

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Evaluación futura de la oferta hídrica a efectos del cambio climático con una proyección al año 2100 en la Microcuenca Mariño en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024.

Asesor:

MSc. Maldonado Mendivil Ángel

Autor:

Miranda Salas Jordy Maxwill

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Abancay- Apurímac - Perú.

2026

Acta de Sustentación



Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 009

En la ciudad de Abancay, a los diecisiete días del mes de abril del 2026, siendo las 11:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0133-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de fecha 09 de abril del 2026, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mag. Américo ROLDAN JUÁREZ
Dictaminante :	Dra. Rosa Marina VERA TEVES
Replicante :	Mag. Edwin ASTETE JUAREZ

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Evaluación futura de la oferta hídrica a efectos del cambio climático con una proyección al año 2100 en la Microcuenca Mariño en el Distrito de Abancay, Provincia de Abancay, Departamento de Apurímac-2024.

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: Miranda Salas, Jordy Maxwell

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Miranda Salas, Jordy Maxwell	Aprobado

Siendo las 12:18 pm horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Américo ROLDAN JUÁREZ

(.....)

Dictaminante: Dra. Rosa Marina VERA TEVES

(.....)

Replicante: Mag. Edwin ASTETE JUAREZ

(.....)

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los tomos N° 007

Abancay 23 de abril del 2026

(*) Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Art. 18 RGGAT.
(**) 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565
Filial Andahuaylas, Av. Juan Antonio Trelles N° 513 Teléfono (083) 421752
www.utea.edu.pe

Reporte de Similitud






7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Metadatos

Datos del Autor	
Apellidos y Nombres	: Miranda Salas Jordy Maxwill
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 74894276
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0001-8216-5698
Datos del Asesor	
Apellidos y Nombres	: MSc. Maldonado Mendivil Ángel
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 06788424
URL ORCID	: https://orcid.org/0000-0001-9002-1910
Datos de la Investigación	
Facultad	: De Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Civil
Línea de Investigación	: Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	: 2025
Fuente de financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de similitud	: 7%
URL de OCDE escuela profesional de ingeniería civil	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford# 2.01.01

Resumen

La presente investigación plantea evaluar y proyectar las consecuencias del cambio climático con respecto a la oferta hídrica en la microcuenca Mariño.

La microcuenca Mariño presenta ligeras variaciones correspondiente a años anteriores en las variables de precipitación, temperatura y caudal. La presente investigación (tesis) se realizó con el objetivo de lograr determinar y evaluar la variación de la oferta hídrica en distintos periodos futuros.

Se hizo uso de los modelos climáticos globales (GCM) bajo los escenarios de emisión: RCP 4.5 y RCP 8.5 los cuales son recomendados por el IPCC, de 36 GCM se llegó a trabajar solo con 11 GCM. Posteriormente se realizó el modelamiento hidrológico con el modelo GR2M el cual fue calibrado mediante el valor Nash-Sutcliffe (NSE), posteriormente se proyectaron los caudales futuros.

Los resultados obtenidos dieron a conocer que el aumento de la oferta hídrica futuro en los meses de noviembre a junio según el escenario RCP 4.5 son de un 20% hasta más del 100% en el mes de mayo, los valores varían ligeramente en el escenario RCP 8.5 llegando hasta un 91% en un periodo cercano. Por el contrario, en los meses de julio a octubre se verá una disminución de la oferta hídrica de hasta un 61% en el escenario RCP 4.5 y en el escenario RCP 8.5 se verá una disminución de hasta un 50%.

El aumento de la oferta hídrica anualmente según el escenario RCP4.5 es de un 17.9% y según el escenario RCP 8.5 de un 18.3%.

Palabras clave: oferta hídrica, cambio climático, microcuenca.

Abstract

The present research aims to evaluate and project the consequences of climate change on the water supply in the Mariño micro-basin.

The Mariño micro-basin shows slight variations, compared to previous years, in the variables of precipitation, temperature, and streamflow. This research (thesis) was carried out with the objective of determining and assessing the variation of water availability across different future periods.

Global Climate Models (GCMs) were used under the emission scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5, which are recommended by the IPCC. Out of 36 GCMs, only 11 were selected for analysis. Subsequently, hydrological modeling was performed using the GR2M model, which was calibrated using the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient, and future streamflows were then projected.

The results indicate that the future increase in water availability from November to June, under the RCP 4.5 scenario, ranges from 20% to over 100% in May, with values varying slightly under the RCP 8.5 scenario, reaching up to 91% in the near future. Conversely, from July to October, a decrease in water availability of up to 61% is expected under the RCP 4.5 scenario, while under the RCP 8.5 scenario, the decrease may reach up to 50%.

The annual increase in water availability is 17.9% under the RCP 4.5 scenario and 18.3% under the RCP 8.5 scenario.

Keywords: water availability, climate change, micro-basin.

Índice general

Portada	i
Acta de Sustentación	ii
Reporte de Similitud	iii
Metadatos	iv
Resumen	v
Abstract	vi
Índice general	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tablas	xi
Índice de Anexos	xii
I. Introducción	13
II. Planteamiento del Problema	15
2.1. Descripción y formulación del problema	15
2.2. Objetivos	19
2.2.1. <i>Objetivos generales</i>	19
2.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	19
2.3. Justificación e importancia	20
2.4. Hipótesis	21
2.4.1. <i>Hipótesis general</i>	21
2.4.2. <i>Hipótesis específica</i>	21
2.5. Variables	22
III. Marco Teórico	24

3.1.	Antecedentes de la investigación.....	24
3.2.	Bases teóricas	28
3.3.	Definición de términos.....	59
IV.	Metodología de la Investigación.....	63
4.1.	Tipo y nivel de investigación.....	63
4.2.	Ámbito temporal y espacial.....	65
4.3.	Población y muestra.....	65
4.4.	Instrumentos	66
4.5.	Procedimientos	66
4.6.	Análisis de datos.....	77
V.	Resultados Y Discusión.....	79
VI.	Conclusiones.....	112
VII.	Recomendaciones.....	114
VIII.	Referencias.....	116
IX.	Anexos	123

Índice de Figuras

Figura 1 Sistema de producción y distribución de agua en la ciudad de Abancay.....	18
Figura 2 Impactos adversos al cambio climático causados por el hombre.....	32
Figura 3 Trayectorias y escenarios definidos por el IPCC.....	36
Figura 4 Ciclo del agua.....	48
Figura 5 Cuenca como sistema hidrológico.....	49
Figura 6 Representación en diagrama de bloques de sistema Hidrológico de Chow V. (1994).....	50
Figura 7 Estructura del modelo GR2M.....	55
Figura 8 Delimitación de la microcuenca Mariño.....	67
Figura 9 Ubicación de la microcuenca Mariño.....	68
Figura 10: Ubicación de las coordenadas de datos PISCO.....	72
Figura 11 Interpolación IDW.....	74
Figura 12 Comparación de la data PISCO con la precipitación registrada por las estaciones meteorológicas de SENAMHI.....	74
Figura 13 Comparación de la temperatura PISCO con la temperatura registrada por las estaciones meteorológicas de SENMAHI.....	75
Figura 14 Selección de los GCM en base a la temperatura promedio observada.....	80
Figura 15 Selección de modelos GCM en base a las precipitaciones observadas.....	80
Figura 16 Datos de precipitación con envolvente GCM en un periodo 1981 al 2005.....	84
Figura 17 Datos de temperatura con envolvente GCM en un periodo 1981 al 2005.....	85
Figura 18 Datos de precipitación con envolvente GCM escalada estadísticamente en un periodo 1981 al 2005.....	86
Figura 19 Datos de temperatura con envolvente GCM escalada estadísticamente en un periodo 1981 al 2005.....	86
Figura 20 Ejemplo de un GCM escalado por mapeo de cuantiles para precipitación del modelo global ACCESS 1-0, en el escenario RCP 4.5.....	87

Figura 21 Ejemplo de un GCM escalado por escalamiento lineal (LS) para temperatura del modelo global ACCESS 1-0, en el escenario RCP 4.5.....	88
Figura 22 Modelamiento del caudal de la microcuenca Mariño por medio del modelo GR2M.....	92
Figura 23 Visualización de los resultados del GR2M y comparado con las precipitaciones y datos climatológicos.....	93
Figura 24 Proyección de las variables climáticas según escenarios RCP4.5 y RCP 8.5..	94
Figura 25 Comparaciones de la proyección de temperatura GCM y observada por meses para el escenario 4.5.....	95
Figura 26 Comparación de la variación de temperatura GCM en el escenario 4.5.....	96
Figura 27 Comparaciones de la proyección de temperatura GCM y observada por meses para el escenario RCP 8.5.....	96
Figura 28 Comparación de la variación de temperatura GCM en el escenario RCP 8.5..	97
Figura 29 Comparaciones de la proyección de precipitación GCM y observada por meses para el escenario RCP 4.5.....	99
Figura 30 Comparación de la variación de precipitación GCM en el escenario RCP 4.5	100
Figura 31 Comparaciones de la proyección de precipitación GCM y observada por meses para el escenario RCP 8.5.....	101
Figura 32 Comparación de la variación de precipitación GCM en el escenario RCP 8.5	101
Figura 33 Comparaciones de la proyección de caudal GCM y observada por meses para el escenario RCP 4.5p.....	104
Figura 34 Comparación de la variación de caudal GCM en el escenario RCP 4.5.....	105
Figura 35 Comparaciones de la proyección de caudal GCM y observada por meses para el escenario RCP 8.5.....	106
Figura 36 Comparación de la variación de caudal GCM en el escenario RCP 8.5.....	106

Índice de Tablas

Tabla 1 Balance oferta y demanda de captación de agua (m ³).....	17
Tabla 2 Operacionalización de variables.....	23
Tabla 3 Métodos de corrección de sesgo para precipitación y temperatura.....	40
Tabla 4 Calificación de NSE para evaluar rendimiento de modelos a paso de tiempo mensual.....	52
Tabla 5 Parámetros y condiciones iniciales del modelo GR2M.....	59
Tabla 6 Resumen de las estaciones.....	69
Tabla 7 Datos de estaciones SENAMHI.....	70
Tabla 8 Resumen de estaciones PISCO.....	73
Tabla 9 Detalle de GCM analizados y mediante PHYTON para la variable precipitación.....	81
Tabla 10 Valores bias y factor de correlación de las variables seleccionadas de precipitación.....	81
Tabla 11 Valores bias y factores de correlación seleccionados de las variables de precipitaciones y temperatura.....	82
Tabla 12 Comparación de valor BIAS y factor de correlación de los GCM originales y los escalados estadísticamente.....	83
Tabla 13 Periodos de referencia del modelo GR2M.....	90
Tabla 14 Eficiencia del modelo GR2M en la microcuenca Mariño.....	91
Tabla 15 Parámetros del modelo GR2M.....	91
Tabla 16 Valores de la variación de temperatura (°C) futura.....	98
Tabla 17 Valores de la variación de precipitación.....	103
Tabla 18 Valores de la variación de caudal.....	108

Índice de Anexos

Anexo A: Matriz de Consistencia: “Evaluación futura de la oferta hídrica a efectos del cambio climático con una proyección al año 2100 en la Microcuenca Mariño en la provincia de Abancay-Apurímac, 2024”	124
Anexo B: Operacionalización de variables	125
Anexo C: Precipitaciones mensuales SENAMHI de la microcuenca Marino (mm/mes) / Estación Abancay “000605/DZ12”	126
Anexo D: Precipitaciones mensuales SENAMHI de la microcuenca Marino (mm/mes) / Estación Curahuasi “000677/DZ12”	127
Anexo E: Temperatura media mensual SENAMHI de la microcuenca Marino (mm/mes) / Estación Abancay “000605/DZ12”	129
Anexo F: Temperatura media mensual SENAMHI de la microcuenca Marino (mm/mes) / Estación Curahuasi “000677/DZ12”	130
Anexo G: Precipitaciones mensuales PISCO-01 (mm/mes).....	132
Anexo H: Precipitaciones mensuales PISCO-02 (mm/mes).....	134
Anexo I: Temperatura mensuales PISCO-01 (°C)	136
Anexo J: Temperatura mensuales PISCO-01 (°C).....	138

I. Introducción

En la actualidad la oferta hídrica está directamente vinculada al cambio climático, estudiado y detallado meticulosamente por distintas instituciones a nivel mundial. La institución más conocida e importante es el panel intergubernamental del cambio climático (IPCC), quienes cada cierto tiempo lanzan reportes sobre nuevos aportes y conocimientos más actualizados del cambio climático a nivel mundial.

Actualmente se encuentra el proceso el séptimo reporte, anteriores reportes son bastantes conocidos por su fiabilidad siendo el quinto AR5 y sexto AR6. Para la investigación se realizó mediante el quinto reporte por contar con mayor accesibilidad a los datos corregidos por instituciones públicas del Perú como SENAMHI, PISCO, MINAN.

La disponibilidad hídrica se encuentra ligada al cambio climático viéndose afectada directamente por factores como la temperatura y precipitaciones, para poder estimar hacia un futuro se realiza mediante modelos de interacción océano-atmosfera denominados GCM (modelos climáticos globales). Los GCM trabajan bajo distintos rangos para cada reporte del IPCC, el quinto reporte se rige bajo los rangos RCP (concentración de gases de efecto invernadero).

Actualmente estudios en la microcuenca Mariño indican un crecimiento de precipitaciones de +0.7 a +8.5 mm/año en distintas zonas de la microcuenca Mariño, esta tendencia no es uniforme en toda la cuenca variando por la topografía de la zona.

Los caudales no cuentan con una tendencia histórica clara pues tienden a variar demasiado y depender de las precipitaciones, aguas subterráneas, glaciares, etc. instituciones como el ANA/SENAMHI apuntan a un repunte en periodos altos de lluvias y disminuciones en periodos de sequía.

El impacto del cambio climático afectara más a la parte sureste del Perú según estudios realizados por SENAMHI, obteniendo un aumento de hasta un 26% de aumento

en la escorrentía media anual en los escenarios más optimistas, dando como resultado el aumento de hasta un 35% de caudales en periodos húmedos.

La disminución y aumento de oferta hídrica en distintos periodos del año es un tema sensible que conlleva consecuencias negativas y buenas dependiendo de la magnitud.

En esta investigación se busca evaluar y proyectar los efectos que tendrá el cambio climático con respecto a disponibilidad hídrica futura en la microcuenca Mariño.

Actualmente no se cuenta con una proyección futura a largo plazo de la microcuenca Mariño en específico, siendo necesario una correcta proyección para evaluar y tomar decisiones en sectores como construcción, agricultura, consumo humano, etc.

El estudio se desarrolló con información recopilada por las instituciones como SENAMHI, PISCO, MINAM que posteriormente son procesadas por las metodologías expuestas en la presente investigación. Los datos procesados son comparados y escalados con datos globales (GCM), posteriormente proyectados y modelados en un modelo hidrológico para finalmente poder obtener una proyección la oferta hídrica a un futuro a largo plazo.

II. Planteamiento del Problema

2.1. Descripción y formulación del problema

- **Descripción del problema**

La escasez de los recursos hídricos en distintas zonas del planeta viene a ser un problema severo, siendo un recurso indispensable para la vida. Anteriormente los recursos hídricos eran definidos como un recurso renovable contando con más del 70% del total del planeta, sin embargo, tan solo el 2,8% viene a ser agua dulce (apto para consumo humano y para el sector de la construcción). Las reservas de los recursos hídricos aptos para consumo son limitadas, el 77% se encuentra en estado sólido (hielo y nieve), el 21,3% se encuentra en el subsuelo y tan solo el 0,63% es el agua que se dispone abiertamente para su uso directo siendo su origen ríos, lagos y otros reservorios. (Garcia, 2024)

La escasez de recursos hídricos en regiones y ciudades del Perú ha conducido a la población a buscar distintas alternativas mientras la demanda aumenta con el paso de los años la oferta decae, es así que en los últimos años se viene llevando a cabo distintas investigaciones a lo largo del país para evaluar y ordenar los recursos hídricos. El crecimiento de la ciudad de Tacna ha impulsado a los usuarios a buscar fuentes alternativas de abastecimiento con el fin de aumentar la disponibilidad de agua. En este contexto, en el año 2002 se formuló un proyecto orientado a la evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en la cuenca de los ríos Caplina y Uchusuma, el cual permitió la ejecución de inversiones significativas destinadas a reducir la problemática existente. El problema de la escasez de recursos es un problema que ya tuvo como resultado la declaración de recursos hídricos agotados por medio de un decreto supremo siendo los afectados las cuencas de los ríos Caplina, Sama y Locumba. consecuentemente prohibiéndose el otorgamiento de nuevos derechos sobre el uso y explotación de agua superficial de dichas fuentes naturales, teniendo ciertas excepciones. (Peruano, 2009)

En la actualidad este problema sigue vigente, el 23 de febrero del 2023 el Instituto Nacional De Defensa Civil (INDECI) público un informe de emergencia. Dicho informe se presentaba a detalle la proporción de los daños ocasionados por la disminución de recursos hídricos (lluvias) en distintos distritos del departamento de Apurímac, siendo el distrito de Abancay uno de los afectados. (INDECI, 2023)

La escasez de lluvias comenzó a tener relevancia desde 01 de setiembre del 2022, el gobierno peruano a través del DECRETO SUPREMO N°149-2022-PCM, declaró estado de emergencia en algunos distritos de los departamentos de Apurímac y Ayacucho, a consecuencia del déficit hídrico. (Decreto Supremo N°149-2022-PCM, 2022)

La oferta hídrica en la ciudad de Abancay ha sufrido constantes variaciones, con el paso de los años el aumento de lluvias y los periodos de sequía son fenómenos que van en aumento debido al cambio climático. En el ámbito de la ingeniería tiene un gran impacto, afectando directamente los diseños, mantenimiento y el proceso de construcción de distintas infraestructuras. Las principales infraestructuras perjudicadas son las carreteras, taludes, puentes, defensas ribereñas, presas y edificaciones.

Las investigaciones realizadas en la actualidad con respecto a oferta hídrica en la microcuenca Mariño están centradas en la evaluación integral para la prevención de desastres, estrategias de resiliencia respecto al cambio climático y estudios de la gestión del agua dentro de la región de Apurímac.

En los últimos años se comenzó a percibir con más frecuencia los escasos de agua por los constantes recortes en épocas de sequía, siendo afectado el distrito de Tamburco con cortes desde las 10 am a 3 pm y sectores como las Américas y el centro del distrito de Abancay de 5 am a 12 am.

La ciudad de Abancay se alimenta directamente de los recursos hídricos de la cuenca el Mariño. En los últimos años la cantidad de gasto de recursos hídricos fue en aumento como se indica en el siguiente cuadro.

Tabla 1*Balance oferta y demanda de captación de agua (m³)*

Localidad	Captación de agua	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Abancay	Demanda	240	214	239	245	250	256
	Oferta	118	118	118	118	118	118
	Balance (O-D)	-122	-123	-121	-127	-132	-138

Nota. Elaborado a partir de la base de datos de EMUSAP (2020). Se presenta la demanda, oferta y balance de captación de agua (m³) proyectados a cinco años.

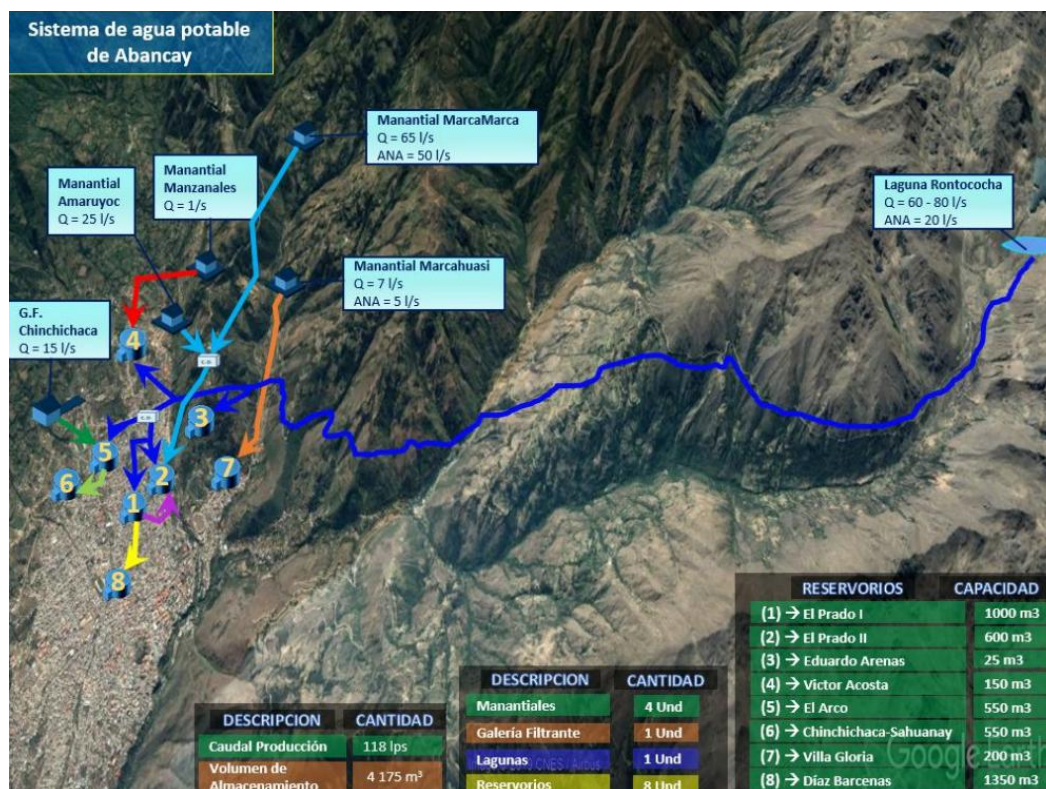
Las principales lagunas que abastecen de agua potable a la ciudad de Abancay son las lagunas de Rontoccocha y Marcamarca abasteciendo un total del 68% de la provisión.

El estudio realizado por la empresa prestadora de servicios EMUSAP en el año 2020 arroja como resultado el aumento creciente de la demanda de captación de agua en el distrito de Abancay mientras la oferta continua con un estimado perpetuo, ocasionando que se dé un desbalance que va en constante crecimiento.

El sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Abancay cuenta con 5 manantiales y la laguna Rontoccocha las cuales abastecen a la población por gravedad. (Berdillana *et al.*, 2019)

Figura 1

Sistema de producción y distribución de agua en la ciudad de Abancay



Nota. Se muestra el sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Abancay, que incluye fuentes superficiales como lagunas y manantiales. Extraído del Estudio Tarifario de la EPS EMUSAP Abancay S.A.C. (p. 41), por Berdillana et al. (2019), Dirección de Regulación Tarifaria.

El déficit hídrico es un problema que afecta cada vez más frecuentemente a nivel mundial el cual es causada por el cambio climático. Dando como resultado la alteración del equilibrio en distintos ecosistemas, generando un desorden progresivo en el comportamiento hidrológico en las cuencas.

A raíz de los problemas observados en distintos distritos del Perú y en la microcuenca Mariño ubicada en la ciudad de Abancay, es necesario evaluar los efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica futura en la microcuenca Mariño, para posteriormente poder gestionar de mejor manera.

- **Formulación del problema**

Problema general

¿En qué medida el cambio climático influirá en la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño en el periodo de proyección hasta el año 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024?

Problema específico

- a) ¿Cómo influyen las variaciones proyectadas de la temperatura media mensual en la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño al 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024?
- b) ¿De qué manera los cambios proyectados en la precipitación mensual afectan en la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño al 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024?
- c) ¿En qué medida las variaciones proyectadas según los modelos climáticos (GCM) del CMIP5 influyen en la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño al 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024?

2.2. Objetivos**2.2.1. Objetivos generales**

Evaluar la influencia del cambio climático en la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño en el periodo de proyección hasta el año 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024

2.2.2. Objetivos específicos

- a) Analizar la influencia de la temperatura media mensual en la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño al año 2100 en el distrito de Abancay, provincia de

Abancay, departamento de Apurímac - 2024

- b) Evaluar el efecto de la precipitación mensual que afecta la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño al 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024.
- c) Evaluar las tendencias futuras de la oferta hídrica a partir de las proyecciones del CMIP5 de la Microcuenca Mariño al 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024.

2.3. Justificación e importancia

Justificación científica

La investigación se justifica científicamente al aportar información actualizada entre el cambio climático y la oferta hídrica en la microcuenca Mariño, una zona donde la información tiende a tener bastantes huecos y se encuentra bastante desorganizada.

La investigación aporta teóricamente información detallada sobre la variabilidad climática y proyección de escenarios futuros siendo evaluadas en distintos escenarios climáticos. Datos que permiten la mejor comprensión de variables como temperatura, precipitación y la disponibilidad hídrica.

Justificación metodológica

La investigación se realizó por medio de distintos enfoques tales como no cuantitativo, experimental, explicativo y de deductivo para analizar variaciones climáticas y proyectar la oferta hídrica a futuro. Este enfoque es adecuado porque permite trabajar con datos históricos ya existentes, aplicar modelos hidrológicos y climáticos, y generar escenarios que no pueden ser manipulados de manera directa en la realidad.

Justificación practica

La investigación tiene justificación practica al proporcionar información que viene a

ser útil en la gestión y planificación de recursos hídricos en la microcuenca Mariño

Los resultados de la investigación podrán ser usados como base de datos para elaboración de diversos proyectos como defensas ribereñas, puentes, etc. en el ámbito de la ingeniería civil.

A su vez podrán ser usados para la gestión del agua por organismos de gestión del agua (autoridades locales), así tomar decisiones informadas teniendo en cuenta riesgos de sequía o aumento de recursos hídricos adaptados al cambio climático actual.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

El cambio climático influye significativamente en la oferta hídrica futura de la Microcuenca Mariño en el periodo de proyección hasta el año 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024.

2.4.2. Hipótesis específica

- a) Las variaciones proyectadas de la temperatura media mensual influyen significativamente en la reducción de la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño al 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024.
- b) La precipitación mensual influye significativamente en la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño al 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024.
- c) Los modelos climáticos CMIP5 explican significativamente las tendencias futuras de la oferta hídrica de la Microcuenca Mariño al 2100 en el distrito de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac-2024.

2.5. Variables

Variable 1 (independiente según corresponda)

- Cambio Climático

Variable 2 (dependiente, una o más, según corresponda)

- Oferta Hídrica

Tabla 2

Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Variable dependiente: Oferta hídrica	Cantidad de agua disponible en una cuenca hidrográfica durante un periodo determinado, resultante de los aportes de la precipitación y de los procesos hidrológicos que regulan su almacenamiento y escurrimiento, y que puede ser representada mediante el caudal medio (FAO, 2011; OMM, 2018).	La aplicación consiste en proyectar los datos obtenidos por medio de estaciones meteorológicas con posibles escenarios de emisiones de RCP establecidos por el IPCC.	Caudal superficial	Caudal medio mensual	(m ³ /s)
				estacionalidad	%
Variable independiente: Cambio climático	La CMNUCC define al cambio climático como "atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables". (Zamora, 2015)	Se realizará una proyección según distintos escenarios de emisiones de RCP establecidos por la IPCC.	Temperatura	Temperatura media mensual	°C/mes
			Precipitación	Precipitación media mensual	(mm/mes)
			Escenarios climáticos futuros	Variación proyectada de temperatura	°C
				Variación proyectada de precipitación	(mm)
Modelos climáticos	RCP 4.5				
	RCP 8.5				

Nota. La información contenida en esta matriz corresponde al análisis e interpretación propia del autor.

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes de la investigación

3.1.1. Internacional

El estudio realizado por Cammalleri *et al.* (2020), es un estudio cuantitativo titulado “*Diverging hydrological drought traits over Europe with global warming*”, que tenía como objetivo evaluar cómo las sequías hidrológicas y, por ende, la oferta hídrica en Europa, cambiarían ante diferentes niveles de calentamiento global, el método que emplearon fue el del modelo hidrológico LISFLOOD, el cual simula caudales de los ríos y déficit hídrico a través de diversos procesos (evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial y uso hídrico), el modelo se realizó para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 las sequías en estudio se dividieron por severidad, duración y frecuencia. Los resultados obtenidos de la investigación mostraron que, en la subregión mediterránea, que ya enfrenta estrés hídrico, se proyecta que las sequías serán más severas, más largas y más frecuentes a medida que aumente el calentamiento global. En cambio, en la subregión boreal (norte de Europa), las sequías podrían disminuir en severidad, duración y frecuencia con el calentamiento. En conclusión, el estudio de Cammalleri y colaboradores demuestra que el cambio climático afecta significativamente las características de las sequías hidrológicas en Europa, ampliando la brecha entre áreas que se vuelven más secas (especialmente el sur) y áreas que pueden experimentar condiciones menos severas.

El estudio realizado por Barranco *et al.* (2018), tenía como objetivo la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos de España. El estudio se realizó con el modelo hidrológico de precipitación-aportación con datos de 12 simulaciones climáticas diferentes (datos que combinan modelos climáticos globales, simulaciones de gases de efecto invernadero “RCP” y métodos de regionalización). La investigación consistió en simular series de precipitación y temperatura con el fin de poder comparar los resultados del periodo (1961-2000) con supuestos perdidos futuros (210-2040,2040-2070,2070-2100).

Los resultados de la investigación de Barranco pese a no tener datos claros en las simulaciones mostraron una tendencia a la disminución de los recursos hídricos en general, la disminución de los recursos hídricos mostró un crecimiento continuo comenzando en el siglo XXI y arrojando resultados más intensos bajo el escenario RCP 8.5, los resultados mostraron que la zona más crítica vendría a ser la parte sur de España. Como conclusión se llegó a obtener Los cambios proyectados para los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5 son respectivamente del -2% y 4% entre los años 2010-2040; 6% y 8% para 2040-2070 y 7% y 14% para los años 2070-2100.

3.1.2. Nacional

La investigación realizada por Olsson *et al.*, (2017), tuvo como objetivo evaluar los impactos climáticos que se tendrían en la cuenca Chancay-Huaral en un periodo futuro del 2051-2080. Su estudio tuvo una deficiencia de datos (resultando en la toma de datos de cuencas vecinas a la del estudio en cuestión), se realizó con un modelo climático global (GCM) del CMIP5 bajo dos escenarios posibles: RCP 4.5 y RCP 8.5, en el cual se midieron precipitaciones, humedad, índices de precipitación, efectos de corrección y descargas. Su investigación logro dar resultados donde la temperatura aumentara en 1.1°C-5.0°C bajo RCP4.5 y 1.7°C-5.9°C bajo RCP 8.5. los promedios de las temperaturas se tomaron de cuencas vecinas por la falta de datos anteriores en ciertos aspectos de la investigación. Tras el análisis de la información se observó que las precipitaciones en la cuenca son más variadas, el estudio dio como resultado que las precipitaciones anuales en el marco del estudio aumentarían en las épocas de lluvia (noviembre a mayo) en una media de 23 mm/temporada bajo RCP4.5 y 32 mm/temporada bajo RCP8.5. Los patrones mostrados que la cantidad de días húmedos aumentarían al termino de este siglo, siendo el escenario RCP8.5 un 41% más grande al escenario RCP 4.5. Las descargas botaron como resultado un aumento en las temporadas de lluvia siendo agosto un 17% y 31% diciembre. El aumento de las descargas bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 son del 20% y 22% y en las estaciones secas un 17% y 20% respectivamente.

Rodas, (2022). Manifiesta que su estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos del cambio climático en la cuenca del río Caplina en Tacna al contar con antecedentes de una disminución de agua y problemas en el abastecimiento de recursos hídricos en distintos ríos de la cuenca. La investigación realizada se basó con el modelo hidrológico climático global del CMIP5 bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, el objetivo de la investigación estuvo centrado en la proyección del comportamiento de la precipitación y temperatura hasta finales del siglo XXI cuya investigación estuvo realizada con el modelo GR2M, la investigación tomo como base una proyección del año 1981-2016 para lograr calibrar los datos obtenidos teniendo como resultado el aumento de la temperatura en 1°C. Tras la obtención de los datos de la proyección para las precipitaciones hasta finales del siglo XXI se dio como resultado en el escenario RCP 4.5 los meses de abril a octubre presentan un aumento de hasta un 213.3% por el contrario en los meses restantes las precipitaciones presentan una disminución de hasta un 48.2%. los resultados arrojaron una tendencia de reducción con respecto a un futuro cercano de 6.6% anual, en un futuro medio de 9.9% y para un futuro lejano 6.8% siendo el escenario RCP4.5. Los resultados obtenidos mediante el escenario RCP 8.5 fueron durante los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y octubre un aumento en la precipitación de hasta un 567.5% mientras que el resto de los meses del año una reducción de hasta un 36.7% de las precipitaciones. Las estimaciones anuales para un futuro cercano dieron como resultado la disminución en la precipitación media anual en un 4.5%, para un futuro medio de un 12.1% y para un futuro lejano de hasta un 6%, las tendencias en la temperatura tienen mayor credibilidad en comparación a la de precipitaciones por los resultados mostrados en las calibraciones a años anteriores al 2016. La temperatura para el escenario RCP 4.5, presentaron un incremento de un 1.6°C en un futuro cercano con respecto a la media histórica, y se mostró un aumento de 2.59°C en un futuro promedio y el aumento de temperatura en un futuro lejano tiende a incrementar hasta los 3.15°C, para los escenarios RCP 8.5 se muestra un incremento superior al escenario RCP4.5 siendo en un futuro cercano de un 1.82°C, 3.32°C para un futuro medio y hasta de

un 5.6°C en un futuro lejano respecto a las temperaturas medias históricas. Los resultados obtenidos por la investigación dan a conocer que los recursos hídricos con el paso del tiempo tienden a escasear teniendo de hasta un 6.7% en un escenario RCP4.5 siendo el mejor escenario y hasta 8.8% en un escenario RCP8.5 un escenario más grave y con mayores consecuencias siendo meses cálidos más afectados teniendo mayores sequías y un aumento en las lluvias en temporadas con lluvias, las temperaturas aumentarían hasta un 5.6°C dependiendo de cómo se trate de mitigar la contaminación ambiental.

3.1.3. Local

Sierra (2017), Manifiesta que el fin de su investigación fue determinar la disponibilidad hídrica en la microcuenca del río Mariño tomando como base los nevados de la montaña Ampay, para la obtención de datos se trabajó con imágenes landsat (imágenes obtenidas por medio de satélites administrados por la administración nacional de aeronáutica NASA y el servicio geológico de los estados unidos GLOVIS. Los satélites LANDSAT fueron: landsat -5, landsat-7 y landsat-8). El método utilizado fue el de índice de diferencia normalizado y nieve DSI (siglas en inglés: Normalized Difference Index Snow). Método usado para con la finalidad de que no surjan incongruencias al momento del levantamiento de áreas glaciares y no generar errores al momento de usar otros métodos para el cálculo de cobertura de nieve y hielo, La evaluación de la disponibilidad hídrica del periodo de 1986 al 2017 mostro resultados de la clara disminución del área glaciar siendo de 2026 km² la superficie glaciar en 1986 y 0.54 km² en el año 2017. Para la estimación hídrica en los próximos años hasta el 2050 se hizo uso de una relación empírica propuesta por Barh y Meir-1997 dando como resultado el constante descenso en el área de la supervise en km² de 0.54km² en el año 2017 a 0.11km² en el año 2050. Se llegó a concluir que el descenso de áreas glaciares en el nevado del ampay es aceptable por tener ejemplos antecesores que ya se dieron como lo son el área glaciar de la cuenca del río olivares en Chile, teniendo de hasta una pérdida de área glaciar de 12.42km² en un periodo de 55 años o la cuenca del río Quellcayhuanca- Río Santa-Perú teniendo una pérdida de

14.0 km² en el transcurso de los años del 1987 al 2013.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Cambio climático

A lo largo de la historia la necesidad de avances y comodidades dieron lugar a emisiones de gases de efecto invernadero, que como consecuencia originaron inequívocamente el calentamiento global.

La IPCC (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático) identifica como cambio climático a la variación del clima en la variabilidad de sus propiedades y valor del medio afectando en un periodo de tiempo prolongado siendo decenios y periodos más largos. La convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático (CMNUCC) diferencia los tipos de contaminación ambiental que ocurren siendo dos las que son influenciadas por las actividades humanas y las que son causas naturales. (Pörtner *et al.*, 2022)

La IPCC está de acuerdo en atribuir la mayor parte de la responsabilidad por el cambio climático al ser humano siendo, en las últimas décadas se liberó la cantidad de CO₂ correspondiente a millones de años. Teniendo como consecuencia el aumento de temperaturas, precipitaciones, sequías, aumento de ciclones tropicales, reducción de la capa de nieve, disminución en el hielo marino ártico y el permafrost.

La última investigación de IPCC determino que el 30% del calentamiento es a causa del metano afirmando que el gas es responsable del calentamiento desde la era preindustrial teniendo como principal fuente de este gas la industria referida a la ganadería.

Actualmente se determinó que lo más alarmante del cambio climático es el aumento de 1.1° de temperatura concerniente a inicios del siglo XX siendo las noticias más desalentadoras y devastadores con respecto a los pronósticos que se prevén para un futuro. (Allen *et al.*, 2019)

3.2.1.1. IPCC

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) es una entidad internacional conformada por 195 Estados miembros, creada en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Su labor principal consiste en analizar y sintetizar de forma periódica el estado del conocimiento científico sobre el cambio climático, así como evaluar sus posibles impactos y los riesgos asociados a escenarios futuros.

Los informes elaborados por el IPCC constituyen una herramienta fundamental para los gobiernos en distintos niveles, ya que sirven de base para la formulación de políticas públicas, estrategias de adaptación y medidas de mitigación. Dichos estudios se sustentan en la revisión y síntesis de múltiples investigaciones, proyecciones y escenarios desarrollados por científicos de la comunidad internacional que participan de forma voluntaria.

3.2.1.2. Quinto reporte AR5

El quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC fue publicado por los 2013 y 2014, el informe presentado este compuesto por tres volúmenes.

El AR5 llegó a la conclusión que los cambios climáticos (temperatura, precipitación, evapotranspiración, etc.) son reales y causados principalmente por las actividades humanas, cuyo impacto de estas actividades ya son visibles. Los escenarios de gases de efecto invernadero (GEI) proponen proyecciones futuras para poder evaluar la posible evolución de los gases de efecto invernadero las Representative Concentration Pathways (RCP) representan trayectorias posibles de concentraciones GEI y forzamiento radioactivo. Si no se propone y comienza una reducción de estas emisiones, los riesgos a los ecosistemas, economía y las personas aumentarían significativamente en los siglos venideros. (Pachauri *et al.*, 2014)

3.2.1.3. Sexto reporte AR6

El sexto informe de evaluación (AR6) del IPCC fue el 20 de marzo del 2023, donde se detalla los estudios realizados y las hipótesis a las que llegaron en base a los estudios realizados sobre el cambio climático; se sugiere la reducción de la contaminación en todo aspecto de posible. Recomendando el mantener el aumento de temperatura en 1.5°C.

Se identifica los factores y sectores que son responsables en mayor proporción del cambio climático, se proyectó hasta el año 2100 a diferentes temperaturas siendo la más óptima 1.5°C hasta la más alta de 4°C teniendo en cuenta que el aumento de temperatura en cualquiera de las situaciones observadas conllevan repercusiones en torno al mundo tales como cambios en humedad, temperatura, precipitaciones, entre otros.

3.2.1.4. Cambios e impactos

Los cambios ocurridos a causa del cambio climático han sido rápidos y generalmente en la atmósfera, océano, criosfera y biosfera. Siendo causado principalmente por el ser humano dando como resultado pérdidas y daños graves a la naturaleza y el ser humano, las afectadas principalmente son países, comunidades y/o centros poblados con menor aporte a al cambio climático siendo afectados de manera desproporcionada.

A comparación de la temperatura del 1850 a la actualidad ya es bastante notable el aumento de temperatura de la superficie terrestre, siendo este lapso de tiempo el más afectado con respecto al aumento de temperatura de los últimos 1400 años. Al realizar los cálculos necesarios a la temperatura de la superficie terrestre y oceánica llega a mostrar un calentamiento de 0.85(0.65 a 1.06) °C², durante los periodos del 1850 al 2012. (Pachauri *et al.*, 2014).

Desde 1901 el nivel medio del mar ha ido en aumento siendo un aumento continuo de 2,0 mm, la tasa promedio fue en aumento de 1,3 mm a 3,7 mm desde el año 1901 hasta el año 2018. Los cambios más extremos observados son olas de calor extremo,

precipitaciones fuertes, sequias, ciclones, etc. Siendo atribuidas a la interferencia humana en el cambio climático. (Hoesung, 2023).

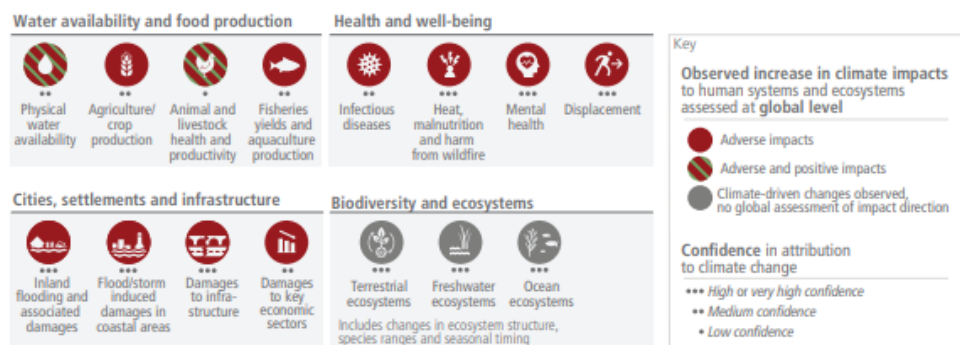
El cambio climático afecto fuertemente al sector y orden de los alimentos, siendo la siembra en zonas bajas a medias las más afectadas en cuanto a procedimientos de cultivo de alimentos y beneficiando a zonas con mayores altitudes.

Figura 2

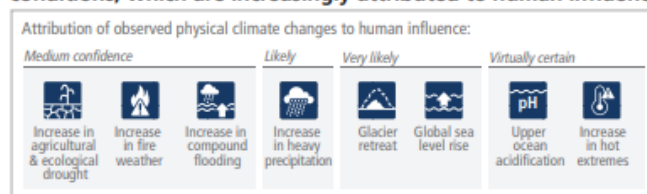
Impactos adversos al cambio climático causados por el hombre.

Adverse impacts from human-caused climate change will continue to intensify

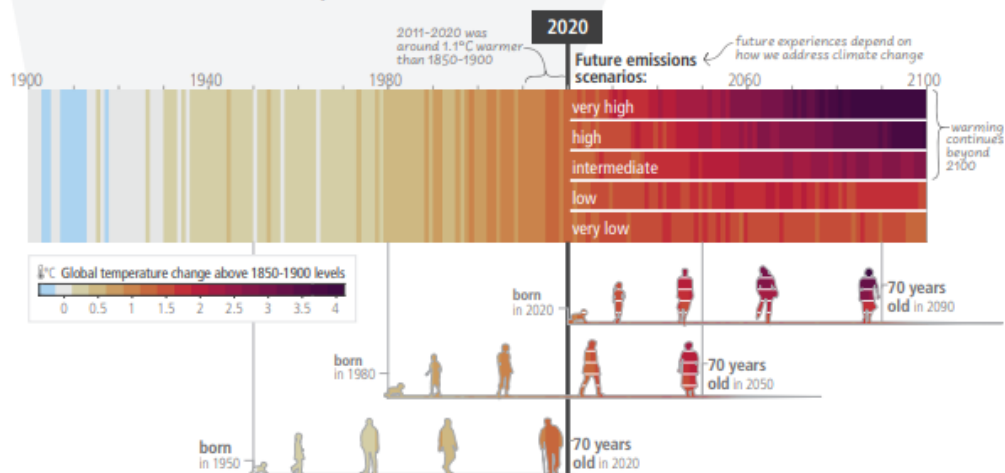
a) Observed widespread and substantial impacts and related losses and damages attributed to climate change



b) Impacts are driven by changes in multiple physical climate conditions, which are increasingly attributed to human influence



c) The extent to which current and future generations will experience a hotter and different world depends on choices now and in the near term



Nota. La figura presenta los principales impactos del cambio climático causado por el ser humano y sus efectos sobre el agua, los alimentos, la salud, los ecosistemas y las ciudades, así como la relación entre estos impactos y las decisiones futuras. Extraído de IPCC (2023), **Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers** (p. 7), Ginebra, Suiza.

La aparición de enfermedades y parásitos que se transportan y se ven atraídas por el agua ha ido en aumento con el paso de los años ocasionando el aumento de enfermos en comunidades alejadas a las ciudades principales, dando como resultado el aumento de casos de mortalidad y morbilidad en distintos países del mundo siendo principalmente países del continente africano por una falta de un sistema sanitario adecuado. (Hoesung *et al.*, 2023).

El aumento de personas con problemas de salud también se vio en aumento por el continuo aumento de temperaturas en varias ciudades del mundo alcanzando temperaturas históricas en muchos países siendo la ciudad de Siracusa en Italia la que registro la temperatura más alta hasta el momento en 2021 siendo 48,8°C. (Smith, 2023)

3.2.2. Modelos climáticos

Un modelo climático es una herramienta numérica que simula el funcionamiento del sistema climático de la Tierra mediante ecuaciones matemáticas que representan los procesos físicos, químicos y biológicos que actúan en la atmósfera, los océanos, la criosfera y la superficie terrestre. Estos modelos permiten estudiar las interacciones entre los distintos componentes del clima y analizar su respuesta ante la variabilidad natural y frente a forzamientos externos, como el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. (IPCC, 2021)

Los científicos ponen a prueba los modelos climáticos comparando con datos recaudados de años anteriores, esto da una confianza mayor respecto a resultados que pueda arrojar sobre un futuro. El clima, temperatura y otros factores que se vean afectados por el cambio climático es imposible de prever por un aumento imprevisto en las emisiones de gases de carbono como una disminución por tal motivo se realiza con distintos futuros posibles. (Conors *et al.*, 2021)

Se usan distintos tipos de modelos para cuantificar diferentes aspectos de los cambios climáticos, los cuales incluyen:

- Modelos que estiman la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por las actividades humanas.
- Modelos del sistema terrestre que simulan la respuesta del clima frente a dichas emisiones.
- Modelos que evalúan los posibles efectos de los cambios climáticos sobre las personas y las actividades humanas.

3.2.2.1. Modelos climáticos globales (GCM)

Modelos de circulación global o más conocidos como modelos climáticos globales son simulaciones complejas referidas a los cambios climáticos por medio de algoritmos matemáticos. Mas comúnmente conocidos en el mundo científico como modelos generales de circulación, teniendo dos modelos el atmosférico y oceánico teniendo varianzas en cada uno de los modelos. Modelos los cuales pueden estar acoplados por "*Coupled General Circulation Models*" o AOGCMs siendo más sofisticados y normalmente usados para predicciones futuras, siendo estas normalmente discutidas, presentadas y debatidas en el IPCC.

Las simulaciones futuras de los climas como por medio de modelos de circulación general acoplados atmosfera-oceánico son dependientes de varios factores externos siendo esencialmente del porcentaje de emisiones de dióxido de carbono, siendo un factor que varía con el paso de los años. (Hoffmann, 2012)

3.2.2.2. Modelos climáticos regionales (RCM)

Los GCM dan resultados gruesos los cuales tienen una resolución poco definida para lograr tomar decisiones sobre ciertas áreas y zonas determinadas con relación al estudio. Para llegar a zonas más pequeñas y tener buena resolución de datos obtenidos se necesita trabajar con modelos climáticos regionales (RCM).

Estos métodos son alimentados por las condiciones de los contornos y comercialización del área establecida siendo áreas limitadas de poco más de 50km. Se

realizo investigaciones con los modelos climáticos en Europa obteniendo simulaciones más precisas en áreas con zonas de topografía simple, en zonas con topografías complejas arrojaron resultados poco detallados.

3.2.2.3. Escenarios de emisión

Los escenarios de emisión y/o caminos simulados se realizan para poder visualizar los futuros riesgos y crear estrategias para mitigar estos. La IPCC realizó estudios de manera neutral teniendo en cuenta los datos recaudados hasta antes del 2016 y 2023, en su informe se evaluó para 4 posibles escenarios entre emisiones muy bajas a escenarios muy altos.

El término trayectoria hace referencia a la evolución temporal de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y al conjunto de procesos socioeconómicos, tecnológicos y energéticos que determinan dicho comportamiento a lo largo del tiempo. No solo considera el nivel de concentración alcanzado en el futuro, sino también el camino que sigue el sistema climático para llegar a ese estado, incluyendo las emisiones, la mitigación y las políticas implementadas.

En este contexto, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) definió y adoptó un conjunto de trayectorias denominadas Trayectorias Representativas de Concentración (Representative Concentration Pathways, RCP), las cuales fueron reportadas en su Quinto Informe de Evaluación. Estas trayectorias describen distintos escenarios de forzamiento radiativo hacia finales del siglo XXI y son ampliamente utilizadas en estudios de proyección climática e impacto hidrológico.

Las trayectorias reconocidas por el IPCC son:

Figura 3

Trayectorias y escenarios definidos por el IPCC

Concentraciones de CO ₂ -eq en 2100 (ppm CO ₂ -eq) ^f Categoría (rango de concentraciones)	Subcategorías	Posición relativa de las RCP ^d	Cambio en las emisiones de CO ₂ -eq en comparación con 2010 (en %) ^c		Probabilidad de que no se supere un nivel de temperatura específico a lo largo del siglo XXI (en relación con 1850-1900) ^{d,e}			
			2050	2100	1,5 °C	2 °C	3 °C	4 °C
<430	Los niveles por debajo de las 430 ppm CO ₂ -eq solo se han analizado en un escaso número de estudios de modelos ⁱ							
450 (430 a 480)	Rango total ^{a,g}	RCP2,6	-72 a -41	-118 a -78	Más improbable que probable	Probable	Probable	Probable
500 (480 a 530)	Sin sobrepaso de 530 ppm CO ₂ -eq		-57 a -42	-107 a -73	Improbable	Más probable que improbable		
	Sobrepaso de 530 ppm CO ₂ -eq		-55 a -25	-114 a -90		Tan probable como improbable		
550 (530 a 580)	Sin sobrepaso de 580 ppm CO ₂ -eq		-47 a -19	-81 a -59		Más improbable que probable ⁱ		
	Sobrepaso de 580 ppm CO ₂ -eq		-16 a 7	-183 a -86				
(580 a 650)	Rango total	RCP4,5	-38 a 24	-134 a -50	Improbable	Improbable	Más probable que improbable	
(650 a 720)	Rango total		-11 a 17	-54 a -21			Más improbable que probable	
(720 a 1000) ^b	Rango total	RCP6,0	18 a 54	-7 a 72	Improbable ^h	Improbable ^h	Improbable	Más improbable que probable
>1000 ^b	Rango total	RCP8,5	52 a 95	74 a 178	Improbable ^h	Improbable ^h	Improbable	Más improbable que probable

Nota. La imagen muestra los rangos de concentración de CO₂ equivalente y su relación con los cambios en las emisiones y la probabilidad de no superar determinados niveles de aumento de la temperatura global durante el siglo XXI. Extraído de IPCC (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report* (Tabla 2.2, p. 63), Ginebra, Suiza.

3.2.2.4. Proyecto de Inter comparación de modelos acoplados (CMIP)

De acuerdo con Ramírez (2023), El Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos Acoplados (CMIP) es una iniciativa coordinada por el Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP) que comenzó en 1995 y que actualmente se encuentra en su sexta fase, conocida como CMIP6. Esta etapa incorpora una nueva generación de modelos climáticos que fueron utilizados como base para el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6). Los resultados de este informe se dieron a conocer de manera gradual y

su versión final fue publicada en 2023, mostrando mejoras importantes frente a las versiones anteriores.

Los modelos climáticos CMIP6 consideran un período histórico que abarca desde 1850 hasta 2014, mientras que las proyecciones futuras se desarrollan a partir de los escenarios denominados Rutas Socioeconómicas Compartidas (SSP), que cubren el intervalo comprendido entre 2015 y 2100. En este contexto, el año 2015 marca el inicio del período futuro común a todos los modelos climáticos.

Los resultados obtenidos a partir de más de 40 modelos incluidos en CMIP6 evidencian una mayor sensibilidad climática en comparación con CMIP5, mostrando incrementos de temperatura que oscilan aproximadamente entre 0.4 °C y 0.9 °C adicionales. No obstante, estos valores pueden variar conforme se incorporen nuevos modelos y simulaciones al conjunto de análisis.

El objetivo del proyecto de Inter comparación de modelos acoplados es de comprender de mejor manera los cambios climáticos pasados, presentes y futuros que son ocasionados por una variable que no fue forzada. Las comprensiones incluyen la evaluación del desempeño de los modelos durante el tiempo histórico y en futuro estimado, el estudio para la predictibilidad del sistema climático por los modelos acoplados se realiza según escenarios de distintas escalas de tiempo.

Los modelos climáticos son capaces de simular la temperatura superficial, precipitaciones medias y anuales, en base a los modelos CMIP2, CMIP3, CMIP5 Y CMIP6 siendo la más actual. Los cambios y riesgos encontrados en los resultados de las predicciones a un futuro estimado tienen a ser desventajosos en su gran mayoría para la población humana más vulnerable.

3.2.2.5. Fases del CMIP

La quinta y sexta fase del CMIP (CMIP5 Y CMIP6) son las modelos más

actualizados y mejores en cuanto a obtención de resultados a comparación de modelos anteriores, sin embargo, tienden a mostrar cierta inclinación e incertidumbres sistemáticas al momento de arrojar los resultados.

Los modelos más actualizados tienden a arrojar una inclinación mayor en los datos sobre precipitaciones a comparación de las simulaciones sobre temperaturas, las causas que ocasionan estos efectos tienden a ser nubes y aerosoles. (Arias *et al.*, 2021)

3.2.2.6. Incertidumbre De Modelos Climáticos

La opinión pública respecto a los resultados arrojados de la investigación tienden a ser de incertidumbre por el hecho de ser una hipótesis.

Pero la incertidumbre viene diluyéndose con la presentación de varios informes teniendo como metas poder iluminar sobre la situación en frente de cada uno. Acompañar las hipótesis con resultados de las simulaciones de modelos probabilísticos de manera transparente para evitar comprometer las investigaciones de cuestiones políticas, éticas o sociales. (Granados, 2019)

3.2.2.7. Técnicas de escalamiento

El escalamiento, también conocido como *downscaling*, es un procedimiento que permite traducir la información climática simulada a gran escala hacia un nivel más detallado y local. Los modelos climáticos globales (GCM) suelen tener una resolución espacial relativamente baja, que oscila entre 0.2° y 4°. Esta resolución no resulta adecuada para estudios locales o de cuenca, ya que introduce sesgos significativos frente a los datos observados.

Para reducir estas limitaciones, se aplican técnicas de escalamiento que combinan las proyecciones de los GCM con la información observada, produciendo series climáticas ajustadas y más representativas de la realidad local. Estas técnicas se clasifican en dos grandes enfoques: estadístico y dinámico.

3.2.2.8. Escalamiento estadístico

Maraun (2010), afirma que “Statistical downscaling methods derive empirical relationships between large-scale climate features and local climate variables, and apply these to GCM output to obtain local projections.”

Los métodos de escalamiento estadístico lo que buscan son relaciones matemáticas o estadísticas entre los datos obtenidos a gran escala como datos GCM y datos a nivel local como son los datos obtenidos por SENAMHI y/o PISCO que son obtenidos por medio de estaciones meteorológicas o hidrológicas.

Estas relaciones conectan variables de gran escala como presión atmosférica, circulación general, temperatura media global) con variables locales (como la lluvia o la temperatura en Abancay.

Al encontrar la relación, se relaciona a los modelos GCM para poder acoplarlos a este. Logrando así proyecciones más estables a nivel local.

Para el estudio de la microcuenca se realizó con las variables de temperatura y precipitaciones principalmente. Estas variables cuentan con técnicas determinadas para distintas situaciones y fines de uso, las técnicas para cada variable 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
<ul style="list-style-type: none"> • Escalamiento lineal (LS) • Escalamiento de intensidad local (LOCI) • Transformación de potencia (PT) • Mapeo de distribución para precipitación usando la función de distribución gamma (DM) • Mapeo de cuantiles (QM) 	<ul style="list-style-type: none"> • Escalamiento lineal (LS) • Escalamiento de varianza (VARI) • Mapeo de distribución para la temperatura usando la función de distribución gaussiana (DM)

Nota. Se presenta los principales métodos de corrección de sesgo aplicados a las variables de precipitación y temperatura, utilizados en estudios de impacto hidrológico. Extraído de Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China (Tabla 2, p. 2551), Hydrology and Earth System Sciences (2015).

Los estudios realizados por Fang, (2015). Tras realizar un análisis de sensibilidad en el modelo hidrológico WEAP en función a los métodos de corrección mostrados en la tabla 4, se llegó a concluir que los métodos más estables para realizar la corrección de sesgo para las variables de temperatura y precipitación son el escalamiento lineal y el mapeo de cuantiles respectivamente.

- Escalamiento lineal (LS) para temperatura y precipitación.

El escalamiento lineal o método LS tiene como finalidad la corrección de sesgo, hacer coincidir los datos obtenidos con datos observados. La corrección de sesgo para la variable de temperatura se aplica una corrección aditiva (tiene como proceso la suma o resta del promedio), para la variable de precipitación se aplica una corrección multiplicativa (se escala por un factor). La finalidad es que la con la media corregida del valor observado se logre conservar la variabilidad de la serie modelada. (Lenderink *et al.*,2007)

- Mapeo de cuantiles (QM) para precipitación.

Amina *et al.* (2024), Recomiendan el uso del método Delta Change y Quantli mapping como métodos de escalamiento estadístico para su uso en corrección de sesgo tanto para precipitaciones como para temperatura en simulaciones hidrológicas.

Themeßl *et al.* (2011), Recomiendan el uso del mapeo de cuantiles como la mejor opción y más robusta para realizar el escalamiento estadístico (downscaling) con respecto a la variable de precipitaciones en estudios climáticos e hidrológicos.

El método de mapeo de cuantiles es un método de corrección de sesgo no paramétrico que se ajusta a una distribución estadística completa de una variable (precipitación) que fue simulada por modelos regionales o generales con la finalidad de que estos modelos coincidan con la los datos observados teniéndolos como una referencia. (Gudmundsson *et al.*, 2012)

3.2.2.9. Escalamiento dinámico

El escalamiento dinámico necesita hacer el uso de modelos climáticos regionales (RCM) o modelos numéricos de alta resolución siendo estos apoyados en información observada dentro de un área geográfica delimitada, forzado en los bordes con la información de un modelo climatológico global (GCM). (Giorgi, 2019)

3.2.2.10. Proyección climática

Proyección climática es la simulación/estimación del clima en un futuro basándose en las simulaciones numéricas y estadísticas realizadas mediante los modelos climáticos globales (GCM) o modelos climáticos regionales (RCMs), usando distintas variables supuestas como cambios de suelo gases de efecto invernadero, aumento de temperatura y precipitaciones. Dependiendo principalmente de factores socioeconómicos (RCP 4.5-8.5) en la presente investigación.

3.2.2.11. Métodos de interpolación

La interpolación en la hidrología tiene como fin el obtener datos/valores de una variable dentro de una determinada área donde no se hayan registrado valores, generalmente estos datos son similares a los valores medidos en zonas cercanas al área determinada donde se desea obtener los datos.

Las observaciones o datos normalmente se encuentran separados, la interpolación tiene como finalidad el rellenar los huecos que se encuentran entre estos y así crear un mapa continuo que representa una región más sólida para estudios, siendo este un método indispensable cuando se encuentra unos escasos de datos. (Burrough y McDonnell, 1998)

Existen distintos métodos de interpolación, pero los más usados y recomendados para las variables en estudio son tres: IDW, KRIGING y SPLINES.

a) IDW

El método de la Inversa de la Distancia Ponderada (IDW) es una técnica de interpolación espacial utilizada para estimar valores en ubicaciones donde no existen mediciones directas, a partir de una combinación ponderada de los datos disponibles en los puntos más cercanos. La ponderación asignada a cada punto depende inversamente de la distancia al sitio de estimación, de modo que los puntos próximos tienen mayor influencia, mientras que la contribución de los puntos más alejados disminuye progresivamente. Este método se basa en el supuesto de que la similitud espacial entre los valores decrece a medida que aumenta la distancia entre ellos (Li y Heap, 2014).

b) Kriging

El método de Kriging es una técnica de interpolación geoestadística empleada para estimar valores en ubicaciones no muestreadas a partir de una combinación lineal ponderada de observaciones cercanas. A diferencia de métodos determinísticos, Kriging considera explícitamente la dependencia espacial de los datos mediante el uso del

semivariograma, lo que permite modelar la estructura espacial de la variable analizada. Asimismo, este método no solo genera estimaciones óptimas desde el punto de vista estadístico, sino que también proporciona una medida de la incertidumbre asociada a dichas estimaciones, lo cual resulta especialmente útil en estudios ambientales y geográficos (Chilès y Delfiner, 2012).

c) Splines

El método de splines es más usado en climatología e hidrología, más específicamente con la variable de temperatura, por generar variaciones suaves en el espacio.

El método de splines funciona ajustando funciones polinómicas suaves a los datos observados consecuentemente la generación de los datos pasa por estos puntos conocidos con mínima curvatura entre ellos. (Wahba, 1990)

3.2.3. Temperatura media mensual

La temperatura media mensual se obtiene al promediar los valores diarios de temperatura registradas durante un mes y permite representar el comportamiento térmico promedio de una zona determinada. Esta variable es ampliamente empleada en estudios climatológicos e hidrológicos, ya que influye directamente en procesos como la evapotranspiración, la disponibilidad hídrica y la dinámica climática regional (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2018; IPCC, 2021).

Fórmula para calcular la temperatura media mensual:

- $T_{media_mensual}$ = temperatura media mensual (°C)
- T_{media_diaria} = temperatura media diaria
- n = número de días del mes

$$T_{media\ diaria} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad \dots (1)$$

$$T_{media\ mensual} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (T_{media\ diaria}) \quad \dots (2)$$

3.2.4. Precipitación media mensual

La precipitación media mensual corresponde al valor promedio de la precipitación total registrada durante un mes en una determinada área, y constituye una variable climática fundamental para el análisis del régimen hidrológico y la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos. Este indicador permite caracterizar la distribución temporal de las lluvias y su influencia en procesos como la escorrentía y la recarga hídrica (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2018; IPCC, 2021).

Fórmula para calcular la temperatura media mensual:

- $P_{media_mensual}$ = precipitación media mensual (mm)
- P_i = precipitación diaria
- n = número de días del mes
- m = número de años analizados

$$P_{mensual} = \sum_{j=1}^n P_i \quad \dots (3)$$

$$P_{media\ mensual} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (P_{mensual}) \quad \dots (4)$$

3.2.5. Oferta hídrica

La oferta hídrica se define como la cantidad de agua disponible en un territorio durante un periodo determinado, considerando tanto los aportes naturales provenientes de la precipitación como los procesos hidrológicos que regulan su almacenamiento y circulación, tales como la escorrentía superficial, la infiltración y la recarga de acuíferos. La

oferta hídrica está relacionada directamente con las características de la cuenca hidrográfica como fisiográficas, ecológicas y climáticas, la oferta hídrica depende del balance hídrico (entrada de agua como precipitaciones y pérdidas como la evapotranspiración escurrimiento entre otras), la temperatura y precipitaciones influyente directamente. En el contexto del cambio climático, la oferta hídrica puede verse significativamente alterada debido a modificaciones de precipitación y temperatura, lo que genera cambios en la disponibilidad de agua a escala mensual, anual y estacional. Estas alteraciones pueden intensificar periodos de déficit hídrico o incrementar la ocurrencia de eventos extremos, afectando la gestión sostenible de los recursos hídricos (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2018; FAO, 2011; IPCC, 2021).

3.2.5.1. Caudal medio mensual

El caudal medio mensual representa el valor promedio del volumen de agua que circula por una sección de un río durante un periodo mensual y constituye un indicador fundamental para la evaluación del comportamiento hidrológico de una cuenca. Este parámetro se obtiene a partir del promedio de los caudales diarios registrados o simulados en un mes determinado, y permite analizar la variabilidad temporal del recurso hídrico.

Desde el punto de vista hidrológico, el caudal medio mensual está directamente influenciado por la precipitación, la temperatura y las características físicas de la cuenca, tales como la pendiente, el uso del suelo y la capacidad de almacenamiento del sistema hidrológico. Asimismo, refleja los efectos de procesos como la escorrentía superficial, la infiltración y la evapotranspiración.

En estudios de oferta hídrica y cambio climático, el caudal medio mensual es ampliamente utilizado para identificar periodos de abundancia o déficit hídrico, así como para evaluar el impacto de la variabilidad climática y de los escenarios futuros sobre la disponibilidad de agua en una cuenca hidrográfica (Chow, Maidment y Mays, 1988; OMM, 2018; IPCC, 2021).

El caudal medio mensual se calcula como el promedio de los caudales diarios registrados o simulados durante un mes determinado, mediante la siguiente expresión:

- Q_{mm} = caudal medio mensual (m^3/s)
- Q_i = caudal diario del día i (m^3/s)
- n = número de días del mes

$$Q_{mm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad \dots (5)$$

3.2.5.2. Estacionalidad

La estacionalidad se refiere a la variación periódica y recurrente de las variables climáticas e hidrológicas a lo largo del año, asociada principalmente a los cambios estacionales del clima. En el ámbito hidrológico, la estacionalidad se manifiesta en la distribución desigual de la precipitación, la temperatura y los caudales, dando lugar a periodos de abundancia y escasez de agua.

Este comportamiento estacional está fuertemente condicionado por factores climáticos regionales, la topografía y la dinámica atmosférica, los cuales determinan la ocurrencia de estaciones húmedas y secas. En cuencas andinas, por ejemplo, la estacionalidad de la precipitación influye directamente en la generación de escorrentía y en la variación del caudal medio mensual. La evaluación de la estacionalidad resulta fundamental en estudios de oferta hídrica, ya que permite identificar meses críticos de déficit hídrico y comprender la respuesta hidrológica de la cuenca frente a la variabilidad climática y al cambio climático, aspectos clave para la gestión sostenible de los recursos hídricos (OMM, 2018; IPCC, 2021).

3.2.6. Modelo hidrológico

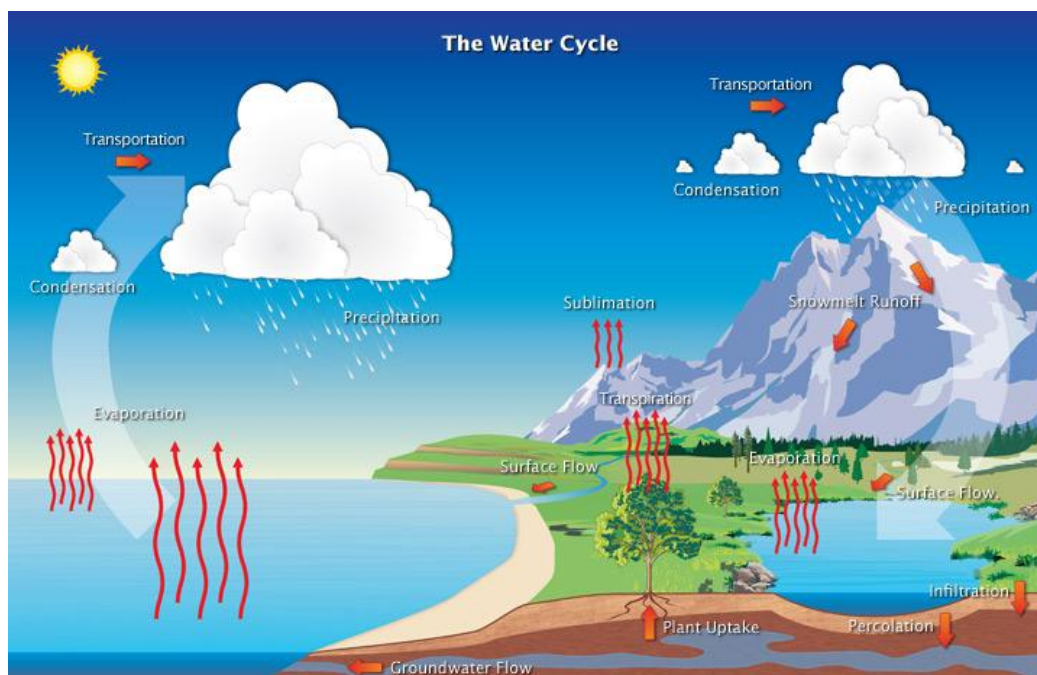
El estudio de la hidrología tiene como fin el de poder medir los procesos e interrelaciones para así poder comprender de una manera más directa. El avance de las

investigaciones en aspectos como la temperatura, precipitación y el flujo de caudales cuentan con métodos y técnicas eficientes para su estimación, existen componentes del ciclo hidrológico los cuales no han sido estudiados ni cuentan con eficientes métodos para determinarlos tales como: la infiltración, percolación profunda, flujo subterráneo, flujo superficial entre otros componentes. Los modelos hidrológicos son una herramienta necesaria para determinar el funcionamiento y comportamiento del ciclo hidrológico. (Cabrera, 2017)

3.2.6.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico o ciclo del agua es el proceso en el cual las moléculas de agua sufren procesos para llegar a distintos estados (líquido, sólido y gaseoso) en algunos casos dentro y fuera de la superficie alimentado por la energía del sol.

Los principales procesos del ciclo del agua en aportar humedad al medio ambiente es la evaporación proporcionando casi el 90% seguido de la transpiración y sublimación por medio de procesos realizados por las plantas. En la figura se muestra los procesos del ciclo hidrológico, para mantener un control en el ciclo hidrológico la precipitación y la evaporación tienen una mínima diferencia, pero con respecto pasan los años la diferencia se ve cada vez más grande. El agua de mar es evaporada en mayor cantidad mientras que la precipitación en el mar es menor contrariamente a lugares terrestres. Al no tener un balance la recarga de agua de mar se realiza por medio exteriores siendo los nevados que consecuentemente ocasionan un aumento en el nivel del mar teniendo como último registro de 17 cm en el transcurso del último ciclo. Las moléculas de agua tienen una infinidad de rutas a tomar dentro del ciclo hidrológico siendo estado líquido, sólido o gaseoso, pero siempre logrando la vuelta al ciclo hidrológico. (Graham *et al.*, 2010)

Figura 4*Ciclo del agua*

Nota. Se representa el ciclo del agua y sus principales procesos. Extraído de Environmental Science: Understanding Our Changing Earth (p. 45), Graham (2010), Pearson Education.

3.2.6.2. Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un territorio en el cual desembocan todas las aguas que se encuentran circundantes en un mismo punto, pudiendo ser un río, mar, lago, etc.

Los límites de las cuencas vienen siendo líneas imaginarias ubicadas en las crestas de las elevaciones de los terrenos circundantes por donde escurre el agua, teniendo el nombre como parteaguas o líneas divisorias.

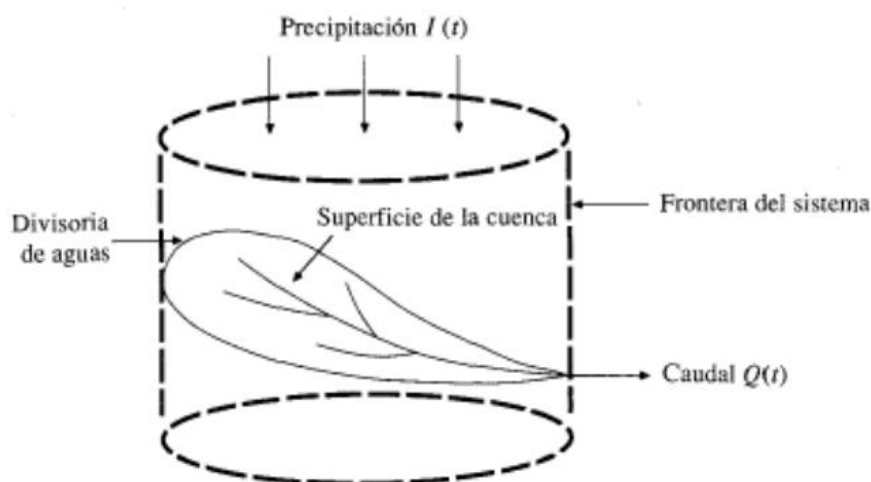
Una cuenca hidrográfica se define como un territorio de gran extensión que concentra y drena las aguas superficiales hacia un punto común, generalmente superando las 50 000 hectáreas de superficie. En función de su tamaño, estas unidades pueden subdividirse en subcuencas, cuya extensión territorial oscila entre 5 000 y 50 000 hectáreas, y microcuencas, que corresponden a áreas menores a 5 000 hectáreas. Esta

clasificación permite una mejor comprensión de la escala espacial de los procesos hidrológicos y facilita la planificación, gestión y evaluación de los recursos hídricos, especialmente en estudios locales y regionales.

Las cuencas se dividen en 3 partes alta, media y baja. La parte alta es donde se encuentran las líneas divisorias, la parte montañosa y nevada de una cuenca. La parte media es donde se recogen las aguas de la parte alta para poder desembocar en los ríos menores y ríos mayores denominados la parte baja.

Figura 5

Cuenca como sistema hidrológico



Nota. La figura muestra la cuenca hidrográfica conceptualizada como un sistema hidrológico, con sus principales entradas, procesos y salidas. Tomado de Applied Hydrology (p. 11), por Chow *et al.* (1994), McGraw-Hill.

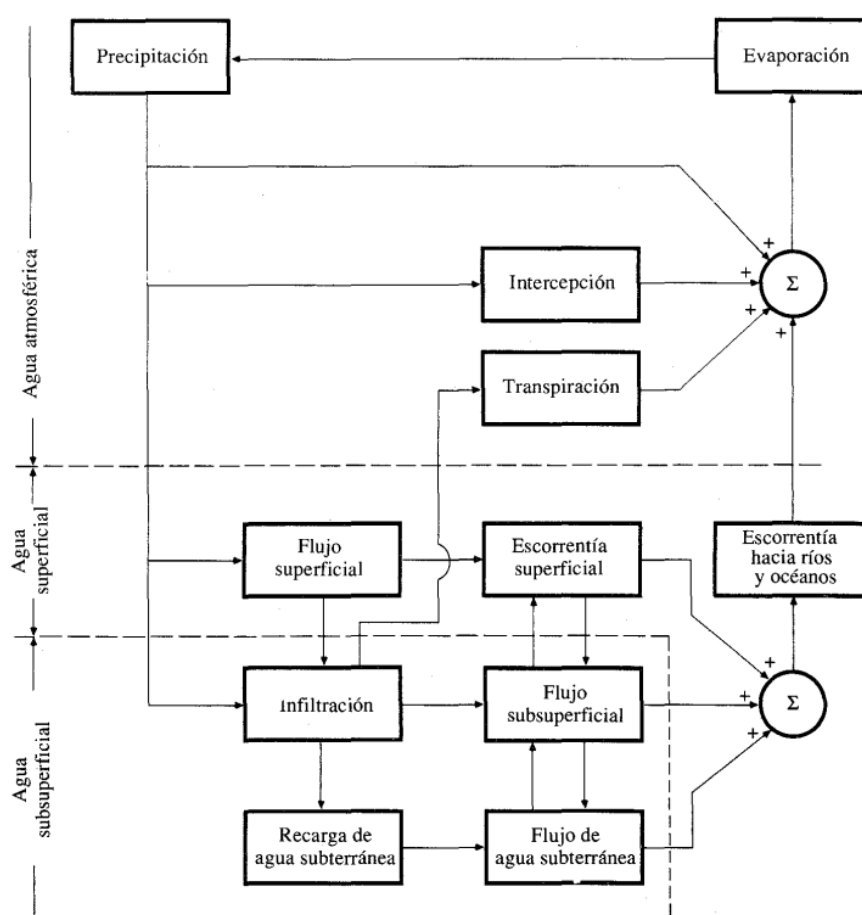
3.2.6.3. Concepto de sistemas

Los procesos hidrológicos presentan una dinámica compleja que puede ser analizada de manera integrada mediante el enfoque de sistemas. Bajo este enfoque, un sistema se define como un conjunto de componentes interrelacionados que interactúan a través de flujos de entrada y salida. En este contexto, la cuenca hidrográfica se concibe como una unidad funcional en la que la precipitación constituye la principal entrada de

agua, mientras que las salidas están representadas principalmente por el escurrimiento superficial que genera el caudal, así como por los procesos de infiltración y flujo subsuperficial. Los límites del sistema están determinados por las divisorias de aguas, las cuales definen naturalmente la extensión espacial de la cuenca y condicionan su respuesta hidrológica (Beven, 2012).

Figura 6

Representación en diagrama de bloques de sistema Hidrológico de Chow V. (1994)



Nota. representa un diagrama de bloques de un sistema hidrológico. Extraído de Applied Hydrology (p. 12), por Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994), McGraw-Hill.

3.2.6.4. Clasificación de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos son herramientas que permiten representar de manera

aproximada el comportamiento del ciclo del agua en una cuenca hidrográfica. Debido a la variabilidad climática y a la incertidumbre asociada a los procesos hidrológicos, en las últimas décadas estos modelos han experimentado un importante desarrollo, lo que ha dado lugar a una amplia diversidad de enfoques y aplicaciones.

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse de distintas maneras según el tipo de respuesta que generan, su finalidad, su forma de representación espacial y su escala temporal. En función de la respuesta, los modelos determinísticos producen un único resultado a partir de un conjunto de datos de entrada, mientras que los modelos estocásticos consideran la incertidumbre del sistema y generan diferentes resultados posibles. Según su propósito, existen modelos de caja negra, que se basan únicamente en relaciones estadísticas entre las variables de entrada y salida; modelos conceptuales, que representan de forma simplificada los principales procesos del sistema hidrológico; y modelos de base física, que describen dichos procesos mediante ecuaciones físicas, lo que los hace más complejos y dependientes de numerosos parámetros. De acuerdo con su distribución espacial, los modelos pueden ser agregados, cuando la cuenca se considera como una unidad homogénea, o distribuidos, cuando se representa la variabilidad espacial dividiendo la cuenca en unidades menores. Finalmente, según la escala temporal, los modelos se clasifican en modelos de evento, que simulan un episodio específico de lluvia–escorrentía; modelos de simulación continua, que representan el balance hídrico a lo largo del tiempo; y modelos mixtos, que combinan ambos enfoques. (Villate et al., 2023).

a) Criterio de calibración

Los modelos hidrológicos (GR2M, HBV, SWAT, ETC.), se basan en la comparación del caudal observado con el simulado y así ajustan sus parámetros y variables como precipitación, evapotranspiración, etc. con la finalidad de que la simulación sea lo más representativo a la realidad.

Los algoritmos usados para optimizar son simples, en esta investigación para las proyecciones de estos modelos hidrológicos se hará uso del paquete airGR programado en el lenguaje R, el cual es una librería diseñada exclusivamente para hidrología desarrollada por la empresa IRSTEA (Francia). (Coron *et al.*, 2017)

Para la calibración y validación de los modelos se usa distintos criterios de eficiencia, el paquete airGR usa tres criterios:

- Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE)

El criterio NSE evalúa qué tan bien el modelo reproduce la variabilidad de los caudales observados.

El criterio NSE de calificación de rendimiento para el criterio se muestra en la tabla

Tabla 4

Calificación de NSE para evaluar 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]

Nota. Presenta el rendimiento por rangos según la obtención de NSE, Adaptado de Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, por Moriasi, et al. (2007), Transactions of the ASABE, 50(3), 885–900.

- Log Nash–Sutcliffe Efficiency (LogNSE)
- Kling–Gupta Efficiency (KGE, 2009)
- RMSE (Root Mean Square Error)

Este criterio indica el error de los valores tomados, en este caso los simulados y observados. Cuando el RMSE es 0 indica un perfecto ajuste.

- PBIAS (Percent Bias)

“The airGR package provides classical efficiency criteria such as the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), the Kling–Gupta Efficiency (KGE), and their variants, for calibration and validation of GR models.” (Coron *et al.*, 2017).

"El paquete airGR proporciona criterios de eficiencia clásicos, como la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), la eficiencia de Kling-Gupta (KGE) y sus variantes, para la calibración y validación de modelos GR".

b) Modelos GR

Los modelos de la familia GR pertenecen al grupo de modelos hidrológicos de precipitación–escorrentía y fueron desarrollados por la unidad de investigación en hidrología del Cemagref, en Francia. Estos modelos se caracterizan por una estructura simple y eficiente, ya que utilizan principalmente la precipitación y la evapotranspiración como variables de entrada para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Debido a su formulación parsimoniosa y a su bajo requerimiento de información, los modelos GR han sido ampliamente utilizados en estudios hidrológicos, mostrando un buen desempeño en la representación del comportamiento hidrológico tanto a escala mensual como diaria. (Cabrera, 2012)

Los modelos de la familia GR pueden aplicarse en diferentes condiciones hidrológicas, incluyendo cuencas con presencia de nieve. a lo largo del tiempo, estos modelos han sido desarrollados y mejorados para trabajar en distintas escalas temporales, dando lugar a versiones específicas según el intervalo de simulación. Entre ellas se encuentran GR1A para el análisis de caudales anuales, GR2M para caudales mensuales, GR3J y GR4J para simulaciones diarias, así como GR4H y GR5H para la modelación de caudales horarios, entre otras variantes, lo que demuestra la flexibilidad y evolución continua de esta familia de modelos.

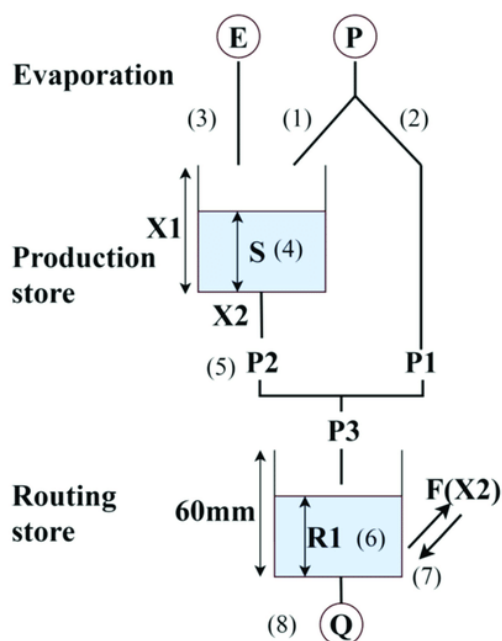
c) Modelos GR2M

El modelo GR2M es un modelo hidrológico conceptual, determinístico y agregado, diseñado para simular caudales a escala mensual a partir de la transformación de la precipitación en escorrentía. Su estructura se basa en un número reducido de parámetros, específicamente dos, los cuales se calibran para representar de manera eficiente el comportamiento hidrológico medio de una cuenca. Este modelo forma parte de la familia de modelos GR desarrollados en Francia por el entonces CEMAGREF (actualmente INRAE) y ha demostrado un buen desempeño en aplicaciones hidrológicas de largo plazo. Las versiones más recientes del modelo incorporan mejoras en su formulación y en los procedimientos de calibración, optimizando su capacidad de simulación bajo distintas condiciones climáticas (Coron et al., 2017).

Funciones del modelo GR2M:

El modelo GR2M es un modelo hidrológico conceptual, agregado y determinístico, cuya función es simular los caudales medios mensuales de una cuenca a partir de la precipitación y la evapotranspiración potencial. El modelo utiliza una estructura simplificada basada en dos parámetros calibrables que permiten representar los procesos dominantes de almacenamiento y transferencia del agua en la cuenca. Gracias a su formulación parsimoniosa y a su bajo requerimiento de datos, GR2M resulta adecuado para el análisis del balance hídrico y la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos a escala mensual (Coron et al., 2017).

Los parámetros del modelo X1 y X2 son fundamentales para calcular todos los volúmenes de las funciones, utilizando la herramienta Solver integrada en Excel para optimizarlos hasta que la curva sea adecuadamente similar a la original.

Figura 7*Estructura del modelo GR2M*

Nota. Presenta el esquema de la estructura del modelo hidrológico GR2M, Adaptado del esquema conceptual especializada (adaptado de Coron et al., 2017).

Donde de la Figura se describe lo siguiente:

P: Precipitación media de la cuenca, mm.

E: Evapotranspiración actual, mm.

S: Almacenamiento del reservorio suelo al inicio del periodo de análisis, mm.

R: Almacenamiento del reservorio de agua gravitacional inicial de análisis (mm)

Q: Caudal a la salida de la cuenca, en mm/s.

P2: Percolación profunda,

P1: Escorrentía superficial, mm.

X_1 : Capacidad de almacenamiento del reservorio de suelo, en mm.

X_2 : Coeficiente de intercambios subterráneos, (adim.).

➤ **Función de Producción (reservorio de suelo)**

Campos Lupuche (2021) sostiene que según el esquema (Figura del modelo GR2M) una fracción de la precipitación es retenida en el reservorio del suelo, mientras que el volumen restante (P_1) se transfiere al reservorio de agua gravitacional. En consecuencia, el volumen actualizado del reservorio de suelo (S_1) se determina mediante la relación expresada en la ecuación (6).

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad \dots (6)$$

Dónde: φ se define como en la ecuación (7).

$$\varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad \dots (7)$$

Al desprestigiar las pérdidas, se asume que el volumen de agua previo al proceso de infiltración permanece constante; por lo tanto, esta condición se expresa mediante la ecuación (8).

$$P_1 = P + S - S_1 \quad \dots (8)$$

Por su parte, la evapotranspiración provoca una disminución del volumen almacenado en el reservorio del suelo, dando lugar a un nuevo volumen S_2 , el cual se determina mediante la ecuación (9)

$$S_2 = \frac{S_1(1 - \omega)}{1 + \omega \left(1 - \frac{S}{X_1}\right)} \quad \dots (9)$$

Donde: ω se define como en la ecuación (10).

$$\omega = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad \dots (10)$$

El volumen S_2 se transferirá al reservorio de agua gravitacional, quedando el volumen inicial S como remanente para el siguiente periodo de análisis. Por consiguiente, S será, por la ecuación (11).

$$S = \frac{S_2}{\left(1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right)^{\frac{1}{3}}} \quad \dots (11)$$

Finalmente, el volumen de percolación P_2 será, según la ecuación (12):

$$P_2 = S_2 - S \quad \dots (12)$$

➤ Función de Transferencia (reservorio de agua gravitacional)

Una vez determinado el caudal de agua que percola, se calcula la precipitación efectiva que entra al reservorio de agua gravitacional (P_3). La ecuación 13, Describa la precipitación efectiva.

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad \dots (13)$$

Dado que el reservorio de agua gravitacional presenta un volumen inicial R , su volumen actualizado se calcula mediante la ecuación (14).

$$R_1 = R + P_3 \quad \dots (14)$$

A continuación, se determina el intercambio de agua F mediante la ecuación (15).

$$F = (X_2 - 1)R_1 \quad \dots (15)$$

Cuando el parámetro X_2 es mayor que 1, el intercambio F se interpreta como una ganancia de agua para la cuenca, mientras que valores menores que 1 indican una pérdida.

En consecuencia, el nivel del reservorio de producción se ajusta considerando este intercambio de volúmenes a nivel subsuperficial, aplicando el factor X_2 . El nuevo nivel del reservorio se calcula mediante la ecuación (16).

$$R_2 = X_2 R_1 \quad \dots (16)$$

Finalmente, el reservorio de agua gravitacional se descarga de acuerdo con una función cuadrática, proceso que determina el caudal de salida del sistema. Dicho caudal se calcula mediante la ecuación (17).

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad \dots (17)$$

El modelo cuenta con dos parámetros X_1 y X_2 , los cuales se definen en función de las características geométricas ilustradas en la figura previamente presentada del modelo GR2M. Asimismo, para su correcta ejecución, el modelo requiere la definición de dos variables iniciales, tal como se detalla en la Tabla 05.

Tabla 5

Parámetros y condiciones iniciales del modelo GR2M

Modelo GR2M		Descripción	Rango
Parámetros	$X_1(mm)$	Capacidad de almacenamiento del reservorio de producción	1-2000
	$X_2(adim)$	Coefficiente de intercambios de aguas subterráneas	0.01-2
Condiciones Iniciales	$S_0(mm)$	Almacenamiento inicial de reservorio de producción	0- X_1
	$R_0(mm)$	Almacenamiento inicial del reservorio de agua gravitacional	0-60

Nota. Los valores y rangos mostrados fueron adaptados de Mouelhi et al. (2006), quienes desarrollaron y validaron el modelo para la simulación de caudales mensuales, describiendo el rol de cada parámetro en el almacenamiento y transferencia del agua en el sistema.

3.3. Definición de términos

3.3.1. Temperatura

La temperatura es una variable física fundamental que cuantifica el estado térmico de un sistema y está directamente relacionada con la energía cinética promedio de las partículas que lo componen. En el ámbito atmosférico, la temperatura del aire describe las condiciones térmicas de la atmósfera y resulta de la interacción entre la radiación solar entrante, los procesos de intercambio de energía en la superficie terrestre y la dinámica de la circulación atmosférica. Esta variable es esencial para la comprensión de los procesos climáticos e hidrológicos, ya que influye directamente en fenómenos como la evapotranspiración, la formación de nubes y el balance energético de la superficie terrestre (Trenberth et al., 2018; IPCC, 2021).

3.3.2. Clima

El clima es descrito normalmente como una función de cómo varía las condiciones atmosféricas como la lluvia, temperatura y viento. Según la OMM, el clima se define a través de las condiciones atmosféricas que se mantienen constantes durante meses, años y décadas. Para una investigación y estudio se recomienda utilizar 30 años como referencia. (Senamhi, 2018)

3.3.3. Precipitación

Según Villón (2004), la precipitación comprende todas las formas de agua que se originan en la atmósfera y alcanzan la superficie terrestre, manifestándose en diferentes modalidades como lluvia, granizo, garúa o nieve. Desde el enfoque de la ingeniería hidrológica, la precipitación constituye la principal fuente de agua superficial, por lo que su medición y análisis representan el punto de partida fundamental para los estudios relacionados con la gestión, aprovechamiento y control de los recursos hídricos. Las gotas de lluvia presentan diámetros aproximados que varían entre 0.5 y 2 mm, lo que implica un incremento significativo respecto al tamaño inicial de las microgotas presentes en las nubes, cuyo diámetro es del orden de 0.02 mm. Este aumento de volumen, que puede llegar a ser entre cien mil y un millón de veces mayor, explica el proceso de formación de la precipitación y se atribuye principalmente a dos mecanismos físicos fundamentales: el proceso de crecimiento por colisión y coalescencia, característico de las nubes cálidas, y el proceso de cristalización o Bergeron-Findeisen, propio de las nubes frías.

- Unión entre sí de numerosas gotitas
- Engrosamiento de una gota por la fusión y condensación de otras

3.3.4. Producto PISCO

La base de datos PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) proporciona información climática e

hidrológica interpolada a nivel nacional. Actualmente, incluye datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración, organizados en una malla espacial de alta resolución aproximada de 5 × 5 km que cubre todo el territorio peruano. El conjunto de datos comprende el período entre 1981 y 2016 y ha sido desarrollado con el objetivo de facilitar la recopilación, consulta y análisis de información para estudios hidrológicos y aplicaciones relacionadas. (Aybar Camacho *et al.*, 2017)

3.3.5. Evaporación

El proceso mediante el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso y se traslada a la atmósfera se llama evaporación. Durante este proceso, el agua presente en almacenamientos, conducciones y en el suelo se convierte en vapor de agua. Es necesario saber cuánta agua se evapora de grandes depósitos y cuánta agua se necesita para regar los campos, para poder planificar correctamente el abastecimiento de agua. La evaporación ocurre cuando las moléculas de agua cerca de la superficie de un suelo mojado o una masa de agua ganan energía cinética debido a la radiación solar, el viento y las variaciones en la presión de vapor. (Castillo Muñoz *et al.*, 2020)

3.3.6. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un proceso hidrológico que representa la pérdida de agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, resultado combinado de la evaporación del agua proveniente del suelo, cuerpos de agua y superficies húmedas, y de la transpiración realizada por la vegetación a través de sus tejidos. Este proceso está controlado por factores climáticos como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad y el viento, así como por características de la cobertura vegetal y del suelo. La evapotranspiración desempeña un papel clave en el balance hídrico y en la regulación del ciclo del agua a distintas escalas espaciales y temporales (Allen *et al.*, 2011; IPCC, 2021).

Para la evapotranspiración, se utilizan varios métodos, siendo el más destacado el Penman Monteith, recomendado por la FAO también se emplean formulaciones como las

de Blaney-Criddle, Jensen-Haise y Hamon. Las variables clave para realizar estos cálculos son la temperatura, radiación, velocidad del viento y presión de vapor, entre otras.

3.3.7. Caudal

El caudal de escorrentía superficial forma parte del ciclo hidrológico y corresponde al agua generada a partir de la precipitación que se desplaza sobre la superficie terrestre hasta alcanzar la salida de la cuenca. Este componente del escurrimiento se caracteriza por su respuesta rápida, ya que influye de manera directa e inmediata en el caudal total del sistema. (Villon, 2004)

3.3.8. Método Oudin

El método Oudin es un método ampliamente usado en investigaciones de hidrología, tiene como función principal el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), cuando no se cuentan con los datos meteorológicos completos.

Según la investigación realizada por Ludovic Oudin en el cual evaluó y comparó distintos métodos en 308 cuencas en distintos países de Europa. Investigación que tenía como finalidad validar su propuesta que consista en usar como variable de entrada la temperatura media y la radiación solar (está dependiendo de la latitud de la cuenca). Dicha investigación validó correctamente su propuesta. (Oudin *et al.*, 2005).

IV. Metodología de la Investigación

4.1. Tipo y nivel de investigación

Hernández, Fernández y Baptista (2022) señalan que “la investigación aplicada tiene como propósito resolver problemas prácticos específicos mediante la utilización del conocimiento científico.”

Enmarcada dentro de la investigación aplicada por que se hace uso de conocimientos científicos y teóricos del cambio climático e hidrología para analizar la proyección de la oferta hídrica en la microcuenca Mariño. A base de datos hidro climáticos, datos RCP y modelos climáticos se busca generar información útil para poder comprender el estado y la disponibilidad hídrica influida por la contaminación ambiental, temperatura y precipitaciones en distintos periodos futuros.

4.1.1. Nivel de la investigación

Según Hernández y Baptista (2022), el nivel explicativo tiene como propósito determinar las causas de los fenómenos y analizar las relaciones de causa y efecto entre las variables, lo que permite entender las razones por las cuales se producen determinados eventos dentro de un contexto específico.

la presente investigación corresponde el nivel explicativo, teniendo como fin identificar y explicar la influencia del cambio climático sobre la oferta hídrica en una proyección al año 2100 en la microcuenca Mariño. El estudio se realiza a través de las variables climáticas (variable independiente) como las precipitaciones, temperatura y RCP afectan a la oferta hídrica en un nivel histórico y como para periodos futuros.

El nivel de la investigación es sustentado en la evaluación de causa tipo causa-efecto entre las variables de estudio, variables que no serán manipuladas directamente (diseño de la investigación no experimental). La investigación se realizará por medio de modelaciones climáticas (GCM), simulaciones hidrológicas (modelos hidrológicos) y

análisis estadísticos que expliquen los cambios proyectados en la oferta hídrica.

4.1.2. Diseño de la investigación

Según Hernández y Baptista (2022), los estudios no experimentales se caracterizan porque el investigador no interviene ni altera las variables, limitándose a observarlas y analizarlas tal como se presentan en la realidad.

Se emplea el diseño no experimental debido a que no se manipula directamente las variables de la investigación. La variable independiente (cambio climático) y dependiente (oferta hídrica) son analizadas tal como se logra obtener de las estaciones meteorológicas y obtenidas de las páginas públicas como SENAMHI y PISCO.

4.1.3. Método de investigación

Según Hernández y Baptista (2022), el método deductivo se basa en el razonamiento lógico que parte de conceptos y teorías generales para analizar situaciones particulares, permitiendo comprobar hipótesis mediante la observación y el análisis de datos.

La investigación empleada es el método deductivo, partiendo desde datos de la teoría sobre la influencia del cambio climático en la oferta hídrica, así como las proyecciones establecidas por el CMIP5. A partir de estos datos se examinan los datos climáticos, hidrológicos, datos históricos y proyecciones, con el fin de contrastar la hipótesis planteada y poder determinar el comportamiento futuro de la disponibilidad hídrica en la microcuenca Mariño.

4.1.4. Enfoque de la investigación

Según Hernández, Fernández y Baptista (2022), El enfoque cuantitativo se basa en la obtención y el análisis de datos para responder preguntas de investigación y contrastar hipótesis, utilizando mediciones numéricas y herramientas estadísticas que permiten identificar patrones de comportamiento y verificar teorías.

Este enfoque de investigación se enfoca en analizar datos, números, indicadores y estadísticas asociadas variables climatológicas e hidrológicas tales como precipitación, caudal, temperatura. Datos que son procesados mediante modelos estadísticos, hidrológicos y simulaciones hidrológicas(proyecciones), con la finalidad de probar las hipótesis planteadas, el enfoque cuantitativo permite obtener resultados objetivos, medibles y verificables.

4.2. Ámbito temporal y espacial

El proyecto se llevó a cabo durante el año 2024 y 2025, se realizó mediante datos verificados y correlacionados con modelos globales, los modelamientos se realizaron con los rangos establecidos por el CMIP5, para la verificación de datos de zona se realizó con entidades públicas.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Según Hernández y Mendoza (2018), “Población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones.” (p.199). Se puede deducir que es el total del cual se tomara una pequeña muestra.

La población está conformada por la totalidad de los registros hidrometeorológicos históricos y proyectados de precipitación, temperatura y caudal de la microcuenca Mariño, provincia de Abancay.

4.3.2. Muestra

La muestra corresponde a un subconjunto de la población de estudio, seleccionado con el propósito de obtener la información necesaria para la investigación, sobre el cual se analizan las variables consideradas en el estudio. (Rivas, 2017).

La muestra corresponde a los datos de la población entre los años 1981 al 2016 de

la microcuenca Mariño, provincia de Abancay.

4.4. Instrumentos

4.4.1. Técnicas e instrumentos de recopilación de datos

la técnica más adecuada para la investigación es la de revisión de registros, siendo un método de recolección de información que conlleva la revisión, examinación y extracción de datos de documentos relacionados con el sujeto o tema participante.

Los instrumentos para la recolección de datos son los datos publicados y solicitados a las instituciones públicas (SENAMHI, ANA, MINAM, PISCO) y los datos de las instituciones privadas dicha descarga se realizará mayormente de la plataforma web KNMI Climate Explorer donde presentan mejor información relacionada a los modelos CMIP5, son factibles y fáciles de usar en los modelos RCP4.5 y RCP8.5.

4.5. Procedimientos

4.5.1. Datos generales y validación de datos

- **Ubicación y descripción del sitio**

La zona de estudio está ubicada políticamente en la región de Apurímac como se muestra en la figura N°9, la cuenca se encuentra en la provincia de Abancay en el territorio central y oriental del Perú.

Está ubicada exactamente en los distritos de Tamburco y Abancay, delimitada por Huanipaca y san pedro de Cachora en el norte, Curahuasi por el norte y este; Lambrama por el sur y Huancarama por el oeste.

El área estimada de la cuenca Mariño es de 200 km², y su ubicación en coordenadas UTM es la siguiente:

Norte: 8502000- 8484000

Este: 721000 – 745000

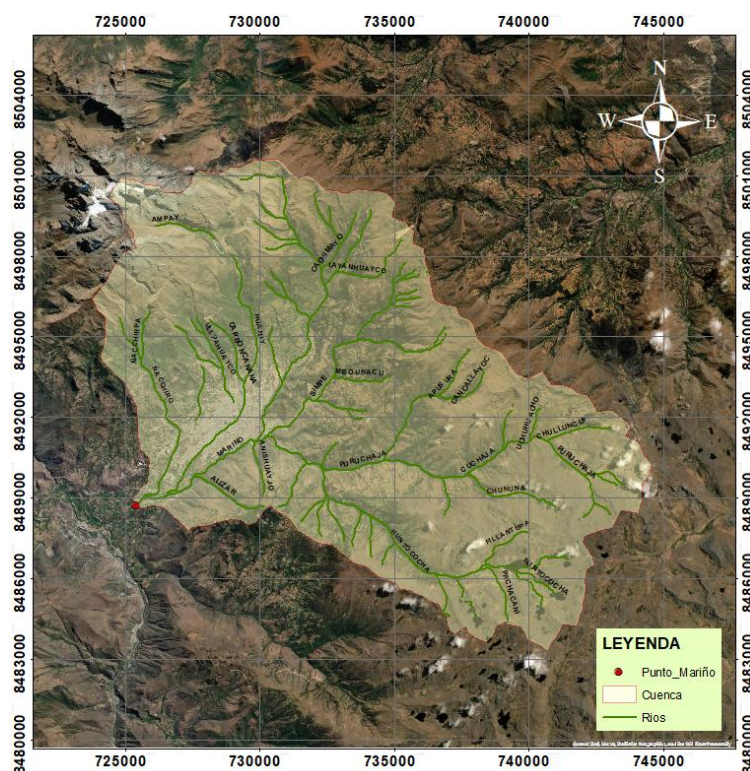
La ubicación de la microcuenca se encuentra rodeada por montañas dividida por los ríos de Pachachaca y Apurímac. El cauce principal de la cuenca es el río Mariño el cual tiene como afluentes principales: ríos Puruchaja, Rontococha entre otros. La cuenca elevada a su vez cuenta con seis subcuencas: Urpahuayco, Chinchichaca (Ñaccero), Colcaqui (Marcahuasi, Atunhuaycoc, (Hatunpata), Charcabamba y Chuayloc. El río Mariño atraviesa los distritos de Tamburco y Abancay, los ríos tributarios son administrados por Senamhi.

○ **Delimitación de la cuenca**

El río principal tiene como cabecera el ex nevado Ampay ubicado en la parte norte-oeste de la cuenca, en donde el área de la cuenca resulta de 218 km².

Figura 8

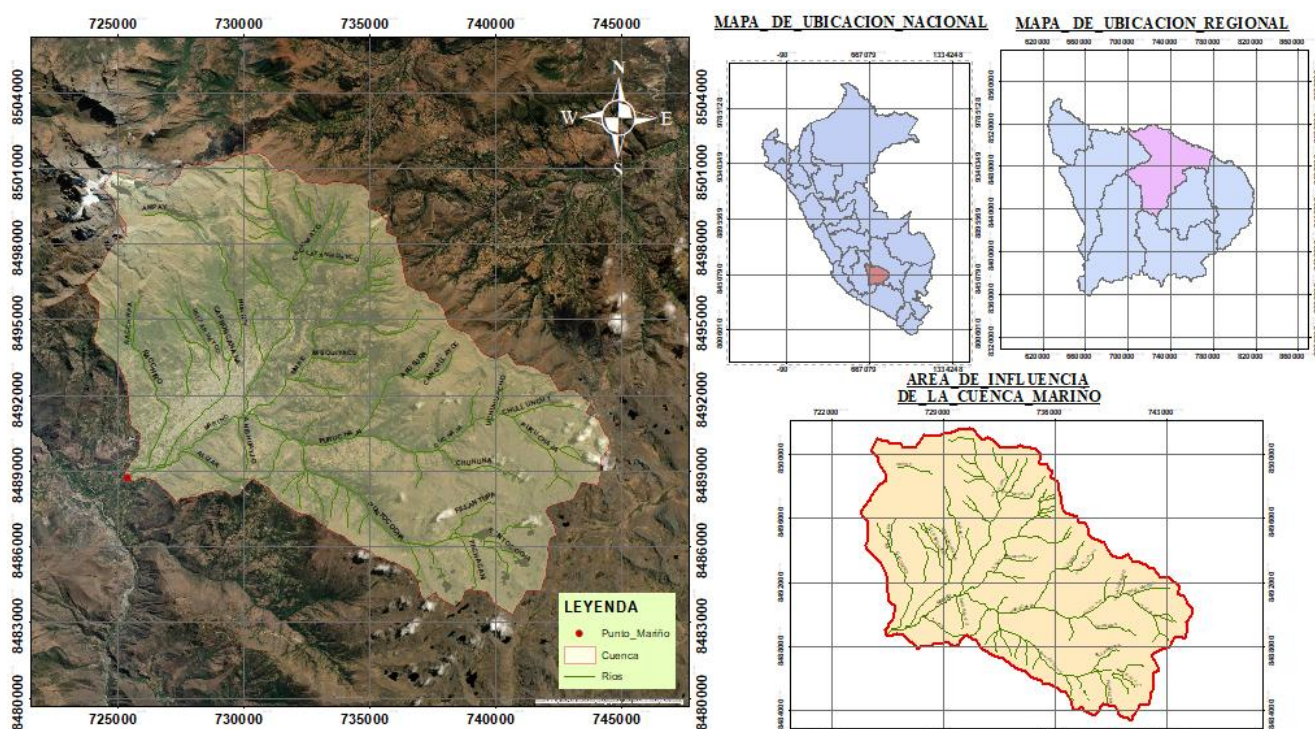
Delimitación de la microcuenca Mariño



Nota. Elaboración propia mediante el programa ArcGIS, donde se muestra la delimitación del área y el perímetro de la microcuenca en estudio.

Figura 9

Ubicación de la microcuenca Mariño



Nota. Elaboración propia mediante el programa ArcGIS, donde se muestra la ubicación de la microcuenca Mariño.

- **Información disponible**

La información disponible se recaudó y solicito a las entidades correspondientes, en este caso al Servicio Nacional De Meteorología del Perú (SENAMHI), y la Autoridad Nacional De Agua (ANA).

En la tabla N°06, se muestra las características de las estaciones que sirvieron como base para la recolección de datos

Tabla 6*Resumen de las estaciones*

Estación	Código	Fuente	Inicio de registro		Ubicación		Altitud (m.s.n.m)
			Precipitación	Temperatura	longitud	Latitud	
Granja san Antonio	113225	SENAMHI	01/2013	01/2013	72°51'24.95"	13°36'17.71"	2772
Abancay 156234-C	113111	SENAMHI	07/1984	-	72°52'14"	13°36'30"	2776
Abancay 000605-C	100001	SENAMHI	01/1996	01/1996	72°52'14"	13°36'30"	2776
Curahuasi	113029	SENAMHI	01/1964	05/1964	72°44'5"	13°33'8"	2763

Nota. Elaboración propia de la descripción de las estaciones de SENAMHI ubicados en la microcuenca Mariño.

Los datos de la topografía para el levantamiento de los mapas se realizaron mediante la descarga de [earthexplorer.usgs](https://earthexplorer.usgs.gov) de manera gratuita mediante el siguiente link: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Tras la recaudación de datos se observó que entre las estaciones solicitadas una estación solo contaba con datos de un año y no contaba con datos de temperatura solo precipitación.

- **Validación de datos**

Se obtuvo una gran cantidad de información, sin embargo, la información obtenida cuenta con bastantes deficiencias en varios aspectos.

La información con la que se trabajó son datos de precipitaciones, temperatura mínima y máxima.

El resumen de la data recolectada es de las siguientes estaciones:

Tabla 7*Datos de estaciones SENAMHI*

FUENTE	ESTACIONES	CÓDIGO	ALTITUD	LATITUD	LONGITUD	PERIODO
SENAMHI	ABANCAY/000605/DZ12	605	2776	13° 36' 30"	72° 52' 14"	1996-2014
SENAMHI	ABANCAY/156234/DZ12	156234	2776	13° 36' 30"	72° 52' 14"	1984-1986
SENAMHI	CURAHUASI/000677/DZ12	677	2763	13° 33' 8"	72° 44' 5"	1964-2025
SENAMHI	GRANJA SAN ANTONIO/113235/DZ12	113235	2772	13° 36' 17.71"	72° 51' 24.95"	2013-2024

Nota. Selección de las estaciones con datos más completos y resaltantes para la investigación en cuestión.

Los datos de SENAMHI fueron obtenidos mediante una solicitud presentada a la institución correspondiente, con el fin de obtener la data detallada de las estaciones meteorológicas con la información necesaria.

- **Datos de precipitación y temperatura por SENAMHI**

Al revisarse los datos obtenidos de las estaciones se llegó a concluir:

- Los datos obtenidos de la estación ABANCAY/156234/DZ1 fueron obviadas por qué la muestra es estadísticamente no significativa.
- Los datos de la GRANJA SAN ANTONIO/113235/DZ12, fueron desestimados. El periodo en cuestión de la estación es del 2013 al 2024, periodo en el cual no se puede corroborar y compara con los modelos PISCO.
- Los datos de las estaciones de: ABANCAY/156234/DZ1 y GRANJA SAN ANTONIO/113235/DZ12, cuentan con datos deficientes, pero se dio de uso para poder correlacionar la estación ABANCAY/000605/DZ12 por datos faltantes en ciertos años.
- La estación CURAHUASI/000677/DZ12, cuenta con una gran variación en sus datos al encontrarse fuera de la cuenca Mariño y a una distancia

considerable. Se decidió apoyarse en esta estación al tener los datos más completos a comparación del resto de estaciones de SENAMHI.

Los datos completos se encuentran en Anexos A: temperatura y precipitaciones mensuales en la microcuenca Mariño.

- **Datos de precipitación y temperatura según PISCO**

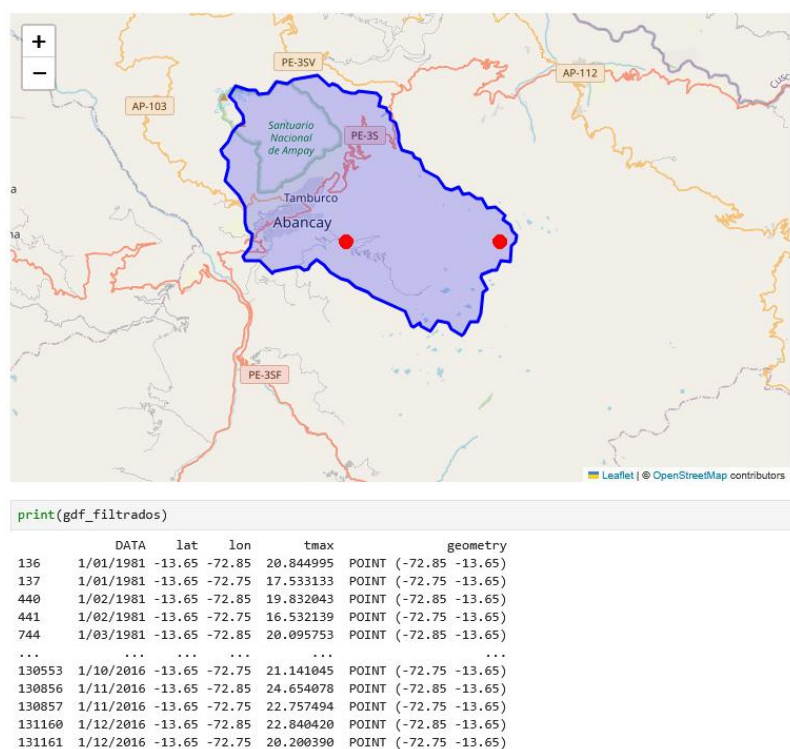
Debido a la limitada disponibilidad de datos y a la presencia de registros incompletos de precipitación y temperatura proporcionados por el SENAMHI, la información faltante fue complementada utilizando el producto PISCO (Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations). Esta base de datos se desarrolló a partir de la interpolación de información proveniente del producto satelital CHIRPS y de registros de estaciones meteorológicas, lo que permitió contar con series de datos más completas para el análisis hidrológico.

Para la obtención y procesamiento de datos PISCO se hizo de la siguiente manera:

- La descarga de datos PISCO se realizó de la biblioteca SENAMHI HSR PISCO del siguiente link (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/?Set-Language=es>).
- Los datos obtenidos de la página PISCO vienen detallados y para su correcta descarga es necesaria la cuadrícula de ubicación de la cuenca. Los datos obtenidos fueron en el sector 18S.
- Para su posterior desglose de los datos PISCO en la zona de evaluación fue necesario el uso de aplicativos como RSTUDIO y PYTHON.

Figura 10:

Ubicación de las coordenadas de datos PISCO



Nota. La imagen muestra la ubicación de las estaciones/puntos de las cuales se obtuvo la información requerida de PISCO-PERÚ, y posteriormente procesados mediante R estudio y PHYTON.

- Tras la extracción de datos NC por medio del programa PHYTON, se procedió a ordenar y verificar los datos obtenidos.

Los datos completos se encuentran en Anexos B: temperatura y precipitaciones mensuales en la microcuenca Mariño.

La tabla 9 muestra un resumen de los datos y características necesarias de las estaciones PISCO de donde se obtuvieron los datos.

Tabla 8*Resumen de estaciones PISCO*

FUENTE	ESTACIONES	CÓDIGO	ALTITUD	LATITUD	LONGITUD	PERIODO
PISCO	PISCO N°01		2641	13° 39' 0"	72° 50' 60"	1981-2016
PISCO	PISCO N°02		4411	13° 39' 0"	72° 45' 0"	1981-2016

Nota. Elaboración propia de la descripción de las estaciones de PISCO-PERÚ ubicados en la microcuenca Mariño.

- **Interpolación IDW**

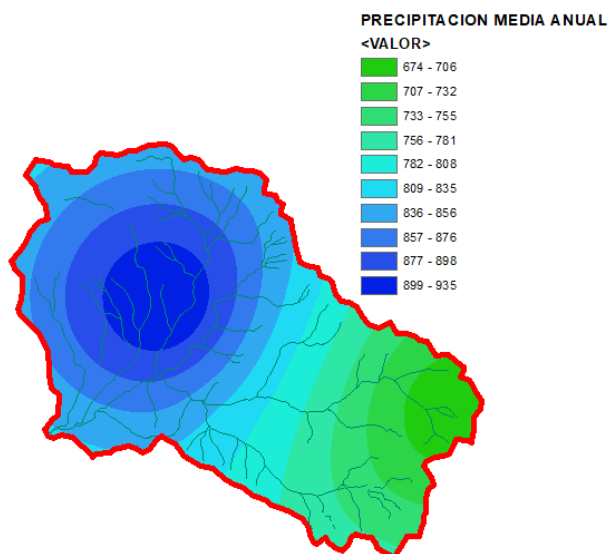
Se realizó una interpolación IDW a causa de falta de datos en las estaciones meteorológicas de SENAMHI, la interpolación IDW se realizó por medio del programa Arcgis.

La disponibilidad de información es desde el 1981 al 2016 según la data PISCO, se tomará este periodo para el análisis de estudio.

Se realizó una comparación de información de la data pisco con los datos registrados en las estaciones SENAMHI, en donde se compara la precipitación y temperatura media mensual

Figura 11

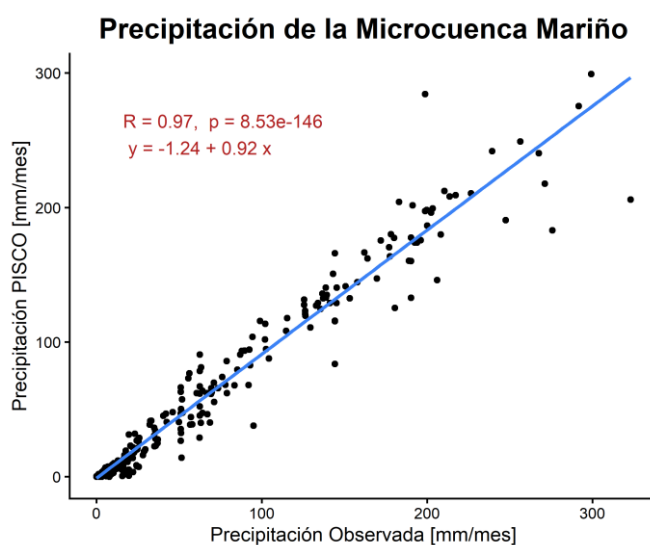
Interpolación IDW



Nota. La figura muestra la interpolación de la cuenca por el método IDW mediante el uso del programa ARGIS

Figura 12

Comparación de la data PISCO con la precipitación registrada por las estaciones meteorológicas de SENAMHI.



Nota. La figura muestra la comparación de datos de temperatura de PISCO con SENAMHI.

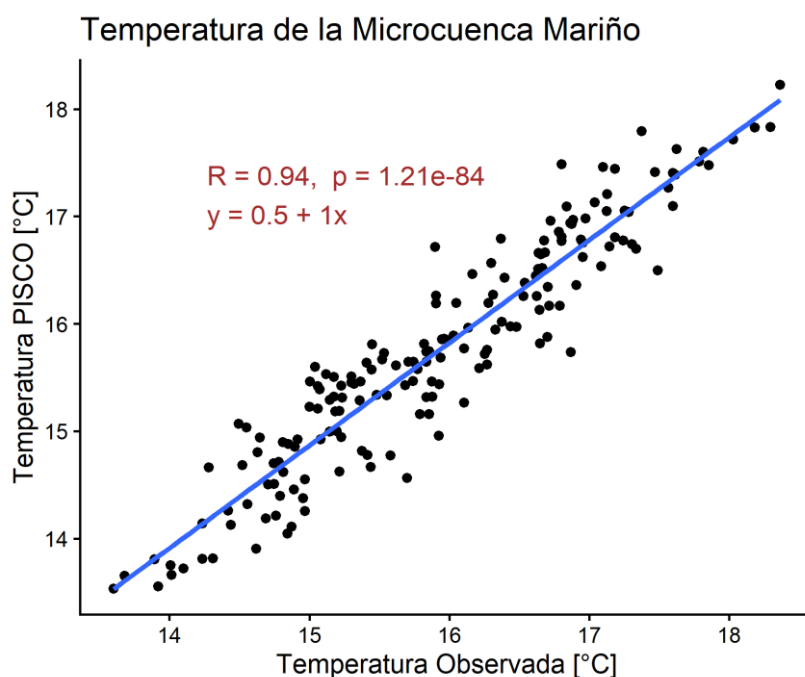
La figura 12 es un gráfico de dispersión con el cálculo de coeficiente de determinación, el coeficiente de determinación sirve para ver qué tan bien la línea de regresión explica la variabilidad de los datos.

En la figura 12 se llega a observar que el valor del coeficiente de determinación es de 0.97, este valor es bastante alto llegando a significar que la precipitación PISCO se ajusta bastante bien a la precipitación observada local (SENAMHI).

En la ilustración 13 se llega a observar que el valor del coeficiente de determinación es de 0.94, este valor es bastante alto llegando a significar que la precipitación PISCO se ajusta bastante bien a la temperatura observada local (SENAMHI).

Figura 13

Comparación de la temperatura PISCO con la temperatura registrada por las estaciones meteorológicas de SENMAHI.



Nota. La figura muestra la comparación de datos de temperatura de PISCO con SENAMHI.

La correlación obtenida al comparar la precipitación y temperatura obtenida de la interpolación IDW de datos de SENAMHI con los datos PISCO mostrados la ilustración 10 y 11, mostraron resultados de una correlación bastante eficiente. Resultados que validan la calidad de los datos PISCO.

Luego de validar las variables de precipitación y temperatura media mensual del producto PISCO, estas fueron consideradas como información confiable y empleadas en el desarrollo de la presente investigación (PISCO N.º 01).

4.5.2. Primera etapa: análisis climático

El análisis climático y temperatura futura para la microcuenca Mariño, conlleva los siguientes pasos:

- La búsqueda y descarga de los datos de precipitación y temperatura mensual entre los años 1981-2100, presentados por los modelos climáticos globales (GCMs), datos que se descargan de manera mensual y diaria en la plataforma web KNMI climate explorer (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>). Pagina que contiene la información de los modelos climáticos CMIP5, la descarga de datos se da para los escenarios con más importancia y más críticas RCP4.5 y RCP8.5, siendo la trayectoria futura más probable y la trayectoria más crítica.
- Se selecciono los modelos más aceptables y adecuados para la cuenca en estudio. Esta selección se realiza por medio de un análisis en el periodo (1981-2016), para dicho análisis se realiza una comparación de datos mediante parámetros estadísticos de medición de sesgo:
 - BIAS: El valor más cercano a cero.
 - Coeficiente de Correlación: valor más cercano a la unidad.
- Al tener los valores de los GCM se procede a realizar un escalamiento

estadístico con el fin de obtener valores mejor representativos para la zona en estudio. Para la corrección de datos de precipitación se realiza por medio del mapeo de CUANTILES y para la corrección de datos de temperatura se realiza por medio del método de escalamiento lineal.

Las herramientas usadas son Excel, PYTHON y lenguaje R.

4.5.3. Segunda etapa: modelo hidrológico

Para poder obtener la data necesaria es necesario calibrar el modelo GR2M con la finalidad de obtener los caudales futuros.

- El modelo hidrológico GR2M, a escala mensual, fue calibrado y validado para el período histórico comprendido entre 1981 y 2016, utilizando el criterio de eficiencia de Nash–Sutcliffe. Este indicador se empleó con el objetivo de determinar los valores más adecuados de los parámetros del modelo, permitiendo una mejor representación y proyección de las variables hidrológicas en la microcuenca Mariño.
- Para la realización del modelado hidrológico se hizo uso del programa R el cual cuenta con una función para el modelado GR2M.
- Posterior a la determinación de los modelos más adecuados a la investigación se realiza la proyección de estos.

4.5.4. Tercera etapa: tasa de cambio

En la etapa final se evalúa el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica futura mediante la comparación entre los caudales proyectados y los históricos, considerando tres períodos climatológicos futuros. Asimismo, esta fase permite cuantificar la tasa de cambio de las variables de precipitación y temperatura futuras respecto a los valores históricos observados, así como los cambios en la precipitación y el caudal.

4.6. Análisis de datos

El análisis de datos en la presente investigación se desarrolló mediante un enfoque

cuantitativo, por medio de la información hidro climática, histórica y proyecciones climáticas realizadas, con el objetivo de poder evaluar la oferta hídrica futura de la microcuenca marino bajo ciertos escenarios establecidos por el CMIP.

El análisis de datos a las proyecciones climáticas obtenidas bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, fueron sometidos a downscaling estadístico y corrección de sesgo con el fin de adecuar correctamente los datos a la escala de la microcuenca (datos obtenidos del GCM).

Posteriormente se analizaron los datos incorporados a un modelo hidrológico para su simulación de proyecciones de caudal y estimación hídrica futura bajo ciertos horizontes establecidos por el CMIP.

La comparación y análisis se realizó de manera temporal a los resultados obtenidos, logrando identificar los periodos con incrementos y disminuciones de la oferta hídrica.

El análisis de datos se basó en estadística descriptiva, análisis temporal y modelación hidrológica, empleando escenarios climáticos futuros para evaluar el impacto del cambio climático en la oferta hídrica.

V. Resultados Y Discusión

5.1. Resultados

5.1.1. Selección de modelos climáticos (GCM)

La cantidad de modelos climáticos globales (GCM) analizados para las precipitaciones son 34 y para temperatura son un total de 32, para la sección de los modelos se trabajó con datos durante el periodo de 1981 al 2016.

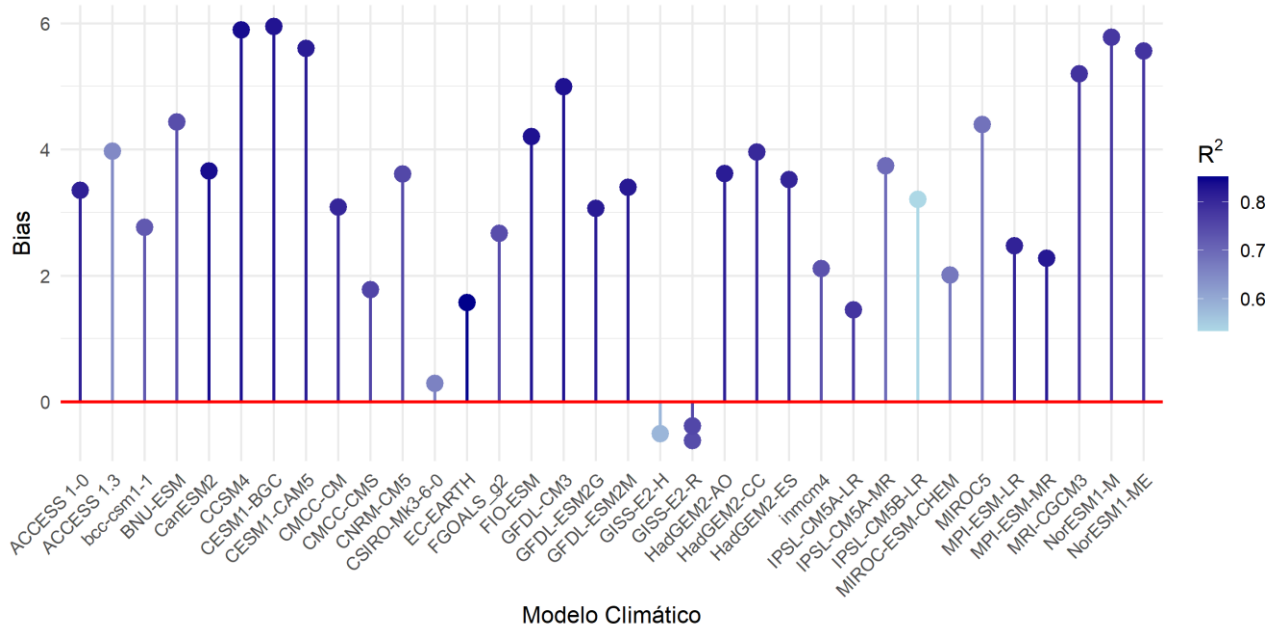
La selección de los GCM se realizó por medio de la función BIAS y el factor de correlación (R2) entre la data obtenida de cada modelo climático y la data observada por PISCO (data que fue validada anteriormente).

En la figura N°14 y N°15 se observa en eje Y la función BIAS y en el factor de correlación en la escala de color. El criterio de selección mediante la función BIAS viene a ser los GCM más cercano a "0", y el color más oscuro para el factor de correlación.

En la tabla 12, se muestra los GCM seleccionados para temperatura y precipitación con valores que representen de mejor manera sus los datos observados.

Figura 14

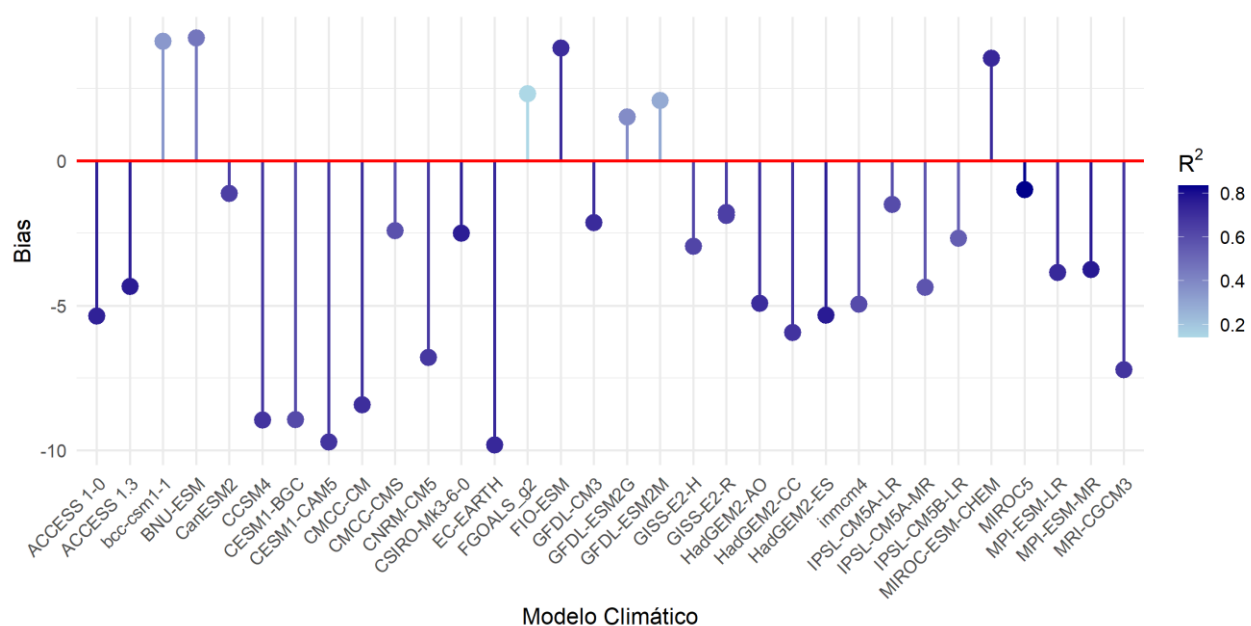
Selección de los GCM en base a la temperatura promedio observada



Nota. En la figura se compara los modelos climáticos GCM para la variable de precipitación.

Figura 15

Selección de modelos GCM en base a las precipitaciones observadas



Nota. En la figura se compara los modelos climáticos GCM para la variable de temperatura.

Tabla 9

Detalle de GCM analizados y mediante PHYTON para la variable precipitación

N°	GCM	R2	BIAS	N°	GCM	R2	BIAS
1	ACCESS 1-0	0.814	3.350	19	GISS-E2-H	0.582	-0.507
2	ACCESS 1.3	0.650	3.971	20	GISS-E2-R	0.724	-0.612
3	bcc-csm1-1	0.724	2.768	21	GISS-E2-R	0.745	-0.613
4	BNU-ESM	0.741	4.435	22	GISS-E2-R	0.754	-0.385
5	CanESM2	0.839	3.659	23	HadGEM2-AO	0.820	3.618
6	CCSM4	0.840	5.897	24	HadGEM2-CC	0.800	3.960
7	CESM1-BGC	0.830	5.953	25	HadGEM2-ES	0.808	3.521
8	CESM1-CAM5	0.820	5.603	26	inmcm4	0.736	2.116
9	CMCC-CM	0.804	3.087	27	IPSL-CM5A-LR	0.781	1.459
10	CMCC-CMS	0.756	1.778	28	IPSL-CM5A-MR	0.695	3.745
11	CNRM-CM5	0.752	3.612	29	IPSL-CM5B-LR	0.533	3.211
12	CSIRO-Mk3-6-0	0.661	0.295	30	MIROC5	0.686	4.397
13	EC-EARTH	0.852	1.577	31	MIROC-ESM-CHEM	0.676	2.009
14	FGOALS_g2	0.743	2.672	32	MPI-ESM-LR	0.811	2.474
15	FIO-ESM	0.833	4.208	33	MPI-ESM-MR	0.825	2.275
16	GFDL-CM3	0.833	4.993	34	MRI-CGCM3	0.786	5.202
17	GFDL-ESM2G	0.821	3.066	35	NorESM1-M	0.778	5.779
18	GFDL-ESM2M	0.824	3.401	36	NorESM1-ME	0.782	5.565

Nota. La tabla muestra los resultados numéricos de la comparación entre los modelos GCM presentados en la Figura 14, los cuales fueron evaluados mediante el factor bias y el coeficiente de correlación para los datos de precipitación.

Tabla 10

Valores bias y factor de correlación de las variables seleccionadas de precipitación

GCM	R2	BIAS
ACCESS 1-0	0.814	3.350
CanESM2	0.839	3.659
CCSM4	0.840	5.897

GCM	R2	BIAS
CESM1-BGC	0.830	5.953
CESM1-CAM5	0.820	5.603
EC-EARTH	0.852	1.577
FIO-ESM	0.833	4.208
GFDL-CM3	0.833	4.993
HadGEM2-AO	0.820	3.618
MPI-ESM-LR	0.811	2.474
MPI-ESM-MR	0.825	2.275

Nota. La tabla presenta los modelos GCM con mejor factor de bias y coeficiente de correlación para los datos de precipitación.

Tabla 11

Valores bias y factores de correlación seleccionados de las variables de precipitaciones y temperatura

N°	GMC	Precipitación		Temperatura	
		R2	BIAS	R2	BIAS
1	ACCESS 1-0	0.814	3.350	0.748	-5.361
2	CanESM2	0.839	3.659	0.646	-1.126
3	CCSM4	0.840	5.897	0.683	-8.950
4	CESM1-BGC	0.830	5.953	0.608	-8.923
5	CESM1-CAM5	0.820	5.603	0.683	-9.703
6	EC-EARTH	0.852	1.577	0.723	-9.805
7	FIO-ESM	0.833	4.208	0.706	3.902
8	GFDL-CM3	0.833	4.993	0.713	-2.126
9	HadGEM2-AO	0.820	3.618	0.709	-4.911
10	MPI-ESM-LR	0.811	2.474	0.721	-3.855
11	MPI-ESM-MR	0.825	2.275	0.772	-3.748

Nota. La tabla presenta los modelos GCM con mejor factor de bias y coeficiente de correlación para las variables de precipitación y temperatura.

5.1.2. Escalamiento estadístico

Una vez obtenidos los modelos GCM más apropiados para la microcuenca Mariño, se necesita realizar escalamiento estadístico (downscaling estadístico) para los modelos seleccionados. Los métodos seleccionados son el escalamiento lineal (LS) explicado en el ítem 3.2.4.7.1. este método se hará uso para la variable de temperatura y el método de mapeo de cuantiles (QM) se hará uso para variable de precipitaciones. Los dos métodos se programarán y codificarán en el lenguaje de programación R.

Al culminar el escalamiento estadístico de los GCM, se mostrará como los parámetros de sesgo tanto para precipitaciones como temperatura mejoran considerablemente, especialmente para las variables de temperatura ver tabla 13.

Tabla 12

Comparación de valor BIAS y factor de correlación de los GCM originales y los escalados estadísticamente

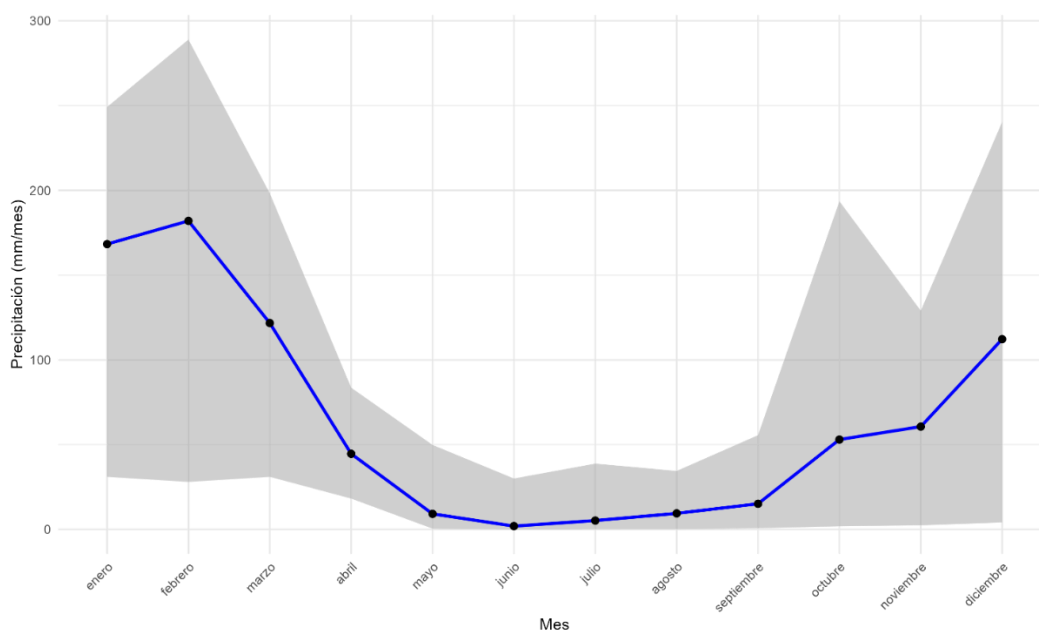
N°	GCM	Modelos Originales				Modelos Con Escalamiento			
		Precipitación		Temperatura		Precipitación		Temperatura	
		R2	BIAS	R2	BIAS	R2	BIAS	R2	BIAS
1	ACCESS 1-0	0.814	3.350	0.748	-5.361	0.855	-0.045	0.834	0.000
2	CanESM2	0.839	3.659	0.646	-1.126	0.834	-0.045	0.834	0.000
3	CCSM4	0.840	5.897	0.683	-8.950	0.841	-0.045	0.750	0.000
4	CESM1-BGC	0.830	5.953	0.608	-8.923	0.850	-0.045	0.730	0.000
5	CESM1-CAM5	0.820	5.603	0.683	-9.703	0.850	-0.045	0.763	0.000
6	EC-EARTH	0.852	1.577	0.723	-9.805	0.844	-0.045	0.843	0.000
7	FIO-ESM	0.833	4.208	0.706	3.902	0.819	-0.045	0.863	0.000
8	GFDL-CM3	0.833	4.993	0.713	-2.126	0.837	-0.045	0.819	0.000
9	HadGEM2-AO	0.820	3.618	0.709	-4.911	0.863	-0.045	0.805	0.000
10	MPI-ESM-LR	0.811	2.474	0.721	-3.855	0.830	-0.045	0.852	0.000
11	MPI-ESM-MR	0.825	2.275	0.772	-3.748	0.840	-0.045	0.838	0.000

Nota. Se presenta los modelos GCM originales y escalados mediante escalamiento lineal y escalamiento de cuantiles para las variables de precipitación y temperatura.

Luego de aplicar el escalamiento estadístico a ambas variables, se evidencia una diferencia significativa en sus parámetros estadísticos, tal como se observa en las Figuras 16 y 18 para la precipitación, y en las Figuras 17 y 19 para la temperatura. En dichos gráficos se aprecia de manera clara la envolvente de color gris correspondiente a los datos antes de la corrección, así como la envolvente posterior al escalamiento, ambas comparadas con los datos observados, lo que permite evaluar visualmente la efectividad del proceso de corrección.

Figura 16

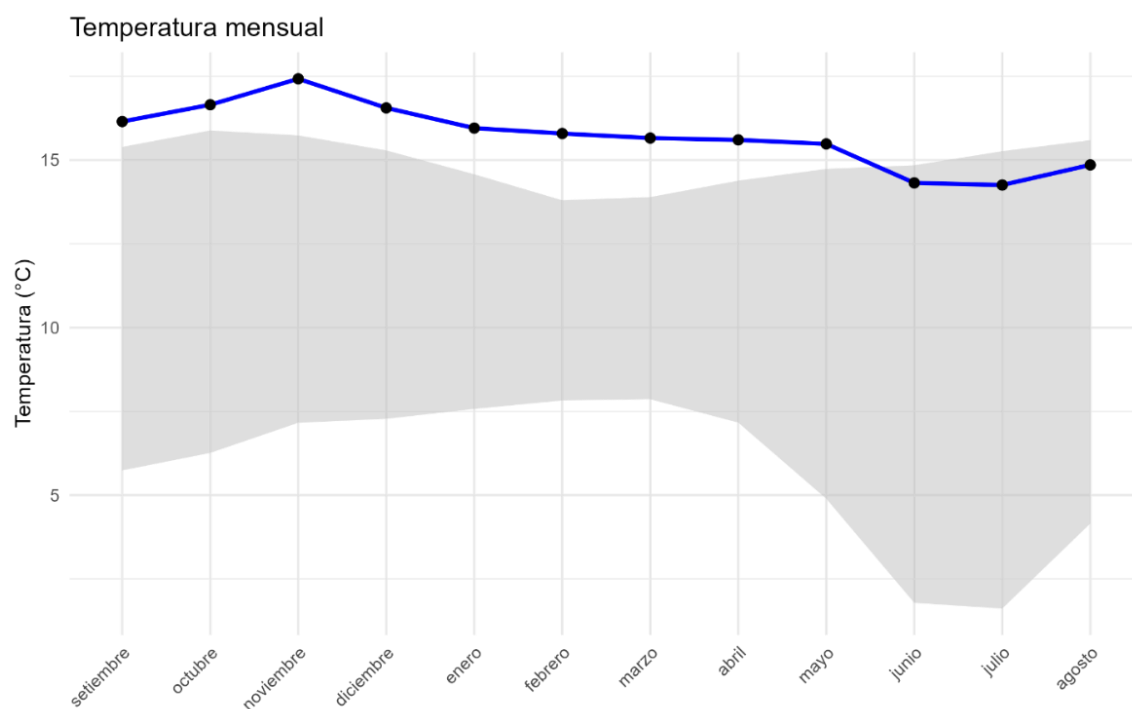
Datos de precipitación con envolvente GCM en un periodo 1981 al 2005



Nota. Elaboración propia mediante el uso del programa R estudio, muestra la envolvente en gris sobre los datos observados (modelos originales) y de color azul los datos PISCO para la variable de precipitación durante el periodo 1981-2005.

Figura 17

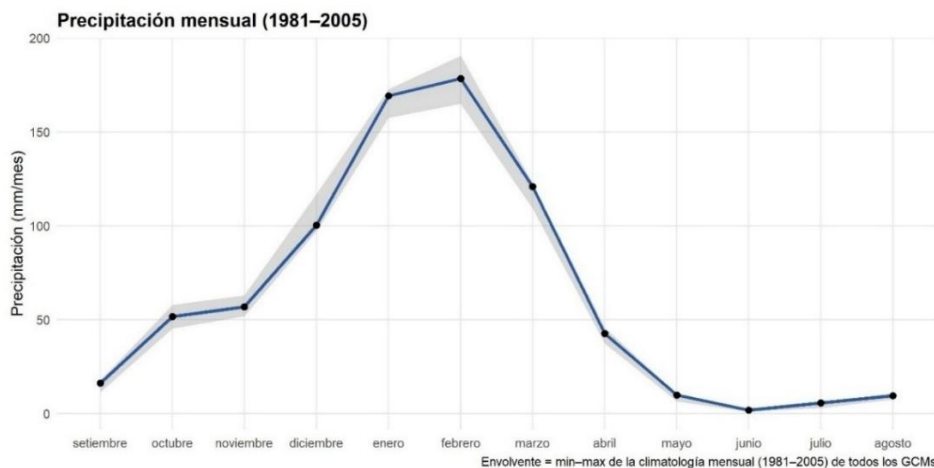
Datos de temperatura con envolvente GCM en un periodo 1981 al 2005



Nota. Elaboración propia mediante el uso del programa R estudio, muestra la envolvente en gris sobre los datos observados (modelos originales) y de color azul los datos PISCO para la variable de temperatura durante el periodo 1981-2005.

Figura 18

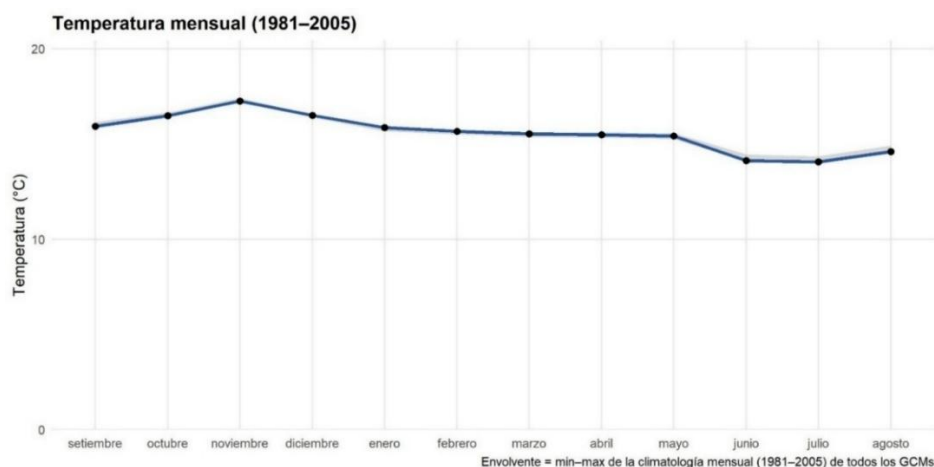
Datos de precipitación con envolvente GCM escalada estadísticamente en un periodo 1981 al 2005



Nota. Elaboración propia mediante el uso del programa R estudio, muestra la envolvente en gris sobre los datos observados (modelos escalados) y de color azul los datos PISCO para la variable de precipitación durante el periodo 1981-2005.

Figura 19

Datos de temperatura con envolvente GCM escalada estadísticamente en un periodo 1981 al 2005

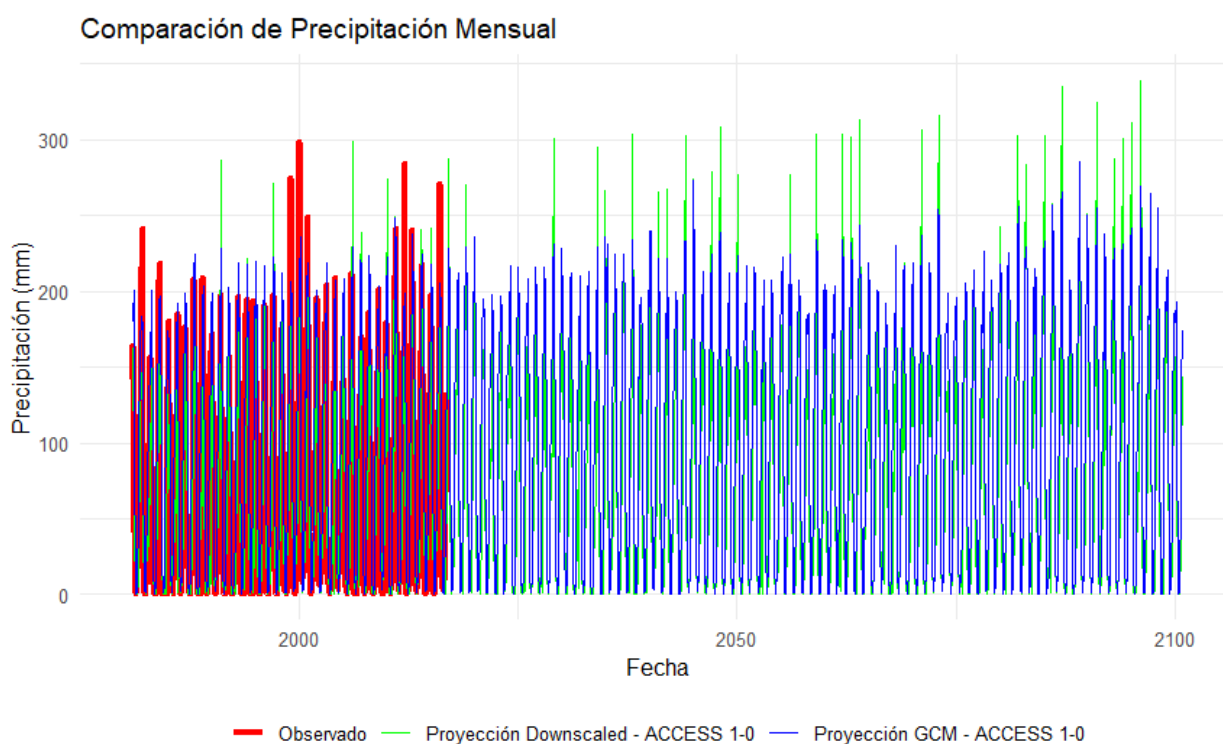


Nota. Elaboración propia mediante el uso del programa R estudio, muestra la envolvente en gris sobre los datos observados (modelos escalados) y de color azul los datos PISCO para la variable de temperatura durante el periodo 1981-2005.

En la figura 20 y la figura 21 se puede observar de mejor las líneas rojas los datos observados, de líneas verdes los datos GCM hasta el año 2100 y de líneas azules los datos escalados respecto a los datos observados.

Figura 20

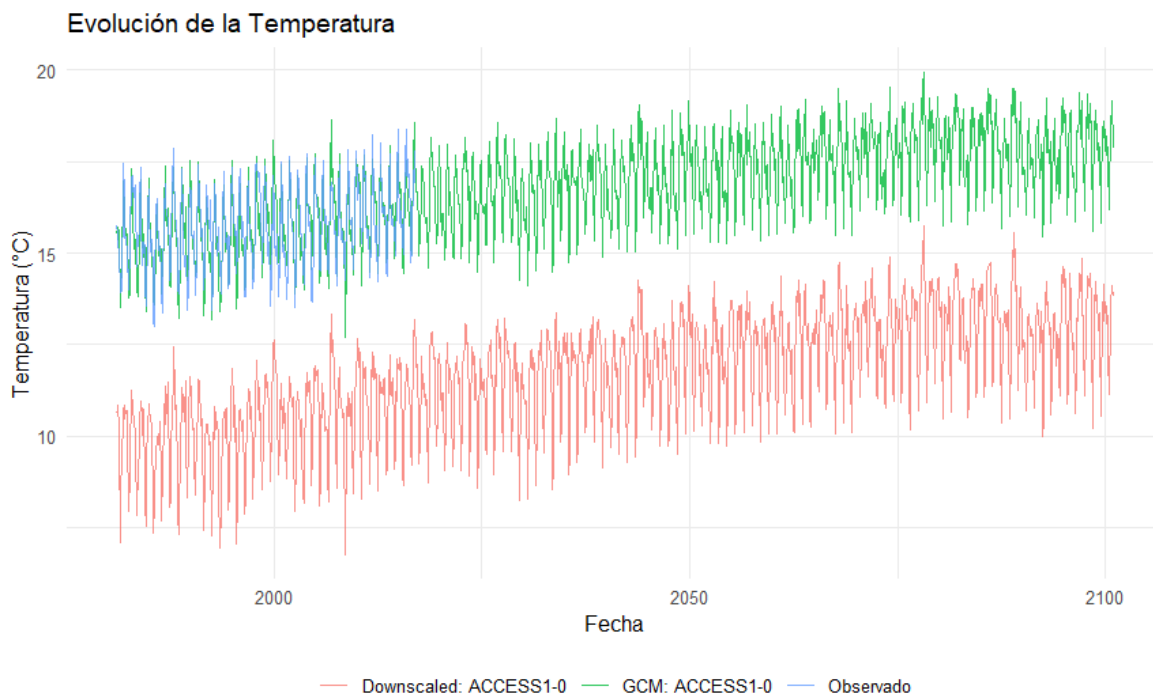
Ejemplo de un GCM escalado por mapeo de cuantiles para precipitación del modelo global ACCESS 1-0, en el escenario RCP 4.5



Nota. Ejemplo de la aplicación del escalamiento de mapeo de cuantiles (QM) para la variable de precipitación del modelo climático global ACCESS1-0, según el escenario RCP 4.5

Figura 21

Ejemplo de un GCM escalado por escalamiento lineal (LS) para temperatura del modelo global ACCESS 1-0, en el escenario RCP 4.5



Nota. Ejemplo de la aplicación del escalamiento de lineal (LS) para la temperatura del modelo climático global ACCESS1-0, escenario RCP 4.5.

5.1.3. Análisis de GCMs

Tras los resultados arrojados de la medición de sesgo de las variables estudiadas (PISCO) y los modelos 11 modelos simulados detallados en la tabla 13.

En la tabla 11 se muestra a detalle los valores de los modelos GCM originales, con la ayuda del coeficiente de correlación y BIAS calculados para su mejor lectura. Se llega a la conclusión que los datos GCM en contraste a los datos observados tienen una gran incertidumbre especialmente los modelos con la variable de temperatura como se muestran en la figura 16, en cuanto a los modelos para la variable de precipitación también muestran una incertidumbre bastante grande sin embargo no tan crítica como con la variable temperatura.

Tras el escalamiento estadístico (DOWNSCALING) se logró mejorar de gran manera los datos/resultados de los modelos GCM, se puede verificar en las ilustraciones 15 y 16.

Para los modelos de precipitación tras el escalamiento estadístico las variaciones oscilan entre 10 a 20 mm/mes durante los meses de diciembre enero y febrero, teniendo en cuenta que la verificación se realizó en el periodo de 1981 al 2016. Por el contrario, el resto del año los datos son más confiables, tener en cuenta que el valor BIAS durante todo el año es de -0.045 según la tabla 13, este resultado indica que el modelo subestima en mínima proporción a la variable (los datos observados según PISCO) pero al estar por debajo del 5% se considera que el desempeño del modelo es excelente en sesgo.

En cuanto a la variable de temperatura tras el escalamiento estadístico (DOWNSCALING) se puede observar en la figura 18 que la predicción de los GCM respecto a los datos observados es muy buena en todo el año, con ligeras variaciones durante los meses junio, julio y agosto que podrán variar en 1°C a menos. Este resultado se ve de mejor manera también en la tabla 13 en cual se muestra que el resultado de correlación ronda los 0.83 entrando en la categoría de una correlación fuerte y el valor Bias está en 0.00000000000000001645 significa que reproduce muy bien el promedio GCM.

5.2. Modelamiento hidrológico

Las variables necesarias para iniciar el modelamiento hidrológico GR2M son:

- Precipitación
- Evapotranspiración
- Caudal

La variable de evapotranspiración se obtuvo mediante el método de Oudin con ayuda de la temperatura media de la cuenca. La temperatura media y precipitación son datos que ya se cuentan (obtenidas con anterioridad del producto pisco), dicho modelo y calculo se realizó mediante el programa de lenguaje R.

5.2.1. Periodos de referencia

El modelamiento hidrológico por medio de GR2M tiene 3 periodos de referencia:

- Periodo de calentamiento: el periodo de calentamiento normalmente es recomendado de 1-2 años, tiene como finalidad para q el modelo se estabilice, pero aún no evalúa estadísticamente.
- Periodo de calibración: periodo en el cual se ajustan los parámetros X1 y X2 para el modelo, este modelo es recomendado que sea largo buscando que el modelo represente de mejor manera la relación lluvia-escorrentía. La optimización para los parámetros X1 y X2 de este periodo se realiza de acuerdo a los criterios que maneja el paquete airGR. El criterio Nash-Sutcliffe (NSE) tiene como finalidad el comprobar la fiabilidad de la eficiencia del modelo comparando la media del caudal simulado con el caudal observado. Al calibrar un modelo GR2M lo que se busca es que el NSE sea lo más cercano a 1. Pero valores como $\geq 0.65-0.70$ ya suelen considerarse satisfactorios en cuencas andinas.
- Periodo de validación: periodo independiente al resto, tiene como finalidad el de corroborar la transferibilidad del modelo. Es recomendado que de igual manera este modelo sea un lapso de tiempo largo.

Tabla 13

Periodos de referencia del modelo GR2M

Periodo	de	Hasta	MESES	% de datos
Calentamiento (WARM-UP)	1981	1982	24	5.55%
Calibración	1983	2000	216	50%
Validación	2001	2016	192	44.44%
		total	432	100%

Nota. Detalle de los periodos de referencia del modelo GR2M.

5.2.2. Calibración y validación del modelo hidrológico

El criterio de calibración con el que se trabajó para el modelo GR2M fue Nash- Sutcliffe (NSE), se llegó a realizar un total de 21 iteraciones y 93 corridas para poder obtener los mejores parámetros para X1 y X2 que son detallados en la tabla 16.

La tabla 15 que muestra la calibración del modelo se realizó por medio del criterio Nash- Sutcliffe (NSE), pero también se usó del modelo Kling Gupta (KGE) para poder tener una mejor validación de los datos en la calibración y validación llegando a dar los resultados mostrados en la figura 21.

Tabla 14

Eficiencia del modelo GR2M en la microcuenca Mariño

Periodo	NSE	KGE
Calibración 1983-2000	0.88277162	0.9266567
Validación 2001-2016	0.91986022	0.85150049

Nota. La tabla 15 muestra los valores obtenidos tras la calibración del modelo GR2M en los criterios Nash- Sutcliffe (NSE) y Kling Gupta (KGE).

Tabla 15

Parámetros del modelo GR2M

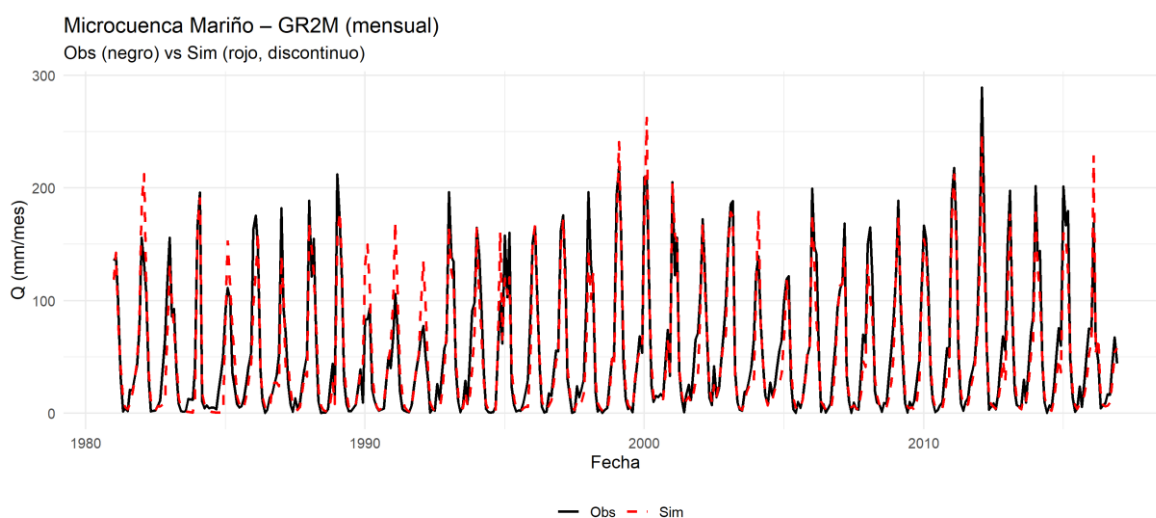
parámetro	valor
X1	0.00448133
X2	0.9025

Nota. Parámetros del modelo GR2M para la microcuenca Mariño.

El resultado de la simulación por medio del modelo hidrológico GR2M se muestra en la figura 22, donde se observa que el caudal observado con el simulado tiene una reproducción bastante similar con ligeras variaciones.

Figura 22

Modelamiento del caudal de la microcuenca Mariño por medio del modelo GR2M



Nota. La figura muestra una comparación de los datos obtenidos de PISCO y los generados por medio del modelo GR2M.

En la figura 23 se observa que los caudales observados tienen ligeras diferencias con los caudales simulados, los caudales bajos tienen una lectura bastante más acertada por el contrario los caudales altos tienen ligeras variaciones en el periodo de calibración.

La simulación de los caudales es bastante acertada con respecto al aumento de precipitaciones detallada en la parte inferior de la figura 23.

Tras el periodo de calibración se puede observar que en el periodo de validación del modelo GR2M simula mejor y tiene menores diferencias respecto al caudal observado. Al tener en cuenta los resultados se toma en cuenta los valores obtenidos y mostrados en las tablas 15 y 16 como muy buenos y bastante aceptables para las proyecciones.

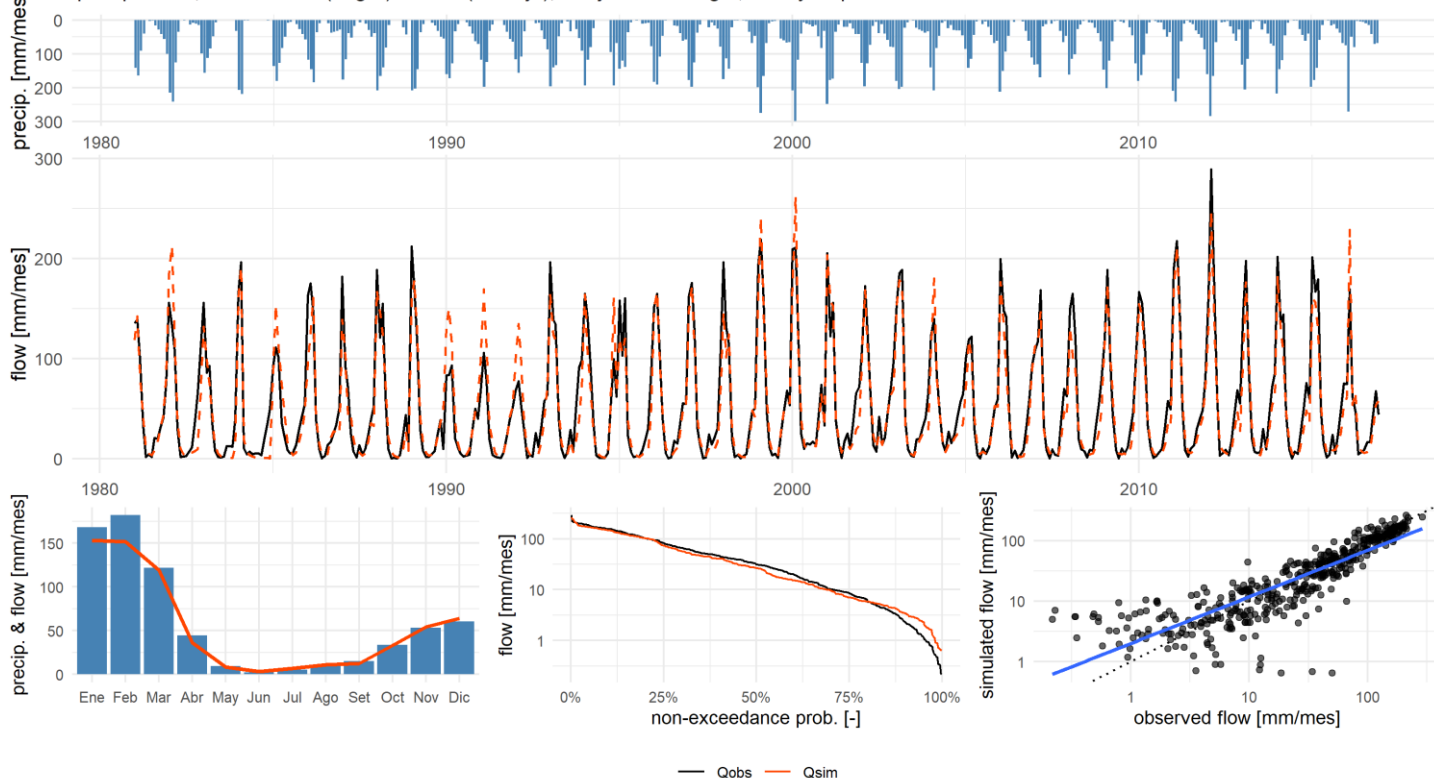
Las proyecciones futuras se realizan con los parámetros obtenidos de este modelamiento GR2M, los cuales son detalladas en la tabla 16.

Figura 23

Visualización de los resultados del GR2M y comparado con las precipitaciones y datos climatológicos

Microcuenca Mariño — GR2M (mensual)

Arriba: precipitación; Centro: Obs (negro) vs Sim (naranja); Abajo: climatología, FDC y dispersión



Nota. Elaboración propia mediante el uso del programa R estudio (paquete airGr), donde se obtuvo los resultados del caudal teniendo en cuenta los valores de temperatura y precipitación.

5.3. Proyecciones futuras

Las proyecciones futuras de las variables climáticas (caudales, precipitaciones y temperatura) se hizo para dos escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5 del modelo CMIP5 desglosado a más detalle en la figura 03, para el periodo de proyección hasta el año 2100.

En la figura 23 se muestra el aumento de temperatura, precipitación y caudal con el paso de los años, el aumento de temperatura especialmente concuerda con los estudios

realizados por el CMIP5.

El aumento de la temperatura en la zona de la microcuenca Mariño es inevitable siendo de hasta 1°C desde el año 2000 hasta la actualidad.

En el grafico de precipitaciones, se tiene un rango establecido de crecimiento de precipitaciones siendo de color verde el escenario RCP4.5 y de color azul el escenario RCP 8.5. para ambos escenarios se observa que los datos son bastante volátiles por periodos, pero con un crecimiento constante con el paso de los años.

De manera similar que el escenario de precipitaciones sucede con las proyecciones para caudales con una tendencia en crecida, en constante aumento a la par de las precipitaciones.

Figura 24

Proyección de las variables climáticas según escenarios RCP4.5 y RCP 8.5



Nota. La figura muestra la proyección para los 3 objetivos planteados inicialmente para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

5.4. Proyecciones por periodos

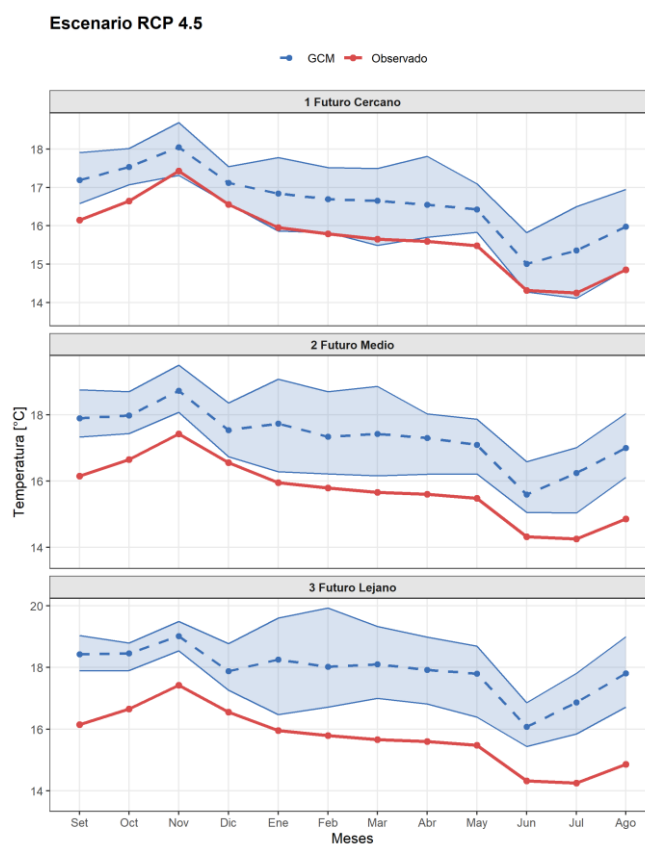
5.4.1. Proyecciones de temperatura

La proyección de la variable de temperatura en la microcuenca Mariño tiene una mayor fuerza y credibilidad al haber reaccionado mejor al escalamiento estadístico con los modelos GCM estudiados como se muestran en la imagen 16 y tabla 14.

Las figuras 24 y 25 muestran los resultados de la proyección para el escenario RCP 4.5 en un futuro cercano 2017-2040, medio (2041-2070) y lejano (2071-2100). De igual manera en la imagen 26 y 27 se muestran la proyección para los futuros cercano, medio y lejano para el escenario RCP8.5.

Figura 25

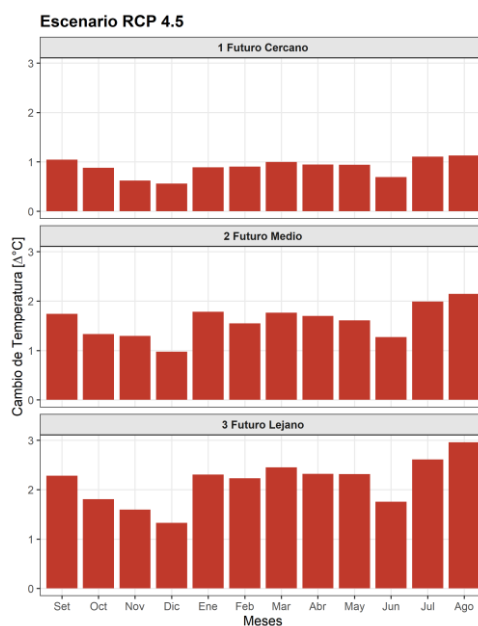
Comparaciones de la proyección de temperatura GCM y observada por meses para el escenario 4.5



Nota. Proyección de la temperatura en períodos futuros bajo el escenario RCP 4.5.

Figura 26

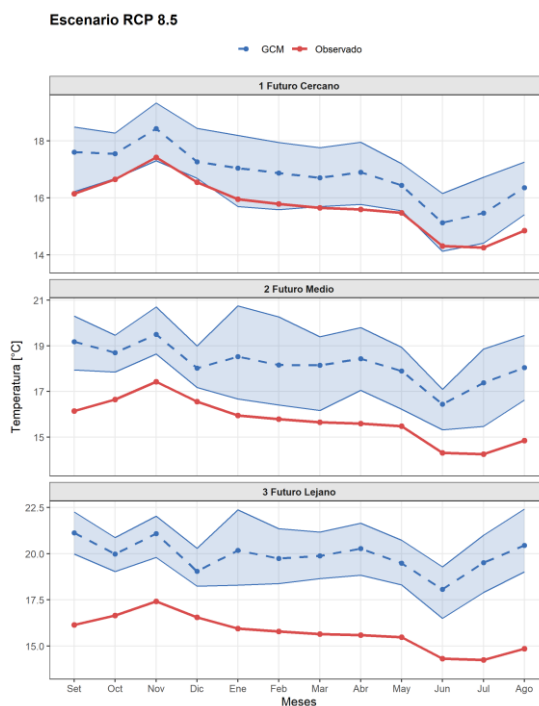
Comparación de la variación de temperatura GCM en el escenario 4.5



Nota. Proyección de la variación de temperatura en períodos futuros (escenario RCP 4.5)

Figura 27

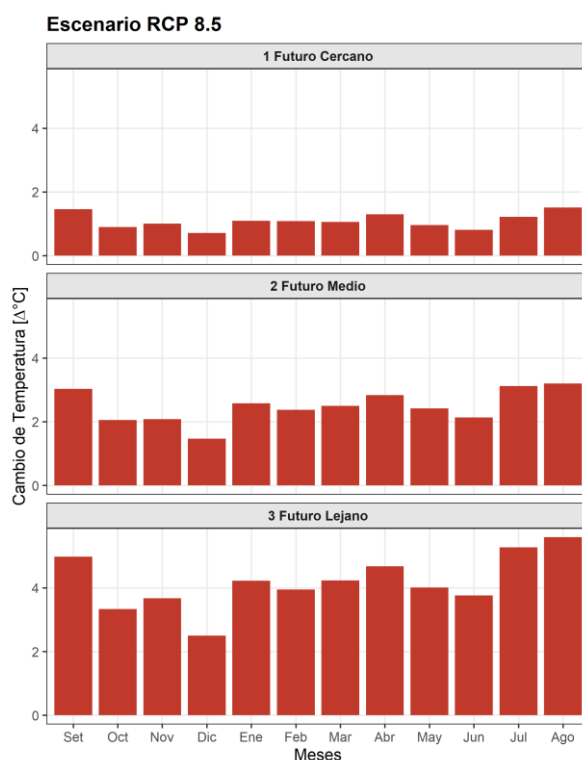
Comparaciones de la proyección de temperatura GCM y observada por meses para el escenario RCP 8.5



Nota. Proyección de la temperatura en períodos futuros bajo el escenario RCP 8.5.

Figura 28

Comparación de la variación de temperatura GCM en el escenario RCP 8.5



Nota. Proyección de la variación de temperatura en períodos futuros (escenario RCP 8.5).

Las proyecciones según el escenario RCP 4.5 como se muestra en la figura 25 y en la tabla 17 describen que el incremento de temperatura a un futuro cercano es de 0.89 °C anuales teniendo un aumento mayor de temperatura en los periodos de julio y agosto con 1.11°C y 1.13°C respectivamente, el aumento de temperatura va en crecimiento respecto al futuro medio con 1.6°C anuales y al futuro lejano con 2.16°C en el escenario RCP4.5.

Con respecto al escenario RCP8.5 los resultados arrojados son mayores, las imágenes 27 y 28 muestran el que el aumento de temperaturas tiene un crecimiento superior respecto al escenario RCP4.5. la tabla 17 muestra con valores numéricos el incremento de las temperaturas en promedio anual de 1.09°C en futuros cercanos y hasta 4°C en futuros lejanos, siendo los meses con mayor incremento de temperaturas los meses de julio y agosto.

Tabla 16*Valores de la variación de temperatura (°C) futura*

	PERIODO	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
RCP4.5	FC 2017-2040	1.04	0.88	0.62	0.56	0.89	0.9	1	0.95	0.94	0.69	1.11	1.13	0.89
	FM 2041-2070	1.74	1.33	1.3	0.97	1.78	1.55	1.76	1.7	1.61	1.27	1.99	2.15	1.6
	FL 2070-2100	2.28	1.81	1.59	1.33	2.3	2.23	2.45	2.32	2.31	1.75	2.61	2.96	2.16
RCP8.5	FC 2017-2040	1.46	0.9	1.01	0.71	1.09	1.08	1.06	1.3	0.96	0.81	1.22	1.51	1.09
	FM 2041-2070	3.03	2.05	2.08	1.47	2.58	2.38	2.5	2.84	2.42	2.13	3.12	3.2	2.48
	FL 2070-2100	4.98	3.34	3.67	2.49	4.22	3.95	4.23	4.68	4.01	3.76	5.26	5.59	4.18

Nota. Elaboración propia mediante el uso del programa EXCEL, la tabla 17 representa la variación mensual de la temperatura respecto a la actual.

5.4.2. Proyecciones de precipitaciones

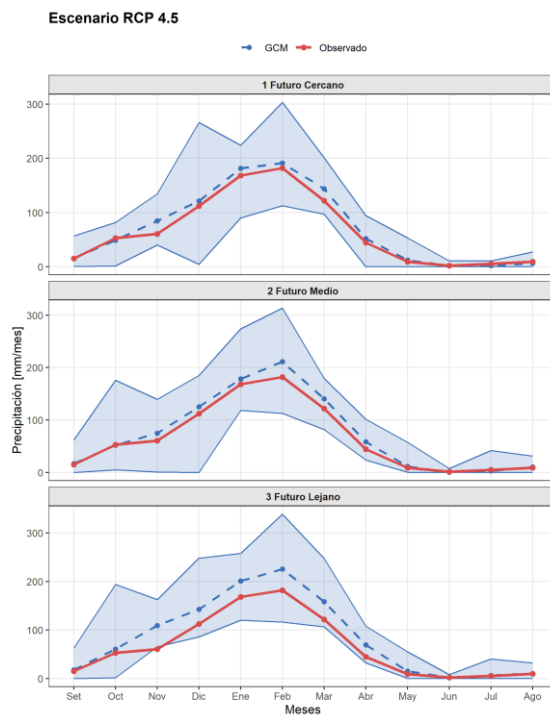
Las proyecciones futuras de las precipitaciones tienden ser menos exactas, tomadas más como tendencia posible. Siendo valores que varían bastante por la topografía, temperatura, región y escalas temporales, sin embargo, los resultados obtenidos logran mostrar una tendencia futura a corto mediano y largo plazo.

En la figura 26 se muestra las proyecciones y la variación que tendría las precipitaciones para el escenario RCP4.5 viéndose que las precipitaciones medias con las precipitaciones observadas tienen mayor incertidumbre durante los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril.

En la figura 29 se observa que la tasa de cambio de precipitación futura es superior en varios meses a comparación de la observada en un futuro cercano y medio.

Figura 29

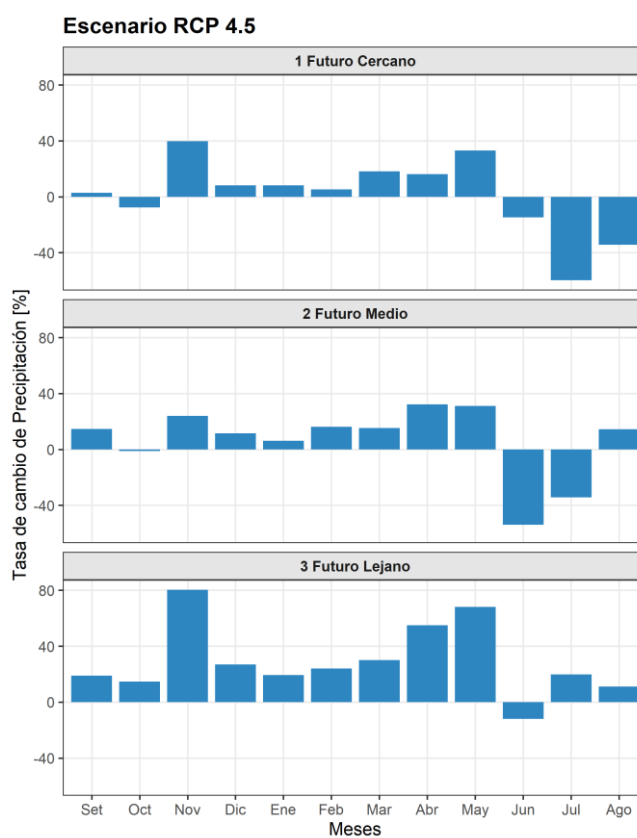
Comparaciones de la proyección de precipitación GCM y observada por meses para el escenario RCP 4.5



Nota. Proyección de las precipitaciones en períodos futuros bajo el escenario RCP 4.5.

Figura 30

Comparación de la variación de precipitación GCM en el escenario RCP 4.5

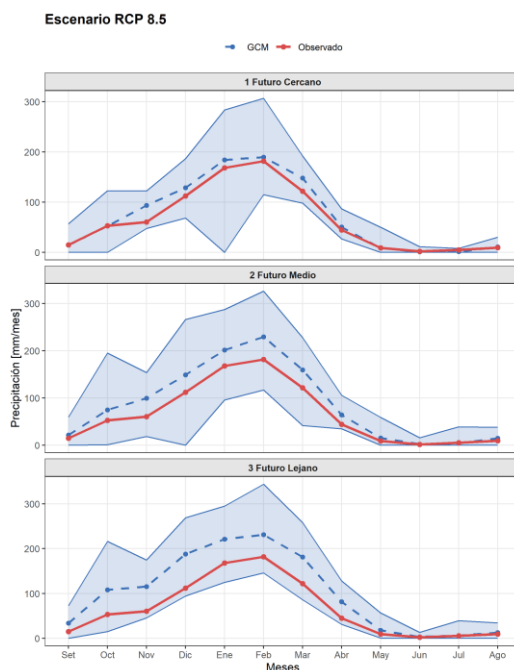


Nota. Proyección de la variación de precipitaciones en períodos futuros (escenario RCP 4.5).

La figura 30 muestra las proyecciones según el escenario RCP8.5 en el cual se observa el cambio de precipitación promedio para un futuro cercano, medio y lejano. La incertidumbre y variación de las precipitaciones en el escenario RCP8.5 son similares al escenario RCP 4.5 en los periodos cercanos y medios, por el contrario, en el periodo lejano se llega a observar un mayor incremento en la tasa de cambio de la precipitación en los meses de setiembre, octubre, noviembre y diciembre.

Figura 31

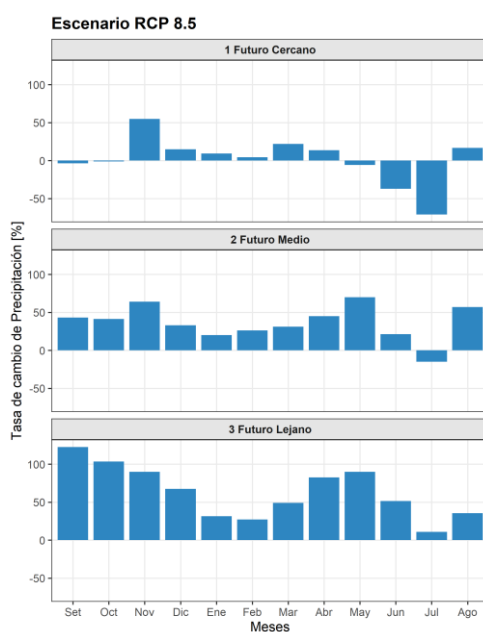
Comparaciones de la proyección de precipitación GCM y observada por meses para el escenario RCP 8.5



Nota. Proyección de las precipitaciones en períodos futuros bajo el escenario RCP 8.5.

Figura 32

Comparación de la variación de precipitación GCM en el escenario RCP 8.5



Nota. Proyección de la variación de precipitaciones en períodos futuros (RCP 8.5).

La tabla 18 nos muestra de mejor manera la variación de la precipitación en los tres periodos futuros (cercano, medio y lejano) por escenario. En el escenario RCP4.5 se tiene un aumento de precipitaciones de hasta un 33.2% en los meses de mayo y una reducción bastante fuerte en los meses de julio con un 59.7% y agosto con un 34.4%. La precipitación media anual en un futuro cercano muestra un crecimiento de un 1.2%, con un constante crecimiento en un futuro cercano medio con 6.3% y lejano con 29.7%. Los meses con mayor aumento de precipitaciones son los meses de noviembre con 80.3%, abril con 54.9% y mayo con 68% en un futuro lejano.

En el escenario RCP 8.5 siendo el escenario más crítico la precipitación anual se ve incrementada en un 1.4% en un futuro cercano, siendo los meses con mayor incremento de precipitaciones los meses de noviembre con 54.7% y marzo con 21.9%, la disminución de lluvia se verá afectada más en el mes de julio con 71%.

Para un futuro lejano el crecimiento de las precipitaciones tiende a subir hasta un 63.5%, siendo los meses más influenciados setiembre con 122.7%, octubre con 103.4% y noviembre con 90%, los valores se representan en la tabla 18.

Tabla 17*Valores de la variación de precipitación*

	PERIODO	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
RCP4.5	FC 2017-2040	2.7%	-7.6%	39.7%	8.2%	8.1%	5.2%	18.1%	16.2%	33.2%	-14.7%	-59.7%	-34.4%	1.2%
	FM 2041-2070	14.7%	-1.1%	23.9%	11.6%	6.1%	16.2%	15.4%	32.1%	31.1%	-54.0%	-34.4%	14.3%	6.3%
	FL 2070-2100	19.0%	14.5%	80.3%	27.0%	19.3%	24.0%	30.1%	54.9%	68.0%	-12.1%	19.9%	11.0%	29.7%
RCP8.5	FC 2017-2040	-3.6%	-1.3%	54.7%	14.9%	9.4%	4.2%	21.9%	13.7%	-5.7%	-37.1%	-71.0%	16.7%	1.4%
	FM 2041-2070	43.3%	41.4%	64.2%	33.1%	20.0%	26.3%	31.2%	45.0%	70.0%	21.5%	-15.0%	57.0%	36.5%
	FL 2070-2100	122.7%	103.4%	90.0%	67.5%	31.5%	27.2%	48.9%	82.5%	90.1%	51.6%	10.8%	35.5%	63.5%

Nota. Elaboración propia mediante el uso del programa EXCEL, la tabla 18 representa la variación mensual de las precipitaciones respecto a la actual.

5.4.3. Proyecciones de caudal

Como se definió anteriormente termino disponibilidad hídrica, está estrechamente relacionada con la escorrentía superficial (caudal) en la microcuenca Mariño. Uno de los fines de la investigación era determinar la oferta hídrica, la cual representa el total del volumen agua que es aprovechada para diversos usos.

En la figura 33 y 34 se puede observar la disponibilidad hídrica futura para el periodo más cercano, medio y lejano de la microcuenca Mariño.

Figura 33

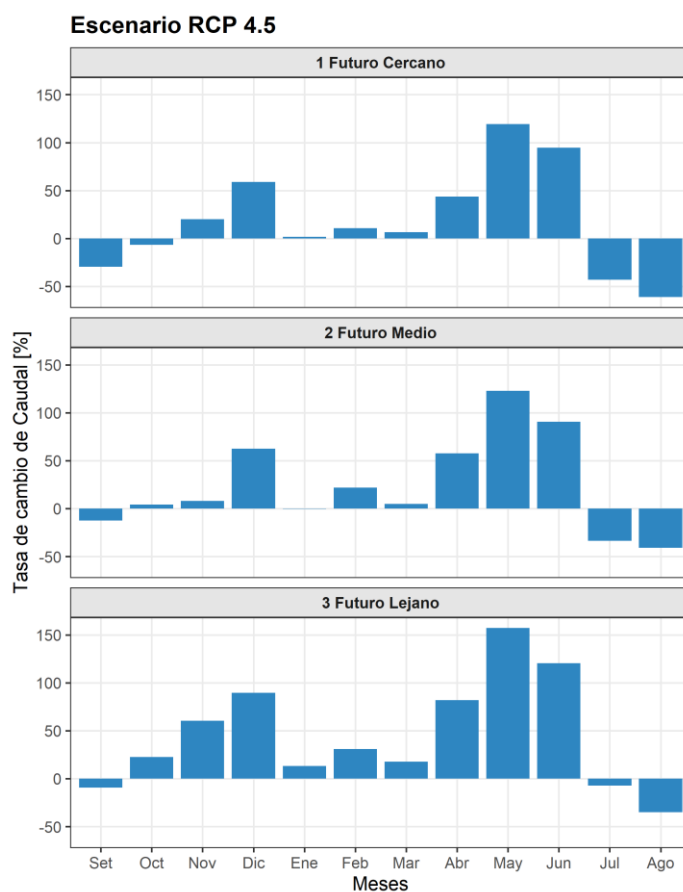
Comparaciones de la proyección de caudal GCM y observada por meses para el escenario RCP 4.5p



Nota. Proyección de los caudales en períodos futuros bajo el escenario RCP 4.5.

Figura 34

Comparación de la variación de caudal GCM en el escenario RCP 4.5

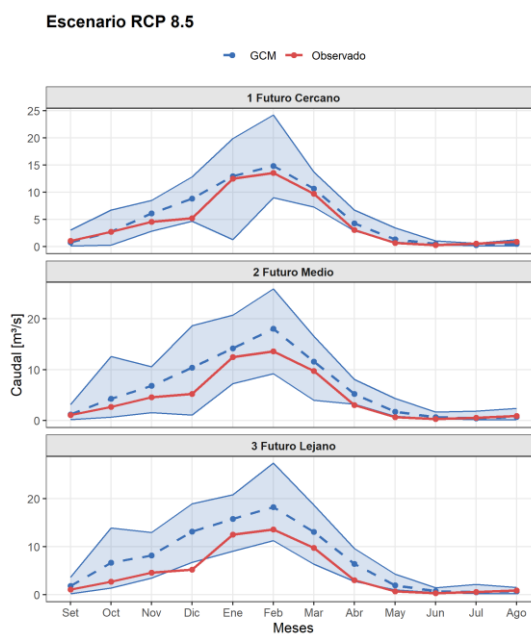


Nota. Proyección de la variación de precipitaciones en períodos futuros (RCP 4.5).

Para el escenario RCP 8.5 se muestra la figura 35 y 36 el cual tiene una oferta hídrica promedio bastante similar al menos en un futuro cercano al escenario RCP 4.5, por el contrario, en un futuro medio tiende a aumentar la oferta hídrica en los meses de noviembre a abril y mucho más en futuro lejano.

Figura 35

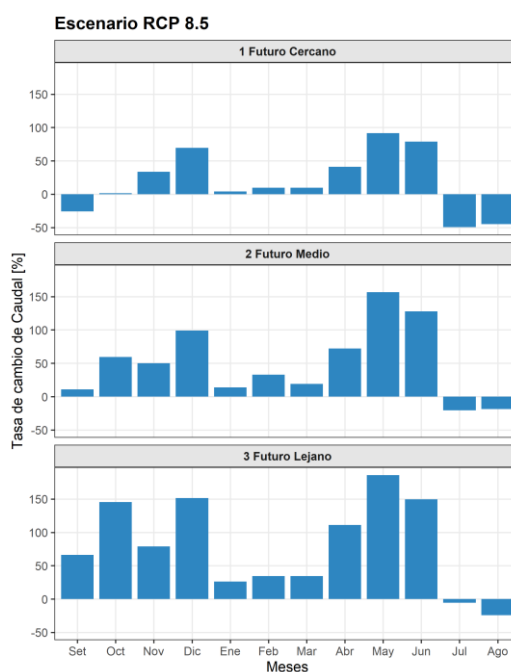
Comparaciones de la proyección de caudal GCM y observada por meses para el escenario RCP 8.5



Nota. Proyección de los caudales en períodos futuros bajo el escenario RCP 4.5.

Figura 36

Comparación de la variación de caudal GCM en el escenario RCP 8.5



Nota. Proyección de la variación de precipitaciones en períodos futuros (RCP 4.5).

En la tabla 19 se muestra más a detalle el porcentaje de aumento de disponibilidad hídrica durante los meses de noviembre a junio y una disminución constante de disponibilidad hídrica respecto a los meses de julio a octubre para un futuro cercano en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

El escenario RCP4.5 tiene un crecimiento de disponibilidad hídrica de hasta un 17.9% en un periodo futuro cercano, siendo principalmente los meses donde hay mayor crecimiento los meses de diciembre con 59%, mayo con 119.2% y junio con 94.7%. por el contrario, se observó una disminución durante los meses de julio con 42.9%, agosto con 61.2% y setiembre con 29.6%.

En un periodo futuro lejano el aumento de disponibilidad hídrica es bastante significativa en casi todo el año siendo los más críticos desde el mes de octubre hasta junio.

El escenario RCP8.5 en un futuro cercano tiene un aumento en la disponibilidad hídrica durante el mes de mayo principalmente con un 91.5% y una disminución de 49.4% en el mes de junio seguido de agosto con 44.7% llegando a conseguir un aumento en un periodo cercano de 18.3% y en un futuro lejano de hasta 79.5%.

Los cambios futuros en la disponibilidad hídrica son similares en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

Tabla 18*Valores de la variación de caudal*

PERIODO		Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
RCP4.5	FC 2017-2040	-29.6%	-6.7%	20.0%	59.0%	1.5%	10.7%	6.6%	43.6%	119.2%	94.7%	-42.9%	-61.2%	17.9%
	FM 2041-2070	-12.5%	4.1%	7.9%	62.5%	-0.3%	22.0%	4.8%	57.6%	122.7%	90.7%	-33.6%	-41.1%	23.7%
	FL 2070-2100	-9.3%	22.5%	60.3%	89.5%	13.3%	30.9%	17.8%	81.8%	157.2%	120.3%	-7.2%	-35.2%	45.2%
RCP8.5	FC 2017-2040	-25.7%	1.4%	33.7%	69.4%	4.0%	9.6%	9.8%	41.1%	91.5%	78.8%	-49.4%	-44.7%	18.3%
	FM 2041-2070	11.0%	59.3%	50.0%	99.0%	13.7%	33.1%	19.0%	72.2%	156.6%	127.7%	-20.4%	-18.7%	50.2%
	FL 2070-2100	66.4%	145.6%	79.1%	151.4%	26.2%	34.5%	34.4%	111.0%	185.9%	149.5%	-5.4%	-24.4%	79.5%

Nota. Elaboración propia mediante el uso del programa EXCEL, la tabla 19 representa la variación mensual de la temperatura respecto a la actual.

5.5. Discusión

El estudio realizado por Barranco et al. (2018), de enfoque cuantitativo tenía como finalidad la evaluación del impacto futuro del cambio climático de los recursos hídricos de España. El modelo hidrológico usado fue el de precipitación-escorrentía con 12 combinaciones de modelos climáticos en los 3 periodos futuros bajo los escenarios de RCP4.5-8.5. Los resultados arrojaron una disminución escorrentía según el escenario RCP4.5 de -3% (210-2040), -11% (2040-2070) y -13% (2070-2100), de igual manera para el escenario RCP8.5 los resultados fueron de -7% (2010-2040), -14% (2040-2070) y -24% (2070-2100). Llegándose a las conclusiones de que se es vulnerable a los cambios climáticos, que la reducción de la escorrentía media futura respecto al periodo de control 1961-2100 es resultado de las todas las simulaciones realizadas y las evaluaciones bajo los escenarios RCP8.5 muestran caídas más bruscas en la futura disponibilidad hídrica.

En comparación a la investigación realizada, la presente investigación emplea un método distinto siendo el modelo hidrológico GR2M, aunque el mismo enfoque metodológico. Los resultados obtenidos evidencian variaciones más grandes en la oferta hídrica, donde se proyectan incrementos de hasta el 17.9% y 45.2% bajo el escenario RCP4.5 así mismo dichas variaciones son aún más significativas bajo escenarios más graves como el RCP8.5 lo que refleja una mayor sensibilidad a la oferta hídrica.

Por otro lado, la investigación realizada por Olsson et al., (2017), fue realizada en la Cuenca costera del Perú en el río Chancay-Huaral. las series temporales de temperatura y precipitación usadas fueron 31 modelos de circulación general (GCM) en los escenarios RCP4.5-8.5. La corrección de los datos de sesgos y escalas de los GCM se realizó por el método de mapeo de cuantiles. El fin de su investigación era evaluar las variables de temperatura y precipitaciones con proyecciones a los años 2051-2080.

Sus resultados arrojaron el aumento de la temperatura de 1°C-4.8°C (en el escenario RCP4.5) y entre 1.9°C-5.2°C (en el escenario RCP8.5) en el periodo 2051-2080. Por otro

lado, la frecuencia de días húmedos aumentara ligeramente a finales de este siglo, según el escenario RCP4.5 y RCP8.5 proyectan similares futuros sin embargo el escenario RCP8.5 simula precipitaciones diarias mucho más fuertes rozando el 41% superiores al escenario RCP4.5. En relación con la investigación realizada ambos estudios realizaron la corrección de sesgos y escalas por medio del mapeo de cuantiles para los datos de precipitaciones, sin embargo, también se añadió la corrección por medio del escalamiento lineal para los datos de temperatura. los resultados arrojados para la temperatura tienen una variación de 1°C., por otro lado, las precipitaciones con proyecciones al año 2100 en el escenario RCP4.5 tiende a llegar hasta un 68% y el escenario RCP8.5 hasta un 122.7% en las temporadas de lluvias altas.

La investigación realizada por Rodas, (2022). se realizó con el modelo climático GR2M para poder determinar la disponibilidad hídrica teniendo en cuenta el cambio climático para los escenarios RCP4.5-8.5 se realizó proyectando las precipitaciones y temperatura, posteriormente obteniendo los datos de la evapotranspiración por el medio del método Oudin.

Los resultados obtenidos por Rodas en la cuenca Caplina dan a conocer que la disponibilidad hídrica en la cuenca Caplina disminuiría de un 6.7% en el mejor escenario (RCP4.5) y hasta un 8.8% en es el peor escenario (RCP8.5). En las precipitaciones se observó un aumento de precipitaciones de hasta un 91.5% en periodos de lluvia alta para escenarios de RCP4.5 y disminución de precipitaciones de hasta 38.8% en periodos de sequía (enero-febrero). Con respecto a la temperatura se obtendrá hasta un incremento de 3.14°C para el mejor escenario (RCP4.5) y hasta un 5.6°C para el peor escenario (RCP8.5).

En contraste con mi investigación los datos obtenidos son bastante similares en cuanto a la temperatura obtenida, sin embargo, las precipitaciones observadas varían en gran medida teniendo en cuenta que la cuenca Caplina se encuentra en la parte fronteriza del Perú y por el contrario la microcuenca Mariño en la parte céntrica del sur del Perú. en

cuanto a la oferta hídrica la cuenca Caplica presenta una disminución de menos del 10% en el peor de los escenarios anualmente por el contrario la microcuenca Mariño presenta un crecimiento de la oferta hídrica anualmente de hasta un 45.2% al año 2100 en el mejor de los casos.

La oferta hídrica varía entre cuencas debido a que cada cuenca presenta condiciones climáticas, físicas, hidrológicas y de uso de territorio distintas las cuales determinan la cantidad de uso diferente para cada una.

VI. Conclusiones

1. Los resultados de la investigación dan a conocer que en todas las proyecciones la oferta hídrica tiende a aumentar, tanto es así que en el escenario RCP4.5 la oferta hídrica presenta un aumento de hasta un 45.2% y para el escenario RCP8.5 presenta un crecimiento de hasta un 79.5% proyectadas al año 2100.
2. Los resultados obtenidos de las proyecciones de la temperatura en distintos periodos futuros son:
 - Futuro cercano (2017-2040): RCP4.5(0.89°C) RCP8.5(1.09°C)
 - Futuro medio (2041-2070): RCP4.5(1.6°C) RCP8.5(2.48°C)
 - Futuro lejano (2070-2100): RCP4.5(2.16°C) RCP8.5(4.18°C)

Los resultados indican que no se registran disminuciones de temperatura mensuales respecto a años anteriores. En un futuro cercano se observan aumentos moderados de temperatura con un crecimiento constante a un futuro lejano, las proyecciones muestran valores significativamente mas elevados para el escenario RCP8.5.

Estos resultados confirman que a largo plazo el escenario RCP8.5 generará un impacto térmico más severo, lo cual influirá de manera significativa en los procesos hidrológicos de la cuenca, afectando la oferta hídrica de la cuenca.

3. Los resultados obtenidos de las proyecciones de la precipitación en distintos periodos futuros son:
 - Futuro cercano (2017-2040): RCP4.5(1.2%) RCP8.5(1.4%)
 - Futuro medio (2041-2070): RCP4.5(6.3%) RCP8.5(36.5%)
 - Futuro lejano (2070-2100): RCP4.5(29.7%) RCP8.5(63.5%)

Los resultados muestran un crecimiento sustancial respecto al año 2100 siendo el más optimista el escenario RCP4.5., los resultados se encuentran dentro de las proyecciones del IPCC AR5.

Las proyecciones de precipitación mensual muestran un incremento progresivo en los distintos periodos futuros como se encuentra detallado en la tabla N° 18, con diferencias marcadas entre los dos escenarios RCP. Los aumentos proyectados son leves lo que sugiere un impacto limitado sobre la oferta hídrica (bajo el escenario RCP4.5) en proyecciones de futuro corto, en contraste en el futuro lejano las precipitaciones se intensifican alcanzando valores elevados en especial bajo el escenario RCP8.5 dando como resultado una mayor disponibilidad hídrica potencial en los meses con venidas altas. Estos resultados muestran una mayor variabilidad hidrológica, dando a concluir que es necesario una adecuada gestión de los recursos hídricos frente a escenarios del cambio climático.

4. Los resultados obtenidos de las proyecciones la oferta hídrica en distintos periodos futuros es:

- Futuro cercano (2017-2040): RCP4.5(17.9%) RCP8.5(18.3%)
- Futuro medio (2041-2070): RCP4.5(23.7%) RCP8.5(50.2%)
- Futuro lejano (2070-2100): RCP4.5(45.2%) RCP8.5(79.5%)

La oferta hídrica presentara un aumento considerable, cabe recalcar que los datos proporcionados en cuanto a oferta hídrica(caudales) está relacionada y dependen en gran medida de las precipitaciones, temperatura, evapotranspiración y otros factores. Según datos obtenidos de la investigación la oferta hídrica crecerá en casi 20% hasta el 2040, sin embargo, la disminución de oferta hídrica crecerá en gran medida en los meses de sequía (julio, agosto y setiembre) en más del 30% según el escenario RCP4.5 y según el escenario RCP8.5 viene a ser más crítico las sequias en algunos meses, pero el aumento de la oferta hídrica anual tiene un crecimiento de más de un 17%.

VII. Recomendaciones

- Se recomienda incorporar los resultados de las proyecciones de oferta hídrica en la planificación de la gestión del recurso hídrico, fortalecer las medidas de adaptación al cambio climático, conservar las zonas de recarga hídrica, mejorar el monitoreo hidro climático y promover estudios complementarios que permitan una gestión sostenible del agua en la microcuenca Mariño.
- Se recomienda a las autoridades encargadas de los recursos hídricos ampliar y mejorar el monitoreo hidro climático en la microcuenca.
- Se recomienda a las futuras investigaciones actualizar periódicamente los estudios relacionados a la oferta hídrica utilizando nuevos escenarios climáticos y modelos hidrológicos a fin de reducir la incertidumbre y mejorar la toma de decisiones futuras.
- Para la lectura y descripta miento de datos se recomienda usar Python, especialmente para datos dados por PISCO y los datos publicados por KNMI climate explorer (modelos GCM) sobre largos periodos de años para poder tenerlos más ordenados y de mejor manera, estas páginas te proveen de información en archivos NC (Formato científico estandarizado de datos climáticos multidimensionales (lat., Lon, tiempo)).
- Los datos solicitados a SENAMHI presentan siempre deficiencias en varias estaciones (falta de datos en meses o años sin tener lecturas), se recomienda solicitar información de estaciones cercanas y tener la mayor información de estas para poder tener una mejor lectura y si es necesario realizar una mejor interpolación con más datos.
- Para la selección de los GCM es recomendable verificar bien y estudiar bien las variables de selección que tomes en cuenta.
- Es recomendable trabajar con lenguaje R para el modelamiento hidrológico para tener una mejor y limpia corrección con técnicas de escalamiento de los datos GCM

que se seleccionen para trabajar.

- Se recomienda la continuación de la investigación y posteriormente una actualización teniendo en cuenta los nuevos informes presentados por el IPCC.

VIII. Referencias

- Allen, M., et al.. (2019). *Special Report: Global Warming of 1.5 °C*. IPCC. Doi:
<https://doi.org/https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Allen, R, et al. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 98, 899–920.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>
- Amina, Z., et al.. (16 de diciembre de 2024). Climate change impacts on the Chiffa basin (northern Algeria) using bias-corrected RCM data. *Frontiers*, 6. Doi:
<https://doi.org/https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1507961>
- Arias, P., et al.. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 75-96.
<https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/344493/20805341>
- Aybar, C., et al.. (2017). *Uso del Producto Grillado PISCO de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas de monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico*. *Senamhi*, 5-7. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/260>
- Barranco, L., et al.. (28 de Diciembre de 2018). *Nueva evaluación del impacto futuro del cambio climático en los recursos hídricos en España*.
<https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2354>
- Berdillana, R., et al.. (2019). *Estudio Tarifario. Abancay: Estudio Tarifario de la EPS EMUSAP Abancay S.A.C.*
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6780105/5874186-estudio-tarifario-de-la-emusap-abancay-s-a-c-2019-2024.pdf?v=1723731343>
- Beven, K. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

- Burrough, P. y McDonnell, R. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- Cabrera , J. (2017). Modelos Hidrológicos, *Universidad Nacional de Ingeniería*.
https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf
- Cabrera, J. (2012). Calibración de Modelos Hidrológicos, *Universidad Nacional de Ingeniería*. https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Cammalleri, C., et al.. (2020). *Diverging hydrological drought traits over Europe with global warming*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(12), 5919–5935.
<https://doi.org/10.5194/hess-24-5919-2020>
- Campos, L., (2021). *Aplicacion de los modelos hidrológicos* [Tesis de pregrado para ingeniería, Universidad San Ignacio de Loyola]. Repositorio Institucional.
<https://hdl.handle.net/20.500.14005/11637>
- Castillo, M., et al.. (2020). *Hidrología aplicada a ingeniería de ríos*. Instituto Politécnico Nacional, Mexico.
- Chilès, J.-P. y Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty* (2nd ed.). Wiley.
- Chow, V., et al.. (1994). *Hidrologia Aplicada*. Editorial McGraw-Hill, Colombia
- Conors , S., et al.. (2021). *Cambio Climatico 2021: Un resumen para todo el mundo*. IPCC, 6-8.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll_Spanish.pdf
- Coron, L., et al.. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software*, 94, 166–179. Doi:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>

Decreto Supremo N°149-2022-PCM. (23 de 12 de 2022). *El Peruano*, págs. 8-10.

EMUSAP. (2020). *Plan Maestro Optimizado III Quinquenio-2020*. Abancay: EPS

EMUSAP Abancay S.A. <https://emusapabancay.com.pe/wp-content/uploads/2024/08/PLAN-MAESTRO-OPTIMIZADO-III-QUINQUENIO.pdf>

Fang, G., et al.. (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, 9(6), 2547–255. Doi:

<https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture*. FAO.

Garcia, A. (24 de julio de 2024). *Ecología Verde* . <https://www.ecologiaverde.com/por-que-el-agua-es-un-recurso-renovable-pero-limitado-1449.html>

Giorgi, F. (2019). Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next?. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(11), 5696–5723. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018JD030094>

Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press.

Graham , S., et al.. (2010). *Environmental Science: Understanding Our Changing Earth*.

(R. Quintero Bolaños , Ed.) Publicaciones Calameo.

<https://www.calameo.com/books/003324358a495f9dcd03d>

Granados, J. (2019). La incertidumbre en los informes sobre cambio climático: ¿un motivo para dudar?. *The Conversation*. <https://theconversation.com/la-incertidumbre-en-los-informes-sobre-cambio-climatico-un-motivo-para-dudar-120389>

Gudmundsson, L., et al.. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods.

Hydrology and Earth System Sciences, 16(9), 3383–3390.doi:

<https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>

Hernández, R., y Mendoza, T, (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* . McGRAW-HILL Interamericana Editores, S.A. de C. V.

Hernández, S., Fernández, C., y Baptista, L. (2022). *Metodología de la investigación (7.ª ed.)*. McGraw-Hill.

Hoesung Lee (Presidente), K. C. (2023). *Cambio Climático 2023*. IPCC.

Hoffmann, D. (2012). Serie de los viernes: Los modelos climáticos. *Cambio Climático Bolivia*. Fundación Instituto Boliviano de la Montaña. https://www.cambioclimatico-bolivia.org/index-cc.php?cod_aporte=88#:~:text=Modelos%20clim%C3%A1ticos%20globales%20o%20%22modelos,GCM%20%2D%20Global%20Circulation%20Models

INDECI-COEN. (2023). Informe de emergencia N°253-23/2/2023/COEN-INDECI/21:59. Lima: INDECI.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland.

Thiemeßl, M., et al. (2011). *Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models*. The Royal Meteorological Society, 31(10), 1530–1544. Doi: <https://doi.org/10.1002/joc.2168>

Lenderink, Buishand, A., y Deursen, V. (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. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>

- Lozano, P., Alvarez, M., y Moggiano, N. (2021). Climate change in the Andes and its impact on agriculture: a systematic review. *Scientia Agropecuaria*, Universidad Continental, 101-106.
<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/3341/4048>
- Li, J., y Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173–189.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Maraun, D., et al.. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3). doi:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2009RG000314>
- Moriasi, D., et al.. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
<https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mouelhi, S., et al.. (2006). Desarrollo paso a paso de un plan mensual de dos parámetros modelo de balance hídrico. *Journal of Hydrology*. 18(1–4), 200–214.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>
- Olsson, T., et al.. (2017). Downscaling climate Projections for the Peruvian coastal ChancayHuaral Basin to support river discharge modeling with WEAP. *Journal of Hydrology*, 27-35.
- Organización Meteorológica Mundial. (2018). *Guide to climatological practices* (WMO-No. 100). WMO.
- Otaya, B., et al.. (2008). Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* , 61(01), 1-5.
- Oudin, L., et al.. (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. Doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>

Pachauri, R., et al.. (Presidente), M. R. (2014). *Cambio climático 2014. IPCC*. Cambridge University Press.

Presidencia de la República del Perú. (2009, 8 de febrero). *Decreto Supremo N.º 004-2009-AG, declaran agotados los recursos hídricos* (pp. 1–3). Diario Oficial El Peruano.

Perrin, C., Michel, C., y Andréassian, V. (2008). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275–289. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.002>

Pörtner, H., et al.. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. IPCC*. Cambridge University Press.

Rajendra, K. y Meyer, L. (2015). *Cambio Climático 2014, IPCC*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

Ramirez, B. (2023). *Análisis de fuentes de incertidumbre en los modelos climáticos CMIP6 para las proyecciones climáticas de temperatura y precipitación en Sudamérica*. [tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6394685>

Rivas, T. (2017). *Elaboracion de una tesis - Estructura y metodologia*. Editorial Trillas .

Rodas, G., (2022). *Evaluación del cambio climático y su efecto en la disponibilidad hídrica futura de la cuenca Caplina - Tacna* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería.] Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22538>

Senamhi. (2018). *Boletín Climático Nacional*. Senamhi, 1-14.

Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data.

En D. SHEPARD, Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference (págs. 517–524). *National Conference*. Doi:

<https://doi.org/https://doi.org/10.1145/800186.810616>

Sierra, P. (2017). *Evaluación de la disponibilidad hídrica glaciar del nevado Ampay en los periodos de 1986 al 2017 y con una tendencia al 2050 en la microcuenca del río Mariño de la provincia de Abancay - Apurímac año 2017* [Tesis de pregrado, *Universidad Alas Peruanas*]. Repositorio Institucional.

<https://hdl.handle.net/20.500.12990/4532>

Smith, I. (19 de Julio de 2023). Las temperaturas más cálidas de la historia: ¿cómo se comparan los países europeos?. *EuroNews*.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. y Kiehl, J. (2018). *Earth's global energy budget*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 311–323.

Villate, C., et al.. (2023). *Empleo de herramientas SIG en el desarrollo de proyectos Civiles* (Universidad Pedagógica y Tecnológica De Colombia). Editorial UPTC.

<https://librosaccesoabierto.uptc.edu.co/index.php/editorial-uptc/catalog/book/347>

Villon, B., (2004). *Hidrología*. Tecnología de Costa Rica.

Wahba, G. (1990). *Spline models for observational data*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Zamora, M., (2015). Cambio climático. *Rev. mex. de cienc. forestales*, 6(31), 1-5.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes