimos

Los parámetros de los modelos hidrológicos conceptuales – empíricos como el GR2M calculados por el proceso de calibración no es del todo exacto, el cual se convierte en otra fuente de error.

- Errores debidos a la estructura del modelo

Los modelos abstractos realizan una aproximación simplificada de la realidad a través de procesos matemáticos que relacionan las variables de entrada y salida; los cuales presentan muchas limitaciones a raíz de que es complicado tomar en cuenta todos los procesos involucrados en el sistema.

2.1.4.7. Modelos GR (Genie Rural)

Los modelos GR son del grupo de modelos precipitación – escorrentía, desarrolladas por la unidad de investigación en hidrología del Cemagref d'Antony. La característica de este grupo de modelos es que tiene a la precipitación y a la evapotranspiración como variables de entrada (Cabrera, 2012). Los modelos GR se pueden aplicar en una amplia gama de condiciones, incluidas las cuencas cubiertas de nieve. Los modelos GR están en constante evolución desde

versiones como GR1A, para caudales anuales, GR2M, para caudales mensuales, GR3J y GR4J, para caudales diarios, GR4H y GR5H, para caudales horarios, etc.

2.1.4.8. Modelo GR2M

GR2M es un modelo agregado que simula caudales a escala mensual, tiene como variables de entrada a la precipitación y evapotranspiración y como variable de salida al caudal, el modelo GR2M tiene dos funciones una de producción y otra de transferencia.

El modelo consta de dos reservorios: el reservorio suelo y el reservorio de agua gravitacional. La estructura del modelo se muestra en la Figura 7, el cual consta de un conjunto de procesos; donde P es la precipitación media de la cuenca, E es la evapotranspiración, P_1 es la escorrentía superficial, P_2 la percolación profunda, S es el almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis, R el almacenamiento del reservorio de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis y Q el caudal a la salida de la cuenca. El reservorio gravitacional es asumido como 60mm, X_1 es la capacidad del reservorio suelo en milímetros y X_2 es el coeficiente adimensional de intercambios subterráneos (Cabrera, 2012).

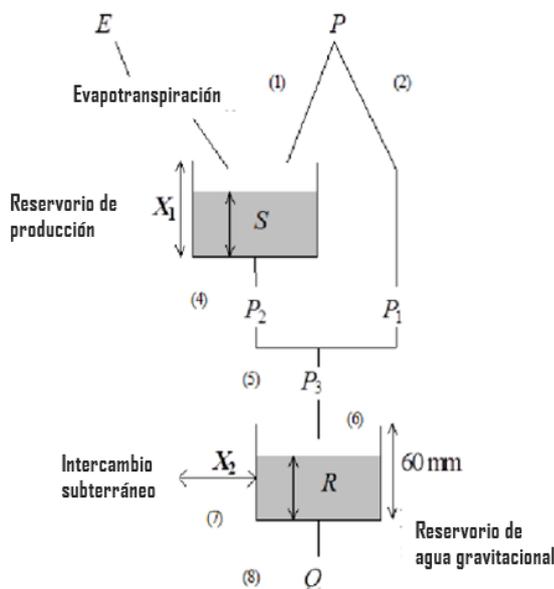


Figura 7: Estructura del modelo GR2M

Fuente: (Mouelhi et al., 2006)

- Función de producción

De acuerdo con el esquema (Figura 7), parte de la precipitación se almacena en el reservorio y la otra parte (P_1) alimenta al reservorio de agua gravitacional, de allí que el nuevo volumen del reservorio de suelo (S_1) se calcula como muestra la ecuación 10.

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}}, \quad (10)$$

Dónde: φ se define como:

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right), \quad (11)$$

Despreciando las pérdidas, el volumen de agua previo a la infiltración tendría que ser constante, por lo tanto.

$$P_1 = P + S - S_1, \quad (12)$$

Por otro lado, la evapotranspiración reduce el volumen del reservorio de suelo a S_2 , por lo tanto, el nuevo volumen será:

$$S_2 = \frac{S_1(1-\omega)}{1 + \omega\left(1 - \frac{S}{X_1}\right)}, \quad (13)$$

Donde: ω se define como:

$$\omega = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right), \quad (14)$$

Del volumen S_2 será transferido al reservorio de agua gravitacional y el remanente será el volumen inicial S para el siguiente periodo de análisis. Por lo tanto, S será:

$$S = \frac{S_2}{\left(1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right)^{\frac{1}{3}}}, \quad (15)$$

Finalmente, el volumen de percolación P_2 será:

$$P_2 = S_2 - S, \quad (16)$$

- Función de transferencia

A partir de P_2 y P se calcula la precipitación efectiva que ingresa al reservorio de agua gravitacional P_3

$$P_3 = P_1 + P_2, (17)$$

El valor de P_3 alimenta al volumen inicial del reservorio de agua gravitacional R

$$R_1 = R + P_3, (18)$$

Este volumen tendrá que ser corregido por el factor X_2 , a causa del intercambio existente entre los volúmenes a nivel sub superficial.

$$R_2 = X_2 R_1, (19)$$

Finalmente, el reservorio de agua gravitacional se vacía de acuerdo a una función cuadrática, de allí se obtiene el caudal de salida:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60}, (20)$$

de lo visto, los volúmenes estimados dependen de los dos parámetros X_1 y X_2

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Disponibilidad hídrica

La disponibilidad hídrica también es conocido como disponibilidad de agua y representa el volumen total de agua que puede ser aprovechado para diversos usos, tales como para consumo humano, agricultura, generación de energía eléctrica, etc. (Silva-Hidalgo et al., 2013).

En el Perú la Autoridad Nacional del Agua (ANA), es la encargada de cuantificar la disponibilidad hídrica para su posterior otorgamiento de licencia de uso de agua. Y en muchos estudios para el caso de los ríos la disponibilidad hídrica se toma en cuenta como la variable más importante al caudal de escorrentía superficial.

Para el caso de la ciudad de Tacna, el año 2014, el grupo conformado por la Administración Local de Tacna, Junta de Usuarios de valle de Tacna, el Proyecto Especial Tacna, EPS Tacna S.A. y la secretaria Técnica del Consejo de Recursos Hídricos de las Cuencas Caplina – Locumba, analizaron las disponibilidades hídricas del agua superficial de los ríos Caplinas y Uchusuma, además de algunos

reservorios y aguas subterráneas, con la finalidad de atender las demandas del sector poblacional, agrícola y otros usos. (MINAGRI, 2014). En ello se puede notar que la disponibilidad hídrica para la cuenca Caplina está en función al caudal de escorrentía superficial del río.

A partir de ello, hablar de la disponibilidad hídrica para la cuenca Caplina, será equivalente a decir caudal de escorrentía superficial.

2.2.2. Clima

El clima se define tradicionalmente en términos de la media y la variabilidad de patrones atmosféricos como la precipitación, temperatura y el viento. El clima refleja las mismas condiciones atmosférica en meses, años y décadas, según la OMM, periodo de 30 años debe ser utilizado para definir el clima (Senamhi, 2018).

2.2.3. Precipitación

La precipitación forma parte del ciclo hidrológico (ver ítem 2.1.4.1) y desde el punto de vista hidrológico, es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, es así, que a partir de la precipitación es posible realizar estudios concernientes al aprovechamiento y control del agua. (Villón, 2002).

En cuanto a su origen, la precipitación se constituye en las nubes por unas pequeñas gotas de agua, con diámetro de 0.02mm aproximadamente, y estas al caer se presentan en forma de llovizna, lluvia, escarcha, nieve y granizo, los cuales se diferencian principalmente en sus diámetros, en cuanto a la medición de la precipitación se emplea los pluviómetros y se acostumbra a medir en términos de la altura de la lámina de agua y se expresa comúnmente en milímetros. (Villón, 2002).

2.2.4. Temperatura

La temperatura es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, de un objeto o del medio ambiente, y se mide comúnmente en grados centígrados. (Chow, 1994). La temperatura atmosférica es el índice de la energía calorífica acumulada en el aire y depende de la interacción de los rayos solares, viento, latitud, entre otros.

2.2.5. Producto PISCO

Es el acrónimo de **Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and Hidrological Observation**, y fue realizada por SENAMHI. El producto PISCO es una base de datos grillada a nivel nacional (Perú) con una resolución espacial de 0.05° (~5.5 km), en la actualidad se tiene disponible a las variables climáticas de precipitación, temperatura y evapotranspiración; tanto a escala diaria y mensual; los cuales abarcan una serie temporal desde el año 1981 hasta el año 2016. Para la construcción del producto PISCO fue necesario usar la base de datos del proyecto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) como una covariable, y fueron corregidas para cada punto de observación con la interpolación de los datos registrados en las distintas estaciones. (Aybar et al., 2017).

2.2.6. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un proceso combinado entre la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. Los factores que dominan en la evapotranspiración son: el suministro de energía, el transporte de vapor y el suministro de humedad a la superficie de evaporación, comúnmente se mide en términos de altura de agua expresado en milímetros (Chow, 1994).

Para el cálculo de la evapotranspiración, existen diversos métodos de los cuales el más resaltante es de Penman-Monteith, el mismo que es aceptado por la FAO, otras formulaciones eficaces son de Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Hamon, entre otros, donde las principales variables de ingreso son la temperatura, radiación, velocidad del viento, presión de vapor, etc. En el año 2005, Ludovic Oudin propuso una formulación para el cálculo de la evapotranspiración con fines de modelamiento de precipitación – escorrentía, el cual se utilizó en la presente investigación y se detalla en el siguiente ítem.

2.2.6.1. Método de Oudin

Ludovic Oudin hizo una evaluación y comparación con 27 métodos, y lo aplicó en 308 cuencas localizadas en países como Francia, Australia y Estados Unidos; todo con fines de modelamiento de precipitación - escorrentía, en donde su propuesta consistía en usar como variable de entrada la temperatura media y la radiación solar que depende de la latitud media de la cuenca; como resultado de

la investigación validó su propuesta y desde entonces es ampliamente usado en investigaciones afines al modelamiento tipo precipitación – escorrentía.

Existen muchas formulaciones que permiten estimar la evapotranspiración potencial, una de las más usadas para realizar modelos hidrológicos precipitación-escorrentía es el propuesto por Oudin et al. (2005).

El método de Oudin es la que muestra en la ecuación 26, en donde PET es la evapotranspiración potencial (mm/d), R es la radiación extraterrestre (MJ/m²/d) y T es la temperatura media del aire (°C).

$$PET = \frac{R}{28.5} \times \frac{T+5}{100} \text{ si } T + 5 \geq 0 \text{ caso contrario } PET = 0, (26)$$

De acuerdo a (Oudin et al., 2010), la ecuación 26, también puede ser usada con temperaturas mensuales, además la radicación extraterrestre es una variable diaria que depende de la latitud y del día juliano del año (Morton, 1983).

2.2.7. Caudal de escorrentía superficial

El caudal de escorrentía superficial es otra componente del ciclo hidrológico, y se define como el agua proveniente de la precipitación, y circula por la superficie terrestre hasta llegar a la salida de la cuenca (estación hidrométrica), además el efecto sobre el escurrimiento total es inmediato (Villón, 2002).

2.2.8. Tasa de cambio

En términos de cambio climático, la tasa de cambio permite cuantificar la variación del clima futuro en base a un periodo de referencia; la estimación de cambios debe realizarse en periodos específicos y en una escala específica. En cuando a las unidades, los cambios de temperatura se deben expresar en °C, mientras que los cambio en precipitación se deben expresar en porcentaje. Para las variables mencionadas se recomienda presentar los resultados en función a los valores medios, y acompañar de los máximos y mínimos para obtener un rango de incertidumbre asociado (Correa et al., 2019).

CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Ubicación y descripción del sitio

3.1.1.1. *Ubicación*

La zona de estudio está ubicada políticamente dentro de la región Tacna, en la Figura 8 se muestra la ubicación de la cuenca Caplina y delimitado a partir de la estación Calientes, el área de estudio se encuentra entre las coordenadas UTM; Este: 378800 – 419000; Norte: 8021200 – 8058000 con una elevación que varía entre 1299 a 5776msnm. La cuenca Caplina se encuentra dentro de la zona de Híper – Árida y Árida, de acuerdo al índice de aridez (IA), el cual es el resultado de la relación de precipitación y evapotranspiración, ver Figura 9.

El cauce principal de la cuenca es el río Caplina y se desplaza predominantemente en la dirección Noreste – Suroeste y desemboca en el Océano Pacífico. El río Caplina nace en Umamacata de la confluencia de la quebrada Piscullane y otras quebradas de menor tamaño que nacen en los nevados de Achacollo, Chupiquiña, El Fraile, Huancune y de la cordillera El Barroso. Los afluentes más importantes del río Caplina son la quebrada Cotañane que nace de la cordillera El Barroso y la quebrada Palca que entrega sus aguas al río Caplina en la localidad de Miculla. El río Caplina atraviesa la ciudad de Tacana y conforma la quebrada Caramolle antes de su desembocadura en el Océano Pacífico, el río Caplina es captado por un canal en las proximidades del balneario de Calientes, a través de un canal que las conduce para uso poblacional y de uso agrícola del valle de Tacna en lo que corresponde a la Comisión Bajo Caplina (MINAGRI, 2002).

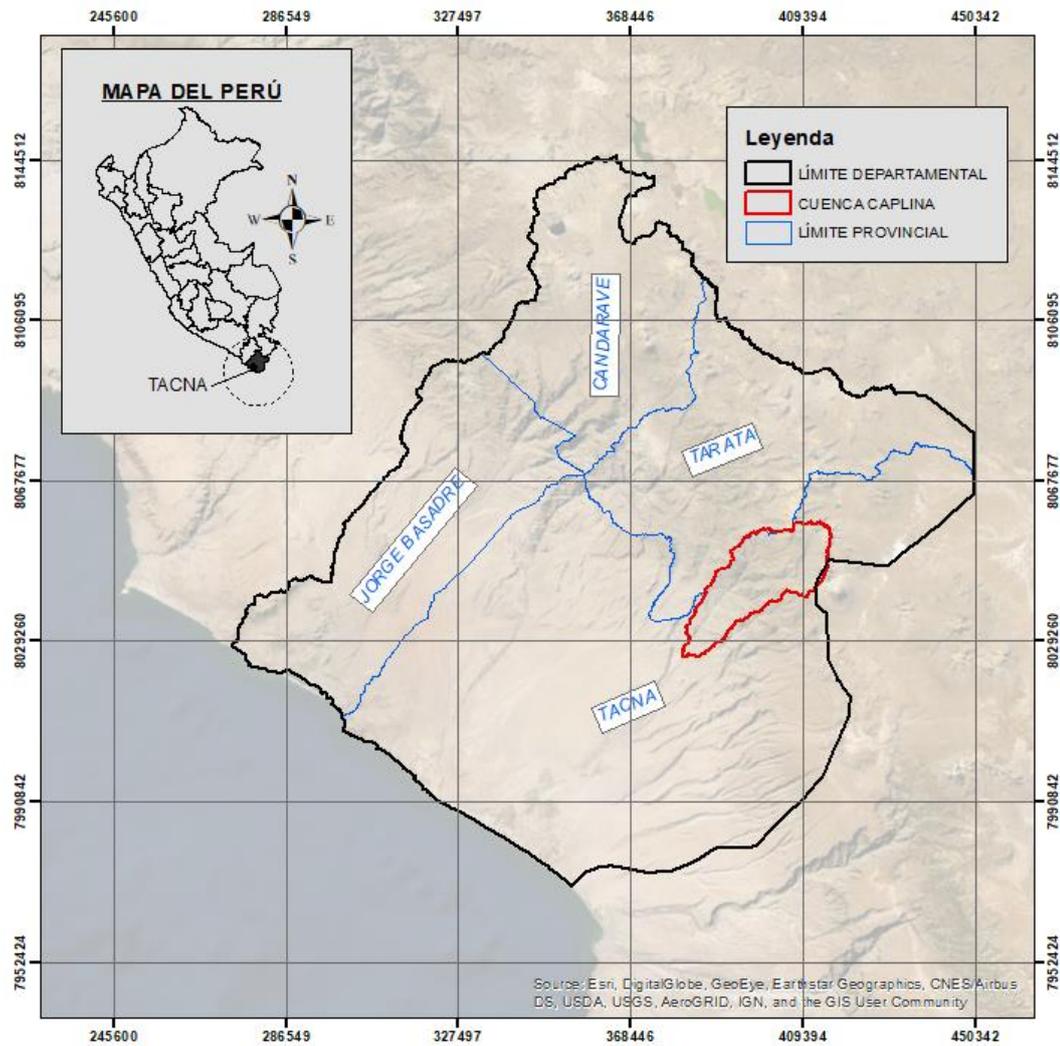


Figura 8: Ubicación de la Cuenca Caplina

Fuente: Elaboración propia

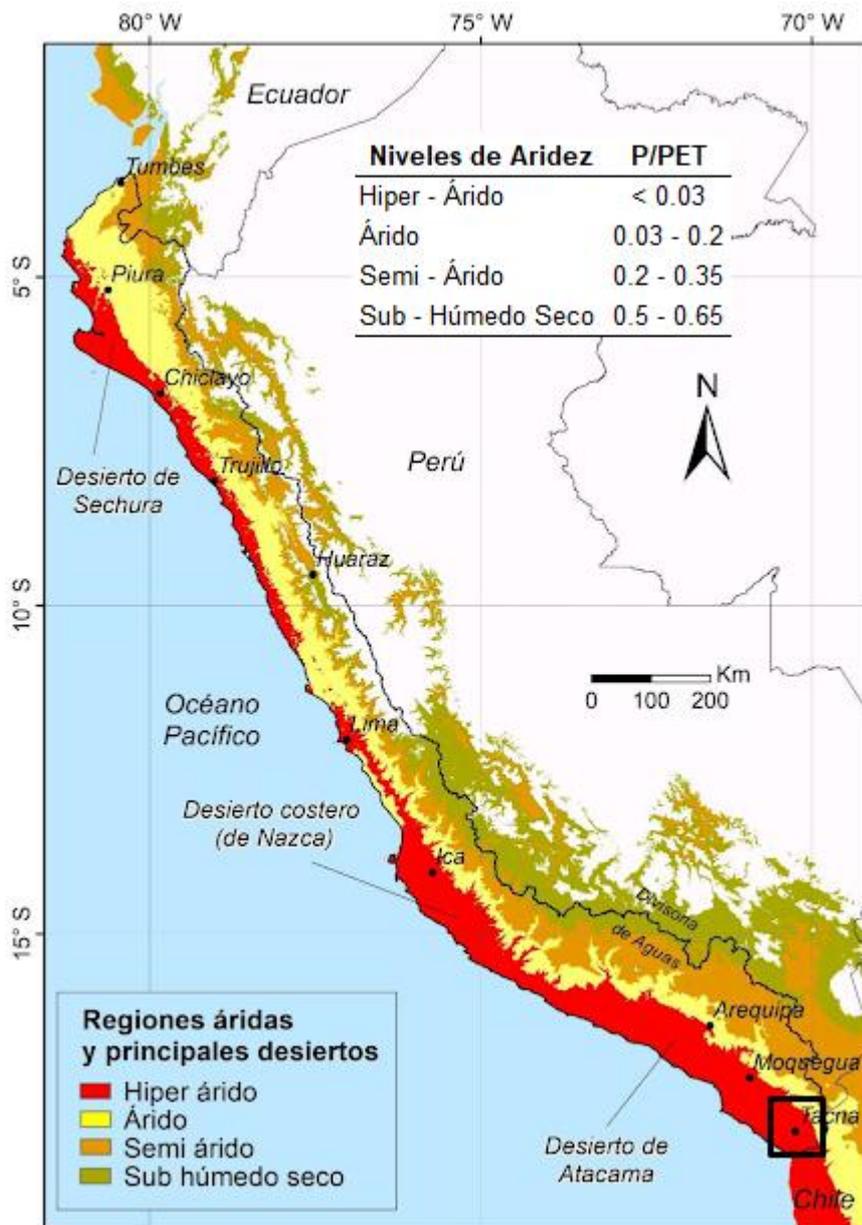


Figura 9: Mapa de aridez del Perú

Fuente: adaptado de Rau, 2019

3.1.1.2. Delimitación de cuenca

Las características fisiográficas calculadas para la cuenca del río Caplina desde la cabecera de la estación Calientes, se muestra en la Figura 10 y la Tabla 5, en donde el área de la cuenca resulta 533.89 km², el perímetro tiene una longitud de

165.38 km, y la topografía varía entre 1299 a 5776 msnm. El índice de compacidad resulta 2.018 por ser de forma rectangular, y el factor de forma 0.173 el cual evidencia que el ancho medio es sumamente menor a la longitud del cauce principal, así mismo, la curva hipsométrica se muestra en la Figura 11 y de acuerdo a su forma esta cuenca está en una etapa equilibrio (fase de madurez), y de acuerdo a la pendiente media la superficie es del tipo escarpado, la densidad de drenaje resulta 0.658 y por ser menor a 1 se considera baja.

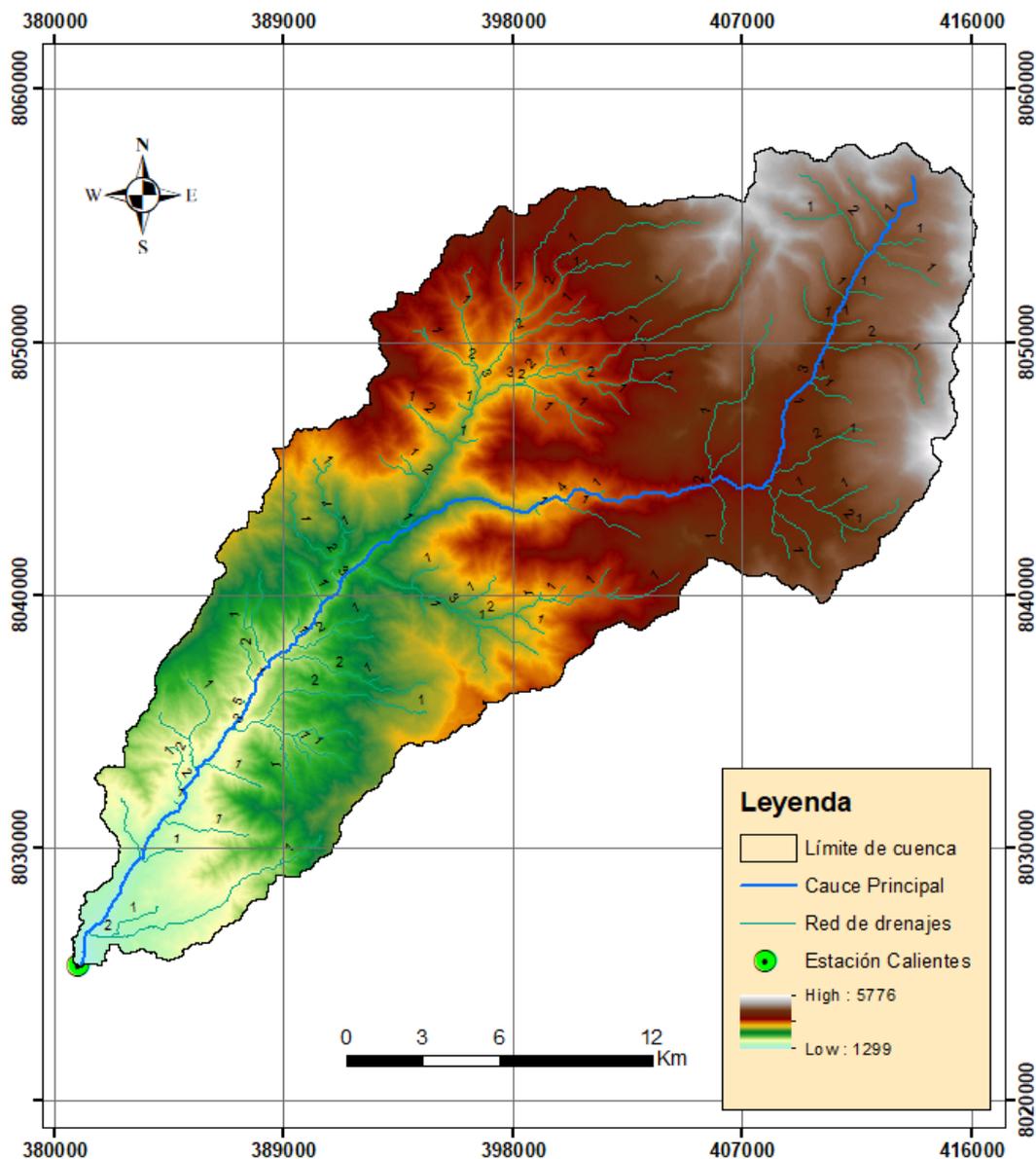


Figura 10: Delimitación de la cuenca Caplina

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Parámetros de la cuenca Caplina

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Área de cuenca	533.89	km ²
Perímetro de cuenca	165.38	km
Elevación mínima	1299.00	msnm
Elevación máxima	5776.00	msnm
Elevación media	3586.91	msnm
Centroide X	399055.86	UTM
Centroide Y	8043824.51	UTM
Índice de compacidad (Kc)	2.018	-
Orden de cauce	5	-
Longitud de drenaje	351.08	km
Densidad de drenaje	0.658	km/km ²
Longitud del cauce principal	55.61	km
Ancho medio	9.60	km
Factor de forma	0.173	-
Pendiente media	43.02	%

Fuente: Elaboración Propia

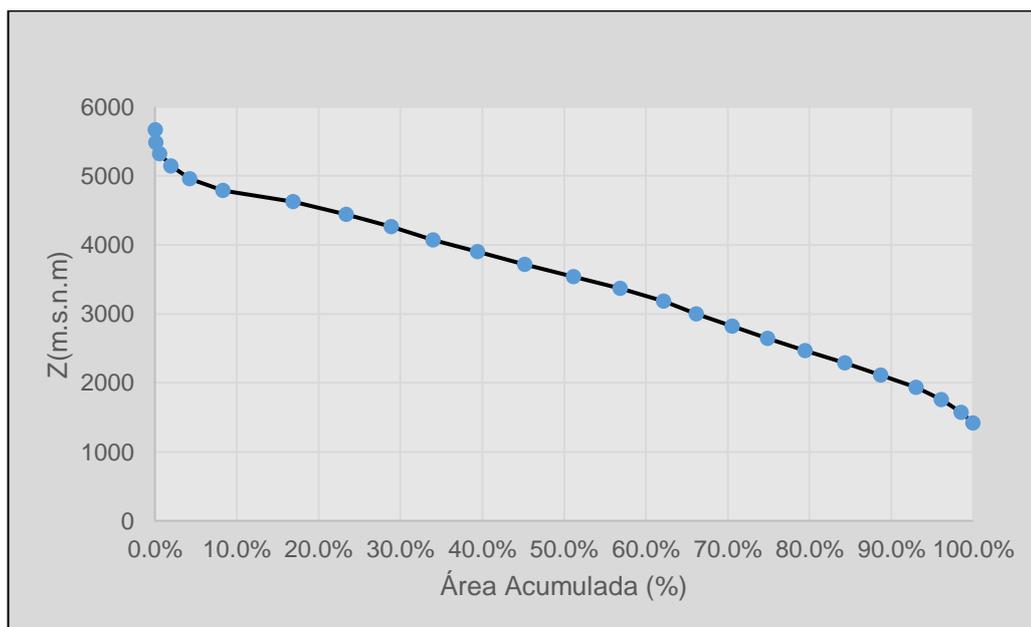


Figura 11: Curva Hipsométrica de la cuenca Caplina (estación Calientes)

Fuente: Elaboración Propia

3.1.2. Información disponible

De acuerdo a la disponibilidad de información en la página del servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú (Senamhi) y de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y por el aporte de los registros del Proyecto Especial Tacna (PET), las estaciones meteorológicas cercanas y con información consistente son: Calana, Calientes, Palca, Bocatoma, Talabaya y Paucarani los cuales se muestran en la Tabla 6, y la estación hidrométrica usada en el presente estudio es Calientes; todo ello se muestra en la Figura 12, así como, la distribución espacial de la topografía, precipitación media anual y la temperatura media anual.

Tabla 6: Estaciones meteorológicas y años de registro

ESTACIÓN	FUENTE	INICIO DE REGISTRO		UBICACIÓN		
		PRECIPITACIÓN	TEMPERATURA	LONGITUD (°)	LATITUD (°)	ALTITUD (m.s.n.m)
BOCATOMA	SENAMHI	2/1/1997	7/1/2000	-69.881056	-17.607167	4260
CALANA	SENAMHI/PET	11/1/1963	2/1/1964	-70.180556	-17.941111	871
CALIENTES	SENAMHI/PET	1/1/1964	6/1/1996	-70.138556	-17.878611	1200
PALCA	SENAMHI/PET	2/1/1965	6/5/2000	-69.955889	-17.77475	3100
PAUCARANI	SENAMHI	4/1/1970	1/1/2003	-69.779444	-17.525	4609
TALABAYA	SENAMHI	5/1/1965	5/1/2004	-69.987667	-17.55125	3420

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la topografía y para la delimitación de la cuenca se usó imágenes satelitales, los cuales son descargables de forma gratuita desde el link: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Debido a que se tiene pocos años de registro de temperatura (ver Tabla 6), se tuvo que completar la información con los datos del producto PISCO (Peruvian Interpoted data of Senamhi's Climatological and Hydrological Observations), dicho producto fue realizado en base a la interpolación de los registros de CHIRPS y las estaciones meteorológicas, los datos CHIRPS proporcionan información climatológica satelital en el rango longitudinal de 50 Sur – 50 Norte, denominándose cuasi-global y tiene una resolución de 0.05 grados, registrados desde el año 1981. El producto PISCO contiene a las variables climatológicas como la evapotranspiración, precipitación y temperatura desde el año 1981, los cuales son de libre disposición en formatos raster.

La disponibilidad de información del caudal es desde el año 1939 registrada por la junta de usuarios de riego del bajo Caplina posteriormente por Senamhi y el PET, por lo tanto, por la intersección de los años de registro entre la precipitación,

temperatura PISCO y el caudal; el periodo de análisis en el presente estudio es entre 1981 al 2016.

En la presente investigación se hizo el análisis de comparación de la información del producto PISCO con los datos registrados por las estaciones como se muestra en la Figura 13, en donde se compara la precipitación y temperatura media mensual que se obtuvo por medio de una interpolación IDW para el centroide de la cuenca Caplina, y como resultado se obtiene una correlación bastante eficiente, con el cual se valida la calidad de los resultados del producto PISCO.

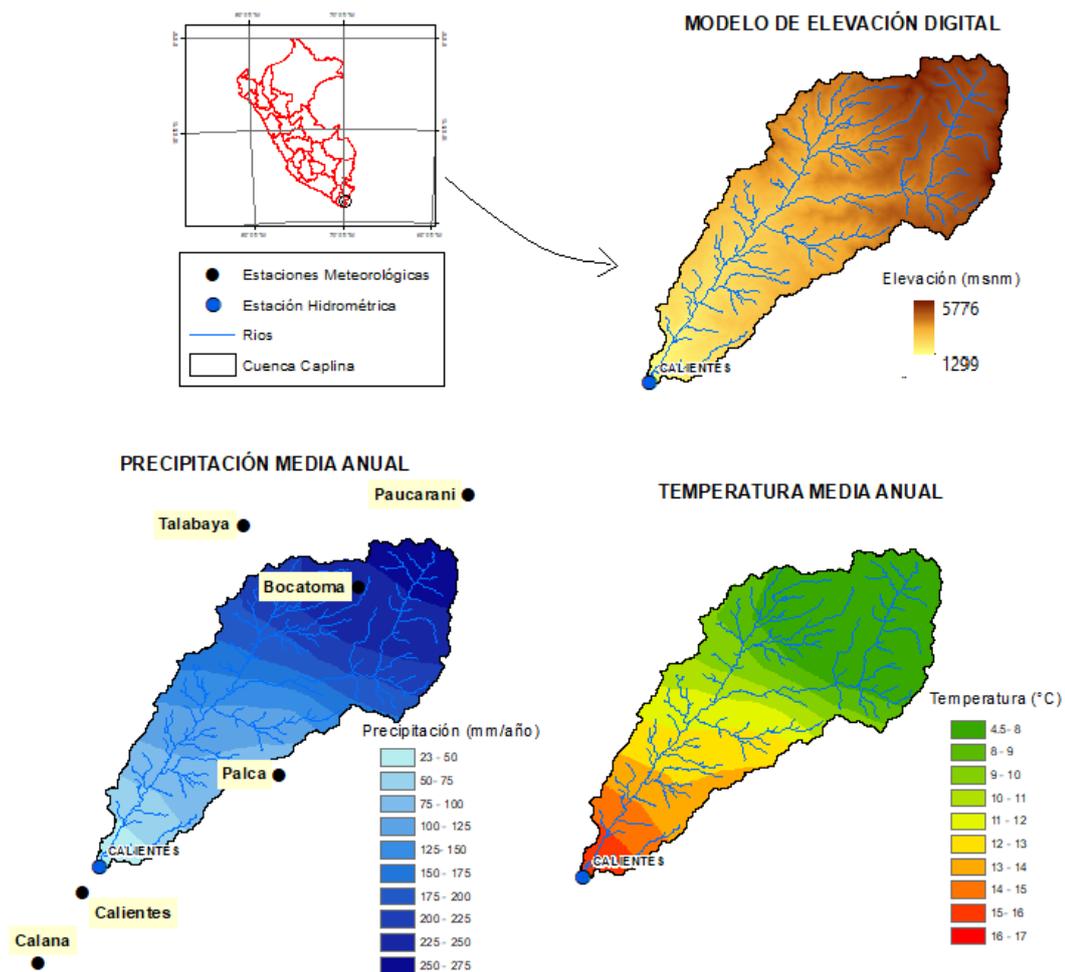


Figura 12: Topografía de la Cuenca, precipitación y temperatura media anual entre 1981 – 2016.

Fuente: Elaboración Propia

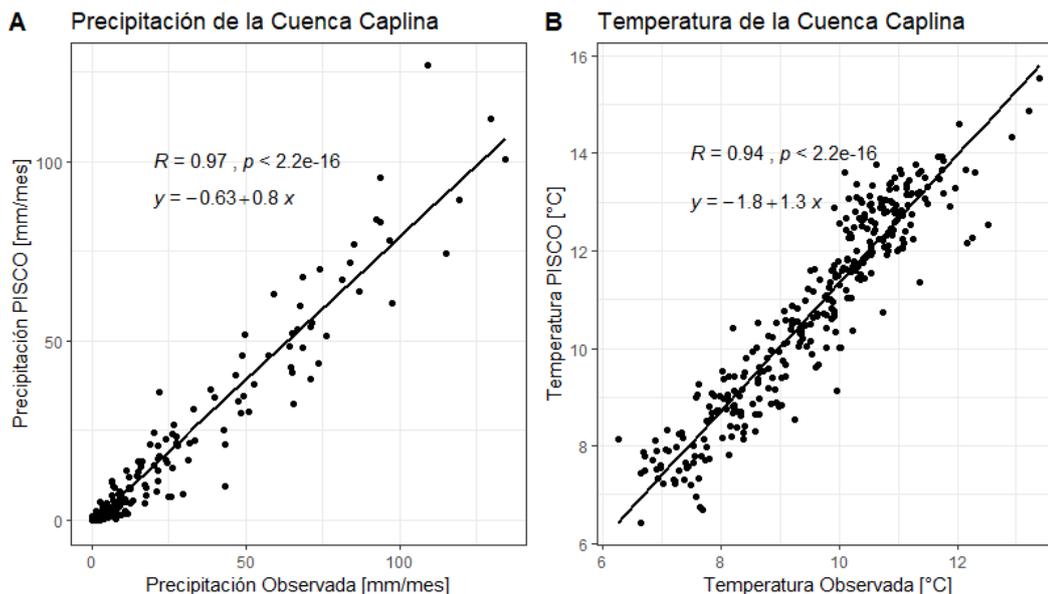


Figura 13: A, comparación de la precipitación PISCO con la precipitación registrada por las estaciones y B, muestra la comparación de la temperatura PISCO con la temperatura registrada por las estaciones.

Fuente: Elaboración Propia

A partir de la validación de las variables: precipitación y temperatura media mensual del producto PISCO, estas últimas son tomadas como información observada para la presente investigación.

En la Figura 14 se muestra la variación media mensual del caudal, evapotranspiración potencial calculado con el método de Oudin, precipitación y temperatura media, mostrados en el ciclo hidrológico del Perú (setiembre – agosto), dichas variables son producto de la salida del producto PISCO en el periodo 1981 – 2016, y los valores se muestran en la Tabla 7, donde el caudal medio anual es de 0.77 m³/s, la precipitación media anual 118.31 mm/año, evapotranspiración media anual 835.66 mm/año y temperatura media anual igual a 10.62 °C.

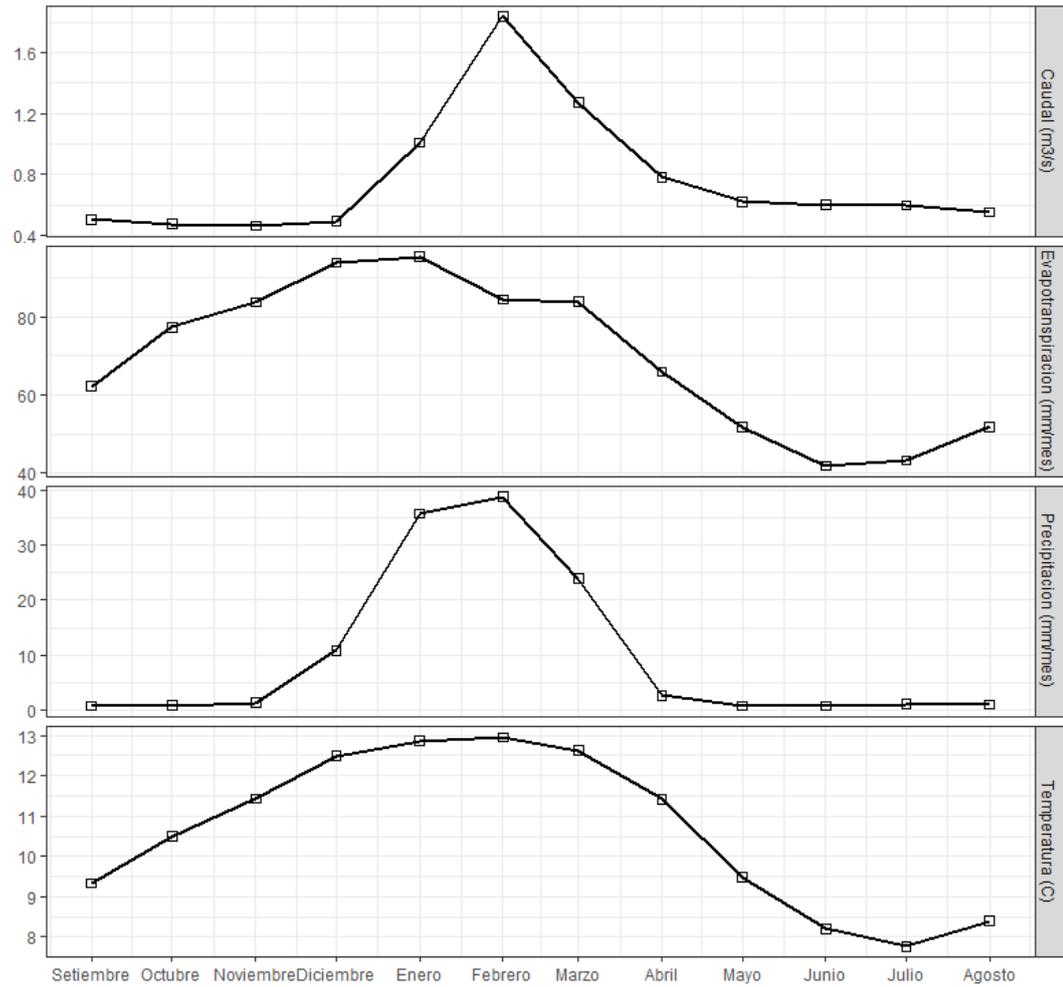


Figura 14: Resumen de la media mensual del caudal, evapotranspiración, precipitación y temperatura de la cuenca Caplina en el periodo: 1981 – 2016.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7: Resumen de la media mensual del caudal, evapotranspiración, precipitación y temperatura de la cuenca Caplina en el periodo: 1981 – 2016.

Meses	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Anual
Q (m³/s)	0.50	0.47	0.46	0.49	1.01	1.84	1.27	0.78	0.62	0.60	0.60	0.55	0.77
ETP(mm/mes)	62.23	77.31	83.76	93.87	95.37	84.46	83.81	65.96	51.76	41.87	43.34	51.93	835.66
P (mm/mes)	0.74	0.79	1.32	10.84	35.82	38.85	23.95	2.60	0.66	0.70	1.08	0.96	118.31
T (°C)	9.33	10.50	11.43	12.50	12.86	12.96	12.62	11.42	9.48	8.20	7.77	8.40	10.62

Fuente: Elaboración Propia

3.2 METODOLOGÍA

Para lograr el objetivo de la presente investigación se plantea el procedimiento esquematizado en la Figura 19, el mismo que contiene 3 etapas:

3.2.1. Primera etapa: Análisis climático

Esta etapa consiste en obtener la precipitación y temperatura futura para la cuenca Caplina (ver Figura 15), para ello se sigue los siguientes pasos:

- Descargar los datos de la precipitación y temperatura media entre los años 1981 al 2100, dados por los modelos climáticos globales (GCMs), dicha descarga se realiza a paso mensual de la plataforma web KNMI Climate Explorer (https://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip5.cgi?id=someone@somewhere) el cual contiene los modelos del CIMIP5, dichas variables climatológicas fueron descargadas para los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5, ya que el primero es la trayectoria más probable de emisión futura y la segunda es la más crítica (ver ítem 2.1.2.3).
- Seleccionar los modelos climáticos globales más adecuados para la cuenca en estudio, para ello se hace un análisis en el periodo histórico (1981-2016), dicho análisis consiste en comparar la información dado por los GCMs y los registros históricos, en ello se emplea parámetros estadísticos de medición de sesgo: bias y el coeficiente de correlación, de acuerdo a ello se selecciona los modelos que presenten valores de bias cercanos a cero y los que presentan un alto coeficiente de correlación (cerca a la unidad).
- Una vez seleccionado los GCMs se hace un escalamiento estadístico para obtener valores mucho más representativos para la cuenca en análisis, de acuerdo a lo explicado en el ítem 2.1.2.7, para corregir los datos de temperatura se realiza el método de escalamiento lineal, y para la precipitación el método de mapeo de cuantiles.
- Finalmente se obtiene la precipitación y temperatura futura para la cuenca Caplina,



Figura 15: Esquema metodológico para el análisis climático

Fuente: Elaboración Propia

Es importante precisar que las herramientas empleadas para este análisis fue el Excel y el lenguaje de programación R.

3.2.2. Segunda etapa: Modelo hidrológico

Consiste en calibrar y validar el modelo hidrológico GR2M, con la finalidad de obtener los caudales futuros, cuyos pasos empleados se detallan a continuación:

- Se calibró y validó el modelo hidrológico a paso mensual GR2M en el periodo histórico comprendido entre los años 1981 al 2016, para ello se usó el criterio de Nash-Sutcliffe, con el cual se encontró los parámetros más óptimos del modelo capaces de representar el comportamiento hidrológico de la cuenca Caplina (ver Figura 16). En cuanto a la herramienta empleada para el modelamiento hidrológico, se empleó el paquete airGR programado en lenguaje R, el cual contiene diferentes modelos hidrológicos de la familia GR, entre ellos el modelo hidrológico GR2M.

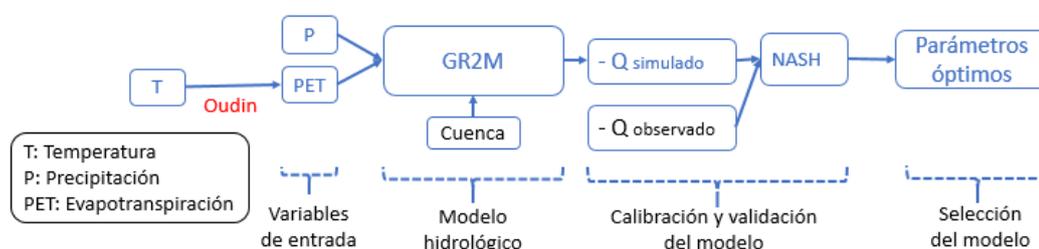


Figura 16: Esquema metodológico para el modelo hidrológico GR2M

Fuente: Elaboración Propia

- Encontrados los parámetros más adecuados del modelo, se hace la proyección de los caudales futuros, en donde las variables de entrada son las salidas que se obtuvo en la primera etapa (ver Figura 16).

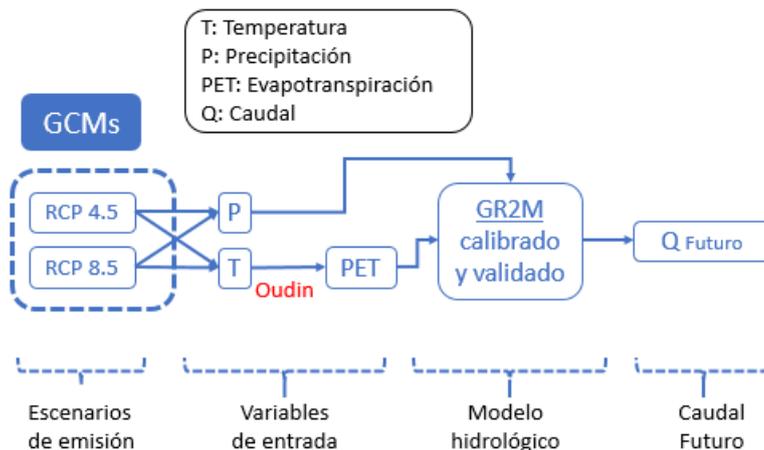


Figura 17: Esquema metodológico para la generación de caudales futuros

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3. Tercera etapa: Tasa de Cambio

En la última etapa se hace una evaluación del efecto del cambio climático en la disponibilidad hídrica futura a través de una comparación del caudal futuro con el histórico, considerando una climatología de 30 años (ver Figura 18).

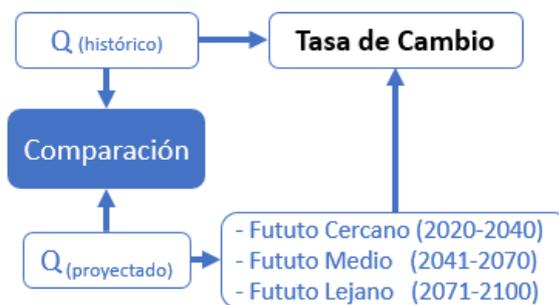


Figura 18: Esquema metodológico para la evaluación de la disponibilidad hídrica futura

Fuente: Elaboración Propia

Esta última etapa también se aplica para cuantificar la tasa de cambio de las variables de precipitación y temperatura futura, en relación a la histórica observada, la tasa de cambio para la precipitación y caudal (disponibilidad hídrica), son expresadas en porcentaje; mientras que la tasa de cambio de la temperatura será expresada en grados Celsius.

Para cuantificar la tasa de cambio, se compara la media multianual para cada mes del año, tanto en el periodo histórico como en el periodo futuro, y se aplica la ecuación 27 para la variable caudal y la ecuación 28 para la variable precipitación y la ecuación 29 para la variable temperatura.

$$\text{Tasa de Cambio [\%]} = \frac{Q_{fut} - Q_{hist}}{Q_{hist}}, \quad (27)$$

$$\text{Tasa de Cambio [\%]} = \frac{P_{fut} - P_{hist}}{P_{hist}}, \quad (28)$$

$$\text{Tasa de Cambio [°C]} = T_{fut} - T_{hist}, \quad (29)$$

De acuerdo a las tres etapas expuestas de la metodología utilizada en la presente investigación, se resume en la Figura 19

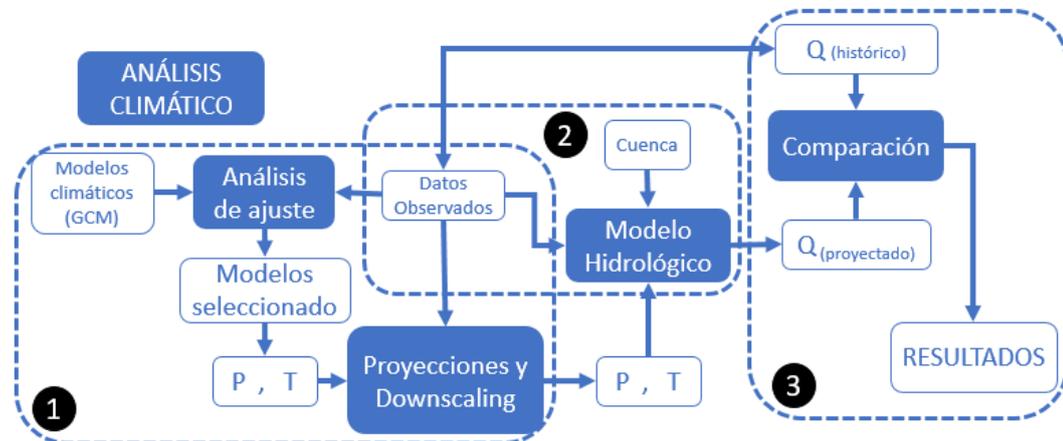


Figura 19: Esquema metodológico para la evaluación de disponibilidad hídrica futura en el contexto del cambio climático.

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 SELECCIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS

Los modelos analizados en la presente investigación fueron los 32 modelos mostrados en la Tabla 8, y para la selección de los modelos se trabajó con la media mensual en el periodo histórico 1981 – 2005, cabe resaltar que el periodo histórico de los GCMs es hasta el año 2005. Para la elección de los GCMs se hizo en función a la Bias y el factor de correlación (R2) entre cada GCM y la data observada (PISCO), en la Figura 20 y Figura 21 se muestra en el eje Y el valor del Bias y en la escala de color se muestra el valor del factor de correlación, por lo tanto el criterio para la elección de los GCMs debe ser el menor valor del eje Y, y el color más claro, por ejemplo el modelo CNRM.CM5 representa muy bien el comportamiento de la precipitación y la temperatura, ya que tiene un valor del Bias cercano al 0 y el factor de correlación muy cercano a 1, los modelos climáticos globales seleccionados con el criterio explicado se muestra en la Tabla 9.

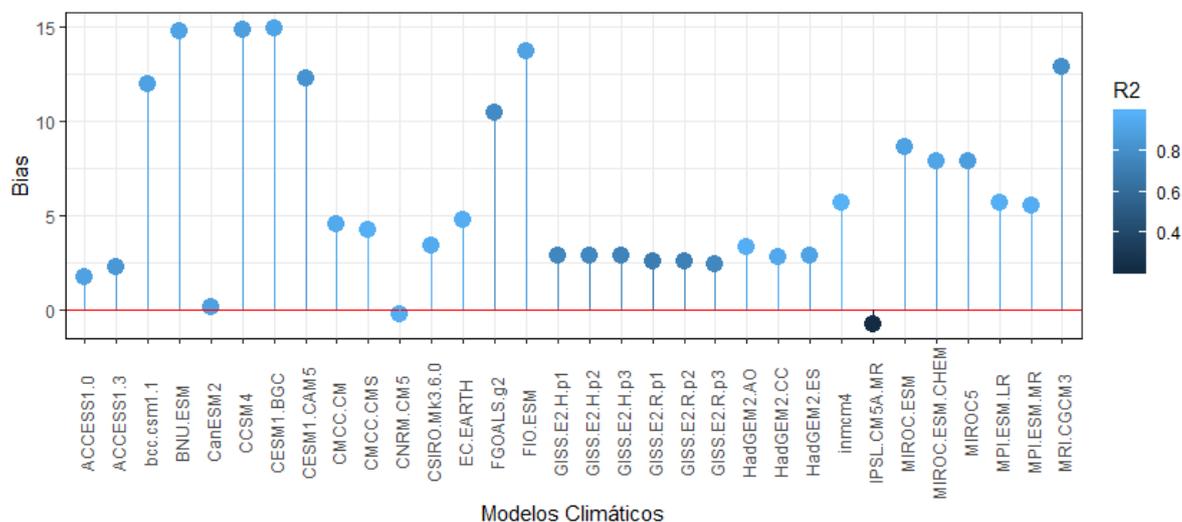


Figura 20: Selección de modelos climáticos globales en base a la precipitación observada

Fuente: Elaboración Propia

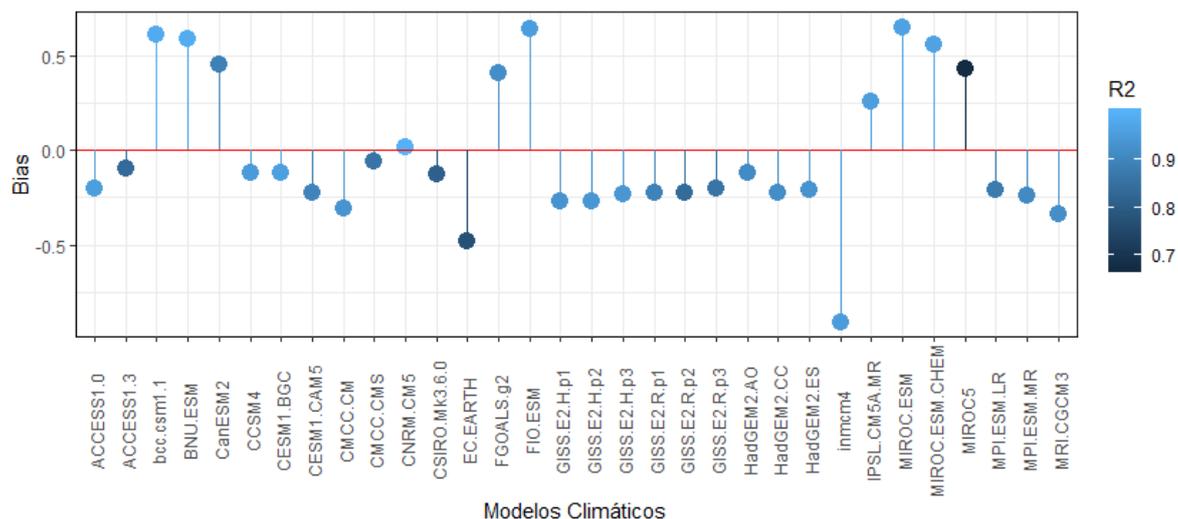


Figura 21: Selección de modelos climáticos globales en base a la Temperatura media observada

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8: Lista de los GCM analizados y seleccionados para la variable precipitación

Nº	GCM	R2	BIAS	Nº	GCM	R2	BIAS
1	ACCESS1.0	0.901	1.753	17	GISS.E2.H.p2	0.762	2.886
2	ACCESS1.3	0.847	2.284	18	GISS.E2.H.p3	0.733	2.925
3	bcc.csm1.1	0.899	11.951	19	GISS.E2.R.p1	0.703	2.570
4	BNU.ESM	0.909	14.728	20	GISS.E2.R.p2	0.727	2.622
5	CanESM2	0.892	0.148	21	GISS.E2.R.p3	0.763	2.467
6	CCSM4	0.880	14.856	22	HadGEM2.AO	0.968	3.356
7	CESM1.BGC	0.911	14.922	23	HadGEM2.CC	0.936	2.833
8	CESM1.CAM5	0.822	12.276	24	HadGEM2.ES	0.910	2.893
9	CMCC.CM	0.938	4.531	25	inmcm4	0.981	5.678
10	CMCC.CMS	0.968	4.242	26	IPSL.CM5A.MR	0.210	-0.697
11	CNRM.CM5	0.960	-0.229	27	MIROC.ESM.CHEM	0.919	7.896
12	CSIRO.Mk3.6.0	0.951	3.464	28	MIROC.ESM	0.897	8.600
13	EC.EARTH	0.957	4.810	29	MIROC5	0.883	7.858
14	FGOALS.g2	0.780	10.453	30	MPI.ESM.LR	0.970	5.711
15	FIO.ESM	0.907	13.663	31	MPI.ESM.MR	0.957	5.526
16	GISS.E2.H.p1	0.750	2.932	32	MRI.CGCM3	0.803	12.834

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9: BIAS y factor de correlación de los modelos seleccionados para las variables precipitación y temperatura

GCM	Modelos Originales			
	Precipitación		Temperatura	
	R2	BIAS	R2	BIAS
ACCESS1.0	0.901	1.753	0.955	-0.202
ACCESS1.3	0.847	2.284	0.834	-0.094
CMCC.CM	0.938	4.531	0.933	-0.306
CMCC.CMS	0.968	4.242	0.859	-0.057
CNRM.CM5	0.96	-0.229	0.998	0.015
CSIRO.Mk3.6.0	0.951	3.464	0.81	-0.13
EC.EARTH	0.957	4.81	0.773	-0.48
GISS.E2.H.p2	0.762	2.886	0.938	-0.268
HadGEM2.AO	0.968	3.356	0.911	-0.119
HadGEM2.CC	0.936	2.833	0.917	-0.222
HadGEM2.ES	0.91	2.893	0.932	-0.209
MIROC.ESM.CHEM	0.919	7.896	0.968	0.559
MPI.ESM.LR	0.97	5.711	0.874	-0.213
MPI.ESM.MR	0.957	5.526	0.91	-0.243

Fuente: Elaboración Propia

4.2 ESCALAMIENTO ESTADÍSTICO

Una vez seleccionado los modelos climáticos globales más apropiados para la cuenca Caplina y de acuerdo a la metodología esquematizada en la Figura 19, el siguiente paso fue realizar el downscaling estadístico, para la variable temperatura el método usado fue el escalamiento lineal (LS) explicado en el ítem 2.1.2.6 el cual fue codificado en el lenguaje de programación R; y para la variable precipitación el método utilizado fue el mapeo de cuantiles (QM), el cual fue codificado en el lenguaje de programación R.

Una vez realizada el escalamiento estadístico, los parámetros estadísticos de sesgo mejoraron considerablemente (ver Tabla 10), y dichos valores al ser graficados como muestra la Figura 22, en el cual, los GCMs envuelven (color gris) y siguen la tendencia de la data observada (línea de color azul).

La Figura 24 muestra unos ejemplos de los métodos de escalamiento estadístico para la variable precipitación y temperatura del modelo climático global EC-EARTH respectivamente, en donde el color negro es la gráfica de la data observada, la roja es la gráfica de la salida del GCM y la gráfica de color azul es el resultado de aplicar el escalamiento estadístico; en el mismo que se muestra

una clara influencia de aplicar esta metodología. Una vez realizada este proceso estas variables de precipitación y temperatura ingresan al modelo hidrológico para la obtención de los caudales futuros, previa calibración y validación del modelo el cual se explica en el siguiente ítem.

Tabla 10: Comparación del valor del Bias y del factor de correlación de los GCMs originales vs los GCMs con escalamiento estadístico.

GCM	Modelos Originales				Modelos con Escalamiento			
	Precipitación		Temperatura		Precipitación		Temperatura	
	R2	BIAS	R2	BIAS	R2	BIAS	R2	BIAS
ACCESS1.0	0.901	1.753	0.955	-0.202	0.951	-0.002	0.9998	0.017
ACCESS1.3	0.847	2.284	0.834	-0.094	0.962	-0.001	0.9998	0.017
CMCC.CM	0.938	4.531	0.933	-0.306	0.970	0.000	0.9998	0.017
CMCC.CMS	0.968	4.242	0.859	-0.057	0.994	-0.001	0.9998	0.017
CNRM.CM5	0.960	-0.229	0.998	0.015	0.993	-0.001	0.9998	0.017
CSIRO.Mk3.6.0	0.951	3.464	0.810	-0.130	0.981	0.002	0.9998	0.017
EC.EARTH	0.957	4.810	0.773	-0.480	0.992	0.000	0.9998	0.017
GISS.E2.H.p2	0.762	2.886	0.938	-0.268	0.896	-0.001	0.9998	0.017
HadGEM2.AO	0.968	3.356	0.911	-0.119	0.956	0.001	0.9998	0.017
HadGEM2.CC	0.936	2.833	0.917	-0.222	0.944	0.000	0.9998	0.017
HadGEM2.ES	0.910	2.893	0.932	-0.209	0.905	0.000	0.9998	0.017
MIROC.ESM.CHEM	0.919	7.896	0.968	0.559	0.979	-0.001	0.9998	0.017
MPI.ESM.LR	0.970	5.711	0.874	-0.213	0.985	0.001	0.9998	0.017
MPI.ESM.MR	0.957	5.526	0.910	-0.243	0.966	0.001	0.9998	0.017

Fuente: Elaboración Propia

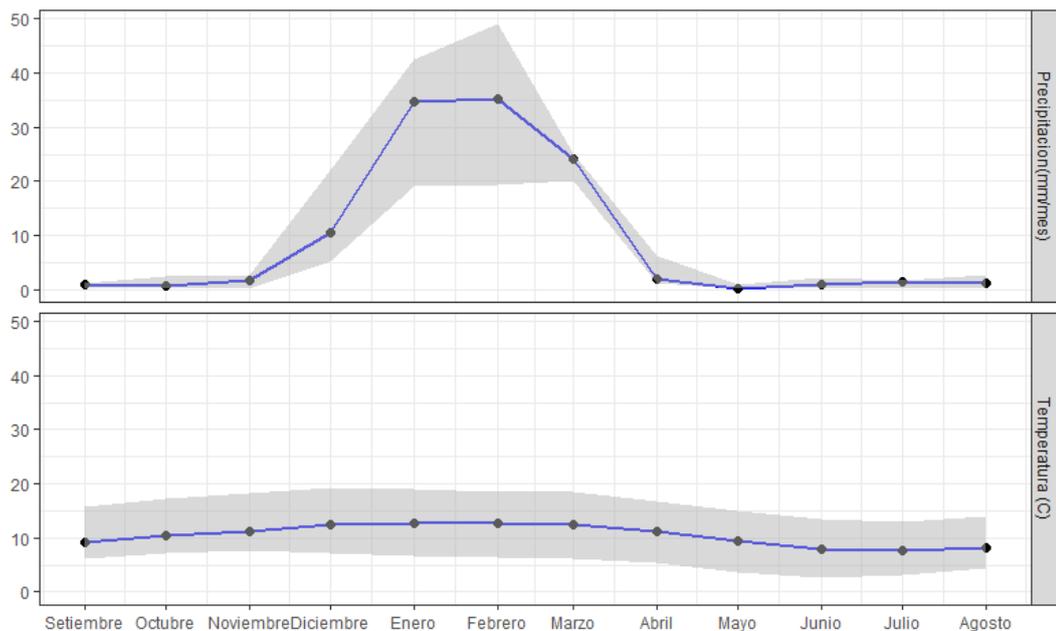


Figura 22: Envoltorio de los GCMs seleccionados, mostrados de color gris; y los datos observados – PISCO mostrado de color azul, en el periodo 1981-2005.

Fuente: Elaboración Propia

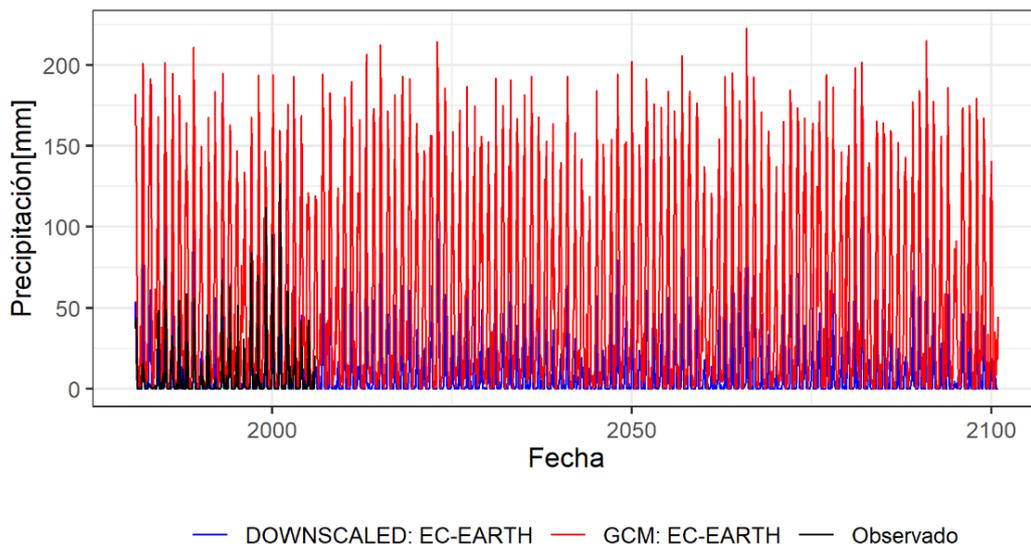


Figura 23: Ejemplo de la aplicación del mapeo de cuantiles (QM) para la precipitación del modelo climático global EC-EARTH, escenario RCP 4.5

Fuente: Elaboración Propia

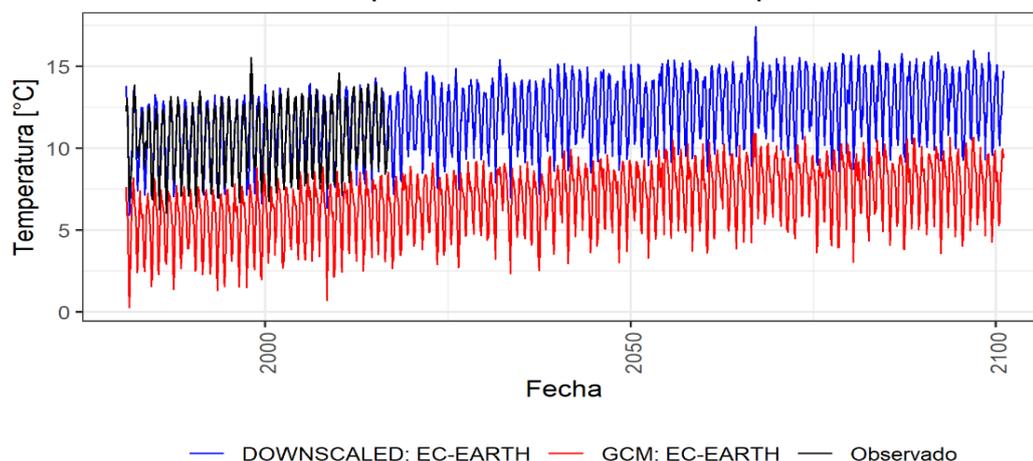


Figura 24: Ejemplo de la aplicación del escalamiento lineal (LS) para la temperatura del modelo climático global EC-EARTH, escenario RCP 4.5

Fuente: Elaboración Propia

4.3 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE DE LOS GCMs

De acuerdo a los resultados de la medición de sesgo entre las variables observadas (PISCO) y simuladas por los 14 modelos climáticos globales (GCMs) el cual se muestra en la Tabla 9, y con la ayuda del coeficiente de correlación y Bias, existe mayor incertidumbre en la variable precipitación que la temperatura, sin embargo con la técnica de downscaling se logró mejorar la calidad de los resultados de los GCMs, los cuales ya tienen una mejor representación de la realidad. A pesar de ello existe una incertidumbre en la predicción de las variables precipitación y temperatura el cual se muestra en la Figura 22, donde se observa que la mayor incertidumbre en la variable precipitación ocurre en los meses diciembre, enero y febrero en donde la variación oscila entre una subestimación de hasta 15mm/mes y una sobreestimación de hasta 14mm/mes tomando en cuenta la media de la precipitación media observada entre los años 1981 al 2005, sin embargo en los demás meses (secos) la confiabilidad en la predicción de la precipitación es bastante alta.

En cuanto a la incertidumbre en la predicción de la temperatura es muy baja y se reduce aún más cuando se aplica la técnica de downscaling, en donde el factor de correlación está próximo a 1 (0.9998), y el bias resulto ser 0.017, por lo cual se afirma que la predicción de los GCMs en la variable temperatura es muy confiable.

4.4 MODELAMIENTO HIDROLÓGICO

4.4.1. Variables de entrada

Las variables de entrada para el modelo GR2M son la precipitación (P) y evapotranspiración potencial (PET), en cuanto a la primera variable ingresa la precipitación media de la cuenca obtenida a partir del raster del producto PISCO, en cuanto a la evapotranspiración potencial fue calculado a partir de la temperatura media de la cuenca (obtenida de forma similar que la precipitación) usando el método de Oudin, dicho modelamiento se hizo de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 16, los valores de las variables de entrada son a paso mensual (precipitación y Evapotranspiración y caudal observado) usadas en el modelo GR2M, dichas variables se muestra en la Figura 25.

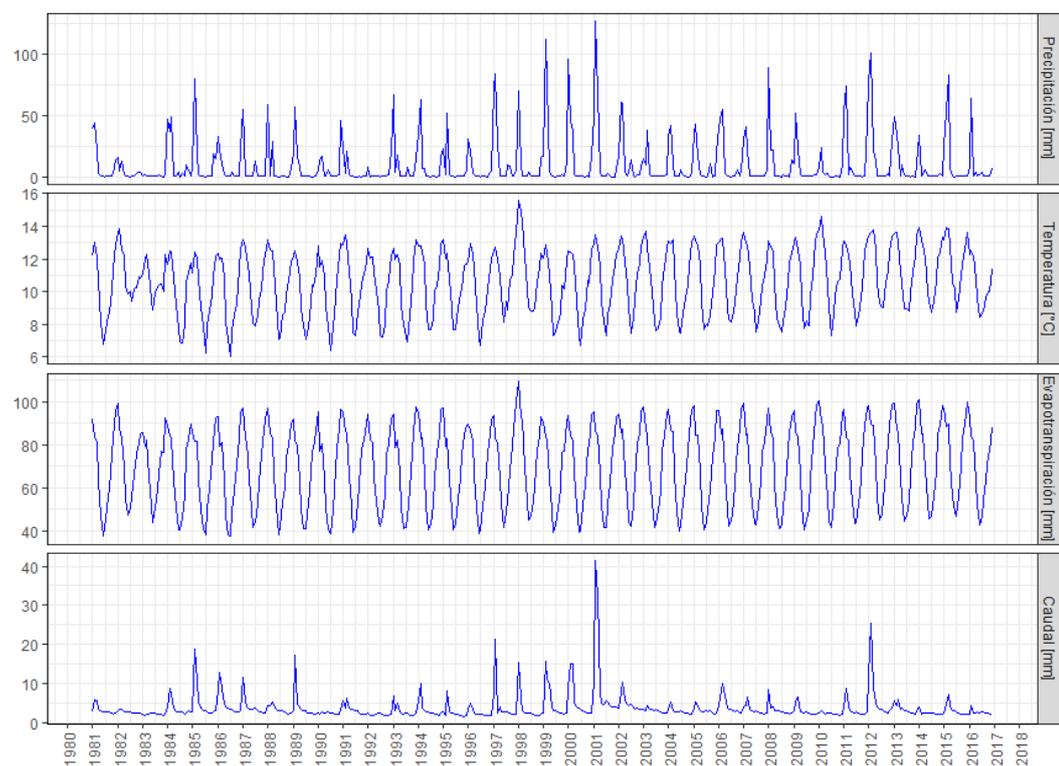


Figura 25: Variables usadas en el modelo hidrológico GR2M

Fuente: Elaboración Propia

4.4.2. Periodos de referencia

El modelo hidrológico GR2M tiene tres periodos, el primero corresponde al periodo de calentamiento, en el cual ingresan valores iniciales para que el modelo optimice el número de iteraciones, el segundo periodo es la calibración, es aquí en donde se calcula los parámetros X1 y X2 del modelo, optimizando en este caso de acuerdo al criterio de Nash-Sutcliffe (NSE), el último periodo le corresponde a la validación, en este periodo se valida la eficiencia del modelo haciendo una comparación entre el caudal simulado y caudal observado usando el criterio de Nash-Sutcliffe (NSE); los periodos usados en la presente investigación se muestra en la Tabla 11, así como también se muestra la cantidad de información alimentada al modelo GR2M.

Tabla 11: Periodos de referencia y cantidad de información alimentada al modelo GR2M

Periodo	De	Hasta	Meses	% de datos
Calentamiento	1/01/1981	1/12/1982	24	6%
Calibración	1/01/1983	1/12/2001	228	53%
Validación	1/01/2002	1/12/2016	180	42%
Total			432	100%

Fuente: Elaboración Propia

4.4.3. Calibración y validación del modelo

El criterio de calibración del modelo precipitación-escorrentía GR2M fue el Nash-Sutcliffe (NSE), en cual se realizó un total de 18 iteraciones y 76 corridas para encontrar los parámetros X1 y X2 mostrados en la Tabla 13, y los valores de NSE se muestran en la Tabla 12, donde además se calculó según el criterio de Kling-Gupta (KGE) con la única finalidad de validar el modelo.

El resultado de la calibración del modelo se muestra en Figura 26, en el mismo que se aprecia una muy buena reproducción de caudales, sin embargo, se nota que para precipitaciones bajas el modelo presentar distorsión en la reproducción de caudales, a pesar de ello la tendencia de los caudales simulados son bastante aceptables.

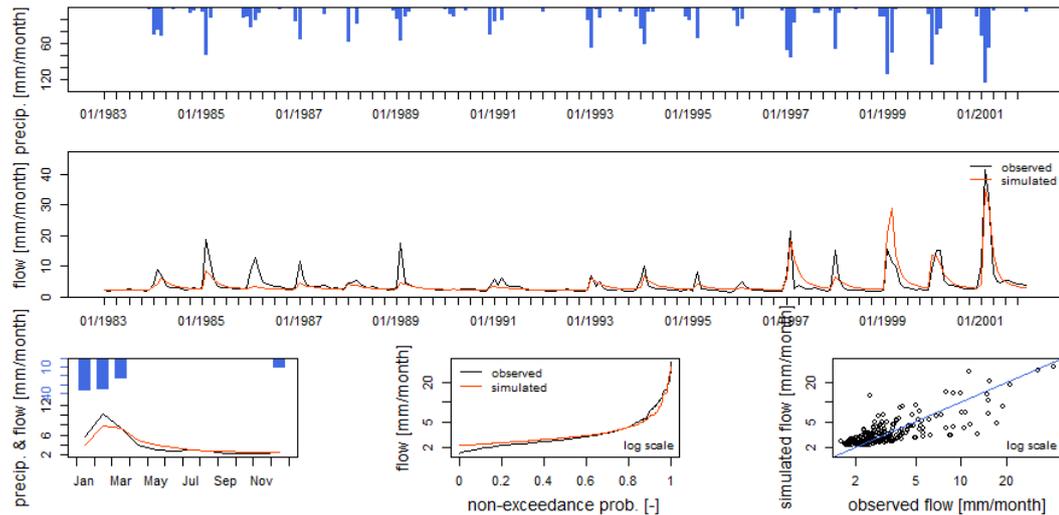


Figura 26: Visualización de resultados del modelo GR2M para el periodo de calibración en la cuenca del río Caplina.

Fuente: Salida del paquete airGr

Una vez calibrado el modelo se procedió a validarlo, dicho resultado se muestra en la Figura 27, donde se nota claramente una eficiente reproducción de caudales, además el valor de NSE resulta 0.6683 para el periodo de calibración y un valor de 0.6261 para el periodo de validación (Tabla 12) y de acuerdo a la Tabla 4 se clasifica con rendimiento bueno.

En la Figura 28 se muestra los resultados de los caudales en unidades de m^3/s , en el mismo que se graficó el caudal observado y simulado tanto en el periodo de calibración y validación, con los parámetros obtenidos (X1 y X2) fue posible obtener los caudales futuros en donde las variables de entrada son la precipitación y temperatura dada por GCMs.

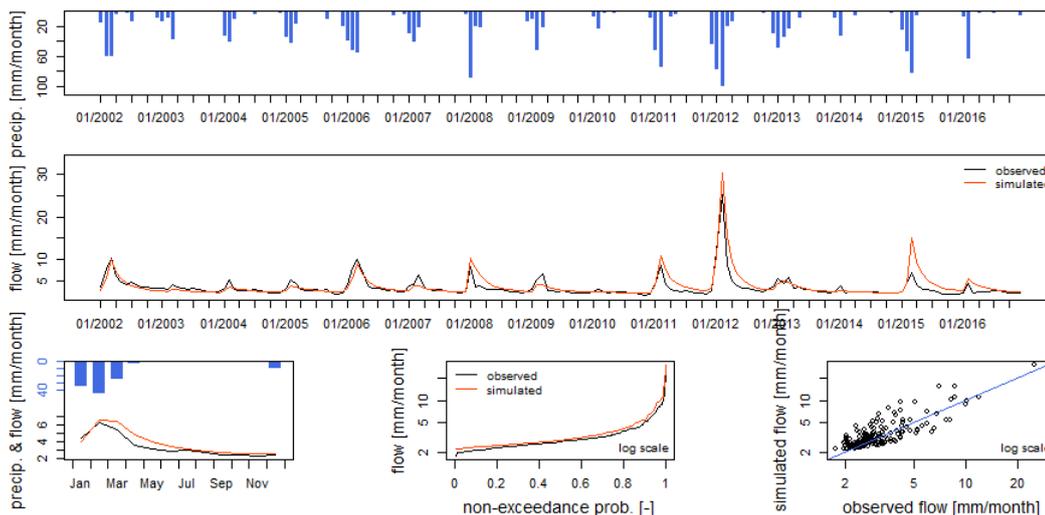


Figura 27: Visualización de resultados del modelo GR2M para el periodo de Validación en la cuenca del río Caplina.

Fuente: Salida del paquete airGr

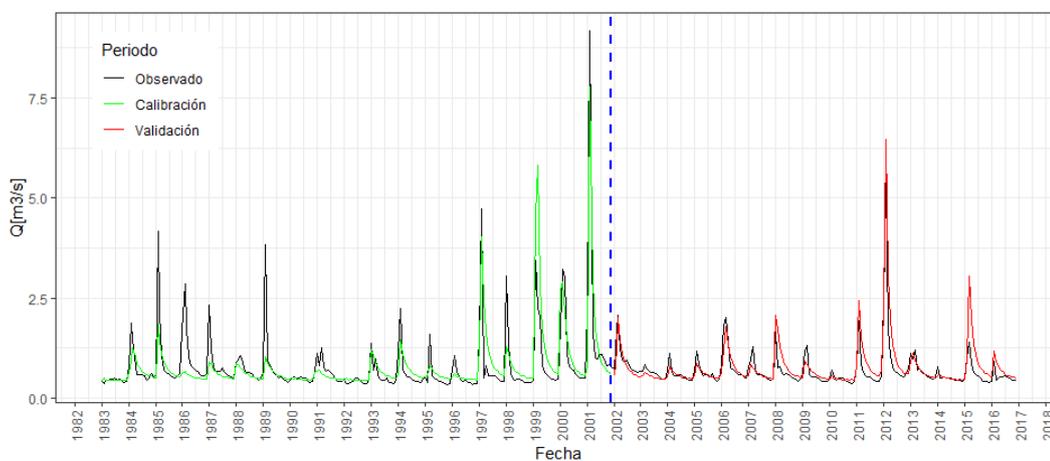


Figura 28: Visualización de resultados del caudal para el periodo de calibración y validación en la cuenca del río Caplina.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12: Eficiencia del modelo GR2M en la cuenca del río Caplina

Criterio	Calibración	Validación
NSE [Q]	0.6683	0.6261
KGE [Q]	0.8314	0.5914

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 13: Parámetros del modelo GR2M para la cuenca del río Caplina

Parámetros del modelo	
X1	117.182
X2	1.210

Fuente: Elaboración Propia

4.4.4. Relación precipitación – caudal

Después de realizar distintas pruebas para obtener el mejor modelo hidrológico, se vio que la variable de entrada más influyente es la precipitación, en la Tabla 14 se muestra la variación porcentual del promedio de la precipitación del periodo de calibración y validación el cual es 7%, por lo tanto el modelo predice los caudales de forma aceptable en periodos donde la variación de la precipitación futura sea menor al 7% con respecto a la precipitación histórica.

Tabla 14: variación porcentual de la precipitación del periodo de calibración y validación en el modelo hidrológico GR2M

Periodo	Precipitación media
Calibración (01/1993-12/2001)	9.727
Validación (01/2002-12/2016)	10.397
Δ	7%

Fuente: Elaboración Propia

4.5 TENDENCIAS CLIMÁTICAS FUTURAS

La proyección de las variables climatológicas e hidrológica se hizo para dos escenarios de emisión: RCP 4.5 y RCP 8.5, en la Figura 29 se muestra dichas proyecciones considerando la media anual desde el año 2005 al año 2100. En la misma figura se muestra que la temperatura fue incrementando con el transcurrir de los años, con el cual se confirma que el calentamiento regional es inminente en la región Tacna; además se cuantifica que la temperatura media anual desde el año 2005 incrementó en aproximadamente un 1°C para el año 2016, el cual podría estar asociado al calentamiento global; por lo tanto, la cuenca en análisis es propenso a sufrir los efectos del cambio climático.

Con respecto a la Temperatura de acuerdo la salida de los GCMs para el escenario RCP8.5 existe un mayor incremento de la temperatura media anual que el escenario RCP4.5.

Para la precipitación media anual existe mayor incertidumbre, en la Figura 29 se muestra una línea de color verde el cual indica el promedio de la variable para el escenario RCP4.5 y de color morado para el escenario RCP8.5, del mismo que se observa que no existe una tendencia definida como la temperatura. Por ello el análisis más adecuado es en periodos de 30 años para ver el cambio de la climatología de la cuenca.

De forma similar que la precipitación, para la Caudal tampoco existe una tendencia definida, sin embargo, la disminución del caudal medio anual en el periodo futuro tiene a disminuir al igual que para la precipitación media anual.



Figura 29: Caudal, precipitación y temperatura media anual histórica y proyectada para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Fuente: Elaboración Propia

4.5.1. Tendencia futura de la precipitación media mensual

Si bien es cierto la incertidumbre en los cambios de precipitación futura es considerable, sin embargo, con los resultados obtenidos se logra cuantificar la variación de los cambios en el futuro cercano, medio y lejano.

En la Figura 30 se muestra los resultados de los cambios futuros en la precipitación, así como la tasa de cambio con referencia a la precipitación promedio histórico.

Para el escenario RCP 4.5 los resultados se muestran en la graficas A y B de la Figura 30; A muestra la precipitación promedio media mensual para los tres periodos futuros, en el mismo que se observa que la mayor incertidumbre en los meses octubre, diciembre, enero, febrero y marzo, en B se cuantifica la tasa de cambio de la precipitación futura con respecto a la precipitación observada, del cual se observa una tendencia de cambio similar para el futuro cercano, medio y lejano; además los meses abril, mayo, junio, agosto y octubre presentan un incremento en la precipitación mensual hasta en un 213.3%, mientras que en los demás meses la precipitación tiende a reducirse hasta en un 48.2%, en cuanto a la variación anual de la precipitación según el escenario RCP 4.5 para todo los periodos existe una tendencia de disminución, tal es así que para el futuro cercano se tiene una disminución en la precipitación media anual en 6.6%, y para futuro medio en 9.9% y para el futuro lejano 6.8%, dichos valores se presenta en la Tabla 15.

Para el escenario RCP 8.5 los resultados se muestran en la graficas C y D de la Figura 30; C muestra el cambio de precipitación promedio para los tres periodos futuros, en el mismo que se observa que la mayor incertidumbre en los meses octubre, diciembre, enero, febrero y marzo al igual que sucedió para el escenario RCP 4.5, en la D se cuantifica la tasa de cambio de la precipitación futura, del cual se observa una tendencia de cambio similar para el futuro cercano, medio y lejano; además los meses abril, mayo, junio, agosto y octubre presentan un incremento en la precipitación mensual hasta en un 567.5%, mientras que en los demás meses la precipitación tiende a reducirse hasta en un 36.7%, en cuanto a la variación anual de la precipitación según el escenario en análisis RCP 5.5 para todo los periodos existe una tendencia de disminución, tal es así que para el futuro cercano se tiene una disminución en la precipitación media anual en 4.5%, y para

futuro medio en 12.1% y para el futuro lejano 6.0%, dichos valores se presenta en la Tabla 15.

Por lo tanto, se espera que los próximos años la precipitación tienda a disminuir y este llegue a causar mayores anomalías en su comportamiento en el periodo comprendido entre 2041 – 2070 (futuro medio).

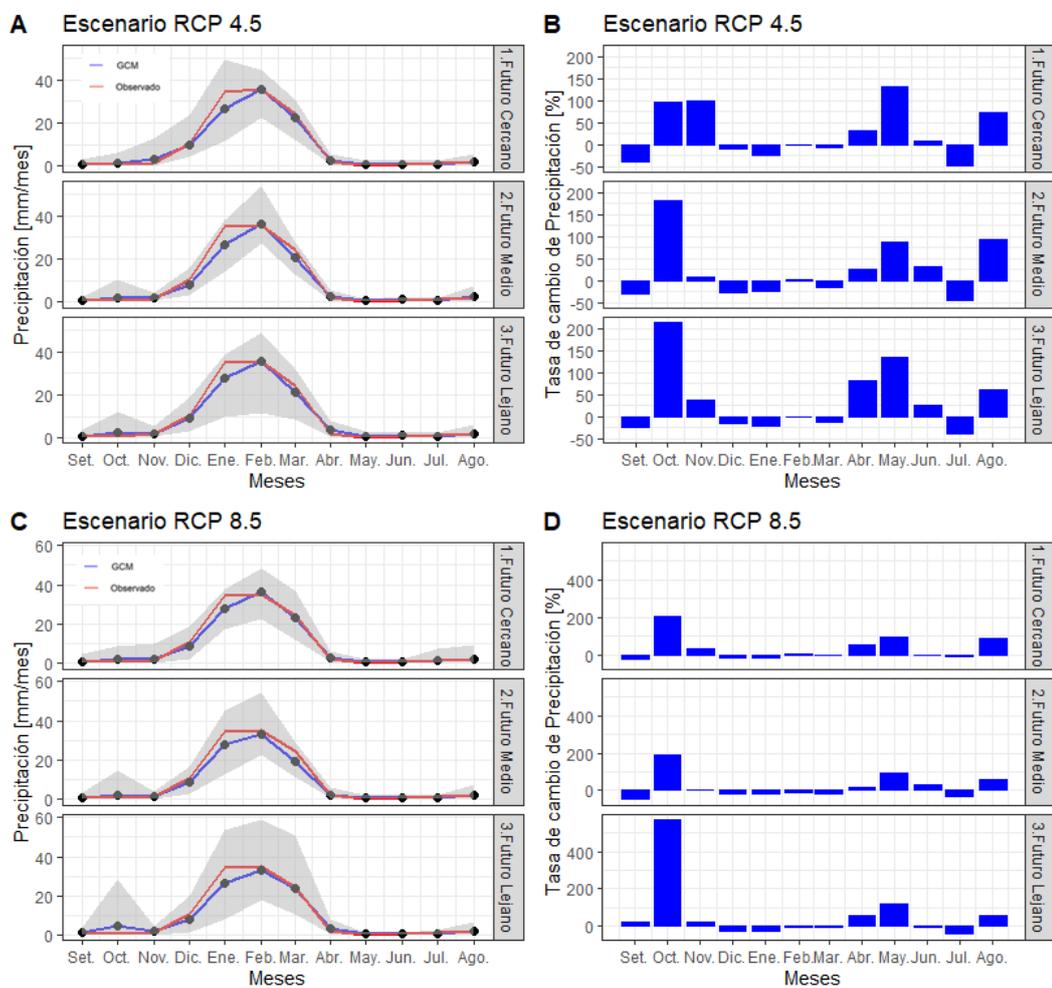


Figura 30: Comportamiento de la precipitación futura

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15: Valores de la tasa de cambio de la precipitación futura

PERIODO	Set	Oct	Nov	Dic	Ene.	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
RCP 4.5 FC (2020-2040)	-38.6%	98.0%	99.4%	-9.8%	-23.8%	0.7%	-7.1%	33.2%	133.1%	9.6%	-48.2%	73.0%	-6.6%
FM (2041-2070)	-28.9%	182.8%	9.1%	-27.0%	-23.5%	2.1%	-15.5%	26.8%	86.7%	30.5%	-43.7%	92.4%	-9.9%
FL (2071-2100)	-24.0%	213.3%	36.0%	-16.6%	-20.6%	0.4%	-13.6%	81.6%	134.9%	26.5%	-38.7%	61.8%	-6.8%
RCP 8.5 FC (2020-2040)	-25.6%	204.4%	33.3%	-18.9%	-19.5%	2.8%	-5.4%	54.8%	90.3%	-6.2%	-13.0%	89.8%	-4.5%
FM (2041-2070)	-45.5%	189.6%	2.8%	-15.4%	-20.4%	-7.2%	-19.6%	20.3%	92.8%	32.2%	-29.8%	61.1%	-12.1%
FL (2071-2100)	27.2%	567.5%	21.4%	-21.5%	-24.3%	-5.5%	-2.2%	55.7%	118.1%	-0.9%	-36.7%	59.8%	-6.0%

Fuente: Elaboración Propia

4.5.2. Tendencia futura de la temperatura media mensual

La cuantificación de la tendencia de cambio de la temperatura tiene mayor credibilidad, y los modelos climáticos usados para la presente investigación tienen un alto grado de credibilidad, el mismo que se demostró en la comparación entre los datos registrados (observados) y la predicción de los GCMs en el periodo histórico (ver Tabla 9).

La Figura 31 muestra los resultados de la cuantificación de los cambios para el futuro cercano, medio y lejano; y para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

Para el escenario RCP4.5 las gráficas A y B describen los cambios, A muestra que la temperatura tiene un incremento progresivo a través de los años, y dicho incremento es muy similar para cada mes, en cuanto al incremento de la temperatura media anual para el futuro cercano está en el orden de 1.6°C con respecto a la temperatura media histórica, y se tendrá un incremento en 2.59°C para el futuro medio, y para el futuro lejano se podría incrementar la temperatura hasta en 3.14 °C; dichos valores se muestran en la Tabla 16.

Para el escenario RCP8.5 las gráficas C y D describen los cambios, C muestra que la temperatura tiene un incremento progresivo a través de los años, y dicho incremento es muy similar para cada mes, en cuanto al incremento de la temperatura media anual para el futuro cercano está en el orden de 1.82°C con respecto a la temperatura media histórica, y se tendrá un incremento en 3.32°C para el futuro medio, y para el futuro lejano se podría incrementar la temperatura hasta en 5.6°C; dichos valores se muestran en la Tabla 16.

A partir de estos resultados se afirma nuevamente que el calentamiento global está presente en la ciudad de Tacna, donde todos los modelos afirman que existe

incremento de temperatura en los próximos años, también se puede observar el incremento de la temperatura media anual en la Figura 29.

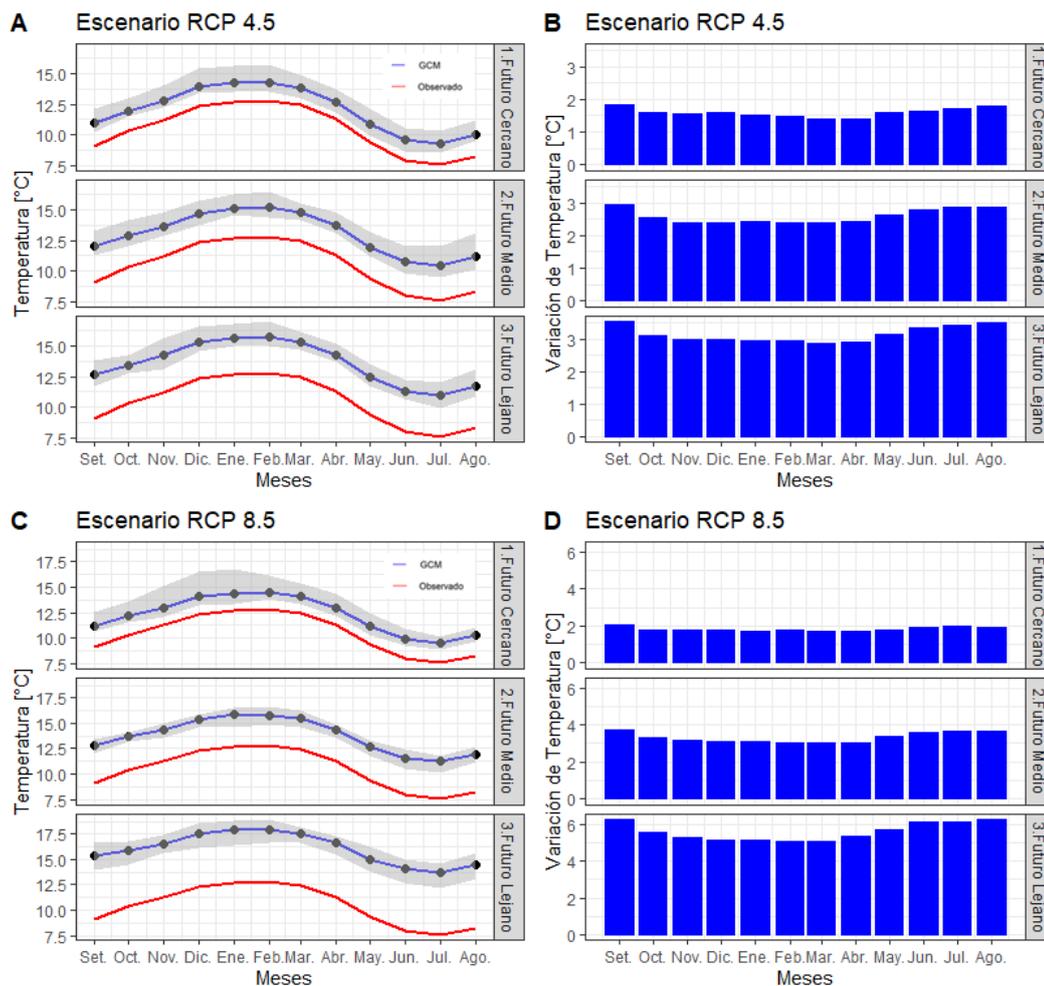


Figura 31: Comportamiento de la temperatura futura

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16: Valores de la variación de la Temperatura (°C) futura

PERIODO		Set	Oct	Nov	Dic	Ene.	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
RCP 4.5	FC (2020-2040)	1.84	1.60	1.57	1.59	1.53	1.48	1.42	1.40	1.58	1.66	1.71	1.78	1.60
	FM (2041-2070)	2.93	2.54	2.41	2.39	2.44	2.39	2.37	2.44	2.62	2.80	2.85	2.87	2.59
	FL (2071-2100)	3.54	3.11	2.99	2.97	2.96	2.93	2.85	2.93	3.13	3.37	3.41	3.50	3.14
RCP 8.5	FC (2020-2040)	2.09	1.80	1.77	1.80	1.72	1.75	1.67	1.68	1.79	1.93	1.95	1.94	1.82
	FM (2041-2070)	3.74	3.34	3.16	3.09	3.14	3.02	3.04	3.05	3.36	3.58	3.66	3.68	3.32
	FL (2071-2100)	6.25	5.59	5.32	5.17	5.18	5.09	5.10	5.33	5.71	6.10	6.14	6.24	5.60

Fuente: Elaboración Propia

4.5.3. Tendencia futura del caudal medio mensual

Tal como se definió el término disponibilidad hídrica en el ítem 2.2.1, para la cuenca Caplina está relacionado con el caudal de escorrentía superficial. En este ítem es donde se expone el objetivo buscado en la presente investigación, en la Figura 32, se muestra los cambios en la disponibilidad hídrica futura para el periodo cercano, medio y lejano en la cuenca del río Caplina.

Para el escenario RCP4.5 se muestra los resultados en las gráficas A y B; A, muestra la estacionalidad media mensual del caudal para el futuro cercano, medio y lejano, en donde las tendencias de los cambios son similares en los diferentes periodos; del mismo que se observa una disminución en la oferta hídrica entre los meses de febrero – agosto hasta en un 38.8% con referencia al caudal histórico, y existe un incremento en la oferta hídrica entre los meses setiembre – enero hasta en un 91.5%, así mismo la gráfica B, se nota claramente el cambio en la oferta hídrica. A pesar de existir un incremento en la oferta hídrica para los meses comprendidos entre setiembre – enero, en el promedio anual existe una disminución en todos los periodos futuros, en donde existe una disminución del 5.3% para el futuro cercano, una disminución del 6.3% para el futuro medio, y una disminución del 6.7% para el futuro lejano, dichos valores se muestran en la Tabla 17.

Para el escenario RCP8.5 se muestra los resultados en las gráficas C y D; C, muestra la estacionalidad media mensual del caudal para el futuro cercano, medio y lejano, en donde las tendencias de los cambios son similares en los diferentes periodos; del mismo que se observa una disminución en la oferta hídrica entre los meses de febrero – agosto hasta en un 41.3% con referencia al caudal histórico, y existe un incremento en la oferta hídrica entre los meses setiembre – enero hasta en un 79.2%, así mismo la gráfica D, se nota claramente el cambio en la oferta hídrica. A pesar de existir un incremento en la oferta hídrica para los meses comprendidos entre setiembre – enero, en el promedio anual existe una disminución en todos los periodos futuros, en donde existe una disminución del 3.6% para el futuro cercano, una disminución del 8.8% para el futuro medio, y una disminución del 2% para el futuro lejano, dichos valores se muestran en la Tabla 17.

Los cambios futuros en la disponibilidad hídrica son bastante similares para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, además existe una mayor incertidumbre en la predicción de caudales futuros para los meses de diciembre, enero y febrero, donde se observa que el rango de predicción del modelo hidrológico es más grueso en la gráfica A y C de la Figura 32 se muestra de color gris la envolvente de los posibles valores del caudal futuro y el valor promedio se muestra con la línea de color azul, y la línea de color rojo es la media de los caudales históricos en el periodo 1981-2016.

En cuanto a la incertidumbre del modelo hidrológico considerando la variación del promedio de la precipitación en el periodo de calibración y validación fue del 7% (explicado en el ítem 4.4.4), y de la Figura 30 y la Tabla 15 se explicó que existe una disminución en la precipitación futura con respecto a la precipitación histórica, además se observa que la disminución para ambos escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en futuro cercano y lejano es menor a 7%, sin embargo, la disminución en el futuro medio supera el 7%, del cual se concluye que existe mayor incertidumbre en la predicción de caudales en este periodo.

Con respecto a la estacionalidad del caudal, existe un retroceso en los meses húmedos, por ejemplo, se puede observar que en el periodo histórico el mes con mayor precipitación en febrero; sin embargo, para el escenario RCP 4.5 en los próximos años el mes con mayor presencia de precipitación ocurre en enero; para el escenario RCP 8.5 se comporta de manera similar, con la variante que en el futuro lejano el mes de febrero vuelve a ser el mes más húmedo.

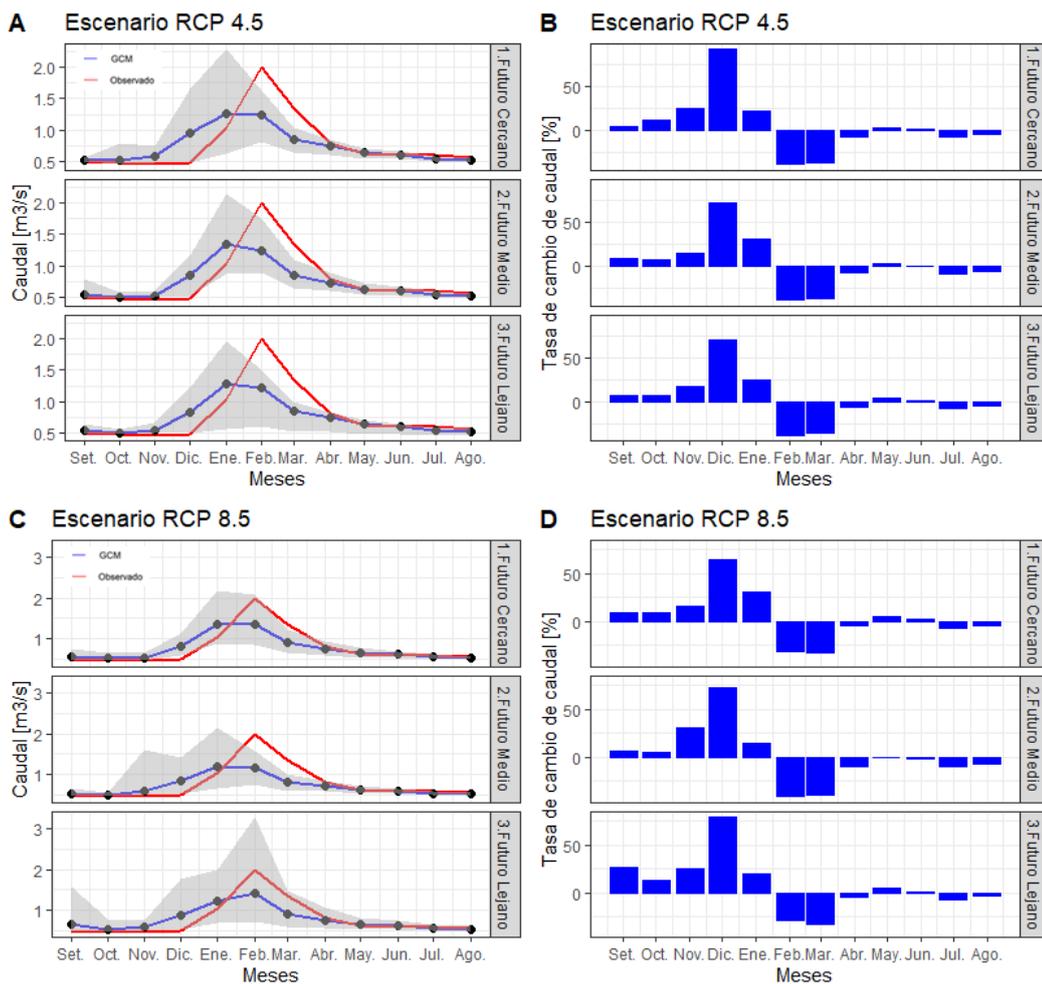


Figura 32: Comportamiento del caudal futuro

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 17: Valores de la tasa de cambio del caudal futuro

PERIODO		Set	Oct	Nov	Dic	Ene.	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
RCP 4.5	FC (2020-2040)	4.3%	11.7%	24.5%	91.5%	20.9%	-37.9%	-36.8%	-7.3%	2.9%	0.5%	-8.0%	-5.4%	-5.3%
	FM (2041-2070)	8.5%	6.7%	13.9%	71.8%	30.2%	-38.1%	-37.2%	-8.3%	1.8%	-0.4%	-8.8%	-6.1%	-6.3%
	FL (2071-2100)	7.1%	6.9%	16.9%	69.2%	23.7%	-38.8%	-36.4%	-6.9%	3.1%	0.6%	-8.0%	-5.0%	-6.7%
RCP 8.5	FC (2020-2040)	8.6%	9.1%	15.9%	64.4%	31.2%	-32.1%	-33.5%	-4.4%	5.0%	2.5%	-6.7%	-4.2%	-3.6%
	FM (2041-2070)	5.8%	5.2%	30.5%	72.5%	14.3%	-41.3%	-39.4%	-10.4%	0.1%	-1.6%	-9.6%	-6.8%	-8.8%
	FL (2071-2100)	27.3%	13.5%	24.8%	79.2%	19.2%	-29.6%	-33.0%	-4.6%	4.5%	1.4%	-7.5%	-3.5%	-2.0%

Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

- Los resultados muestran que en todos los periodos futuros la disponibilidad hídrica tiene a disminuir, tal es así que, para el escenario RCP4.5 podría reducirse hasta en un 6.7% y para el escenario RCP8.5 se podría reducir hasta en un 8.8%. Siendo así se concluye que es de suma relevancia tomar medidas de gestión de recursos hídricos a fin de garantizar la disponibilidad hídrica para la ciudad principal de Tacna.
- Se observa una disminución en la oferta hídrica entre los meses de febrero – agosto hasta en un 38.8% para el escenario RCP4.5 y hasta un 41.3% para el escenario RCP8.5, mientras que para los meses comprendidos entre septiembre – enero existe un incremento en la oferta hídrica hasta en un 91.5% para el escenario RCP4.5 y hasta un 79.2% para el escenario RCP8.5
- En cuanto a la estacionalidad, presenta un ligero retroceso de aproximadamente un mes; es decir los valores de caudal histórico de cada mes, en los próximos años pasará a ser del mes anterior.
- Los GCMs muestran que la precipitación media anual tiende a disminuir, para el escenario RCP4.5 podría existir una reducción hasta en 9.9% mientras que para el escenario RCP8.5 hasta en un 12.1%.
- Con respecto a la temperatura los GCMs concuerdan en que podría existir un incremento gradual con el transcurrir de los años, los mismo que muestran que podría existir un incremento hasta en 3.14°C para el escenario RCP4.5 y en un 5.6°C para el escenario RCP8.5.

RECOMENDACIONES

- En cuanto al uso de programas para manejo de gran cantidad de datos, como es el caso de los GCM que se encuentran en formato raster, se recomienda usar el lenguaje R, u otros similares ya que resultó ser bastante efectivo.
- En investigaciones referentes a hidrología lo mas importante es la calidad de información registrada (datos históricos), para ello se recomienda realizar una verificación minuciosa.
- No todos los GCMs son representativos para el lugar de estudio, por ello es importante realizar una selección de los GCMs conforme a la respuesta climática de la zona de interés.
- Se recomienda hacer uso de las técnicas de escalamiento para corregir los sesgos en la predicción de datos, sin embargo, se vio que al aplicar el escalamiento elimina algunos eventos extremos que identifica el GCMs, por lo cual se recomienda que para investigaciones referentes a identificación de eventos extremos (niño, sequias, inundaciones, etc.) se haga otro tipo de tratamiento para corrección de sesgos.
- Finalmente se recomienda seguir investigando en esta rama de la ciencia e ingeniería, ya que el cambio climático se encuentra en su mayor apogeo y sus efectos son cada vez más notorios con distintas intensidades a lo largo del planeta. También se recomienda realizar investigaciones sobre la mitigación y adaptación frente al cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Oscar, F. (2017). Uso del producto grillado pisco de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas de operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico. Senamhi, 1–22. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>
- Cabrera, J. W. (2011). Statistical analysis of climate change effects on agricultural drought occurrence: The case of candarave village, Tacna - Perú, Thesis submitted for the degree of Master of Advanced Studies in Sustainable Water Resources of Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Cabrera, J. W. (2012). Modelos agregados : GR2M. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño - Universidad Nacional de Ingeniería, 4. <http://www.imefen.uni.edu.pe/modhidro.htm>
- Chow, V. Te. (1994). Hidrología Aplicada (McGRAW-HILL (ed.); 1st ed.).
- Climateprediction.net. (2019). Regional climate models | climateprediction.net. <https://www.climateprediction.net/climate-science/climate-modelling/regional-models/>
- Correa, K., Avalos, G., Cubas, F., De la Cruz, G., & Díaz, A. (2019). Orientaciones para el análisis del clima y determinación de los peligros asociados al cambio climático. 0–29. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-12.pdf>
- da Silva, A. S. A., Stosic, B., Menezes, R. S. C., & Singh, V. P. (2019). Comparison of interpolation methods for spatial distribution of monthly precipitation in the state of pernambuco, Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(3), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\) HE.1943-5584.0001743](https://doi.org/10.1061/(ASCE) HE.1943-5584.0001743)
- Dakhlaoui, H., Ruelland, D., Trambly, Y., & Bargaoui, Z. (2017). Evaluating the robustness of conceptual rainfall-runoff models under climate variability in northern Tunisia. *Journal of Hydrology - ELSEVIER*, 550, –217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.032>
- ENES. (2019). CMIP5 & AR5 - ENES (European Network for Earth System Modelling). <https://portal.enes.org/data/enes-model-data/cmip5/datastructure>
- Español. (2009). Balance energético de la Tierra: Web Lea Español. <http://spanish.peopledaily.com.cn/32001/99056/99094/6834116.html>
- Fang, G. H., Yang, J., Chen, Y. N., & Zammit, C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact

- study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2547–2559. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015>
- Gisprogram. (n.d.). What is downscaling? | GIS Climate Change Scenarios. Retrieved February 7, 2020, from <https://gisclimatechange.ucar.edu/question/63>
- Graham, S., Parkinson, C., Chahine, M., & Simmon, R. (2010). The Water Cycle| Earth Observatory - NASA. 2010. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Water>
- 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 - ELSEVIER*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hoar, T., & Doug, N. (2008). Statistical downscaling of the community Climate System Model (CCSM) monthly temperature and precipitation projections.
- IPCC. (2014a). Anexo II: Glosario. Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis. Contribución de Los Grupos de Trabajo I, II y III Al Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático, 7137, 127–141. <https://doi.org/10.1038/446727a>
- 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.
- Kiehl, J. T., & Trenberth, K. E. (1997). Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2), 197–208. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2)
- Lanza, L. G., Ramírez, J. A., & Todini, E. (2001). Stochastic rainfall interpolation and downscaling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 139–143. <https://doi.org/org/10.5194/hess-5-139-2001>.
- Lenderink, G., Buishand, A., & Van Deursen, W. (2007). Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1145–1159. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>
- Marchane, A., Tramblay, Y., Hanich, L., Ruelland, D., & Jarlan, L. (2017). Climate change impacts on surface water resources in the Rheraya catchment (High Atlas, Morocco). *Hydrological Sciences Journal - Taylor & Francis*, 62(6), 979–995. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1283042>

- Michel, C. (1991). *Hydrologie Appliquée Aux Petits Bassins Raraux (Applied Hydrology for Catchments)*. Internal Report (Cemagref Antony France).
- MINAGRI. (2002). *Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Caplina y Uchusuma*. Ministerio de Agricultura y Riego.
- MINAGRI. (2009). D.S N°004-2009-AG.
- MINAGRI. (2014). *Consensuan Plan Anual de Disponibilidad Hídrica para la cuenca Caplina en Tacna*. <https://www.ana.gob.pe/noticia/consensuan-plan-anual-de-disponibilidad-hidrica-para-la-cuenca-caplina-en-tacna?fbclid=IwAR1z3YY8z9XOcIVZyMC7YgXnznMhLdH6zivit93wjLFRZ0oCwdutYECX4WVY>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. L., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 39(3), 885–900. <https://doi.org/10.1234/590>
- Morton, F. I. (1983). Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology - ELSEVIER*, 66(1–4), 1–76. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90177-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90177-4)
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J. F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., ... Zurek, M. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies*. In IPCC Expert Meeting Report.
http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=940991
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1–4), 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. . (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* (10): 282-290.
- Olsson, T., Kämäräinen, M., Santos, D., Seitola, T., Tuomenvirta, H., Haavisto, R., & Lavado-Casimiro, W. (2017). 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>
- 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>
- Oudin, L., Moulin, L., Bendjoudi, H., & Ribstein, P. (2010). Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulations. *Hydrological Sciences Journal*, 55(2), 209–222. <https://doi.org/10.1080/02626660903546118>
- Rau, P. (2017). Alcances sobre el cambio climático y lectura de datos CMIP5. <http://pedrorau.blogspot.com/2017/01/cambioclimaticocmp5.html>
- Rau, P. (2019). Un mapa de aridez para el Perú. <https://pedrorau.blogspot.com/2019/11/un-mapa-de-aridez-para-el-peru.html>
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Ruelland, D., Frappart, F., Lavado, W., Dewitte, B., & Felipe, O. (2019). Assessing multidecadal runoff (1970–2010) using regional hydrological modelling under data and water scarcity conditions in Peruvian Pacific catchments. *Hydrological Processes*, 33(1), 20–35. <https://doi.org/10.1002/hyp.13318>
- Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Collet, L., & Roucou, P. (2012). Simulating future trends in hydrological regime of a large Sudano-Sahelian catchment under climate change. *Journal of Hydrology*, 424–425, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.002>
- Senamhi. (2018). Boletín Climático Nacional. 1–14.
- Silva-Hidalgo, H., Aldama, Á. A., Martín-Domínguez, I. R., & Alarcón-Herrera, M. T. (2013). Metodología para la determinación de disponibilidad y déficit de agua superficial en cuencas hidrológicas: Aplicación al caso de la normativa Mexicana. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 4(1), 27–50.
- Themeßl, 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>
- Tyndall/Center. (2004). Informe sobre vulnerabilidad ante el cambio climático.
- Valéry, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2010). Méthode de régionalisation des précipitations et des températures de l'air pour les bassins de haute altitude - ce que nous enseignent les bassins à problème. *Hydrological Sciences Journal*, 55(6), 928–940. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.504676>

Vargas, P. (2009). El Cambio Climático y Sus Efectos en el Perú.

Villón, M. (2002). HIDROLOGÍA (E. Villón (ed.); Segunda Ed).

Zulkafli, Z., Buytaert, W., Manz, B., Rosas, C. V., Willems, P., Lavado-Casimiro, W., Guyot, J. L., & Santini, W. (2016). Projected increases in the annual flood pulse of the Western Amazon. *Environmental Research Letters*, 11(1).
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014013>

ANEXOS

Anexo A. Precipitaciones mensuales PISCO de la cuenca Caplina (mm/mes)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1981	38.972	43.967	21.326	2.625	0.056	0.055	0.017	0.529	0.269	0.058	2.301	14.060
1982	15.802	4.875	12.642	1.976	0.212	0.107	0.033	0.163	0.406	2.879	3.232	3.185
1983	0.893	1.570	0.236	0.221	0.374	0.379	0.403	0.413	1.857	0.084	0.046	2.783
1984	46.747	37.119	48.486	0.506	0.161	3.886	0.032	2.150	0.084	9.439	5.598	0.836
1985	6.894	80.207	18.629	1.836	0.068	0.303	0.018	0.120	0.299	0.138	18.716	14.990
1986	33.009	21.558	10.668	1.849	0.472	0.104	0.148	3.754	0.159	0.052	0.196	23.203
1987	54.738	0.714	0.351	0.302	0.429	0.198	12.387	0.074	0.099	1.006	0.053	0.137
1988	58.621	0.563	28.586	0.899	0.062	0.021	0.024	0.085	0.381	0.031	0.028	6.568
1989	18.795	56.270	15.107	8.456	0.119	0.136	0.104	0.091	0.129	0.036	0.029	0.157
1990	4.637	12.277	16.274	0.859	0.774	5.429	0.081	0.051	0.049	0.065	1.714	45.902
1991	23.939	2.553	21.046	1.148	0.077	0.789	0.018	0.046	0.050	0.013	0.320	0.403
1992	7.393	0.029	0.236	0.419	0.342	0.367	0.037	0.218	0.053	0.180	1.273	20.973
1993	67.076	4.014	17.786	0.488	0.239	0.367	0.197	7.953	0.056	0.470	0.360	14.887
1994	35.640	62.969	6.938	6.914	0.086	0.132	0.023	0.188	0.100	0.021	0.285	16.387
1995	22.701	1.474	51.830	1.849	0.387	0.060	0.036	0.107	0.059	0.075	0.592	5.497
1996	30.944	20.719	2.390	1.258	0.586	0.149	0.040	0.832	0.053	0.002	2.207	4.740
1997	71.921	83.978	26.506	0.370	0.602	0.159	0.244	9.222	9.023	0.292	0.602	5.423
1998	70.153	9.889	0.235	0.340	0.057	3.450	0.083	0.228	0.125	0.076	0.279	15.389
1999	16.684	112.010	77.038	4.436	0.109	0.125	0.030	0.058	0.260	1.142	0.110	12.063
2000	95.556	45.900	36.512	1.432	0.127	0.546	0.327	0.188	0.041	0.588	0.036	16.706
2001	48.191	126.750	67.699	5.031	0.077	0.158	0.090	2.251	0.231	0.008	0.031	6.948
2002	16.192	60.464	59.738	3.973	0.271	3.373	13.828	0.157	0.031	1.324	1.078	8.749
2003	14.499	9.136	37.850	1.095	0.323	0.085	0.643	0.604	0.105	0.077	0.514	1.597
2004	32.534	41.355	10.980	0.197	0.079	0.138	5.182	1.402	0.214	0.025	0.024	2.691
2005	34.352	42.629	16.942	1.403	0.082	0.127	0.039	0.109	10.729	0.004	0.567	20.589
2006	39.193	51.553	55.182	2.078	0.070	0.214	0.043	0.174	0.104	5.521	0.823	4.715
2007	30.225	40.610	21.355	0.889	0.456	0.165	0.078	0.344	0.161	0.076	0.829	5.220
2008	89.225	21.228	21.660	0.203	0.091	0.208	0.019	1.476	0.162	0.077	0.028	13.971
2009	10.805	52.090	22.206	1.645	0.249	0.066	0.175	0.161	0.101	0.048	1.538	1.508
2010	7.391	23.212	3.402	1.259	2.669	0.184	0.024	0.032	0.109	0.362	0.026	9.884
2011	53.047	74.220	1.743	7.806	4.197	0.375	0.558	0.193	0.168	0.001	1.048	43.567
2012	78.020	100.474	20.708	13.451	0.065	0.170	0.100	0.243	0.243	2.748	0.049	29.916
2013	48.357	34.618	24.425	0.193	9.414	1.504	0.111	0.486	0.032	0.138	0.041	9.568
2014	33.186	0.209	1.437	5.921	0.107	0.308	0.128	0.122	0.162	0.855	2.152	0.126
2015	24.967	53.807	83.193	6.544	0.237	0.028	0.302	0.382	0.491	0.368	0.539	0.580
2016	8.049	63.725	0.810	3.677	0.067	1.196	3.199	0.097	0.092	0.195	0.082	6.476

Anexo B. Temperaturas mensuales PISCO de la cuenca Caplina (°C)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1981	12.212	13.034	12.010	10.665	8.140	6.782	7.162	8.136	8.767	10.104	11.385	12.904
1982	13.625	13.871	12.487	12.296	10.342	9.874	9.987	9.385	10.176	10.241	10.885	10.840
1983	11.070	12.004	12.296	11.115	9.474	8.884	9.937	10.264	10.366	10.493	10.014	12.278
1984	11.696	12.522	12.418	10.829	9.198	7.773	6.951	6.878	7.970	10.550	11.176	11.737
1985	11.152	12.436	12.082	10.801	9.022	7.890	6.255	7.905	8.797	9.753	10.879	12.173
1986	12.378	11.953	12.069	10.938	8.172	7.068	6.041	7.599	8.558	9.229	11.341	12.668
1987	13.160	12.716	12.116	11.035	9.020	8.083	7.905	8.503	9.475	10.149	12.000	12.158
1988	13.147	12.586	12.506	11.391	9.317	7.088	7.168	8.591	8.710	9.834	10.666	11.801
1989	12.169	12.471	11.806	10.919	8.970	7.928	7.074	7.423	8.407	10.415	10.318	11.032
1990	12.819	11.497	11.858	10.968	9.136	7.813	6.434	7.801	8.665	10.655	12.239	12.936
1991	12.893	13.491	12.947	11.251	9.502	7.441	7.293	8.745	9.171	10.500	11.059	11.848
1992	12.642	12.009	12.101	11.175	10.090	8.815	7.295	7.212	8.005	10.030	10.724	12.186
1993	12.662	11.931	12.235	11.591	9.152	7.981	7.224	6.970	8.623	10.338	11.914	13.156
1994	12.801	12.787	12.455	11.667	9.297	7.702	7.652	8.386	10.025	10.301	11.549	12.964
1995	13.176	12.039	12.321	10.815	9.045	7.723	7.667	9.062	9.891	10.194	11.564	11.635
1996	11.786	12.946	12.317	11.431	9.158	7.192	6.679	8.267	8.837	10.157	10.760	12.047
1997	12.519	12.714	11.982	10.884	9.800	8.143	9.379	8.887	10.698	11.035	12.170	13.593
1998	15.534	14.868	14.328	12.229	10.130	9.126	8.829	8.819	8.971	10.611	11.426	12.377
1999	12.026	12.836	12.386	11.044	8.870	7.321	7.554	8.134	8.648	10.375	10.127	11.929
2000	12.524	12.387	12.261	11.606	9.406	7.343	6.747	8.306	8.959	10.716	10.577	12.569
2001	12.841	13.494	12.737	11.586	9.429	8.144	7.296	8.550	9.300	10.689	11.660	12.279
2002	12.655	13.375	13.278	11.805	10.479	9.001	7.481	8.404	9.589	11.074	11.764	12.805
2003	13.322	13.664	12.750	11.414	10.042	8.161	7.582	7.794	8.380	10.415	11.514	12.610
2004	13.063	12.968	13.173	11.455	8.671	7.608	7.494	8.683	9.670	10.376	11.605	12.992
2005	13.358	13.154	12.785	11.672	9.372	7.712	7.971	7.889	8.553	9.945	11.350	12.836
2006	12.993	13.260	13.279	11.411	9.075	8.277	8.122	8.734	9.414	10.809	12.085	13.004
2007	13.592	13.051	12.879	11.503	9.504	8.729	7.534	8.202	9.386	10.297	11.000	11.995
2008	13.124	12.796	12.421	10.427	8.336	7.880	7.531	8.243	9.038	10.537	11.776	12.335
2009	12.993	13.334	12.554	11.609	9.530	7.775	8.175	7.894	9.790	10.946	13.067	13.436
2010	13.767	14.606	13.650	12.440	10.401	9.008	7.277	8.695	9.750	10.623	10.769	12.609
2011	13.097	12.880	12.261	11.633	9.936	8.710	7.912	8.501	9.608	10.264	12.473	13.075
2012	13.357	13.613	13.780	12.663	10.526	9.250	9.010	9.012	10.504	11.299	12.428	13.383
2013	13.577	13.649	13.052	11.217	10.526	8.993	8.954	8.796	9.948	11.197	12.220	13.468
2014	13.936	13.204	12.898	12.071	10.002	9.432	8.705	9.435	10.654	12.010	12.438	13.288
2015	13.176	13.936	13.836	12.777	10.570	10.228	8.769	9.538	10.994	11.693	12.589	13.630
2016	12.262	12.521	12.169	10.732	9.661	8.409	8.645	8.848	9.612	10.024	10.014	11.361

Anexo C. Caudales mensuales PISCO de la cuenca Caplina (m³/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1981	0.563	1.336	1.097	0.709	0.602	0.593	0.573	0.556	0.542	0.488	0.461	0.488
1982	0.624	0.721	0.646	0.557	0.547	0.59	0.539	0.501	0.505	0.498	0.476	0.514
1983	0.424	0.376	0.44	0.44	0.475	0.476	0.494	0.445	0.464	0.432	0.389	0.407
1984	0.815	1.887	1.49	0.777	0.573	0.585	0.578	0.545	0.444	0.512	0.612	0.544
1985	0.568	4.174	2.134	1.069	0.707	0.64	0.624	0.566	0.529	0.497	0.553	0.624
1986	1.684	2.854	1.723	1.032	0.801	0.742	0.702	0.68	0.598	0.549	0.548	0.626
1987	2.325	1.241	0.789	0.679	0.68	0.671	0.75	0.641	0.574	0.56	0.523	0.501
1988	0.895	0.943	1.053	0.885	0.674	0.644	0.64	0.602	0.544	0.496	0.433	0.496
1989	0.623	3.841	0.932	0.832	0.698	0.619	0.594	0.507	0.523	0.488	0.451	0.402
1990	0.46	0.49	0.54	0.47	0.5	0.54	0.51	0.49	0.43	0.4	0.41	0.68
1991	1.13	0.82	1.26	0.78	0.66	0.69	0.64	0.59	0.49	0.43	0.42	0.41
1992	0.47	0.37	0.36	0.4	0.43	0.49	0.5	0.45	0.39	0.36	0.37	0.44
1993	1.36	0.71	0.97	0.58	0.47	0.46	0.46	0.5	0.39	0.39	0.37	0.46
1994	1.13	2.23	0.74	0.61	0.52	0.54	0.48	0.46	0.42	0.41	0.38	0.47
1995	0.52	0.4	1.59	0.55	0.51	0.48	0.43	0.42	0.39	0.36	0.33	0.35
1996	0.7	1.06	0.67	0.53	0.45	0.42	0.45	0.4	0.38	0.34	0.35	0.35
1997	1.49	4.72	0.5	0.81	0.56	0.55	0.55	0.56	0.5	0.44	0.41	0.42
1998	3.04	1.35	0.61	0.47	0.46	0.48	0.47	0.45	0.38	0.38	0.38	0.4
1999	0.46	3.45	2.25	2.04	0.82	0.63	0.6	0.52	0.47	0.48	0.46	0.47
2000	1.78	3.21	3.03	1.1	0.77	0.74	0.7	0.6	0.54	0.51	0.5	0.5
2001	2.12	9.17	6.54	1.63	1	0.98	1.1	1.08	0.91	0.81	0.83	0.79
2002	0.736	1.715	2.06	1.24	0.953	0.884	0.954	0.815	0.717	0.707	0.674	0.656
2003	0.667	0.679	0.842	0.725	0.657	0.645	0.645	0.608	0.56	0.514	0.486	0.477
2004	0.675	1.107	0.631	0.557	0.548	0.559	0.592	0.537	0.489	0.461	0.452	0.454
2005	0.678	1.163	0.864	0.629	0.568	0.578	0.589	0.544	0.601	0.467	0.417	0.466
2006	0.845	1.806	2.02	1.411	0.766	0.715	0.657	0.609	0.591	0.595	0.529	0.503
2007	0.776	0.945	1.284	0.692	0.59	0.579	0.588	0.557	0.515	0.474	0.445	0.488
2008	1.652	0.766	0.792	0.625	0.594	0.607	0.58	0.536	0.504	0.476	0.425	0.477
2009	0.625	1.169	1.313	0.597	0.54	0.533	0.534	0.498	0.453	0.425	0.431	0.422
2010	0.469	0.696	0.518	0.435	0.495	0.492	0.49	0.453	0.429	0.394	0.365	0.405
2011	0.807	1.936	0.846	0.639	0.562	0.533	0.536	0.484	0.44	0.412	0.405	0.527
2012	2.404	5.412	1.747	1.058	0.782	0.68	0.646	0.587	0.557	0.517	0.622	0.737
2013	1.122	0.968	1.191	0.693	0.735	0.654	0.628	0.56	0.517	0.505	0.468	0.523
2014	0.794	0.501	0.497	0.534	0.509	0.507	0.515	0.471	0.446	0.436	0.439	0.427
2015	0.493	1.007	1.4	0.87	0.63	0.6	0.57	0.49	0.42	0.41	0.42	0.4
2016	0.43	0.93	0.46	0.49	0.52	0.53	0.57	0.54	0.5	0.46	0.45	0.45

Anexo D. Precipitaciones medias mensuales de los modelos climáticos seleccionados para la cuenca Caplina (mm/mes), en el periodo 1981-2005.

GCM/OBS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
OBSERVADO	34.675	35.320	24.241	1.995	0.247	0.826	1.363	1.240	0.994	0.723	1.608	10.595
ACCESS1-0	23.570	38.229	23.624	2.475	0.354	0.128	0.787	2.512	0.245	0.285	2.793	18.550
ACCESS1-3	25.533	42.749	21.602	4.544	0.342	0.272	1.154	1.988	0.403	1.404	1.554	12.149
CMCC-CM	27.527	41.944	20.803	5.466	0.228	1.952	1.141	0.311	0.160	1.351	1.861	11.117
CMCC-CMS	33.177	36.246	20.535	4.901	1.012	1.313	1.140	0.939	0.184	0.557	2.616	11.103
CNRM-CM5	30.785	37.732	23.023	2.605	0.692	0.952	0.377	2.076	0.132	0.553	2.684	12.118
CSIRO-Mk3-6-0	30.126	42.443	23.375	2.618	0.450	1.485	0.566	1.397	0.615	2.530	0.197	8.261
EC-EARTH	36.357	38.833	25.134	1.118	0.202	1.802	0.568	1.080	0.292	0.311	2.783	5.387
GISS-E2-H	39.249	19.259	22.797	3.404	0.224	0.927	0.408	2.089	0.053	0.609	2.706	21.998
HadGEM2-AO	28.379	47.010	22.152	4.194	0.213	0.561	0.515	2.313	0.146	0.925	2.293	5.239
HadGEM2-CC	24.557	47.170	22.389	3.834	0.271	0.267	1.021	2.124	0.215	0.777	2.396	8.772
HadGEM2-ES	19.065	49.189	23.522	2.645	0.286	0.814	1.698	0.918	0.217	0.701	2.456	12.329
MIROC-ESM-CHEM	31.126	40.478	19.967	6.286	0.227	0.260	0.502	2.624	0.398	2.330	0.624	8.916
MPI-ESM-LR	41.526	33.739	24.752	1.525	0.249	1.834	0.269	1.315	0.274	1.026	2.052	5.396
MPI-ESM-MR	42.509	26.454	24.795	1.489	0.268	2.163	0.317	0.923	1.143	1.108	1.128	11.695

Anexo E. Temperaturas medias mensuales de los modelos climáticos seleccionados para la cuenca Caplina (°C), en el periodo 1981-2005.

GCM/OBS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
OBSERVADO	12.689	12.790	12.468	11.303	9.329	7.944	7.562	8.264	9.088	10.327	11.227	12.334
ACCESS1-0	10.874	10.656	10.452	9.166	6.423	4.637	4.588	6.195	7.891	9.125	10.761	10.919
ACCESS1-3	10.355	10.201	10.105	10.109	8.931	7.646	7.320	8.404	9.511	10.871	11.206	10.899
CMCC-CM	9.611	9.013	8.819	7.717	5.554	4.002	4.055	5.444	7.251	8.528	8.843	9.580
CMCC-CMS	11.912	11.227	11.091	10.144	8.140	6.289	6.406	8.307	10.311	11.597	12.443	12.401
CNRM-CM5	14.432	14.464	13.751	12.109	9.257	6.951	6.417	7.107	8.497	10.520	12.377	13.503
CSIRO-Mk3-6-0	11.531	10.769	10.390	10.390	6.161	5.219	5.831	7.871	10.320	10.653	11.618	12.145
EC-EARTH	6.679	6.437	6.075	5.353	3.556	2.558	3.126	4.432	6.062	7.230	7.640	7.175
GISS-E2-H	9.258	9.356	8.950	8.594	6.740	5.096	4.552	5.994	7.464	8.628	9.419	9.304
HadGEM2-AO	11.164	10.390	10.293	9.732	8.227	6.446	6.265	7.584	8.838	10.166	11.488	11.679
HadGEM2-CC	10.130	9.722	9.436	8.758	6.950	4.994	4.757	6.236	8.116	9.517	10.162	10.385
HadGEM2-ES	10.353	9.951	9.551	8.899	7.044	5.143	5.117	6.315	7.784	9.436	10.515	10.708
MIROC-ESM-CHEM	18.982	18.439	18.470	16.858	14.951	13.476	12.959	14.022	15.701	17.286	18.319	19.230
MPI-ESM-LR	10.551	9.908	9.558	8.192	5.979	4.522	4.968	6.688	8.570	9.676	10.713	11.012
MPI-ESM-MR	10.184	9.823	9.479	7.965	5.932	4.543	4.351	5.999	7.988	9.194	10.318	10.746