

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y AMBIENTALES**



Análisis hidrológico en la subcuenca Yuracyacu ante un escenario de cambio de uso de suelo al año 2030 aplicando el modelo SWAT

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AGRARIO CON MENCIÓN FORESTAL

AUTOR

Thalia Isabel Mori Coba

ASESORES

Claudia Daniela Ramos Delgado

Gary Chota Loayza

Rioja, Perú

2024

## METADATOS COMPLEMENTARIOS

### Datos del autor

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

### Datos del asesor

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (obligatorio)	

### Datos del Jurado

#### Datos del presidente del jurado

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

#### Datos del segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

#### Datos del tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

**Datos de la obra**

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma (Normal ISO 639-3)	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

\*Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesoro).

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS****ACTA N° 051 - 2024/UCSS/FCAA/DI**

Siendo las 10:00 a.m. del 04 de noviembre de 2024 a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis integrado por:

- |                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| 1. Maximiliana Irene Castro Medina | presidente      |
| 2. Hector Andres Agosto Otero      | primer miembro  |
| 3. Marilu Tovar Baca               | segundo miembro |
| 4. Claudia Daniela Ramos Delgado   | asesor(a)       |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada:

**Análisis hidrológico en la subcuenca Yuracyacu ante un escenario de cambio de uso de suelo al año 2030 aplicando el modelo SWAT**

Que presenta el bachiller en **Ciencias Agrarias con Mención Forestal**:

**Thalia Isabel Mori Coba**

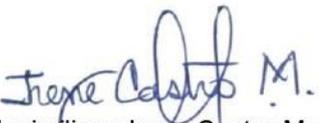
Cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Agrario con Mención Forestal**.

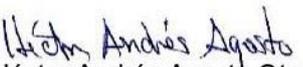
Terminada la sustentación y luego de deliberar, el jurado acuerda:

APROBAR	<b>X</b>
DESAPROBAR	...

La tesis, con el calificativo de **BUENA** y eleva la presente acta al decanato de la **Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales**, a fin de que se declare EXPEDITA para conferir el TÍTULO de INGENIERO AGRARIO CON MENCIÓN FORESTAL.

Lima, 04 de noviembre de 2024.

  
Maximiliana Irene Castro Medina  
Presidente

  
Héctor Andrés Agosto Otero  
1° miembro

  
Marilú Tovar Baca  
2° miembro

  
Claudia Daniela Ramos Delgado  
Asesor(a)

**Anexo 2****CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO**

Lima, 03 de noviembre de 2024

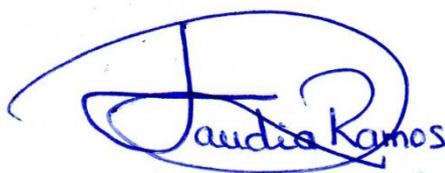
Señor(a),  
Wilfredo Mendoza Caballero  
Jefe del Departamento de Investigación  
Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis** / informe académico/ trabajo de investigación/ trabajo de suficiencia profesional, bajo mi asesoría, con **título: Análisis hidrológico en la subcuenca Yuracyacu ante un escenario de cambio de uso de suelo al año 2030 aplicando el modelo SWAT**, presentado por Thalia Isabel Mori Coba, con código de estudiante 2013102152 y DNI 73642647 para optar el **título profesional**/grado académico de Ingeniero Agrario con mención Forestal ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 3 % (tres por ciento)**. Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, reading 'Claudia Ramos', is written over a horizontal line.

**Firma**

**Claudia Daniela Ramos Delgado**

DNI N°: 43118973

ORCID: 0000-0002-2627-2907

Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales - UCSS

\* De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.

## **DEDICATORIA**

A mi madre, quien me guio por el camino del bien y estuvo presente en todo momento brindándome su apoyo incondicional.

Con gratitud, amor y cariño a Gary y Annie.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme la vida, salud y fortaleza para cumplir todos mis objetivos propuestos.

A mis asesores por su apoyo incondicional para el desarrollo de esta investigación.

Al Ing. Percy Troya Palomino quien en vida también formó parte de esta investigación.

Al SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), por brindarme las facilidades para hacer posible esta investigación.

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE APÉNDICES .....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Bases teóricas especializadas.....	8
1.2.1. Aspectos generales de la subcuenca Yuracyacu.....	8
1.2.2. Climatología .....	10
1.2.3. Ciclo hidrológico .....	10
1.2.4. Descripción del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) .....	11
1.2.5. Descripción del Modelo SWAT-CUP .....	14
1.2.6. Modelos Predictivos de Cambio de Suelos .....	14
1.2.7. Cambio climático.....	14
1.2.8. Modelos de Circulación General (MCG) .....	16
1.2.9. La herramienta MARKSIM GCM.....	17
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
2.1. Diseño de la investigación .....	19
2.2. Lugar y fecha .....	19
2.3. Población y muestra.....	22
2.4. Técnicas e instrumentos.....	22
2.4.1. Información geográfica.....	22
2.4.2. Información meteorológica .....	23
2.4.3. Características generales del área de estudio.....	25
2.5. Descripción de la investigación .....	25
2.5.1. Metodología.....	25

2.6. Identificación de variables y su mensuración .....	46
2.7. Análisis de datos .....	47
2.8. Materiales y equipos .....	47
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
3.1. Generación de información sobre cambio de uso de suelo para el periodo 2030 en la subcuenca Yuracyacu, mediante Teledetección y herramientas SIG .....	48
3.2. Establecimiento del modelo calibrado en función a las Unidades de Respuesta Hidrológica con el modelo SWAT .....	49
3.2.1 Ejecución del modelo SWAT .....	49
3.2.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico.....	53
3.3. Generación de información climática en la subcuenca Yuracyacu para el periodo 2030, usando modelos de circulación general (MCG) .....	58
3.3.1 Análisis de información meteorológica .....	58
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIONES .....</b>	<b>68</b>
4.1. Generar información sobre cambio de uso de suelo para el periodo 2030 en la subcuenca Yuracyacu, mediante Teledetección y herramientas SIG .....	68
4.2. Establecer el modelo calibrado en función a las Unidades de Respuesta Hidrológica con el modelo SWAT .....	71
4.2.1 Ejecución del modelo SWAT .....	72
4.2.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico.....	72
4.3. Generar información climática en la subcuenca Yuracyacu para el periodo 2030, usando modelos de circulación general (MCG) .....	74
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>79</b>
<b>TERMINOLOGÍA .....</b>	<b>92</b>
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>94</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Descripción de los modelos de circulación general que incluye MarkSim</i> .....	18
Tabla 2. <i>Información geográfica suministrada al modelo agua</i> .....	23
Tabla 3. <i>Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrológicas del estudio</i> .....	24
Tabla 4. <i>Leyenda General de cobertura y uso de suelo del servidor MAPBIOMAS</i> .....	29
Tabla 5. <i>Codificación de cobertura y uso de suelo adaptada de Corine -MINAM a SWAT</i> .....	31
Tabla 6. <i>Clasificación y extensión de usos de suelo</i> .....	32
Tabla 7. <i>Clasificación de suelos</i> .....	33
Tabla 8. <i>Índice de Kappa</i> .....	40
Tabla 9. <i>Parámetros de Calibración usando en SWAT CUP</i> .....	46
Tabla 10. <i>Criterios estadísticos para evaluar el rendimiento de un modelo hidrológico</i> ..	49
Tabla 11. <i>Variable y su medición</i> .....	46
Tabla 12. <i>Clasificación y extensión de usos de suelo al año 2030</i> .....	49
Tabla 13. <i>Parámetros evaluados en la cuenca del río Yuracyacu</i> .....	57
Tabla 14. <i>Rendimiento del modelo en etapa de calibración y validación</i> .....	55
Tabla 15. <i>Parámetros calibrados para la subcuenca Yuracyacu</i> .....	57
Tabla 16. <i>Precipitación total anual de los modelos climáticos en mm</i> .....	62
Tabla 17. <i>Temperatura mínima promedio anual de los modelos climáticos en °C</i> .....	62
Tabla 18. <i>Temperatura máxima promedio anual de los modelos climáticos en °C</i> .....	64
Tabla 19. <i>Evapotranspiración anual de los modelos climáticos en mm</i> .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Representación del modelo SWAT</i> .....	13
Figura 2. <i>Representación de escenarios Rutas de Concentración Representativa</i> .....	15
Figura 3. <i>Visualización de downscaling a un modelo Modelos de Circulación General</i> .....	17
Figura 4. <i>Mapa de ubicación del area de estudio de la subcuenca Yuracyacu</i> .....	20
Figura 5. <i>Metología aplicada en el modelo SWAT</i> .....	27
Figura 6. <i>Variación altitudinal en la subcuenca del río Yuracyacu</i> .....	28
Figura 7. <i>Uso actual del suelo para el año 2007 en la subcuenca del río Yuracyacu</i> .....	35
Figura 8. <i>Uso actual del suelo para el año 2012 en la subcuenca del río Yuracyacu</i> .....	36
Figura 9. <i>Uso actual del suelo para el año 2017 en la subcuenca del río Yuracyacu</i> .....	37
Figura 10. <i>Tipos de Suelos para la subcuenca del río Yuracyacu</i> .....	38
Figura 11. <i>Ubicación de la estaciones meteorológicas e hidrométricas</i> .....	34
Figura 12. <i>Serie histórica de temperatura máxima diaria en las estaciones Chachapoyas, Naranjillo, Rioja, Moyobamba y Soritor</i> .....	35
Figura 13. <i>Serie histórica de precipitación diaria en las estaciones Chachapoyas, Naranjillo, Rioja, Moyobamba y Soritor</i> .....	36
Figura 14. <i>Serie histórica de humedad relativa diaria en las estaciones Chachapoyas, Naranjillo, Rioja, Moyobamba y Soritor</i> .....	37
Figura 15. <i>Serie histórica de temperatura mínima diaria en las estaciones Chachapoyas, Naranjillo, Rioja, Moyobamba y Soritor</i> .....	38
Figura 16. <i>Flujo de trabajo del modelo Land Change Modeler</i> .....	39
Figura 17. <i>Comparación de precipitación media mensual de modelos climáticos para la subcuenca del río Yuracyacu</i> .....	48
Figura 18. <i>Uso de suelo proyectado al año 2030 en la subcuenca del río Yuracyacu</i> .....	48
Figura 19. <i>Delimitación de subcuencas ámbito de estudio del río Yuracyacu</i> .....	50
Figura 20. <i>Clasificación del uso de suelos de la zona de estudio</i> .....	51
Figura 21. <i>Clasificación del tipo de suelo de la zona de estudio</i> .....	51
Figura 22. <i>Clasificación de pendeintes de la zona de estudio</i> .....	52
Figura 23. <i>Clasificación de las unidades de respuesta hidrológicas de la zona de estudio</i>	52
Figura 24. <i>Caudales simulados y observados en etapa de calibración y validación</i> .....	56
Figura 25. <i>Diagrama de dispersión de caudales observados vs caudales simulados en periodos de calibración y validación</i> .....	57

Figura 26. <i>Serie histórica de precipitación para el modelo BCC-CSM1-1-, bajo escenarios de RCP 2.4, 4.5, 6.0 y 8.5</i> .....	59
Figura 27. <i>Serie histórica de Precipitación para el modelo CSIRO-Mk3-6-0, bajo escenarios de RCP 2.4, 4.5, 6.0 y 8.5</i> .....	60
Figura 28. <i>Serie histórica de Precipitación para el modelo HadGEM2-ES, bajo escenarios de RCP 2.4,4.5, 6.0 y 8.5</i> .....	61
Figura 29. <i>Caudal promedio para el escenario RCP 2.6</i> .....	64
Figura 30. <i>Caudal promedio para el escenario RCP 4.5</i> .....	64
Figura 31. <i>Caudal promedio para el escenario RCP 6.0</i> .....	65
Figura 32. <i>Caudal promedio para el escenario RCP 8.5</i> .....	66
Figura 33. <i>Tendencia de la variación porcentual del caudal promedio mensual proyectado para enero de 2020 a diciembre 2030</i> .....	67
Figura 34. <i>Comportamiento de la subcuenca del río Yuracyacu al año 2030</i> .....	67

## ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Precipitación promedio mensual (mm) estación Chachapoyas.....	94
Apéndice 2. Precipitación promedio mensual (mm) estación Rioja .....	95
Apéndice 3. Precipitación promedio mensual (mm) estación Soritor .....	96
Apéndice 4. Precipitación promedio mensual (mm) estación Moyobamba.....	97
Apéndice 5. Precipitación promedio mensual (mm) estación Naranjillo.....	98
Apéndice 6. Datos de caudales observados (m <sup>3</sup> /s) en la estación hidrométrica La Florida	99
Apéndice 7. Variación porcentual de caudales observados.....	100
Apéndice 8. Datos de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) periodo 2020 al 2030, modelo BCC- CSM (RCP 2.6) .....	101
Apéndice 9. Datos de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) periodo 2020 al 2030, modelo CSIRO- Mk3.6.0 - RCP 2.6.....	102
Apéndice 10: Datos de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) periodo 2020 al 2030, modelo HadGEM2-ES - RCP 2.6.....	103
Apéndice 11. Datos de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) periodo 2020 al 2030, modelo BCC- CSM - RCP 4.5.....	104
Apéndice 12. Datos de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) periodo 2020 al 2030, modelo CSIRO-Mk3.6.0 - RCP 4.5.....	105
Apéndice 13. Datos de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) periodo 2020 al 2030, modelo HadGEM2-ES - RCP 4.5.....	106
Apéndice 14. Datos de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) periodo 2020 al 2030, modelo BCC- CSM - RCP 8.5.....	107
Apéndice 15. Datos de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) periodo 2020 al 2030, modelo CSIRO-Mk3.6.0 - RCP 8.5.....	108
Apéndice 16. Datos de caudales simulados (m <sup>3</sup> /s) periodo 2020 al 2030, modelo HadGEM2-ES - RCP 8.5.....	109
Apéndice 17. Registro Fotográfico.....	110
Apéndice 18. Sctript para elaborar gráficos.....	111

## RESUMEN

El cambio climático es un proceso natural y/o antrópico que genera una alteración en la oferta hídrica y mediante los modelos hidrológicos se puede lograr una predicción confiable de sus efectos. La investigación realizada en la subcuenca del río Yuracyacu, analizó el comportamiento hidrológico de la subcuenca ante un escenario de cambio de uso de suelo al año 2030 aplicando el modelo hidrológico SWAT, inicialmente se obtuvo la información climática y física de la subcuenca, luego se generó un mapa de suelo proyectado al año 2030, y finalmente se analizó la información bajo diferentes escenarios como RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5 de tres modelos climáticos globales (GCM): BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0, HadGEM2-ES. Los resultados obtenidos en la etapa de calibración del modelo para la serie de 10 años (2001 - 2010) como periodo base según el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) arrojó un desempeño de 0,67 y para el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) un valor de 0,71, sin embargo en la etapa de validación se obtuvo un desempeño de 0,60 mediante el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y 0,70 para el coeficiente de determinación ( $R^2$ ); en ambos casos indicando un buen desempeño, se concluyó que los caudales medios simulados al año 2030 mostraron una reducción de hasta -67,94 % con respecto al caudal medio observado del río Yuracyacu en el escenario más crítico HadGEM2-ES (RCP 8.5).

Palabras claves: Cambio de uso del suelo, caudal Simulado, escenarios climáticos, modelos de circulación general (GCM), modelo SWAT.

## **ABSTRACT**

Climate change is a natural and/or anthropogenic process that generates an alteration in water supply and through hydrological models a reliable prediction of its effects can be achieved. The research carried out in the Yuracyacu River sub-basin analyzed the hydrological behavior of the sub-basin under a scenario of land use change by 2030 applying the SWAT hydrological model. Initially, the climatic and physical information of the sub-basin was obtained, then a soil map projected to 2030 was generated, and finally the information was analyzed under different scenarios such as RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 of three global climate models (GCM): BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0, HadGEM2-ES. The results obtained in the calibration stage of the model for the 10-year series (2001 - 2010) as a base period according to the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) showed a performance of 0.67 and for the coefficient of determination ( $R^2$ ) a value of 0.71, however in the validation stage a performance of 0.60 was obtained using the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) and 0.70 for the coefficient of determination ( $R^2$ ); in both cases indicating a good performance, it was concluded that the simulated average flows in 2030 showed a reduction of up to -67.94 % with respect to the observed average flow of the Yuracyacu River in the most critical scenario HadGEM2-ES (RCP 8.5).

Keywords: Land use change, projected flow, climate scenarios, general circulation models (GCM), SWAT model.

## INTRODUCCIÓN

El agua químicamente está compuesta por dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno; sin embargo, para la vida misma tiene un concepto más amplio y transversal. Considerando lo descrito por la Ley de Recursos Hídricos N° 29338, el agua es un recurso natural renovable pero vulnerable a la vez (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2009). Esta escasez del agua y la relación que tiene con el cambio climático, se debe a lo transversal que es el agua en todos los aspectos de desarrollo para la vida del planeta.

Según el Banco Mundial (2022), la mayoría de países están involucrando en sus políticas las variaciones en los flujos de los recursos hídricos; pues, las estimaciones indican que para el año 2030, habrá una diferencia marcada del 40 % entre la demanda y oferta de agua a nivel mundial. Así mismo, las consecuencias del cambio climático alterarán los procesos hidrológicos, que conllevará a que la disponibilidad del agua sea impredecible, favoreciendo la frecuencia de inundaciones y sequías.

Actualmente, los modelos hidrológicos se han convertido en herramientas que se utilizan para predecir futuros problemas en la gestión de los recursos hídricos (Chamorro *et al.*, 2016); además, tiene como aliados a la teledetección y los sistemas de información geoespacial (SIG) que permiten incluir modelos hidrológicos como el SWAT de gran aceptación y aplicación a nivel nacional e internacional, logrando predecir de manera confiable los efectos del cambio climático en el balance hídrico de la unidad hidrográfica (cuenca), mediante el análisis de información topográfica, geológica, uso del suelo y el impacto de actividades antropogénicas.

El objetivo general de la presente investigación es analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca Yuracyacu ante un escenario de cambio de uso de suelo al año 2030, aplicando el modelo SWAT. considerando, que la subcuenca Yuracyacu es la principal fuente de abastecimiento de agua del distrito de Nueva Cajamarca tanto para el consumo humano, como para el sector turismo, sector industrial y sector agrario principalmente;

además, en la actualidad el caudal está disminuyendo, por este motivo surge la necesidad de realizar investigaciones para predecir la oferta hídrica a corto plazo, en este caso al año 2030.

Esta investigación está estructurada en seis capítulos, en el capítulo I se presenta los antecedentes del estudio tales como “Estimación del modelo SWAT para simular caudales con fines agrícolas en la cuenca del río Keka-Bolivia”, “Modelamiento hidrológico y los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca del río Yauco”, “Escenarios de disponibilidad hídrica al 2050 mediante el modelo SWAT en la cuenca del río Moche-departamento de La Libertad” entre otros; dichas investigaciones demuestran la importancia que tiene el modelo SWAT en hidrología tanto a nivel nacional como internacional, así mismo; en este capítulo se presentan bases teóricas y conceptos esenciales para el desarrollo de la investigación. En capítulo II se presenta los materiales y métodos, el cual comprende todos los procedimientos realizados desde la recolección de datos, hasta la generación de información climática y de caudales para los años 2020 al 2030 a partir de la información existente y complementaria como datos hidrometeorológicos de los años 1990 al 2019, información hidrométrica de aforos del periodo 2001 al 2010; así como información física de topografía, tipo de suelo y los diferentes usos de suelo que hay en la subcuenca Yuracyacu; cabe mencionar, que la información se procesó, calibró y validó con ayuda de diferentes programas y modelos hidrológicos. En el capítulo III comprende los resultados obtenidos de la ejecución del modelo SWAT, análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo; asimismo, generación de información climática en la subcuenca Yuracyacu para el periodo 2030 utilizando modelos de circulación general (MCG). Finalmente, están las discusiones, conclusiones y recomendaciones; en los capítulos IV, V y VI respectivamente.

# **OBJETIVOS**

## **Objetivo general**

Analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca Yuracyacu ante un escenario de cambio de uso de suelo al año 2030, aplicando el modelo SWAT.

## **Objetivos específicos**

1. Determinar el cambio de uso de suelo en la subcuenca Yuracyacu para el año 2030, mediante Teledetección y herramientas SIG.
2. Establecer el modelo calibrado en función a las Unidades de Respuesta Hidrológica con el modelo SWAT.
3. Generar información climática en la subcuenca Yuracyacu para el periodo 2030, usando modelos de circulación general (MCG).

# CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

## 1.1. Antecedentes

### Internacional

Quispe (2016) en el estudio “Aplicación del modelo SWAT para simular caudales mensuales con fines agrícolas en la Cuenca del Rio Keka, Bolivia”, tuvo como objetivo aplicar el modelo SWAT para simular caudales mensuales que serán usados con fines agrícolas en la cuenca del río Keka. La metodología consistió en recopilar información correspondiente a la cuenca en estudio, como registros climáticos del periodo 2003 al 2012 de la estación meteorológica El Belén, a cargo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), los datos hidrológicos de la estación de Achacachi en el mismo periodo y la descarga de imágenes satelitales Landsat 5TM; también, obtuvo en campo los caudales del río principal mediante aforamiento y muestras de suelo aleatorias y selección de puntos de muestreo de suelos. Finalmente, en gabinete analizó toda la información obtenida requerida por los programas de Sistema de Información Geográfica y SWAT. Los resultados mostraron que los datos de caudales simulados presentaron un R<sup>2</sup> del 0,82, los cuales fueron semejantes a los datos aforados; además, indicó que los datos calibrados presentaron valores semejantes a los reales con un coeficiente de correlación de 0,98 aseverando que fue buena la capacidad de simulación para la producción de agua por parte del modelo. Posteriormente, realizó un balance hídrico con el software ABRO 02 v.3.1 para cultivos de papa, haba, cebada, hortalizas y alfalfa; obteniendo un caudal de 2987,32 l/s para el área de riego incremental (155,7 ha). En ese sentido, el estudio concluyó que el modelo hidrológico SWAT fue muy buena herramienta para simular las escorrentías en la producción de agua de la cuenca del río Keka, pero requiere mayor cantidad de aforamiento para ajustar la calibración. La oferta de agua estimada solo cubrió el 25,24 % de la demanda del área cultivable; por lo tanto, evidenció una demanda agrícola insatisfecha.

Hurtado-Pidal y Yáñez (2015) desarrollaron la investigación “Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del río Las Juntas” en Ecuador; cuyo objetivo fue “determinar el comportamiento de la dinámica hidrológica en períodos húmedos y secos”, así mismo, “comprender los componentes principales que intervienen en el ciclo hidrológico en la cuenca”. Realizaron una metodología que consistió en la recopilación de información geográfica en escala 1:50000 proporcionada por el Ministerio del Ambiente y el Instituto Espacial Ecuatoriano del año 2008, tanto de cobertura y tipo de suelos, ráster de elevación e información de caudales diarios de 11 estaciones hidrometeorológicas (Bucay, Babahoyo, Caluma, Chillares, San Pablo, Balasampa, Montalvo, San Antonio, La Chima, San Pablo El Palmar, Embarcadero) para los años 2002-2012. Los investigadores mediante métodos estadísticos de coincidencia como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el porcentaje bias (PBIAS) y Nash-Sutcliffe, realizaron la calibración y validación del modelo de la cuenca en SWAT; para lo cual, consideraron un periodo de calibración entre el año 2002 al 2006 (5 años) y el de validación para 6 años (2007 – 2012). Como resultado obtuvieron que la simulación más eficiente fue con calibración para la estación San Pablo al modificar parámetros de escurrimiento y disponibilidad de agua; sin embargo, la mejor simulación no requería calibración en la estación Embarcadero. Por lo tanto, indicaron que los parámetros por defecto del modelo arrojaron mejores resultados en comparación de los que fueron calibrados. También, cuantificaron el caudal máximo de escurrimiento superficial (febrero de 2008) con un valor de 275 m<sup>3</sup>/s, por las inundaciones generadas de precipitaciones extraordinarias, y el caudal promedio de 60 m<sup>3</sup>/s. Identificaron que existe mayor producción de agua en la parte media y baja de la cuenca del río Las Juntas, a consecuencia de las altas precipitaciones y erosión por actividades agrícolas; sin embargo, indicaron que la parte alta presentó valores bajos de escorrentía por presencia de bosques y escasas precipitaciones. Concluyeron que mediante el uso del modelo SWAT podrían analizar el escurrimiento superficial de las cuencas a nivel de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en Ecuador, debido a la disponibilidad abierta de la información meteorológica y cartográfica

Zuleta (2013), en la investigación sobre el “Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica”; tuvo como objetivo determinar la variación de la oferta hídrica frente a los efectos de la variación climática y cambio de uso de suelo para mejorar la gestión del recurso

hídrico. La metodología consistió en utilizar información de la cuenca del río Reventazón como las características físicas de los suelos analizados con el programa SPAW (Soil Water Characteristics Program); así mismo, utilizó imágenes satelitales del año 2011 y el software ArcGis 10.1, para determinar los usos del suelo. Además, elaboró el mapa de uso del suelo proyectado al año 2030, con el software IDRISI SELVA mediante el modelo CA\_Markov y la información de fotogrametría del año 1998 y 2011. Posteriormente, obtuvo datos climatológicos para los años 2030, 2050 y 2100 del modelo HadCM; para finalmente, calibrar el modelo SWAT con la herramienta SWAT-CUP, utilizando los caudales mensuales para el período 1980 – 2011. Cabe mencionar, que evaluó cinco escenarios, donde para el escenario base calibrado en SWAT utilizó información de uso de suelo del año 2011, dos escenarios (con emisiones medias y altas emisiones de gases efecto invernadero) sin cambio de uso de suelo (CUS) y los otros dos con CUS proyectado al año 2030. Obtuvo como resultados, una reducción de los sistemas forestales e incremento de coberturas de pastos; además, evidenció en el mapa proyectado al 2030, la predominancia del bosque denso e incremento de zonas de regeneración y pastos. Con respecto a los escenarios de altas emisiones de gases (A2), identificó una disminución en las precipitaciones y aumento de temperatura de 2,9 °C con respecto al año 2011; sin embargo, para los escenarios con bajas emisiones de gases (B1) obtuvo un aumento paulatino de las precipitaciones y el incremento de 2,1 °C en la temperatura. El investigador concluyó que todas las combinaciones de posibles escenarios planteados, registraron una disminución en los caudales para el año 2030, en comparación al año 2011 como escenario base; además, para los escenarios B1, evidenció una reducción del caudal en un 25 % con respecto al 2011 (24,7 m<sup>3</sup>) y para los escenarios A2, en 49,7 % (16,6 m<sup>3</sup>).

## **Nacional**

Urbay (2022) desarrolló una investigación sobre el “Modelamiento hidrológico y los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca del río Yauco”; con el objetivo de “predecir los impactos potenciales del cambio climático, empleado el modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Yauca” perteneciente a los departamentos de Arequipa y Ayacucho. Para ello, la investigación fue no experimental con un enfoque cuantitativo y alcance descriptivo con enfoque mixto. La metodología consistió en identificar los parámetros climáticos afectados por el cambio climático (cualitativo) y su cuantificación, esto mediante el uso de data de precipitación y temperatura del producto PISCO (periodo de

1981 a 2016); caudales de la estación hidrológica Yauca; tipo de suelo del geo servidor de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); mapas satelitales para usos de suelo del sensor MODIS 13V; el modelo hidrológico en SWAT; los modelos HadGEM2-ES, MIROC 5, CSIRO-Mk3-6-0 y MRI-CGCM3 para los escenarios de RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5 y su evaluación de las proyecciones de cambio climático. Los resultados mostraron que el tipo de suelo predominante fue Litosol y para coberturas de suelo a Cordillera y Cepillo de Rango. Además, obtuvo 460 HRU y 10 parámetros (SOL\_BD, SFTMP, GW\_REVAP, SOL\_K, SOL\_AWC, ALPHA\_BF, CH\_N2, GW\_DELAY, CH\_K2 y ESC), de los 13 evaluados, registraron alta sensibilidad del modelo en SWAT. Asimismo, en la proyección del caudal para los años 2050 y 2100, los escenarios con el modelo CSIRO-MK3-6-0 presentaron una tendencia positiva a excepción del RCP 8.5; sin embargo, el modelo HADGEM2-ES y MRI-CGCM3 presentaron una tendencia positiva en todos los escenarios. Pero, el modelo MIROC5 tuvo una tendencia negativa en los escenarios RCP 2.6 y 8.5, para RCP 6 fue positiva y RCP 4.5, constante. El investigador concluyó que requiere determinar el caudal, precipitaciones y temperaturas a largo plazo y correlacionarlas en el modelo SWAT para obtener las predicciones sobre el impacto del cambio climático en la cuenca del río Yauca.

Gómez-Lora *et al.* (2021) presentaron un estudio de la “Evaluación del bosque húmedo tropical mediante el análisis de la cobertura fraccional y técnicas SIG en la subcuenca del río Yuracyacu, Amazonía peruana”; con el objetivo de “evaluar la cobertura boscosa en la subcuenca del río Yuracyacu para el periodo 1989-2010, utilizando imágenes satelitales ópticas, a través del análisis de la cobertura fraccional mediante Carnegie Landsat System Analysis – Lite (CLASlite) y técnicas de sistemas de información geográfica (SIG)” correspondiente a la región San Martín. Utilizaron como materiales a las cartas nacionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:100 000, imágenes satelitales del satélite ALOS con resolución de 12,5 m y del Landsat 5. En el software QGIS 3.3 determinaron la morfometría de la subcuenca y mediante un análisis multitemporal identificaron la cobertura boscosa, deforestación y perturbaciones en CLASlite 3.3, para luego verificarlos en campo; posteriormente, calcularon la tasa de deforestación con la ecuación de la FAO. Obtuvieron resultados de cobertura boscosa de 1989 al 2010 (de 64 % a 50 %) y deforestación desde 1989; con ello generaron un modelo de regresión lineal para identificar las áreas de bosque tropical húmedo en función del tiempo (anual) y validaron con el mapa del año 2010. A

partir de la ecuación FAO, obtuvieron escenarios proyectados hasta el año 2030. Concluyeron que la pérdida total de bosque fue el 15 % del área de toda la subcuenca y en el periodo de 1989 a 1995, registraron la mayor pérdida; además, obtuvieron una tasa de deforestación de 1,21 % anual y un 63 % de bosques para el año 2030 a causa de la agricultura migratoria.

Medina y Blas (2021) realizaron una investigación sobre el “Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Yuracyacu para identificar zonas vulnerables por máximas avenidas, ciudad Nueva Cajamarca – San Martín”; con el objetivo de “identificar zonas vulnerables en el área urbana de la ciudad de Nueva Cajamarca por máximas avenidas del río Yuracyacu, desde la bocatoma Canal Michuco hasta el puente de la Vía de Evitamiento mediante el modelamiento hidrológico e hidráulico” en la región de San Martín. La investigación fue de tipo aplicada, de enfoque cuantitativo y diseño transeccional. Utilizaron imágenes del sensor Landsat 8 de resolución espacial de 30 metros, DEM de Earthdata NASA con 12,5 m y MSD de 30 m del satélite ALOS. También, realizaron un levantamiento topográfico y fotogramétrico de la zona de estudio. Para la delimitación de la subcuenca del río Yuracyacu realizaron un geoprocésamiento en QGIS 3.10 y el cálculo de los parámetros geomorfológicos. Obtuvieron rangos de la curva número (CN) con ArcGIS al ingresar el DEM corregido y el mapa de usos de suelo y el modelo hidrológico buscó determinar las intensidades de diseño menores a 24 horas, para finalmente obtener los caudales máximos en diferentes periodos de diseño. Los resultados mostraron que la subcuenca en la zona de estudio presentó coberturas de bosques (72,52 %), cultivos (20,57 %), pastos (5,37 %) y área urbana (0,55 %); con respecto a caudales máximos para un periodo de retorno (Tr) de 2 años obtuvieron 58,4 m<sup>3</sup>/s; Tr de 5 años:128,9 m<sup>3</sup>/s; Tr de 10 años:1802 m<sup>3</sup>/s; Tr de 25 años: 245,5 m<sup>3</sup>/s; Tr de 50 años:293,5 m<sup>3</sup>/s; Tr de 100 años:340,4 m<sup>3</sup>/s; Tr de 200 años:386,4 m<sup>3</sup>/s y Tr de 500 años:445,7 m<sup>3</sup>/s. Concluyeron que las áreas vulnerables a inundación fueron Tr 2 años:0,136 ha, Tr 5 años:0,431 ha, Tr 10 años:0,431 ha, Tr 25 años:0,752 ha, Tr 50 años:4,002 ha, Tr 100 años:6,295 ha, Tr 200 años:12,638 ha y Tr 500 años:17,228 ha y los sectores correspondieron a Los Olivos, Monterrey, San Nicolas, Nueva Cajamarca primera y segunda etapa.

Quezada y Rodríguez (2021) realizaron la investigación “Escenarios de disponibilidad hídrica al 2050 mediante el modelo SWAT en la Cuenca del Río Moche- departamento de La Libertad”; con el objetivo de determinar el efecto del cambio climático en la disponibilidad hídrica al año 2050 mediante el modelo SWAT. El estudio tuvo un enfoque cuantitativo de tipo aplicada no experimental. La metodología que utilizaron fue desarrollada en cuatro etapas, iniciando con la recolección de datos; luego, realizaron la modelación hidrológica de la cuenca y la creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), seguidamente la calibración y validación del modelo, para finalmente generar la simulación de los escenarios e interpretar los resultados. Para ello, utilizaron los modelos digitales de terreno (DEM) de la cuenca desde el portal del MINAM, imágenes satelitales de SENTINEL 2 para usos de suelo y de la FAO para tipos de suelo; también, recolectaron datos meteorológicos de cinco estaciones (Julcán, Capachique, Sinsicap, Salpo y Quiruvilca) e hidrométricos de la estación Quirihuac (1999 – 2008) y el uso del software SWAT. En los resultados, identificaron que en la cuenca predomina las coberturas del desierto semi árido y matorrales; además, estableció a los litosoles como tipo de suelo mayoritario. Obtuvieron 1292 HRU para el modelo SWAT y valores satisfactorios para los indicadores estadísticos en la calibración y validación. Consideraron evaluar de forma comparativa el modelo por MIROC ESM y MIROC 5 en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 con proyección al año 2050; por lo tanto, indicaron que en noviembre registraron las temperaturas más bajas y más altas para agosto. Con respecto a las precipitaciones, registraron una disminución en el periodo húmedo (octubre a abril) y un incremento en el periodo seco (mayo a setiembre) para MIROC 5; pero, un aumento del 99 % en la época seca para RCP 4.5 con MIROC ESM. Cuantificaron una disminución de 45 % para caudales en época de avenida registraron y aumento de 120 % en época de estiaje para ambos modelos en RCP 4.5; pero, en RCP 8.5 obtuvieron una disminución de 48 % para MIROC 5 y aumento de 113 % para MIROC-ESM. Concluyeron que la modelación hidrológica permitió evaluar el comportamiento bajo escenarios del cambio climático donde evidenciaron disminuciones de la escorrentía superficial lo que puede originar un estrés hídrico en la cuenca.

Salas (2020) ejecutó una investigación “Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo Swat” con el objetivo de “estimar la carga de sedimentos para lograr identificar los puntos de mayor erosión y poder así plantear medidas de protección”. Para la metodología, generó una base de datos climáticos mediante los

programas de W02 y pcpSTAT; luego, desarrolló el balance hidrológico del modelo QSWAT, el análisis de sensibilidad, la validación y calibración este. Por lo tanto, utilizó la información cartográfica de la cuenca proveniente del Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente, información meteorológica de las estaciones (Combapata, Ccatcca, Pomacanchi y Sibinacocha) y del producto grillado PISCO; pero, en ausencia de estaciones hidrométricas, consideró aforos del 2011 hasta 2016. Cabe mencionar que, el cálculo de sedimentos fue mediante la ecuación de MUSLE para cada subcuenca de acuerdo a sus características fisiográficas y meteorológicas. Además, los resultados mostraron que los suelos fueron mayoritariamente pastos; con respecto, al análisis de sensibilidad del modelo QSWAT con cuatro parámetros (GWQMN, ALPHA\_BF, GW\_DELAY y CN2) obtuvo valores aceptables, al igual que en el proceso de calibración y validación. En tal sentido, determinó 237 HRU para el modelo y la simulación entre 1981 al 2016 de forma mensual. Por lo tanto, concluyó que el modelo hidrológico representó el comportamiento hidrológico de la zona de estudio, donde la mayor carga de sedimentos en la parte alta de la cuenca con elevada pendiente y baja cantidad de sedimentos en la parte baja de la cuenca a pesar de la presencia de cultivos.

Torreblanca (2020) desarrolló la investigación titulada “Predicción de la hidrología en la cuenca del río Cancusane hasta su almacenamiento en la EL FRAYLE hasta el año 2050”; con el objetivo de “determinar la hidrología futura expresada en caudales mensuales”. El investigador utilizó imágenes raster de 12,5 m de resolución del ALOS PALSAR, el Mapa Ecológico del Perú para obtener el mapa de coberturas de suelo, el mapa de tipos de suelos del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) correspondiente al año 2002, data pluviométrica de cuatro estaciones del SENAMHI (Imata, Pillones, El Frayle, Las Salinas) y el registro diario del sensor TRMM (1981 – 2018); además, consideró para el análisis del vector regional de índices pluviométricos con el software HYDRACCESS, a los datos meteorológicos del servidor NASA LARC (temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar). También, realizó el modelo hidrológico de la cuenca en SWAT y utilizó 6 modelos climáticos (BCC-CSM1-1, EUROPEAN EARTH MODEL, IPSL-CM5A-MR, MRI-CGCM3, NASA-GISS-E2-H y MIROC-ESM) para las proyecciones al 2050. Presentó resultados para coberturas de suelo, donde predominó el matorral andino, tundra y matorral semi árido templado; también, consideró a los leptosoles como el tipo de suelos mayoritarios en la cuenca. Para el análisis de sensibilidad del modelo,

trabajó con 9 parámetros y solo 5 obtuvieron mejor ajuste; finalmente, estimó los caudales mensuales promedio. Obtuvo una precipitación de 414,8 mm, escorrentía total de 157,27 mm y 124,15 mm de almacenamiento al realizar el balance hídrico en SWAT. En el análisis para identificar el modelo de circulación general, realizó un comparativo con las estaciones meteorológicas y el modelo EC EARTH presentó el mejor ajuste, sobre todo con la estación Imata. Concluyó que los componentes del balance hídrico de la cuenca representaron el 38 % de la precipitación y proyectó una reducción del 32 % de los caudales en el periodo 2020 – 2050.

Ccama y Turpo (2020) desarrollaron una investigación denominada “Modelamiento de la vulnerabilidad del recurso hídrico considerando la incidencia del cambio climático en la cuenca del río Chancay-Lambayeque utilizando SWAT”; con el objetivo de “evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico, bajo la incidencia del cambio climático de las variables de temperatura y precipitación, mediante el modelamiento hidrológico con el software SWAT integrando en la interfaz del sistema de información geográfica ArcGIS”, perteneciente a la región Lambayeque. La metodología desarrollada permitió delimitar las subcuencas que conforman la cuenca del río Chancay en ArcSWAT con el uso de las imágenes satelitales ALOS PALSAR -ASF de 12,5 x 12,5 m en ráster. Con respecto a las coberturas de suelo, utilizaron el Mapa Nacional de Ecosistemas del MINAM, 2018 y la reclasificación de códigos del SWAT; además, para el tipo de suelo, hicieron uso de los mapas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). Consideraron utilizar los datos hidrometeorológicos de PISCO V 2,1 desde 1987 hasta 2015 y de la base de datos SWAT; adicionalmente, para caudales, los registrados desde 1990 hasta 2009 de la estación Racarumi Lambayeque. Los resultados indicaron, que la cuenca presentó 11 coberturas y 9 tipos de suelos; así como, una pendiente media alta. Delimitaron la cuenca en 23 subcuencas y ubicaron 14 estaciones meteorológicas dentro de esta. Realizaron un análisis de sensibilidad del modelo con 9 parámetros, los cuales fueron considerados para la calibración y validación por cumplir las condiciones de p-Value y t-Stat aceptables. Utilizaron como incertidumbres climáticas a la precipitación y la temperatura media anual para los escenarios futuros de CMIP 6 del modelo CNRM-ESM2-1 (escenarios SSP 4.5 y 4.8) del periodo 2015 – 20100, donde el incremento de temperatura y precipitaciones fueron registrados en tres estaciones (Chancay, Pisco A2 y A4). Concluyeron que SWAT integrado con ArcGis son excelentes herramientas para la simulación de caudales en la cuenca del río

Chancay – Lambayeque; además, señalaron que los caudales bajo escenario de proyecciones de cambio climático, incrementarían en 47,06 % (escenario SSP 4.5) y 62,9 % (escenario SSP 8.5).

Vela (2008) desarrolló una investigación titulada “Situación actual de la oferta y demanda hídrica como servicio ambiental en la subcuenca Yuracyacu” con el objetivo de “evaluar el la oferta y demanda hídrica como servicio ambiental en la subcuenca Yuracyacu” localizada en la región San Martín. Desarrolló una metodología que consistió en la recolección de información secundaria en entidades públicas y privadas; adicionalmente, obtuvo la información primaria mediante entrevistas personales. Para analizar la oferta de agua de la subcuenca, utilizó la data meteorológica (precipitación, temperatura, horas de sol, viento y punto de rocío), mapas de suelos y uso de tierras del Alto Mayo mediante los sistemas de información geoespacial (SIG) y generó pequeñas unidades de respuesta hidrológica (URH) para obtener el volumen de agua y sedimentos del caudal que discurre por el cauce principal. En los resultados de la investigación, identificó que las coberturas de suelo predominante fueron el bosque primario (cuenca alta), suelo descubierto, vegetación secundaria, pasto, arroz e infraestructura urbana (cuenca baja); además, obtuvo precipitaciones superiores a 50 mm y caudales iguales o mayores a 5 m<sup>3</sup>/s con el modelo simulado. Señaló que la demanda hídrica doméstica urbana y rural fue 4 424,91 m<sup>3</sup>; pero, 114 729 020 m<sup>3</sup> para el uso agrícola. El investigador concluyó que la oferta de agua en la subcuenca fue de 264 271 680 m<sup>3</sup>; con la cual, lograría satisfacer la demanda poblacional de Nueva Cajamarca, pero no la demanda agraria, considerando que cuantificó en 114 733 444,91 m<sup>3</sup> para la demanda hídrica de toda la subcuenca.

## **1.2. Bases teóricas especializadas**

### **1.2.1. Aspectos generales de la subcuenca Yuracyacu**

De acuerdo con la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2017), la subcuenca se ubica en los distritos de Nueva Cajamarca y Yuracyacu, provincia de Rioja, departamento de San Martín. Geográficamente está localizada en las coordenadas UTM WGS 84 (parte Alta: E: 236441-N: 9328698 y parte baja: E: 254337-N: 9345212). Asimismo, esta subcuenca se encuentra dentro de la jurisdicción de la Autoridad Administrativa de Agua Huallaga, específicamente

en el ámbito de la Administración Local de Agua Alto Mayo.

La subcuenca Yuracyacu tiene como principal actividad económica el sector agropecuario y representa la base del desarrollo sobre el cual se han emplazado asentamientos espontáneos de la zona. Actualmente, se observa que la actividad agrícola está orientada a la producción y comercialización de arroz, seguida por el maíz y el plátano, que son ofertados a los mercados regionales; mientras, que la producción de carne y frutas es absorbida por los mercados locales de Nueva Cajamarca, Rioja y Moyobamba. Con respecto, a los productos extractivos forestales como la madera son comercializados hacia otros mercados nacionales, destacando entre ellos las ciudades de Chiclayo, Trujillo y Piura (ANA, 2017).

### **Densidad poblacional de la Subcuenca Yuracyacu**

El distrito de Nueva Cajamarca cuenta con 21 765 habitantes hombres y 21 711 habitantes mujeres con un total de 43 476 habitantes. Por otro lado, el distrito de Yuracyacu cuenta con 1 952 habitantes hombres y 1 880 habitantes mujeres con un total de 3 832 habitantes. El distrito de San Fernando cuenta con 1 769 habitantes hombres y 1644 habitantes mujeres con un total de 3 413 habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2017).

### **Uso Agrario en la Comisión de Usuarios del Subsector Hidráulico Yuracyacu (CUSSHY)**

Esta comisión agrupa lo que antiguamente fue la comisión de usuarios El Independiente y la comisión de usuarios Yuracyacu. Actualmente agrupa nueve bloques de riego que son: bloque Tello la Unión con 226 usuarios y 876,30 ha bajo riego; bloque de riego Michuco, cuenta con 646 usuarios y 2 294,81 ha bajo riego; bloque de riego Canan Morito cuenta con 67 usuarios y 152,15 ha bajo riego; bloque de riego Alto Plantanoyacu cuenta con 81 usuarios y 490,35 ha bajo riego; bloque de riego Molino cuenta con 110 usuarios y 536,49 ha bajo riego; bloque de riego Ucrania Azunguillo cuenta con 112 usuarios y 583,72 ha bajo riego; bloque de Riego Naranjal cuenta con 24 usuarios y 91,70 ha bajo riego; bloque de riego Plantanoyacu cuenta con 98 usuarios y 580,64 ha bajo riego; bloque de riego Huaro cuenta con 73 usuarios y 317,67 ha bajo riego, y finalmente el bloque de riego

Constelación cuenta con 236 usuarios y 873,54 ha bajo riego (Administración Técnica del Distrito de Riego Alto Mayo, 2007).

### **1.2.2. Climatología**

#### **Clima**

La sub cuenca Yuracyacu se caracteriza por presentar un clima húmedo semicálido, con alta humedad en los meses de mayor precipitación (Ríos *et al.*, 2018)

#### **Precipitaciones**

Las precipitaciones se presentan en dos épocas bien marcadas, una en los meses de junio a noviembre y la otra de diciembre a mayo, con un promedio de 1000 – 1400 mm/m<sup>3</sup> al año y con un numero de lluvias de 84 a 114 días al año (Ríos *et al.*, 2018)

#### **Temperatura**

La temperatura promedio fluctúa entre 22 °C a 32 °C presentando una temperatura mínima en el mes de junio de 16 °C (Ríos *et al.*, 2018).

#### **Humedad relativa**

En la cuenca Yuracyacu la humedad relativa varía entre 76 % a 88 % en las épocas de mayor precipitación (Ríos *et al.*, 2018)

### **1.2.3. Ciclo hidrológico**

Villón (2004) señala que el ciclo hidrológico comprende una serie de procesos en los que se encuentra al agua en estados distintos tales como:

*La precipitación:* es el agua caída en forma sólida o líquida y resulta de la evaporación del agua esta se acumula saturando la atmósfera donde finalmente se precipita. Los datos de precipitación son el insumo principal en los modelos hidrológicos.

*La evaporación:* es el cambio de estado líquido a gaseoso del agua; por acción de la radiación solar y el aumento en la temperatura del aire. Cuanto mayor sea la humedad del viento, menor será la posibilidad de evaporación.

*La transpiración:* es el proceso donde las plantas liberan agua como subproducto de la fotosíntesis. La transpiración es una combinación de evaporación y transpiración.

*La infiltración:* es el ingreso del agua al suelo, esta depende de las propiedades físicas, químicas, topografía, pendiente, vegetación, actividades humanas, entre otros.

*La percolación:* es el agua que se mueve de forma descendente por los diferentes perfiles del suelo gracias a la gravedad.

*La escorrentía:* es agua de la precipitación, que fluye a través del suelo y eventualmente ingresa al sistema de agua superficial. Una gran proporción de la escorrentía superficial fluye hacia las vías fluviales, donde se describe como flujo de entrada o salida.

*El flujo de agua subterránea:* proporciona una línea base para las fuentes hídricas superficiales y la reposición de los acuíferos.

Para cuantificar los componentes del ciclo hidrológico en las cuencas fluviales o subterráneas se utiliza el balance hídrico.

#### **1.2.4. Descripción del modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool)**

La herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT) es un programa hidrológico de simulación para obtener volúmenes de agua, los sedimentos, cambios de uso de suelo, efectos en la calidad de agua por pesticidas y fertilizantes de una cuenca hidrográfica. Fue desarrollado por Jeff Arnold de la Universidad de Texas para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Neitsch *et al.*, 2005). El modelo SWAT es un modelo hidrológico semidistribuido que se caracteriza por discretizar la cuenca en subcuencas y que utiliza información climatológica como precipitación, temperatura, humedad relativa, viento y radiación solar como datos de entrada, asimismo, utiliza información topográfica, uso actual y tipo de suelo (Torres *et al.*, 2004).

El modelo SWAT se desarrolló para la predicción de acciones en la gestión hídrica y de la tierra; así como, los efectos de los sedimentos y los plaguicidas a largo plazo en cuencas hidrográficas con diferentes condiciones de suelo. Los datos de entrada se organizan en categorías como clima, suelos, uso de la tierra y fuentes de agua; para lo cual, establece en una unidad de respuesta hidrológica (URH) o área terrestre que consta de un solo tipo de cubierta, suelo, topografía y condiciones de cultivo (Neitsch *et al.*, 2005). Para el cálculo del balance hídrico, este modelo simula el ciclo hidrológico en dos componentes o fases:

*Fase terrestre:* Cuantifica la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas descargados al cauce principal en cada Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU). Proaño *et al.* (2006) indican que el modelo simula la circulación del agua con la siguiente ecuación de balance de agua:

$$SW_t = S_w + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET - P_i - QR_i)$$

Donde:

SW<sub>t</sub> = Refiere al contenido de agua en el suelo en el día t (mm H<sub>2</sub>O)

SW = Agua aprovechable por la vegetación (mm H<sub>2</sub>O)

t = Tiempo en días

R= Precipitación diaria (mm H<sub>2</sub>O)

Q = Cantidad de escorrentía diaria (mm H<sub>2</sub>O)

ET = Evapotranspiración diaria (mm H<sub>2</sub>O)

P = Percolación diaria (mm H<sub>2</sub>O)

QR= Flujo de retorno o flujo base (mm H<sub>2</sub>O)

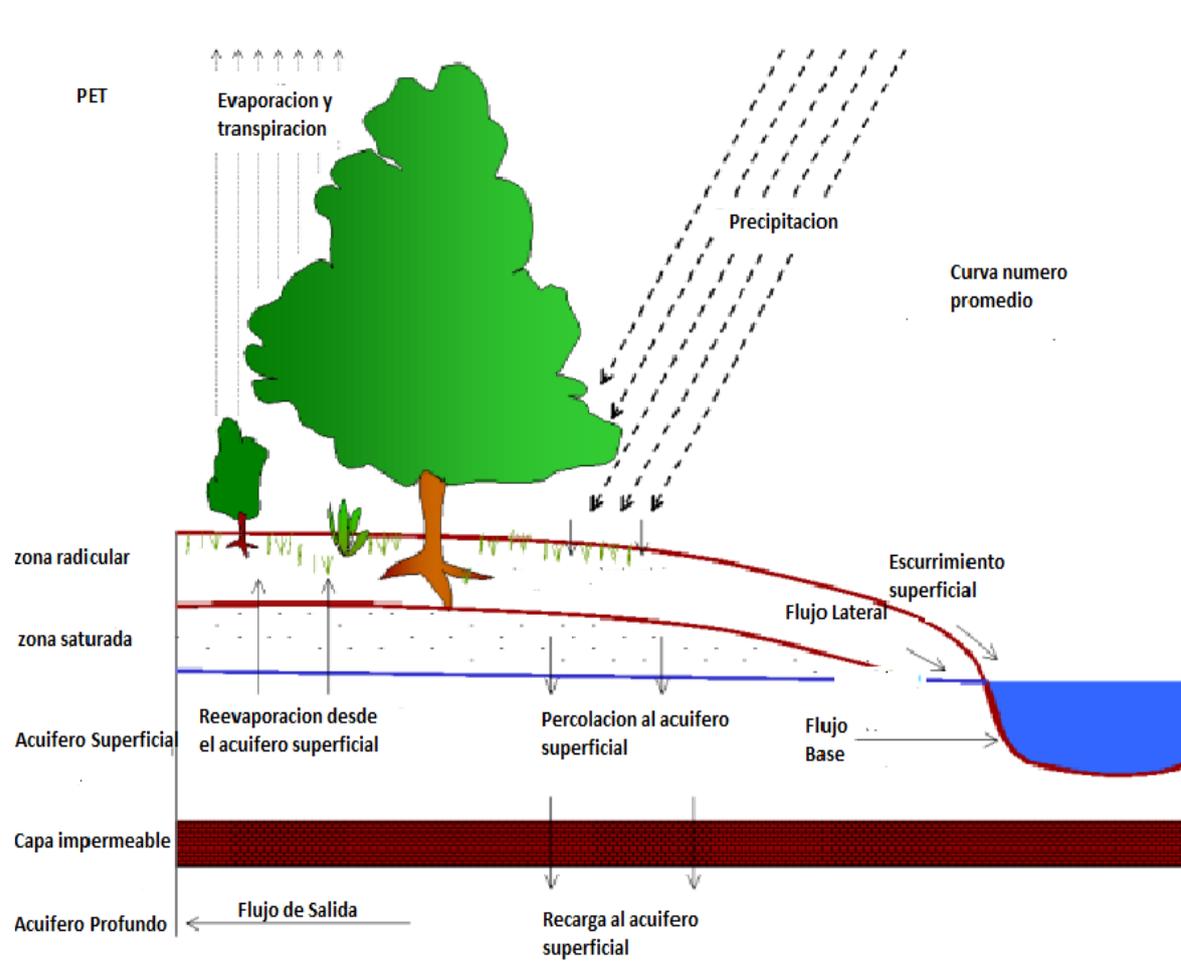
Cuando se subdivide una cuenca, un modelo hidrológico puede evidenciar las diferencias en la evapotranspiración para diferentes tipos de vegetación y suelo (Ortiz *et al.*, 2010). El flujo de agua para cada HRU se calcula por separado y se asigna al flujo total de la cuenca, incrementando la precisión y obteniendo una descripción física real del balance hídrico.

*Fase líquida:* Esta etapa implica el movimiento de agua y sedimentos desde la red de canales o cauces de la cuenca hasta su desembocadura o punto de medición. El flujo en el canal principal se puede separar en agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas (Ortiz *et al.*, 2010).

Una cantidad del agua en su recorrido se pierde por la pendiente, por la evaporación y transmisión en el lecho del cauce. Como indican Ortiz *et al.* (2010), otra pérdida se origina por la demanda para uso agrícola o humano; sin embargo, la oferta hídrica se suplementa por la lluvia que cae sobre el cauce y la fuente de fuentes puntuales. El flujo es conducido a través del cauce aplicando un método variable de almacenamiento; es decir, el modelo SWAT simula al ciclo hidrológico del agua (Figura 1).

### Figura 1

*Representación del ciclo hidrológico en el modelo SWAT*



*Nota.* Adaptado del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, 2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, SWAT 2005 del Centro Internacional de Agricultura Tropical, 6.

### **1.2.5. Descripción del Modelo SWAT-CUP**

Es un programa que tiene una versión comercial y de acceso libre. El programa asocia métodos de calibración para el modelo SWAT mediante el uso de algoritmos (SUFI2, PSO, GLUE, PARASOL y MCMC), los cuales identifican los parámetros más sensibles que tienen relevancia en el modelo ejecutado y pueden ser modificados en la etapa de calibración para obtener mejores resultados respecto a caudales simulados y observados; finalmente estos parámetros modificados son utilizados en la etapa de validación del modelo hidrológico SWAT (Abbaspour *et al.*, 2015).

### **1.2.6. Modelos Predictivos de Cambio de Suelos**

Camacho *et al.* (2010) señalan que CA\_Markov y Land Change Modeler (LCM) son modelos que utilizan información espacio-temporal que nos permite generar y predecir los cambios de uso de suelo teniendo para esto dos capas con información actual y pasada; además, los dos modelos están disponibles en el programa IDRISI, el primero de ellos desde el año 2000 y LCM fue introducido en la versión Andes en 2006, actualmente se puede instalar como extensión del programa ArcGIS.

### **1.2.7. Cambio climático**

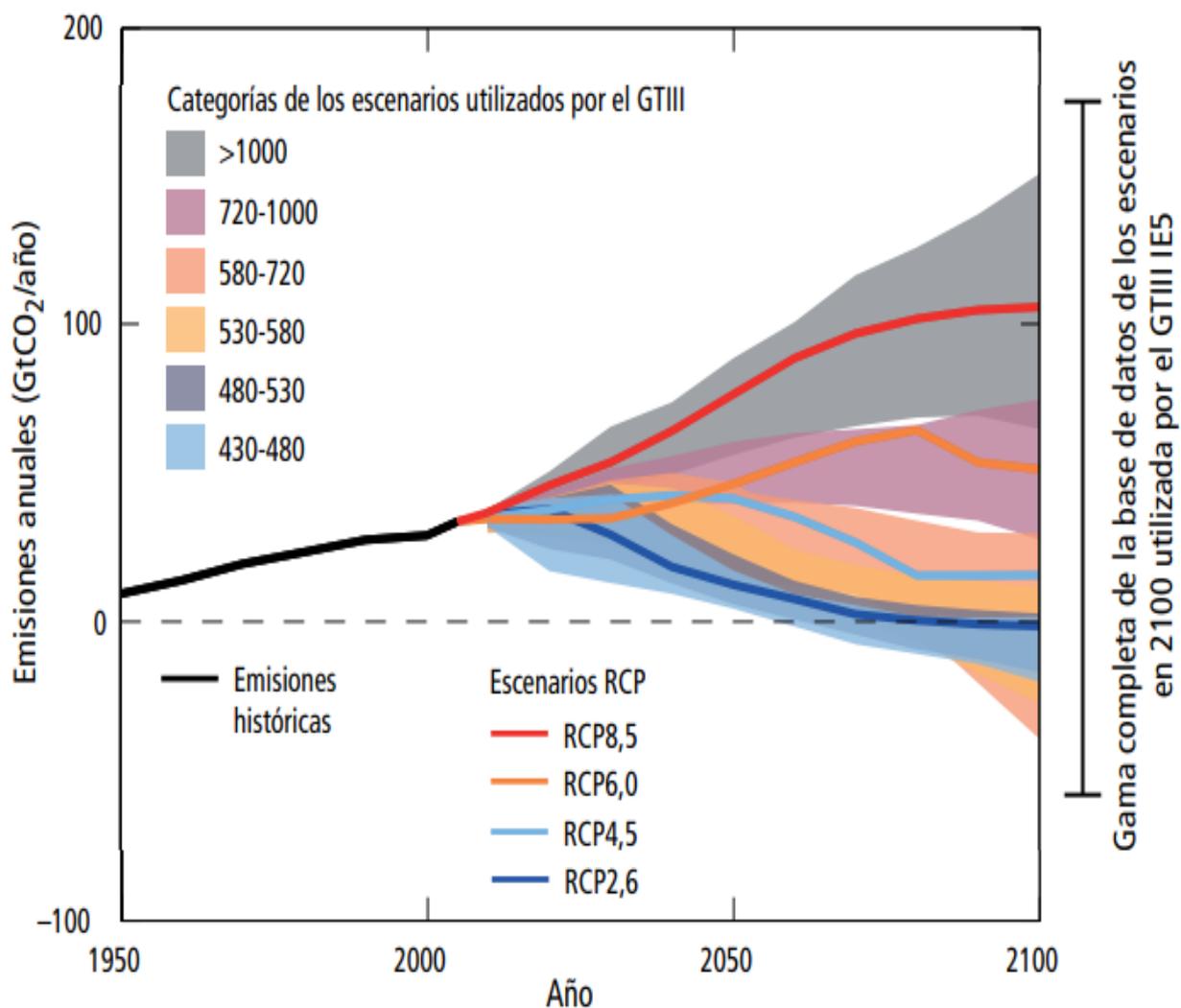
El cambio climático es una alteración en el comportamiento meteorológico del planeta que ha sido causado por distintos procesos naturales y/o antrópicos. Dentro de las influencias antrópicas que existen se encuentra el desarrollo industrial mundial; que, de manera directa e indirecta, ha incrementado la temperatura global y la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2014).

Camino *et al.* (2014) mencionan que; para entender el efecto del cambio climático sobre la hidrología, es necesario definir los escenarios de emisiones denominados Rutas de Concentración Representativa (RCP) y se utilizan para hacer proyecciones en base al aumento de emisiones contaminantes. Las proyecciones incluyen un escenario de cambio

nulo como (RCP 2.6), dos escenarios de cambios intermedios (RCP 4.5 y RCP 6.0), y un escenario con un cambio muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8.5) como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2**

*Representación de escenarios de Rutas de Concentración Representativa*



*Nota.* Adaptado del gráfico de emisiones antropógenas del CO<sub>2</sub> anuales del *Cambio climático 2014: Informe de síntesis* del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2014. [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, pp. 157.

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (MINAM), el Perú es vulnerable a los efectos del cambio climático, debido a que presenta siete de las nueve características de vulnerabilidad reconocidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), como son:

zonas costeras bajas; zonas áridas y semiáridas; zonas expuestas a inundaciones, sequías y desertificación; ecosistemas montañosos frágiles; zonas propensas a desastres; zonas con alta contaminación atmosférica urbana y economías dependientes en gran medida de los ingresos generados por la producción y uso de combustibles fósiles. (MINAM, 2016, p. 16)

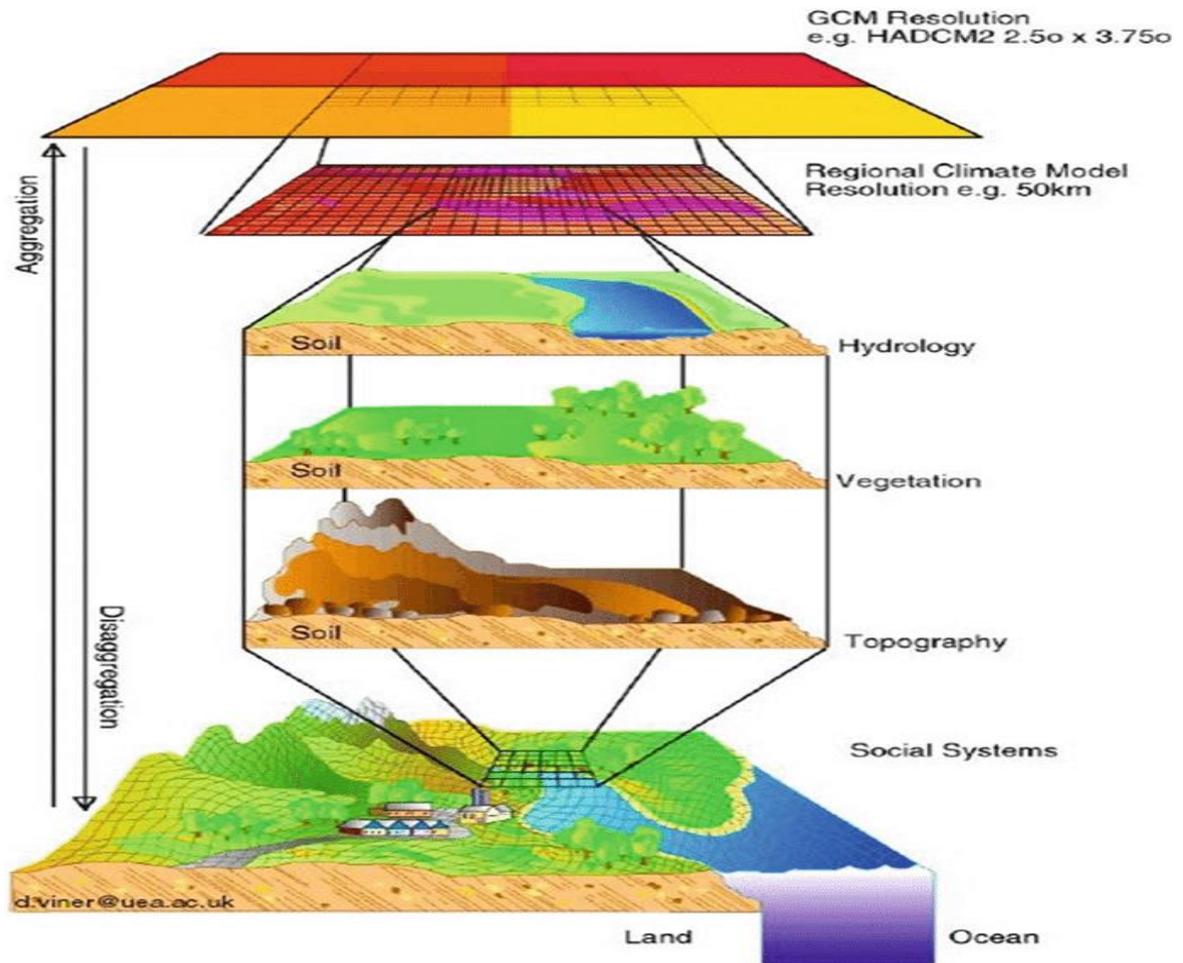
### **1.2.8. Modelos de Circulación General (MCG)**

Los modelos de circulación general representan diversos procesos atmosféricos del sistema climático global; además, permiten estimar futuros patrones climáticos y evaluar probables cambios en los patrones de precipitación y temperatura (Kaini *et al.*, 2020). Los MCG son herramientas importantes que mejoran la comprensión y predictibilidad del comportamiento climático durante diferentes períodos de tiempo. Permite investigar el alcance del cambio climático observado a razón de la variación natural, la actividad humana o la combinación de ambos. Mediante los resultados y predicciones brindan información importante para diferentes campos de la ciencia.

Los MCG son parecidos ya que describen el mismo sistema climático, sin embargo, los errores, simplificaciones, omisiones de modelos de procesos, parámetros de procesos y aproximaciones numéricas son diferentes (Knutti *et al.*, 2013). Los MCG están compuestos por expresiones matemáticas que permiten el estudio de los procesos climáticos, radiación atmosférica y la interacción océano-atmósfera – litosfera. Generalmente, estos modelos presentan datos climáticos con una resolución horizontal entre 250 y 600 km y vertical de 10 a 20 km (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2001); por lo tanto, es necesaria la aplicación de métodos de reducción de escala (downscaling), como se muestra en la Figura 3.

**Figura 3**

*Visualización de downscaling a un modelo Modelos de Circulación General*



*Nota.* Procesos climáticos locales que afectan los modelos climáticos regionales. Adoptado de Trzaska, y Schnarr (2014). A review of downscaling methods for climate change projections de la Agencia de EE. UU. para el Desarrollo Internacional (USAID). [http://www.ciesin.org/documents/Downscaling\\_CLEARED\\_000.pdf](http://www.ciesin.org/documents/Downscaling_CLEARED_000.pdf)

### **1.2.9. La herramienta MARKSIM GCM**

Es una plataforma virtual que genera datos meteorológicos futuros diarios, estos datos ya cuentan con reducción de escala provenientes de los MCG (Jones y Thornton, 2013). Esta plataforma tiene la capacidad de generar variables climáticas como la precipitación, radiación solar, temperatura mínima y máxima, que son datos mínimos usados en el modelo hidrológico SWAT.

Los datos proyectados se generaron a partir de una data histórica existente entre los años 1964 al 2005, a partir de esta información se obtuvo valores de precipitación, temperatura máxima y mínima para el periodo 2006 al 2099; para lo cual se utilizaron 17 modelos en la plataforma (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Descripción de los modelos de circulación general que incluye MarkSim*

<b>MODELO</b>	<b>INSTITUCION</b>	<b>RESOLUCION Lat -Long</b>
<b>BCC-CSM 1.1</b>	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2,8125 x 2,8125
<b>BCC-CSM 1.1(m)</b>	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2,8125 x 2,8125
<b>CSIRO-Mk3.6.0</b>	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation and the Queensland Climate Change Centre of Excellence	1,875 x 1,875
<b>FIO-ESM</b>	The First Institute of Oceanography, SOA, China	2,812 x 2,812
<b>GFDL-CM3</b>	Geophysical Fluid Dynamics Laboratorio	2 x 2,5
<b>GFDL-ESM2G</b>	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2 x 2,5
<b>GFDL-ESM2M</b>	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2 x 2,5
<b>GISS-E2-H</b>	NASA Goddard Institute for Space Studies	2 x 2,5
<b>GISS-E2-R</b>	NASA Goddard Institute for Space Studies	2 x 2,5
<b>HadGEM2-ES</b>	Met Office Hadley Centre	1,2414 x 1,875
<b>IPSL-CM5A-LR</b>	Institut Pierre-Simon Laplace	1,875 x 3,75
<b>IPSL-CM5A-MR</b>	Institut Pierre-Simon Laplace	1,2587 x 2,5
<b>MIROC-ESM</b>	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2,8125 x 2,8125
<b>MIROC-ESM-CHEM</b>	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2,8125 x 2,8125
<b>MIROC5</b>	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	1,4063 x 1,4063
<b>MRI-CGCM3</b>	Meteorological Research Institute	1,125 x 1,125
<b>NorESM1-M</b>	Norwegian Climate Centre	1,875 x 2,5

*Nota.* Tomado de Jones, P. G. (2013). MarkSim standalone. V2 for DSSAT users. International Center for Tropical Agriculture (CIAT), 10. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/9072>

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Diseño de la investigación**

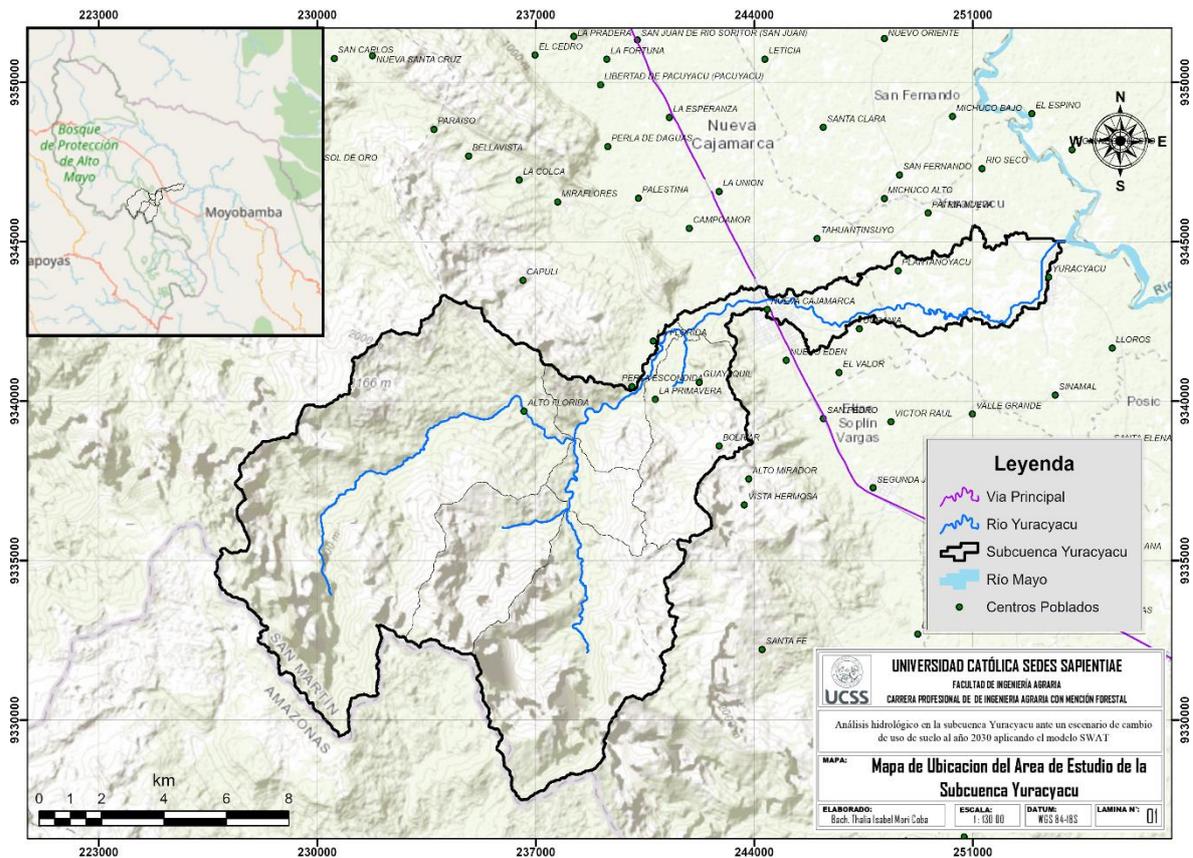
La investigación fue de tipo no experimental, longitudinal y descriptiva, ya que no se van a alterar ni manipular las variables, basándose principalmente en la búsqueda y recolección de información, procesamiento de datos, análisis estadísticos y finalmente interpretación de los resultados arrojados por los modelos hidrológicos (Agudelo y Aigner, 2008).

### **2.2. Lugar y fecha**

La presente investigación se realizó entre la parte alta y media de la subcuenca Yuracyacu en un área aproximada de 140,64 km<sup>2</sup> dentro de los 215,6338 km<sup>2</sup> de extensión de la subcuenca (Figura 4). Se ejecutó en un tiempo aproximado de 1 año, desde el mes de diciembre del año 2021 hasta diciembre del año 2022.

**Figura 4**

*Mapa de ubicación del área de estudio de la subcuenca Yuracyacu*



Nota. Delimitación de la subcuenca del río Yuracyacu.

### 2.3. Caracterización de la subcuenca Yuracyacu

#### Clima

La subcuenca Yuracyacu presenta un clima de tipo lluvioso, templado y muy húmedo durante todo el año representado por la siguiente codificación B (r) B', el mismo que ha sido determinado según la clasificación de W. Thornthwaite realizada en el estudio climático del Perú elaborado por el SENAMHI.

El tiempo atmosférico está determinado por el Anticiclón del Atlántico Sur, la Baja Amazónica, Jet de bajos niveles al este de los Andes, por la Zona de Convergencia intertropical (en el norte del país) y la Zona de convergencia del Atlántico Sur; lo cual, en el

invierno, los friajes afectan indirectamente a esta región principalmente con precipitaciones, que pueden llegar a ser intensas.

## **Geomorfología**

La zona de estudio se encuentra influenciada por 3 unidades geomorfológicas:

*Montañas calcáreas:* constituyen relieves de ladera muy empinadas de formas alargadas en la parte alta de la cuenca, con elevaciones superiores a los 1000 metros, su origen se da por erosiones de diferentes procesos geodinámicos (ZEE, 2006)

*Montañas Detríticas:* representadas por zonas inaccesibles y de formas irregulares, con laderas fuertemente empinadas, caracterizados por sedimentos de la formación Mitu, en esta zona de alta pendiente sumado a las precipitaciones dan origen a deslizamientos de masa y/o derrumbes de taludes, debido a esto son zonas sensibles y vulnerables intervenciones humanas. (ZEE, 2006)

*Montañas Detríticas:* representadas por áreas relativamente planas, los cuales han sido influenciadas por la dinámica fluvial, se encuentran distribuidos en ambos márgenes del río Mayo y son cortados por los ríos Yuracyacu, Huascayacu, Naranjillo, Naranjos y Avisado. (ZEE, 2006)

## **Geología**

El área de estudio comprende parte de la Cordillera Oriental, Faja Subandina, Depresión del Alto Mayo. El sistema de drenaje corresponde a la Hoya hidrográfica del Atlántico. La secuencia estratigráfica está constituida por una secuencia de conglomerados polimícticos de color rojo y areniscas del Grupo Mitu, de edad Permo Triásico se encuentra en el piso, estratigráficamente comprende los grupos Pucara, Mitu y Depósitos aluviales subcrecientes. (ZEE, 2006)

## **Zona de vida**

Según el mapa de zona de vida peruano, el área de estudio tiene influencia en 3 zonas de vida, que son Bosque Muy Húmedo – Premontano Tropical (bmh-PT), Bosque Muy Húmedo – Montano Bajo Tropical (bmh-MBT) y Bosque Pluvial – Montano Tropical (bp - MT) (ONER, 2006)

### **2.4. Población y muestra**

La población y la muestra de esta investigación comprenden la parte alta y media de la subcuenca del río Yuracyacu.

### **2.5. Técnicas e instrumentos**

Considerando la metodología propuesta por Useche *et al.* (2019), se utilizaron como técnicas para la recolección de datos de información geográfica y meteorológica, el análisis documental y la observación directa; con respecto al análisis documental, se consideró a la ficha bibliográfica y de contenido como instrumentos que permitieron discernir la data de diferentes plataformas virtuales e institucionales y realizar su procesamiento en diversos softwares especializados. Además, mediante instrumentos de georreferenciación (Equipo de Sistema de Posicionamiento Global – GPS), en campo, se validó la ubicación de estación hidrométrica y las condiciones del cauce del río en toda la subcuenca y en la zona de estudio (ver Apéndice 17).

#### **2.5.1. Información geográfica**

Esta información permitió establecer los datos de entrada para el presente estudio (Tabla 2).

**Tabla 2***Información geográfica suministrada al modelo agua*

<b>Información</b>	<b>Fuente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Formato</b>
<b>(DEM)</b>	ALOS PALSAR	Modelo de Elevación (DEM) Resolución 12.5m x 12.5m	Ráster
<b>Tipo de Suelos</b>	FAO	Mapa de suelo mundial	shapefile
<b>Uso de Suelos</b>	MAPBIOMAS	Mapa de uso de suelos mundial Resolución 30m x 30m	Ráster

**2.5.2. Información meteorológica**

La información climática para la presente investigación fue proporcionada por SENAMHI de las estaciones meteorológicas de Chachapoyas (ver Apéndice 1), Rioja (ver Apéndice 2), Soritor (ver Apéndice 3), Moyobamba (ver Apéndice 4) y Naranjillo (ver Apéndice 5), de las cuales se tuvieron registros de precipitación, temperaturas máximas y mínimas, así como la humedad relativa. Estos datos corresponden a un periodo de 29 años (1990-2019) periodo suficiente teniendo en cuenta que, según el manual de hidrología, hidráulica y drenaje del Ministerio de Transporte y comunicaciones del año 2008, recomienda un mínimo de 25 años, así mismo, la información hidrométrica de la estación La Florida fue proporcionada por la Autoridad Nacional del Agua (ver Apéndice 6). La ubicación geográfica y periodo de registro de datos de las estaciones se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3***Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrológicas del estudio*

Estación	Ubicación			Registros	Coord.UTM (WGS-84)		Altitud (m s.n.m.)
	Dpto	Provincia	Distrito		Este	Norte	
<b>Naranjillo (Co)</b>	San Martín	Rioja	Nueva Cajamarca	1990-2019	234971	9357241	882
<b>Rioja (Co)</b>	San Martín	Rioja	Rioja	1990-2019	259593	9331089	823
<b>Moyobamba (Co)</b>	San Martín	Moyobamba	Moyobamba	1990-2019	282153	9331448	879
<b>Soritor (Co)</b>	San Martín	Moyobamba	Moyobamba	1990-2019	267927	9320441	902
<b>Chachapoyas (Co)</b>	Amazonas	Chachapoyas	Chachapoyas	1990-2019	182690	9312910	2442
<b>La Florida (Ho)</b>	San Martín	Rioja	Nueva Cajamarca	2001-2010	241154	9342050	931

*Nota.* Adaptado de SENAMHI. (2023). Co: Estación Convencional, Ho: Estación Hidrométrica.

### **2.5.3. Características generales del área de estudio**

El río Yuracyacu es uno de los afluentes principales de la cuenca del río Mayo (margen derecha), tiene su origen en las vertientes orientales de la Cordillera Oriental, recorriendo de Norte a Sur aproximadamente 11 km hasta llegar al caserío La Primavera; posteriormente, modifica su recorrido de SO-NE, hasta llegar a su desembocadura ubicada en la margen derecha del río Mayo (cerca a la ciudad de Yuracyacu). La cuenca cuenta con un área de 21 563,38 ha que representa el 8,13 % de la cuenca del Alto Mayo (Presidencia del Consejo de Ministros [PCM] y Gobierno Regional de San Martín [GORESAM], 2016).

La subcuenca del río Yuracyacu tiene un área de drenaje de 198,5 km<sup>2</sup>, la longitud del cauce más largo es 42,42 km. Asimismo, tiene un perímetro de 101,80 km; un coeficiente de compacidad de 2,04; el factor de forma es 0,11; la altitud media de la subcuenca es 1800 m s.n.m. con una pendiente de 4,6 % y un tiempo de concentración hasta el punto de confluencia con el río Mayo de 8,85 horas. La precipitación pluvial se caracteriza por variar desde 1 500 mm hasta los 3 800 mm al año; además, la temperatura llega a tener un promedio anual de alrededor de 22 °C en las zonas altas, por otro lado, en las partes más bajas se registran promedios de 12 °C (ANA, 2017).

## **2.6. Descripción de la investigación**

### **2.6.1. Metodología**

La metodología desarrollada en la investigación (Figura 5) comprende cuatro procesos: (1) ejecución del modelo SWAT en la zona de evaluación, (2) generación de data climática GPM al 2030, (3) generación de información de cambio de uso de suelo al año 2030 y (4) evaluación hidrológica de la zona de estudio ante cambios en la cobertura, tal como se detalla a continuación:

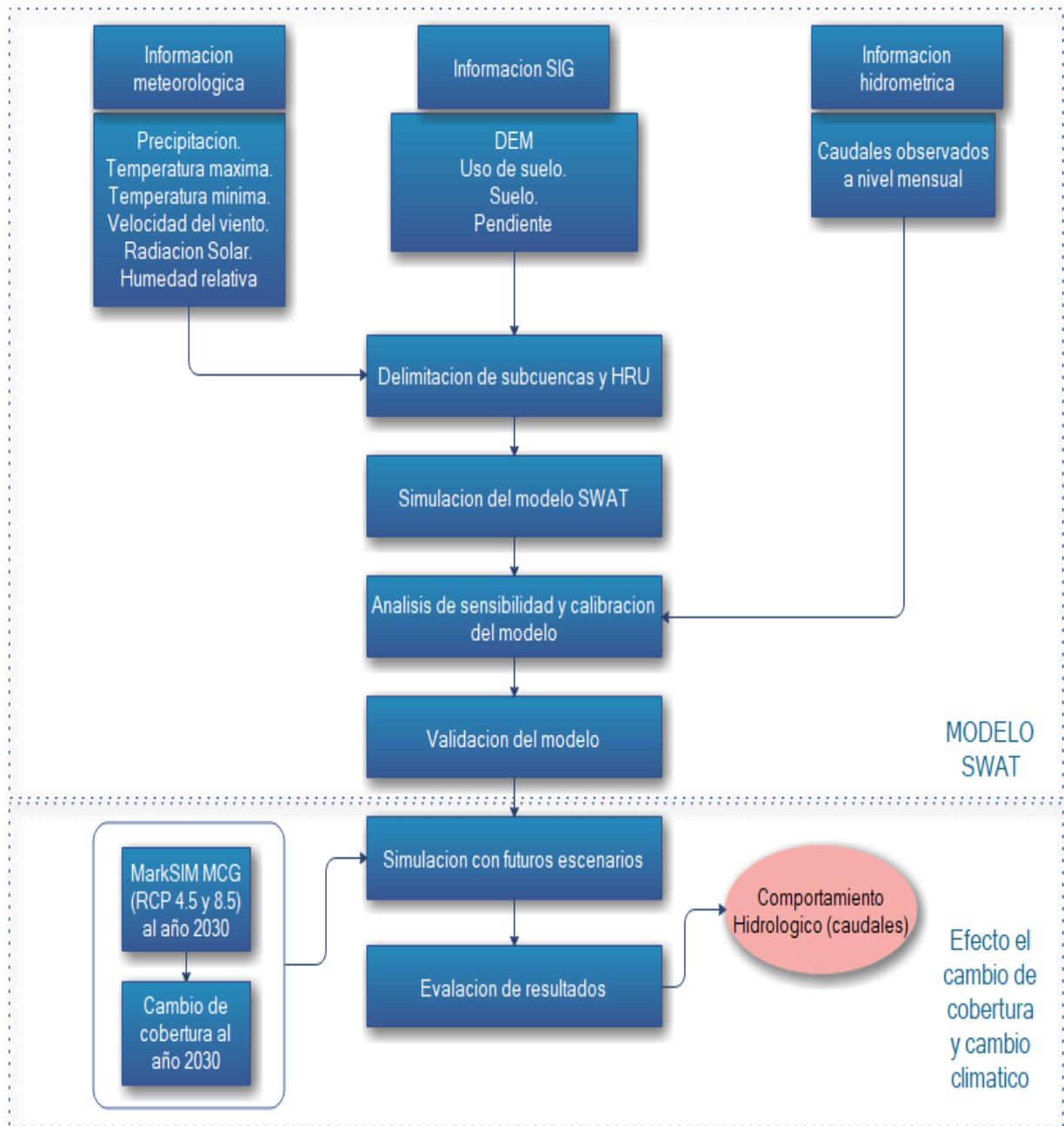
1. Ejecución del modelo SWAT: Se ingresó al modelo hidrológico, datos de precipitación, temperatura mínima, temperatura máxima, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa, juntamente con los Modelos Digitales de Elevación (DEM) de la

cuenca, información de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente; una vez ejecutado se obtuvo parámetros físicos de la cuenca de estudio y las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), posteriormente los resultados fueron calibrados con información hidrométrica y finalmente validados.

2. Generación de data climática GPM al 2030: Se descargó datos climáticos futuros del servidor MARKSIM bajo diferentes escenarios como RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5.
3. Generación de cambio de uso de suelo: Mediante el modelo Land Change Modeler (LCM) y la información base (áreas protegidas, zona de amortiguamiento caminos, ríos, centros poblados menores y mayores) se determinó los cambios de uso de suelo al año 2030.
4. Evaluación Hidrológica de la zona de estudios ante cambios de cobertura: Se analizó los resultados de caudales futuros obtenidos, bajo la influencia del cambio de uso de suelo y cambio climático.

**Figura 5**

Metodología aplicada en el modelo SWAT



Nota. Flujograma en la obtención de caudales del año 2030.

### Sistematización de la información requerida

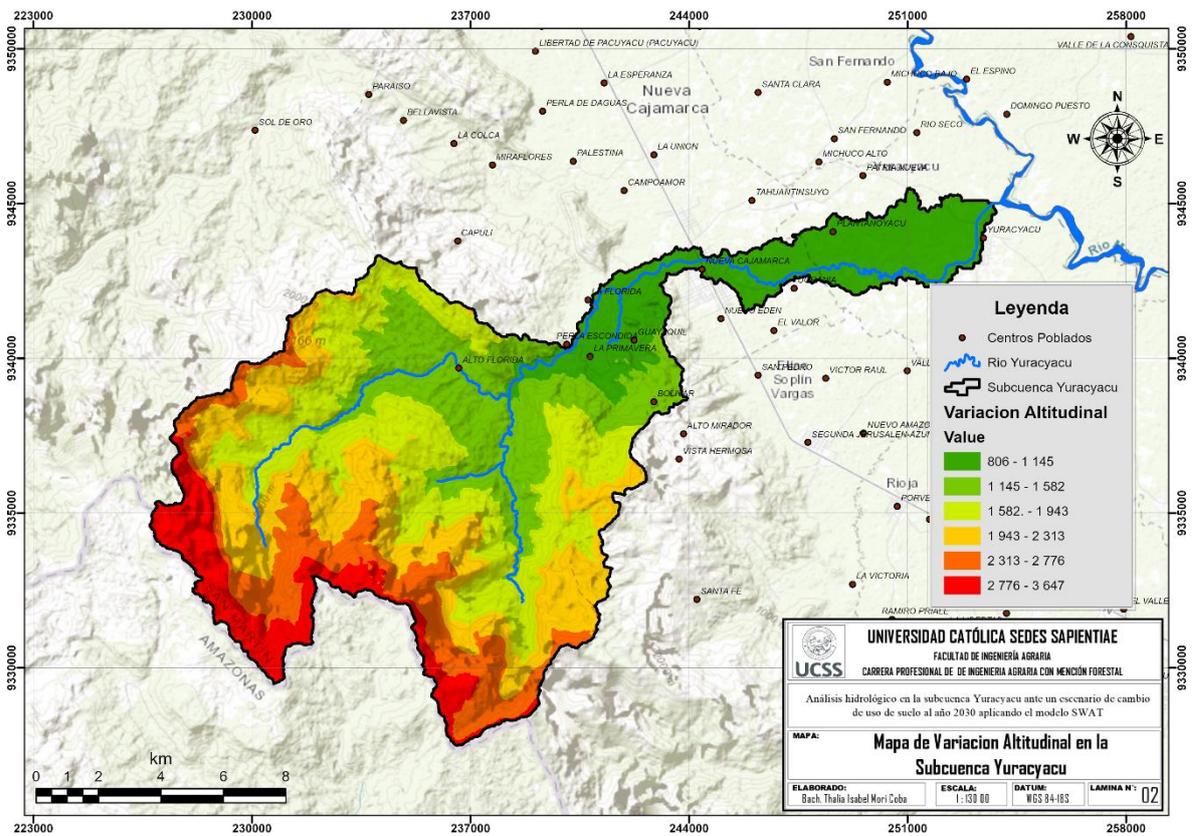
#### Modelo digital de elevación

Mediante el procesamiento de las imágenes satelitales y las curvas de nivel obtenidas a través

del modelo de elevación digital almacenadas en el servidor de Alos Palsar e incorporadas en el software ArcGIS, la subcuenca del río Yuracyacu presenta una variación altitudinal que oscila entre 800 a 3 647 m s.n.m (Figura 6). Posteriormente se reclasifico los mapas de uso de suelo de la subcuenca para el año 2007 (Figura 7), 2012 (Figura 8) y 2017 (Figura 9) en una clasificación adaptada a la base de datos del modelo SWAT (Tabla 5) para visualizar e identificar los patrones de cambio en el tiempo.

**Figura 6**

*Variación altitudinal en la subcuenca del río Yuracyacu*



*Nota.* Rango de altitudes en la subcuenca del río Yuracyacu.

## Uso de suelo

El mapa de uso y cobertura de suelo se ha descargado en formato raster a través de lenguaje de programación JavaScript de la plataforma del servidor MAPBIOMAS, esta información ha sido usada directamente en el software TerrSet para estimar el uso de suelo al año 2030, para acceder a la información de usos y coberturas se ingresa en el siguiente link: <https://plataforma.amazonia.mapbiomas.org/map>, donde se encuentra una colección de mapas de cobertura para toda la Amazonía desde el año 1985 al 2018 y que se ha obtenido

mediante una clasificación semi automatizada a través de la metodología basada en arboles empíricos, la leyenda de este producto se aprecia en la Tabla 4; para el presente estudio se ha utilizado información de cobertura que involucra la cuenca de estudio del año 2007 (Figura 7), 2012 (Figura 8) y 2017 (Figura 9), de acuerdo a la clasificación asignada y extensión de área por cada tipo de uso. A cada uso y cobertura se le reclasificó y asignó un código conforme a la base de datos del modelo SWAT, con la finalidad que, durante la simulación, se pueda leer la información como su base de datos interna (Tabla 5).

**Tabla 4**

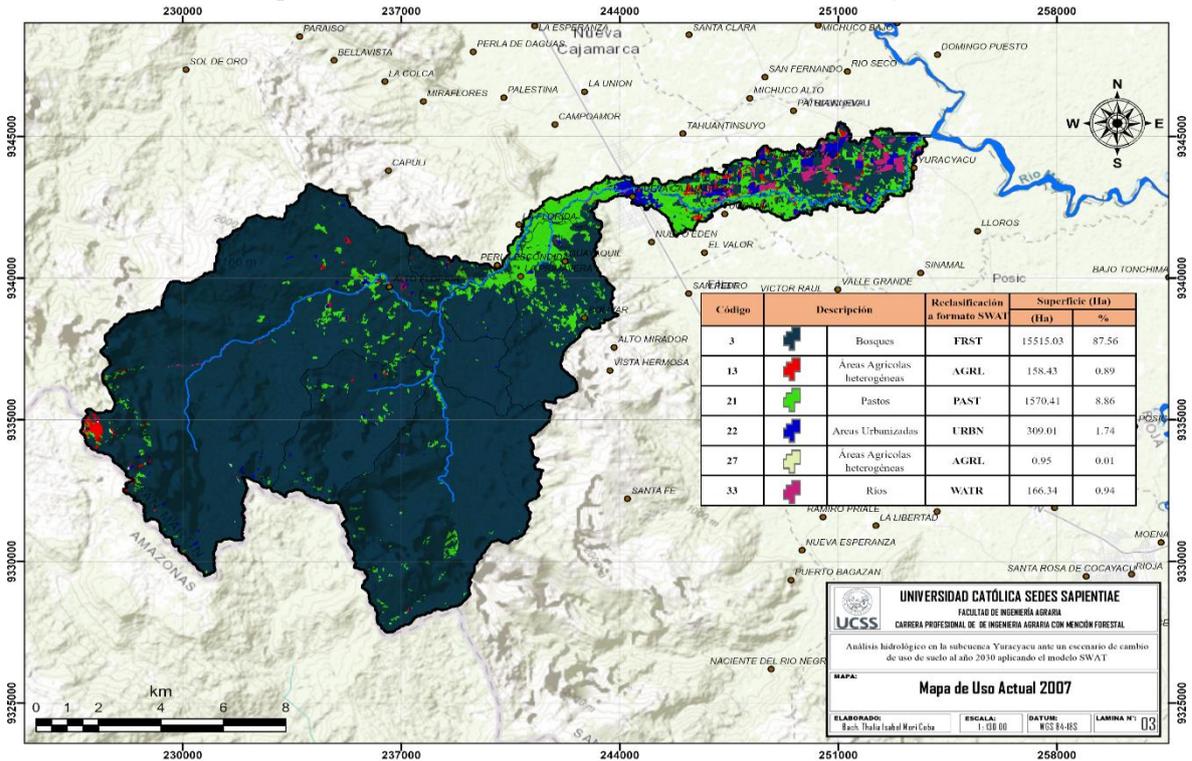
*Leyenda General de cobertura y uso de suelo del servidor MAPBIOMAS*

<b>Código</b>	<b>Clase</b>	<b>Cobertura/Uso</b>
<b>3</b>	Formación Forestal	Cobertura
<b>12</b>	Formación Campestre	Cobertura
<b>13</b>	Otra Formación Natural No Forestal	Cobertura
<b>21</b>	Pasto	Cobertura
<b>22</b>	Área Sin Vegetación	Cobertura
<b>27</b>	No observado	
<b>33</b>	Río, Lago y Océano	Cobertura

*Nota.* Obtenido de la plataforma de MAPBIOMAS (2023).

**Figura 7**

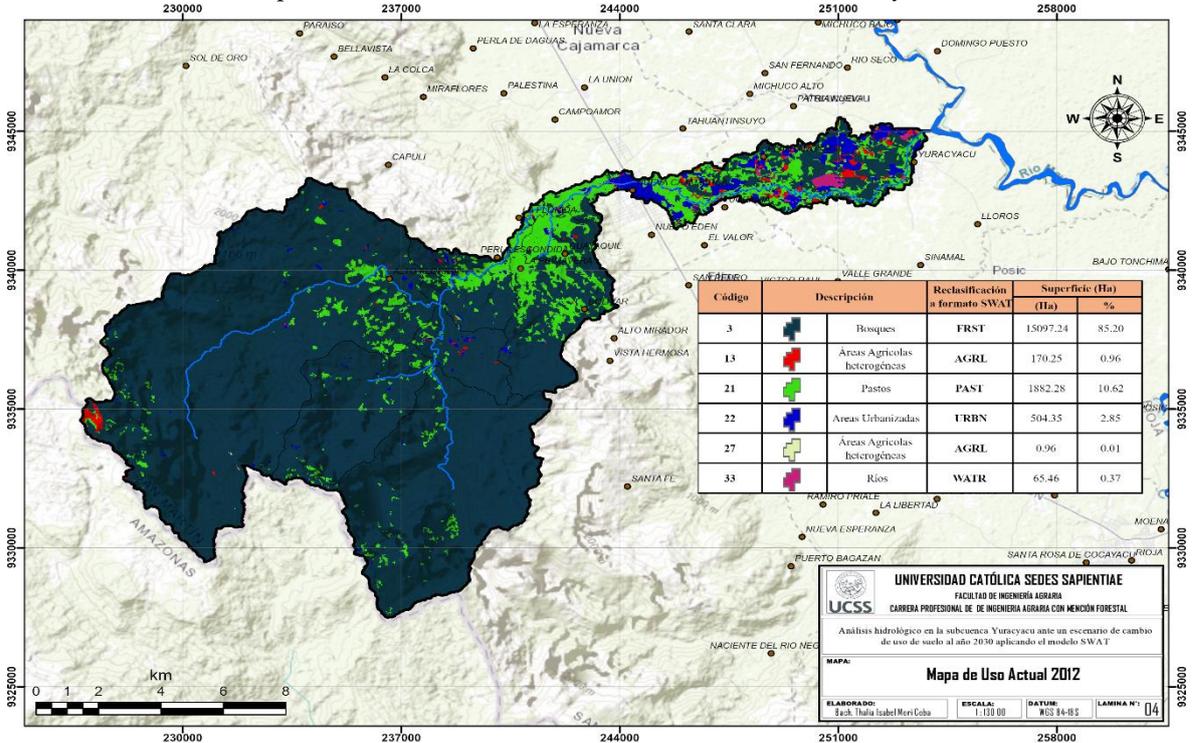
*Uso actual del suelo para el año 2007 en la subcuenca del río Yuracyacu*



*Nota.* Clases de Uso de Suelo en la subcuenca Yuracyacu del año 2007.

**Figura 8**

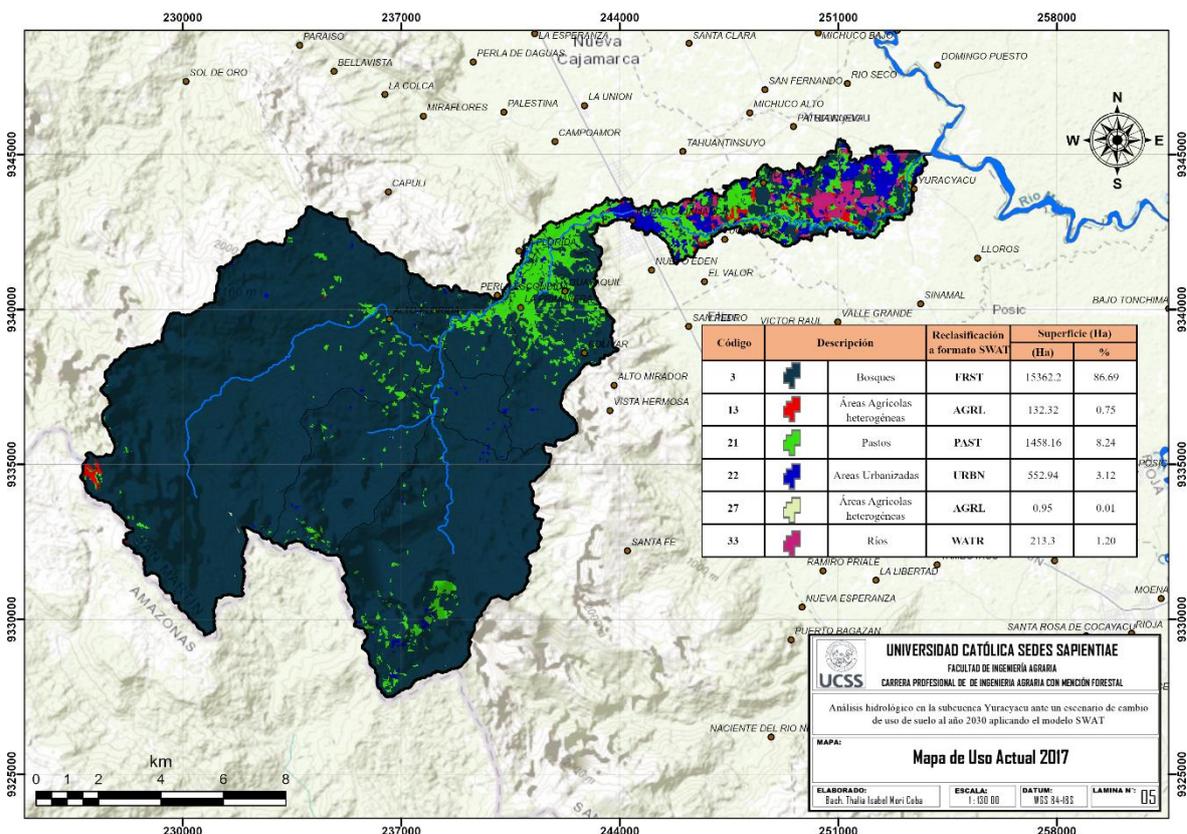
*Uso actual del suelo para el año 2012 en la subcuenca del río Yuracyacu*



*Nota.* Clases de Uso de Suelo en la subcuenca Yuracyacu del año 2012.

**Figura 9**

*Uso actual del suelo para el año 2017 en la subcuenca del río Yuracyacu*



*Nota.* Clases de Uso de Suelo en la subcuenca Yuracyacu del año 2017.

**Tabla 5**

*Codificación de cobertura y uso de suelo adaptada de Corine -MINAM a SWAT*

Código	Descripción	Adaptado a Corine - MINAM	Adaptado a formato SWAT
3	Formación Forestal	Bosques	FRST
12	Formación Campestre	Áreas Agrícolas heterogéneas	AGRL
13	Otra Formación Natural No Forestal	Áreas Agrícolas heterogéneas	AGRL
21	Pasto	Pastos	PAST
22	Área Sin Vegetación	Áreas Urbanizadas	URBN
27	No observado	Áreas Agrícolas heterogéneas	AGRL
33	Río, Lago y Océano	Ríos	WATR

*Nota.* Adaptado de MINAM (2015).

Los bosques en la subcuenca han reducido su extensión en 0,9 % (2007:15 515,03 ha a 2017:15 362,20 ha); por el contrario, se evidencia un incremento de las áreas agropecuarias y urbanas (área sin vegetación) en la Tabla 6. Respecto, a la clasificación taxonómica del suelo en la zona de estudio es, principalmente, acrisoles orticos en la parte alta de la subcuenca y en la parte media son litosoles – cambisoles districos (Figura 10).

**Tabla 6**

*Clasificación y extensión de usos de suelo*

Código	Descripción	Superficie (ha)		
		2007	2012	2017
3	Bosques	15515,03	15097,24	15362,20
13	Áreas Agrícolas heterogéneas	158,43	170,25	132,32
21	Pastos	1570,41	1882,28	1458,16
22	Áreas Urbanizadas	309,01	504,35	552,94
27	Áreas Agrícolas heterogéneas	0,95	0,96	0,95
33	Ríos	166,34	65,46	213,30

*Nota.* Información generada a partir del procesamiento del ráster de uso de suelo de Mapbiomas (2023).

### **Tipos de suelo**

La información de suelos en la investigación se ha obtenido de la base de datos de suelo (Tabla 7) a escala mundial de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), elaborado conjuntamente con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y se encuentra en una escala de 1 : 5 000 000, cabe indicar que presenta una clasificación taxonómica que es leída por la base de datos del modelo SWAT; motivo por el cual se optó por usar esta información y no las existentes en los estudios de Zonificación Ecológica Económica de la región San Martín por tener una clasificación diferente a la que se usó en el modelo, la información de suelo puede descargarse en formato shapefile o ráster del siguiente enlace: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>, como se muestra Figura 10.

**Tabla 7**

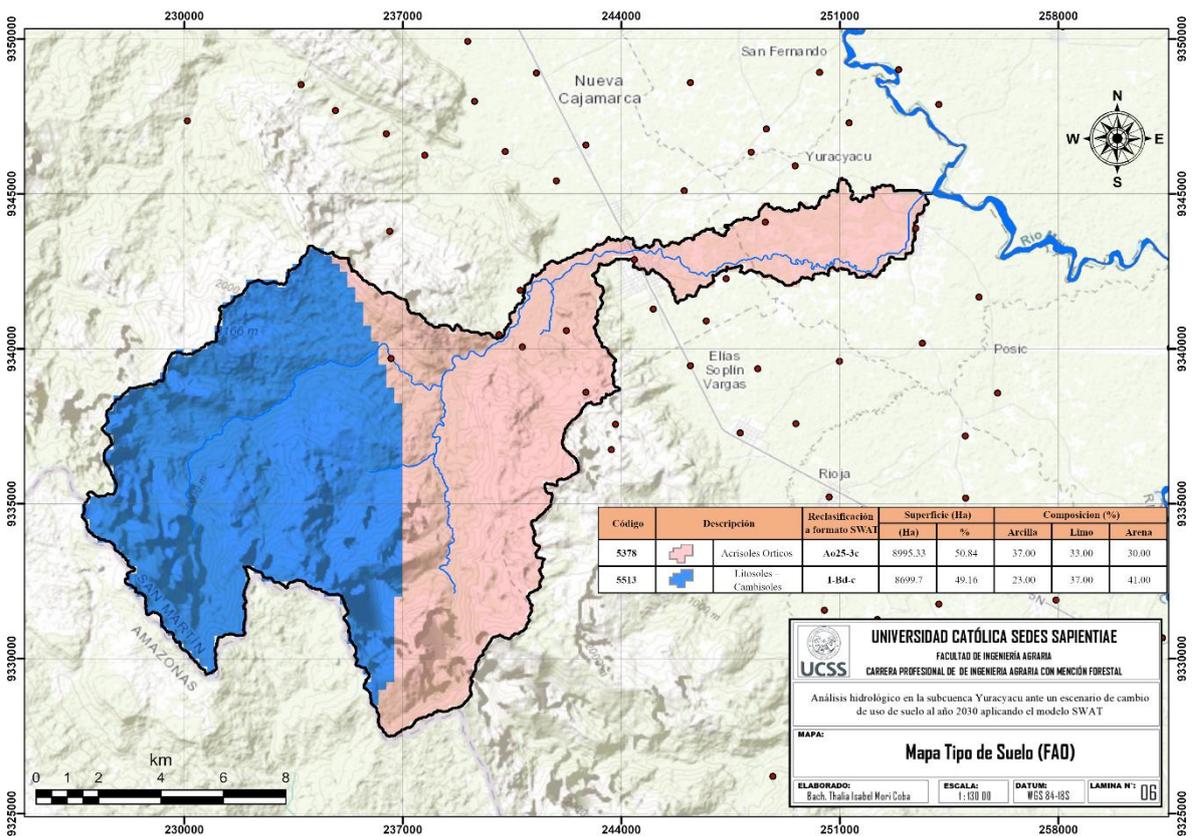
*Clasificación de suelos*

Código RASTER	Codificación SWAT	Descripción	%		
			Arcilla	Limo	Arena
5378	Ao25-3c	Acrisoles Orticos	37	33	30
5513	I-Bd-c	Litosoles – Cambisoles Districos	23	37	41

*Nota.* Obtenido de FAO (2023).

**Figura 10**

*Tipos de Suelos para la subcuenca del río Yuracyacu*



*Nota.* Codificación y Composición de Arcilla, Limo y Arena presente en los suelos de la zona de estudio.

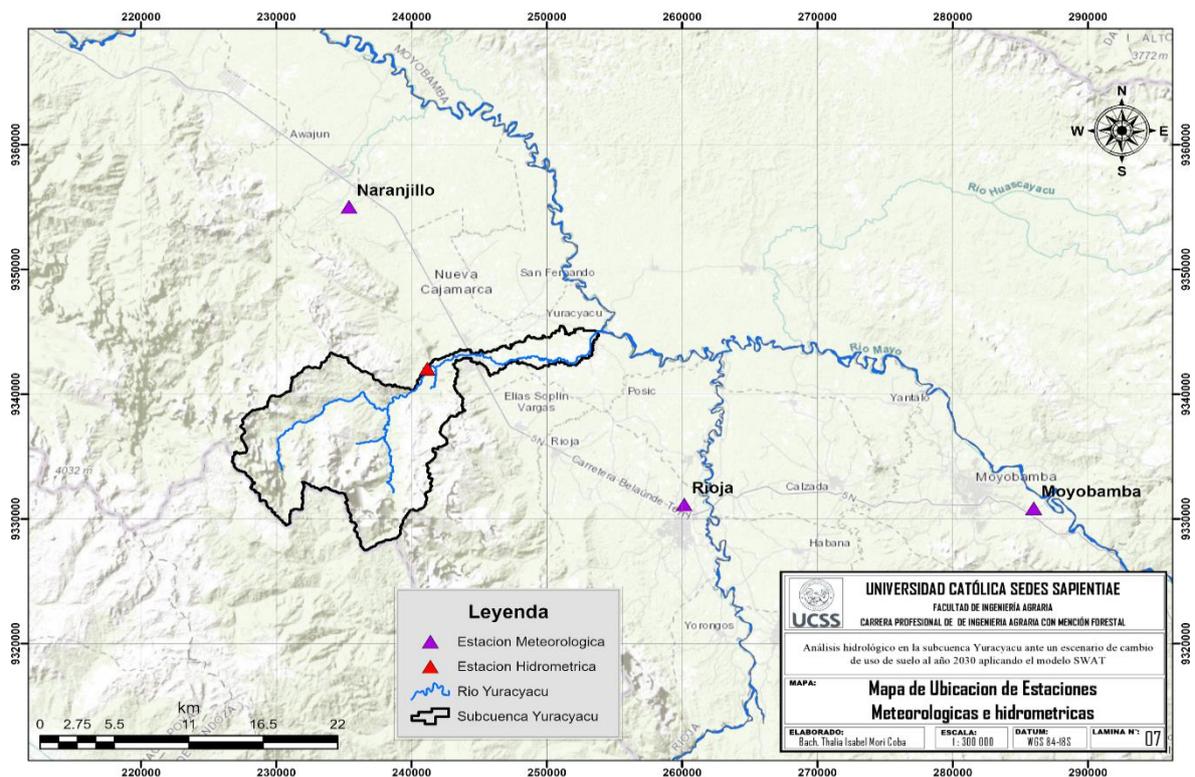
## Datos meteorológicos e hidrológicos

La información climatológica que necesita el modelo es data diaria (humedad relativa, temperatura máxima y mínima, precipitación, dirección del viento y radiación solar) obtenida de las cinco estaciones climáticas del Servicio Nacional de Meteorología y Climatología (SENAMHI), como son: Naranjillo, Rioja, Moyobamba, Soritor, Chachapoyas (Figura 11), cuyo registro histórico utilizado para esta investigación comprendió entre los años 1990 al 2019 (Figura 12, Figura 13, Figura 14 y Figura 15).

Los datos hidrométricos o de caudales aforados fueron obtenidos de la estación La Florida (Figura 11) a cargo de la Administración Local del Agua Alto Mayo y cuenta con un registro de aforo mensual desde el año 2001 al 2010 (actualmente inoperativa), se puede acceder y descargar a través del siguiente enlace <http://snirh.ana.gob.pe/visors2/>; la cual se utilizó para calibrar y validar el modelo.

**Figura 11**

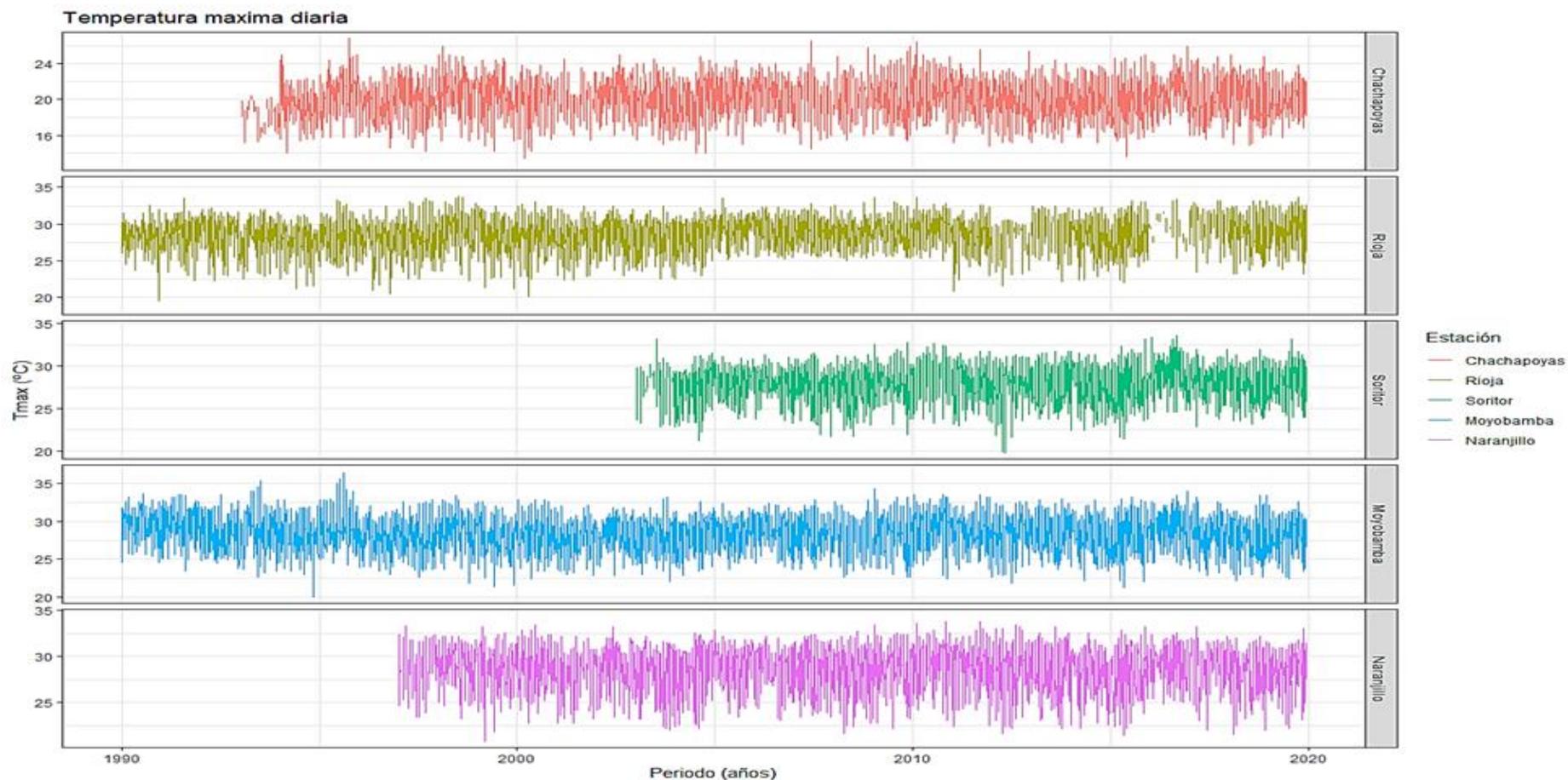
*Ubicación de la estaciones meteorológicas e hidrométricas*



*Nota.* Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométricas que influyen en la cuenca de estudio.

**Figura 12**

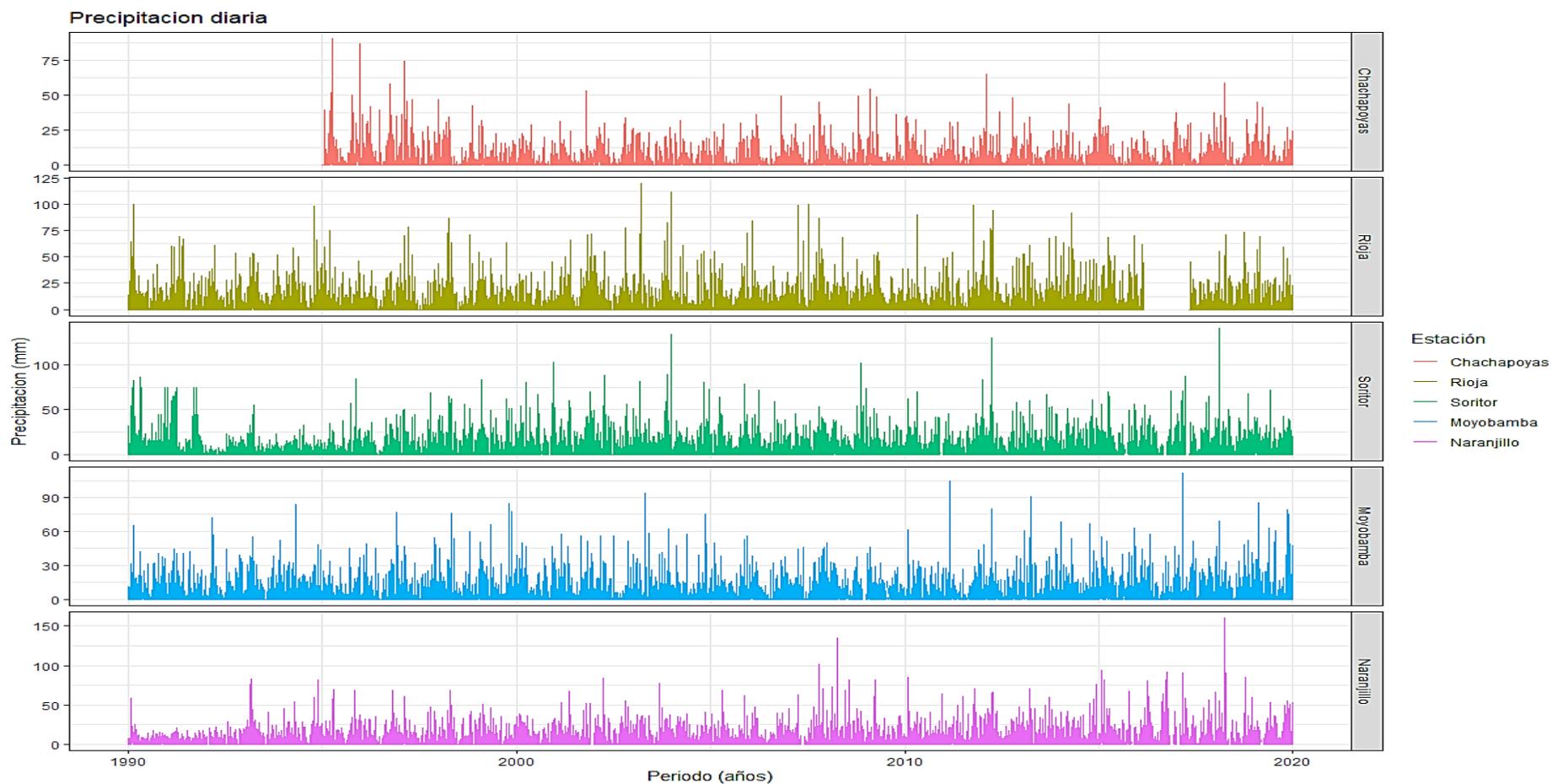
*Serie histórica de temperatura máxima diaria en las estaciones Chachapoyas, Naranjillo, Rioja, Moyobamba y Soritor*



*Nota.* Modificado de SENAMHI para el periodo 1990 al 2019 (2023).

**Figura 13**

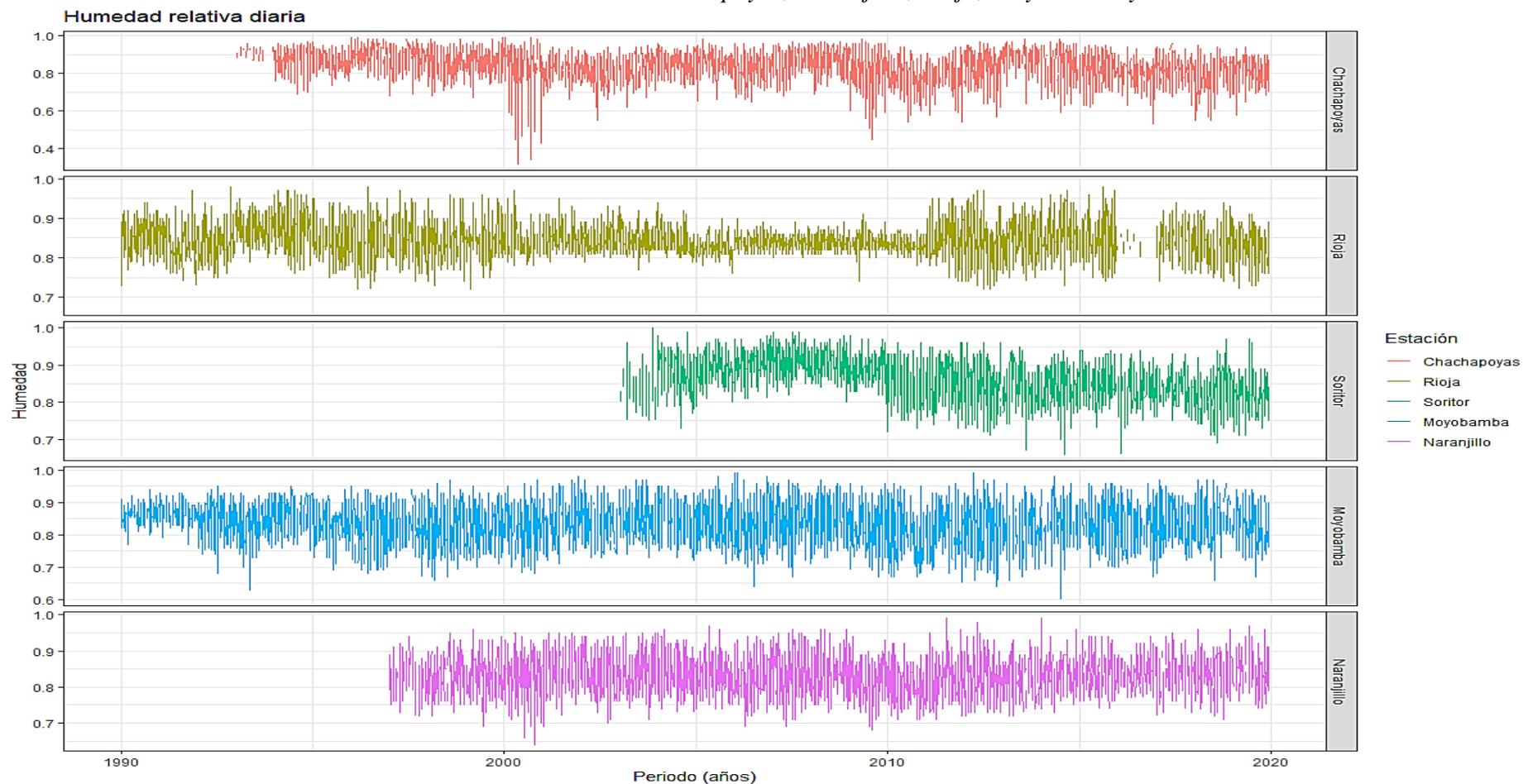
*Serie histórica de precipitación diaria en las estaciones Chachapoyas, Naranjillo, Rioja, Moyobamba y Soritor*



*Nota.* Modificado de SENAMHI para el periodo 1990 al 2019 (2023).

**Figura 14**

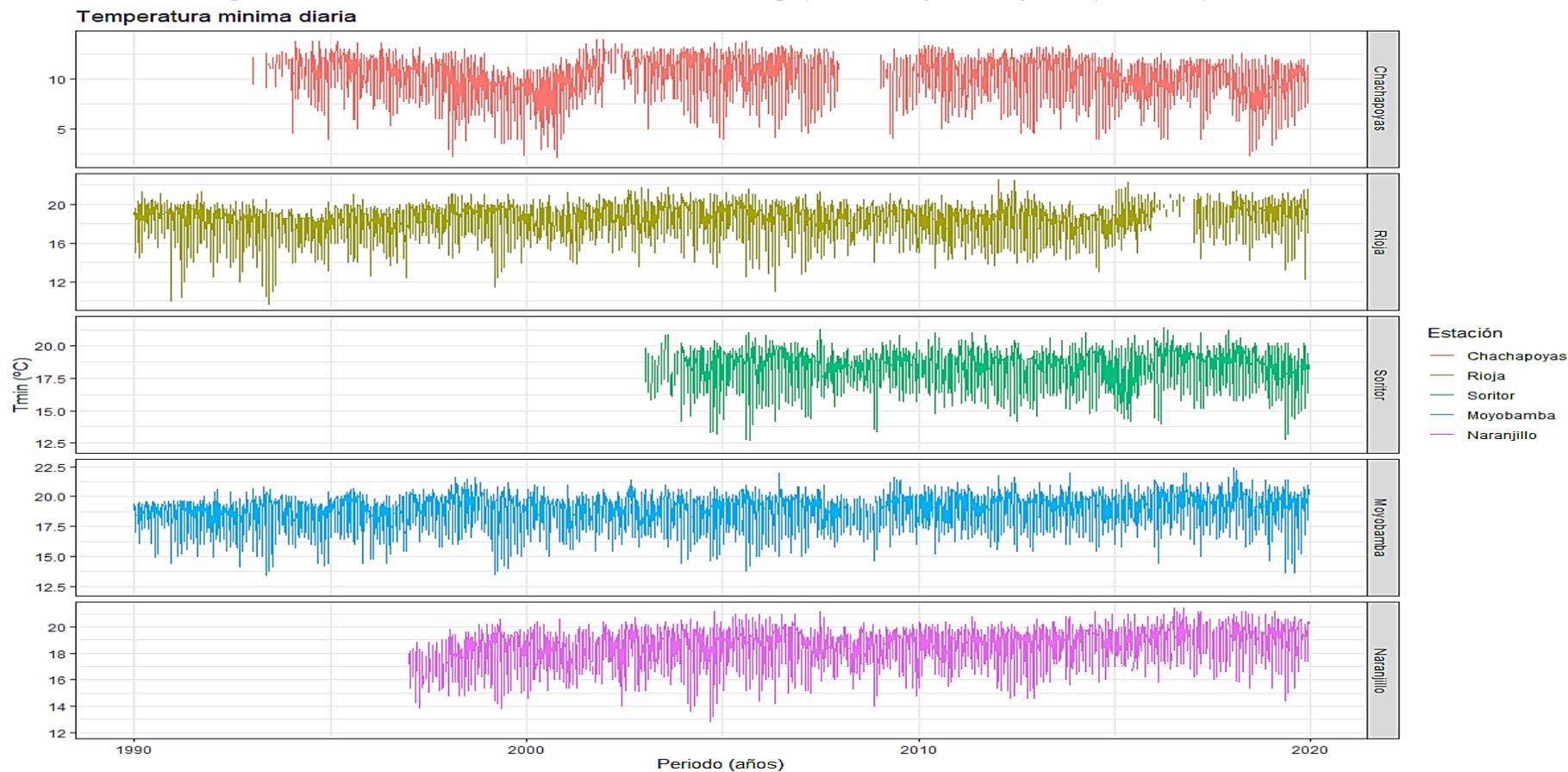
*Serie histórica de humedad relativa diaria en las estaciones Chachapoyas, Naranjillo, Rioja, Moyobamba y Soritor*



*Nota.* Modificado de SENAMHI para el periodo 1990 al 2019 (2023).

**Figura15**

*Serie histórica de temperatura mínima diaria en las estaciones Chachapoyas, Naranjillo, Rioja, Moyobamba y Soritor*



Nota. Modificado de SENAMHI para el periodo 1990 al 2019 (2023).

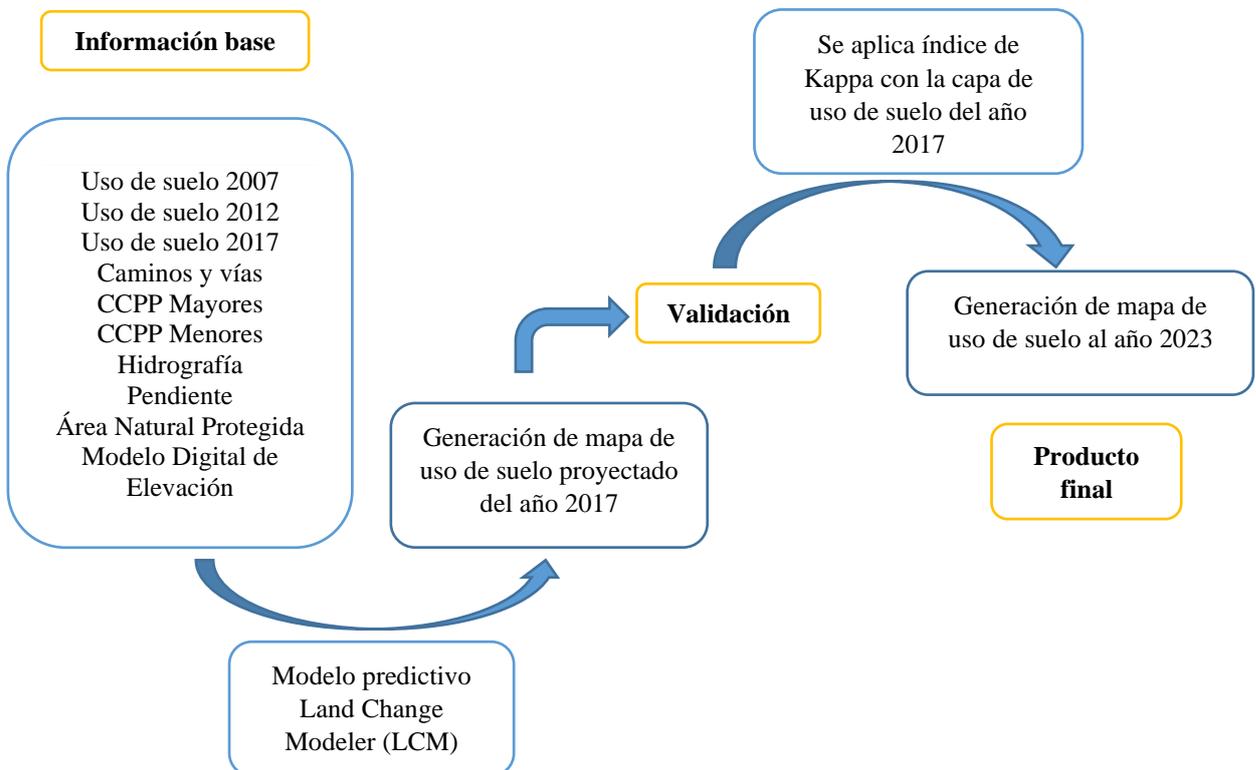
## Uso de suelo proyectado al 2030

Para realizar el modelamiento de cambio de uso de suelo se usó el modelo predictivo Land Change Modeler (LCM) que está incorporado en el software TerrSet. Este es un sistema geoespacial que permite monitorear y modelar procesos del sistema terrestre, mediante imágenes satelitales históricas preprocesadas y clasificadas (Nath *et al.*, 2018).

LCM utiliza mapas de uso de suelos actuales y pasados para predecir los cambios proyectados mediante redes neuronales; así mismo, utiliza información existente en la cuenca como áreas protegidas, zona de amortiguamiento caminos, ríos, centros poblados menores y mayores para lograr una predicción más eficiente (Figura 16).

**Figura 16**

Flujo de trabajo del modelo Land Change Modeler



Las múltiples capas de datos SIG al igual que los mapas clasificados de los años 2007 y 2012 fueron reclasificados en el software ArcGis 10.5. Posteriormente, con base en las imágenes de los años anteriormente indicados, la matriz y áreas de probabilidad de transición permitió

generar la imagen de idoneidad de transición; para finalmente aplicar un filtro de contigüidad y modelar el mapa de uso de suelo al año 2030. Cabe indicar, que para validar el modelo antes de ejecutar la simulación, se comparó la capa de suelos del año 2017 existente con el simulado. Esta metodología se hace con la finalidad de validar el modelo utilizando el índice de concordancia KAPPA (Tabla 8).

**Tabla 8**

*Índice de Kappa*

<b>Rango</b>	<b>Eficiencia</b>
<b>0</b>	Pobre
<b>0.2</b>	Leve
<b>0.21 – 0.40</b>	Aceptable
<b>0.41 – 0.60</b>	Moderado
<b>0.61 – 0.8</b>	Considerable
<b>0.81 – 1.00</b>	Casi perfecta

*Nota.* Obtenido de Landis, J y Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data de. *Biometrics*, 33: 159-174.

### **Aplicación del modelo SWAT**

Para la elaboración del modelo hidrológico SWAT, se ingresó la información a través de la interfaz de ARCSWAT instalado en ArcGis 10x. Para ello, se incorporó la información de precipitación diaria, temperatura diaria máxima y mínima; además, para las variables como humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento se utilizó el motor climático que incluye el modelo como base de datos. Es necesario indicar que el modelo realizó el cálculo de la evapotranspiración utilizando el método de Penman – Montith.

La escorrentía en la superficie se calculó para todas las unidades de respuesta hidrológica (HRU) y se acumuló para calcular el total de escorrentía en la cuenca. La escorrentía se estimó usando el método del número de la curva SCS modificado del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (USDA) publicado en el año 1972.

## Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación del modelo

*Análisis de Sensibilidad:* El modelo hidrológico SWAT tiene incorporado una gran cantidad de variables o parámetros necesarios para la calibración que muchas veces hacen que el proceso sea complejo, siendo necesario determinar qué parámetros son los necesarios para ser calibrados y mejorar la respuesta del modelo hidrológico, de esta forma se pueda reproducir datos muy similares a los aforados. Este análisis resultó útil para seleccionar los parámetros que son más sensibles frente a los menos sensibles o que tienen un impacto poco significativo en el modelo, con la finalidad de facilitar el proceso ahorrando costo computacional; bajo ese contexto, los parámetros que deben ser tomados en cuenta en la etapa de calibración deben tener un factor p-value superior a 0,2 (Srinivasan, 2015). Para ello se calibraron los parámetros, mediante del programa SWAT-CUP, al realizar el análisis de sensibilidad (Tabla 9).

**Tabla 9**

*Parámetros de Calibración usando en SWAT CUP.*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Proceso de intervención</b>
<b>CN<sub>2</sub></b>	Curva Numero en cada subcuenca	Cobertura
<b>Alpha Bf</b>	Factor Alfa del Flujo Base	Acuífero
<b>Gw Delay</b>	Tiempo de retardo del agua subterránea	Acuífero
<b>Gwqmm</b>	Acuífero profundo	Acuífero
<b>Sol Awc</b>	Contenido de humedad en el suelo	Suelos
<b>Esco</b>	Factor de compensación de evaporación del suelo	Evaporación
<b>Gw_revap</b>	Coefficiente de recarga de aguas subterráneas	Acuífero

*Nota.* Adaptado de Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J. y Williams, J (2005). Soil and Water Assessment Tool. Texas Agricultural Experiment Station. Temple - Texas, USA.

## Calibración y Validación

Esta etapa consistió en modificar los valores o rangos de los parámetros seleccionados en la Tabla 9, con la finalidad de obtener caudales simulados muy parecidos a los aforados. Es

necesario lograr un ajuste o métricas estadísticas aceptables entre las observaciones y las simulaciones; para ello se utilizó el algoritmo Sequential Uncertainty Fitting 2 (SUFI2). SUFI2, que es un método que permite un mejor rendimiento y de fácil manejo para la calibración del modelo SWAT.

Para determinar la eficiencia del modelo se realizó la comparación y evaluación de los siguientes parámetros estadísticos como son el coeficiente de eficiencia de Nash - Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el sesgo porcentual (Percent bias - PBIAS) (Tabla 10). Estos criterios estadísticos evaluaron el desempeño del modelo SWAT aplicado en la investigación al comparar los valores simulados y observados.

**Tabla 10**

*Criterios estadísticos para evaluar el rendimiento de un modelo hidrológico*

<b>Criterio estadístico</b>	<b>Valores</b>	<b>Clasificación del rendimiento</b>
<b>Coefficiente de Nash – Sutcliffe</b>	$0,75 < NSE \leq 1,00$	Excelente
$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{sim})^2}$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	Bueno
	$0,50 < NSE \leq 0,65$	Satisfactorio
	$0,40 < NSE \leq 0,50$	Aceptable
	$NSE \leq 0,40$	Malo
	<b>Coefficiente de determinación</b>	
$R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})(Q_t^{sim} - \bar{Q}^{sim})]^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2 \sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - \bar{Q}^{sim})^2}$	$r \geq 0,5$	Satisfactorio
	$0 \leq r < 0,5$	Malo

(continuación)

Criterio estadístico	Valores	Clasificación del rendimiento
<b>Percent bias</b> $PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim}) \cdot 100}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs})}$	$PBIAS < \pm 10$ $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ $PBIAS \geq \pm 25$	Excelente Bueno Satisfactorio Malo
<b>Raíz cuadrada del error cuadrático medio</b> $RMSE = \left[ \frac{(\sum_{t=1}^n Q_t^{sim} - Q_t^{obs})^2}{n} \right]^{0.5}$	Valor inferior a la mitad de la desviación estándar	Satisfactorio
<b>Relación entre RSME y la desviación estándar de las observaciones</b> $RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}}$ $= \frac{\left[ \sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2} \right]}{\left[ \sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \right]}$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$ $0,50 \leq RSR \leq 0,60$ $0,60 \leq RSR \leq 0,70$ $RSR > 0,70$	Excelente Bueno Satisfactorio Malo

Nota. Obtenido de Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. y Veith, T.L. (2007) Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885-900. (doi: 10.13031/2013.23153)

En la calibración y validación del modelo, se utilizó caudales mensuales de la estación hidrológica La Florida (punto de aforo). El proceso de calibración se realizó con un periodo de 7 años, el cual estaba comprendido entre enero del 2001 a diciembre del 2007. Además, para el proceso de validación se utilizó el periodo de 3 años, comprendido entre enero del 2008 a diciembre del año 2010. En ambos procesos (calibración y validación), el rendimiento del modelo se evaluó con las métricas estadísticas.

### Proyecciones climáticas en SWAT

Con el modelo SWAT previamente calibrado y validado, se pueden realizar las predicciones del impacto por acciones del cambio climático en la subcuenca de estudio. Para lo cual, se utilizó MarkSimGCM para obtener los datos climáticos futuros, siendo un generador que

emplea procesos estocásticos para reducir las proyecciones climáticas futuras y ser utilizadas en los MCG con aceptación a nivel mundial (Jones y Thornton, 2013; Trotochaud *et al.*, 2016) y son calibrados con datos de WorldClim.

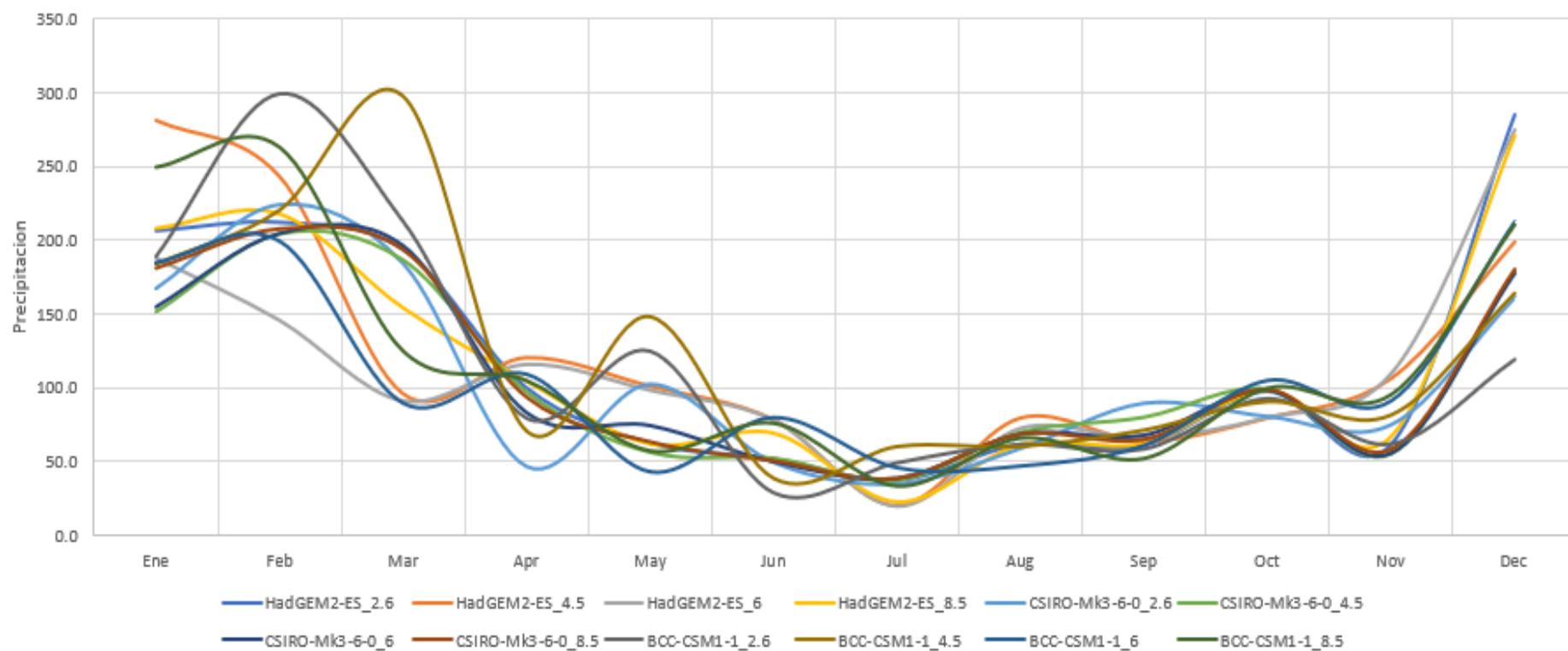
Para ello se tomó como referencias de los modelos utilizados en MarkSimGCM, al estudio denominado “Evaluación de los modelos CMIP5 del IPCC en el Perú: Proyecciones al año 2030 en la Región San Martín” el cual fue realizado en el 2013 por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, donde se aplicaron los modelos climáticos para la región San Martín CCSM4, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES y MPI-ESM-LR; cabe mencionar que, el SENAMHI en el año 2009 ha realizado el estudio “Proyecciones climáticas al 2030 en la cuenca del Mayo” en el cual utilizan el modelo climático CCSM.

Teniendo como base los estudios aplicados por el SENAMHI en la región San Martín y cuenca del río Mayo, se optó por usar para la presente investigación los modelos BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES. Estos modelos climáticos se analizaron en los 4 RCP (2.5,4.5,6,8.5), de los cuales se posee información meteorológica (precipitación y temperatura) para determinar caudales proyectados al 2030 mediante un gráfico de tendencia estadística.

Los escenarios futuros elegidos se basaron en los modelos climáticos evaluados BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES para los diferentes escenarios de emisiones contaminantes (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5) de la subcuenca del río Yuracyacu, obteniendo de esta forma doce proyecciones posibles. Además, el cálculo de la precipitación media en la subcuenca se realizó mediante la interpolación de la información proyectada obtenida de MarkSim y su representación fue generada con el software Hydraccess (Figura 17).

**Figura 17**

*Comparación de precipitación media mensual de modelos climáticos para la subcuenca del río Yuracyacu*



## 2.7. Identificación de variables y su medición

Para la investigación desarrollada se consideraron las siguientes variables identificadas en la Tabla 11; así como sus respectivas dimensiones, indicadores y unidades de medida.

**Tabla 11**

*Variable y su medición*

<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidad de Medida</b>
<b>Dependiente: Y1</b>	Caudal	Variabilidad de caudales periodo 2020 - 2030	m <sup>3</sup> /mes
<b>Independiente: X1</b>	Elementos climáticos	Precipitación Temperatura mínima Temperatura máxima Humedad Relativa	mm °C °C %
<b>Independiente: X2</b>	Elementos geográficos	Relieve (Modelo Digital de Elevación) Uso Actual Tipo de suelo	m Ha Ha
<b>Independiente: X3</b>	Datos hidrométricos	Caudales Históricos 2001 - 2010	m <sup>3</sup> /mes

## **2.8. Análisis de datos**

El análisis de datos se realizó mediante la estadística descriptiva que consistió en la elaboración de gráficos para determinar consistencia en los datos evaluados. Para el desempeño del modelo hidrológico se establecieron rangos de aceptación o rechazo de acuerdo a los criterios estadísticos antes mencionados, que buscan comparar los caudales simulados con los caudales observados o aforados. Respecto a la elaboración de las gráficas de series como precipitación y temperatura, se utilizó paquetes estadísticos mediante el uso de códigos en el programa R (ver Apéndice 18) y Excel.

## **2.9. Materiales y equipos**

Los equipos y softwares fueron:

### **Equipos Geolocalizadores**

- GPS Garmin modelo MAP 62s

### **Equipos de cómputo**

- Laptop Toshiba Core i5 procesador 64 bits con disco sólido SSD de 500 GB

- Disco duro de 1 TB de almacenamiento

- Tarjeta gráfica de 2 GB

### **Softwares**

Los cálculos y el manejo de datos se realizaron mediante el uso de los softwares siguientes:

- ArcGIS 10,5 Desktop.
- ArcSWAT.
- SWATCUP.
- R y RStudio.
- Microsoft office 2016.

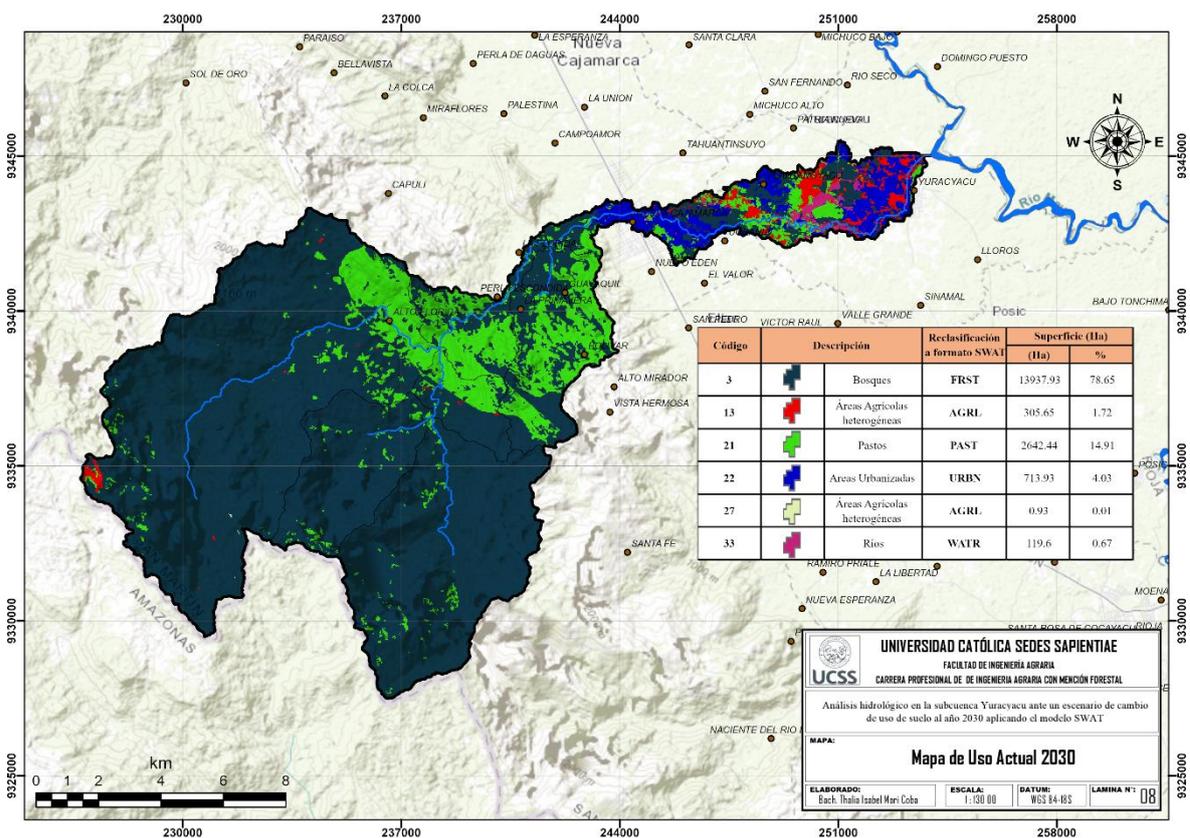
## CAPÍTULO III. RESULTADOS

### 3.1. Determinar el cambio de uso de suelo en la subcuenca Yuracyacu para el año 2030, mediante Teledetección y herramientas SIG

El modelo de uso de suelo proyectado al 2030 de la subcuenca del río Yuracyacu (Figura 18) presentó una tendencia similar en las variaciones de coberturas, como se evidencia en los valores de superficie comparativos de la Tabla 12. Además, tiene un índice de KAPPA con un valor de 0,8970; lo cual indica una capacidad predictora casi perfecta y buena concordancia cartográfica.

**Figura18**

Uso de suelo proyectado al año 2030 en la subcuenca del río Yuracyacu



*Nota.* Uso de Suelo en la subcuenca Yuracyacu del año 2012.

**Tabla 12***Clasificación y extensión de usos de suelo al año 2030.*

Código	Descripción	Superficie (ha)			
		2007	2012	2017	2030
3	Bosques	15515,03	15097,24	15362,20	13937,93
13	Áreas Agrícolas heterogéneas	158,43	170,25	132,32	305,65
21	Pastos	1570,41	1882,28	1458,16	2642,44
22	Áreas Urbanizadas	309,01	504,35	552,94	713,93
27	Áreas Agrícolas heterogéneas	0,95	0,96	0,95	0,93
33	Ríos	166,34	65,46	213,3	119,6

### 3.2. Establecimiento del modelo calibrado en función a las Unidades de Respuesta Hidrológica con el modelo SWAT

#### 3.2.1 Ejecución del modelo SWAT

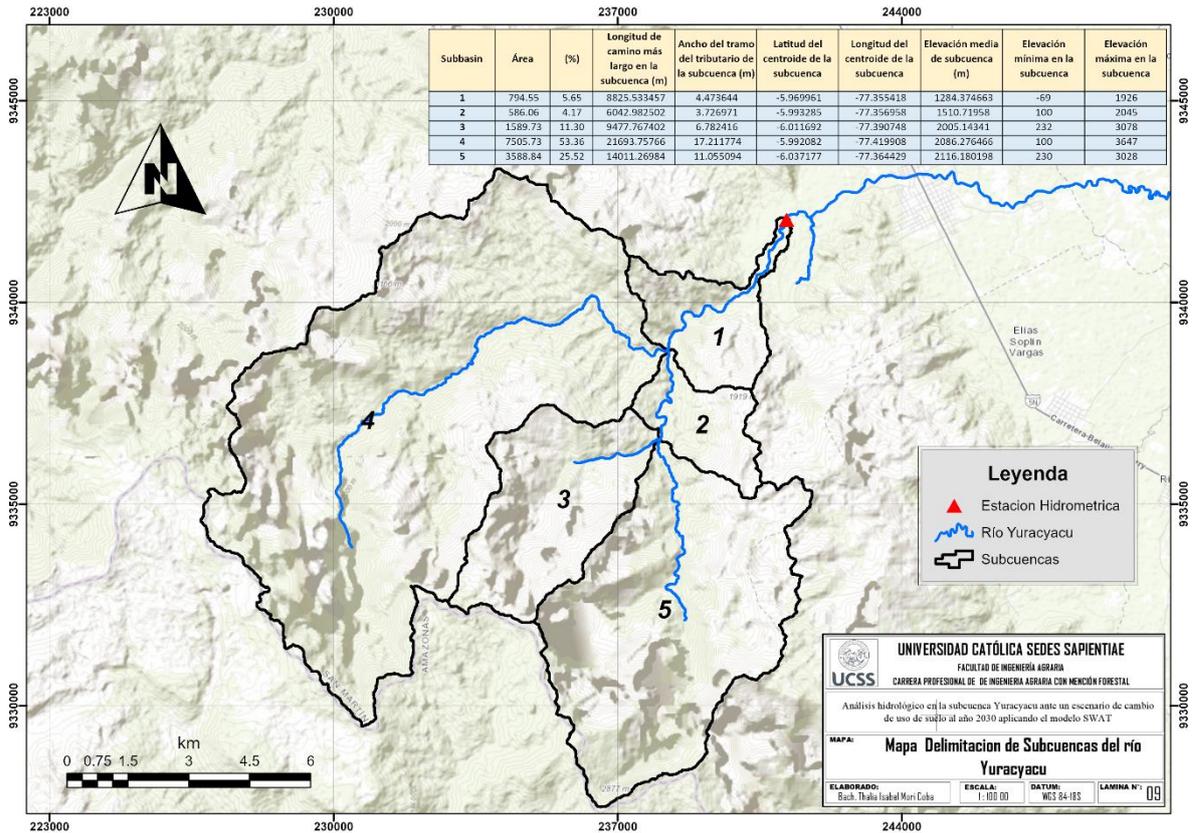
Para la ejecución del modelo, este solicita un punto de interés para ejecutar una nueva delimitación de la cuenca; al respecto este punto de interés debe coincidir con una estación hidrométrica donde se ha registrado los caudales históricos para la posterior calibración y validación del modelo, para el presente estudio se indicó como punto de salida la estación de hidrométrica la florida, la nueva delimitación del área de estudio, cuya área fue de 140,64 km<sup>2</sup>; asimismo, del área total se subdividió en 5 subcuencas identificadas con numeración correlativa (Figura 19); esta primera fase se logró de acuerdo a la dirección y acumulación del flujo obtenido del modelo digital de elevación. Como segunda fase se ingresó la información digital del tipo de suelo, usos de suelo y clases de pendientes, con la finalidad de obtener Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

Respecto a la nueva delimitación se obtuvo un uso de suelos con predominancia del uso forestal (88,67 %) y pastos (11,04 %); por otra parte, en menor medida es agricultura (0,27 %) y urbana (0,02 %) para las subcuencas de estudio (Figura 20). Con respecto a los tipos de suelos se obtuvo una mayor predominancia de los litosoles – cambisoles districos con 63,93 % y acrisoles órticos en 36,07 % (Figura 21). Además, al asignar una clasificación de pendientes para discretizar la cuenca se evidencia la predominancia de pendientes mayores

al 45 % en un área correspondiente a 61,04 % (Figura 22) y generando, finalmente, 103 HRU (Figura 23) para la zona de estudio, al respecto en propio indicar nuevamente que las HRU son espacios u unidades que comparten características de tipo de suelo, uso de suelo y pendiente dentro de la cuenca de estudio.

**Figura 19**

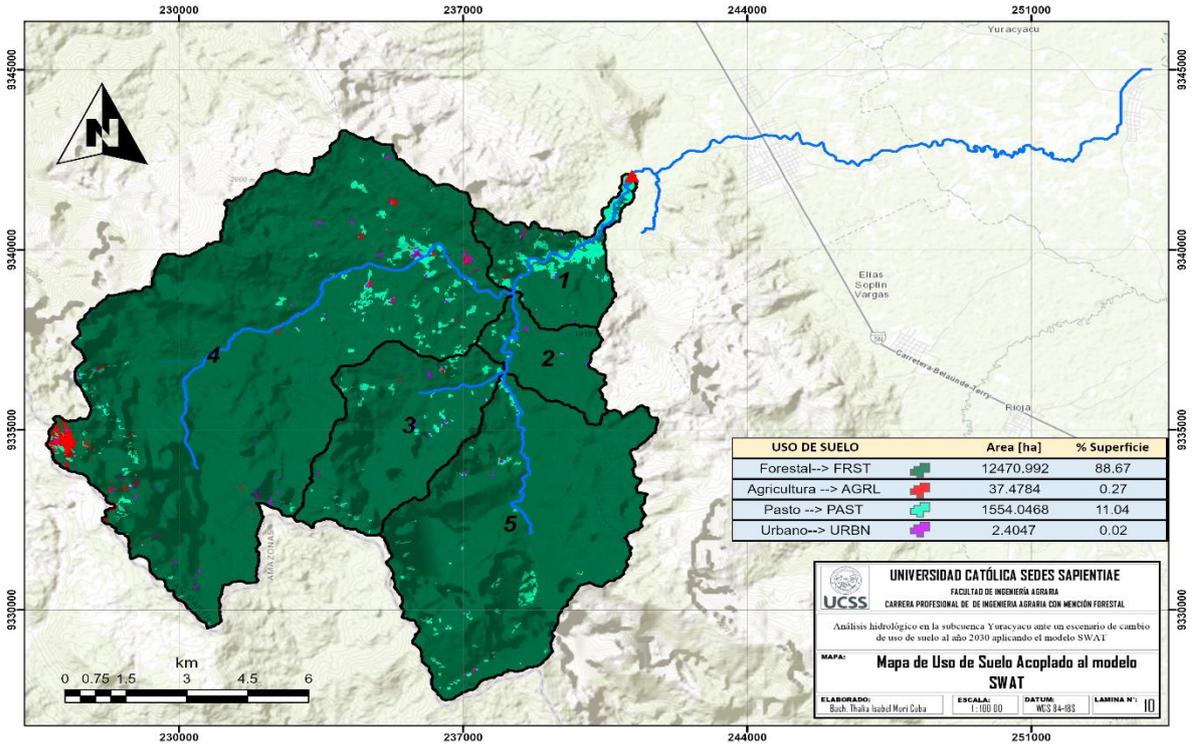
*Delimitación de subcuencas ámbito de estudio del río Yuracyacu*



*Nota.* Delimitación de subcuencas con el modelo SWAT en base al punto de la estación Hidrométrica.

**Figura 20**

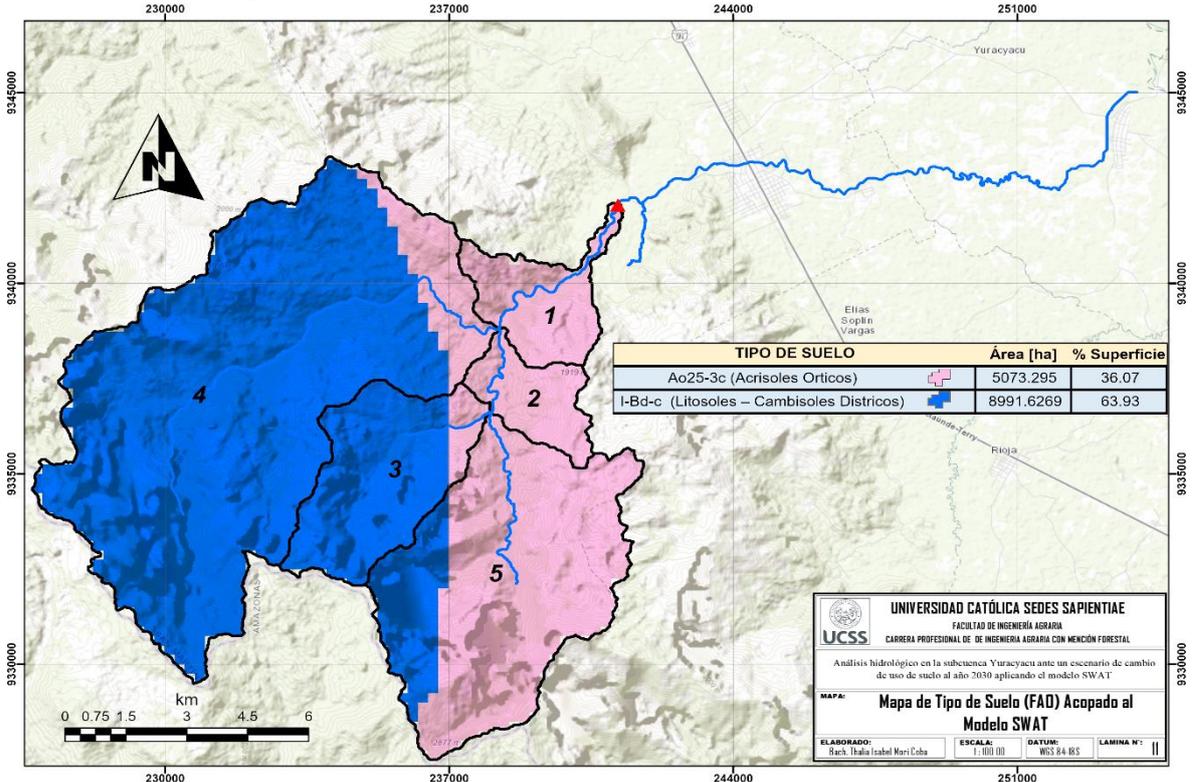
*Clasificación del uso de suelos de la zona de estudio*



Nota. Uso de Suelo acoplado al modelo SWAT, para la generación de HRU.

**Figura 21**

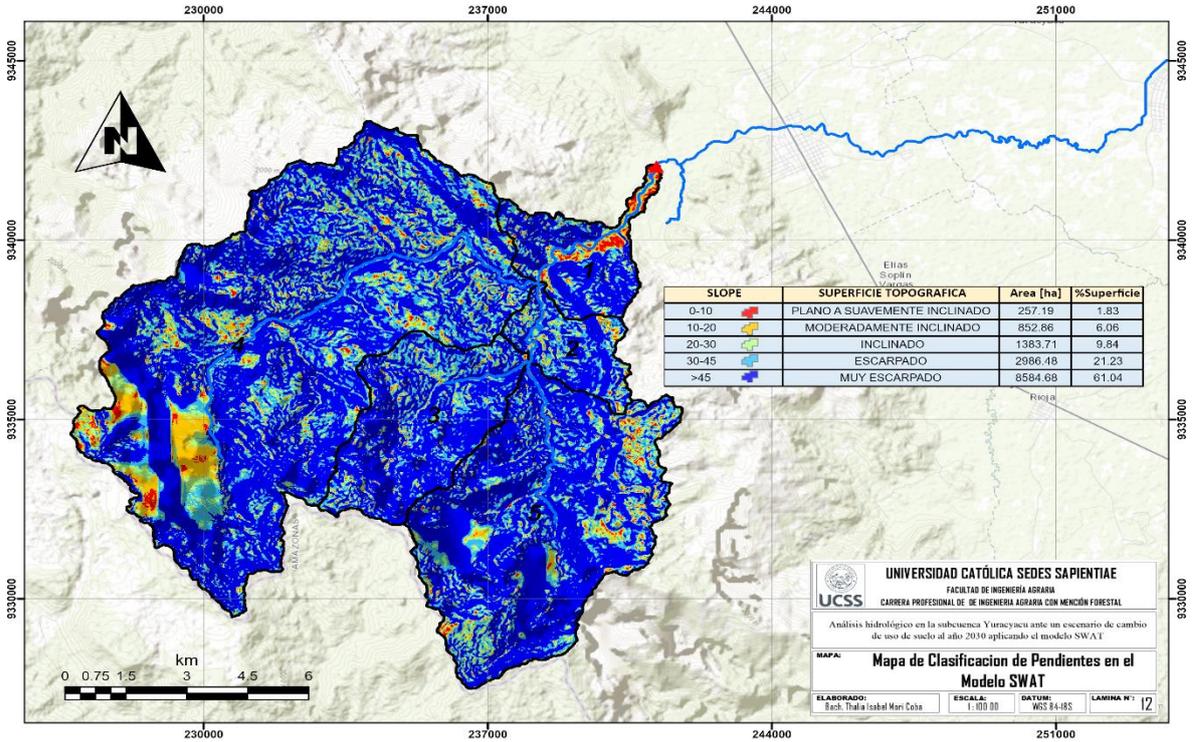
*Clasificación del tipo de suelos de la zona de estudio*



Nota. Tipo de Suelo acoplado al modelo SWAT, para la generación de HRU.

**Figura 22**

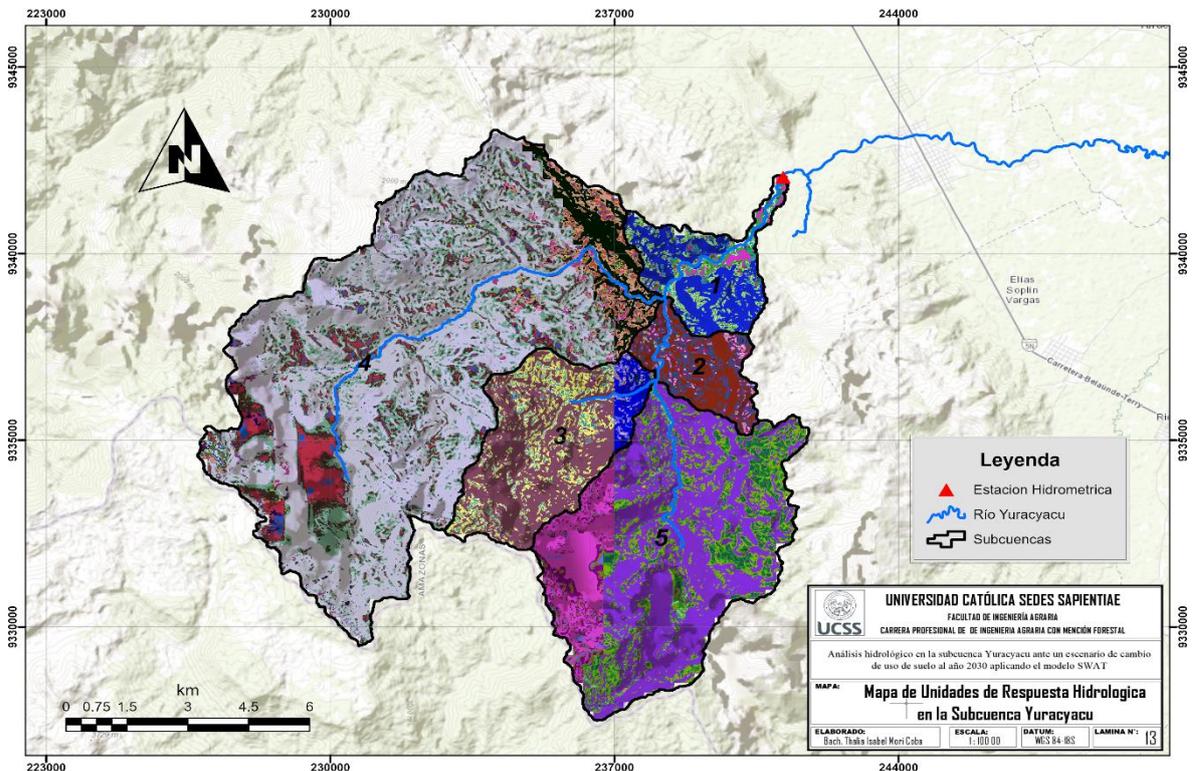
*Clasificación de pendientes de la zona de estudio*



Nota. Pendiente acoplado al modelo SWAT, para la generación de HRU.

**Figura 23**

*Clasificación de las unidades de respuesta hidrológicas de la zona de estudio*



Nota. Representación de las Unidades de Respuesta Hidrológica del modelo SWAT.

### 3.2.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico

#### Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite establecer los parámetros de ingreso al modelo SWAT mediante el software SWAT CUP; por lo tanto, muestra la relevancia de algunos parámetros frente a otros al identificar pequeñas variaciones, buscando ajustar los caudales simulados en comparación con los observados. Para la investigación se utilizaron los siguientes parámetros:

- Factor de compensación de evaporación del suelo (ESCO)
- SCS Numero de curva (CN)
- Factor alfa del flujo base (ALPHA BF)
- Tiempo de retardo del Agua Subterránea (GW\_DELAY)
- Umbral de profundidad del agua necesaria en el acuífero superficial para que ocurra el flujo de retorno (GWQMN)
- Factor de compensación de absorción de la planta (EPCO)
- Coeficiente de Agua Subterránea (GW REVAP)
- Umbral de la profundidad del agua en el acuífero superficial (REVAPMN)
- Capacidad de Agua en el suelo (SOL AWC)

Al analizar mediante el factor t-Stat, permite identificar la diferencia significativa entre las medias de los grupos y su mayor sensibilidad de forma ascendente; además de un p-value superiores a 0,2. Por lo tanto, se identificó que los parámetros que cumplen esta condición son EPCO, REVAPMN, CN2; así mismo, los parámetros como ESCO, ALPHA BF, GW DELAY, GWQMN, GW REVAP y SOL AWC no cumplen la condición, pero presentan un t-stat alto, permitiendo incluir todos los parámetros (Tabla 13).

**Tabla 13***Parámetros evaluados en la cuenca del río Yuracyacu*

<b>Parámetro</b>	<b>t-Stat</b>	<b>P-Value</b>
<b>V_ESCO.hru</b>	7,116940431	0,00000000025815
<b>R_CN2.mgt</b>	1,162984300	0,24791020300000
<b>V_ALPHA_BF.gw</b>	1,345206881	0,18193820600000
<b>V_G W_DEL AY. gw</b>	4,444203294	0,00002507200000
<b>V_GWQMN.gw</b>	-5,797140352	0,00000009900000
<b>V_EPCO.bsn</b>	0,325565633	0,74550871600000
<b>V_G W_RE V AP. gw</b>	-8,301076294	0,00000000000000
<b>V_REVAPMN.gw</b>	0,872158405	0,38544277800000
<b>V_SOL_AWC.sol</b>	-7,537273968	0,00000000003626

**Calibración y validación del modelo**

La etapa de calibración consiste en comparar los datos simulados y los observados a nivel mensual a través de métricas estadísticas y gráficos, para esto se usó los caudales medidos en la estación hidrométrica “La Florida” de los años 2001 al 2007 mientras que para la validación se usó los años 2008 al 2010. Además, se observa en el análisis de series de tiempo del caudal observado (ver Apéndice 6), un flujo permanente durante el transcurso de los meses a excepción de la época húmeda; además, una subestimación de los caudales simulados (Figura 24).

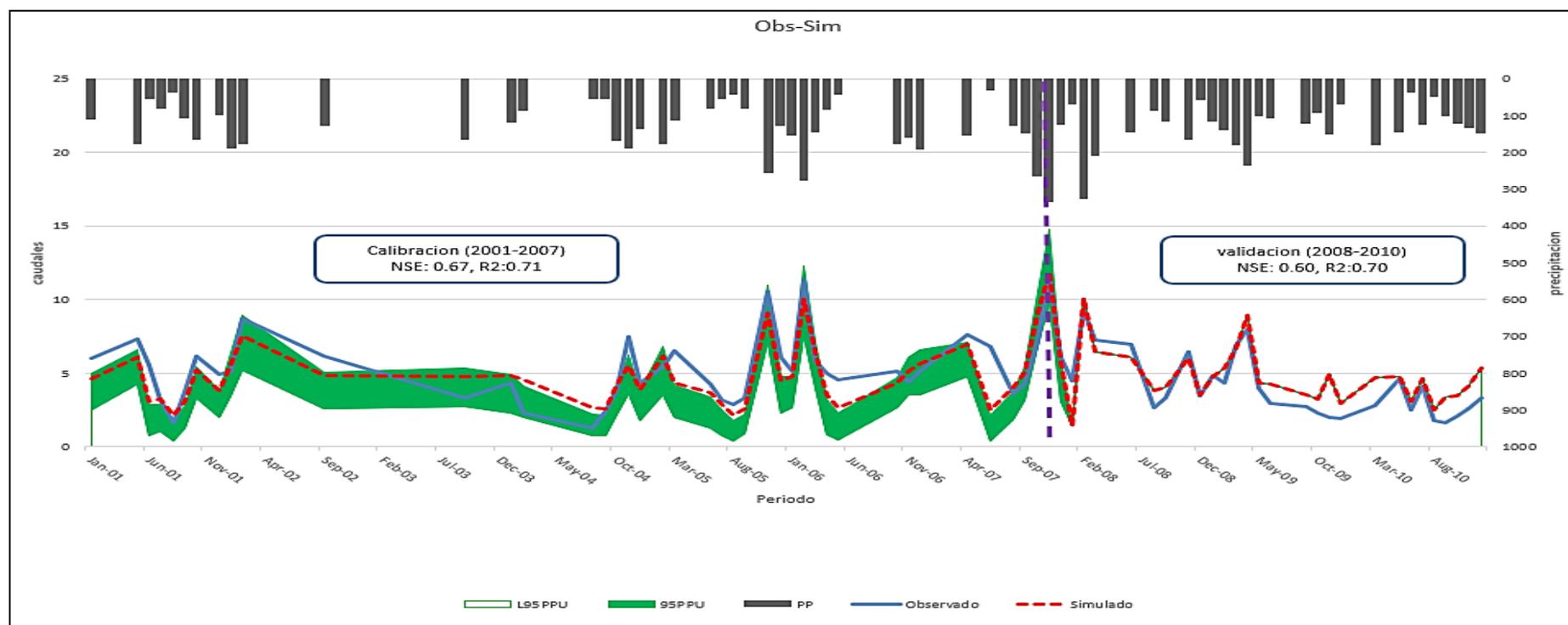
En la calibración y validación se obtuvo un rendimiento bueno para el coeficiente de Nash y valores satisfactorios del Coeficiente de determinación (Tabla 14); sin embargo, la calibración obtuvo un rendimiento excelente para PBIAS y la validación fue solo bueno (Figura 25); por lo tanto, se obtienen métricas aceptables.

**Tabla 14***Rendimiento del modelo en etapa de calibración y validación*

<b>Periodo</b>	<b>Media</b>	<b>Media simulada</b>	<b>Rendimiento</b>		
	<b>Observada</b>				
	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>NSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>PBIAS</b>
<b>Calibración</b>	5,33	4,89	0,67	0,71	8,2
<b>Validación</b>	4,04	4,68	0,60	0,70	-16

**Figura 24**

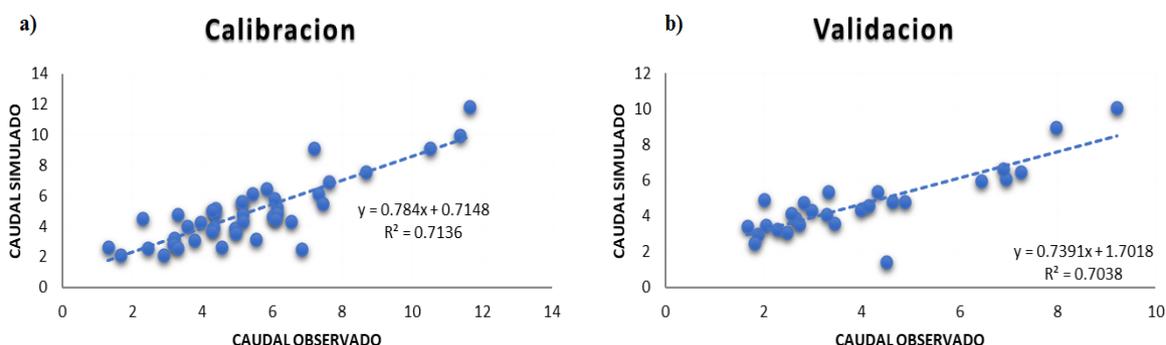
*Caudales simulados y observados en etapa de calibración y validación*



**Nota.** Grafica de rendimiento en la etapa de calibración y validación para la serie de caudales observados y simulados.

**Figura 25**

*Diagrama de dispersión de caudales observados vs caudales simulados en periodos de calibración y validación*



Cabe mencionar que, los valores ajustados de los parámetros en la calibración del modelo hidrológico del área de estudio, presentan buenos resultados según las métricas evaluadas para la calibración (Tabla 15).

**Tabla 15**

*Parámetros calibrados para la subcuenca Yuracyacu*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Valor Ajustado</b>
<b>v_ESCO.hru</b>	0,5 a 0,95	0,95	0,943250
<b>r_CN2.mgt</b>	-0,1 a 0,1	73 a 92	68 a 86 (-0,061)
<b>v_ALPHA_BF.gw</b>	0 a 1	0,048	0,715
<b>v_GW_DEL AY. gw</b>	30 – 150	31	141,89
<b>v_GWQMN.gw</b>	-1000 a 1000	1000	-590
<b>v_EPCO.bsn</b>	0,01 a 1	1	0,886150
<b>v_GW_REVAP. gw</b>	0,02 a 0,2	0,02	0,0857
<b>v_REVAPMN.gw</b>	-1000 a 1000	750	50
<b>v_SOL_AWC.sol</b>	-0,05 a 0,05	0,144	-0,0365

*Nota.* Elaboración propia.

### **3.3. Generación de información climática en la subcuenca Yuracyacu para el periodo 2030, usando modelos de circulación general (MCG)**

Posterior a la calibración y validación del modelo SWAT, se realizaron las predicciones climáticas del potencial impacto del cambio climático sobre la cuenca de estudio (parte alta y media de la subcuenca Yuracyacu). Para ello se utilizaron los MCG (BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES) para plantear diversos escenarios climáticos en función a los RCP (2.5,4.5,6,8.5) del año 2030. Por lo tanto, para cada modelo en relación a cada RCP se cuenta con información meteorológica (precipitación y temperatura), la cual se ingresa en el modelo SWAT para determinar el caudal en el año 2030 y se representa gráficamente mediante una estadística de tendencia.

#### **3.3.1 Análisis de información meteorológica**

La información meteorológica analizada fue de 11 años (2020 al 2030). En este periodo, se evaluaron proyecciones de los modelos climáticos: BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0, HadGEM2-ES, bajo los escenarios RCP 2.6; RCP 4.5; RCP 6.0 y RCP 8.5.

Las proyecciones de precipitación media anual en el modelo climático BCC-CSM1-1 escenario RCP 2.6 (Figura 26), presenta menores registros en el periodo seco (junio a setiembre) con un valor mínimo de 26,7 mm en el mes de junio del año 2030, asimismo, presenta el mayor registro en el periodo húmedo (diciembre a marzo) para el escenario RCP 8.5 con un valor de 309,2 mm en el mes de febrero del año 2023. Para modelo CSIRO-Mk3-6-0, se presentan menores valores de precipitación en el mes de abril del año 2023, con un valor de 25,8 mm para el escenario RCP 2.6; sin embargo, los mayores valores son en el mes de febrero del año 2030 con 228,3 mm para el escenario RCP 2.6 (Figura 27). El modelo HadGEM2-ES (Figura 28) presenta valores altos en las láminas de precipitación durante el periodo evaluado, principalmente para el escenario RCP 4.5; en esa línea el escenario RCP 6.0 presentan semejanza entre los modelos BCC-CSM1-1 y CSIRO-Mk3-6-0.

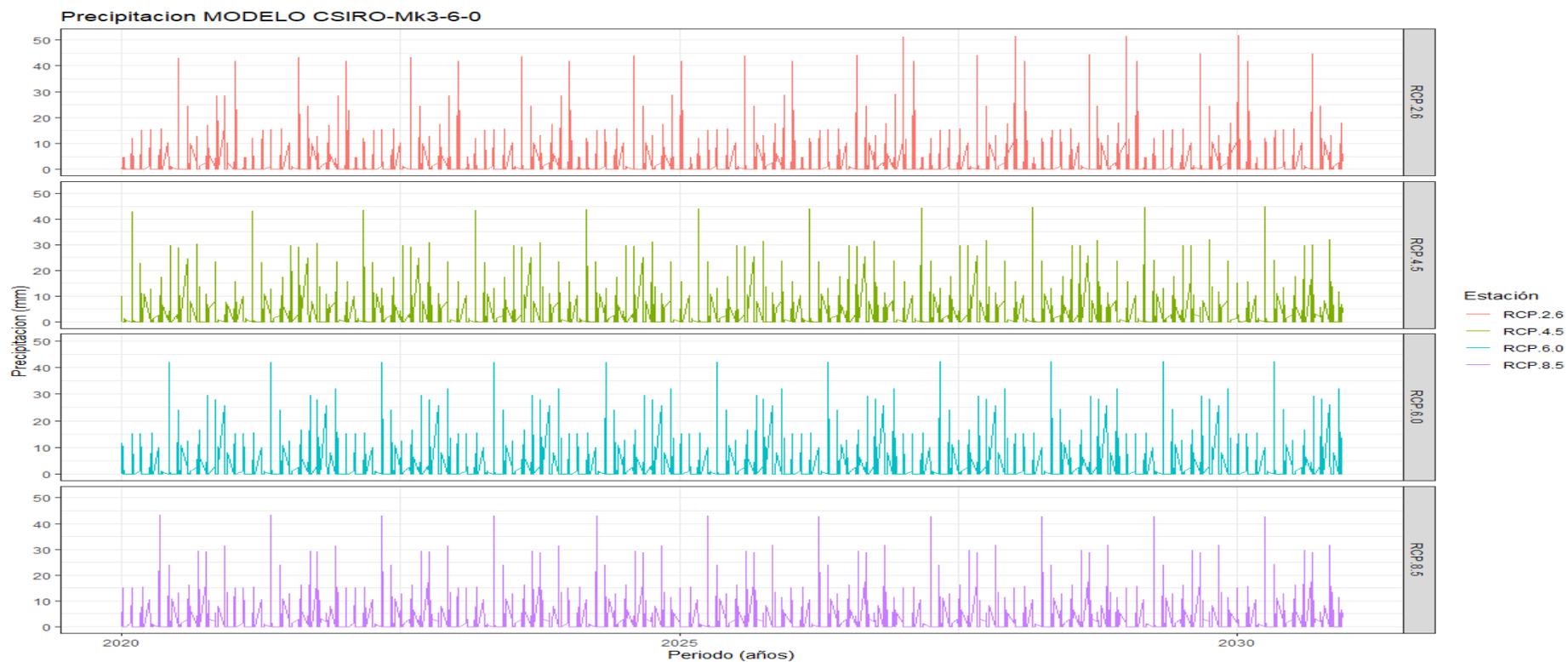
**Figura 26**

*Serie histórica de precipitación para el modelo BCC-CSM1-, bajo escenarios de RCP 2.4, 4.5, 6.0 y 8.5*



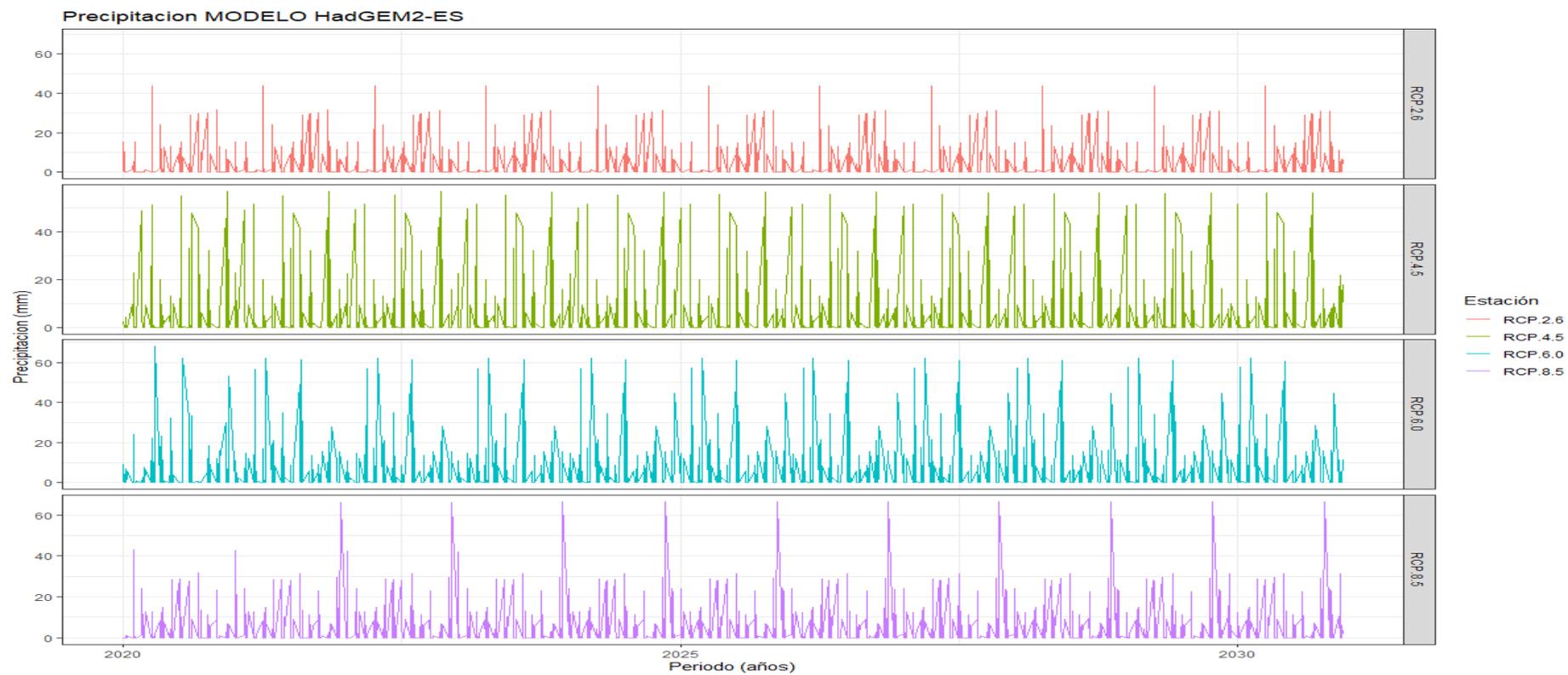
**Figura 27**

*Serie histórica de Precipitación para el modelo CSIRO-Mk3-6-0, bajo escenarios de RCP 2.4, 4.5, 6.0 y 8.5*



**Figura 28**

*Serie histórica de Precipitación para el modelo HadGEM2-ES, bajo escenarios de RCP 2.4, 4.5, 6.0 y 8.5*



El modelo que tiene similitud con la precipitación base medida es el modelo HadGEM2-ES bajo el escenario RCP 4.5 (Tabla 16). Con respecto, a la temperatura mínima se registra un notorio incremento del valor a excepción del modelo CSIRO-Mk3-6-0 en RCP 2.6 (Tabla 17). Se obtuvo valores semejantes para la temperatura máxima con respecto al escenario base (Tabla 18). Además, la evapotranspiración anual difiere completamente con el escenario base y son semejantes entre los modelos para RCP 2.6 y 6 (Tabla 19).

**Tabla 16**

*Precipitación total anual de los modelos climáticos en mm*

<b>Escenario base precipitación anual en la subcuenca (mm)</b>	<b>Escenario (RCP)</b>	<b>Modelo climático</b>		
		BCC- CSM1-1	CSIRO- Mk3-6-0	HadGEM2- ES
<b>1617,42</b>	2.6	1378,12	1274,07	1427,33
	4.5	1490,57	1267,59	1467,9
	6	1271,42	1265,58	1340,6
	8.5	1435,72	1297,69	1395,6

**Tabla 17**

*Temperatura mínima promedio anual de los modelos climáticos en °C*

<b>Escenario base en la cuenca (°C)</b>	<b>Escenario (RCP)</b>	<b>Modelo climático</b>		
		BCC- CSM1-1	CSIRO- Mk3-6-0	HadGEM2- ES
<b>18,44</b>	2.6	19,83	16,2	19,96
	4.5	19,9	19,95	19,93
	6	19,89	19,81	19,89
	8.5	19,92	19,91	20

**Tabla 18***Temperatura máxima promedio anual de los modelos climáticos en °C*

Escenario base en la cuenca (°C)	Escenario (RCP)	Modelo climático		
		BCC- CSM1-1	CSIRO- Mk3-6-0	HadGEM2- ES
<b>28,74</b>	2.6	28,41	28,79	28,76
	4.5	28,38	28,65	28,66
	6	28,56	28,5	28,63
	8.5	28,58	28,67	28,78

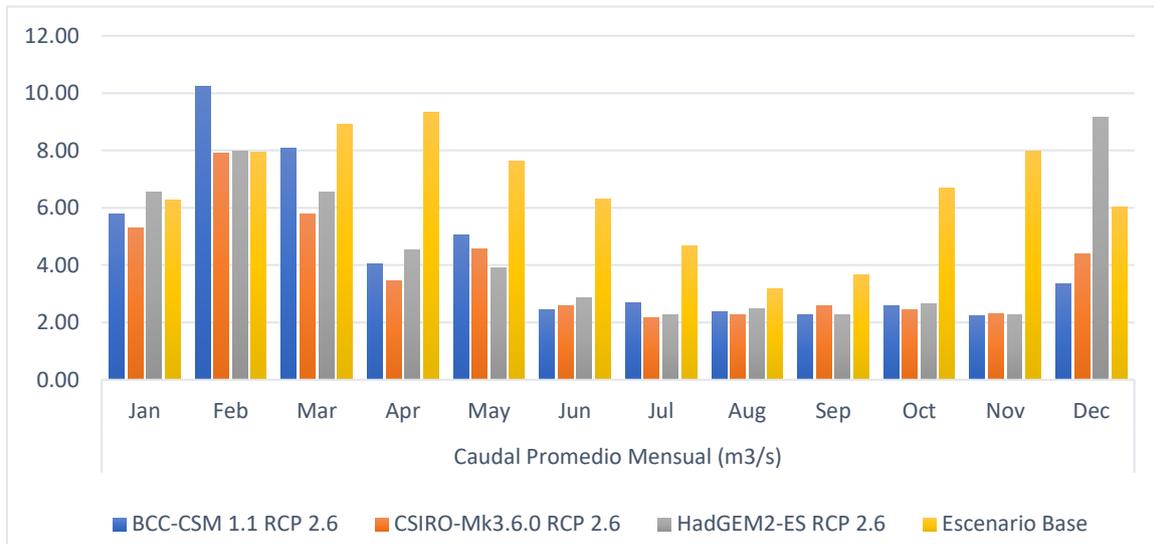
**Tabla 19***Evapotranspiración anual de los modelos climáticos en mm*

Escenario base en la cuenca (mm)	Escenario (RCP)	Modelo climático		
		BCC- CSM1-1	CSIRO- Mk3-6-0	HadGEM2- ES
<b>492,37</b>	2.6	418,93	408,36	414,39
	4.5	423,33	416,11	377,89
	6	395,83	414,69	369,36
	8.5	379	416,81	410,41

Los caudales mensuales en la estación hidrométrica La Florida, representa el caudal base o escenario actual, y estos datos son comparados para determinar la variación mensual con los caudales simulados de modelos climáticos (BCC-CSM 1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES), en el periodo 2020 al 2030. Por lo tanto, los caudales simulados del modelo BCC-CSM 1-1 (ver Apéndice 8), de CSIRO-Mk3-6-0 (ver Apéndice 9) y HadGEM2-ES (ver Apéndice 10), en el escenario RCP 2.6 (Figura 29), indican que se registrarán los mayores valores en los meses de diciembre hasta abril (época húmeda). Con el escenario RCP 4.5 (Figura 30) se evidencian elevados caudales de escorrentía superficial para los modelos climáticos BCC-CSM 1-1 (ver Apéndice 11) y HadGEM2-ES (ver Apéndice 13) en comparación con CSIRO-Mk3-6-0 (ver Apéndice 12). Sin embargo, en el escenario RCP 8.5; todos los modelos presentan comportamientos similares indicando la disminución respecto al caudal base en los diferentes meses del año (Figura 31), como se muestran en los Apéndices 14, 15 y 16.

**Figura 29**

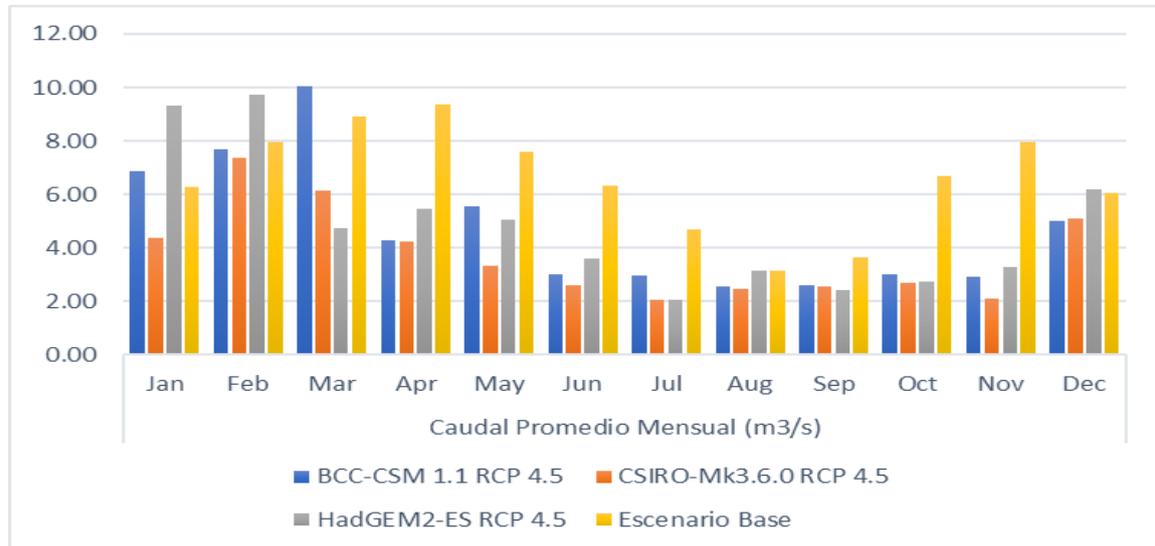
*Caudal promedio para el escenario RCP 2.6*



*Nota.* Grafica de caudal base comparado con los modelos climáticos BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES para escenarios de RCP 2.6.

**Figura 30**

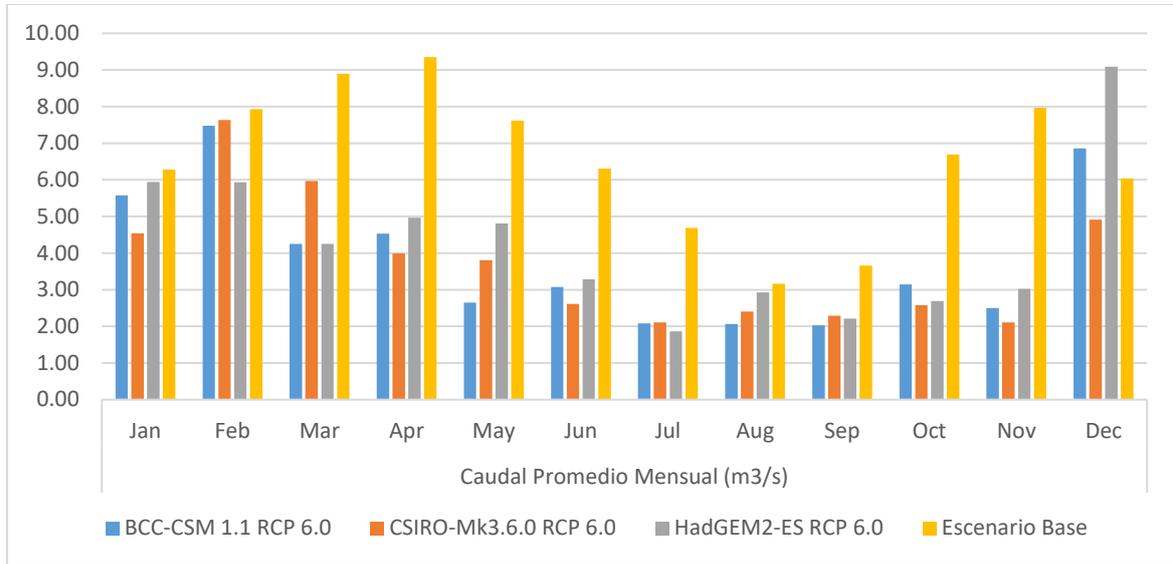
*Caudal promedio para el escenario RCP 4.5*



*Nota.* Grafica de Caudal base comparado con los modelos climáticos BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES para escenarios de RCP 4.5.

**Figura 31**

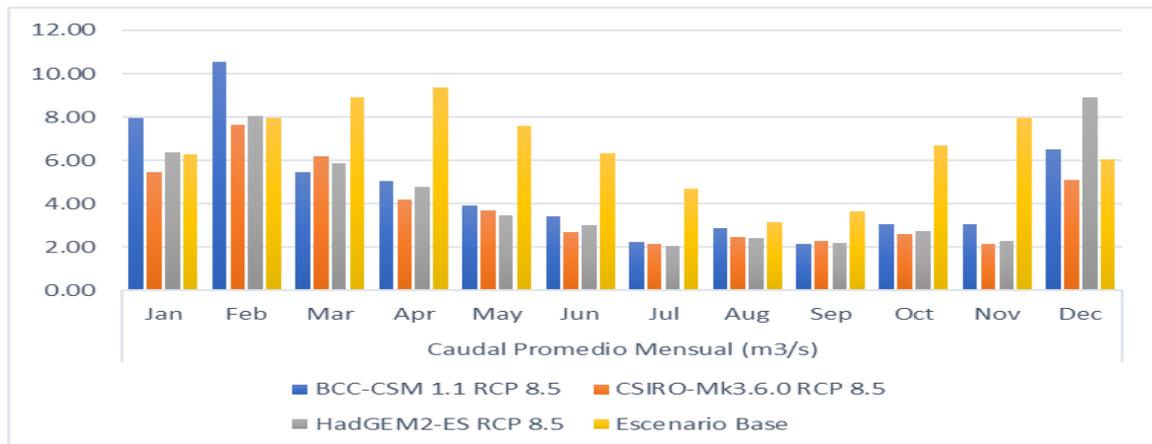
*Caudal promedio para el escenario RCP 6.0*



*Nota.* Grafica de Caudal base comparado con los modelos climáticos BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES para escenarios de RCP 6.0

**Figura 32**

*Caudal promedio para el escenario RCP 8.5*



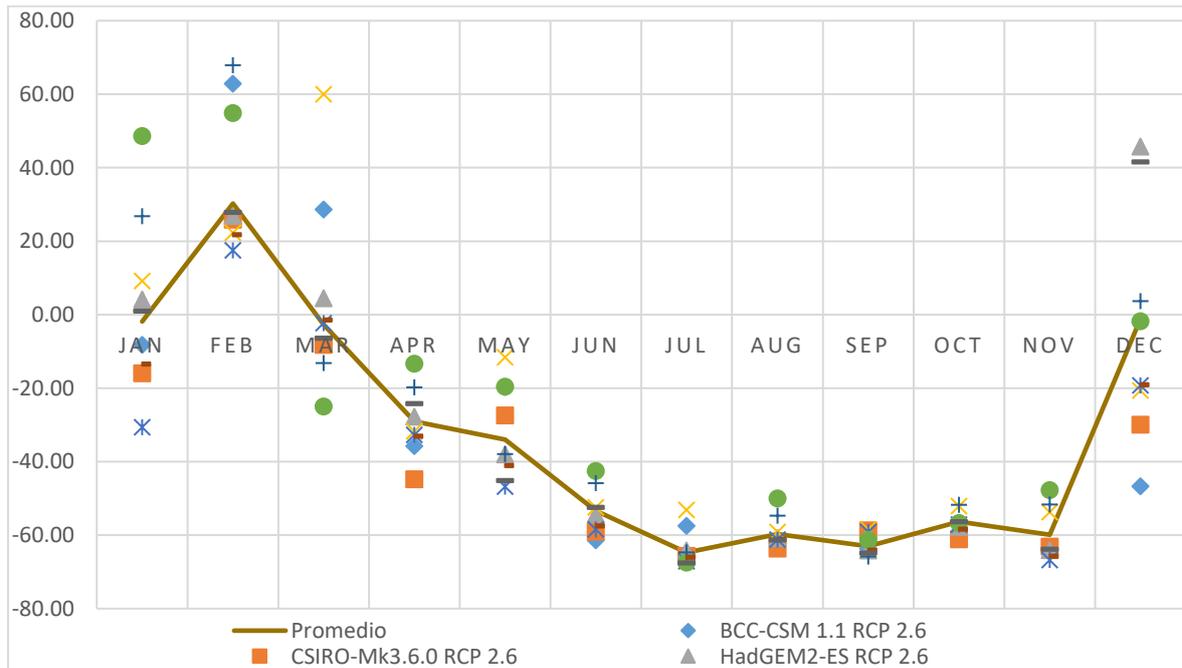
*Nota.* Grafica de Caudal base comparado con los modelos climáticos BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES para escenarios de RCP 8.5

En los modelos BCC-CSM 1-1 y CSIRO-Mk3-6-0 se evidencia una mayor tendencia negativa en los caudales simulados, al obtener una variación porcentual mensual en todos los escenarios mayores a -70 %. Así mismo, el modelo HadGEM2-ES registra una variación por encima de -70 %. Cabe mencionar que, las variaciones mensuales del caudal con respecto

al cambio climático están entre 67,94 % a -66.72 % en el periodo húmedo (octubre - abril) y de -70.28 % a -11,55 % en el periodo seco (mayo – setiembre) como se evidencia en la Figura 33 y Apéndice 7.

**Figura 33**

*Tendencia de la variación porcentual del caudal promedio mensual proyectado para enero de 2020 a diciembre 2030*

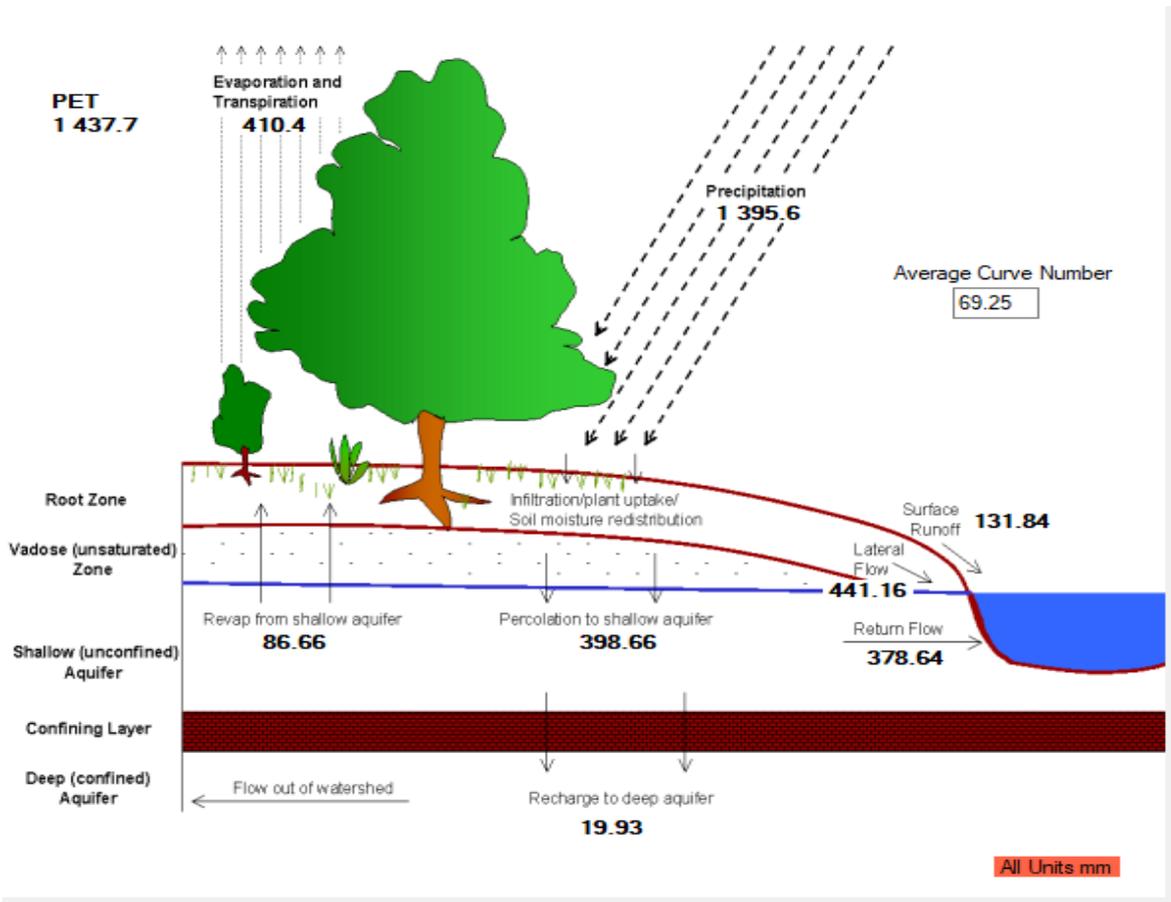


*Nota.* Grafica de variación promedio de caudal bajo los escenarios climáticos BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES.

Finalmente, la evaluación hidrológica de la zona de estudio ante los cambios de cobertura de suelo ha generado el balance hídrico de la subcuenca para el año 2030, donde cuantifica 1395,6 mm de precipitación, 131,84 mm de escorrentía superficial, 410,4 mm de evapotranspiración y 398,66 mm de percolación (Figura 33).

**Figura 34**

*Comportamiento de la subcuenca del río Yuracyacu al año 2030*



*Nota.* Gráfica obtenida del modelo SWAT, que representa el ciclo hidrológico en la subcuenca del río Yuracyacu para el escenario del año 2030.

## CAPÍTULO IV. DISCUSIONES

Las proyecciones de flujos de agua (caudales) considerando entornos cambiantes referente usos de suelos y condiciones climáticas es una importante tarea que requiere del uso de modelos hidrológicos de cuencas, como el modelo SWAT. Este modelo al evaluarse bajo diferentes condiciones ambientales (sean climáticas, suelos y coberturas vegetales) permite estimar las variaciones generadas por el cambio climático.

La subcuenca del río Yuracyacu es una cuenca hidrográfica estratégica en la zona del Alto Mayo; sin embargo, está expuesta en las últimas décadas a cambios de uso de suelo y, en consecuencia, alteraciones en las condiciones hidrológicas. Por lo tanto, al realizar un análisis de la parte alta y media de la subcuenca con el modelo SWAT integrado con modelos de circulación global (MGC) permite simular los impactos del cambio climático en el caudal.

### **4.1. Analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca Yuracyacu ante un escenario de cambio de uso de suelo al año 2030, aplicando el modelo SWAT**

La variación hidrológica, en esta investigación, se evaluó al comparar la línea del caudal base frente a los diversos escenarios de acuerdo a los modelos climáticos en la zona de estudio. La escorrentía superficial promedio mensual para el año 2030 se incrementa en comparación con el escenario base en los diversos escenarios (RCP 2.5, 4.5, 6.0 y 8.5) en el periodo húmedo (diciembre -abril). Esto indica que puede aumentar la ocurrencia de eventos de inundación con un mayor grado de incertidumbre en un período proyectado (Mishra y Lilhare, 2016).

Por otro lado, los intervalos de tiempo de mitad de año pueden exhibir un mayor grado de incertidumbre en los volúmenes de escorrentía esperados y una disminución en contraste con el escenario base. Sin embargo, en la investigación de Hurtado-Pidal y Yáñez (2015) se evidencia, una condición diferente al registrar mayores caudales en los primeros meses del año debido a las elevadas precipitaciones y condiciones erosivas en la parte media y baja de la cuenca. Cabe mencionar, que la herramienta SWAT cumple un rol valioso, al incluir los

patrones de precipitación, terreno, vegetación, tamaño de la cuenca, entre otros, que incrementan su eficacia de desempeño e imita con mayor precisión la cantidad de agua fluvial de una cuenca (Perera *et al.*, 2024)

Los cambios de usos de suelos proyectado al año 2030 establecen una modificación de las áreas boscosas por vegetación de menor tamaño (cultivos y pastos) y urbanizaciones, lo cual genera mayores volúmenes de precipitaciones sobre superficies de menor retención hídrica incrementando la escorrentía y por ende los caudales del río Yuracyacu en periodos cortos. Esto se sustenta con los valores obtenidos en los modelos para los diversos escenarios de cambio climático, al reflejar un incremento de los valores picos de las precipitaciones de corta duración, a lo largo del tiempo analizado (2020 – 2030), reducción de la evapotranspiración y mínimo incremento de la temperatura. La fluctuación de los caudales en el periodo proyectado es congruente con el patrón precipitación de la subcuenca Yuracyacu; es decir, se registran caudales por encima del escenario base en los periodos húmedos, principalmente para el modelo BCC-CSM 1-1 en el escenario RCP 4.6.

#### **4.2. Determinar el cambio de uso de suelo en la subcuenca Yuracyacu para el año 2030, mediante Teledetección y herramientas SIG**

El cambio de uso de suelos es considerado como uno de los principales factores del cambio climático a nivel global, con un impacto significativo en la dinámica de los recursos hídricos. En la presente investigación se proyectó el uso de suelo al año 2030, usando información de referencia de los años 2007, 2012 y 2017 en la subcuenca Yuracyacu, basándose en la clasificación establecida por el servidor MAPBIOMAS, posteriormente adaptado a la clasificación de CORINE LAND COVER (MINAM) y finalmente adaptado a la codificación de SWAT.

La subcuenca del río Yuracyacu en la parte alta y media, estaba cubierta mayoritariamente por bosques (87,65 %), pero en menor porcentaje por pastos (8,87 %), área urbana (1,75 %)

y zonas agrícolas (0,91 %) en el año 2007. De forma similar en el año 2012, presentó una cobertura boscosa de 85,29 % y pastos (10,63 %); así como, un ligero incremento del área urbana (2,75 %) y agrícola (0,96 %); pero, registró un mayor incremento de la zona urbana (3,12 %) en el año 2017 como se observa en la Tabla 10 en unidades de hectáreas. Estas modificaciones en las coberturas y usos de suelo pueden tener efectos en la regulación hídrica de la subcuenca Yuracyacu, principalmente en la escorrentía superficial y la variación de caudales; generando un círculo vicioso que da lugar a la alteración continua de las coberturas por efectos de procesos erosivos hídricos (Lelis *et al.*, 2012).

El crecimiento poblacional y el desarrollo de actividades como la agricultura son referentes para sustentar los cambios de usos de suelo predominantes en la zona de estudio; es decir, el desarrollo económico de los asentamientos poblacionales de la subcuenca Yuracyacu se sustentan en la actividad agropecuaria (ANA, 2017). Al igual que esta investigación, Medina y Blas (2021) identificaron predominancia de coberturas boscosas (12 404 ha), cultivos (3 518 ha), pastos (137 ha), suelos sin vegetación (137 ha) y área urbana (95 ha) desde la parte alta hasta el puente de la carretera Fernando Belaunde Terry de la subcuenca del río Yuracyacu. De igual manera, Vela (2008) indica que en la parte alta y media de la subcuenca está constituida en un 60 % por bosques en transición o cultivos de café bajo sombra, un 20 % de bosque primario y 2 % de zona urbana. Sin embargo, a pesar de tener una extensión boscosa de 13 705 ha se evidencia que el 3 % de esta área registra un proceso acelerado de deforestación (González y Llanos, 2015); la cual se justifica por la expansión de la agricultura y ganadería que generan una tendencia lineal decreciente de la cobertura boscosa de 3 200 ha a una tasa de 152 ha/año (Gómez-Lora *et al.*, 2021).

Para la zona de estudio, la distribución de tipos de suelos registró litosoles – cambisoles distrícos como el más predominante con 63,93 % de la subcuenca, seguido de acrisoles órticos (36,07 %). Así mismo, Medina y Blas (2021) manifiestan que los tipos de suelos presentes en la subcuenca, considerando el estudio de la Zonificación Ecológica y Económica del Alto Mayo en el 2007, son: Calera, Cerro Amarillo, Gravilla-Florida, Nuevo Tambo-Gravilla, Valle Grande – Nuevo Tambo, los cuales tienen características arcillosas, acidez y de baja fertilidad.

Para identificar el impacto de cambio de uso de suelo en las condiciones hidrológicas de la cuenca se utilizó los modelos predictivos de LCM en TerrSet, considerando como escenarios históricos fechados en el 2007 y 2012; además de realizar la calibración con la capa de suelos del año 2017 y posteriormente, el escenario futuro para el año 2030. La precisión de este modelo fue de 89,70 % para índice de KAPPA, lo que indica muy buena concordancia entre los mapas de clasificación y la información de referencia. Esta precisión puede variar de acuerdo al enfoque, para el desarrollador de mapas analiza la probabilidad que una cobertura terrestre encaje con lo observado en campo; pero, para el usuario es la frecuencia de una clase específica presente en el mapa, se logre identificar en el suelo (Regasa y Nones, 2022).

El mapa de uso de suelo proyectado al 2030, como se observó en los mapas históricos, pronostica un incremento de las áreas de uso agrícola (1,73 %), urbanizaciones (4,03 %) y pastizales (14,93 %); pero, se espera una disminución de bosque con una tasa de deforestación lenta. Esta transformación de cobertura y uso del suelo por acción humana puede afectar la integridad del sistema de recursos naturales; así como la producción de bienes y servicios ecosistémicos. Además, permiten inferir que los cambios de uso de suelo en las próximas décadas serán más significativos debido a la presión humana por tierras para asentamientos y cultivo. El crecimiento de la población local requiere de mayor cantidad de recursos naturales para satisfacer sus necesidades de alimentos, energía y materiales de construcción (Leta *et al.*, 2021; Tsegaye *et al.*, 2010).

Estas proyecciones para el año 2030 de aumento de zonas agrícolas y ganaderas; así como, una reducción en la cobertura forestal se sustenta en las prácticas de pastoreo y manejo agronómico desarrollado, que evidencia la importancia de estos mapas para la planificación territorial (Zuleta, 2013).

#### **4.3. Establecer el modelo calibrado en función a las Unidades de Respuesta Hidrológica con el modelo SWAT**

El modelo SWAT es una herramienta eficaz para modelar los impactos del cambio climático en el ciclo hidrológico de una cuenca hidrográfica; para lo cual, utiliza Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) tomando en cuenta la heterogeneidad espacial de la cobertura

y usos del suelo en una cuenca, permitiendo así la estimación de caudales. Los modelos que permiten estudiar los procesos hidrológicos de las cuencas y su respuesta ante factores naturales como antrópicos, generalmente deben calibrarse antes de su aplicación para que exista una relación estrecha con la realidad.

#### **4.3.1. Ejecución del modelo SWAT**

El modelo de simulación hidrológica SWAT para cuencas hidrográficas está compuesto de dos fases principales. La fase terrestre permite cuantificar la cantidad de agua (caudal) que discurre por el cauce principal de cada HRU. La fase líquida o de enrutamiento que controla el movimiento del agua a través de la red de canales de la cuenca, son cada HRU, hasta su desembocadura (Ortiz *et al.*, 2010).

Mediante el Modelo de Elevación Digital (DEM); así como, el uso y tipos de suelo para la cuenca de estudio (parte alta y media de la subcuenca del río Yuracyacu) se dividió en 5 subcuencas, las cuales se subdividieron en 103 HRU en el modelo SWAT (Figura 23). Sin embargo, Vela (2008) dividió en 75 HRU toda la subcuenca del río Yuracyacu, siendo la primera unidad donde se ubica la parte alta que fue objeto en esta investigación.

La escorrentía superficial se estimó mediante el método de Curva Número del SCS a partir de los registros diarios de precipitación de cinco estaciones meteorológicas aledañas a la zona de estudio (Tabla 3 y Figura 6), los cuales fueron aceptables para el modelo en función a los valores que se ingresaron inicialmente; es decir, se logró cumplir con la fase terrestre del modelo. Para la fase de enrutamiento se utilizó el método de Muskingum que permite determinar el volumen almacenado de agua en un cauce considerando un intervalo de tiempo.

#### **4.3.2. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico**

La calibración del modelo se realizó comparando los caudales simulados SWAT con las descargas observadas de la estación hidrométrica La Florida de registro mensual. En base a estudios anteriores, a nivel de la cuenca Alto Mayo, se seleccionaron diversos parámetros

para la calibración y validación.

Para realizar el análisis de sensibilidad se utilizó el algoritmo SUFI-2 con el software SWAT CUP, al igual que para identificar los parámetros más influyentes en el proceso lluvia-escorrentía; por lo tanto, para este proceso se evaluaron nueve parámetros (CN, ALPHA BF, GW\_DELAY, GWQMN, GW REVAP, ESCO, EPCO, REVAPMN y SOL AWC) y, solo tres fueron significativos estadísticamente (alta influencia en el modelo); pero, al obtener mayor valor absoluto de t-stat en los otros parámetros corroboran su alta sensibilidad para el modelo. De la misma forma, León *et al.*(2019) manifiestan que los ocho parámetros aplicados como CN, GW\_DELAY, GW REVAP, ESCO, EPCO, REVAPMN, SOL AWC y CH\_N2 presentan alta sensibilidad al modelo desarrollado para la cuenca del río Piura al evaluar el impacto climático en la oferta de agua superficial; además, Salas (2020) obtuvo, en la modelación de la cuenca del río Pitumarca, cuatro parámetros muy sensibles (CN2, GW\_DELAY, ALPHA\_BF y GWQMN) al determinar el volumen de pérdida de suelo por año. Por otro lado, Torreblanca (2020) indica en su investigación que fueron 5 parámetros (CN2, GW EVAP, ALPHA\_BF, GW\_DELAY, GWQMN), quienes presentaron mayor sensibilidad en el modelo al determinar la oferta hídrica de la cuenca del río Cancusane.

El análisis de sensibilidad de la presente investigación, muestra que los parámetros más sensibles en la simulación de caudal del río Yuracyacu son los que representan la escorrentía superficial, la recarga de aguas subterráneas y las propiedades del suelo, permitiendo la validación de la simulación para el balance hídrico.

El modelo SWAT se calibró para el periodo 2001 al 2007 y el análisis de validación entre el año 2008 al 2010. Considerando, los índices estadísticos obtenidos en la fase de calibración y validación, permite inferir que el modelo es eficiente para simular el comportamiento del caudal en la sección de control establecida por la estación hidrométrica La Florida, tanto en periodos húmedos como secos. Sin embargo, se evidenció un flujo estacional significativo en el análisis de series de tiempo del flujo observado, durante los meses húmedos, siendo una tendencia esperada porque en estos periodos la subcuenca experimenta presencia de precipitaciones de mayor duración e intensidad, traduciéndose en el incremento de caudales

en el cauce del río. Por otro lado, una subestimación de los valores simulados, principalmente en caudales pico; cabe mencionar, que esta condición es común en el modelo SWAT (Almeida *et al.*,2020; Brighenti *et al.*,2016). La subestimación también puede ser a razón de la presencia de estructuras hidráulicas en la cuenca como presas, canales de riego y captaciones de diversa índole (Arnold *et al.*, 2012); lo cual se evidencia en la cuenca de estudio con presencia de barrajes en el cauce (ver Apéndice 17, imagen B).

En la búsqueda de estimar parámetros necesarios para una buena simulación del modelo, el análisis de correlación entre el caudal observado y simulado reveló valores satisfactorios de  $R^2$ , de la misma forma para NSE y PBIAS en el caso de la calibración, pero solo bueno para la validación. Por ello, hay un mejor desempeño durante el período de calibración en comparación con el período de validación; pero, los criterios estadísticos indican que el modelo captura bien el caudal observado, como concluye en los estudios desarrollados por Moriasi *et al.* (2007).

Sin embargo, en el caso de León *et al.* (2019) registra una sobre estimación de los caudales simulados, con valores satisfactorios de los indicadores estadísticos tanto para calibración como validación; esta misma condición es evidenciada por Zuleta (2013) y Quispe (2016) para predecir los caudales promedios mensuales. Por otro lado, Salas (2020), Ccama y Turpo (2020) evidencian en la calibración, una baja dispersión entre los caudales simulados y observados; pero, una sobre estimación de caudales simulados con respecto a los observados en la fase de validación. Solamente, en la investigación de Hurtado-Pidal y Yáñez (2015) obtuvieron como resultados una sub estimación de los caudales calculados en comparación con los observados; principalmente, en los valores picos del hidrograma debido la falta de datos en determinados meses de los años evaluados.

#### **4.4. Generar información climática en la subcuenca Yuracyacu para el periodo 2030, usando modelos de circulación general (MCG)**

El modelo SWAT, además de incorporar una interfaz de SIG que permite proporcionar información importante para el balance hídrico, también, se destaca por generar simulaciones a largo plazo de variables climáticas que permiten probar y predecir el

movimiento del agua en cuencas. Por lo tanto, los parámetros meteorológicos (precipitación mensual, temperatura mínima y máxima, evapotranspiración) de los modelos climáticos (BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-ES) para los diferentes escenarios de emisiones contaminantes (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5) permitieron doce proyecciones posibles en SWAT para la cuenca en estudio.

De acuerdo con Acuña *et al.* (2013), se prevé cambios poco significativos en la precipitación de la región San Martín para los modelos climáticos CMIP5 (CCSM4, HadGem2-AO, HadGem2-ES y MPI-ESM-LR) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Pero en la presente investigación, el análisis de datos de precipitación para los diversos escenarios de cambio climático (RCP 2.6, 4.5, 6.0, y 8.5), evidencian bajas diferencias de las láminas de lluvia entre los escenarios y en comparación con la precipitación de referencia; por otro lado, se evidencia una marcada variación entre los modelos (Tabla 14). Es decir, la variabilidad climática indica la presencia de años anormalmente secos y otros húmedos (Hernández, 2023).

Mediante MarkSIM GCM se obtuvo datos futuros de precipitaciones de los modelos BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0 y HadGEM2-E. Al realizar una observación comparativa con los registros históricos de las estaciones meteorológicas del SENAMHI identifican que la precipitación media anual disminuyó, contrastando con los datos climáticos 2020 – 2030, en -21 % para el modelo CSIRO-Mk3-6-0 en todos los escenarios; pero, los modelos BCC-CSM1-1 y HadGEM2-E presentaron un comportamiento contrario y en el escenario RCP 4.5 tienen disminuciones cercanas. Sin embargo, León *et al.* (2019) en la cuenca del río Piura, evidencian un incremento en RCP 4.5 mayor al 50 % del modelo CSIRO-Mk3-6-0 y del 142 % para HadGEM2-ES.

Con respecto, a la temperatura mínima de la zona de estudio, esta se incrementa en 1 °C para los modelos en los 4 escenarios y también se evidencia un incremento de 0,3 °C para la temperatura máxima; lo cual sustenta, la reducción de la evapotranspiración total en 70 mm. Para la investigación de Quezada y Rodríguez (2021) identificaron condiciones semejantes en las proyecciones climáticas para el año 2050, al determinar que las temperaturas se

incrementan en 1,8 °C entre los meses de octubre hasta abril y en 1,4 °C de mayo a setiembre para el modelo climático MIROC 5 RCP 4.5; pero en RCP 8.5 aumentó en 3,5 °C y 2,7 °C respectivamente, al igual que el modelo MIROC-ESM en RCP 4.5 y 8.5 en la cuenca del río Moche.

La tendencia porcentual del caudal es negativa a largo plazo, para los diversos escenarios con el uso de tres modelos climáticos en la presente investigación. Considerando que los modelos climáticos BCC-CSM 1-1 y CSIRO- Mk3-6-0 presentan una tendencia similar para el escenario RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, con excepción del mes de febrero. Por otro lado, el modelo HadGEM2-ES posee una tendencia positiva en los meses de diciembre a marzo para los escenarios RCP 2.6 y 8.5, pero a largo plazo una leve tendencia negativa. Es decir, se evidencian reducciones de caudal para el modelo BCC-CSM 1-1 y CSIRO-Mk3-6-0 por encima del -65 % y para HadGEM2-ES, del - 70 %. De la misma forma, Urbay (2022) identifica condiciones semejantes en su investigación, al obtener tendencias negativas para los modelos CSIRO- Mk3-6-0 y HadGEM-ES superiores al 100 %, sin embargo, para los modelos MIROC5 y MRI-CGCM3 menor al 50 % de los caudales proyectados para el año 2050 y 2 100 en la cuenca del río Yauca. Igualmente, Torreblanca (2020) observó, para la cuenca del río Cancusane, reducción del caudal en 32 % ; pero, los valores pico se registran en el periodo seco para el año 2034 con el modelo EC EARTH que presentó un mayor ajuste con los datos hidrométricos de la estación El Frayle.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

- **Analizar el comportamiento hidrológico de la subcuenca Yuracyacu ante un escenario de cambio de uso de suelo al año 2030, aplicando el modelo SWAT.** La subcuenca del río Yuracyacu presentara una disminución en la oferta hídrica respecto al caudal promedio histórico al año 2030, demostrando que el cambio de uso de suelo y los eventos climáticos futuros, tendrán una relación directa con la oferta hídrica, así mismo la presente investigación demuestra que el modelo hidrológico SWAT tiene la capacidad de predecir eficientemente el comportamiento de cuencas en zonas de selva, siendo un modelo a usar para investigaciones similares.
- **Determinar el cambio de uso de suelo en la subcuenca Yuracyacu para el año 2030, mediante Teledetección y herramientas SIG.** Con la información de los usos de suelo de los años 2007, 2012 y 2017, se obtuvo el ráster proyectado al año 2030, donde se evidenció una disminución de 8,04 % de bosques en la sub cuenca Yuracyacu, lo que equivale a 1424,27 ha. en relación al año 2017; asimismo las áreas agrícolas heterogéneas aumentaron en 0,98 % (174,26 ha), el pasto aumentó 6,68 % (1184,28 ha) y las áreas urbanizadas en 0.91% lo que corresponde a 160,99 ha. Confirmando así la pérdida de cobertura forestal y el aumento de la agricultura en la sub cuenca del río Yuracyacu.
- **Establecer el modelo calibrado en función a las Unidades de Respuesta Hidrológica con el modelo SWAT.** La calibración y validación del modelo SWAT según el coeficiente de Nash muestra valores de 0,67 y 0,60 respectivamente, indicando un rendimiento bueno en la capacidad para simular la escorrentía presente y futura de la subcuenca Yuracyacu; así mismo, el programa SWAT CUP utilizado en la etapa de calibración, indicó que los parámetros más sensibles fueron EPCO,REVAPMN,CN2,ALPHA\_BF, demostrando que es práctico y confiable para calibrar todo tipo de cuencas, esto demuestra que el modelo SWAT puede ser usado en la modelación hidrológica para la generación de caudales presentes y futuros.

- **Generar información climática en la subcuenca Yuracyacu para el periodo 2030, usando modelos de circulación general (MCG).** Mediante el modelo SWAT, se determinó los caudales simulados y proyectados al año 2030 del río Yuracyacu, usando información del cambio de uso de suelo obtenido del modelo predictivo Land Change Modeler (LCM) y los modelos climáticos (BCC-CSM1-1, CSIRO-Mk3-6-0, HadGEM2-ES), bajo distintos escenarios RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5), lográndose determinar que en el escenario (RCP 6.0) representado por el modelo HadGEM2-ES existirá una disminución de caudal respecto al escenario base de hasta un 70,28 % para el mes de julio (época seca) y en el modelo BCC-CSM 1.1 (RCP 8.5) se estima un incremento respecto al escenario base de hasta 67,94 % para el mes febrero (época húmeda).

## CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES

- Se sugiere a las autoridades locales que puedan usar la información obtenida en la presente investigación para tener una idea de los posibles escenarios que se vienen en el corto plazo y que puedan ocasionar sequías y/o avenidas.
- Ante la falta de estaciones climatológicas dentro de la cuenca se recomienda al gobierno regional realizar las gestiones correspondientes ante el SENAMHI, para la instalación de estaciones climáticas automáticas que permitan mostrar una realidad más exacta del comportamiento climático de la cuenca. Cabe mencionar, que actualmente la Autoridad Nacional del Agua ha implementados una estación de aforo en tiempo real; por lo tanto, se recomienda para próximos estudios utilizar esta nueva información hidrométrica, para procesos de calibración y validación de modelos hidrológicos.
- En el presente estudio la información climática proyectada al año 2030, se obtuvo desde el servidor MarkSim, el cual tiene una base de datos de modelos climáticos aprobados en el Quinto Informe de Evaluación (IE5) del IPCC, actualmente ya se aprobó el Sexto Informe de Evaluación (IE6) el cual contiene nuevos modelos climáticos predictivos; en ese sentido, se recomienda utilizar estas nuevas proyecciones climáticas en los modelamientos hidrológicos que se realicen.
- Finalmente se recomienda incluir siempre el componente de cambio climático y cambio de uso de suelo, en el modelamiento hidrológico con el modelo SWAT con la finalidad de obtener resultados confiables y reducir la incertidumbre del modelo.

## REFERENCIAS

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, Srinivasan, R., Yang, H. y Klove, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model [Un modelo de hidrología y calidad del agua a escala continental para Europa: calibración e incertidumbre de un modelo SWAT de alta resolución y gran escala]. *Journal of hydrology*, 524, 733-752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Acuña, D., Avalos, G., Cubas Saucedo, F., Llacza Rodríguez, A. y Barreto Schuler, C. (2013). *Evaluación de los modelos CMIP5 del IPCC en el Perú: Proyecciones al año 2030 en la región Ancash* (Reporte Ejecutivo). Repositorio Institucional - SENAMHI. <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/215>
- Agudelo Viana, L. G., y Aigner Aburto, J. M. (2008). *Diseños de investigación experimental y no-experimental*. [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/2622/1/AgudeloGabriel\\_2008\\_DisenosInvestigacionExperimental.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/2622/1/AgudeloGabriel_2008_DisenosInvestigacionExperimental.pdf)
- Almeida, R. A., Pereira, S. B., Pinto, D. y Rosa, D. R. Q. (2020). Applicability of the swat hydrological model in the Mucuri river basin [Aplicabilidad del modelo hidrológico del swat en la cuenca del río Mucuri]. *Engenharia Agrícola*. SCIELO, 40, 631-644. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n5p631-644/2020>
- Administración Local del Agua Alto Mayo. (2014). Aforos realizados 2002-2011.
- Administración Técnica del Distrito de Riego Alto Mayo (2007). Diagnóstico de la Infraestructura de Riego
- Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., Santhi, M., Harmel, R., Van Griensven, M., Van Liew, W., Kannan M. y Jha, M. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation [SWAT: uso, calibración y validación de modelos]. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. doi: 10.13031/2013.42256.

Autoridad Nacional del Agua. (2009). *Ley N° 29338 del 2009. Por lo cual se expide la Ley de Recursos Hídricos.*

Autoridad Nacional del Agua (2017). *Delimitación de faja marginal del río Yuracyacu, en el Tramo del Sector Perla Escondida hasta la desembocadura al río Mayo* (Informe Técnico). Perú.

Báez, W. L. (2014). Análisis del manejo de cuencas como herramienta para el aprovechamiento sustentable de recursos naturales. *Revista Chapingo serie zonas aridas*, 13(2), 39-45. <https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545055001.pdf>

Banco Mundial. (2022). *Gestión de los recursos hídricos.* <https://www.bancomundial.org/es/topic/waterresourcesmanagement#1>

Bonini, A. J. y Guzmán, C. E. (2003). *Estimación de Caudales y Sedimentos en la Cuenca del Río Chaguana, mediante el Modelo Matemático AVSWAT (Soil and Water Assesment Tools)* [Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Guayaquil, Ecuador]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/3394>

Brighenti, T., Bonumá, N. y Chaffe, P. (2016). Hierarchical Calibration of SWAT model for a watershed in southern Brazil [Calibración jerárquica del modelo SWAT en una cuenca del sur de Brasil]. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos RBRH*, 21, 53-64. doi: 10.21168/rbrh.v21n1.p53-64

Ccama, J. y Turpo, R. E. (2020). *Modelamiento de la vulnerabilidad del recurso hídrico considerando la incidencia del cambio climático en la cuenca del río Chancay – Lambayeque utilizando SWAT* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3330>

Cabrera, J. (2012a). Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U). *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño*, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.

[https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_8.pdf](https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_8.pdf)

Cabrera, J. (2012b). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.

Camacho, M., Molero, E., Paegelow, M. Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. *Tecnologías de la información geográfica. La información geográfica al servicio de los ciudadanos*, Universidad de Sevilla, pp.658-678, 2010. <https://shs.hal.science/halshs-01063442/>

Camino, E., Ruggeroni, J. R. P. y Hernández, F. H. (2014). Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas. *Revista tiempo y clima*, 5(43). [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)

Chamorro, F. R. M., Enríquez, P., Cabrera, D. R. J. R. y Calvachi, G. L. C. (2016). Estrategias de la planificación del recurso hídrico con fines de abastecimiento para consumo humano. *Revista Unimar*, 34(2), 221-238. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8211161>

Chuvieco, E. (2002). Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid, España: *RIAL* (2 edición) <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist.%20Cart.%20y%20Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>

Centro Internacional de Agricultura Tropical (2010). *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, SWAT 2005*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, 6.

García-Gonzales, M.; Carbajal-Escobar, Y. y Jiménez-Escobar, H. (2007). *La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático*. Ingeniería y Competitividad. 9(1). 19-29. [http://praxisfilosofica.univalle.edu.co/index.php/ingenieria\\_y\\_competitividad/article/view/2492](http://praxisfilosofica.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2492)

- Gassman, P; Reyes, M; Green, C y Arnold J (2007) The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions [La herramienta de evaluación del suelo y el agua: desarrollo histórico, aplicaciones y futuras líneas de investigación]. *Transactions of the ASABE*, 50:1211–1250. doi: 10.1.1.88.6554.
- González, C. y Llanos, R. (2015). Evaluación de los efectos de la deforestación en la hidrología y pérdida lateral de carbono orgánico del suelo de la cuenca del Altomayo (Reporte técnico). Lima: Infobosques. [https://www.conservation.org/docs/default-source/peru/carlos\\_gonzales\\_inca.pdf?Status=MasterYsfvrsn=ef831abf\\_5](https://www.conservation.org/docs/default-source/peru/carlos_gonzales_inca.pdf?Status=MasterYsfvrsn=ef831abf_5)
- Gómez-Lora, J. W., Gallo-Ramos, V. H. y Camacho-Zorogastúa, K. del C. (2021). Evaluación del bosque húmedo tropical mediante el análisis de la cobertura fraccional y técnicas SIG en la subcuenca del río Yuracyacu, Amazonía peruana. *Madera y bosques*, 27(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722109>
- Hernández, P. (2023). *Análisis del impacto del crecimiento de las megaciudades sobre el ciclo hidrológico bajo escenarios de cambio climático*. Aplicación a la cuenca del río Bogotá (Colombia). [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/191025>
- Hurtado-Pidal, J. y Yáñez, B. D. B (2015). Aplicación del modelo hidrológico swat (soil y water assessment tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del río Las Juntas. *Revista GEOESPACIAL*. 12: 106 - 122. [https://www.researchgate.net/publication/321016385\\_APLICACION\\_DEL\\_MODELO\\_HIDROLOGICO\\_SWAT\\_SOIL\\_WATER\\_ASSESSMENT\\_TOOL\\_PARA\\_ANALISIS\\_DEL\\_CAUDAL\\_DE\\_ESCORRENTIA\\_SUPERFICIAL\\_EN\\_LA\\_CUENCA\\_HIDROGRAFICA\\_DEL\\_RIO\\_LAS\\_JUNTAS](https://www.researchgate.net/publication/321016385_APLICACION_DEL_MODELO_HIDROLOGICO_SWAT_SOIL_WATER_ASSESSMENT_TOOL_PARA_ANALISIS_DEL_CAUDAL_DE_ESCORRENTIA_SUPERFICIAL_EN_LA_CUENCA_HIDROGRAFICA_DEL_RIO_LAS_JUNTAS)
- Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H. y Gisbert Blanquer, J. M. (2011). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía*. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%20c3%ada.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017). *Censo poblacional y vivienda 2017*[archivo de datos]. Lima: Instituto nacional de Estadística e Informática. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf)

Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. (2017). *Manual de Medición de Caudales*. Guatemala. <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2018/02/Manual-de-medici%C3%B3n-de-caudales-ICC.pdf>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, pp 157. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2001). *Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI\\_TAR\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI_TAR_full_report.pdf)

Jones, P. G. (2013). MarkSim standalone. V2 for DSSAT users. *International Center for Tropical Agriculture (CIAT)*, 10. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/9072>

Jones, P. G. y Thornton, P. K. (2013). Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications [Generación de datos meteorológicos a partir de un conjunto de modelos climáticos para aplicaciones de modelización agrícola]. *Agricultural Systems*, 114, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.08.002>

Kaini, S., Nepal, S., Pradhananga, S., Gardner, T., Y Sharma, A. K. (2020). Representative

general circulation models selection and downscaling of climate data for the transboundary Koshi river basin in China and Nepal [Selección de modelos representativos de circulación general y reducción de escala de datos climáticos para la cuenca transfronteriza del río Koshi en China y Nepal.]. *International Journal of Climatology*, 40(9), 4131-4149. <https://doi.org/10.1002/joc.6447>

Knutti, R., Masson, D., y Gettelman, A. (2013). Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there [Genealogía de los modelos climáticos: Generación CMIP5 y cómo hemos llegado hasta aquí]. *Geophysical Research Letters*, 40(6), 1194-1199. <https://doi.org/10.1002/grl.50256>

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data [Medición de la concordancia entre observadores para datos categóricos]. *Biometrics*, 159-174. <https://www.jstor.org/stable/2529310>

Lelis, T. A., Calijuri, M. L., Santiago, A. D. F., Lima, D. C. D., & Rocha, E. D. O. (2012). Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil [Análisis de sensibilidad y calibración del modelo SWAT aplicado a una cuenca fluvial del sudeste de Brasil]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 623-634. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200031>

León Ochoa, R. F., Portuguez Maurtua, D. M. y Chávarri Velarde, E. A. (2019). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura—Perú, considerando la incidencia del cambio climático. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 182-193. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.476>

Leta, M. K., Demissie, T. A. y Tränckner, J. (2021). Hydrological Responses of Watershed to Historical and Future Land Use Land Cover Change Dynamics of Nashe Watershed, Ethiopia [Respuestas hidrológicas de la cuenca hidrográfica al uso histórico y futuro del suelo Dinámica del cambio de la cubierta terrestre en la cuenca hidrográfica del Nashe, Etiopía]. *Water*, 13(17), Art. 17. <https://doi.org/10.3390/w13172372>

Mapbiomas (2023) *Mapas de cobertura y uso*. <https://peru.mapbiomas.org/colecciones-de-mapbiomas-peru/>

- Medina, J. E. y Blas, F. K. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico del río Yuracyacu para identificar zonas vulnerables por máximas avenidas, ciudad Nueva Cajamarca – San Martín* [Tesis de pregrado, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. <https://repositorio.ucss.edu.pe/handle/20.500.14095/1073>
- Ministerio del Ambiente (2016). *La Contribución Nacional del Perú - iNDC: agenda para un desarrollo climáticamente responsable*. Lima <http://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/wp-content/uploads/sites/11/2015/12/LA-CONTRIBUCI%C3%93N-NACIONAL-DEL-PER%C3%9A1.pdf>
- Ministerio del Ambiente (2018). *Información de pérdida de bosque en el distrito de Nueva Cajamarca 2018*. Perú, Lima: Servidor Geobosques
- Ministerio del Ambiente (2015). Mapa Nacional de Cobertura vegetal. <https://www.minam.gob.pe/patrimonionatural/wpcontent/uploads/sites/6/2013/10/MAPA-NACIONAL-DE-COBERTURA-VEGETAL-FINAL.compressed.pdf>
- Mishra, V. y Lilhare, R. (2016). Hydrologic sensitivity of Indian sub-continental river basins to climate change [Sensibilidad hidrológica de las cuencas fluviales subcontinentales indias al cambio climático]. *Global and Planetary Change*, 139, 78-96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.01.003>
- Miyashiro, V., Méndez, L. y Orihuela, L. (2014). *Gestión del Agua en el Perú: Uso, protección y tratamiento*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://www.fondoeditorialunalm.com/wp-content/uploads/2020/09/GESTION-DEL-AGUA.pdf>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. y Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [Directrices de evaluación de modelos para la cuantificación sistemática de la precisión en simulaciones de cuencas hidrográficas]. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://pubag.nal.usda.gov/download/9298/PDF>

- Nath, B., Niu, Z. y Singh, R. P. (2018). Land Use and Land Cover Changes, and Environment and Risk Evaluation of Dujiangyan City (SW China) Using Remote Sensing and GIS Techniques [Cambios en el uso y la cubierta del suelo, y evaluación del medio ambiente y los riesgos de la ciudad de Dujiangyan (suroeste de China) mediante técnicas de teledetección y SIG]. *Sustainability*, 10(12), Art. 12. <https://doi.org/10.3390/su10124631>
- Ndulue, E. y Mbajjorguu, C. (2018). Modeling climate and land-use change impacts on streamflow and sediment yield of an agricultural watershed using swat [Modelado de los impactos del cambio climático y del uso de la tierra en el caudal y la producción de sedimentos de una cuenca agrícola utilizando swat]. *Agricultural Engineering International: CIGR*, 20(4). <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/download/4837/2876/0>
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J. y Williams, J (2005). Soil and Water Assessment Tool. Texas Agricultural Experiment Station. *Temple - Texas, USA*. <https://swat.tamu.edu/media/1292/swat2005theory.pdf>
- Oñate V. F. y Aguilar N.G. (2003). *Aplicación del modelo Swat para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo Universidad Técnica Particular de Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja. Ecuador. [https://www.researchgate.net/publication/237734865\\_APLICACION\\_DEL\\_MODELO\\_SWAT\\_PARA\\_LA\\_ESTIMACION\\_DE\\_CAUDALES\\_Y\\_SEDIMENTOS\\_EN\\_LA\\_CUENCA\\_ALTA\\_DEL\\_RIO\\_CATAMAYO](https://www.researchgate.net/publication/237734865_APLICACION_DEL_MODELO_SWAT_PARA_LA_ESTIMACION_DE_CAUDALES_Y_SEDIMENTOS_EN_LA_CUENCA_ALTA_DEL_RIO_CATAMAYO)
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2023). *Digital Soil Map of the World*. <https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search?id=14116#/metadata/446ed430-8383-11db-b9b2-000d939bc5d8>
- Ortiz, A; Mendoza, M y Bravo, M. (2010). *Implementación del modelo hidrológico SWAT: modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la Cuenca del lago de Cuitzeo*. (En línea). Instituto Nacional de Ecología: Distrito Federal, México: Consultado 10 dic. 2022.

[http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/2011\\_cnch2\\_cc\\_aortiz.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/2011_cnch2_cc_aortiz.pdf)

Perera, T. A. N. T., Piyadasa, R. U., Gunarathne, M. H. J. P. y Kumar, D. N. (2024). SWAT model to simulate hydrological responses to land use and land cover changes in a tropical catchment: A study in Sri Lanka. *Groundwater for Sustainable Development*, 101251.

Presidencia del Consejo de Ministros y Gobierno Regional de San Martín (2016). *Diagnóstico y Zonificación para el Tratamiento de la Demarcación Territorial de la Provincia de Rioja*. <http://sdot.pcm.gob.pe/wp-content/uploads/2016/08/EDZ-Rioja.pdf>

Proaño, M., Gavilanes, C., Valenzuela, P. y Cisneros, C. (2006). *Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato*. Proyecto Cuencas Andinas – CODESAN - GTZ <https://docplayer.es/12311961-Informe-tecnico-aplicacion-del-modelo-swat-en-la-subcuenca-del-rio-ambato-ing-msc-mauricio-proano-ing-carla-gavilanes-ing.html>

Quezada, Y. G. y Rodríguez, R. J. (2021). *Escenarios de disponibilidad hídrica al 2050 mediante el modelo SWAT en la cuenca del Río Moche—Departamento de La Libertad* [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Institucional Universidad Cesar Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/85275>

Quispe, R. J. (2016). *Aplicación del modelo swat (soil and water assessment tool) para simular caudales mensuales con fines agrícolas en la cuenca del río Keka*. [Tesis de pregrado, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia]. Repositorio Institucional Universidad Mayor de San Andrés. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/7634>

Regasa, M. S. y Nones, M. (2022). Past and Future Land Use/Land Cover Changes in the Ethiopian Fincha Sub-Basin [Cambios pasados y futuros del uso y la cubierta del suelo en la subcuenca etíope del Fincha]. *Land*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/land11081239>

Resolución 151 de 2020 [ Autoridad Nacional del Agua]. *Glosario de términos utilizado en la Ley de Recursos Hídricos N° 29338 y en su reglamento (D.S. N° 001-2010-AG)*. 01

de octubre de 2020.

- Ríos, J., Luna, S., Romero, E. (2018). *Informe de evaluación de riesgo de erosión e inundación fluvial originado por precipitaciones intensas en la cuenca del río Yuracyacu-sector Nueva Cajamarca-Rioja-San Martín*. Gobierno Regional de San Martín-Oficina Nacional de Seguridad y Defensa Nacional. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/5441>
- Ruiz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., Ontiveros Capurata, R. E. y López-López, R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad y ciencia*. 28(1), 1-14. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792012000100001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792012000100001)
- Salas, M. K. (2020). *Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo Swat* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16823>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2023). Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Srinivasan, R. (2015). Soil and Water Assessment Tool Beginner SWAT Training Manual. Workshop at Spatial Science Laboratory. *AgriLife Research. Texas A&M University*. [http://www.crs4.it/repository/documents/conferences/swat\\_2015/introductory\\_manual\\_updated\\_oct.\\_2012.pdf](http://www.crs4.it/repository/documents/conferences/swat_2015/introductory_manual_updated_oct._2012.pdf)
- Torreblanca, L. A. (2020). *Predicción de la hidrología en la cuenca del río Cancusane hasta su almacenamiento en la represa “El Frayle” hasta el año 2050* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/11816>
- Torres-Benites, E., Fernández-Reynoso, D., Oropeza-Mota, J. y Mejía-Saenz, E. (2004).

Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*.  
22(4).437-444

Trotochaud, J., Flanagan, D. C. y Engel, B. A. (2016). A simple technique for obtaining future climate data inputs for natural resource models [Una técnica sencilla para la obtención de entradas futuras de datos climáticos para modelos de recursos naturales]. *Applied Engineering in Agriculture*, 32(3), 371-381.  
<https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=310743>

Trzaska, S. y Schnarr, E. (2014). *A review of downscaling methods for climate change projections*. United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD, (September), 1-42.  
[http://www.ciesin.org/documents/Downscaling\\_CLEARED\\_000.pdf](http://www.ciesin.org/documents/Downscaling_CLEARED_000.pdf)

Tsegaye, D., Moe, S. R., Vedeld, P. y Aynekulu, E. (2010). Land-use/cover dynamics in Northern Afar rangelands, Ethiopia [agrícola]. *Agriculture, Ecosystems Y Environment*, 139(1), 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.07.017>

Urbay, D. J. (2022). *Modelamiento hidrológico y los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca del río Yauco* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional Universidad Privada del Norte.  
<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3298541>

Uribe, N. (2010). *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT2005*. SWAT Soil and Water Assessment Tool, 1-47.  
<https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>

Useche, M. C., Artigas, W., Queipo, B. y Perozo, E. (2019). *Técnicas e instrumentos de recolección de datos cuali-cuantitativos*.  
<https://repositoryinst.uniguajira.edu.co/bitstream/handle/uniguajira/467/88.%20Tecnica%20e%20instrumentos%20recolecci%C3%B3n%20de%20datos.pdf?sequence=1>

Vela, N. H. (2008) *Análisis actual de la oferta y demanda hídrica como un servicio ambiental hídrico en la subcuenca Yuracyacu*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional De San Martín, Tarapoto]. Repositorio UNSM-Institucional. <http://hdl.handle.net/11458/2372>

Villón, V. M. (2004). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. [https://books.google.com.pe/books?id=BAcaDQEACAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=BAcaDQEACAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Zuleta, C. A. (2013). *Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del Río Pejibaye, Costa Rica* [Tesis de posgrado, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE]. Repositorio Institucional CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9025>

## TERMINOLOGÍA

- **Agua Superficial.** Son las aguas que se encuentran sobre la superficie terrestre, en movimiento o reposo, producto de las precipitaciones y descongelamiento glaciario las cuales forman ríos, lagunas, entre otros (Miyashiro *et al.*, 2014)
- **Aforo de caudales.** Proceso en el cual se determina el caudal de un río en una sección observada, mediante el uso de diferentes instrumentos o técnicas (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, 2017)
- **Análisis multitemporal.** Es la comparación de la temporalidad de cambios que se den en un área determinada y que se puede evaluar mediante diferentes técnicas de teledetección (Chuvioco, 2002).
- **Balance Hídrico.** Es el punto de equilibrio del flujo de agua que ingresa y sale de un sistema que puede ser una cuenca hidrográfica, un lago, un humedal, etc., intervienen los procesos del ciclo hidrológico (Ruiz *et al.*, 2012).
- **Calibración de un modelo.** Conjunto de procesos por el cual se manipulan una o más variables de un modelo hidrológico, con la finalidad de ajustar los caudales simulados con los caudales observados (Cabrera, 2012b).
- **Cuenca:** Territorio delimitado por aguas subterráneas y superficiales que fluyen hacia un mismo lugar producto del ciclo hidrológico, formando cuerpos de agua como ríos, lagos, etc. y que desembocan finalmente en el mar (Báez, 2014).
- **Escorrentía.** Agua que transita sobre la superficie terrestre de una cuenca producto de la pendiente, la gravedad y las precipitaciones, alimentando a quebradas ríos lagos, etc (Ibañez *et al.*, 2011).
- **Oferta Hídrica en la cuenca.** Caudal disponible en la cuenca producto del ciclo hidrológico del agua, que sirve para satisfacer las necesidades de los seres vivos (Ibañez *et al.*, 2011).

- **Unidad hidrográfica.** Espacio físico delimitado por las líneas divisorias de agua, que a su vez está compuesta por sub unidades hidrográficas, correspondiendo a un mismo punto de confluencia (Villón, 2004).
  
- **Unidad de Respuesta Hidrológica.** Espacios físicos de una cuenca que comparten información de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente (Cabrera, 2012a).
  
- **Calibración:** Proceso que consiste en modificar algunos parámetros que intervienen en un modelo hidrológico, con la finalidad de lograr una semejanza entre una serie simulada y observada (Cabrera, 2012b).
  
- **Validación del modelo.** Proceso posterior a la calibración que sirve para verificar y/o corroborar que los parámetros ajustados, garanticen la eficiencia del modelo según el coeficiente de Nash (Cabrera, 2012b).

## APÉNDICES

### Apéndice 1:

*Precipitación promedio mensual (mm) estación Chachapoyas*

Año	Estación Chachapoyas											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
<b>1995</b>	194	45,5	197	386,1	88,1	26,2	14,3	5,8	48,7	181,5	142,5	289,4
<b>1996</b>	71	169,8	258	95,6	28,9	69,3	20,1	30,1	77,2	281,4	84,8	77,9
<b>1997</b>	76,9	295,6	113,8	148,5	83,8	69,3	6	64	91,2	34,9	81,8	172,6
<b>1998</b>	88	100,6	175,1	146,5	13,8	6	0,9	27,4	19,4	96,3	79,3	15,7
<b>1999</b>	100,3	204,9	35	36,5	84,7	64,3	16,7	24,8	61,1	30,6	41,2	100,5
<b>2000</b>	38,6	90,4	86,5	70	72,7	27	11,4	14,4	66,4	5,4	33	112
<b>2001</b>	62,9	61,3	151,4	40	65,4	9,4	20	9,5	62,5	129,3	63,2	47,8
<b>2002</b>	114,3	175,3	151	75,4	40,3	7,6	30,8	7,3	28,6	178,2	74,9	93,9
<b>2003</b>	76,9	123,8	107,1	70,6	65,9	13,9	7,8	38,7	43,2	65,7	84,1	84,6
<b>2004</b>	47,2	64,9	125,1	87,2	40,1	42,4	39,3	16,6	27,8	93,2	149,8	55,4
<b>2005</b>	18,1	84,5	101,3	65,9	44,3	7,3	4	19,1	73,6	142,3	44,8	89,7
<b>2006</b>	136	78,9	269,1	47,4	11,7	15,3	27,2	5,1	31,5	153,4	89,1	82,1
<b>2007</b>	108,5	52,5	170,1	69,3	42,9	4,8	34,4	36,5	30,5	239,6	90,9	79,8
<b>2008</b>	48,8	129,1	66,2	40,7	49	30,1	7	21,8	38,7	123,8	96,7	38,8
<b>2009</b>	130,5	151	105,1	179,8	47,7	16,4	29	16,2	29,6	136,8	61,3	26,8
<b>2010</b>	109,6	98,2	80,3	69,4	49,1	27,9	61,5	7	27	16,9	54,6	69,5
<b>2011</b>	84,8	54,8	206,1	67,3	51	7,7	43,8	19,2	47,4	81,2	57,9	120,4
<b>2012</b>	143,9	245,3	92	77,6	79,5	50,3	5,5	9,6	35,4	155,3	58,8	54,9
<b>2013</b>	114,2	95,4	183,6	77,9	61,1	20,5	18,5	40,3	40,1	130,3	28	90
<b>2014</b>	113,8	90,8	265,2	62,7	68,1	37	21,3	18,3	51,7	50,8	128,1	150
<b>2015</b>	237,6	138,1	180,2	77,9	57,1	8	24,5	46	13	39,3	95,5	154
<b>2016</b>	37,8	103,4	107,5	51,6	15,7	29	4,6	22,2	28,7	77,5	25,9	145,3
<b>2017</b>	110,3	111,4	145	112,8	47,5	18,5	2,9	76,4	30,7	70,1	68,4	113,1
<b>2018</b>	108,9	131,4	104,4	145,9	72	31,4	8,5	9,8	29,1	132,2	95,9	119,5
<b>2019</b>	148,1	148,2	208,4	67,1	85,8	19,8	32,7	15,8	20,7	81,1	120	126,6
<b>Promedio</b>	100,84	121,80	147,38	94,79	54,65	26,38	19,71	24,08	42,15	109,08	78,02	100,41
<b>máximo</b>	237,60	295,60	269,10	386,10	88,10	69,30	61,50	76,40	91,20	281,40	149,80	289,40
<b>mínimo</b>	18,10	45,50	35,00	36,50	11,70	4,80	0,90	5,10	13,00	5,40	25,90	15,70

## Apéndice 2:

### *Precipitación promedio mensual (mm) estación Rioja*

Año	Estación Rioja											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1990	169,9	295,2	219,3	135,3	48,1	73,7	62,7	60,9	111,8	115,2	129,3	99,4
1991	63,6	189	234,8	252,6	203,9	154,2	46,6	47,7	89,4	105,1	178,1	61,4
1992	144,3	117,8	257,2	135,5	49,4	47,6	58,6	84,5	75,7	100,1	156,6	104,2
1993	83,7	246,8	355,1	162,7	126,3	48,9	49	58,9	96,3	161,6	159	108,7
1994	112,9	219,4	162,1	226,5	90,6	93,6	99	24,3	52,2	268,6	237,9	241,7
1995	155,1	83,3	265,1	76,9	78	76,2	93,5	67,5	107,5	46,4	117,3	250,2
1996	151,3	122,8	153,1	133,4	46,5	21,8	36	138,7	95,1	186,8	98,7	130,9
1997	123,6	349,5	227,8	98,6	150,7	16,2	5,5	69,9	76,9	64,3	160,6	116,9
1998	112,1	136,6	177,3	285,4	98	51,9	13,6	44,6	49,8	188,6	71,9	71,5
1999	207,3	288,4	144	82,4	207,5	50,7	62,3	99,3	52,4	175,3	85	127,7
2000	149,8	176,6	91,6	131,7	137,7	29,1	86,8	77,4	96,9	33,9	101	166,1
2001	69,5	176,1	198,9	184,6	171,3	49,9	45,8	42,3	127,4	225,4	157,4	304
2002	166,8	135,2	146,6	226,1	106,5	25,3	123,5	41	73,7	226,4	76,6	78,4
2003	141,6	113,4	304	127,3	112,9	123,7	33,7	64,1	105,2	209,6	300,4	361,3
2004	44,9	87,6	178	193,9	156,8	35,3	63,5	83,6	94,7	182	174,5	197,4
2005	55,5	211	148,7	212,6	95,4	47,1	35,1	29,4	71,5	192,5	182,7	176,1
2006	94,7	260,1	212,2	83	60,5	60,4	59,1	128,6	66,7	104,4	111,1	186,6
2007	130,8	82,1	182,6	200,1	141,7	14,5	127,6	127,9	228	238,9	240,8	144
2008	93,7	159,1	236	86,5	203,4	115,7	73,7	68,7	102,1	179,5	149,5	89
2009	210,6	163	212,8	322,4	125,9	66,1	37,8	74,2	136	59,1	109,4	83,3
2010	51,6	153,4	128,6	190,7	150,6	36,9	113,3	23,1	86	110,6	159,3	133,4
2011	106,7	148,5	217,4	39,8	122	22,4	69,2	93,1	77,2	243,8	194,9	236,9
2012	189,9	211,8	284,2	269,9	146,9	63,5	38	35	51	163,4	100,7	190
2013	214,5	130,2	357,4	105,6	112,2	89,7	74,4	115,5	176	218,3	168,1	69,3
2014	185,8	159,8	276,2	220,7	83,8	97,4	135,5	105,7	137,4	201	133,8	151,3
2015	201,2	244,4	257,9	221,7	199,6	43,3	79,1	88,4	47	177,7	177,6	207,1
2016	27,7	210,9										
2017					151,6	136,5	28	100,7	98,1	115,3	154,4	56,3
2018	170,2	147,3	144,6	225,2	226,1	71,5	54,7	118,3	140,9	229,9	119,2	104,5
2019	182,2	254,5	90,2	93,8	108,6	79,4	118,1	56,5	132,8	96,6	194,7	137,5
<b>Promedio</b>	131,43	181,86	209,42	168,75	128,02	63,53	66,33	74,82	98,47	159,32	151,74	151,21
<b>máximo</b>	214,50	349,50	357,40	322,40	226,10	154,20	135,50	138,70	228,00	268,60	300,40	361,30
<b>mínimo</b>	27,70	82,10	90,20	39,80	46,50	14,50	5,50	23,10	47,00	33,90	71,90	56,30

### Apéndice 3:

#### *Precipitación promedio mensual (mm) estación Soritor*

Año	Estación Soritor											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1990	137	517	227,5	263	189	85	80	123	101,5	171	170	275
1991	196	276	285	140,5	59	45	74,8	83	256,5	240	126	19,2
1992	24,3	31,6	42,5	15,9	28,1	24,5	49,3	90,8	84,1	57,2	86,4	107,3
1993	58,7	189,4	258,6	58,2	79	42	32	41	66	64	87	57
1994	62	97	95	219	51	69,3	93	61	48	81	83	142
1995	35	39	179	128	47	35,7	85	32,4	130,4	41,3	290,4	142,2
1996	112,8	144	165,2	94,5	49,6	9,4	21,2	145,5	84,3	168,6	75,7	156
1997	85,2	191,2	158	107,6	175,4	36,2	45,8	80,3	115,9	147,4	145,5	132,1
1998	254,9	161,7	162,6	376,4	79,5	89,7	65,9	101,3	117,4	290,6	87	71,3
1999	243,9	252,8	197,8	121,5	256,4	151,6	109,8	64,5	108,9	284,8	112,7	132,3
2000	159,1	239,2	196,4	179,9	227,4	114	200,4	100,9	163,9	97,5	94,9	305,9
2001	112,6	110,8	248,1	141	187,7	56,9	142,2	60,9	129,9	272,8	192,7	281,4
2002	123,1	145,9	164,3	350,7	186,5	83,5	154,2	52,7	85,3	151,5	145,5	97,6
2003	200	171,1	203,9	143,4	159,2	121,2	83,9	64,7	88,2	138,7	350,8	324,1
2004	38,8	90,8	169,4	112,6	139,4	80,7	138,9	64,4	105,5	259,7	255,8	233
2005	89,9	166,6	214,2	196,9	93,1	100	42,8	26,8	56,4	187,3	246,5	220
2006	167,7	208,6	286,9	103,1	69,3	68,2	53,1	125,4	160,8	111,1	101,5	209,5
2007	180,1	51,3	239	110,6	140,4	78,7	115	78,6	149,4	191,9	245,4	167
2008	115,3	255,2	308,9	115	155,9	110,7	91,3	41,9	137,9	179,3	321,3	203,9
2009	144,9	193,7	193,6	263,4	122,5	119,1	49,6	110	125,1	150,2	117	73,3
2010	75,6	232,1	151,4	315,5	179,8	49,4	112,3	50,8	89,5	137,3	220,3	
2011	153,7	131,3	174,3	115,3	87,4	93	70,8	99,2	118,9	107	231,4	365,7
2012	183,2	202,4	396,8	199,4	130,2	78,7	64,2	19,1	126,1	252,2	123,7	192,1
2013	216,8	118,1	306,9	108,9	184,2	82,1	90	171,6	182,1	201,4	201,3	129,1
2014	129,2	138,1	312,7	202,4	84,4	142,7	109,5	120,3	153,9	251,9	180,2	224,5
2015	325,7	256,5	264	315,8	174,6	49,5	124	107,9		159,2	173,8	313,1
2016	60,8	241,8	299,2	247,8	188	93	22,6	75,5		159,6	148	203
2017	209,7	229,2	282,5		173,8	206	28,2	120	155,2	190	190	148,1
2018	197,6	260,2	230,4	146,4	310,2	39,4	77	167,7	112,4	208,6	218,6	206,6
2019	201,6	243,6	108,2	134,8	159,8	67,6	107,9	70	147,4	177,4	216,8	210,8
<b>Promedio</b>	143,17	186,21	217,41	173,36	138,93	80,76	84,49	85,04	121,46	171,02	174,64	184,24
<b>máximo</b>	325,70	517,00	396,80	376,40	310,20	206,00	200,40	171,60	256,50	290,60	350,80	365,70
<b>mínimo</b>	24,30	31,60	42,50	15,90	28,10	9,40	21,20	19,10	48,00	41,30	75,70	19,20

## Apéndice 4:

### *Precipitación promedio mensual (mm) estación Moyobamba*

Año	Estación Moyobamba											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1990	139,6	212,8	152,1	106,4	92,6	93,1	70,7	73,8	93,1	150,9	254,9	133,4
1991	115,4	214,2	275	149,3	145,1	97,5	20	86,1	63,8	77,4	120	48,7
1992	80,4	116,6	249,2	128,5	25,3	23,9	91,3	137	92,5	95,2	130,9	144,1
1993	96,1	218,5	357,4	156,9	89,8	63,9	39,7	59,7	124,9	130,4	153,5	158,1
1994	153,1	153,4	163,8	284,6	49,3	82,1	72,6	52	90,4	151,4	177,6	186,5
1995	97,9	79,8	207,2	59,8	42,5	82,2	50,5	37,9	129,3	70,9	139,9	204,5
1996	119,9	193,8	134,8	114,5	58,3	42,8	11,5	99,7	70,8	197,5	141,9	178,4
1997	84,4	280,9	86,9	102,6	100,8	47,3	30,4	72,8	126,4	86,5	151,3	159,2
1998	136,7	83,4	110,9	133,9	166	42,1	47,9	48,5	76,3	182,5	57,2	92,8
1999	195,4	254,8	171,9	81,9	176,9	85,2	55,9	73,9	44,3	189,8	166,1	107,7
2000	154,3	185,4	151,8	161,9	58	40,8	65,7	95,6	134,2	111,3	44,1	234,4
2001	79,5	156,3	266,5	164,2	114,3	52,3	56	112,6	120,4	232,6	78,3	184,1
2002	106	138,9	167,5	181,4	87,3	29,7	123,6	24,3	24,8	60,4	135,7	107,1
2003	188,6	113,8	142,9	43,8	224,3	115,4	32,5	64,9	92,1	117,9	71,1	227,9
2004	54,2	96,2	125	89,7	110,9	38,8	69,9	38,6	103	109,6	209,9	97,9
2005	77,6	235,7	88,7	159,7	71,4	52,4	47,3	20,5	66,6	150	193,2	154,3
2006	136,5	192,6	166	70,9	34,2	31,1	43,4	103,6	98,7	150,9	102,8	188,5
2007	139,6	50,8	185,1	147,6	110,5	16,1	33,9	109,6	123,5	140,1	200,8	161,2
2008	97,6	206,8	224,6	90,4	75,4	100,5	53,1	30,1	119	165,4	106,7	
2009	204,9	164	97,3	167,4	115,1	94,3	58,4	41,9	117,4	108,3	69,4	45,8
2010	50	184,2	109,4	129	144,1	55,5	62,9	33,2	79	104,9	123,5	112,6
2011	77,2	106,2	288,5	86,2	30,7	44,8	63,2	23,2	79,2	129,5	144,9	225
2012	150,2	132,4	237,3	166,2	82,5	63,7	34,4	50,9	80	137	88,2	152,9
2013	137,9	105,4	307,8	105,2	117,7	39,7	50,1	138,5	114,5	113	88,8	112,8
2014	192,4	133,3	255,4	210,6	59,5	73,4	52,1	82,1	63	187,6	169,8	193,9
2015	216,5	162,5	220,3	146,3	114,5	42,7	96,9	82,3	40,7	141,2	167,4	242,7
2016	66,6	212,4	180,8	184,9	96,1	43	26,6	59,5	146,9	107,7	42,4	167,9
2017	170,7	241,1	104,7	41,5	138,9	196,9	19,4	95,6	106,1	114	149,4	95,1
2018	219,9	148	150,6	128,9	118,1	32,9	38,2	71,5	103,5	167,4	130,9	179
2019	176,3	271,7	123,5	92,7	176,5	57	161,4	47,1	67,4	83,3	229,4	235,5
<b>Promedio</b>	130,51	168,20	183,43	129,56	100,89	62,70	55,98	68,90	93,06	132,15	134,67	156,28
<b>máximo</b>	219,90	280,90	357,40	284,60	224,30	196,90	161,40	138,50	146,90	232,60	254,90	242,70
<b>mínimo</b>	50,00	50,80	86,90	41,50	25,30	16,10	11,50	20,50	24,80	60,40	42,40	45,80

## Apéndice 5:

### *Precipitación promedio mensual (mm) estación Naranjillo*

Año	Estación Naranjillo											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1990	143,9	214,4	224,6	55,3	51,4	46,3	35,6	95,1	95,3	112,3	126,8	98,8
1991	95,2	108,4	163,1	162,2	64,5	35,1	89,9	43,1	76,8	79,2	61,4	74,6
1992	52,3	149	94,9	148,8	71,5	55,9	60,8	59,6	23,6	65,3	70,3	125,3
1993	156,8	238,3	339,2	137,9	118,1	67,5	30,6	82,1	98,1	101,7	110,6	82,9
1994	149,9	157	164,2	211,3	71	88,1	104,6	26,6	57,5	204,1	255,1	165,6
1995	81,6	120,8	160	258,8	57,2	97,4	33	13,5	146	69,5	213,8	199,8
1996	75,3	177,8	223,1	95,4	69,2	37,2	10	120,1	81,4	231,7	115	162,2
1997	81,2	319,2	100,4	122,1	72,1	59,6	17,3	46,6	140,3	142,1	170,3	76
1998	123,1	118,7	111,2	219,2	159,1	49,8	13,2	154,9	35,4	184,3	69,1	99,3
1999	261,5	155,8	167,1	113,2	188,9	152,3	42,5	74,5	60,9	146,9	78,2	140,1
2000	222,1	200,6	158,5	244,1	94,6	135,6	78	39,5	158,3	79,1	54,7	201,2
2001	112,8	189,6	148,8	137,7	179,4	56,8	83,6	36,8	108,2	168	104,9	
2002	191,5	181,1	191,5	182,4	161	10,7	132,5	51,5	128,9	198,5	110	138,5
2003	98,8	169,4	263,8	147,4	114,2	128,3	19,4	52,9	168,3	159,3	210,1	207,8
2004	120,6	89,1	168,5	172,6	129,5	73,7	69,2	56,3	56,3	171,2	194	139,3
2005	77	179,5	114,2	215,1	160,4	81,7	51,7	35,1	83,2	98	259,5	126,9
2006	157,6	268,4	148,5	80,3	44,9	37	51,8	65,3	82,2	182,2	162,6	196,9
2007	219,9	101	190,9	157,1		32	69	130,4	151,2	271,2	342,6	126,1
2008	71,5	332,4	214,1	276,2	118,4	146,9	152,9	87,5	119,1	291,3	167,4	59,5
2009	117,9	141,2	182,4	240,3	102,1	109,7	49,6	85,3	125,2	94,9	154,6	70,5
2010	59,3	179,2	184,3	181,2	148,5	39,3	127,4	49	103,6	125,7	136	152,2
2011	153,3	66,5	187,6	125,3	144,6	89,3	117,2	86,5	93,1	204,4	126,6	302,1
2012	236,3	246,8	227,2	230,9	94,4	66,3	28,7	93,4	94	136,2	157,4	183,3
2013	245,8	110,8	270	88,2	215,1	101,2	79,1	145,5	145,6	229,6	114	118,8
2014	189,3	124,4	335,6	139,2	124,8	136,6	78,3	104,5	69,4	140,4	244,4	245,4
2015	337,1	236,7	330,2	217,4	156,3	68,2	68	113,3	38,5	211,2		146,3
2016	77,8	182,5	276,2	327	117	39,7	52,1	157,5	167,9	189,3		135,9
2017		258,5	269,5	128,2	120,1	208,2	10,5	93,3	96,7	173,1	228,8	58,1
2018	194,4	152,9	140,7	253,8		52,1	54,7	61,6	64,1	228,4	165,1	209,4
2019	161	171,6		72,9	206,9	108,9	173,6	19,4	72,2	210,9	265,4	274,8
<b>Promedio</b>	147,06	178,05	198,29	171,38	119,83	80,38	66,16	76,02	98,04	163,33	159,60	148,88
<b>máximo</b>	337,10	332,40	339,20	327,00	215,10	208,20	173,60	157,50	168,30	291,30	342,60	302,10
<b>mínimo</b>	52,30	66,50	94,90	55,30	44,90	10,70	10,00	13,50	23,60	65,30	54,70	58,10

## Apéndice 6:

*Datos de caudales observados (m<sup>3</sup>/s) en la estación hidrométrica La Florida*

Estación Hidrométrica La florida												
Año	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2001	6,44	11,87	13,35	7,18	7,32	5,54	3,19	1,67	3,77	6,13	6,14	4,92
2002	5,13	8,69	9,28	15,22	11,54	9,54	10,06	5,62	6,15	8,82	9,89	7,48
2003	7,89	12,92	12,13	9,96	9,47	9,63	6,79	5,38	5,12	11,8	18,6	14,69
2004	4,35	2,28	12,92	13,19	7,1	5,61	4,04	1,3	2,44	3,95	7,44	7,33
2005	4,34	5,43	7,64	12,59	8,89	5,28	3,17	2,89	3,29	14,26	10,51	6,1
2006	5,15	11,37	5,84	4,96	4,56	6,2	3,18	3	3,84	5,16	4,39	5,12
2007	15,86	9,05	10,88	9,63	9,5	6,84	6,01	3,58	4,28	7,19	11,64	6,07
2008	6,5	9,21	7,25	6,33	8,11	6,95	2,44	2,66	3,28	4,29	6,44	3,44
2009	4,87	4,89	6,89	7,96	5,03	2,98	3,23	2,73	2,73	3,28	2	1,89
2010	2,29	3,63	2,81	6,46	4,62	4,48	4,75	2,81	1,66	2,05	2,56	3,32

## Apéndice 7:

### Variación porcentual de caudales observados

Escenario	VARIACION PORCENTUAL											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
<b>BCC-CSM 1.1 RCP 2.6</b>	-8.22	62.91	28.61	-35.77	-19.69	-61.34	-57.47	-62.23	-63.70	-59.02	-64.25	-46.71
<b>CSIRO-Mk3.6.0 RCP 2.6</b>	-15.94	25.86	-8.17	-44.79	-27.37	-59.04	-65.62	-63.61	-58.72	-61.15	-63.09	-29.90
<b>HadGEM2-ES RCP 2.6</b>	4.14	26.89	4.51	-27.75	-38.01	-54.37	-64.12	-60.79	-64.15	-57.74	-64.08	45.76
<b>BCC-CSM 1.1 RCP 4.5</b>	9.19	22.30	60.01	-31.72	-11.55	-52.44	-53.13	-59.12	-58.39	-52.06	-53.69	-20.61
<b>CSIRO-Mk3.6.0 RCP 4.5</b>	-30.62	17.56	-2.26	-32.69	-46.80	-58.41	-67.11	-61.16	-59.10	-57.15	-66.72	-19.21
<b>HadGEM2-ES RCP 4.5</b>	48.65	54.88	-24.96	-13.30	-19.59	-42.55	-67.43	-50.00	-61.25	-56.72	-47.76	-1.74
<b>BCC-CSM 1.1 RCP 6.0</b>	-11.18	18.99	-32.26	-27.86	-57.87	-51.03	-66.88	-67.16	-67.72	-49.93	-60.25	9.24
<b>CSIRO-Mk3.6.0 RCP 6.0</b>	-27.70	21.56	-4.96	-36.46	-39.32	-58.45	-66.46	-61.72	-63.47	-59.00	-66.38	-21.75
<b>HadGEM2-ES RCP 6.0</b>	-5.38	-5.53	-32.35	-20.92	-23.43	-47.69	-70.28	-53.47	-64.83	-57.09	-51.84	44.64
<b>BCC-CSM 1.1 RCP 8.5</b>	26.85	67.94	-13.14	-19.73	-37.93	-45.83	-64.71	-54.66	-65.80	-51.69	-51.63	3.73
<b>CSIRO-Mk3.6.0 RCP 8.5</b>	-13.38	21.82	-1.44	-33.01	-41.05	-57.48	-65.99	-61.09	-64.04	-58.30	-65.70	-19.03
<b>HadGEM2-ES RCP 8.5</b>	1.00	27.82	-6.39	-24.18	-45.11	-52.38	-67.52	-61.28	-64.84	-56.32	-63.76	41.63
<b>Promedio</b>	-1.88	30.25	-2.73	-29.02	-33.98	-53.42	-64.73	-59.69	-63.00	-56.35	-59.93	-1.16

## Apéndice 8:

*Datos de caudales simulados (m<sup>3</sup>/s) periodo 2020 al 2030, modelo BCC-CSM (RCP 2.6)*

Caudal simulado modelo BCC-CSM - RCP 2.6												
Año	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2020	3,92	9,16	6,65	3,07	5,12	2,27	2,41	2,16	2,09	2,39	2,14	3,4
2021	5,33	10,74	8,11	4,07	5,14	2,44	2,63	2,38	2,25	2,55	2,27	3,49
2022	5,43	10,72	8,24	4,13	5,13	2,48	2,66	2,39	2,26	2,55	2,27	3,43
2023	6,08	10,85	8,22	4,14	5,11	2,48	2,65	2,39	2,29	2,61	2,29	3,37
2024	5,95	10,07	8,42	4,17	5,17	2,45	2,72	2,38	2,32	2,54	2,29	3,36
2025	6,14	10,34	8,53	4,14	5,01	2,44	2,7	2,36	2,29	2,53	2,28	3,4
2026	6,08	10,35	8,6	4,16	4,98	2,44	2,73	2,36	2,3	2,54	2,29	3,28
2027	6,06	10,27	8,63	4,13	5,06	2,45	2,73	2,36	2,32	2,55	2,28	3,26
2028	6,12	10,03	8,23	4,13	4,95	2,42	2,68	2,33	2,29	2,56	2,28	3,3
2029	6,17	10,43	8,67	4,16	5,01	2,46	2,74	2,37	2,34	2,6	2,29	3,24
2030	6,24	10,15	6,59	3,88	4,77	2,24	2,7	2,53	2,29	2,83	1,96	3,16
<b>Promedio</b>	5,77	10,28	8,08	4,02	5,04	2,42	2,67	2,36	2,28	2,57	2,24	3,34
<b>Máximo</b>	6,24	10,85	8,67	4,17	5,17	2,48	2,74	2,53	2,34	2,83	2,29	3,49
<b>Mínimo</b>	3,92	9,16	6,59	3,07	4,77	2,24	2,41	2,16	2,09	2,39	1,96	3,16

**Apéndice 9:**

*Datos de caudales simulados (m<sup>3</sup>/s) periodo 2020 al 2030, modelo CSIRO-Mk3-6-0 - RCP 2.6*

<b>Caudal simulado modelo CSIRO-Mk3-6-0 - RCP 2.6</b>												
<b>Año</b>	<b>Jan</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Apr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Aug</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>
<b>2020</b>	3,66	6,58	5,02	3,29	3,65	2,21	1,81	2,06	2,34	2,34	2,11	4,37
<b>2021</b>	5,12	7,96	5,72	3,26	4,99	2,63	2,18	2,28	2,58	2,42	2,34	4,42
<b>2022</b>	5,46	8,16	5,89	3,36	4,96	2,68	2,22	2,32	2,64	2,45	2,36	4,48
<b>2023</b>	5,45	8,1	5,81	3,35	4,5	2,58	2,16	2,27	2,61	2,41	2,31	4,35
<b>2024</b>	5,43	7,68	5,89	3,34	4,45	2,57	2,15	2,27	2,61	2,41	2,34	4,39
<b>2025</b>	5,48	8,04	5,92	3,36	4,51	2,58	2,16	2,28	2,63	2,42	2,33	4,47
<b>2026</b>	5,42	8,16	6,03	3,38	4,58	2,61	2,19	2,3	2,62	2,42	2,33	4,45
<b>2027</b>	5,54	8,15	5,84	3,67	4,67	2,6	2,23	2,32	2,59	2,48	2,34	4,35
<b>2028</b>	5,52	7,85	5,66	3,65	4,61	2,56	2,19	2,3	2,58	2,47	2,32	4,39
<b>2029</b>	5,52	8,27	5,86	3,7	4,6	2,6	2,23	2,34	2,63	2,48	2,34	4,42
<b>2030</b>	5,56	8,2	5,85	3,7	4,64	2,61	2,24	2,35	2,63	2,48	2,32	4,36
<b>Promedio</b>	5,29	7,92	5,77	3,46	4,56	2,57	2,16	2,28	2,59	2,43	2,31	4,40
<b>Máximo</b>	5,56	8,27	6,03	3,70	4,99	2,68	2,24	2,35	2,64	2,48	2,36	4,48
<b>Mínimo</b>	3,66	6,58	5,02	3,26	3,65	2,21	1,81	2,06	2,34	2,34	2,11	4,35

**Apéndice 10:**

*Datos de caudales simulados (m<sup>3</sup>/s) periodo 2020 al 2030, modelo HadGEM2-ES - RCP*

2.6

Caudal simulado modelo HadGEM2-ES - RCP 2.6												
Año	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2020	4,46	6,45	5,47	3,71	3,17	2,3	1,8	2,09	1,96	2,44	2,13	8,91
2021	6,18	8,12	6,54	4,56	3,87	2,84	2,24	2,46	2,26	2,65	2,24	8,95
2022	6,28	8,22	6,68	4,59	3,88	2,88	2,27	2,48	2,27	2,67	2,21	9,13
2023	6,32	8,22	6,59	4,61	3,92	2,87	2,27	2,46	2,26	2,67	2,28	9,15
2024	6,35	7,77	6,66	4,54	3,88	2,87	2,26	2,47	2,26	2,67	2,3	9,21
2025	7,15	8,2	6,67	4,59	3,98	2,94	2,31	2,5	2,29	2,67	2,24	9,12
2026	7,05	8,21	6,69	4,58	3,95	2,95	2,31	2,51	2,28	2,67	2,25	9,16
2027	6,99	8,21	6,77	4,67	4	2,94	2,32	2,52	2,28	2,67	2,28	9,17
2028	7,11	7,85	6,63	4,61	3,96	2,95	2,33	2,51	2,28	2,67	2,28	9,43
2029	7,12	8,32	6,79	4,76	4,04	2,95	2,33	2,53	2,29	2,7	2,26	9,34
2030	7,05	8,2	6,77	4,69	4	2,95	2,33	2,51	2,29	2,66	2,29	9,3
<b>Promedio</b>	6,55	7,98	6,57	4,54	3,88	2,86	2,25	2,46	2,25	2,65	2,25	9,17
<b>Máximo</b>	7,15	8,32	6,79	4,76	4,04	2,95	2,33	2,53	2,29	2,70	2,30	9,43
<b>Mínimo</b>	4,46	6,45	5,47	3,71	3,17	2,30	1,80	2,09	1,96	2,44	2,13	8,91

**Apéndice 11:**

*Datos de caudales simulados (m<sup>3</sup>/s) periodo 2020 al 2030, modelo BCC-CSM - RCP 4.5*

<b>Caudal simulado modelo BCC-CSM - RCP 4.5</b>												
<b>Año</b>	<b>Jan</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Apr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Aug</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>
<b>2020</b>	2,42	6,2	5,35	2,71	4,96	2,14	1,96	2,3	2,48	2,73	2,41	8,62
<b>2021</b>	5,55	9,74	7,21	3,72	6,53	2,83	2,71	2,83	2,67	3	2,77	7,2
<b>2022</b>	5,29	10,29	8,2	4,02	5,94	2,85	2,83	2,79	2,42	3,12	2,83	7,04
<b>2023</b>	4,62	9,14	9,52	4,06	5,66	2,89	2,88	2,65	2,5	2,89	2,99	6,91
<b>2024</b>	7,25	8,01	10,62	4,23	5,71	3,06	3,07	2,67	2,51	2,99	2,98	5,24
<b>2025</b>	6,55	8,11	10,37	4,22	5,43	3,09	3,13	2,59	2,55	3,01	2,98	5,16
<b>2026</b>	9,09	7,54	11,06	4,55	5,47	3,19	3,19	2,53	2,71	3,07	3	3,04
<b>2027</b>	8,72	6,02	12,13	4,65	5,38	3,13	3,13	2,44	2,7	3,04	2,94	2,9
<b>2028</b>	8,54	5,71	11,93	4,8	5,21	3,14	3,1	2,43	2,71	3,03	3	2,96
<b>2029</b>	8,7	7,04	12,24	4,91	5,41	3,19	3,15	2,46	2,71	3,07	3,01	2,92
<b>2030</b>	8,79	6,97	12,29	5,11	5,35	3,22	3,17	2,47	2,73	3,1	3,02	2,87
<b>Promedio</b>	6,87	7,71	10,08	4,27	5,55	2,98	2,94	2,56	2,61	3,00	2,90	4,99
<b>Máximo</b>	9,09	10,29	12,29	5,11	6,53	3,22	3,19	2,83	2,73	3,12	3,02	8,62
<b>Mínimo</b>	2,42	5,71	5,35	2,71	4,96	2,14	1,96	2,30	2,42	2,73	2,41	2,87

**Apéndice 12:**

*Datos de caudales simulados (m<sup>3</sup>/s) periodo 2020 al 2030, modelo CSIRO-Mk3-6-0 - RCP 4.5*

Caudal simulado modelo CSIRO-Mk3-6-0 - RCP 4.5												
Año	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2020	2,65	5,8	5,18	3,55	2,63	2,21	1,6	2,12	2,29	2,49	1,95	4,97
2021	3,83	7,24	6,04	4,29	3,3	2,57	2,05	2,42	2,52	2,65	2,03	5
2022	3,96	7,37	6,14	4,21	3,33	2,61	2,08	2,44	2,6	2,71	2,08	5,08
2023	4,01	7,43	6,1	4,3	3,34	2,59	2,08	2,45	2,57	2,7	2,1	5,05
2024	4,02	7,1	6,17	4,23	3,32	2,61	2,07	2,43	2,55	2,68	2,09	5,1
2025	4,09	7,41	6,12	4,21	3,32	2,58	2,06	2,43	2,55	2,69	2,07	5,05
2026	4,73	7,69	6,27	4,2	3,37	2,68	2,13	2,48	2,61	2,71	2,09	5,03
2027	4,82	7,75	6,35	4,31	3,43	2,68	2,14	2,5	2,61	2,72	2,12	5,03
2028	4,84	7,45	6,18	4,35	3,41	2,69	2,14	2,48	2,59	2,71	2,11	5,17
2029	5,6	8,05	6,5	4,52	3,51	2,72	2,18	2,53	2,65	2,77	2,15	5,16
2030	5,43	8,08	6,57	4,37	3,66	2,75	2,2	2,51	2,68	2,72	2,16	5,1
<b>Promedio</b>	4,36	7,40	6,15	4,23	3,33	2,61	2,07	2,44	2,57	2,69	2,09	5,07
<b>Máximo</b>	5,60	8,08	6,57	4,52	3,66	2,75	2,20	2,53	2,68	2,77	2,16	5,17
<b>Mínimo</b>	2,65	5,80	5,18	3,55	2,63	2,21	1,60	2,12	2,29	2,49	1,95	4,97

**Apéndice 13:**

*Datos de caudales simulados (m<sup>3</sup>/s) periodo 2020 al 2030, modelo HadGEM2-ES - RCP*

4.5

Caudal simulado modelo HadGEM2-ES - RCP 4.5												
Año	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2020	7,73	8,17	3,86	4,58	4,46	3,05	1,62	2,77	2,13	2,49	2,96	5,89
2021	9,5	9,84	4,83	5,44	5,11	3,6	2,05	3,12	2,41	2,73	3,23	5,94
2022	9,6	9,92	4,91	5,54	5,21	3,64	2,08	3,15	2,45	2,73	3,21	6,06
2023	9,53	9,94	4,88	5,52	5,1	3,64	2,08	3,16	2,47	2,78	3,29	6,09
2024	9,7	9,42	4,98	5,4	5,16	3,66	2,08	3,17	2,47	2,75	3,19	6,05
2025	9,52	10,04	4,69	5,49	5,03	3,65	2,07	3,16	2,45	2,74	3,33	6,04
2026	9,78	9,95	4,77	5,6	5,04	3,64	2,08	3,18	2,44	2,72	3,35	6,03
2027	9,77	10,09	4,77	5,66	5,14	3,69	2,09	3,19	2,46	2,71	3,32	6,01
2028	9,81	9,66	4,64	5,6	5,08	3,7	2,09	3,19	2,46	2,75	3,36	6,18
2029	9,86	10,15	4,78	5,54	5,06	3,68	2,1	3,21	2,48	2,73	3,4	6,14
2030	8,2	10,02	4,55	5,5	5,07	3,64	2,04	3,17	2,45	2,69	3,4	7,35
<b>Promedio</b>	9,36	9,75	4,70	5,44	5,04	3,60	2,03	3,13	2,42	2,71	3,28	6,16
<b>Máximo</b>	9,86	10,15	4,98	5,66	5,21	3,70	2,10	3,21	2,48	2,78	3,40	7,35
<b>Mínimo</b>	7,73	8,17	3,86	4,58	4,46	3,05	1,62	2,77	2,13	2,49	2,96	5,89

**Apéndice 14:**

Datos de caudales simulados (m<sup>3</sup>/s) periodo 2020 al 2030, modelo BCC-CSM - RCP 8.5

<b>Caudal simulado modelo BCC-CSM - RCP 8.5</b>												
<b>Año</b>	<b>Jan</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Apr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Aug</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>
<b>2020</b>	6.9	7.87	3.35	4.19	1.57	2.72	1.92	1.77	1.55	2.67	3.78	6.81
<b>2021</b>	7.6	10.38	4.65	4.98	2.27	3.22	2.26	2.25	1.85	2.93	2.7	7.72
<b>2022</b>	7.59	10.88	5.03	5.17	2.41	3.25	2.32	2.17	1.93	3.18	2.64	7.68
<b>2023</b>	6.54	12.03	5.19	5.16	2.43	3.23	2.27	2.24	1.86	3.36	2.69	7.73
<b>2024</b>	8.54	11.27	5.93	5.11	3.18	3.36	2.24	2.56	1.9	3.5	2.63	6.74
<b>2025</b>	8.99	10.1	5.38	5.03	4.82	3.54	2.05	3.24	2.33	2.82	3.35	5.73
<b>2026</b>	8.67	10.32	5.66	5.15	4.92	3.61	2.13	3.43	2.29	2.94	3.16	5.95
<b>2027</b>	8.58	10.7	5.86	5.18	5.09	3.59	2.17	3.45	2.38	2.97	3.05	5.88
<b>2028</b>	8.35	10.06	6.09	5.1	4.98	3.62	2.2	3.42	2.43	3	3.1	5.98
<b>2029</b>	7.88	11.29	6.29	5.2	5.36	3.56	2.29	3.44	2.48	2.97	3.08	5.77
<b>2030</b>	8.27	11.38	6.46	5.13	5.74	3.62	2.44	3.29	2.55	2.95	3.18	5.6
<b>Promedio</b>	7.99	10.57	5.44	5.04	3.89	3.39	2.21	2.84	2.14	3.03	3.03	6.51
<b>Máximo</b>	8.99	12.03	6.46	5.20	5.74	3.62	2.44	3.45	2.55	3.50	3.78	7.73
<b>Mínimo</b>	6.54	7.87	3.35	4.19	1.57	2.72	1.92	1.77	1.55	2.67	2.63	5.60

**Apéndice 15:**

*Datos de caudales simulados (m<sup>3</sup>/s) periodo 2020 al 2030, modelo CSIRO-Mk3-6-0 - RCP 8.5*

<b>Caudal simulado modelo CSIRO-Mk3-6-0 - RCP 8.5</b>												
<b>Año</b>	<b>Jan</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Apr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Aug</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>
<b>2020</b>	3.94	6.26	5.35	3.41	3.34	2.25	1.81	2.14	2.05	2.43	2.06	4.97
<b>2021</b>	5.48	7.82	6.25	4.1	3.89	2.68	2.16	2.45	2.27	2.6	2.19	5.08
<b>2022</b>	5.56	7.87	6.33	4.23	3.84	2.7	2.18	2.46	2.27	2.63	2.16	5.1
<b>2023</b>	5.55	7.89	6.21	4.14	3.92	2.71	2.18	2.46	2.29	2.62	2.19	5.06
<b>2024</b>	5.66	7.52	6.34	4.33	3.64	2.69	2.16	2.47	2.27	2.65	2.17	5.15
<b>2025</b>	5.65	7.8	6.22	4.28	3.65	2.69	2.15	2.45	2.26	2.63	2.13	5.08
<b>2026</b>	5.59	7.83	6.23	4.26	3.61	2.7	2.15	2.46	2.26	2.63	2.11	5
<b>2027</b>	5.55	7.86	6.33	4.36	3.67	2.71	2.17	2.48	2.27	2.63	2.15	5.04
<b>2028</b>	5.65	7.54	6.2	4.31	3.64	2.73	2.18	2.48	2.28	2.63	2.14	5.17
<b>2029</b>	5.64	8	6.35	4.46	3.71	2.72	2.18	2.5	2.29	2.67	2.16	5.16
<b>2030</b>	5.67	7.92	6.36	4.41	3.67	2.73	2.19	2.49	2.3	2.64	2.17	5.11
<b>Promedio</b>	5.45	7.66	6.20	4.21	3.69	2.66	2.14	2.44	2.26	2.61	2.15	5.08
<b>Máximo</b>	5.67	8.00	6.36	4.46	3.92	2.73	2.19	2.50	2.30	2.67	2.19	5.17
<b>Mínimo</b>	3.94	6.26	5.35	3.41	3.34	2.25	1.81	2.14	2.05	2.43	2.06	4.97

**Apéndice 16:***Datos de caudales simulados (m3/s) periodo 2020 al 2030, modelo HadGEM2-ES - RCP*

8.5

<b>Caudal simulado HadGEM2-ES - RCP 8.5</b>												
<b>Año</b>	<b>Jan</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Apr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Aug</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>
<b>2020</b>	4,46	6,3	5,37	3,83	2,9	2,39	1,71	2,07	1,94	2,5	2,12	8,74
<b>2021</b>	6,2	7,83	6,37	4,79	3,49	2,98	2,09	2,44	2,22	2,72	2,22	8,8
<b>2022</b>	6,39	7,94	6,44	4,76	3,53	3,01	2,11	2,45	2,24	2,75	2,31	9
<b>2023</b>	6,4	7,94	6,41	4,92	3,56	3,01	2,12	2,47	2,25	2,78	2,29	8,88
<b>2024</b>	6,53	8,23	5,73	4,75	3,45	3,02	2,05	2,45	2,22	2,74	2,27	8,82
<b>2025</b>	6,49	8,41	5,78	4,82	3,45	3,03	2,04	2,44	2,22	2,78	2,26	8,84
<b>2026</b>	6,46	8,48	5,8	4,83	3,47	3,05	2,06	2,46	2,22	2,76	2,27	8,95
<b>2027</b>	6,47	8,45	5,8	4,87	3,48	3,06	2,07	2,48	2,23	2,78	2,28	8,93
<b>2028</b>	6,55	8,18	5,56	4,85	3,47	3,07	2,06	2,46	2,23	2,77	2,28	9,04
<b>2029</b>	6,91	8,41	5,68	5,01	3,49	3,13	2,06	2,49	2,24	2,78	2,35	8,98
<b>2030</b>	7,01	8,31	5,67	4,94	3,47	3,1	2,04	2,48	2,24	2,76	2,33	8,88
<b>Promedio</b>	6,35	8,04	5,87	4,76	3,43	2,99	2,04	2,43	2,20	2,74	2,27	8,90
<b>Máximo</b>	7,01	8,48	6,44	5,01	3,56	3,13	2,12	2,49	2,25	2,78	2,35	9,04
<b>Mínimo</b>	4,46	6,30	5,37	3,83	2,90	2,39	1,71	2,07	1,94	2,50	2,12	8,74

**Apéndice 17:***Registro Fotográfico*

*Nota.* A: cauce del río Yuracyacu en la zona de estudio. B: barraje ubicado en el río perteneciente a un canal lateral de primer orden. C: Georreferenciación de la estación de aforo hidrométrico La Florida. D: Georreferenciación del cauce del río en la parte media de la subcuenca.

**Apéndice 18:***Script para elaborar gráficos*

```

R Project
//Script para elaborar graficos

library(easypackages) #Para instalar la libreria
library(xts)
library(lattice)
library(ggplot2)
pdiaaria <- read.csv(file.choose(),header=TRUE, check.names = F, stringsAsFactors = F) #
almacenar los datos csv en pdiaria
str(pdiaria)
idx <- as.Date(pdiaria[,1])
data.matrix <- pdiaria[,-1]
data.xts <- xts(data.matrix, order.by = idx )
str(data.xts)
plot(data.xts)
plot(data.matrix[,2], type="l")
plot(data.xts[,2])
data.zoo <- as.zoo(data.xts)
str(data.zoo)
plot(data.zoo, main = "Series de tiempo de precipitación")
summary(data.zoo)
max(data.zoo, na.rm = T)
plot(data.zoo, main = "Series de tiempo de precipitación", ylim = c(0,80))
xyplot(data.xts,xlab = "Fecha",ylab = "Precipitación [mm/día]",ylim=c(0,100))
autoplot(data.xts[,1:5]) +theme_bw()+xlab("Fecha")+ylab("Precipitación [mm/día]")
boxplot(coredata(data.xts))
hist(coredata(data.xts[,1]), freq = T)
histogram(coredata(data.xts[,4]))

```