



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“MODELAMIENTO HIDROLÓGICO Y LOS
IMPACTOS POTENCIALES DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RIO YAUCO”**

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autor:

Danny Joel Urbay Sanchez

Asesor:

Ing. Mg. Kelly Polo Herrera

Código ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4833-2157>

Lima - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Carlos Alberto Alva Huapaya	06672420-0
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Sandra Lorena Zavala Guerrero	46112405-0
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Ruben Allicahuamán Quichua	70195962-6
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

DEDICATORIA

A mi compañera de vida por darme las fuerzas y comprenderme en todos los problemas que se han venido dando durante toda mi formación profesional hasta el momento, mi madre por enseñarme a luchar por mis convicciones y enseñarme el hábito de la investigación, mi padre por invertir en mi educación, y mi hermano e hijo por alegrarme cuando me encontraba agobiado.

Gracias madre, padre, Sheyla y Elion.

AGRADECIMIENTO

A muchos de mis profesores, que me ayudaron con su experiencia profesional y su enseñanza para formarme como un ingeniero de alta competitividad y sus consejos para afrontar las problemáticas profesionales. Sobre todo, a mi asesora de tesis la Ing. Kelly M. Polo H. por darse el tiempo de guiarme con sus consejos para mejorar en mi tesis. Como también al Ing. Nino Bravo, que absolvió mis dudas y me guió para resolver esos errores que se presentaban en el modelo.

INDICE

JURADO EVALUADOR.....	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO.....	4
INDICE.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	15
RESUMEN	16
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	17
1.1. Realidad Problemática.....	17
1.1.1. Descripción de la Problemática de Investigación	17
1.2. Antecedentes.....	22
1.2.1. Internacionales	22
1.2.2. Nacional	24
1.2.3. Local	25
1.3. Marco Teórico	25
1.3.1. Cuenca	25
1.3.1.1. Características de la Cuenca.....	26
1.3.1.1.1 Sub Cuenta o Cuencas Tributarias	26
1.3.1.1.2 Micro Cuenca.....	26
1.3.1.1.3 Red de Drenaje.....	26
1.3.1.1.4 El Parteaguas.....	27
1.3.1.1.5 Área de la Cuenca	27
1.3.1.1.6 Corriente Principal	27
1.3.1.1.7 Corriente Tributaria.....	27
1.3.1.2. Partes de una Cuenca Hidrográfica	28
1.3.1.2.1 Cabecera o Cuenca Alta.....	28
1.3.1.2.2 Cuenca Media	29
1.3.1.2.3 Cuenca baja	29
1.3.2. Geomorfología.....	30
1.3.2.1. Topografía	30
1.3.2.1.1 Curva de Nivel	30
1.3.2.2. Suelo.....	30
1.3.2.2.1 Cobertura.....	31
1.3.2.2.2 Pendiente.....	31
1.3.3. Ciclo Hidrológico de una Cuenca.....	32

1.3.3.1. Variables Hidrológicas	33
1.3.3.1.1 Infiltración.....	33
1.3.3.1.2 Escorrentía o Escurrimiento Superficial	34
1.3.3.1.3 Percolación.....	35
1.3.3.1.4 Evaporación	35
1.3.3.1.5 Transpiración	35
1.3.3.1.6 Evapotranspiración.....	35
1.3.3.1.7 Caudal	36
1.3.3.1.8 Curva Número.....	36
1.3.3.1.9 Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU).....	37
1.3.4. El Clima	37
1.3.4.1. Variables Climatológicas	38
1.3.4.1.1 Precipitación.....	38
1.3.4.1.2 Temperatura o calor	38
1.3.4.1.3 Humedad	38
1.3.4.1.4 Radiación Solar	38
1.3.4.2. Viento	39
1.3.5. Calentamiento Global	39
1.3.5.1. Cambio Climático.....	39
1.3.5.1.1 Variables Climáticas afectadas	39
1.3.6. DATA PISCO	41
1.3.6.1. Estaciones Virtuales	43
1.3.7. Mapa de Suelo	44
1.3.8. Escenarios de Emisión	45
1.3.8.1. RCP 2.6	49
1.3.8.2. RCP 6.0	49
1.3.8.3. RCP 4.5	49
1.3.8.4. RCP 8.5	50
1.3.9. Modelo de Circulación General (MCG)	50
1.3.10. Modelo Hidrológico.....	51
1.3.10.1. Modelo SWAT	52
1.3.10.1.1 Beneficios del Modelo SWAT	53
1.3.10.2. Unidad de Respuesta Hidrológica	53
1.3.10.3. Calibración y validación del Modelo	54
1.3.11. R y Rstudio	55
1.3.11.1. R	55
1.3.11.1.1 Rstudio	55
1.3.12. ArcGIS	56
1.3.12.1. ArcSWAT.....	56
1.3.12.2. SWAT-CUP.....	56
1.3.12.2.1 SUFI-2.....	56
1.3.12.3. SWAT OUTPUT VIEWER	57
1.3.13. Modelo de Elevación Digital (MDE o DEM).....	57
1.3.14. EarthData	58
1.3.15. Earth Explorer.....	58
1.3.15.1. SRTM V3	59
1.3.15.2. MODIS	59
1.3.15.2.1 MODIS 13.....	61

1.4. Formulación del Problema	62
1.5. Objetivos.....	62
1.5.1. Objetivo General.....	62
1.5.2. Objetivo Especifico.....	63
1.5.3. Hipótesis general.....	63
1.5.4. Hipótesis especifica	63
1.6. Justificación.....	64
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	67
2.1. Enfoque y Tipo de Investigación.....	67
2.1.1. Enfoque de Investigación.....	67
2.1.2. Tipo de Estudio	68
2.2. Población y Muestra	69
2.3. Materiales, Software y Metodología	70
2.3.1. Materiales.....	70
2.3.2. Softwares	70
2.3.3. Data.....	71
2.4. Metodología.....	71
2.4.1.1. Técnica e Instrumento de Recolección de Datos.....	73
2.4.1.2. Procedimiento de Recolección de Datos	74
2.5. Procesos Análisis de Datos.....	75
2.5.1. Procedimientos.....	78
2.5.1.1. Descripción de Área de Estudio	81
2.5.1.2. Determinación de Variables Requeridas por el Modelo SWAT	82
2.5.1.2.1 Variable Geomorfología	82
2.5.1.2.1.1 Pendiente.....	82
2.5.1.2.1.2 Tipo de Suelo	84
2.5.1.2.1.3 Uso de Suelo	86
2.5.1.2.1.4 Variable Climática	88
2.5.1.2.2 Variables Hidrológicas.....	91
2.5.1.2.2.1 Unidad de Respuesta Hidrológica de la Cuenca	91
2.5.1.2.2.2 Sub Cuencas del Rio Yauca	92
2.5.1.2.2.3 Curva Número de la Cuenca Yauca.....	93
2.5.1.2.2.4 Estación Hidrológica	94
2.5.1.3. Proceso de Calibración y Validación del Modelo SWAT.....	95
2.5.1.3.1 Calibración del Modelo SWAT	95
2.5.1.3.1.1 Análisis de Sensibilidad.....	106
2.5.1.3.2 Proceso de Validación del Modelo SWAT	107
2.5.1.3.3 Simulación del Modelo SWAT Calibrado y Validado	112
2.5.1.4. Predicciones del modelo SWAT	112
2.5.1.4.1 Predicción del Caudal para el año 2050 y 2100.....	113
2.5.1.4.1.1 Caudal Proyectado – Modelo CSIRO-MK3-6-0	114
2.5.1.4.1.2 Caudal Proyectado – Modelo HADGEM2-ES	116
2.5.1.4.1.3 Caudal Proyectado – Modelo MIROC5	119
2.5.1.4.1.4 Caudal Proyectado – MRI – CGCM3	121

2.5.1.4.2 Predicción de la Temperatura para el año 2050 y 2100	124
2.5.1.4.2.1 Temperatura – CSIRO-MK3-6-0	124
2.5.1.4.2.2 Temperatura – HADGEM2-ES	124
2.5.1.4.2.3 Temperatura – MIROC 5	124
2.5.1.4.2.4 Temperatura – MRI-CGCM3	125
2.5.1.4.3 Predicción de la Precipitación para el año 2050 y 2100	125
2.5.1.4.3.1 Precipitación – CSIR-MK3-6-0	125
2.5.1.4.3.2 Precipitación – HADGEM2-ES	125
2.5.1.4.3.3 Precipitación – MIROC5	125
2.5.1.4.3.4 Precipitación – MRI-CGCM3	126
2.5.1.4.4 Impactos Potenciales del Cambio Climático Sobre la Cuenca Yauca	126
2.5.1.4.4.1 Impacto Climático Sobre el Caudal	126
2.5.1.4.4.2 Impacto Climático Sobre la Temperatura	133
2.5.1.4.4.3 Impacto Climático Sobre la Precipitación	139
2.6. Aspectos Éticos	142
CAPÍTULO III. RESULTADOS	143
3.1. Variables Afectadas por el Cambio Climático Y Necesaria en el Modelo SWAT	143
3.2. Calibración y Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT	143
3.3. Descripción de las Predicciones del Impacto Potencial del Cambio Climático Generadas por el Modelo SWAT	144
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	148
4.1. Discusión	148
4.2. Conclusiones.....	151
4.2.1. Conclusión con respecto al objetivo número uno	151
4.2.2. Conclusión con respecto al objetivo número dos	151
4.2.3. Conclusión con respecto al objetivo número tres	152
4.3. Recomendaciones	152
REFERENCIAS.....	154
ANEXOS.....	168
ANEXO N.º 1 Mapa de Ubicación de la Cuenca del Rio Yauca.	169
ANEXO N.º 2 Mapa de Tipo de Suelo de la Cuenca Yauca	170
ANEXO N.º 3 Uso de Suelo de la Cuenca Yauca.	171
ANEXO N.º 4 Pendiente de la Cuenca Yauca	172
ANEXO N.º 5 Mapa de la Subcuenca del Rio Yauca	173
ANEXO N.º 6 Mapa de Ubicación de Estaciones Climáticas Virtuales	174
ANEXO N.º 7 Mapa de Ubicación de Estación Hidrológica Yauca	175
ANEXO N.º 8 Curva Número de la Cuenca Yauca	176
ANEXO N.º 9 Precipitación Promedio Mensual de la Cuenca Yauca.....	177
ANEXO N.º 10 Temperatura Máxima y Mínima Mensual de la Cuenca Yauca	178

ANEXO N.º 11 Valores Promedio de Precipitación - CSIRO-MK3-6-0.....	179
ANEXO N.º 12 Valores Promedio de Temperatura - CSIRO-MK3-6-0	181
ANEXO N.º 13 Valores Promedio de Precipitación – HADGEM2 – ES	183
ANEXO N.º 14 Valores Promedio de Temperatura – HADGEM2 – ES.....	185
ANEXO N.º 15 Valores Promedio de Precipitación – MIROC 5	187
ANEXO N.º 16 Valores Promedio de Temperatura – MIROC 5.....	189
ANEXO N.º 17 Valores Promedio de Precipitación – MRI – CGCM3	191
ANEXO N.º 18 Valores Promedio de Temperatura – MRI – CGCM3.....	193

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de suelos y sus diámetros	31
Tabla 2. Variables climáticas afectadas.....	41
Tabla 3. Tipos de Rutas de Concentración Representativa (RCP).....	48
Tabla 4. Modelos Circulares Generales.....	50
Tabla 5. Ecuaciones de Validaciones de Modelo Hidrológico.....	54
Tabla 6. Descripción Técnica del Sensor MODIS	60
Tabla 7. Producto MODIS y Estudio de Tipo de Cobertura	60
Tabla 8. Característica de Cobertura de los Sub Productos MODLAND	61
Tabla 9. Producto MODIS 13.....	62
Tabla 10. Datos Empleados Para el Modelo SWAT	73
Tabla 11. Origen, Fuente y Alcance de los Datos	74
Tabla 12. Variables del Modelo y sus Características.....	76
Tabla 13. Ubicación Geográfica de la Cuenca del Rio Yauca	81
Tabla 14. Ubicación Política de la Cuenca Yauca.....	81
Tabla 15. Clases de Gradiente de la Pendiente.....	82
Tabla 16. Reclasificación de la Pendiente de la Cuenca Yauca	83
Tabla 17. Área de la Pendiente de la Cuenca Yauca	84
Tabla 18. Clasificación General de Tipo de Suelo Según FAO	85
Tabla 19. Equivalencia de Tipo de Suelo Para SWAT.....	85
Tabla 20. Tipo de Suelo de la Cuenca Yauca.....	86
Tabla 21. Valores MODIS V13 y Equivalencia SWAT.....	87
Tabla 22. Características de Uso de Suelo de la Cuenca Yauca.....	88
Tabla 23. Ubicación de Estaciones Virtuales de la Cuenca Yauca	90
Tabla 24. Características de la Sub Cuencas	93
Tabla 25. Coordenadas de la Estación Hidrológica Yauca	95
Tabla 26. Curva Número Calibrado	98
Tabla 27 Parámetros de Calibración de SWAT CUP.....	100
Tabla 28. Calibración de Parámetro SOL_AWC, SOL_K y SOL_BD.....	101
Tabla 29. Parámetros Calibrados y Ajustados – Simulación número 21	102
Tabla 30. Curva Número Calibrado Ajustado	102
Tabla 31. Resultados de los Parámetros Calibrados.....	106

Tabla 32. Coeficiente de Nash-Sutcliffe.....	108
Tabla 33. Coeficiente Estadísticos y Número de Simulación	109
Tabla 34. Caudal Promedio Anual	127
Tabla 35. Variación del Caudal Promedio Anual.....	128
Tabla 36. Temperatura Promedio Anual	134
Tabla 37. Variación de la Temperatura Promedio Anual.....	134
Tabla 38. Precipitación Promedio Anual.....	139
Tabla 39. Variación de la Precipitación Promedio Anual	140
Tabla 40. Tendencia del caudal	146
Tabla 41. Producción de Agua de acuerdo los RCP y MCG.....	146
Tabla 42. <i>Variación de Temperatura Mensual de acuerdo a los RCP</i>	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Calentamiento Global con Respecto a los años 1850 - 1900 (° C)	18
Figura 2. Impacto para determinados sistemas naturales y actividades económicas	19
Figura 3. Impacto del Calentamiento Global si aumentase la temperatura 1.5 °C y 2 °C ...	20
Figura 4. División de una cuenca hidrográfica.....	26
Figura 5. Características de la cuenca	28
Figura 6. Corrientes de una cuenca hidrográfica.....	28
Figura 7. Partes de una cuenca hidrográfica.....	29
Figura 8. Curvas de nivel en msnm	30
Figura 9. Ciclo hidrológico de una cuenca	32
Figura 10. Ciclo hidrológico simplificado.....	33
Figura 11. Proceso de infiltración.....	34
Figura 12. Conformación de la evapotranspiración.....	36
<i>Figura 13. Red de Estaciones Meteorológicas Para la Elaboración de PISCO.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 14. Modelo Grillado de la Interpolación de Data PISCO. Chirps</i>	<i>43</i>
Figura 15. Mapa de Suelos de América del Sur.	44
Figura 16. Representación Básica del Modelo de Elevación Digital.	58
Figura 17. Modelo de Elevación Digital	58
Figura 18. DEM tomado por el sensor STRM V3.....	59
Figura 19. Enfoque de investigación	68
Figura 20. Tipo de Estudio de Investigación.....	69
Figura 21. Metodología de investigación del modelo SWAT.....	73
Figura 22. Proceso de Elaboración de Investigación.....	80
Figura 22. Procesamiento de Información Para Determinar la Pendiente.....	83
Figura 23. Porcentaje de la Pendiente de la Cuenca Yauca.....	84
Figura 24. Procesamiento de Información de Tipo de Suelo	86
Figura 25. Procesamiento de Información de Uso de Suelo.....	88
Figura 33. Proceso de Para la Determinación de las Estaciones Virtuales Climatológicas	90
Figura 28. Procedimiento Para Delimitación de la Hidrología de la Cuenca Yauca.....	92
Figura 28. Procedimiento Para Delimitación de la Hidrología de la Cuenca Yauca.....	93
Figura 30. Curva Número de la Cuenca Yauca	94
Figura 31. Caudal Observado Versus Caudal Simulado – Año 2015	104

Figura 32. Caudal Observado Versus Caudal Simulado Ajustado – Año 2016.....	105
Figura 33. Resultado del Análisis de Sensibilidad de los Parámetros. SUFI-2.....	107
Figura 34. Calibración - Caudal Simulado Número 21 y Caudal Observado 2015	109
Figura 35. Ajuste - Caudal Simulado Número 30 y Caudal Observado 2015.....	110
Figura 36. Caudal Validado versus Caudal Observado.....	111
Figura 37. Simulación del Modelo SWAT Calibrado y Validado de 1981 al 2015.....	112
Figura 38. Caudal proyectado RCP 2.6 – Modelo CSIRO–MK3–6-0	114
Figura 39. Caudal proyectado RCP 4.5 – Modelo CSIRO–MK3–6-0	115
Figura 40. Caudal proyectado RCP 6.0 – Modelo CSIRO–MK3–6-0	115
Figura 41. Caudal proyectado RCP 8.5 – Modelo CSIRO–MK3–6-0	116
Figura 42. Caudal proyectado RCP 2.6 – Modelo HADGEM2-ES	117
Figura 43. Caudal proyectado RCP 4.5 – Modelo HADGEM2-ES	117
Figura 44. Caudal proyectado RCP 6.0 – Modelo HADGEM2-ES	118
Figura 45. Caudal proyectado RCP 8.5 – Modelo HADGEM2-ES	118
Figura 46. Caudal proyectado RCP 2.6 – Modelo MIROC5.....	119
Figura 47. Caudal proyectado RCP 4.5 – Modelo MIROC5.....	120
Figura 48. Caudal proyectado RCP 6.0 – Modelo MIROC5.....	120
Figura 49. Caudal proyectado RCP 8.5 – Modelo MIROC5.....	121
Figura 50. Caudal proyectado RCP 2.6 – Modelo MRI – CGCM3	122
Figura 51. Caudal proyectado RCP 4.5 – Modelo MRI – CGCM3	122
Figura 52. Caudal proyectado RCP 6.0 – Modelo MRI – CGCM3	123
Figura 53. Caudal proyectado RCP 8.5 – Modelo MRI – CGCM3	123
Figura 54. Variación del Caudal de la Cuenca Yauca – RCP 2.6	129
Figura 55. Variación del Caudal de la Cuenca Yauca – RCP 4.5	130
Figura 56. Variación del Caudal de la Cuenca Yauca – RCP 6.0	131
Figura 57. Variación del Caudal de la Cuenca Yauca – RCP 8.5	132
Figura 58. Variación de Temperatura – RCP 2.6	135
Figura 59. Variación de Temperatura – RCP 4.5	136
Figura 60. Variación de Temperatura – RCP 6.0	137
Figura 61. Variación de Temperatura – RCP 8.5	138
Figura 62. Variación de la Precipitación – RCP 2.6.....	140
Figura 63. Variación de la Precipitación – RCP 4.5.....	141

Figura 64. Variación de la Precipitación – RCP 6.0.....	141
Figura 65. Variación de la Precipitación – RCP 8.5.....	142
Figura 66. Variación Máxima de la Precipitación – RCP 2.6	147

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Pendiente de la cuenca.....	31
Ecuación 2. Escorrentía	34
Ecuación 3. Caudal	36
Ecuación 4. Curva Número	37
Ecuación 5. Radiación solar	38
Ecuación 6 Modelo hidrológico	51
Ecuación 7. Modelo SWAT.....	52
Ecuación 8. Ecuación SUFI-2	57
Ecuación 9. Índice de Vegetación Normalizado	62
Ecuación 10. Factor de Corrección MODIS V13.....	87
Ecuación 11. Caudal Simulado Número 21 y Caudal Observado 2015	110
Ecuación 12. Caudal Simulado Ajustado Número 30 y Caudal Observado 2015	110

RESUMEN

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) menciona que, el Cambio Climático (CC) genera una serie de alteraciones en el ecosistema, como el cambio de temperatura, que influye en el ciclo hidrológico de un área. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura menciona que, el Perú es susceptible a los cambios que genera el Cambio Climático.

La cuenca del Rio Yauca no cuenta, con estudio hidrológico que considere el impacto del CC. Es por ello que la presente investigación tiene como objetivo principal, predecir los impactos potenciales del cambio climático aplicación del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para determinar los impactos del CC en la cuenca del rio Yauca. Para ello se pretende hallar las variables que conforman el modelo, calibrar y aplicar el modelo SWAT y describir el impacto el CC sobre el flujo de la cuenca Yauca.

El modelo SWAT validado tiene un excelente rendimiento, determinando que la temperatura disminuye (-10%) para el año 2050 y 2100. La precipitación aumenta (+100%) pero el caudal promedio anual disminuye a 0 mm³/s.

Se concluye que SWAT es una herramienta adecuada que permite predecir los impactos del CC en la cuenca del rio Yauca.

PALABRAS CLAVES:

Modelo, SWAT, Caudal, RCP, Cambio Climático, Cuenca, Yauca

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad Problemática

1.1.1. Descripción de la Problemática de Investigación

Según la historia, la humanidad siempre ha buscado complacer su necesidad básica y sentirse cómodo, pero a medida que ha ido evolucionado se posiciono en un lugar determinado, esto fue gracias a la agricultura (Arango Sales, 2003). El homo sapiens fue moldeando el entorno a sus necesidades, generando una serie de cambios y problemas ambientales.

En la primera revolución industrial acontecieron cuantiosos cambios, en el medio ambiente, provocados por el uso de máquinas, que producían grandes cantidades de emisiones, por el uso de carbón y petróleo (López, Lovato, & Abad, 2018).

En la actualidad, el uso de combustibles fósiles puede influir directamente en el ecosistema y contribuyen al cambio climático (Correa, Gonzáles, & Pacheco, 2016). El calentamiento global es un efecto de las altas concentraciones de dióxido de carbono y los aerosoles, que calientan el clima, por el consumo de combustibles fósiles, petróleo y carbón (Maya, 2020)

El calentamiento global tiene sus efectos a nivel local o regional, pero se modifica dependiendo de la zona del planeta (IPCC, 2019). A estos cambios que se suscitan de forma local, se llama cambio climático e influye directamente en variantes climáticas, como son, la temperatura, humedad, precipitación (Giaccone, Colombo, & Acquotta, 2015). Estas variantes pueden provocar desertificación, por

la escasez de precipitaciones en una región e inundaciones en otro sector, generando una perturbación en la cadena trófica y el ecosistema (Lagos & Vargas, 2014).

La desertificación está directamente relacionada con el desgaste del suelo, ya que este, no posee una capa vegetal que pueda impedir el impacto de las gotas de lluvia y se degrade (Marin, 2015). La temperatura influye sobre la evapotranspiración y este a su vez está íntimamente ligado al tipo de suelo y cobertura vegetal (Ballinas, Esperón, & Barradas, 2015).

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) determinó a través de un estudio, que si aumentase a 1.5 °C la temperatura a nivel global ocasionaría la desaparición del 75% a 80% de los corales en los mares, y si se aumenta en 2° C ya no habría existencia de los arrecifes marinos, esto se debe a la acidificación de los mares provocando una disminución de la concentración de oxígeno (IPCC, 2019).

Tal y como se muestra en la **Figura 1**, el estudio realizado por el IPCC en el 2019, explicado anteriormente, simula dos posibles escenarios generados por el aumento de temperatura producido por el CO (monóxido de carbono) a nivel global.

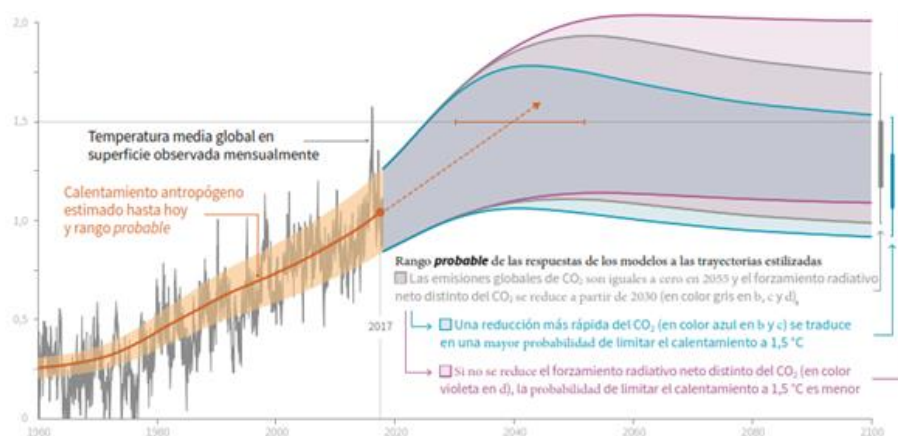


Figura 1. Calentamiento Global con Respecto a los años 1850 - 1900 (° C)

Como también, dentro de la **Figura 2** se observa, los ecosistemas y actividades económicas que son más vulnerables a un aumento de temperatura. Dentro de la gradiente de colores, el color más oscuro (morado) representa el grado de incidencia.

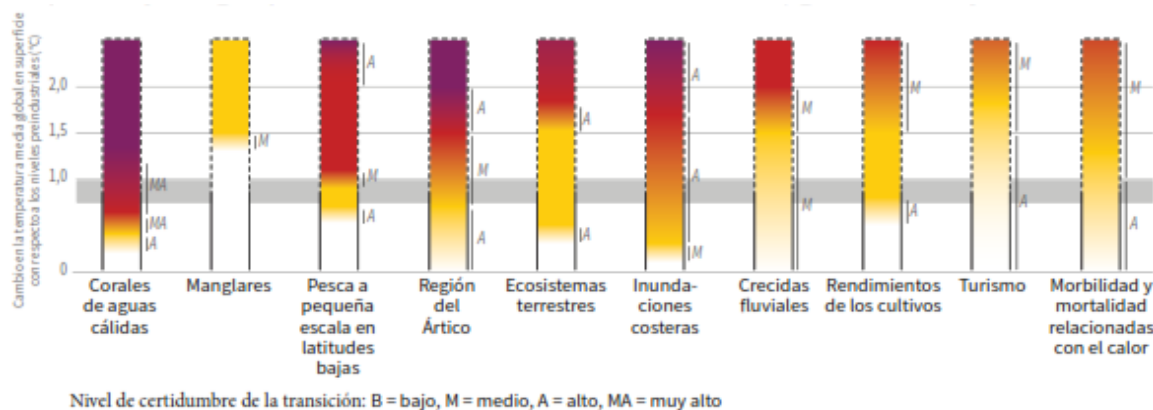


Figura 2. Impacto para determinados sistemas naturales y actividades económicas

En la **Figura 3** se puede examinar, dos posibles escenarios, uno si aumenta la temperatura en 1.5 ° C y el otro en 2 ° C, siendo los polos los más afectados en comparación con los países que se encuentran muy cerca de la línea del Ecuador.

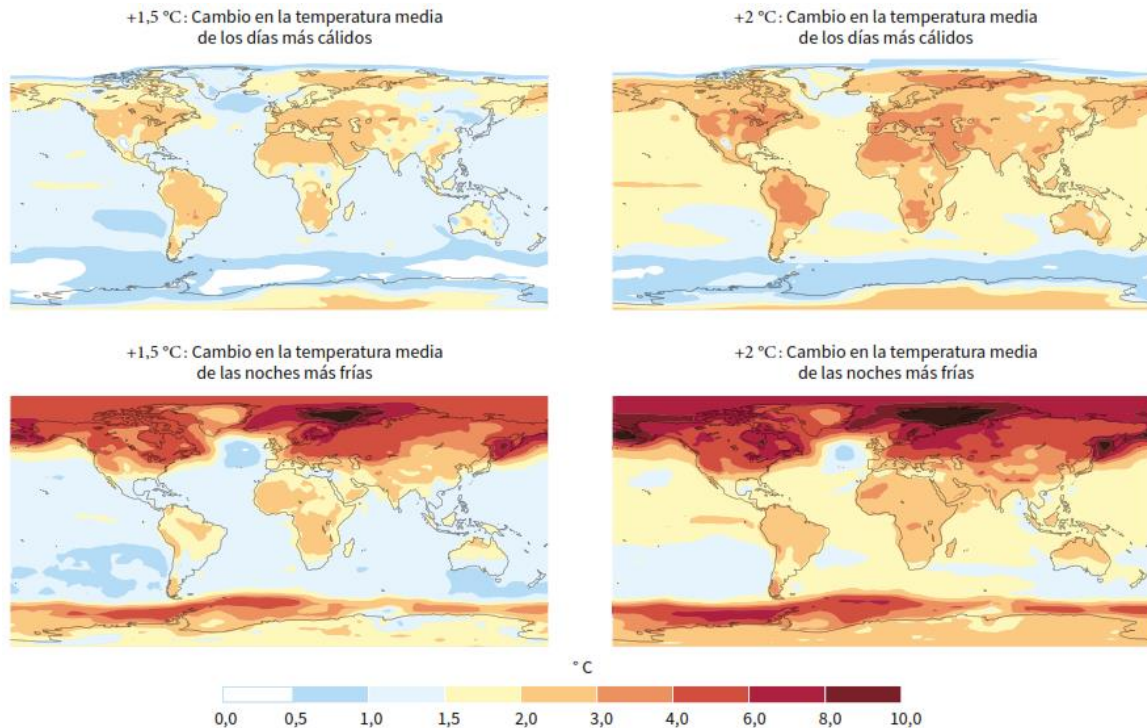


Figura 3. Impacto del Calentamiento Global si aumentase la temperatura 1.5 °C y 2 °C

En la unidad hidrográfica denominada cuenca, es en donde se lleva a cabo el ciclo hidrológico y donde se produce el caudal de agua dulce (Morejón, y otros, 2015). Las variables ambientales que conforman este proceso, pueden alterarse por el efecto del cambio climático (Revueltas, Zabaleta, Mercado, & Aguirre, 2020). Sobre todo, cuando la escasez de agua en las regiones andinas, origina conflictos entre regiones por el uso y control del agua (J Selva Andina Biosph, 2016).

Existen herramientas que nos permiten determinar el volumen de agua generado por una cuenca, como es el modelo Soil and Water Assessment Tool o conocido como SWAT, pero se traduce como herramienta de evaluación de suelo y agua, se emplea en la investigación del efecto del cambio climático en el balance hidrológico, a través de la interacción del clima, geología, relieve y uso de suelo (Leon, Portuguez, & Chávarri, 2019).

Como se ha mencionado anteriormente, el cambio climático genera una serie de problemas ambientales y económicos, sobre todo para las regiones alto andinas. La agricultura es la actividad económica mas frágil, frente al efecto del cambio climático, provocando sequías, plagas y crecimiento de malezas (Guerrero, Leiva, & Rodríguez, 2020), igualmente la minería. Las alteraciones que ocasiona el cambio climático, si no se toman en cuenta, podrían ser irreversibles y demasiado costosas (ONU, 2021).

Un modelo hidrológico determina las interacciones de las variables hidrológicas y climatológicas, en una serie de tiempo, con la finalidad de determinar la esorrentia o caudal que genera una cuenca (Oñate, Bosque Sastre, & Ponce, 2016). Pero dentro de los modelos se plantean diversos escenarios que podrían suceder en la posterioridad.

La investigación que realizó el grupo internacional de expertos sobre el cambio climático (2013), propuso diversos escenarios donde la temperatura a nivel global podría aumentar para el 2081 – 2100 en comparación con los años 1986-2005. Estos escenarios son denominados como rutas de concentracion representativas o por sus siglas RCP. El IPCC (2013) clasificó de la siguiente forma los posibles escenarios que podrían darse, RCP 2.6 cuando la temperatura podría aumentar entre 0.3 °C a 1.7 °C, de 1.1 a 2.6 °C (RCP 4.5), 1.4 a 3.1 °C (RCP 6.0) y 2.6 a 4.8 °C (RCP 8.5).

Estos modelos y escenarios se aplican a regiones agrícolas, que se ven afectadas por el cambio climático.

La Autoridad Nacional del Agua (2003) realizó un estudio, donde determinó que el agua que se genera en la cuenca del rio Yauca se ve afectado en épocas de sequía, generando así una serie de problemas sociales por las comunidades afectadas.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Internacionales

A nivel internacional la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura menciona que, el recurso hidrológico es de vital importancia para el desarrollo de la vida, pero no se cuenta con una adecuada gestión para su manejo y si sigue de esa forma para el año 2025 tendremos un déficit (FAO, 2017).

La disponibilidad del agua se ve afectada por el cambio climático, es por ello que se han realizado diversos estudios tales como, el de Alarcón, Zafra & Echeverri (2019) donde simula a través de un modelo, dos posibles escenarios (RCP 4.5 y RCP 6.0), enfocados en la desertificación que podría afrontar Colombia.

El modelo arrojó, para el mejor de los escenarios (RCP 4.5) que la escorrentía que se producía como parte del ciclo hidrológico disminuiría en un 12% y en la peor situación (RCP 6.0) la escorrentía disminuiría en 18% y la desertificación aumentaría en un 23% (Alarcón, Zafra, & Echevarri, 2019).

Existen diversos modelos hidrológicos, uno de ellos es el simulador SWAT (herramienta de evaluación de suelo y agua) que se emplea para estimar las variaciones climáticas en el ciclo hidrológico, a través de la simulación del comportamiento de la cuenca con las variaciones climáticas (Leon, Portuguez, & Chávarri, 2019).

Este modelo (SWAT) fue aplicado en la cuenca alta del río Taibilla que se encuentra en España, para determinar los efectos que ocasiona la alteración climatológica, concluyó que en la próxima década la temperatura aumentaría en 1.5

°C a 1.7 °C y la precipitación, escorrentía y la tasa de infiltración se reducirían (Jodar, Ruiz, & Melgarejo, 2018). De la misma forma, otro estudio se llevó a cabo en Málaga al Sur de España, en la cuenca del río Guadalhorce, concluyó que la temperatura aumentaría en los próximos años y la precipitación disminuiría en un 10 a 20 % debido a que, la región es una zona agrícola (Jiménez, Jimenez, & Gemár, 2019).

Otro estudio que se realizó al Este de España, en la cuenca del río Júcar, se aplicó un modelo hidrológico, pero se planteó dos posibles escenarios RCP 4.5 (aumento de la temperatura de 1.1 °C a 2.6 °C) y RCP 8.5 (aumento de temperatura 2.6 °C a 4.8 °C), con la finalidad de determinar los cambios que se han dado en el ciclo hidrológico, al terminar la investigación se observó que, para el primer escenario (RCP 4.5) el caudal disminuiría en un 28%, en el segundo escenario (RCP 8.5) la cantidad de agua dulce se reduciría en 13% (Suárez, Solera, Andreu, & García, 2019).

En México podemos encontrar la cuenca del río Tampaón donde se comparó dos modelos (SWAT y GR4), para evaluar el impacto que genera el cambio climático (Velázquez, Troin, & Caya, 2015). Al terminar el estudio, el resultado que arrojó SWAT es mucho más preciso en comparación con el modelo GR4 (Velázquez, Troin, & Caya, 2015). Estos resultados que se obtuvieron de SWAT mencionan que disminuiría en un 36% a 55% el caudal medio mensual y el caudal máximo mensual decrece entre 34% y 60% y se aminora un 36% y 49% el caudal mínimo mensual (Velázquez, Troin, & Caya, 2015).

Con los diversos estudios internacionales que se citan en la investigación, se puede deducir que el modelo SWAT es una buena herramienta, para poder determinar cómo influye el cambio climático en una cuenca.

1.2.2. Nacional

El Perú es considerado según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (2017) cómo, un país que es susceptible a los cambios generados por el cambio climático en las variables climatológicas, estas son la temperatura, la variación en la precipitación que influye en el régimen hidrológico.

Es por ello que, se ha realizado diversas investigaciones para determinar la influencia del cambio climático en el territorio nacional. Como es el caso del análisis de la cuenca de Chancay-Lambayeque donde se empleó el modelo SWAT para determinar la vulnerabilidad del recurso hídrico por la incidencia del cambio climático (Ccama y otros, 2020). Los resultados de la predicción climatológica, para algunas variables climáticas como la temperatura, precipitación y caudal tienden a un incremento hasta 3 °C, 59.7 % y 62.9% correspondientemente para el año 2100 (Ccama y otros, 2020).

En la cuenca de los ríos Anya y la cuenca Mchique que forman parte de la cuenca del río Mantaro y se encuentra en la región de Junín, se usó y comparó el modelo SWAT y el modelo Lutz Scholtz para determinar el impacto climático, simulando dos periodos 2070- 2100 y 1980-2010 para dos posibles escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 (Del Aguila, 2021). Se obtuvo que el modelo SWAT es mucho más fiable para determinar los impactos del cambio climático y el resultado que se obtuvo del modelamiento menciona que habría un aumento en el caudal de 29.4% y 34.1%

en la cuenca de Anya y en Mchique un 5.4% y 1.8% para un escenario RCP 4.5 y RCP 8.5 respectivamente (Del Aguila, 2021).

Existen muy pocos estudios publicados en América del Sur con relación al modelo SWAT y en el Perú se ha empleado este modelo para determinar el impacto climatológico en la hidrología (Asuzar & Lavado, 2020).

1.2.3. Local

El sistema hidrológico del área de Ayacucho que conforma una porción de la cuenca del río Yauca se alimenta a través de corrientes de masas de aire húmedas del Océano Atlántico (Huaman, y otros, 2020).

La Atoridad Nacional del Agua (ANA) ha realizado un modelo hidrológico de la cuenca del río Yauca, debido a la demanda que genera el sector agrícola. El resultado de dicho estudio dio como resultado que la demanda del recurso hídrico es directamente proporcional al crecimiento poblacional, pero la oferta es inversamente proporcional (ANA, 2003).

El estudio anteriormente mencionado no considera los cambios que genera el cambio climático sobre la cuenca del río Yauca, como también, no emplea ningún tipo de modelo hidrológico. Dentro de los antecedentes a nivel local es el único que se enfoca en la importancia del recurso hídrico.

1.3. Marco Teórico

1.3.1. Cuenca

La cuenca es un área que se encuentra limitada por las partes más altas de una cadena montañosa, colinas o laderas, donde se realiza el ciclo hidrológico (Faustino

& Jiménez, 2000). Toda el agua que se colecta en esta zona topográfica desagua en un río, lago o el mar (FAO, 1992).

1.3.1.1. Características de la Cuenca

1.3.1.1.1 Sub Cuenta o Cuencas Tributarias

Una cuenca está conformada por un conjunto de sub cuencas y cada una de estas, vierten sus aguas en un curso principal de agua (Faustino & Garcia, 2018). Ver la **Figura 4** donde se muestra a más detalle las sub cuencas.

1.3.1.1.2 Micro Cuenca

La micro cuenca está conformada por sub cuencas y de forma independiente, esta pequeña unidad hidrográfica posee su sistema de red hídrica, que se conecta a una red o curso principal (Faustino & Garcia, 2018). Ver la **Figura 4** donde se muestra a más detalle las micro cuencas.



Figura 4. División de una cuenca hidrográfica

1.3.1.1.3 Red de Drenaje

Se conoce a la red de drenaje como, la trayectoria de los caudales de forma natural. La red de drenaje es un buen indicador, para saber las condiciones del suelo y la superficie de la unidad hidrográfica (Máximo, 2002).

1.3.1.1.4 El Parteaguas

Es la línea imaginaria que se forma por los puntos topográficos más elevados de una cuenca y delimita una cuenca de otra (Aparicio, 1989). En la **Figura 5** se explica donde se ubica el parteaguas.

1.3.1.1.5 Área de la Cuenca

Se denota como la superficie que abarca la cuenca en el plano horizontal (Aparicio, 1989). En la **Figura 5** se explica donde se ubica el área de la cuenca.

1.3.1.1.6 Corriente Principal

Es la corriente de agua que presenta la mayor longitud, que pasa por la vertiente o salida de la cuenca (Breña & Jacobo, 2006). Ver **Figura 4** y **Figura 5**. Para determinar la corriente principal, se emplea la metodología de Pfafstetter aprobada por la Autoridad Nacional de Agua (ANA, 2011). En esta metodología menciona que, las corrientes de orden 1, corresponden a una corriente tributaria sin ramificación, una de orden 2 está conformada de tributarias de primer orden, dos corrientes de tercer orden forman una de cuarto orden y así sucesivamente (Breña & Jacobo, 2006). En la **Figura 6** se explica de forma más didáctica, el orden de las corrientes.

1.3.1.1.7 Corriente Tributaria

En la **Figura 5** y **Figura 6** las series de corrientes que vierten o tributan en una bifurcación sus aguas (Breña & Jacobo, 2006).

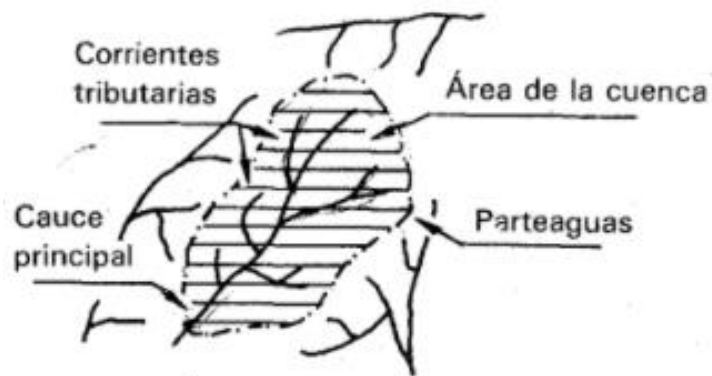


Figura 5. Características de la cuenca

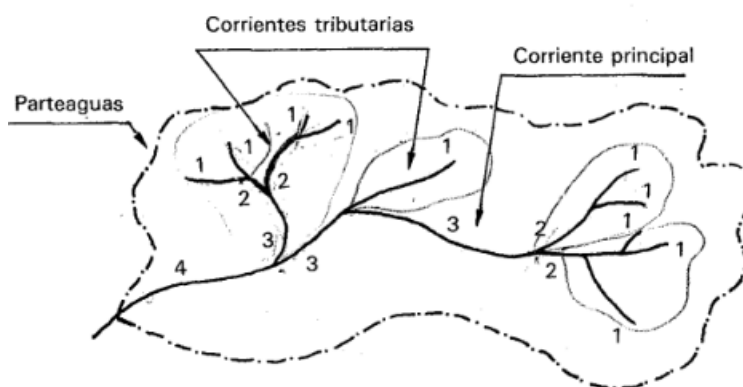


Figura 6. Corrientes de una cuenca hidrográfica

1.3.1.2. Partes de una Cuenca Hidrográfica

Una cuenca alto andina está conformada usualmente por tres áreas, como se puede observar en la **Figura 7**.

1.3.1.2.1 Cabecera o Cuenca Alta

En 2016, Vásquez y otros investigadores mencionan que, las cabeceras de cuenca se encuentran entre los 3000 a 6000 msnm y es donde predomina la mayor parte del agua, como también, la precipitación alcanza valores de 800 a 1600 mm por año. La topografía es accidentada y escarpada y las actividades mineras y

agrícolas son frecuentes (Vásquez y otros, 2016). Observar la Figura 7 donde se muestra la cabecera de cuenca.

1.3.1.2.2 Cuenca Media

La cuenca media o parte media, lo conforma el área que se encuentra entre los 800 a 300 msnm y la topografía es relativamente plana, con una precipitación que va desde los 100-800 mm/año (Vásquez y otros, 2016). Observar la Figura 7 donde se muestra la cuenca media.

1.3.1.2.3 Cuenca baja

La zona baja comprende desde los 0 a 800 msnm y podemos encontrar los cascos urbanos, como grandes proyectos de irrigación con imponentes sistemas de almacenamiento de agua o embalses (Vásquez y otros, 2016). Observar la Figura 7 donde se muestra la parte baja de la cuenca.

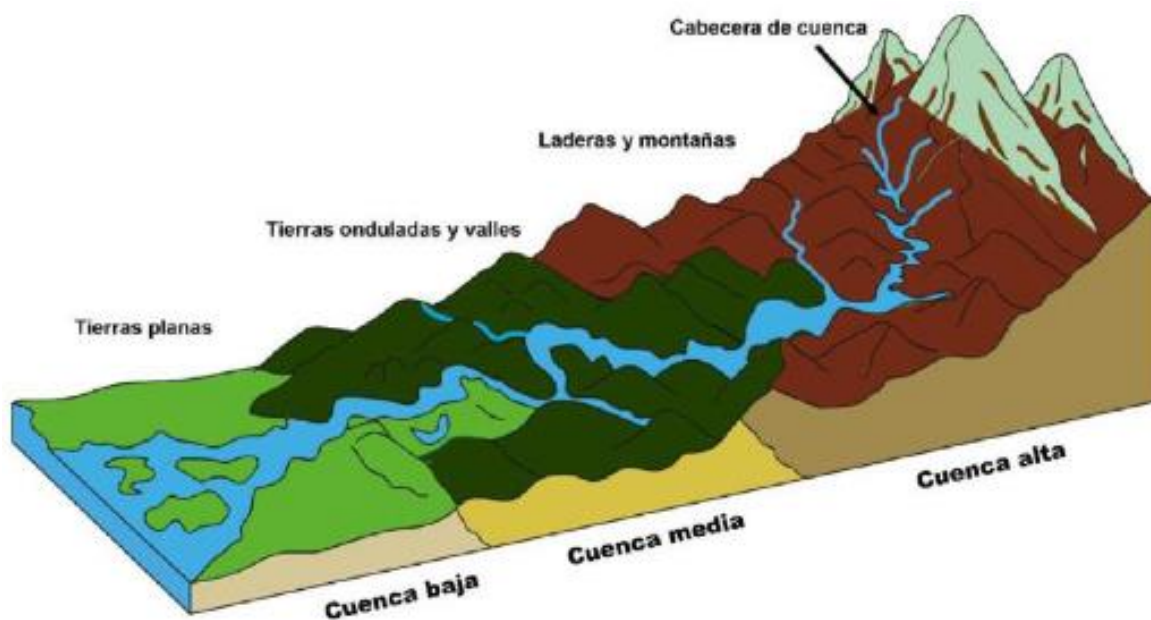


Figura 7. Partes de una cuenca hidrográfica

1.3.2. Geomorfología

1.3.2.1. Topografía

Es considerado como una ciencia que se enfoca en la medición de extensiones de tierra y extrayendo datos que luego son plasmados en un plano, donde se representa su forma, pendiente, altura a través de curvas de nivel (Gámez Morales, 2015).

1.3.2.1.1 Curva de Nivel

Son un conjunto de líneas que se encuentran plasmados en una cartografía o plano y representan la elevación con respecto al plano de referencia (Gámez Morales, 2015). Ver **Figura 8** donde se muestran estas curvas de nivel.

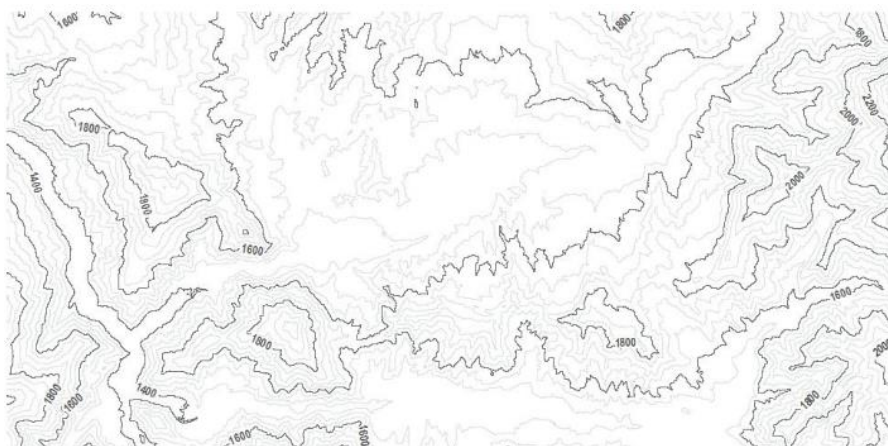


Figura 8. Curvas de nivel en msnm

1.3.2.2. Suelo

Material no consolidado que se encuentra conformado por materia orgánica, inorgánica, agua, aire y organismo (Ministerio del Ambiente, 2014). En la **Tabla 1** que fue extraído del libro de Hidrología en la Ingeniería (1999) se menciona el diámetro de cada partícula que conforma el suelo.

1.3.2.2.1 Cobertura

Se hace mención al tipo de cobertura vegetal y se considera un valor importante para determinar la escorrentía (Chereque Morán, 1989).

Tabla 1.

Tipos de suelos y sus diámetros

Tipo de Material	Diámetro
Gravas	$2 \leq D$
Arenas gruesas	$0.2 \leq D < 2$
Arena fina	$0.02 \leq D < 0.2$
Limo	$0.002 \leq D < 0.02$
Arcilla	$D < 0.002$

Nota: En la presente tabla se muestra los tipos de materiales que conforman el suelo y el diámetro.

1.3.2.2.2 Pendiente

La pendiente es un parámetro muy importante, debido a que tiene relación con otros parámetros como son, la escorrentía, humedad de suelo, infiltración (Máximo Villón, 2002).

Ecuación 1. Pendiente de la cuenca

$$S = \frac{DL}{A}$$

Donde:

S = Pendiente de la cuenca

D = Desnivel constante entre curvas de nivel en Km

L = Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca en Km.

A = Área de la cuenca en Km²

1.3.3. Ciclo Hidrológico de una Cuenca

El ciclo hidrológico es un proceso natural que atraviesa el agua, que se encuentra en lagos o mares. El agua se evapora y asciende hacia la atmósfera y forma las nubes (Campos Aranda, 1998), que posteriormente precipitan y llegan al suelo, para luego retornar a la atmósfera a través de la evaporación y evapotranspiración. Ver la **Figura 9** y la **Figura 10** donde se muestra el ciclo hidrológico con mayor detalle.

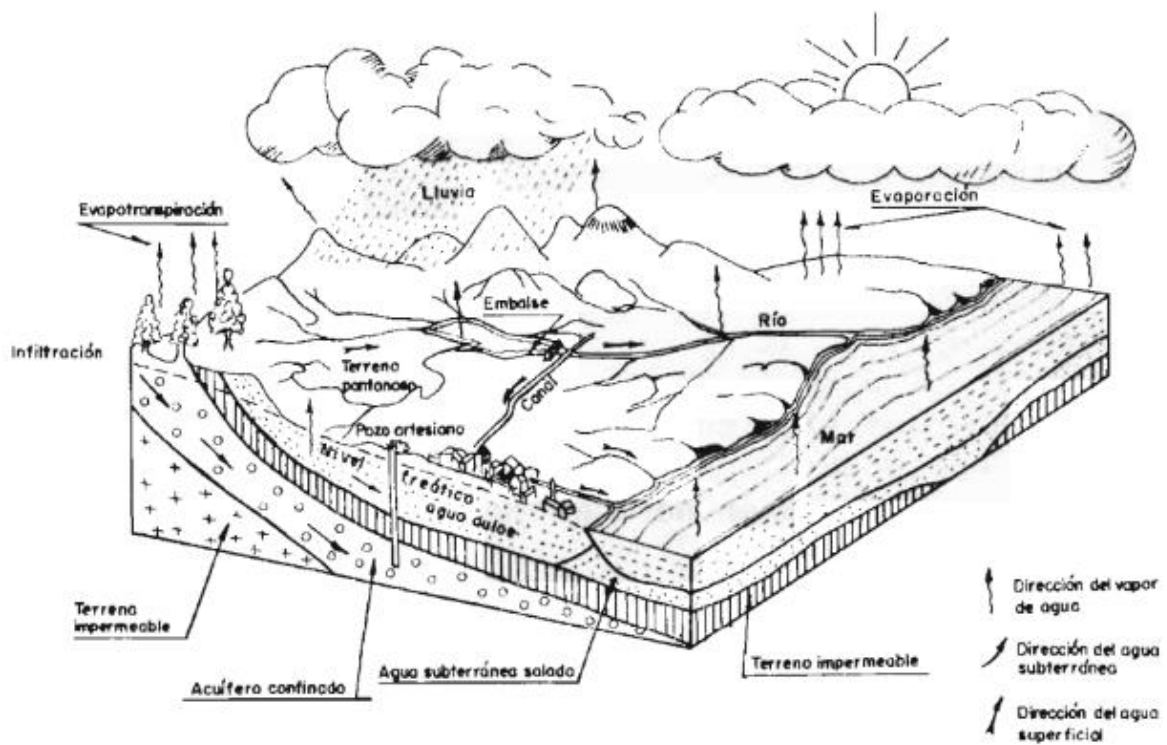


Figura 9. Ciclo hidrológico de una cuenca

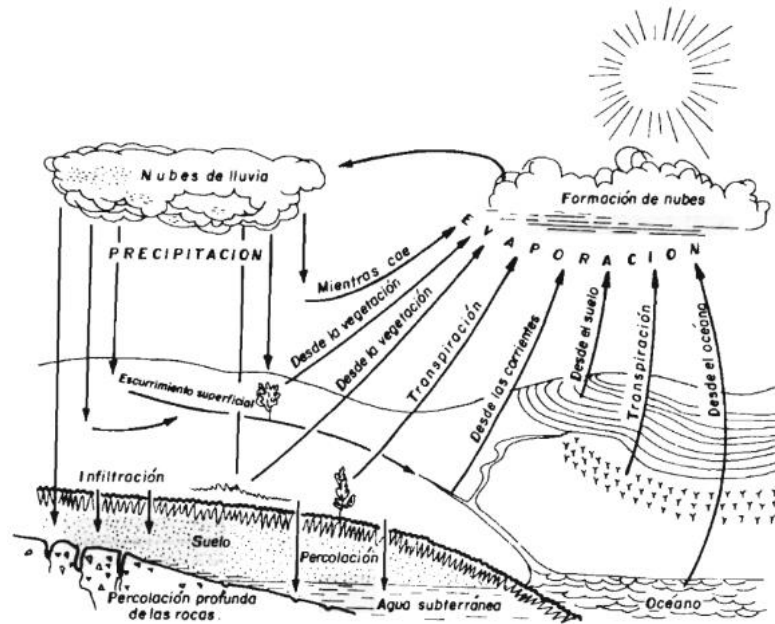


Figura 10. Ciclo hidrológico simplificado

1.3.3.1. Variables Hidrológicas

Dentro del ciclo hidrológico se encuentran diversas variables que forman parte del ciclo hidrológico, estas son:

1.3.3.1.1 Infiltración

Es el proceso que se da cuando, el agua penetra la capa del suelo o cobertura vegetal (Chereque Morán, 1989).

En la **Figura 11** se muestra el proceso de infiltración, donde la precipitación o lluvia (P) cae e intercepta (I) con el suelo, una porción infiltra (F) e ingresa a las capas inferiores, donde se encuentra con la corriente sub superficial (Ess) a este proceso se denomina percolación (P^1), otro porcentaje se almacena en la parte superficial (S) y se evapora (E) o escurre (Es).

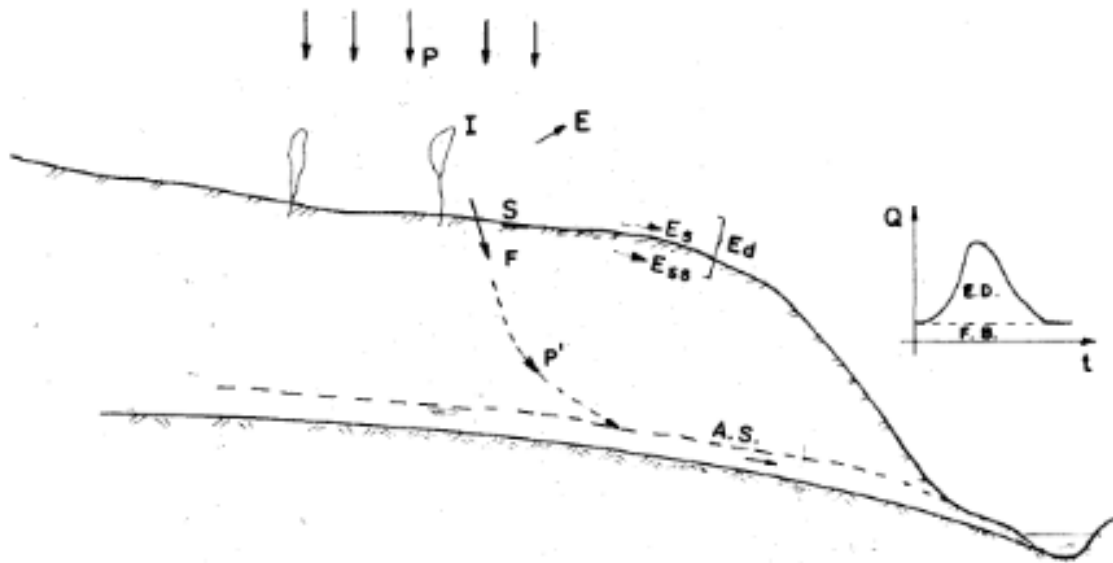


Figura 11. Proceso de infiltración

1.3.3.1.2 Escorrentía o Escurrimiento Superficial

Proviene de la precipitación que no se infiltra en el suelo (Máximo Villón, 2002) o es el volumen de agua de lluvia que recorre desde el punto donde cae hasta la corriente de agua que forma la red de drenaje de la cuenca (Monsalve Sáenz, 1999).

En la **Ecuación 2** se muestran las variables que interactúa para determinar la escorrentía.

Ecuación 2. Escorrentía

$$Q_e = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$$

Donde:

Q_e = Escorrentía en mm

P = Lámina de lluvia en mm

S = Potencial máxima de retención.

1.3.3.1.3 Percolación

La percolación es el movimiento descendente del agua, que se encuentra en el interior del suelo (Gómez Vargas, Gonzales Velásquez, & Morales Pérez, 2018). En la **Figura 11** se observa la percolación dentro del ciclo hidrológico.

1.3.3.1.4 Evaporación

La evaporación es producida por el aumento de energía cinética de las moléculas del agua, producida por la energía térmica o radiación, emiten por el sol (Aparicio Mijares, 1989). En la Figura 12 se puede observar evaporación que forma parte del proceso de ciclo hidrológico.

1.3.3.1.5 Transpiración

La transpiración es el proceso que sucede en toda la estructura vegetal de una planta, al exponerse a la alta temperatura atmosférica. Dando como resultado, que la estructura vegetal sude o transpire y esta humedad se adicione a la humedad atmosférica (Maderey Rascón & Jiménez Román, 2005). En la Figura 12 se muestra el proceso de transpiración de la planta, debido a una alta temperatura.

1.3.3.1.6 Evapotranspiración

La evapotranspiración es el producto de la evaporación ocasionado por los cuerpos de agua o zonas humedad, sumado a la transpiración que genera la vegetación (Ricardo Trezza, 2008).

En la **Figura 12** se muestra la interacción de la energía solar con respecto a la evaporación y la transpiración de las plantas.

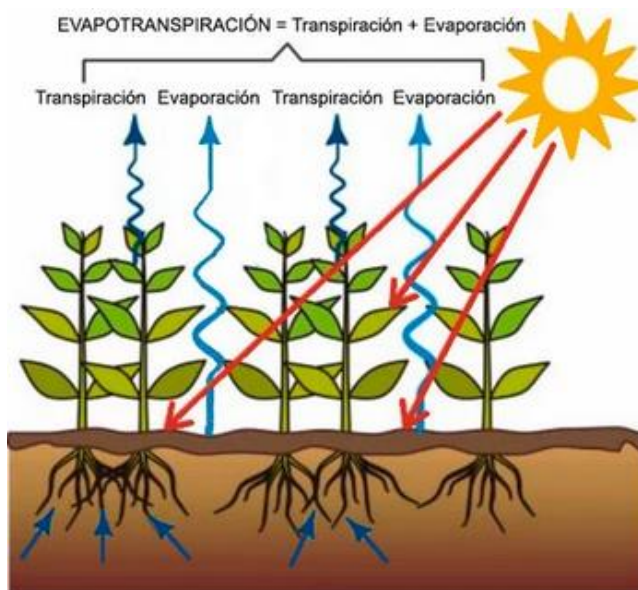


Figura 12. Conformación de la evapotranspiración

1.3.3.1.7 Caudal

Es considerado como la escorrentía superficial por unidad de tiempo, la unidad de medida es m³/segundos o Litros/segundos (Monsalve Sáenz, 1999).

Ecuación 3. Caudal

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q = Caudal

V = Volumen en m³ o litros.

t = Tiempo en segundos.

1.3.3.1.8 Curva Número

La curva número es la caracterización de la capacidad de escorrentía de suelo, mediante la interacción de las actividades económicas, el tipo de sustrato o

tipo de cobertura y la clasificación hidrológica del sustrato (Díaz Carvajal & Mercado Fernández, 2017).

En la **Ecuación 4** se demuestra, como determinar la curva número.

Ecuación 4. Curva Número

$$NC = \frac{25.400}{S + 254}$$

Donde:

NC = Curva número.

S = Potencial máximo de retención (milímetros).

1.3.3.1.9 Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU)

Son regiones hidrológicas que presentan similares propiedades hidrológicas, elevación, pendiente, uso de suelo, tipo de suelo, entre otras (García Reinoso, Méndez Monroy, & Zarate Jiménez, 2017).

García Reinoso y otros investigadores (2017) mencionan que algunas cualidades son predominantes ante otras en un HRU (unidad de respuesta hidrológica) y dentro del modelo SWAT se usa la topografía para la delimitación de las sub cuencas, uso y tipo de suelo, que forman parte de estas características para definir un HRU.

1.3.4. El Clima

El clima es el conjunto de fluctuaciones atmosféricas caracterizado por estados y la evaluación del tiempo (Chereque Morán, 1989).

1.3.4.1. Variables Climatológicas

Las variables climáticas que forman parte del ciclo hidrológico y son afectados por el cambio climático son:

1.3.4.1.1 Precipitación

Se le denomina a la caída de partículas líquidas o sólidas de agua, esta precipitación alimenta a toda la cuenca (Maderey Rascón & Jiménez Román, 2005).

1.3.4.1.2 Temperatura o calor

Es una magnitud que se relaciona con el grado de agitación de una partícula que compone la materia, cuando mayor sea el grado de agitación, mayor será la temperatura (FECYT, 2004).

1.3.4.1.3 Humedad

Es considerada como la presencia de vapor de agua en la atmósfera, generado por un proceso de vaporización natural (FECYT, 2004).

1.3.4.1.4 Radiación Solar

Se define como la energía electromagnética que es emitida por el sol y es recibida por la atmósfera (FECYT, 2004). En la Ecuación 5 se muestra, como determinar la radiación solar.

Ecuación 5. Radiación solar

$$R_{ssamani} = Ra \times kt \times (T_{max} - T_{min})^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$R_{ssamani}$ = Radiación solar incidentes [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

Ra = Radiación solar extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

Kt = Coeficiente empírico [$^{\circ}\text{C}$]

Tmax = Temperatura diaria máxima [$^{\circ}\text{C}$]

Tmin = Temperatura diaria mínima [$^{\circ}\text{C}$]

1.3.4.2. Viento

El viento no es más que, el movimiento de aire y cumple la función dentro del ciclo hidrológico es transportar las masas de aire húmedo en el proceso de evaporación y calor (Chereque Morán, 1989).

1.3.5. Calentamiento Global

Es un proceso donde la temperatura a nivel global se ha ido incrementando de manera progresiva (Vásquez Villanueva, y otros, 2016).

1.3.5.1. Cambio Climático

Los cambios del clima o también conocido como, cambio climático, que sucede a lo largo del tiempo podría estar ocasionado por factores naturales o antropogénicos (Forero Cantor, Saldarriaga Muñoz, & Vargas Romero, 2017).

1.3.5.1.1 Variables Climáticas afectadas

En la

Tabla 2 que fue elaborado en base al artículo científico titulado *Cambio Climático: Impacto y perspectivas de investigación desde de una visión multidisciplinaria* que fue elaborado por Forero Cantor y otros investigadores en el año de 2017.

Tabla 2.

Variables climáticas afectadas

VARIABLES CLIMÁTICAS AFECTADAS	EVIDENCIA DETECTADA	PREVENCIONES
Precipitación	Se observó un aumento de la precipitación en América, Europa, Asia y Asia Central.	Se espera una disminución de la precipitación en las zonas tropicales.
Temperatura	En el 2005 se observó un incremento de temperatura, comparado al año de 1906 de 0.56 °C.	Se predice que épocas contienen temperaturas extremas. El aumento de la temperatura del mar será más frecuente en los meses de verano.
Recursos hídricos	Alteración del ciclo hidrológico	Disminución del volumen de agua dulce. Aumento de la evapotranspiración en las zonas alto andinas.

Nota: En la presente tabla se muestra las variables afectadas, con sus respectivas evidencias y las prevenciones que se deben de tener en consideración.

1.3.6. DATA PISCO

La determinación de la distribución de la precipitación en todo el territorio nacional es complicada debido a las configuraciones topográficas que presenta. Para ello el SENAMHI a través de su Dirección de Hidrogeología (DHI) ha empleado diversos sensores satelitales a nivel global, al igual que estaciones climatológicas que se encontraban ubicadas en todo el territorio nacional (SENAMHI, 2017), para determinar a través de modelos matemáticos y estadísticos la precipitación en una zona alejada y esto se ha realizado desde el 2013 (SENAMHI, 2017).

En la **Figura 13** se muestra la red de estaciones climatológicas que alimentan al modelo matemático de Data Pisco, para la determinación de la precipitación. La **Figura 13** fue tomado de *Uso de productos grillado pisco de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operaciones de monitoreos y pronóstico*

hidrometeorológico (p. 8), por SENAMHI, 2017, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

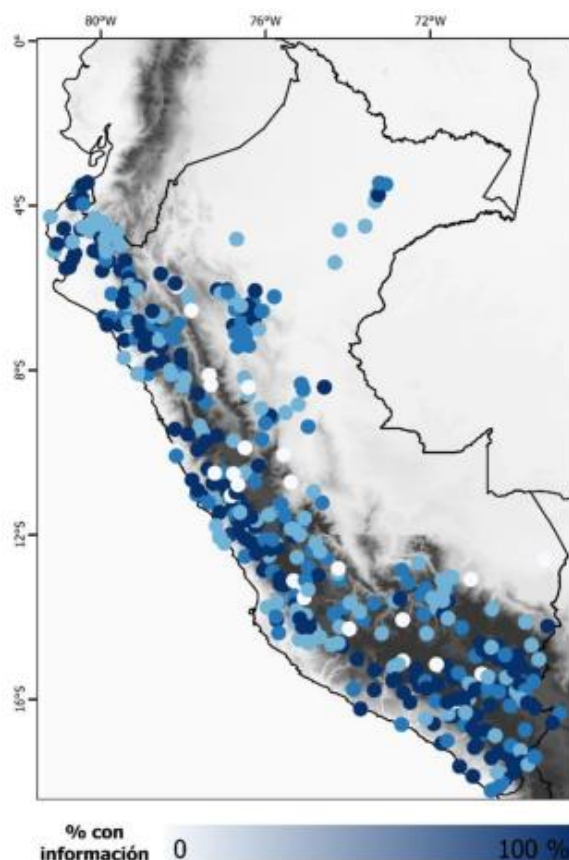


Figura 13. Red de Estaciones Meteorológicas Para la Elaboración de PISCO.

El modelo matemático en el 2013 dio como resultado un modelo grillado con una temporalidad mensual que inicia en enero de 1981 hasta la actualidad y una resolución espacial de 0.05° que es equivalente 0.05 Km (SENAMHI, 2017).

En la **Figura 14** se muestra el resultado del modelamiento matemático que realizó el Data Pisco en el año 2013. La **Figura 14** fue tomada de *Generación de base de datos de precipitación mensual grillado de alta resolución a nivel nacional 1981-2013* (p. 37), por SENAMHI, 2015, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

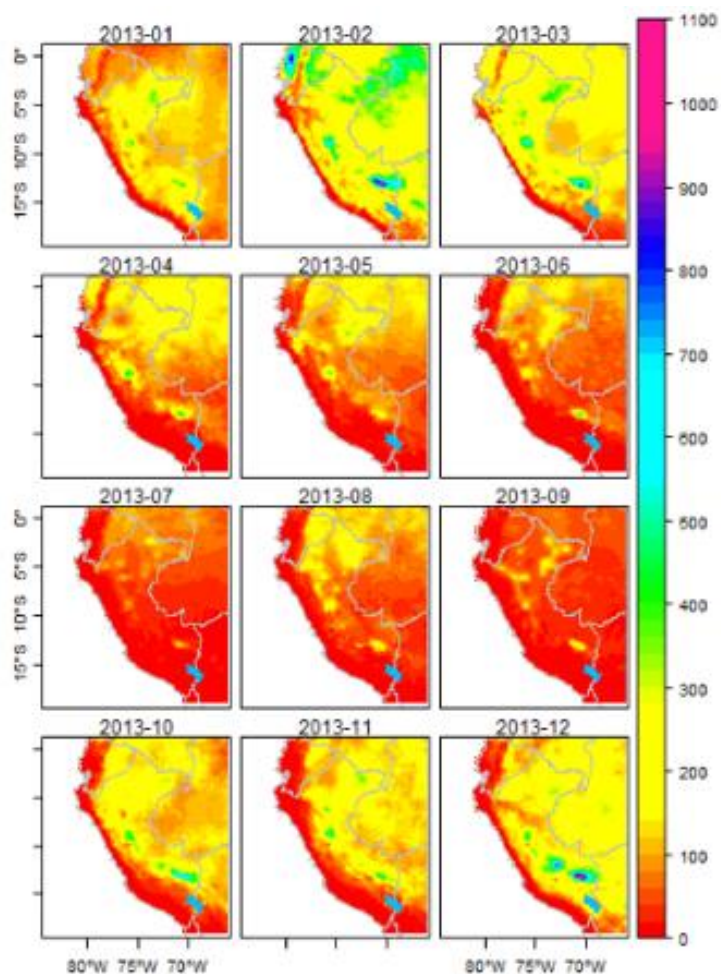


Figura 14. Modelo Grillado de la Interpolación de Data PISCO. Chirps

Para elaborar el modelo PISCO se requiere de una base de datos a nivel global del proyecto CHIRPS (Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station Data), la data es una combinación de información generada por los satélites meteorológicos, modelos matemáticos y estaciones climatológicas y se encuentran disponibles desde 1981 (SENAMHI, 2015).

1.3.6.1. Estaciones Virtuales

Las estaciones virtuales son aquellas intersecciones formadas cuando un satélite hace el barrido de la cobertura terrestre y el plano de agua, de los cuales, los datos registrados por el satélite permiten deducir una serie temporal y las

variaciones de los niveles de precipitación, superficiales del agua (León, Seyler, & Puerta, 2011).

1.3.7. Mapa de Suelo

La FAO y la UNESCO elaboraron el mapa de suelos, gracias al aporte de los científicos de diversas regiones (FAO, 2021). El mapa está dividido por continentes y tiene una escala de 1:5 000 000. Fue gracias al acuerdo que se llevó a cabo en el séptimo congreso en Madison, Wisconsin, EE. UU en 1960 (FAO, 2021). En la **Figura 15** se muestra el mapa de suelo de América del Sur que inició su elaboración en el año de 1961.

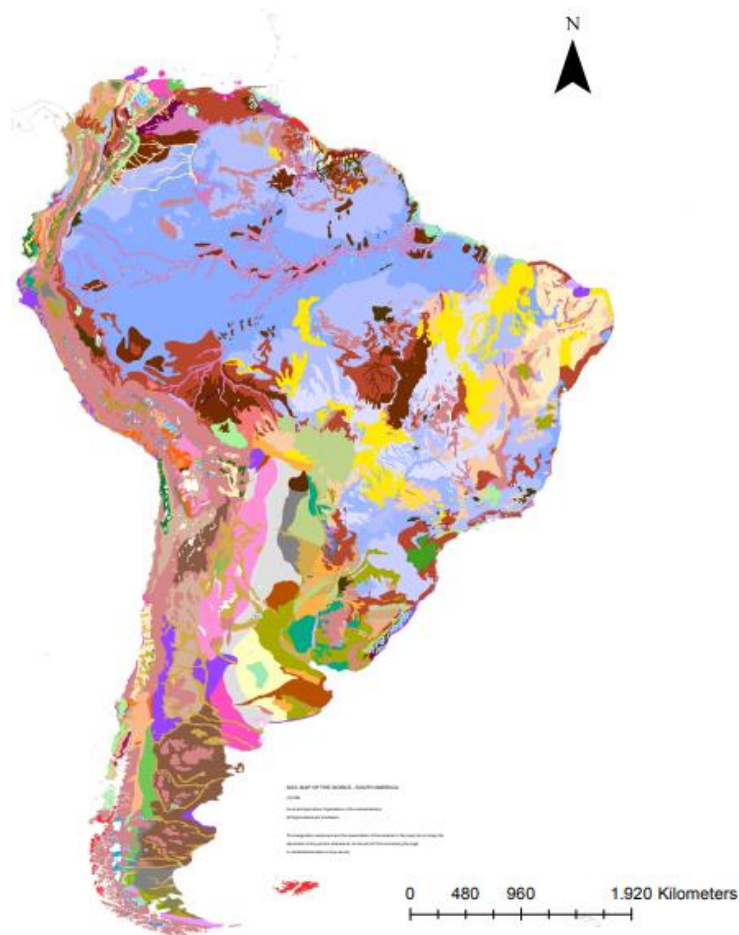


Figura 15. Mapa de Suelos de América del Sur.

1.3.8. Escenarios de Emisión

Según el grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (2013) menciona que, un escenario son imágenes alternativas del futuro, que son basados en suposiciones del aumento de las emisiones gaseosas de efecto invernadero que tiene correlación directa con el aumento de temperatura.

Los escenarios que se tienen en el presente han generado una serie de cambios en diversos aspectos, como físico, ecológico (IPCC, 2013).

Como se muestra en el

Tabla 3 el IPCC planteó cuatro escenarios denominándolos como Rutas de Concentración Representativa o también conocido por sus siglas RCP.

Estos escenarios que son denominados como Rutas de Concentración Representativas (RCP) representan el aumento de temperatura debido a la radiación que es absorbida por la superficie de la tierra. Se plantean cuatro escenarios (RCP, 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5) donde la variación de temperatura es distinta a la anterior y por consecuencia los cambios climáticos son mucho más notorios y perjudiciales.

La

Tabla 3 fue extraída de la tesis de investigación titulada como *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático* por León Ochoa R. en el año 2017 de la Universidad Agraria la Molina.

Tabla 3.

Tipos de Rutas de Concentración Representativa (RCP)

Nombre	Radiactiva	Concentración (ppm)	Aumento de Temperatura Estimada (°C)	Estado
RCP 8.5	>8.5 Wm ² en el año 2100	> 1370 CO ₂ equivalente en el año 2100	4.9	Escenario con alta emisiones de GEI
RCP 6.0	~ 6 Wm ² en el año 2100	~ 850 CO ₂ equivalente en el año 2100	3	Escenario con concentraciones medias de GEI
RCP 4.5	~ 4.5 Wm ² en el año 2100	~ 650 CO ₂ equivalente en el año 2100	2.4	
RCP 2.6	Máxima 3 Wm ² en el año 2100	Máxima ~ 490 CO ₂ equivalente en el año 2100	1.5	Escenario con baja emisión de GEI

Nota: En la presente tabla se muestra los escenarios climáticos, las cuales llevan el nombre de Rutas de Concentración Representativa o RCP. Donde a su vez muestra los posibles aumentos que podrían suceder en cada tipo de escenario, el nivel de concentración de CO₂ y el nivel de radiación.

Como se puede observar en la

Tabla 3 la relación que tiene la energía radiactiva absorbida por la tierra, con respecto a las concentraciones de dióxido de carbono, que ocasiona el aumento de temperatura.

1.3.8.1. RCP 2.6

Este escenario representa las acciones que se han llevado a cabo para mitigar el crecimiento de la temperatura a un valor de 2 °C, generado por el Calentamiento global con una visión al año 2100 alcanzando valores de 3 W/m² (Leon Ochoa, Portuguez Maurtua, & Chávarri Velarde, 2019).

1.3.8.2. RCP 6.0

En este escenario, se plantea que, las emisiones generadas disminuyan de manera significativa para el 2060 y se implementen políticas climatológicas, teniendo como beneficio una disminución de la intensidad energética de 1.2% para el 2060 y entre los años 2060 a 2100 a un 1.5% y si no se realiza ningún cambio la temperatura aumentará en 3 °C con respecto a la década anterior (Leon Ochoa, Portuguez Maurtua, & Chávarri Velarde, 2019).

1.3.8.3. RCP 4.5

León y otros científicos (2019) describen que en un escenario RCP 4.5 la temperatura asciende a 2.4 °C para el año 2040 y comienza a descender en el 2080 es por ello que se propone políticas climáticas y sanciones económica por el uso del carbono, como la implementación de tecnologías para capturar, almacenar la producción de CO (Leon Ochoa, Portuguez Maurtua, & Chávarri Velarde, 2019).

1.3.8.4. RCP 8.5

En el escenario RCP 8.5 no se realiza ninguna implementación de políticas climáticas o tecnologías, es por ello que, la generación de GEI aumentan exponencialmente, así como también se produce el aumento de la temperatura en 4.9 °C (Leon Ochoa, Portuguez Maurtua, & Chávarri Velarde, 2019).

1.3.9. Modelo de Circulación General (MCG)

Los modelos circulares generales (MCG) son herramientas que nos ayuda a entender el comportamiento del clima en las diversas escalas temporales (León, Seyler, & Puerta, 2011). Los MCG son representaciones matemáticas de un sistema climático terrestre que permite evaluar los efectos que genera los GEI (gases de efecto invernadero) sobre el clima futuro (Velázquez Zapata, Troin, & Dávila Ortiz, 2017). Todos los MCG tienen como finalidad predecir el aumento de temperatura a nivel global.

En la **Tabla 4** se muestran algunos modelos circulares generales (MCG) que poseen cuatro rutas de concentración representativa (RCP) a futuro. A su vez la misma tabla fue extraída y adaptada a la investigación de la tesis de grado titulada *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático* por León Ochoa de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

Tabla 4.

Modelos Circulares Generales

Modelos Circulares General	Resolución Lat. X Long	Rutas de Concentración Representativa
HadGEM2-ES	1.2414 x 1.875	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.0
CSIRO-Mk3-6-0	1.875 x 1.875	
MRI-CGCM3	1125 x 1.125	

MIROC5

1.4063 x 1.4063

Nota: En la presente tabla se muestra los modelos climáticos o Modelos Circulares Generales que plantean los diversos Escenarios de Concentración Representativa (RCP) con sus respectivas resoluciones espaciales. Esta información ha sido utilizada para predecir los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca Yauca.

Los modelos MCG que se muestran previamente tienen un mejor ajuste de temperatura y precipitación, esto lo determinó la investigadora Ramos Jauregui (2014) en su tesis *Estimación del Efecto del Cambio Climático en la Precipitación en la Costa Norte del Perú Usando Simulaciones de Modelos Climáticos Globales*.

1.3.10. Modelo Hidrológico

Un modelo hidrológico es una serie de ecuaciones matemáticas y físicas que tiene como finalidad, representar un sistema real donde interactúan diversas variables hidrológicas, climatológicas y geomorfológicas (Valladares Martel, 2017).

En la Ecuación 6 se representa de manera teórica, un modelo hidrológico de manera general.

Ecuación 6 Modelo hidrológico

$$Q(t) = \Omega i(t)$$

Donde:

$Q(t)$ = Data de entrada en función del tiempo

$I(t)$ = Data de salida en función del tiempo

Ω = Función de transformación de entrada y salida

1.3.10.1. Modelo SWAT

En el departamento de Agricultura de la Universidad de Texas, el Dr. Jeff Arnold creó el modelo Soil an Water Assessment Toal o SWAT (Rivera Toral, Pérez Nieto, Ibáñez Castillo, & Hernández Saucedo, 2012)

La herramienta de análisis de suelo y agua o conocido como también como el modelo SWAT (Osorio Cárdenas & Cerquera Martínez, 2020) es un modelo distribuido de tiempo continuo que tiene sus cimientos en la física y es empleado para predecir el equilibrio de una unidad hidrográfica a mediano y largo plazo (Leon Ochoa, Portuguez Maurtua, & Chávarri Velarde, 2019).

El modelo requiere de los siguientes datos para determinar los cambios en el ciclo hidrológico.

- Modelo de elevación digital (DEM).
- Clima: Temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación solar, velocidad del viento, humedad, potencial de evaporación.
- Cobertura vegetal.
- Características físicas del suelo en la Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU).

En la **Ecuación 7** se muestra la aplicación de las variables antes mencionadas.

Ecuación 7. Modelo SWAT

$$SW = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{qw})_i$$

Donde:

SWt = Contenido final de agua en el suelo (mm).

SWo = Contenido de agua inicial (mm).

t = Tiempo.

Rday = Cantidad de precipitación.

Qsurf = Cantidad de escorrentía superficial (mm).

Wseep = Cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo (mm).

Qqw = Cantidad de flujo de retorno (mm).

Ea = Evapotranspiración

1.3.10.1 Beneficios del Modelo SWAT

La aplicación de la herramienta para la evaluación del suelo y agua o por sus siglas SWAT, presenta algunos beneficios como, la aplicación a cualquier cuenca que no ha sido monitoreada y las condiciones pueden ser modeladas, así como los cambios en el ciclo hidrológico y sus variables que lo conforman pueden ser cuantificables (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005). Como también diversos estudios han arrojado que el modelo es preciso si se compara con los datos reales del área de estudio.

1.3.10.2. Unidad de Respuesta Hidrológica

La cuenca está conformada por sub cuencas y en ellas podemos encontrar diversas propiedades que se le denomina unidad de respuesta hidrológica o su abreviatura HRU por sus siglas en ingles (Leon Ochoa, Portuguez Maurtua, & Chávarri Velarde, 2019).

Un HRU contiene la siguiente información, escorrentía superficial, percolación, flujo de agua subterránea, evapotranspiración y pérdida de transmisión (Leon Ochoa, Portuguez Maurtua, & Chávarri Velarde, 2019).

1.3.10.3. Calibración y validación del Modelo

Lujano Laura, Sosa Sarmiento (2016) mencionan que el proceso de calibración está conformado por procesos computacionales. Este proceso se basa en los datos que ingresan al modelo matemático son comparados con los datos observados (Lujano Laura, Sosa Sarmiento, Lujano Laura, & Lujano Laura, 2016).

Existen diversas ecuaciones que nos permiten validar un modelo, como se muestra en la **Tabla 5** que fue extraído de la tesis de grado titulada *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático* por León Ochoa de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

Las variables que se muestran dentro de las fórmulas como Q^{sim} y Q^{obs} se denominan caudales simulados y caudal observado. Como también la variable “t” es tiempo y “n” es el número de observaciones del periodo considerado y la variable \bar{Q}^{sim} y \bar{Q}^{obs} son caudales medios simulados y observados.

Tabla 5.

Ecuaciones de Validaciones de Modelo Hidrológico

Nombre	Criterio estadístico	Valores	Clasificación Rendimiento
Co. Nash-Sutcliffe	$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{sim})^2}$	$0.75 < NSE \leq 1.0$	Excelente
		$0.65 < NSE \leq 0.75$	Bueno
		$0.50 < NSE \leq 0.65$	Satisfactorio
		$0.40 < NSE \leq 0.50$	Aceptable
		$NSE \leq 0.40$	Malo
Co. de determinación	$R^2 = \frac{(\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})(Q_t^{sim} - \bar{Q}^{sim}))^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2 \sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - \bar{Q}^{sim})^2}$	$r \geq 0.5$	Satisfactorio
		$0 \leq r \leq 0.5$	Malo
Percent bias		$PBIAS < \pm 10$	Excelente

	$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim}) \cdot 100}{\sum_{t=1}^n Q_t^{obs}}$	$\pm 10 \leq PBIAS < 0.60$ Bueno $\pm 15 \leq PBIAS < 0.70$ Satisfactorio $PBIAS \geq \pm 25$ Malo
Raíz cuadrada de error cuadrático medio	$RMSE = \left(\frac{(\sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - Q_t^{obs}))^2}{n} \right)^{0.5}$	Valor inferior a la mitad de la desviación estándar Satisfactorio
Relación entre el RSME y la desviación estándar de las observaciones	$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_T^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2}}$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$ Excelente $0.50 \leq RSR \leq 0.60$ Bueno $0.60 \leq RSR \leq 0.70$ Satisfactorio $RSR > 0.70$ Malo

Nota: La presente tabla muestra las fórmulas empleadas que podrían usarse para validar los resultados del modelo hidrológico, para predecir los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca del río Yauca. Cada una de estas fórmulas tiene una interpretación de acuerdo al resultado obtenido. Para el proceso de validación de resultados se ha hecho uso del coeficiente de Nash-Sutcliffe.

1.3.11. R y Rstudio

1.3.11.1.R

Tino Rodríguez (2017) menciona que R es un lenguaje de programación orientado a objetos, enfocado en el análisis y manipulación de datos, con pruebas paramétricas y no paramétricas, modelos no lineal y lineal. Como también, se enfoca en el modelamiento de series temporales, simulaciones y estadística espacial (Tino Rodríguez, 2017).

1.3.11.1.1 Rstudio

Rstudio es un entorno de desarrollo que soporta el lenguaje de programación de R y Python, que posee una consola de edición de código y resalta la sintaxis del código fuente y admite la ejecución dentro de la computadora (Rstudio, 2021).

1.3.12. ArcGIS

Es un sistema complejo, que recopila, organiza, administra, comparte y distribuye información geográfica (Esri, 2021).

1.3.12.1. ArcSWAT

La herramienta ArcSWAT es una extensión dentro de ArcGIS, que se basa en el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) que es empleado para la simulación de la producción de agua que se da en el ciclo hidrológico y sus alteraciones en las variables hidrológicas (Uribe, 2005).

1.3.12.2. SWAT-CUP

El programa SWAT-CUP es un software de calibración, validación, análisis de sensibilidad de los modelos que genera el SWAT. El programa vincula los procedimientos SUFI2, GLUE, ParaSOL, MCMC y PSO al modelo SWAT, cualquiera de los procedimientos antes mencionados puede emplearse para calibrar el modelo SWAT (2W2E GmbH, 2021).

1.3.12.2.1 SUFI-2

El algoritmo estadístico SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting versión – 2) proporciona los rangos y parámetros de las variables, que el modelo considere necesario evaluando la sensibilidad a través de dos coeficientes, el primero T-Stat y el segundo P-valor (Sánchez Galindo, Fernández Reynoso, Matínez Menes, Rubio Granados, & Ríos Berber, 2021).

SUFI-2 genera una serie de interacciones que contienen numerosas simulaciones, donde cada simulación toma como referencia la simulación anterior

con el objetivo de aproximar los caudales de salida a los datos observados (Jodar Abellan, Ruiz, & Melgarejo, 2018).

Ecuación 8. Ecuación SUFI-2

$$E_n = (R_n - R_{n-1}) + S_n + Ev_n$$

Donde:

E_n = Entrada al embalse en el mes actual (m^3/s)

R_n = Reservas del embalse en el mes actual (m^3/s)

R_{n-1} = Reserva en el mes anterior (m^3/s)

S_n = Salidas en el mes actual (m^3/s)

Ev_n = Pérdida de evaporación en el mes actual (m^3/s)

1.3.12.3. SWAT OUTPUT VIEWER

La herramienta SWAT OUTPUT VIEWER es una herramienta para visualizar y analizar los resultados del modelo SWAT (SwatViewer, 2022)

1.3.13. Modelo de Elevación Digital (MDE o DEM)

Un modelo de elevación digital o también conocido por sus siglas como MED o DEM, es una matriz numérica de datos que representa de manera digital la altitud de la superficie de un terreno (Andrades, y otros, 2020).

En la **Figura 16** se muestra una representación básica en dos dimensiones de un DEM (modelo elevación digital), donde cada píxel o cuadrícula representa una altura del terreno (N. Demers, 2009) .Como también en la **Figura 17** se muestra un ejemplo de un modelo de elevación digital en tercera dimensión, que fue extraído de la página oficial de ArcGIS.

78	72	69	71	58	49
74	67	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

Elevation

Figura 16. Representación Básica del Modelo de Elevación Digital.

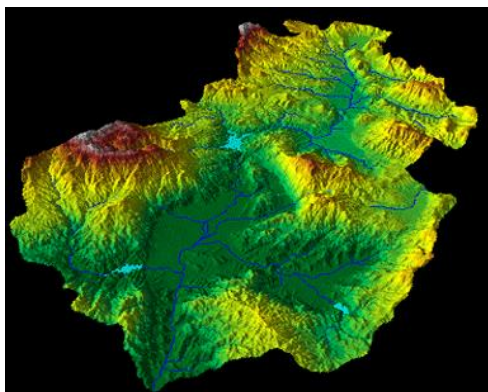


Figura 17. Modelo de Elevación Digital

1.3.14. EarthData

EarthData es una plataforma de la EODIS o también conocido como, Sistema de Datos e Información del Sistema de Observación de la Tierra, que administra la información de la NASA que es obtenida por los sensores satelitales, aéreos y otros programas de prospección (Organización de las Naciones Unidas, 2021).

1.3.15. Earth Explorer

Es un programa que tuvo como objetivo el lanzamiento de seis satélites entre los años de 2009 al 2013, con la finalidad de realizar un monitoreo a nivel global sobre el calentamiento global, cálculo de variables climáticas, ciclo hidrológico. Desglaciación y la atmósfera (ESA, 2021).

1.3.15.1. SRTM V3

En el 2000 se inició la misión Topográfica Shuttle Radar o también conocida por sus siglas SRTM de la NASA y se publicó a nivel global una serie de imágenes satelitales que fue captado por el satélite SRTM V3 con una resolución de treinta metros por píxel, del relieve terrestre (NASA, 2021). En la **Figura 18** se muestra una imagen del sensor SRTM V3 que posee una resolución espacial de 30 metros, en comparación de su antecesor y esta fue extraído de la página de la NASA.

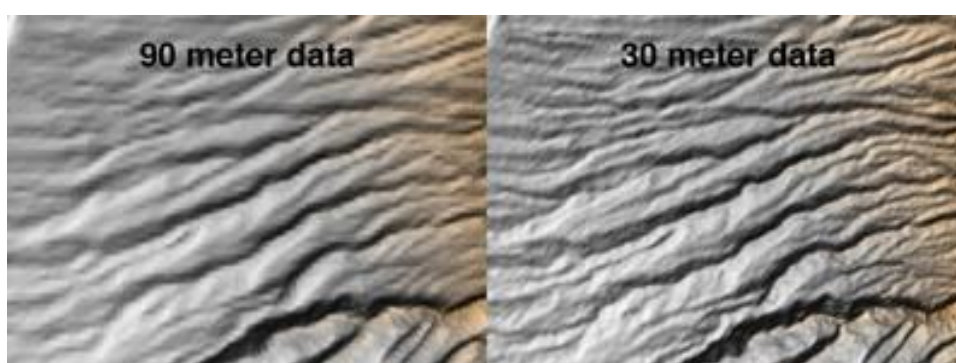


Figura 18. DEM tomado por el sensor STRM V3

1.3.15.2. MODIS

El sensor MODIS cuenta con dos satélites a bordo, el primero es Terra o EOS-AM que fue lanzado en diciembre de 1999 y el sensor Aqua o EOS-PM lanzado en mayo de 2002, ambos sensores fueron creados para monitorear la cobertura terrestre y cambios climáticos, generando imágenes satelitales (François Mas, 2011).

En la **Tabla 6** se muestra las especificaciones técnicas del sensor MODIS que fue extraído de Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio por J. François Mas en el año de 2011.

Tabla 6.

Descripción Técnica del Sensor MODIS

Características	Descripción
Orbita	Altitud: 708 km (Tierra) y 705 (Aqua), pasando en el Ecuador a 10:30 am nodo descendente (Tierra) y a la 1:30 pm, nodo ascendente (Aqua), helio síncrona, casi polar, circular.
Tasa de escaneo	20.3 rom, ortogonal a la órbita
Dimensiones de la franja escaneada	2 330 km (ortogonal) por 10 km (a lo largo del ortiba, al nadir)
Telescopio	17.78 cm diámetro con planos de desvío intermediarios
Tamaño	1.0 x 1.6 x 1.0 m
Peso	228.7 kg
Poder	162.5 W (promedio orbital)
Tasa de transferencia de datos	10.6 Mbps (pico); 6.1 Mbps (promedio orbital)
Codificación	12 bits
Resolución espacial	250 m (bandas 1- 2)
	500 m (bandas 3-7)
	1000 m (bandas 8-36)
Vida útil	6 años

Nota: La presenta tabla muestra las características físicas, tiempo de vida útil, resolución espacial del sensor satelital MODIS.

Cuando el sensor MODIS realiza el barrido a nivel global genera una serie de productos que se enfocan en un tipo de cobertura y a su vez cada producto tiene sub productos que se enfocan en una característica de la cobertura (François Mas, 2011).

En la **Tabla 7** se muestra los productos y el tipo de cobertura a analizar, como también en la **Tabla 8** se muestra la característica del tipo de cobertura por cada sub producto. La información de ambas tablas fue extraída del libro Aplicación del sensor MODIS para el monitoreo del territorio, elaborado por J. François Mas en el año de 2011.

Tabla 7.

Producto MODIS y Estudio de Tipo de Cobertura

Producto	Tipo de Cobertura
MODcean	Estudio de los océanos
MODIS Atmosphere	Estudio atmosférico
MODLAND	Estudio de la cromosfera y la cubierta terrestre

Nota: La presente tabla muestra los diversos productos, que ofrece cuenta el sensor satelital MODIS y el tipo de cobertura que detecta.

Tabla 8.

Característica de Cobertura de los Sub Productos MODLAND

Sub Producto	Característica de Cobertura
MOD09	Estudio de reflectancia de la superficie.
MOD10	Estudio de cobertura de nieve
MOD11	Estudio de la temperatura y emisividad de la superficie terrestre
MOD43	Estudio de albedo y función de la distribución de la reflectancia bidireccional
MOD13	Estudio de las variables biofísicas, vegetación o índice de vegetación.
MOD15	Estudio de índice de área foliar
MOD17	Estudio de la producción primaria
MOD12	Estudio de cobertura de suelo
MOD14	Estudios de puntos de calor e incendios
MOD44	Estudio de conservación de cobertura vegetal y fracción de vegetación.
MCD45	Estudio de áreas incendiadas

Nota: La presente tabla muestra la variedad de sub productos que genera ofrece el sensor MODIS y cada una de sus características.

1.3.15.2.1 MODIS 13

El producto MODIS 13 posee una temporalidad de toma de datos de 16 días y tiene como objetivo, determinar la cobertura terrestre a través de los sensores que se encuentran instalados. La combinación de dos bandas o secciones de frecuencia espectro radiométrica aplicado una ecuación matemática, genera el índice de vegetación de normalizado o NDVI por sus siglas en inglés (NASA, 2021).

En la **Tabla 9** se muestra algunos de los productos del sensor MODIS 13, donde se muestra el tiempo que demora el sensor por un mismo punto de la tierra, el factor que tiene que ser multiplicado el producto, las dimensiones de cada píxel de la imagen satelital y su extensión por cada imagen a su vez el tipo de sensor.

Tabla 9.

Producto MODIS 13

Clave	Resolución Temporal	Resolución Espacial	Sensor	Factor de Escala	Rango Valido	Extensión
MOD13Q1	16 días	250 m	Terra	0.0001	-2000 a 10000	Zona
MYD13Q1	16 días	250 m	Aqua	0.0001	- 2000 a 10000	Zona

Nota: En la siguiente tabla se muestra los dos sub productos principal del sensor MODIS. Con el tipo de resolución espacial y temporal. Al igual que la escala y el tipo de sensor enfocada para cada estudio específico.

En la **Ecuación 9** se explica las bandas o espectro radiométrico que se emplean para determinar los productos MOD13Q1 y MUD13Q1.

Ecuación 9. Índice de Vegetación Normalizado

$$NDVI = \frac{(Banda\ infraroja\ cercana - Banda\ roja)}{(Banda\ infraroja\ cercana + Banda\ roja)}$$

1.4. Formulación del Problema

La principal interrogante que se ha planteado para la investigación es:

¿Como el modelo hidrológico SWAT predice los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca del rio Yauca?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Predecir los impactos potenciales del cambio climático, empleado el modelo hidrológico SWAT en la cuenca del rio Yauca.

1.5.2. Objetivo Especifico

- Determinar las variables que son necesarias para el modelo SWAT y que ayuden a predecir, los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca del rio Yauca.
- Calibrar y aplicar el modelo SWAT para predecir los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca del rio Yauca.
- Describir las predicciones obtenidas por el modelo SWAT sobre el impacto potencial del cambio climático sobre la cuenca del rio Yauca.

1.5.3. Hipótesis general

El modelo hidrológico SWAT es el más idóneo para predecir los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca del rio Yauca.

1.5.4. Hipótesis específica

- La precipitación, temperatura, evapotranspiración son variables climatológicas que requiere el modelo SWAT y son indicadores del impacto del Cambio Climático que afecta a la cuenca del Rio Yauca.
- La calibración del modelo hidrológico SWAT permite predecir los impactos potenciales del cambio clima en la cuenca del rio Yauca.
- Las predicciones que genero el modelo SWAT muestran que la temperatura aumentaría para los próximos años, pero la precipitación y el flujo del agua disminuirían.

1.6. Justificación

El cambio climático ha generado diversas perturbaciones y es de gran importancia analizar y determinar cómo afecta a una cuenca, es por ello que se crean los modelos hidrológicos. Muchos estudios realizados por el SENAMHI se enfocan en la variación climática. Como también, los estudios que hace la Autoridad Nacional del Agua (ANA) se enfocan en la gestión de los recursos hídricos. Pero ninguna de las entidades nacionales antes mencionadas, han realizado un estudio que tiene como objetivo, determinar los cambios que podría ocasionar el cambio climático, con respecto a la alteración de las variables climáticas que impacten en el ciclo hidrológico que sucede en una cuenca.

La presente investigación surge debido a que no se cuenta con un modelo hidrológico que determine los efectos que genera el cambio climático sobre nuestra área de estudio, Así como, el estudio de las variables climatológicas que se ven influenciados por el efecto del cambio climático.

Es por ello que se plantea el modelo hidrológico SWAT que permitirá determinar las perturbaciones que genera el cambio climático, que a su vez influye en el ciclo hidrológico de la cuenca del río Yauca.

Los resultados obtenidos a medidas que el modelo hidrológico SWAT se ejecuta, sirven como información básica para generar un estudio de gestión hidrográfica de la cuenca.

Como también, las personas que realizan actividades agrícolas podrían conocer la oferta hídrica que es influenciados por el cambio climático. Como se mencionó previamente, el uso de modelos hidrológicos en el Perú no es muy frecuente y en la

actualidad no existen muchos estudios previos, sobre el tema que está siendo investigado y mucho menos sobre el área de estudio que se ha delimitado.

La ANA realizó un estudio donde analiza el caudal y emplea una serie de ecuaciones matemáticas y estadísticas para determinar la variación del caudal en un periodo de cincuenta años y no considera ninguna otra variable climatológica. Al terminar de realizar los cálculos, determinó que el caudal disminuiría en 30%. La misma entidad en otro estudio de viabilidad de un proyecto hidrológico, determinó que se tiene problemas sociales por el uso de agua en época de sequía.

Se decidió elegir toda la cuenca del río Yauca, debido a que solo se cuenta con la única estación hidrológica dentro de la cuenca y cuenta con un periodo corto de datos históricos que ayudarán a calibrar el modelo.

El modelo SWAT fue aplicado en la cuenca del río Piura y se obtuvo un buen rendimiento del modelo con un valor de coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.89 para el periodo de calibración y 0.76 para el periodo de validación, representando estadísticamente los impactos que genera el cambio climático sobre el ciclo hidrológico con ayuda de los RCP (Leon Ochoa, Portuguez Mautua, & Chávarri Velarde, 2019).

Como también, se menciona que el modelo SWAT tiene una gran capacidad de simulación (Oñate Valdivieso, Bosque Sendra, Sastre Merlin, & Ponce, 2016), y el SENAMHI apoyó a la elaboración de investigación donde se aplica el modelo SWAT para determinar los caudales (Asuzar Véliz & Lavado Casimiro, 2020). Es por ello que el modelo SWAT es un instrumento y modelo matemático que es el más adecuado para representar y predecir los cambios que genera el cambio climático.

CAPÍTULO II.

MÉTODOLÓGÍA

2.1. Enfoque y Tipo de Investigación

2.1.1. Enfoque de Investigación

La presente investigación tiene un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo) debido a que, busca identificar aquellas variables cuantitativas y analizarlas como variables a nivel teórico, como son la climatología, cobertura y tipo de suelo, que son afectadas por el cambio climático y posteriormente cuantificarlas. Como también, identificar aquellas variables que son necesarias para el modelo matemático y determinar la influencia del cambio climático en la cuenca.

Un diseño mixto permite que el investigador combine paradigmas con la finalidad de aproximarse al problema de investigación (Pereira Pérez, 2011).

Como también, Sánchez Flores (2019) indica que un enfoque cuantitativo se basa en la medición de un fenómeno a través de técnicas estadísticas, que posteriormente serán aplicados a los datos que han sido recolectados. También menciona que la finalidad de un enfoque cuantitativo es la explicación, descripción y predicción de sus ocurrencias de un fenómeno natural (Sánchez Flores, 2019).

Las variables climatológicas e hidrológicas son clasificadas como variables continuas, debido a que no pueden representarse mediante un número entero. Martínez Bencardino (2012) menciona que las variables continuas adquieren valores fraccionarios y pueden intercalarse.

En la **Figura 19** se muestra de manera mas resumida el enfoque de la presente investigación.

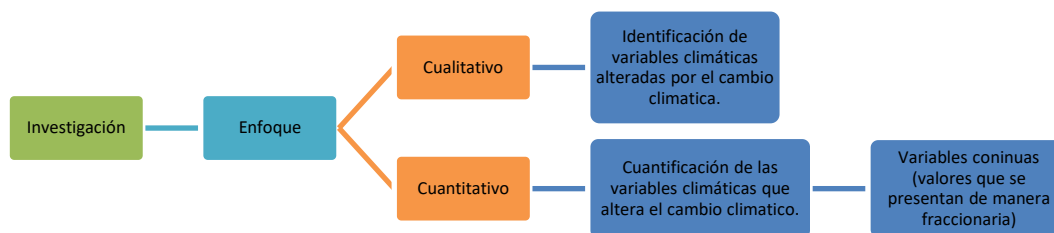


Figura 19. Enfoque de investigación

2.1.2. Tipo de Estudio

La investigación es de tipo experimental, pero se encuentra en la categoría de pre experimental, esto se debe a que se pretende manipular la temperatura, que es una variable climática que es afectada por el cambio climático.

Como también es experimental de series cronológicas múltiples, debido a que no se puede saber el efecto del cambio climático, delimitando un periodo de observación corto, ya que, se debe de recabar datos históricos y saber cómo ha ido fluctuando los cambios en las variables climáticas, que influyen en la cuenca del río Yauca. Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014) mencionan que un estudio de diseño experimental de series criológicas multiplex, el investigador posee bases para sospechar de la influencia de la variable independiente sobre la dependiente y los resultados toman tiempo en manifestarse.

El estudio tiene un diseño descriptivo, esto se debe a que, se busca identificar aquellas variables climáticas que son afectadas por el cambio climático, a través de la revisión sistemática y aplicar el modelo para determinar el impacto que tiene sobre la cuenca y describir el impacto que genera a lo largo del tiempo. Sabino (1992) nos explica que una investigación descriptiva utiliza criterios sistemáticos que facilitan el entendimiento de un fenómeno y describe las características que pueden ser comparadas con otros estudios.

Es por ello que lo podemos denominar como, un estudio prospectivo porque se busca recopilar información meteorológica, geomorfológica e hidrológica para generar futuros escenarios a través del modelo SWAT y ser evaluados los impactos que genera el cambio climático en la cuenca del río Yauca.

Como se menciona previamente, es claro que toda la metodología de investigación se enfoca en un modelo aplicado, con un enfoque longitudinal a largo plazo.

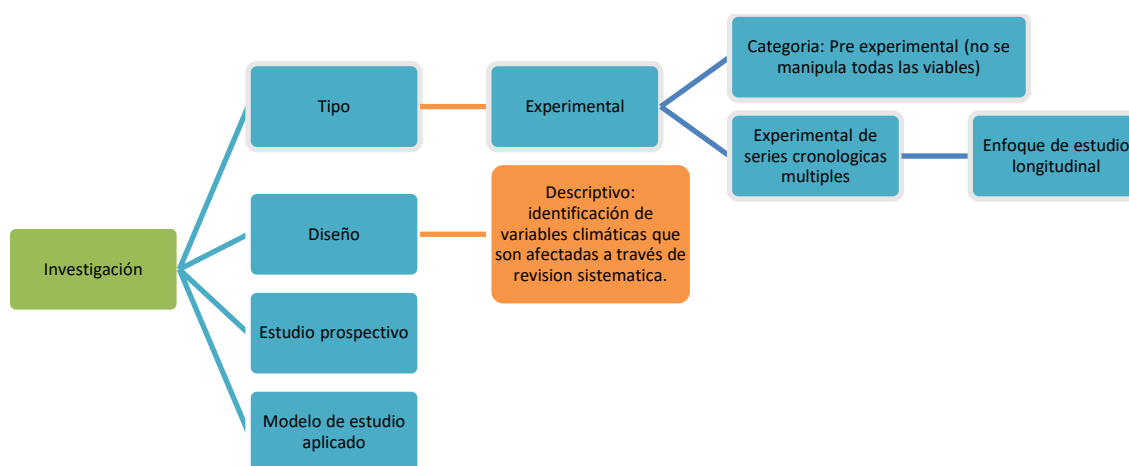


Figura 20. Tipo de Estudio de Investigación

2.2. Población y Muestra

El estudio plantea que, el área de la cuenca del río Yauca, es la zona donde se realizará la aplicación del modelo hidrológico SWAT. Donde se propone como objetivo general, predecir los cambios potenciales que generaría el cambio climático. Teniendo en consideración lo que se ha expuesto previamente, podemos designar a la cuenca Yauca como la población que será estudiada.

Como también, la cuenca Yauca cumple la función de muestra. Debido a que, sea extraído información, de las características climáticas, geomorfológicas e

hidrológicas, que podrían ayudar a predecir los impactos que genera el cambio climático, con ayuda del modelo SWAT.

2.3. Materiales, Software y Metodología

2.3.1. Materiales

- Laptop Windows 11 o 10
- Memoria Externa de un Tera

2.3.2. Softwares

Los softwares mencionados a continuación son los únicos empleados en toda la investigación.

- El principal programa que usaremos para la gestión de la información es ArcGIS 10.4 ya que nos permite manipular la información y tener resultados visuales. Como también la elaboración de la cartografía del área de estudio y la representación de los cambios generados por el cambio climático.
- El software de ArcSWAT es una extensión que se instaló en ArcGIS para generar la simulación de las interacciones climatológicas y determinar el impacto del cambio climático.
- El lenguaje de R es un programa estadístico que nos permite trabajar con grandes volúmenes de datos.
- El software Rstudio es el editor de código del lenguaje de programación R.
- Microsoft Excel para la generación de gráficos y modificatoria de alguna base de datos.

- SWAT-VIEW programa que nos permite leer la información generada por ArcSWAT antes y después de la calibración y determinar el grado de afectación del cambio climático sobre la cuenta del río Yauca.
- SWAT-CUP programa para realizar la calibración y la validación del modelo generado por SWAT.

2.3.3. Data

- Información de precipitación que es recabada de data Pisco, formato shapefile.
- Información de temperatura que es recabada de data Pisco, formato shapefile.
- Modelo de elevación digital (DEM) que es extraído del servidor Earth, Explorer, formato Ráster o TIN.
- Cobertura de suelo que es extraído del servidor Earth Explorer, gracias al sensor MODIS 13, formato de descarga tipo Ráster o TIN.
- Tipo de suelo a nivel mundial que fue extraído de la página de la FAO.
- Información del caudal de la estación hidrológica ubicada en la parte baja de la cuenca del río Yauca, que se encuentra en el SNIRH, el formato de descarga es en tipo PDF que posteriormente será convertido en formato tipo shapefile.
- Los MCG HadGEM2-ES, CSIRO-Mk3-6-0, MRI-CGCM3 y MIROC 5 que modelar el clima en función de los escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. La información tiene una escala mensual.

2.4. Metodología

La investigación tiene una metodología que se divide en tres partes, la primera se basa en la revisión bibliográfica, para determinar las variables hidrológicas, geomorfológicas y climatologías que se ven afectadas por el cambio climático y a su

vez definir los modelos climáticos (MGC) que plantean posibles escenarios (RCP) que podrían ayudar a predecir los impactos del cambio climático sobre la cuenca del río Yauca.

La segunda parte, se basa en la adición de los datos hidrológicos, geomorfológicos y climáticos sobre el modelo SWAT, para posteriormente calibrar y validar el modelo hidrológico, comparando el caudal simulado con respecto al caudal real y una vez calibrado el modelo SWAT se adiciona los valores de los escenarios RCP para determinar los efectos del cambio climático para el 2040 – 2050 y 2050 - 2100 (ANEXO N.º 11 al 18).

El periodo de estudio base es de 1981 hasta 2016, esto nos permite tener un modelo sea mucho más estable y exacto. Se propone este periodo de estudio de treinta y cinco años de estudio, debido a que DATA PISCO ofrece esta información de manera pública y además pasó por un proceso previo de calidad y validación.

Finalmente, El modelo calibrado que fue alimentado por los datos de los RCP genera una serie de datos de caudal proyectado para el año 2040 - 2050 y 2050 – 2100 que, posteriormente serán analizados para determinar el grado de incidencia del cambio climático sobre la cuenca del río Yauca.

Todo el proceso se muestra en la Figura 21 a nivel general y las etapas antes mencionadas, en la cual se divide la presente investigación.

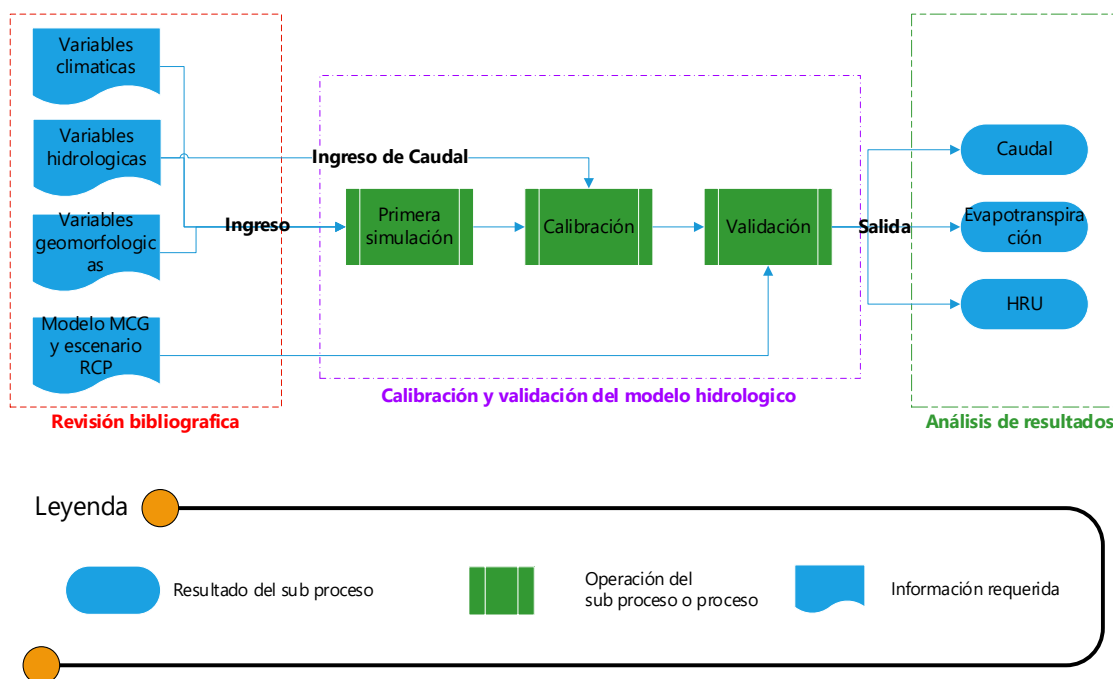


Figura 21. Metodología de investigación del modelo SWAT

2.4.1.1. Técnica e Instrumento de Recolección de Datos

La parte experimental de la presente investigación, usa una serie de instrumentos que se encargan de recolectar la información climática y geomorfológica. Estos instrumentos son los sensores satelitales, de entidades internacionales, como estación hidrológica del SENAMHI.

En la **Tabla 10** se muestra los que fueron recolectados de acuerdo al instrumento empleado, con su respectivo formato de descarga.

Tabla 10.

Datos Empleados Para el Modelo SWAT

Fuente	Dato	Formato
SNIRH	Caudal	.CSV
FAO	Tipo de suelo	.SHP
Earth Data	Elevación digital (DEM)	.TIF
Earth Data	Uso actual de suelo	.TIF

Earth Clima	Modelo circular geocéntrico (MCG)	.CSV
Earth Clima	Ruta de concentración representativa (RCP)	.CSV
Data Pisco	Temperatura máxima y mínima	.CSV
Data Pisco	Precipitación	.CSV

Nota: En la presente tabla se muestra los datos que han sido usados para la aplicación del modelo hidrológico SWAT, las fuentes de donde se ha extraído y el tipo de formato que maneja cada archivo.

El instrumento principal que será utilizado para predecir los impactos generados por el cambio climático sobre la cuenca del río Yauca, es el modelo hidrológico SWAT. Como también, la revisión sistemática es la técnica que fue empleada constantemente para definir los requisitos que necesita el modelo SWAT y los modelos climáticos que ayudan a predecir el impacto del cambio climático.

2.4.1.2. Procedimiento de Recolección de Datos

Para recolectar datos, primero se debe de saber qué variables climáticas son afectadas por el cambio climático. Esto se explica previamente en la parte metodológica y en la **Figura 21**.

Después de haber realizado la revisión sistemática, se procedió con la descarga de la información del geo servidores nacionales e internacionales para incorporarlo en el modelo SWAT. La información se describe con mayor detalle en la **Tabla 11**.

Tabla 11.

Origen, Fuente y Alcance de los Datos

Origen	Fuente	Datos	Alcance
Nacional	Data Pisco	Precipitación	Nacional
	SNIRH	Temperatura Max y Min	
	SENAMHI	Caudal de la cuenca	
Internacional	FAO	Curva Número Tipo de suelo	Internacional

Climate Explorer	MCG
	RCP
Earth Explorer	Modelo de elevación digital (DEM)
	Uso de suelo

Nota: En la presente tabla se muestra, el origen de la información que ha sido empleada en el modelo hidrológico, la fuente de donde se ha extraído y el dato específico que se ha introducido.

2.5. Procesos Análisis de Datos

Considerando el primer objetivo, que propone determinar las variables que son necesarias para el modelo SWAT y que ayuden a predecir, los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca del río Yauca. Se empleó la revisión sistemática para identificar aquellas variables que forman parte del modelo SWAT. Donde se obtuvo que, el clima, la hidrología y la geomorfología, son elementos que forman parte del modelo SWAT. Para luego clasificarlos (ver **Tabla 12**).

La geomorfología de la cuenca, se clasifica en, el tipo de suelo (ver ANEXO N.º 2 Mapa de Tipo de Suelo de la Cuenca Yauca, uso de suelo (ver ANEXO N.º 3 Uso de Suelo de la Cuenca Yauca. y la pendiente (ver ANEXO N.º 4 Pendiente de la Cuenca Yauca .

Con respecto a la variable Climática de la cuenca Yauca, posee dos características. La primera es la, precipitación (ver ANEXO N.º 9 Precipitación Promedio Mensual de la Cuenca Yauca) y la segunda es la, temperatura (ver ANEXO N.º 10 Temperatura Máxima y Mínima Mensual de la Cuenca Yauca) que, a su vez, podemos clasificarla como mínima y máxima. Esta información, ha sido extraída de la base de datos climática Data Pisco.

Finalmente, la variable hidrológica de la cuenca, podemos dividirla en el caudal generado y la curva número. La información que se menciona anteriormente fue recabada del SNIRH. Para adicionar toda la información geográfica que fue usada se encuentra en el sistema de referencia UTM 18 Sur.

Toda la información que se ha extraído de la cuenca, se introduce en el modelo hidrológico SWAT, con el fin del obtener un caudal simulado y algunos parámetros adimensionales, que ayuden a ajustar las simulaciones.

Tabla 12.

Variables del Modelo y sus Características

Variable	Característica
Geomorfológica	Pendiente
	Tipo de suelo
	Uso de suelo
Clima	Precipitación
	Temperatura máxima y mínima
Hidrológica	Curva número
	Caudal

Nota: En la presente tabla se muestra, las variables que han sido identificadas para la aplicación del modelo SWAT y las características de cada variable.

Con respecto al segundo objetivo que propone, la calibración y aplicación del modelo SWAT para predecir los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca del rio Yauca. Se realizo con ayuda del algoritmo SUFI-2 (ver **Ecuación 8**). Se propuso realizar cincuenta simulaciones con el algoritmo SUFI-2 con el objetivo de reajustar el modelo SWAT y se obtenga valores que se aproximen a la realidad. A su vez se introduce la información de la curva numero como parte del proceso de calibración.

También se ha hecho uso del coeficiente estadístico Nash-Sutcliffe (ver **Tabla 5**). Este coeficiente permitió comparar el caudal real (caudal que ha sido

monitoreado por una estación hidrológica) y el caudal simulado, que ha sido generado por el modelo hidrológico calibrado SWAT.

Este proceso de simulación con SUFI-2 y Nash-Sutcliffe fue realizado dos veces, con el propósito de tener un caudal simulado que se asemeje al caudal real, obteniendo un valor adimensional que se aproxima a uno. Este valor adimensional, se puede interpretar que, el modelo tiene un excelente rendimiento y los resultados que se obtengan son válidos ya que se asemejan al real.

El tercer objetivo propone que describir las predicciones obtenidas por el modelo SWAT sobre el impacto potencial del cambio climático sobre la cuenca del río Yauca. Para lograr dicho objetivo fue necesario hacer uso de los modelos geocéntricos de concentración, estos también pueden ser llamados como modelos climáticos (ver **Tabla 4**).

Estos modelos climáticos, proponen cuatro escenarios, que fueron propuestos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Estos escenarios son, las Rutas de Concentración Representativas (RCP) que se dividen en cuatro tipos (ver **Tabla 3**) y poseen información histórica del año 1850 al 2100 de la temperatura, precipitación, humedad, velocidad de viento.

Para la presente investigación se ha hecho uso de la información de temperatura, precipitación. Debido a que son características de las variables que requiere el modelo hidrológico SWAT, como se mencionó previamente.

El primero RCP 2.6 y el cuarto RCP 8.5 proponen cambios que podrían suceder por el efecto del cambio climático para el año 2100. En comparación, los RCP 4.5 y 6.0 predicen cambios para el año 2050.

Con el modelo SWAT validado se emplean los datos de los RCP para obtener un caudal simulado hasta el año 2050 y 2100. Esto permite determinar el impacto que genera el cambio climático sobre la cuenca Yauca.

Los resultados obtenidos se expresan a través de gráficos estadísticos. Para determinar la tendencia anual del caudal se emplea una gráfica de tendencia. Este gráfico permite determinar, si el caudal tiene una pendiente positiva, que se traduce en un aumento o una pendiente negativa, que se interpreta como una escases o sequía.

Para determinar la variación mensual de la temperatura y precipitación se hace uso de una gráfica de líneas. La grafica nos brinda una visualización cuales son los meses que se tiene una mayor precipitación y temperatura.

Todo el proceso de análisis de los datos ha sido explicado de manera más didáctica, en el apartado de procesamiento y a su vez se describe de manera grafica en la Figura 22.

2.5.1. Procedimientos

La **Figura 22** muestra los procedimientos que se han realizado para poder predecir los impactos del Cambio Climático sobre la cuenca del rio Yauca. Este proceso resuelve el primer objetivo planteado e inicio con la determinación de las variables que requiere el modelo SWAT para predecir los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca Yauca. Para poder ingresar esta información al modelo SWAT y generar un caudal simulado, con el fin que los valores obtenidos se asemejen al real.

Seguidamente se prosiguió al proceso de calibración con ayuda del algoritmo SUFI-2 y validación de la información generada por el modelo SWAT se realizó con el coeficiente estadístico de Nash-Sutcliffe para tener como resultado

un valor adimensional que indique que el modelo SWAT posee un excelente rendimiento.

Finalmente se realizó las simulaciones con ayuda de los modelos climáticos (MCG) que plantean las Rutas De Concentración Representativas (RCP) y obtener una predicción sobre los impactos del Cambio Climático sobre la cuenca Yauca.

Todos estos procedimientos se explican a mayor detalle en los siguientes apartados.

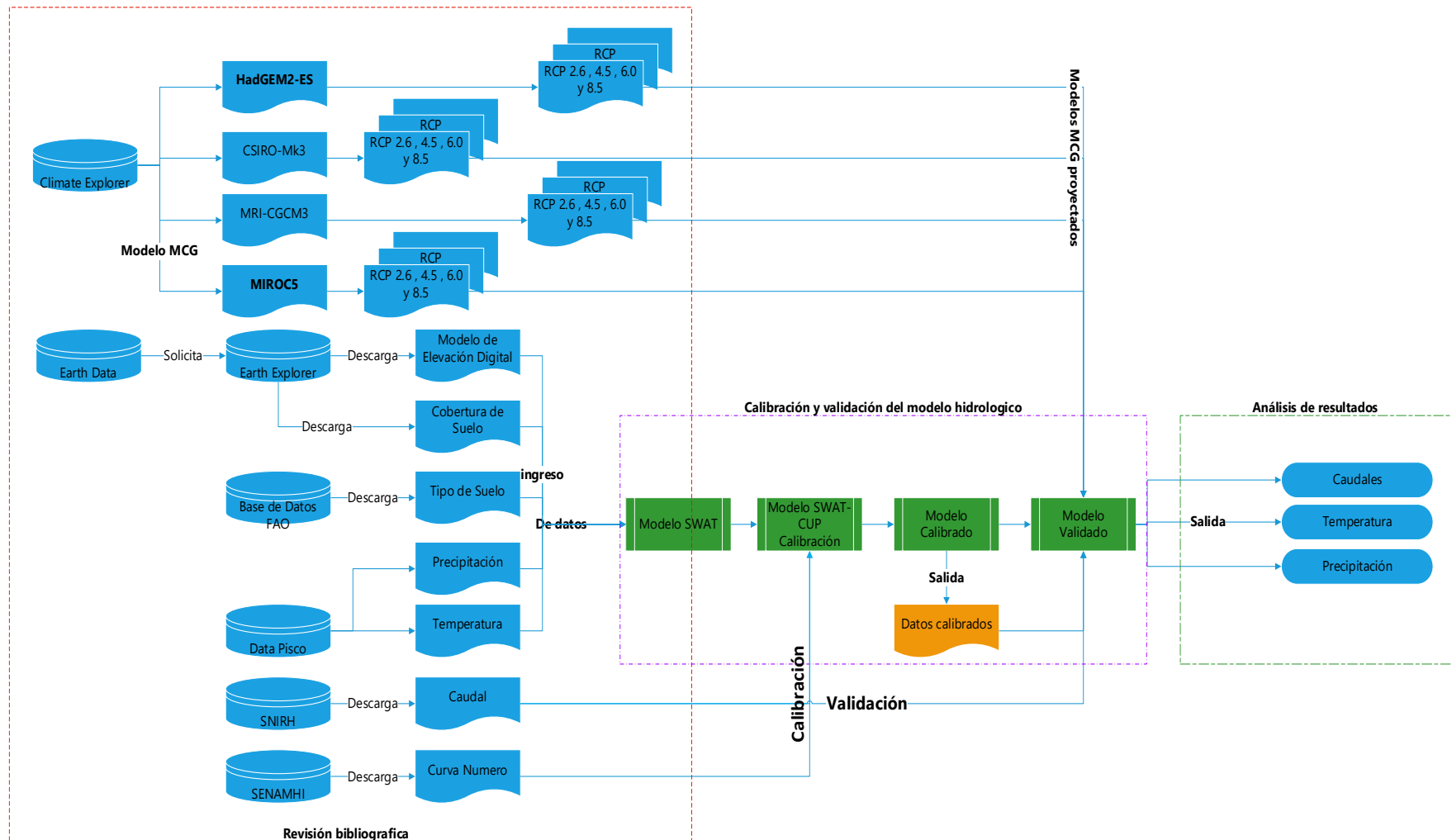


Figura 22. Proceso de Elaboración de Investigación

2.5.1.1. Descripción de Área de Estudio

En **Tabla 13** se puede observar las coordenadas geográficas y universales de la cuenca del río Yauca y en la Tabla 14 la distribución política, al igual que en el ANEXO N.º 1 se presenta un mapa político de la cuenca Yauca.

Para adicionar, se ha empleado como sistema de coordenadas UTM 1984 con un sistema de referencia 18 Sur.

Tabla 13.

Ubicación Geográfica de la Cuenca del Rio Yauca

Sistema de Coordenada	Componentes	Valor Mínimo	Valor Máximo
Coordenadas Geográficas	Long. Oeste	74°33'52"	73°40'33"
	Lat. Sur	15°42'36"	14°41'20"
Coordenadas UTM (Zona 18 s)	Metros Este	546.665	642.595
	Metros Norte	8°263,132	8°376,058
Altitud (Nivel medio del mar)	m.s.n.m	0	5 185

Nota: La table muestra las coordenadas geográficas y universales de la cuenca del río Yauca. Como también la altitud máxima y mínima. La información fue extraída del estudio de balance hídrico superficial de la cuenca del río Yauca realizado por la ANA en el año 2003.

Tabla 14.

Ubicación Política de la Cuenca Yauca

Cuenca	Departamento	Área (Km ²)	Porcentaje (%)	Provincia	Distrito
Yauca	Arequipa	327	8%	Caraveli	Jaqui
					Yauca
	Ayacucho	3757	92%	Lucanas	Chaviña
					San Pedro
					Sancos
					Coracora
				Parinacochas	Chumpi Pullo

2.5.1.2. Determinación de Variables Requeridas por el Modelo SWAT

Como se mencionó previamente, la variable geomorfológica se clasifica en tres. La primera es la pendiente, que pasa por un proceso de reclasificación para determinar el grado de inclinación y permita determinar la dirección del flujo del agua. La segunda clase es, el tipo de suelo que ayuda a determinar el porcentaje de infiltración, escorrentía superficial y evapotranspiración del suelo y finalmente la clase de uso de suelo, que define el tipo de cobertura presenta la superficie y tiene una correlación directa con el grado de infiltración, escorrentía y evaporación.

2.5.1.2.1 Variable Geomorfología

2.5.1.2.1.1 Pendiente

La pendiente determina el porcentaje de inclinación de la superficie, con respecto al plano horizontal y darle una clasificación. Como se muestra en la **Tabla 15** que fue extraído de la guía para la descripción de suelo, elaborado por la FAO en el año 2009.

Tabla 15.

Clases de Gradiente de la Pendiente

Clase	Descripción	%
01	Plano	0 – 0.2
02	Nivel	0.2 – 0.5
03	Cercano al nivel	0.5 – 1.0
04	Muy ligeramente inclinado	1.0 – 2.0
05	Ligeramente inclinado	2 – 5
06	Inclinado	5 – 10
07	Fuertemente inclinado	10 – 15
08	Moderadamente escarpado	15 – 30
09	Escarpado	30 – 60
10	Muy escarpado	60 <

Nota: La presente tabla muestra, el porcentaje de la pendiente y estas como se clasifican de acuerdo a una descripción. Esto nos permite determinar la dirección del flujo del agua cuando ocurre el proceso de escorrentía.

La **Figura 23** muestra el proceso que se llevó a cabo para clasificar la pendiente que hace uso del modelo de elevación digital que se re proyecta de un sistema de coordenadas geográficas a UTM. Para ser delimitado en función de nuestra área de estudio y determinar la pendiente a través de la **Ecuación 1** y clasificarla.

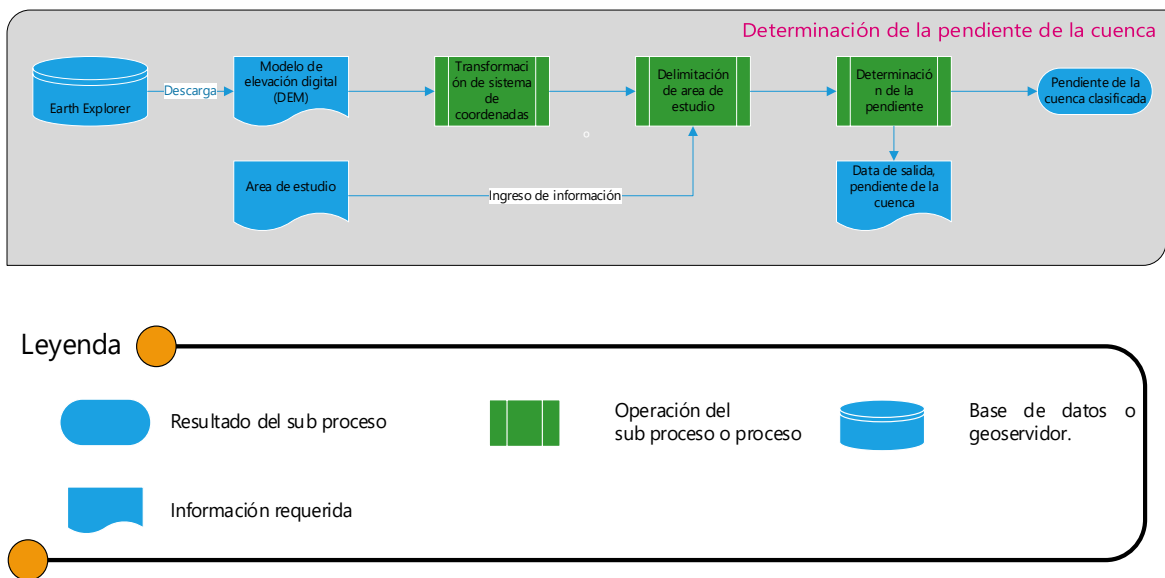


Figura 23. Procesamiento de Información Para Determinar la Pendiente

La clasificación que se empleó para determinar la pendiente, se muestra en la Tabla 16 que tomó como referencia de la FAO (Tabla 15).

Tabla 16.

Reclasificación de la Pendiente de la Cuenca Yauca

Clase	Clasificación	Rango de Pendiente %
1	Pendiente Ligera inclinada	0 - 8
2	Pendiente Moderada inclinada	8 - 20
3	Pendiente fuertemente inclinada	20 - 45
4	Pendiente severamente inclinado	45 - 60
5	Pendiente muy severamente inclinado	60<

Nota: La presente tabla muestra clasificación de la pendiente de acuerdo al porcentaje de inclinación de la superficie de la cuenca Yauca.

Una vez realizado la clasificación de la pendiente según la Tabla 16 se obtiene los porcentajes y el área que abarca. Esto se ha mostrado en la Tabla 17 y en la Figura 24. Al igual se puede observar en el ANEXO N.º 4.

Tabla 17.

Área de la Pendiente de la Cuenca Yauca

Clasificación	Rango de Pendiente %	Área (ha)	Porcentaje del Área
Pendiente Ligera inclinada	0-8	37741.0	9.24%
Pendiente Moderada inclinada	8-20	151338.3	37.05%
Pendiente fuertemente inclinada	20-45	45425.7	11.12%
Pendiente severamente inclinado	45 - 60	106740.1	26.13%
Pendiente muy severamente inclinado	60<	67210.7	16.45%

Nota: La presente tabla muestra los porcentajes de las áreas y el área en hectáreas, de acuerdo al grado de inclinación de la pendiente de la cuenca del río Yauca.

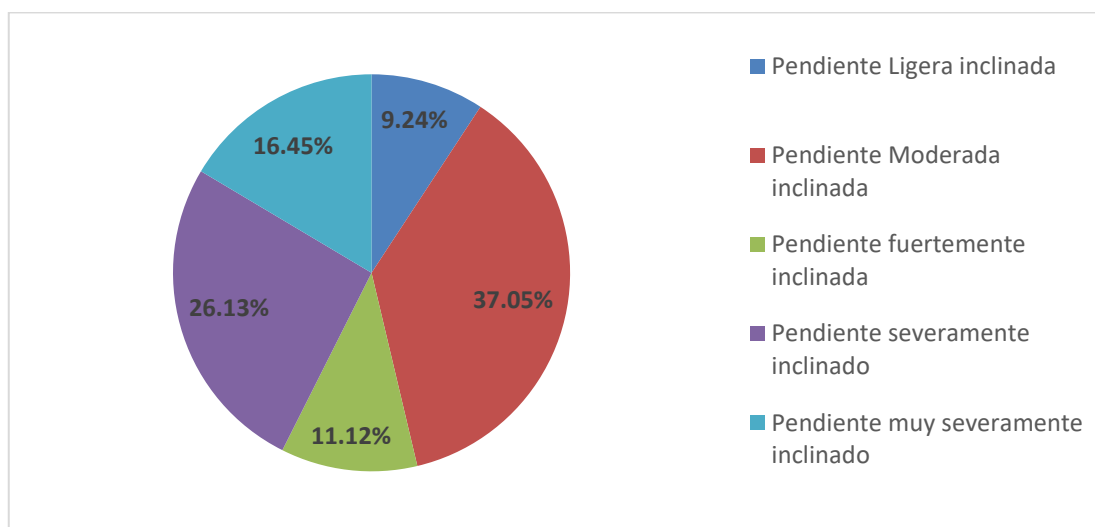


Figura 24. Porcentaje de la Pendiente de la Cuenca Yauca.

2.5.1.2.1.2 Tipo de Suelo

La información que se descargó del geo servidor de la FAO clasifico al suelo de acuerdo a su composición (ver Tabla 18).

Pero se tomó como referencia dicha información y se reclasifico de acuerdo a la clasificación que maneja el modelo SWAT (ver Tabla 19).

Tabla 18.

Clasificación General de Tipo de Suelo Según FAO

Tipo de suelo	Suelo de la FAO	Descripción		Composición (%)		
		Español	Ingles	Arena	Limo	Arcilla
Tv	Tv6-b	Andosoles vítricos	Vitric Androsols	64.5	26.2	9.3
Re	Re5-1a	Regosoles éutricos	Eutric Regosols	68.3	15.1	16.6
Je	Je7-3a	Fluvisoles éutricos	Eutric Flovisols	70.8	12.8	16.5
I	I-Bh-Tv-c					
	I-Tv-c	Litosoles	Lithosols	58.9	16.2	24.9
	I-Re-c					

Nota: La presente tabla muestra, la clasificación del suelo que le asigna la FAO y su reclasificación que fue necesario para que pueda ingresar al modelo SWAT. Como también se menciona los porcentajes de Arena, Limo y Arcilla de acuerdo al tipo de suelo.

Tabla 19.

Equivalencia de Tipo de Suelo Para SWAT

Tipo de suelo FAO	Equivalencia SWAT
Tv6-b	5683
Re5-1a	5658
Je7-3a	5561
I-Bh-Tv-c	5518
I-Tv-c	5542
I-Re-c	1874

Nota: La tabla muestra la equivalencia que usa el modelo SWAT de acuerdo al tipo de suelo y esta pueda ser ingresada como una variable, dentro de la ecuación.

La **Figura 25** muestra el proceso que se siguió para determinar el tipo de suelo de la cuenca y el ANEXO N.º 2 muestra la distribución geográfica. El proceso inicio con la delimitación geográfica de la cuenca Yauca, esto se debe a que la información base, se extiende a nivel mundial y obtener como resultado los porcentajes del tipo de suelo (ver **Tabla 20**).

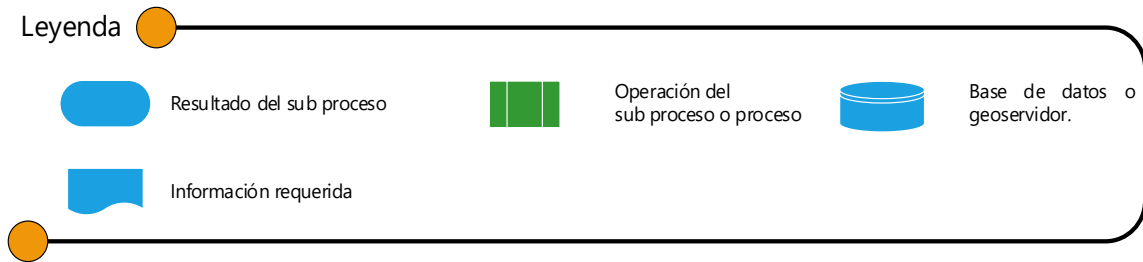
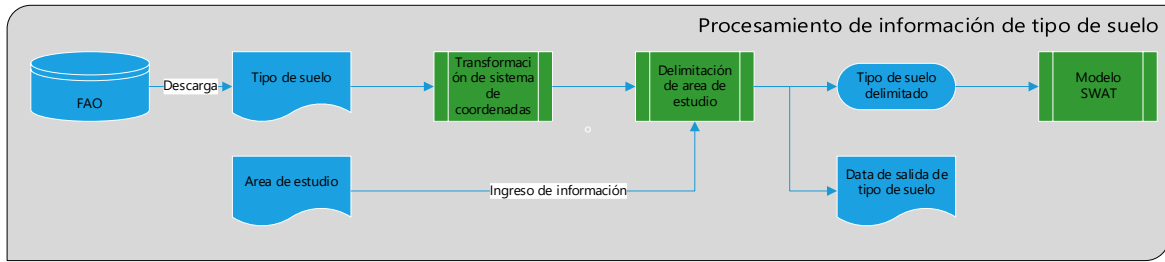


Figura 25. Procesamiento de Información de Tipo de Suelo

Tabla 20.

Tipo de Suelo de la Cuenca Yauca

Tipo General de Suelo	Descripción	Tipo de Suelo FAO	Código SWAT	Área (ha)	Porcentaje %	Porcentaje Total
I	Litosoles	I-Bh-Tv-c	5518	36622.3238	8.97	97.7
		I-Tv-c	5542	362423.558	88.73	
Je	Fluvisoles éutricos	Je7-3a	5561	9409.8487	2.3	2.3

Nota: La tabla muestra los porcentajes del tipo de suelo que posee la cuenca del río Yauca y el área en hectáreas como la descripción del suelo. El suelo que abunda es el Litosol con un 97.7% y solo el 2.3% corresponde a los Fluvisoles éutricos.

2.5.1.2.1.3 Uso de Suelo

Para obtener el uso actual de suelo, se hizo uso de la imagen satelital del sensor MODIS13V. Los valores de los píxeles han sido corregidos previamente con la Ecuación 10. Como también se aplicó la ecuación matemática que se titula Determinación de Vegetación Normalizada o conocido como NDVI (**Ecuación 9**) y determinar el uso de suelo.

Ecuación 10. Factor de Corrección MODIS V13.

$$NDVI = (IMAGEN MODIS 13) * 0.0001$$

En la Tabla 21 se muestra la clasificación de uso de suelo de acuerdo al estudio que realizó Alencar Dasilva Alves y otros investigadores (2019), como también López Pérez y otros (2015) también obtuvieron valores similares aplicando la Ecuación 9 de NDVI (Índice Normalizado de Vegetación)

Tabla 21.

Valores MODIS V13 y Equivalencia SWAT

Valor	MODIS V13		Equivalencia SWAT	Descripción
	Mínimo	Máximo		
1	-1	0.05	WATR	Agua
2	0.05	0.2	SWRN	Cordillera
3	0.2	0.4	RNGB	Cepillo de rango
4	0.4	0.6	PAST	Pastizal
5	0.6	0.7	FRST	Bosque mixto
6	0.7	1	WETL	Humedales boscosos

Nota: La tabla muestra los valores mínimos y máximos que fueron obtenidos de la imagen satelital MODISV13 y estas poseen una equivalencia y descripción. De acuerdo al tipo de cobertura de suelo que se encuentra en la cuenca Yauca.

La Figura 26 muestra los procesos que se llevaron a cabo para determinar el uso de suelo de la cuenca Yauca. Se descargo del geo servidor Earth Explorer que solicita a su vez la información a Earth Data. Esto se realizó para obtener la imagen del sensor MODIS 13 y aplicar la fórmula matemática NDVI que permite clasificar el uso del suelo. Los valores se encuentran en el rango menos uno hasta más uno (ver Tabla 21).

El resultado de todos estos procesos se obtuvo, el porcentaje y el área n kilómetros cuadrados, que corresponde de acuerdo al uso del suelo de la cuenca

(ver Tabla 22) con su respectiva clasificación de acuerdo al modelo SWAT y la distribución geográfica se muestra en el ANEXO N.º 3 .

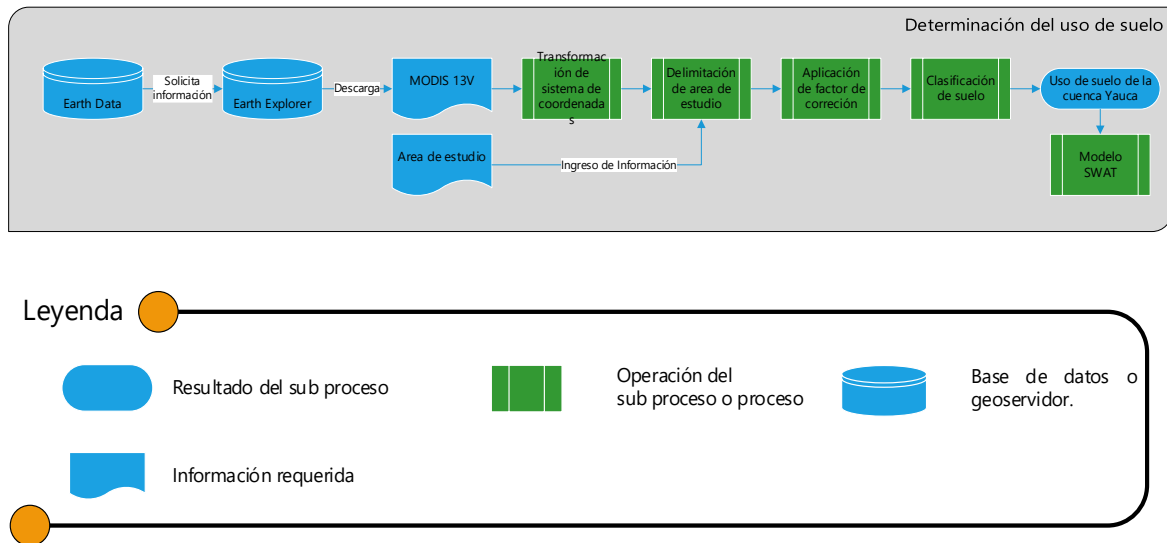


Figura 26. Procesamiento de Información de Uso de Suelo

Tabla 22.

Características de Uso de Suelo de la Cuenca Yauca

Código	Código SWAT	Descripción	AREA km ²	Porcentaje
1	WATR	Agua	358.9	9%
2	SWRN	Cordillera	1304.5	32%
3	RNGB	Cepillo de rango	1517.2	37%
4	PAST	Pastizal	595.8	15%
5	FRST	Bosque mixto	222.1	5%
6	WETL	Humedales boscosos	84.4	2%

Nota: La presente tabla muestra las áreas en kilómetros cuadrados de acuerdo al uso del suelo de la cuenca Yauca, el porcentaje que corresponde y la el código que asigna el modelo hidrológico SWAT para identificarlo.

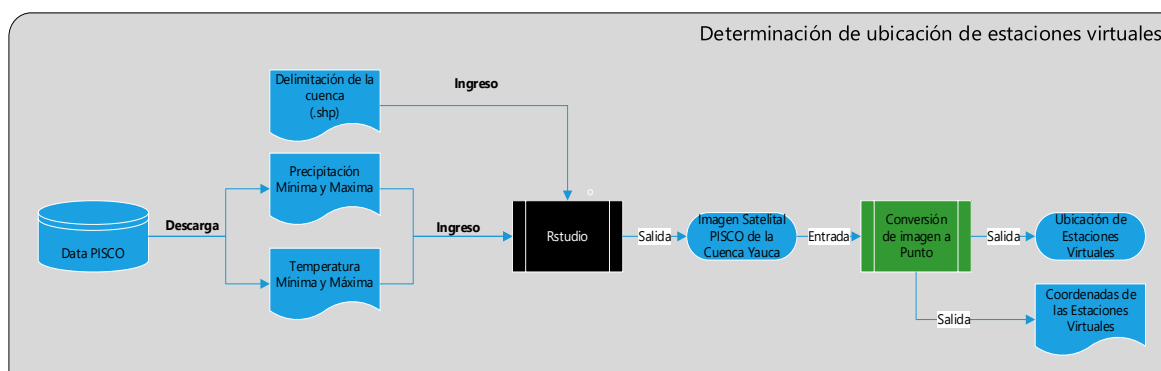
2.5.1.2.1.4 Variable Climática

La determinación de la precipitación y la temperatura se ha hecho uso de la base de datos del SENAMHI a través del servidor DATA PISCO que posee información histórica de 1981 al 2016.

La Figura 27 represento el proceso que inicio con la descarga de información a nivel nacional de la precipitación, temperatura mínima y máxima y se introdujo en Rstudio para ser delimitar geográficamente la información. Del proceso se obtuvo una imagen satelital de la cuenca con una resolución de 0.1 grados o 1 km, con el formato TIFF. Para luego convertir cada píxel de la imagen en un punto y determinar su latitud y su longitud (ver Tabla 23). El ANEXO N.º 6 muestra la ubicación geográfica dentro de la cuenca, de forma más visual.

La información de precipitación, temperatura mínima y máxima que se mencionó previamente, se extrajo de Data Pisco que tiene una data histórica a nivel diario y mensual de 1981 a 2016, Se ha hecho uso de información diaria debido a una homogenización de datos con respecto a los datos hidrológicos, esto se explicó en el siguiente apartado. Los ANEXO N.º 9 y ANEXO N.º 10 muestran la precipitación y temperatura mensual de la cuenca Yauca, desde el año de 1981 al 2016.

Esta información será usada para realizar las primeras simulaciones como se mencionó previamente.



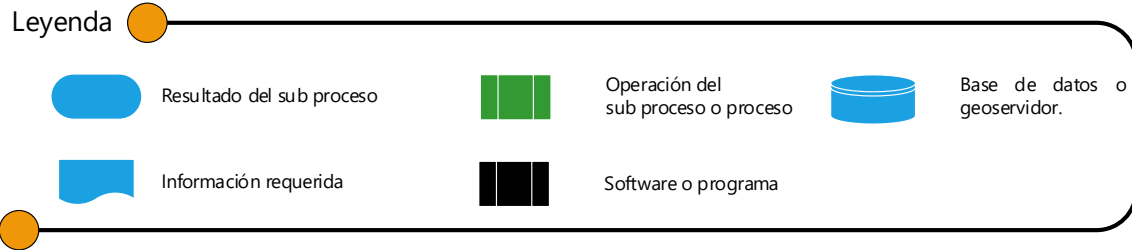


Figura 27. Proceso de Para la Determinación de las Estaciones Virtuales Climatológicas

Tabla 23.

Ubicación de Estaciones Virtuales de la Cuenca Yauca

Nombre	Sistema de Coordenadas Geográficas		Sistema de Coordenadas UTM 18 S		Altura m.s.n.m
	Latitud	Longitud	X	Y	
Estación 1	-73.8396	-14.7497	624901	8369040	4260
Estación 2	-74.0438	-14.8461	602880	8358480	4068
Estación 3	-73.8402	-14.8451	624782	8358480	4014
Estación 4	-74.1451	-14.9455	591929	8347530	3599
Estación 5	-74.0433	-14.9451	602880	8347530	3804
Estación 6	-73.9415	-14.9446	613831	8347530	4070
Estación 7	-73.8397	-14.9441	624782	8347530	3393
Estación 8	-73.7379	-14.9436	635732	8347530	3916
Estación 9	-74.1448	-15.0445	591929	8336580	3295
Estación 10	-74.0429	-15.0441	602880	8336580	3209
Estación 11	-73.941	-15.0436	613831	8336580	3435
Estación 12	-73.8392	-15.0431	624782	8336580	3352
Estación 13	-73.7373	-15.0426	635732	8336580	3443
Estación 14	-74.2463	-15.1438	580978	8325630	2534
Estación 15	-74.1444	-15.1435	591929	8325630	2301
Estación 16	-74.0424	-15.1431	602880	8325630	2887
Estación 17	-73.9405	-15.1426	613831	8325630	1843
Estación 18	-73.8386	-15.1421	624782	8325630	2439
Estación 19	-73.7367	-15.1416	635732	8325630	3478
Estación 20	-74.3479	-15.2431	570028	8314680	2010
Estación 21	-74.2459	-15.2428	580978	8314680	872
Estación 22	-74.144	-15.2425	591929	8314680	1645
Estación 23	-74.042	-15.2421	602880	8314680	2515
Estación 24	-73.94	-15.2416	613831	8314680	3762
Estación 25	-73.8381	-15.2411	624782	8314680	3451
Estación 26	-74.4496	-15.3424	559077	8303720	1932

Estación 27	-74.3476	-15.3421	570028	8303720	702
Estación 28	-74.2456	-15.3418	580978	8303720	2576
Estación 29	-74.1436	-15.3415	591929	8303720	2339
Estación 30	-74.0415	-15.341	602880	8303720	2978
Estación 31	-73.9395	-15.3406	613831	8303720	3739
Estación 32	-74.4493	-15.4414	559077	8292770	1469
Estación 33	-74.3473	-15.4411	570028	8292770	1623
Estación 34	-74.2452	-15.4408	580978	8292770	2335
Estación 35	-74.1432	-15.4405	591929	8292770	2881

Nota: La presente tabla muestra las estaciones climáticas que fueron simuladas en toda la extensión de la cuenca Yauca, con sus respectivas coordenadas en el sistema de coordenadas UTM 1984 – 18S y la altitud de cada estación.

2.5.1.2.2 Variables Hidrológicas

Las características de las variables hidrológicas de la cuenca se clasificaron de acuerdo a la curva número y la unidad de respuesta hidrológica esto será explicado en el siguiente apartado. Adicional a ello se realizó la determinación de las sub cuencas que conforman el río Yauca.

2.5.1.2.2.1 Unidad de Respuesta Hidrológica de la Cuenca

La **Figura 28** muestra cómo se determinó las unidades de respuesta hidrológica (HRU) donde se realiza una interpolación a partir de la pendiente, tipo de suelo y uso de suelo de la cuenca Yauca. El terminar el proceso se obtuvo 460 unidades de respuesta hidrológica

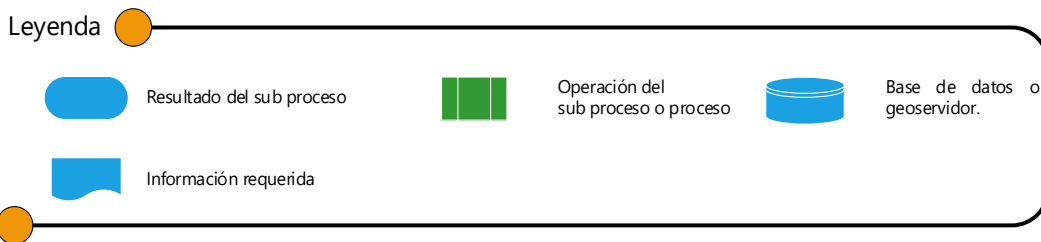
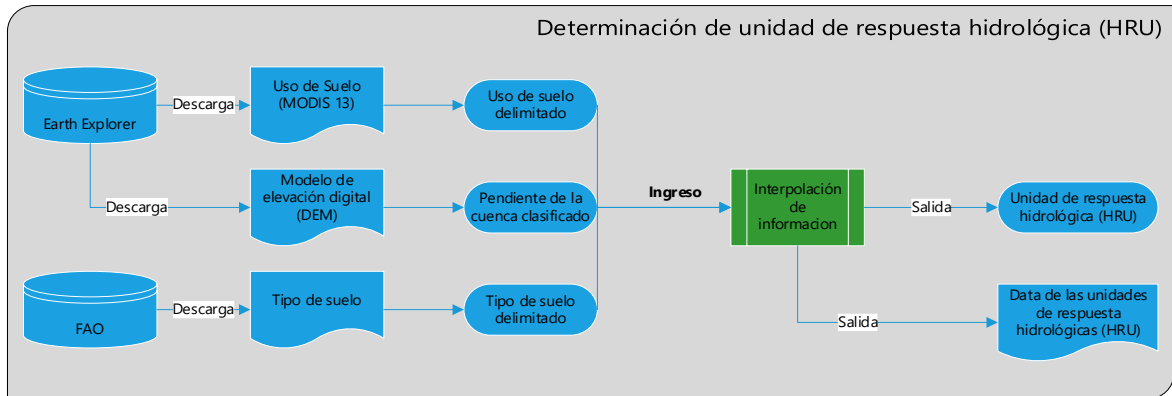
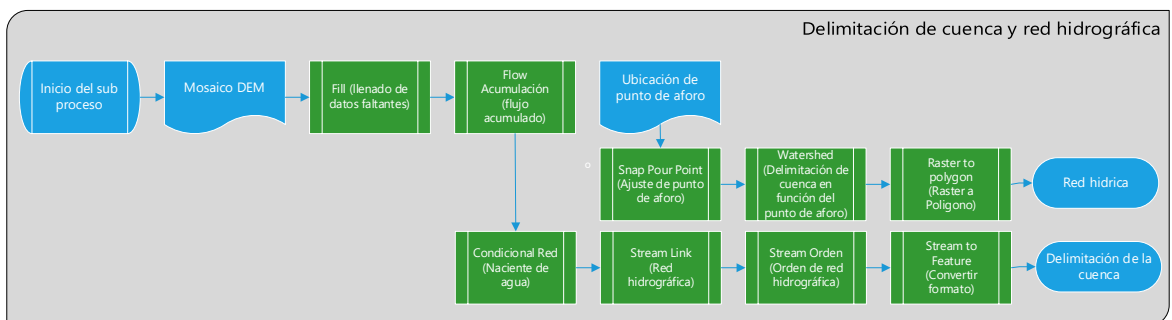


Figura 28. Procedimiento Para Delimitación de la Hidrología de la Cuenca Yauca

2.5.1.2.2.2 Sub Cuencas del Rio Yauca

La Figura 28 expone los procesos que se han realizado para delimitación de las sub cuencas del rio Yauca y el ANEXO N.º 5 manifestó la existencia de 15 sub cuencas que conforman la cuenca del rio Yauca y en la **Tabla 24** se expone los porcentajes, elevación mínima, máxima y la pendiente cada una de las sub cuencas.



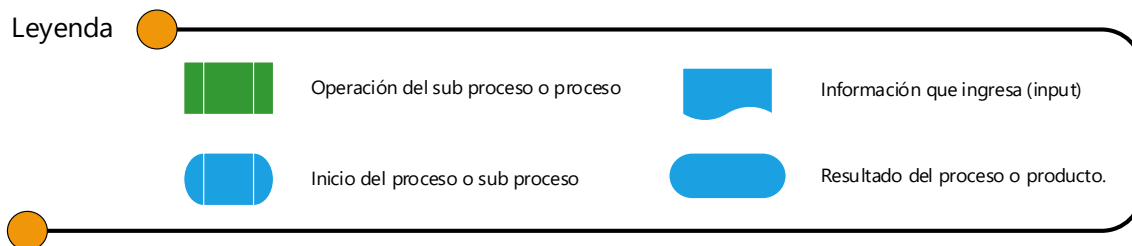


Figura 29. Procedimiento Para Delimitación de la Hidrología de la Cuenca Yauca

Tabla 24.

Características de la Sub Cuencas

Sub Cuenca	Área		Pendiente (%)	Latitud UTM 18S	Longitud UTM 18S	Elevación		
	Km2	%				Media	Mínima	Máxima
1	42594.8	10%	24.8	-14.860	-73.837	4062.4	2707	5157
2	15138.8	4%	25.6	-14.956	-73.739	3963.1	2708	4793
3	25328.0	6%	22.8	-14.935	-74.012	3755.7	3051	4313
4	12063.6	3%	21.4	-15.017	-73.997	3499.5	3051	4217
5	8592.1	2%	31.9	-15.027	-73.831	3259.9	2160	4245
6	18395.6	5%	26.4	-15.105	-73.735	3487.8	2154	4559
7	10164.3	2%	40.4	-15.103	-73.831	2886.1	1876	4162
8	22515.7	6%	22.5	-15.257	-73.840	3490.2	1878	4238
9	18229.1	4%	43.1	-15.138	-74.155	2552.5	896	3492
10	76141.9	19%	46.5	-15.178	-74.013	2558.6	896	4210
11	48878.6	12%	25.1	-15.118	-74.238	2748.3	507	4002
12	15796.5	4%	51.5	-15.296	-74.270	1757.7	508	2849
13	15749.7	4%	46.3	-15.377	-74.400	1431.0	301	2322
14	75341.5	18%	35.0	-15.389	-74.165	2555.7	305	4245
15	3525.5	1%	38.1	-15.466	-74.449	765.9	221	1815

Nota: La presente tabla muestra el área de cada sub cuenca y el área porcentual, conjuntamente con su elevación y sus coordenadas en el sistema de referencia geográfica UTM 1984 – 18S.

2.5.1.2.2.3 Curva Número de la Cuenca Yauca

La determinación de curva número de la cuenca Yauca, se extrae de la investigación de realizar por la Autoridad Nacional del Agua, titulada *Generación del Mapa Temático de Curva Número* que usa los recursos

cartográficos de la FAO y la UNESCO para determinar la capacidad de escorrentía que presenta el territorio peruano (2015).

El ANEXO N.º 8 señala la distribución de las CN de la cuenca, cuando se presenta un evento lluvioso. La determinación de curva número, tomo en consideración el tipo de suelo, cobertura y uso de suelo y modelo de elevación digital.

La **Figura 30** muestra los valores de la Curva Número (CN) de cada sub cuenca. Mientras que el valor de la curva número sea mayor, tiene un mayor potencial de generar escorrentía en un evento lluvioso.

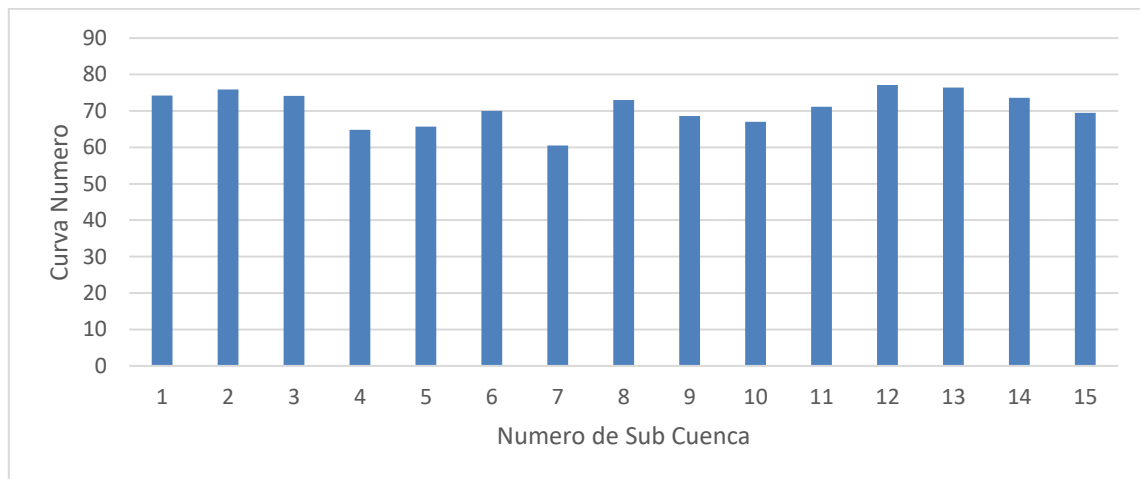


Figura 30. Curva Número de la Cuenca Yauca

2.5.1.2.2.4 Estación Hidrológica

La determinación de las estaciones hidrológicas, se realizó gracias a la ayuda del geo servidor SNIRH. La estación hidrológica se ubicó en la parte baja o vertiente de la cuenca, como se puede visualizar en el ANEXO N.º 7.

Este estación se encuentra en la vertiente o parte baja de la cuenca y sus coordenadas se encuentran en la **Tabla 25** .

La información que se extrae será usada para el proceso de calibración y validación del modelo SWAT, con el fin de predecir los impactos que genera el cambio climático sobre la cuenca Yauca.

Tabla 25.

Coordenadas de la Estación Hidrológica Yauca

Sistema de Coordenadas UTM 18 S		Altura m.s.n.m	Nombre
X	Y		
558124.904	8287287.94	223	Estación Hidrológica Yauca

Nota: La presente tabla muestra el nombre de la estación hidrológicas y las coordenadas, considerando el sistema de coordenadas UTM 1984 – 18S y su altitud.

2.5.1.3. Proceso de Calibración y Validación del Modelo SWAT

2.5.1.3.1 Calibración del Modelo SWAT

Este proceso está conformado por dos etapas. La primera etapa corresponde a la calibración, que inicio con la inserción de la curva número (CN) que se muestra en la

Tabla 26, y se realizó una simulación base con toda la información que se mencionó previamente. El resultado se ingresó al programa SWAT-CUP, donde se encuentra el algoritmo SUFI-2 que es el encargado de realizar las cincuenta simulaciones que se ha mencionado previamente. Con el objetivo de determinar algunos parámetros de calibración (ver

Tabla 27) para posteriormente ajustarlos y obtener un resultado que se aproxime al caudal real.

Para esta etapa de la investigación se ha tomado como base histórica de información desde el año 1981 al 2016 debido a que, es toda la información de calidad que posee Data Pisco.

Tabla 26.

Curva Número Calibrado

Sub Cuencas	CN Modelo SWAT	CN ANA	CN Calibrada
1		74.18	64.39
2	73	75.89	65.87
3	79	74.17	64.38
4		64.81	56.25
5		65.68	57.01
6		69.98	60.74
7	73	60.52	52.53
8		73.00	63.36
9		68.64	59.58
10		67.06	58.21
11		71.15	61.76
12	79	77.15	66.96
13	74	76.40	66.32
14	73	73.62	63.91
15	74	69.44	60.27

Nota: La presente tabla muestra, los valores calibrados de la curva número, que es brindado la Autoridad Nacional del Agua.

El algoritmo SUFI-2 es el más adecuado para realizar los procesos de calibración, ya que se adapta satisfactoriamente al caudal observado, como lo menciono Jodar Abellan y otros investigadores (2018) en su investigación *Evaluación del impacto del cambio sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT*.

Estos parámetros que se mencionó en la

Tabla 27 son generados de manera automática por el programa SWAT-CUP y permitió obtener un mejor ajuste del caudal simulado con respecto al caudal real.

Tabla 27

Parámetros de Calibración de SWAT CUP

Orden	Parámetro de Calibración	Descripción	Valor Mínimo	Valor Máximo
1	CN-2	Número de curva de escorrentía para condiciones de humedad.	-0.2	0.2
2	ALPHA_BF	Factor de recesión de flujo de base	0	1
3	GW_DELAY	Es el tiempo de demora para la recarga del acuífero.	30	450
4	GWQMN	Limite en el nivel del agua al acuífero poco profundo para lujo base.	0	2
5	GW_REVAP	Coefficiente “Revap” de las aguas subterráneas	0	0.2
6	ESCO	Factor de compensación de evaporación del suelo	0.8	1
7	CH_N2	Valor de n de Manning del cauce principal	0	0.3
8	CH_K2	Conductividad hidráulica efectiva de canal	5	130
9	ALPHA_BNK	Constante de proporcionalidad	0	1
10	SOL_AWC	Capacidad de agua disponible en el suelo	-0.2	0.4
11	SOL_K	Conductividad hidráulica saturada	-0.8	0.8
12	SOL_BD	Densidad del suelo a bulbo húmedo	-0.5	0.6
13	SFTMP	Temperatura media de congelación de la lluvia	-5	5

Nota: La presente tabla muestra, los parámetros adicionales que maneja el programa SWAT-CUP para ajustar el modelo SWAT con los valores máximo y mínimo.

Como parte del proceso de calibración, se compara la simulación que se aproxima al caudal real y se extraen los parámetros antes mencionados (ver

Tabla 27).

Para realizar esta comparación se tomó en cuenta la información histórica del caudal real desde el 22 de julio del 2014 hasta fines del 2019. Donde solo se ha considerado como parte del proceso de calibración, la información diaria del 2015 y para el proceso validación toda la información del 2016. Debido a que el modelo SWAT trabaja con información completa anual y de igual forma los datos de Data Pisco finalizan en el año 2016.

Dentro de las primeras cincuenta simulaciones, se obtuvo que la simulación número 21 se aproxima más al caudal real, obteniéndose los parámetros calibrados y son reajustados (ver **Tabla 29** y **Tabla 28**). Para realizar una segunda vez, cincuenta simulaciones y obtener parámetros más precisos. A estos nuevos parámetros lo hemos llamado, Parámetros Calibrados Ajustados y se pueden ver en las **Tabla 29** y **Tabla 28**.

Estos parámetros calibrados que forman parte del modelo, que son generados por el programa SWAT-CUP se ven relegados como resultado del caudal simulado se muestra en la **Figura 31**. Pero luego de realizar el reajuste, con los parámetros ajustados se obtiene un caudal que se aproxima mucho más (ver **Figura 32**).

De igual forma se reajusto la curva número con ayuda de coeficiente CN2 (Curva Numero de Escorrentía) y esto se muestra en la **Tabla 32**.

Tabla 28.

Calibración de Parámetro SOL_AWC, SOL_K y SOL_BD

Origen de Información	SOL_AWC	SOL_K	SOL_BD
Parámetro Inicial	0.37	-0.46	-0.31
Parámetro Simulado	0.122	45.93	1

Parámetro Calibrado	0.08	67.06	1.31
Parámetros Ajustados	0.39	-0.47	-0.38
Parametros Calibrado Ajustado	0.031	98.58	1.81

Nota: La presente tabla muestra las etapas del proceso de calibración de los parámetros de capacidad de agua disponible en el suelo (SOL_AWC), Conductividad hidráulica saturada (SOL_K) y la disponibilidad del suelo en bulbo húmedo (SOL_BD) ayudan a determinar los la cantidad de escorrentía que puede generar cada tipo de suelo.

Tabla 29.

Parámetros Calibrados y Ajustados – Simulación número 21

Parámetro	Valor Medio	Rango	Mínimo Ajustado	Máximo Ajustado	Parámetros Ajustados
CN2	0.13	± 0.06	0.07	0.73	0.62
ALPHA_BF	0.67	± 0.2	0.67	0.87	0.80
GW_DELAY	252.60	± 100	152	352	258
GWQMIN	0.26	± 0.2	0.06	0.46	0.11
GW_REVAP	0.18	± 0.0	0	0.2	0.18
ESCO	0.83	± 0.03	0.8	0.86	0.81
CH_N2	0.17	± 0.05	0.12	0.22	0.18
CH_K2	66.25	± 20	46.25	86.25	65.85
ALPHA_BNK	0.75	± 0.2	0.55	0.95	0.85
SOL_AWC	0.37	± 0.02	0.35	0.39	0.39
SOL_K	-0.46	± 0.2	-0.66	0.26	-0.47
SOL_BD	-0.31	± 0.1	-0.41	-0.21	-0.38
SFTMP	3.10	± 1.10	2	4	3.62

Nota: La presente tabla muestra los parámetros calibrados que se obtienen a partir de la simulación número 21. La situación numero 21 es el que ha generado un caudal que se aproxima mucho mejor al caudal real. El parámetro de CN2 (Curva Numero de Escorrentía) ayudo a reajustar los valores de la curva número de acuerdo a nuestra área de estudio.

Tabla 30.

Curva Número Calibrado Ajustado

Sub Cuencas	CN Calibrada Inicial	Parámetro CN Calibrado Ajustado	CN Calibrado Ajustado Final	Porcentaje de Variación
1	64.39		24.61	
2	65.87		25.18	
3	64.38		24.61	
4	56.25		21.50	
5	57.01	0.6178	21.79	28 %
6	60.74		23.21	
7	52.53		20.08	
8	63.36		24.22	

9	59.58	22.77
10	58.21	22.25
11	61.76	23.60
12	66.96	25.59
13	66.32	25.35
14	63.91	24.43
15	60.27	23.04

Nota: La tabla muestra el reajuste de la curva número con ayuda del coeficiente adimensional CN2, obteniendo una variación del 28% con respecto al valor inicial.

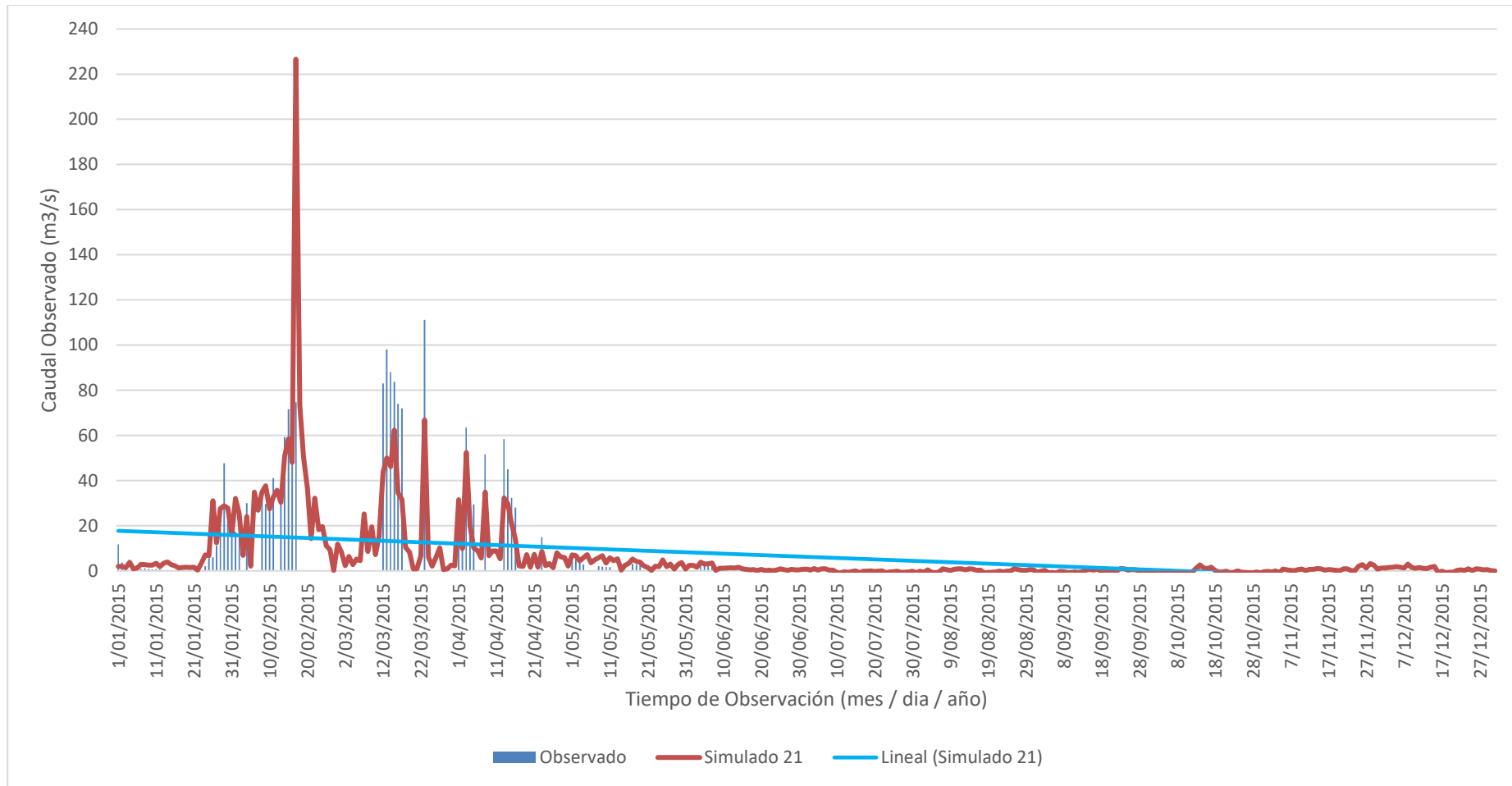


Figura 31. Caudal Observado Versus Caudal Simulado – Año 2015

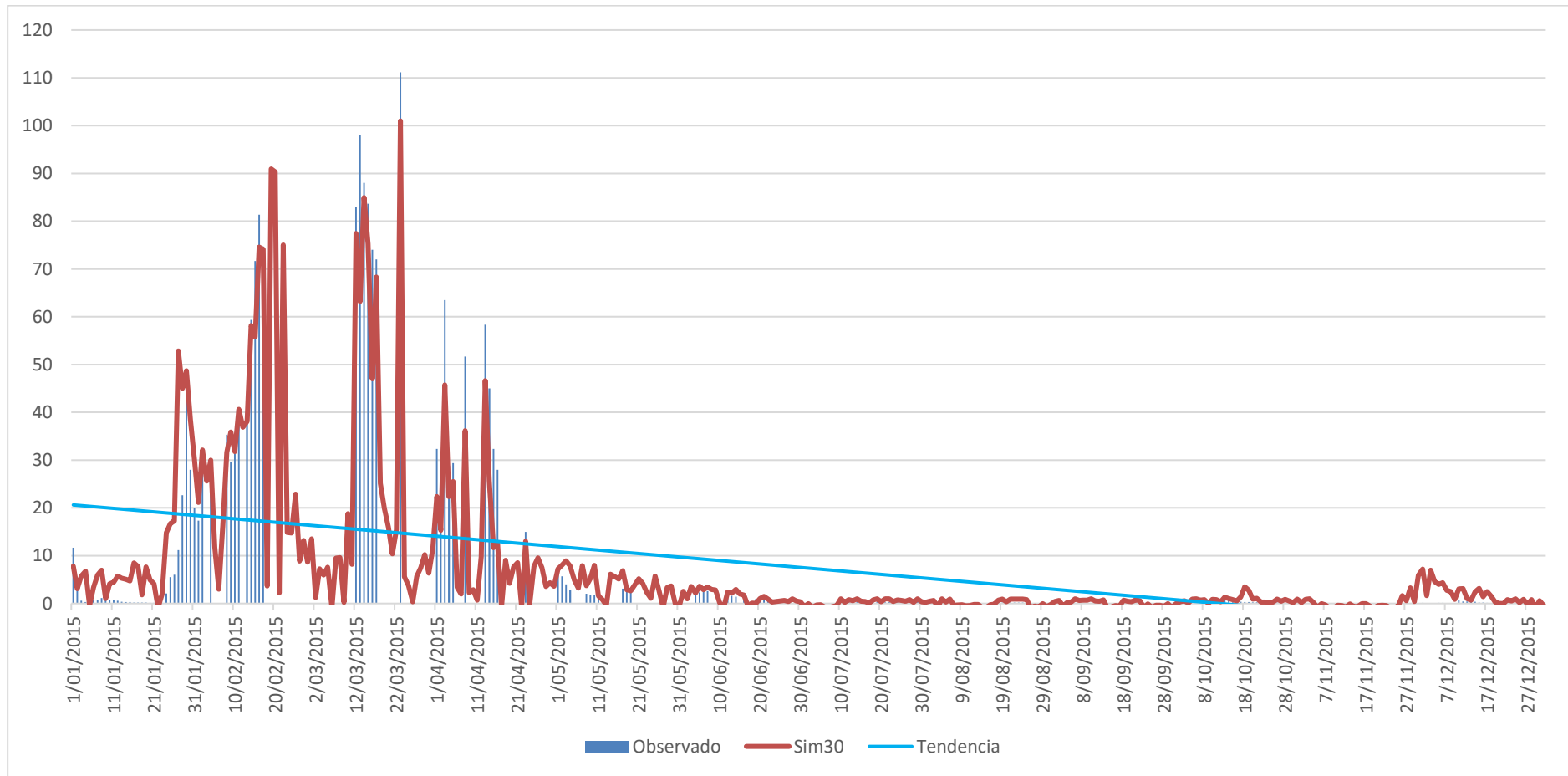


Figura 32. Caudal Observado Versus Caudal Simulado Ajustado – Año 2016

2.5.1.3.1.1 Análisis de Sensibilidad

Se mostro en el análisis de sensibilidad los parámetros que tienen influencia significativa, en los resultados del modelo SWAT con relación a la información real (ver **Figura 33**).

Peña (2014) menciona que, el valor de p-value indican la importancia o grado de significancia, de un parámetro en el proceso de calibración, por otro lado, el parámetro de t-Stat representa la sensibilidad de un parámetro que conforma un modelo matemático y dicho parámetro es directamente proporcional a la sensibilidad del parámetro.

Los valores p-value superiores a 0.2 deben de ser considerados en el proceso de calibración. Mientras tanto los valores t-Stat superiores a 0.00 son mucho más sensibles.

Considerando la información previamente mencionada, se puede inferir que los parámetros SOL_BD, SFTMP, GW_REVAP, SOL_K, SOL_AWC, ALPHA_BF, CH_N2, GW_DELAY, CH_K2 y ESCO son menos sensibles, a su vez el ultimo parámetro mencionado puede no ser considerado en el proceso de calibración debido al grado de significancia (ver **Tabla 31** y **Figura 33**).

Tabla 31.

Resultados de los Parámetros Calibrados

Orden	Parámetros	t – Stat	P – Value
1	ALPHA_BNK	-0.0087	0.993
2	CH_K2	-0.5571	0.5809
3	CH_N2	-0.4163	0.6796
4	ESCO	-1.4819	0.147
5	GW_REVAP	-0.1112	0.912
6	GWQMN	0.3747	0.71
7	GW_DELAY	-0.5567	0.5811

8	ALPHA_BF	-0.2261	0.8223
9	SFTMP	-0.103	0.9185
10	SOL_BD	-0.0819	0.9351
11	SOL_K	-0.1545	0.878
12	SOL_AWC	-0.2025	0.8406
13	CN2	0.0719	0.943

Nora: La tabla muestra el nivel de sensibilidad (t-Stat) y significancia (P-Value). Donde aquellos parámetros que tengan un valor superior 0.2 de P-Value deben de ser considerados en el modelo, mientras que los valores que se aproximen a 0.00 en t-Stat son mucho mas sensibles.

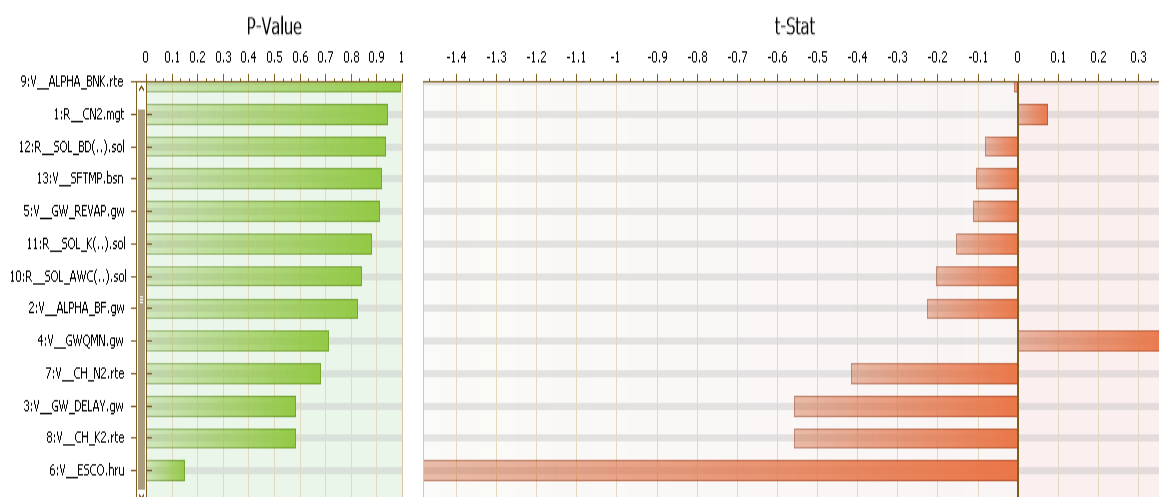


Figura 33. Resultado del Análisis de Sensibilidad de los Parámetros. SUFI-2

2.5.1.3.2 Proceso de Validación del Modelo SWAT

Se realizó el proceso de validación y se ha usado el coeficiente estadístico de Nash-Sutcliffe (ver **Tabla 32** que se extrajo de **Tabla 5**). El coeficiente de Nash-Sutcliffe permite realizar una comparación entre los caudal observado y caudal simulado, para así obtener un valor adimensional, que nos indica el rendimiento del modelo.

Este coeficiente estadístico, también fue empleado en el proceso de calibración y ajuste, para determinar que numero de simulación es el que se aproxima al caudal real y seleccionar los parámetros que ya fueron explicados en el apartado anterior (ver

Tabla 33).

La **Figura 34** y **Figura 35** muestra a través de un gráfico de tendencia del caudal simulado y ajustado. Como también la Ecuación 11 y Ecuación 12 representa la ecuación general de dichas graficas.

La primera imagen (**Figura 34**) se ha podido observar que el caudal que genero la simulación numero 21 no se ajusta correctamente a la línea de tendencia. En comparación la segunda imagen que se ha realizado un ajuste de los datos, se observo que tiene una mejor distribución de datos del caudal.

Igualmente se usó la información que fue monitoreada por la ANA del año 2016 para el proceso de validación. Debido a que la información que nos brinda Data Pisco inicia en el año de 1981 y termina en el año 2016.

Finalmente, los datos que fueron corregidos son validados, como se ha hecho mención anteriormente con el coeficiente NASH |obteniendo un valor de 0.91 lo que se puede interpretar que el modelo posee un excelente rendimiento. Como también se muestra en la **Figura 36** la comparación del caudal validado con respecto al caudal observado del año 2016.

Tabla 32.

Coeficiente de Nash-Sutcliffe

criterio estadístico	Valores	Clasificación
$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{(\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{sim})^2)}$	0.75 < NSE ≤ 1.0	Excelente
	0.65 < NSE ≤ 0.75	Bueno
	0.50 < NSE ≤ 0.65	Satisfactorio
	0.40 < NSE ≤ 0.50	Aceptable

Nota: La tabla muestra, la clasificación que empleo el coeficiente estadístico Nash-Sucliffe y los rangos de cada una de las clasificaciones.

Tabla 33.

Coefficiente Estadísticos y Número de Simulación

Etapa	Número de Simulación	Coeficiente Estadísticos			
		R ²	NSE	PBIAS	RSR
Calibrado	21	0.54	0.99	27	0.29
Calibrado Ajustado	30	0.66	0.55	12	0.23
Validación	-	0.88	0.91	23	0.13

Nota: La tabla muestra, los valores obtenidos de acuerdo al coeficiente estadístico de Nash (NSE), Correlación (R²), PBias y RSR. Donde el valor de Nash en la etapa de validación se reduce de 0.99 a 0.91.

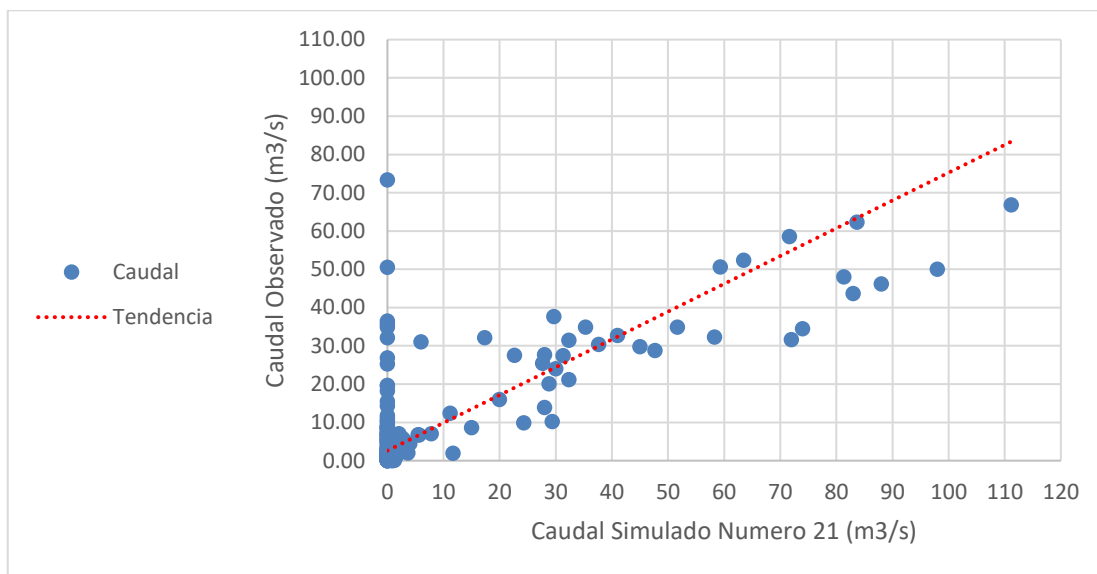


Figura 34. Calibración - Caudal Simulado Número 21 y Caudal Observado 2015

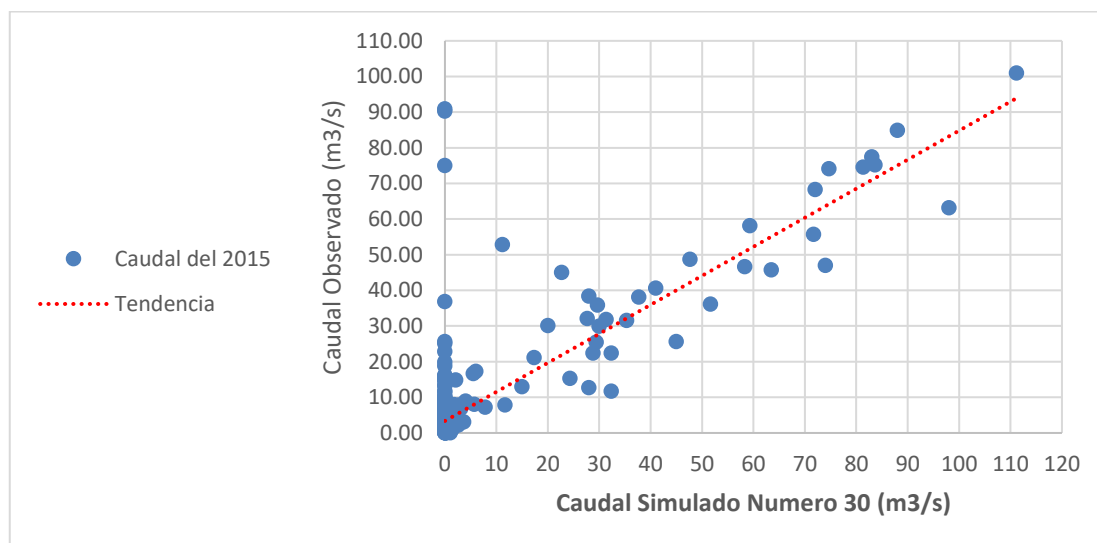


Figura 35. Ajuste - Caudal Simulado Número 30 y Caudal Observado 2015

Ecuación 11. Caudal Simulado - Número 21 versus Caudal Observado 2015

$$Y = 0.7264X + 2.6116$$

Donde:

Y = Caudal Observado del año 2015

X = Caudal Simulado del año 2015

Ecuación 12. Caudal Simulado Ajustado - Número 30 versus Caudal Observado 2015

$$Y = 0.8145X + 3.3655$$

Donde:

Y = Caudal Observado del año 2015

X = Caudal Simulado Ajustado del año 2015

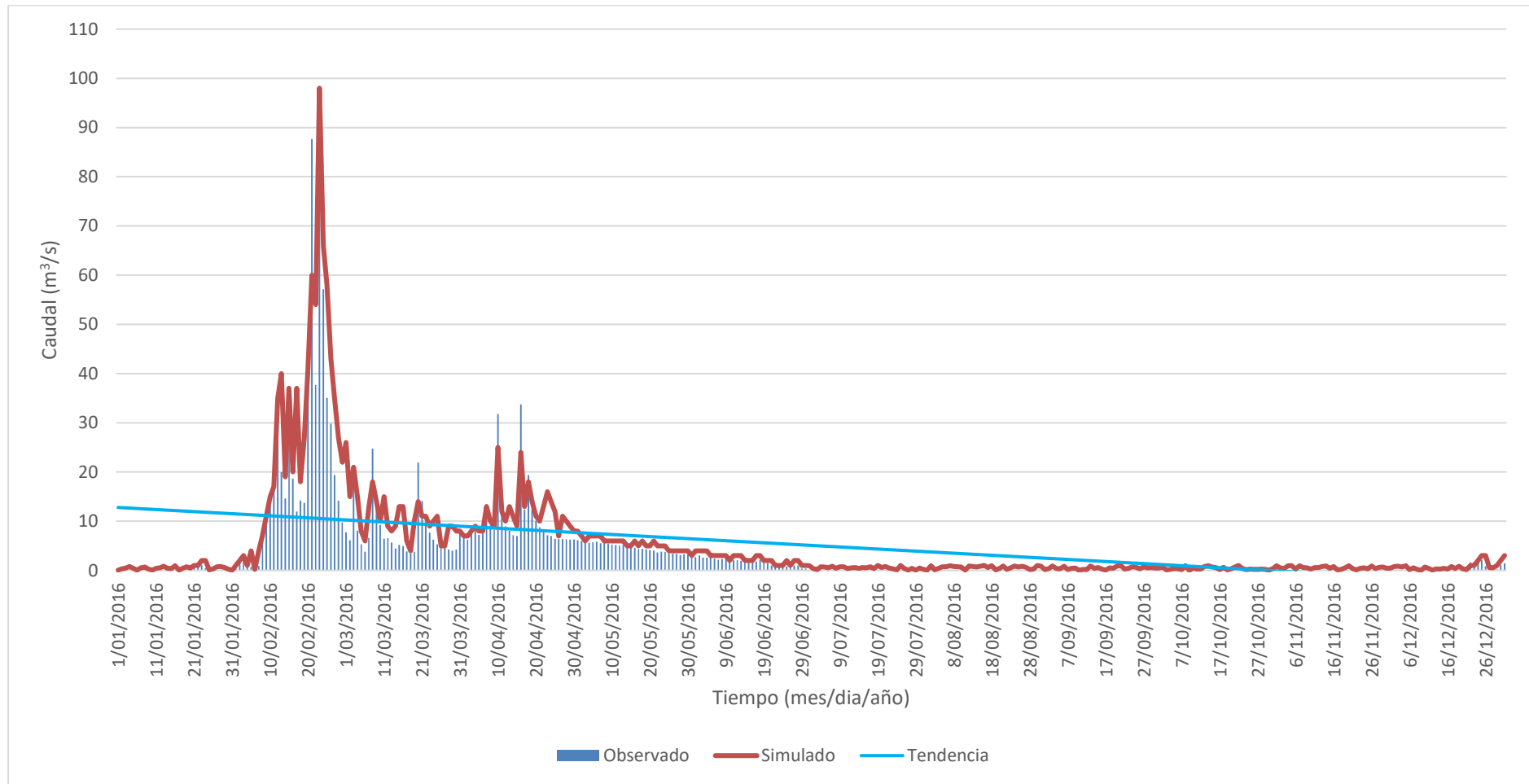


Figura 36. Caudal Validado versus Caudal Observado

2.5.1.3.3 Simulación del Modelo SWAT Calibrado y Validado

Después de haber realizado la calibración, ajustar y calibrar el modelo se obtiene un valor de evapotranspiración de 296.2 mm/s, evaporación de 12.37 m³/s, infiltración de 28.35 m³/s, escorrentía de 1.71 m³/s, flujo de retorno de 17.39 m³/s, flujo lateral de 37.11 m³/s y un valor promedio de curva número de 61.9 (ver **Figura 37**).

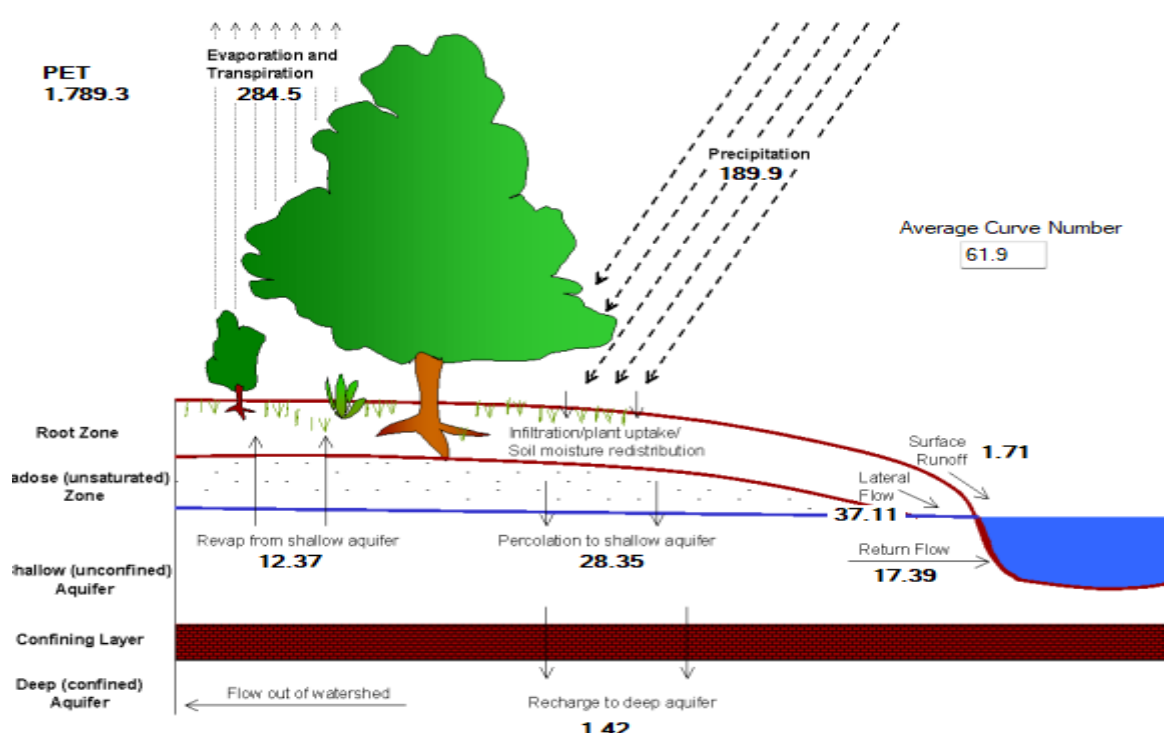


Figura 37. Simulación del Modelo SWAT Calibrado y Validado de 1981 al 2015

2.5.1.4. Predicciones del modelo SWAT

Se realizó las predicciones del impacto potencial del cambio climático sobre la cuenca del río Yauca, con apoyo del modelo SWAT previamente calibrado y validado. Si no se utilizase los Modelos Circulares Generales (MCG), que plantaron los diversos escenarios climáticos, que fueron nombrados como Rutas de

Concentración Representativa (RCP) no sería posible hacer las predicciones sobre los impactos del Cambio Climático sobre la cuenca Yauca.

El modelo climático o Modelos Circulares Generales (MCG) son, CSIRO – MK3-6-0, HADGEM2-ES, MIROC5 y MRI-CGCM3. Estos modelos climáticos se han descrito anteriormente en la **Tabla 4** y cada uno de ellos posee cuatro RCP (ver **Tabla 3**) y poseen información histórica para el año 2050 (RCP 2.6 y RCP 8.0) y 2100 (RCP 4.5 y 6.0) que han permitido predecir el impacto del cambio climático.

Cada RCP posee información de la precipitación, temperatura que han sido introducidos dentro del modelo SWAT para determinar el caudal a corto (año 2050) y largo (año 2100) plazo y la tendencia de estos datos que se representó a través de una gráfica estadística de tendencia.

La determinación de la tendencia, se basa en método gráfico y está aprobada por la Autoridad Nacional del Agua a través de su manual de *Métodos para el análisis de variables hidrológicas y ambientales* por Guevara Pérez en el año de 2015.

2.5.1.4.1 Predicción del Caudal para el año 2050 y 2100

La información de la precipitación, temperatura de cada modelo climático y las variables geomorfológicas e hidrológicas son introducidas en el modelo SWAT validado, con la intención de obtener un caudal simulado.

Cada modelo climático genera cuatro escenarios, debido a los RCP. Cada escenario muestra el caudal para el año 2050 y el año 2100.

2.5.1.4.1.1 Caudal Proyectado – Modelo CSIRO-MK3-6-0

Los datos del modelo climático CSIRO-MK3-6-0 han sido introducidos en el modelo SWAT y se ha obtenido como resultado los caudales para los próximos años (2050 y 2100).

Los caudales que ha generado el modelo SWAT con la base de datos modelo climático CSIRO-MK3-6-0 demuestran que, el modelo RCP 2.6, 4.5 y 6.5 tiene una tendencia positiva (ver **Figura 38**, **Figura 39**, **Figura 40**) y el escenario RCP 8.5 posee una tendencia negativa (ver **Figura 41**).

Todos los escenarios han demostrado que el caudal simulado tanto a corto y largo plazo, es inferior a $0 \text{ m}^3/\text{s}$.

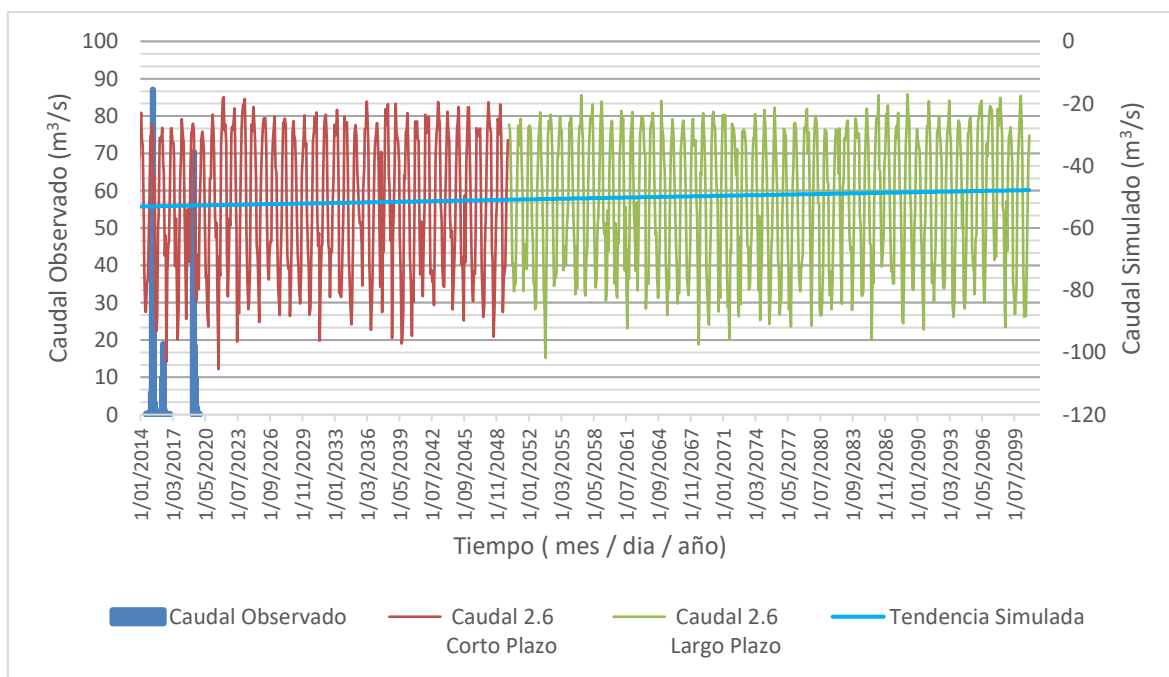


Figura 38. Caudal proyectado RCP 2.6 – Modelo CSIRO–MK3–6-0

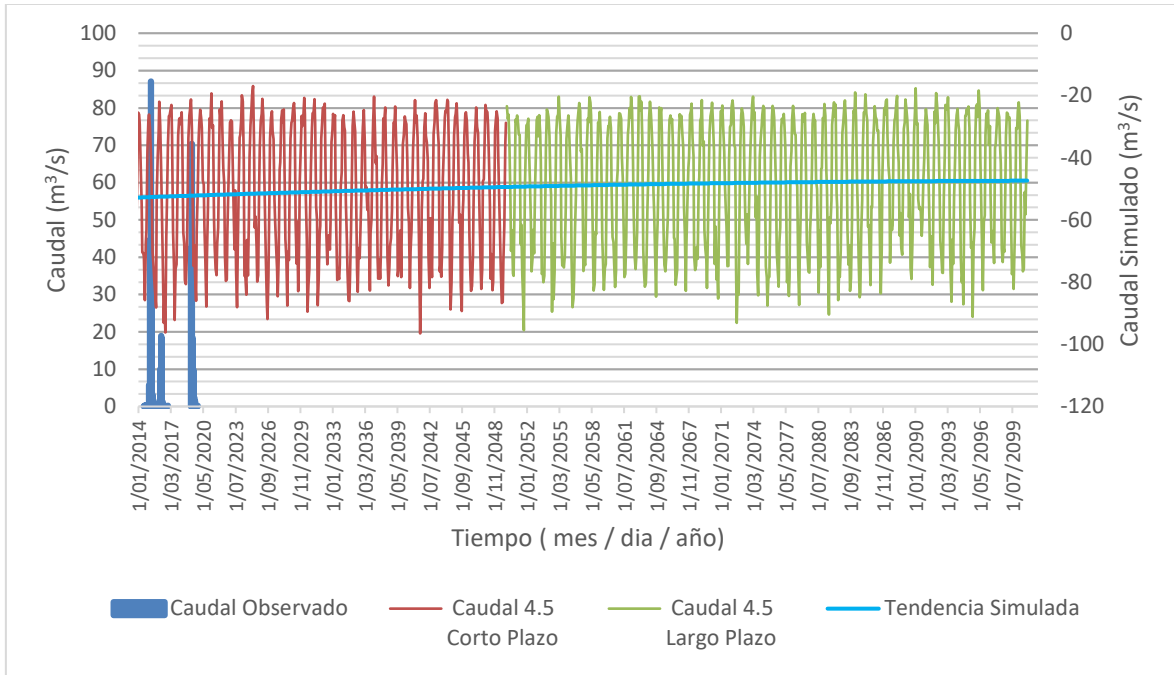


Figura 39. Caudal proyectado RCP 4.5 – Modelo CSIRO–MK3–6-0

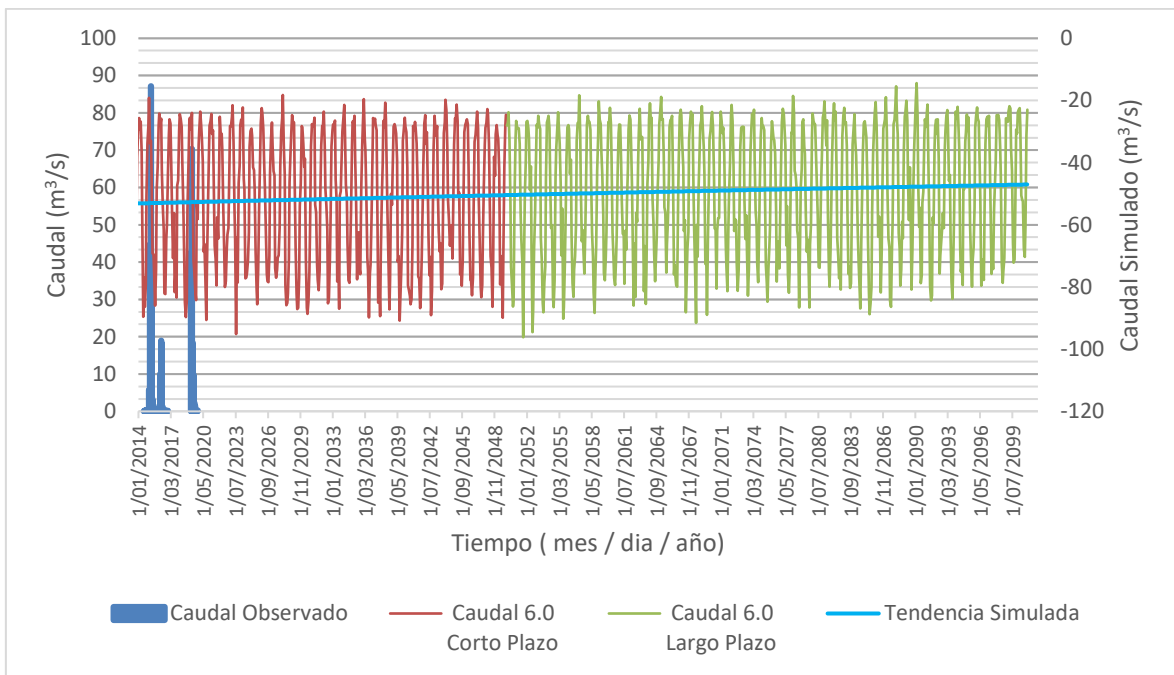


Figura 40. Caudal proyectado RCP 6.0 – Modelo CSIRO–MK3–6-0

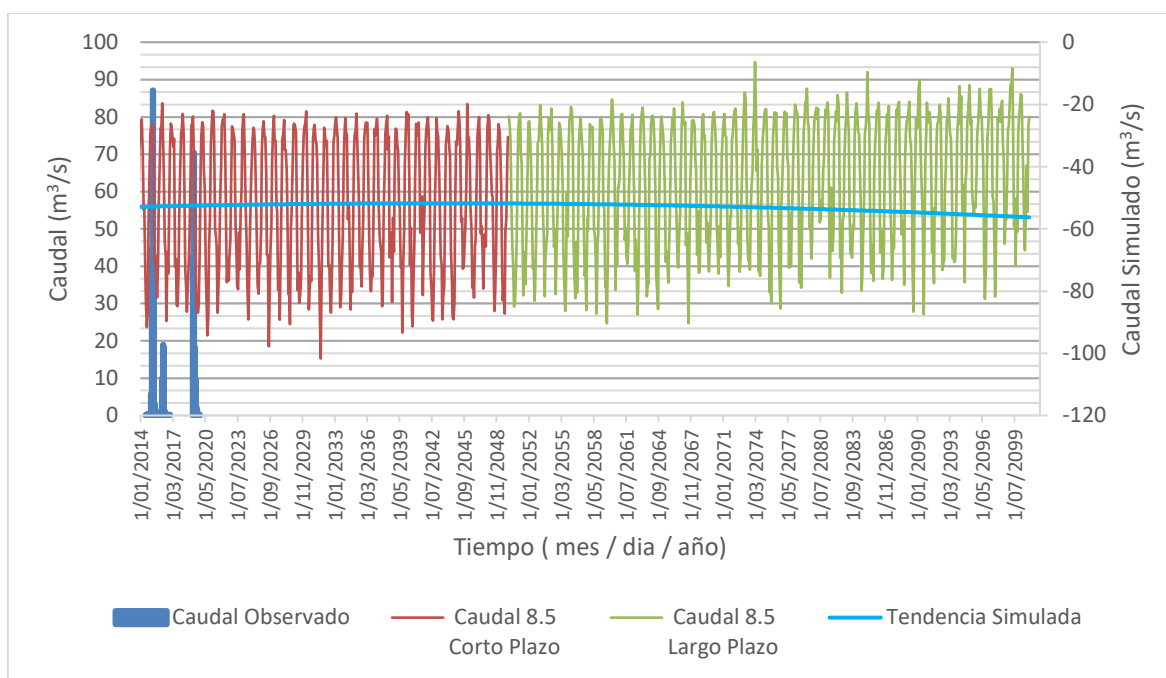


Figura 41. Caudal proyectado RCP 8.5 – Modelo CSIRO–MK3–6-0

2.5.1.4.1.2 Caudal Proyectado – Modelo HADGEM2-ES

El modelo climático HADGEM2-ES que fue introducido en SWAT, dio como productos la información de los caudales para el año 2050 y 2100. Donde se muestra que los escenarios RCP 2.6 y 8.5 tienen una tendencia positiva. Pero los RCP 4.5 poseen una tendencia ligeramente positiva y el RCP 6.0 muestra una tendencia lateral.

Con respecto al caudal, se observó que los escenarios RCP 2.6, 6.0 y 8.5 no poseen un flujo constante y solo se tienen pequeños picos a corto y largo plazo, pero mayormente poseen un caudal igual o inferior a $0\text{m}^3/\text{s}$ (ver **Figura 42**, **Figura 43** y **Figura 45**). El RCP 4.5 muestra una tasa constante de producción de agua tanto para el año 2050 y 2100 (ver **Figura 44**).

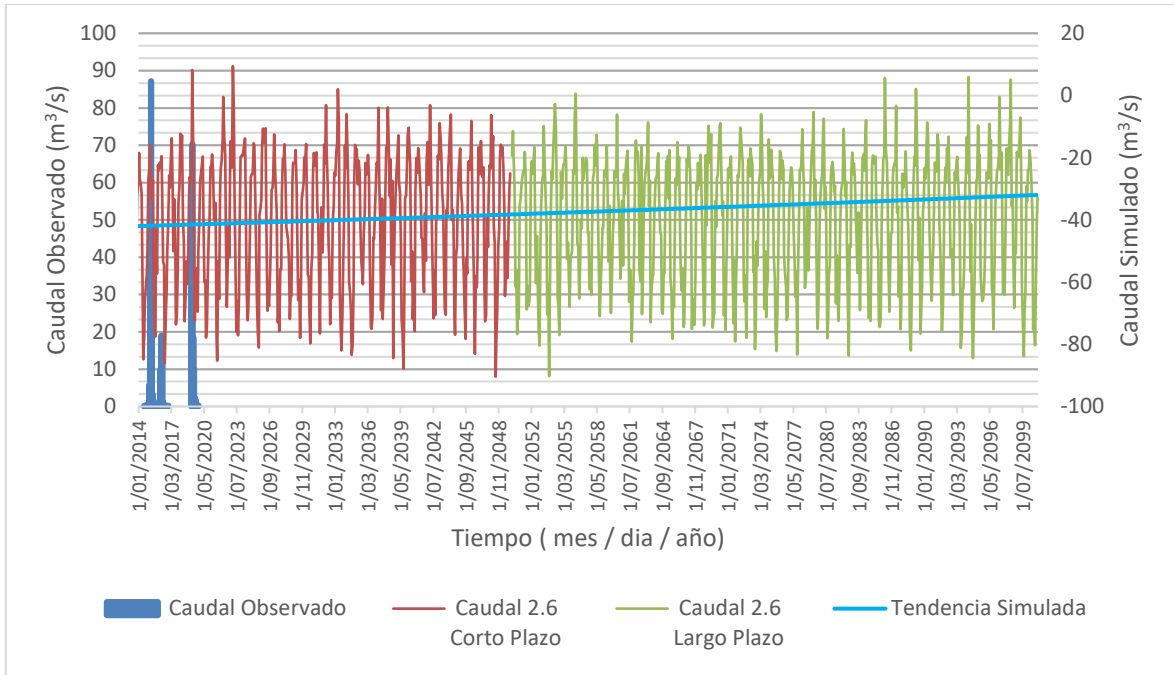


Figura 42. Caudal proyectado RCP 2.6 – Modelo HADGEM2-ES

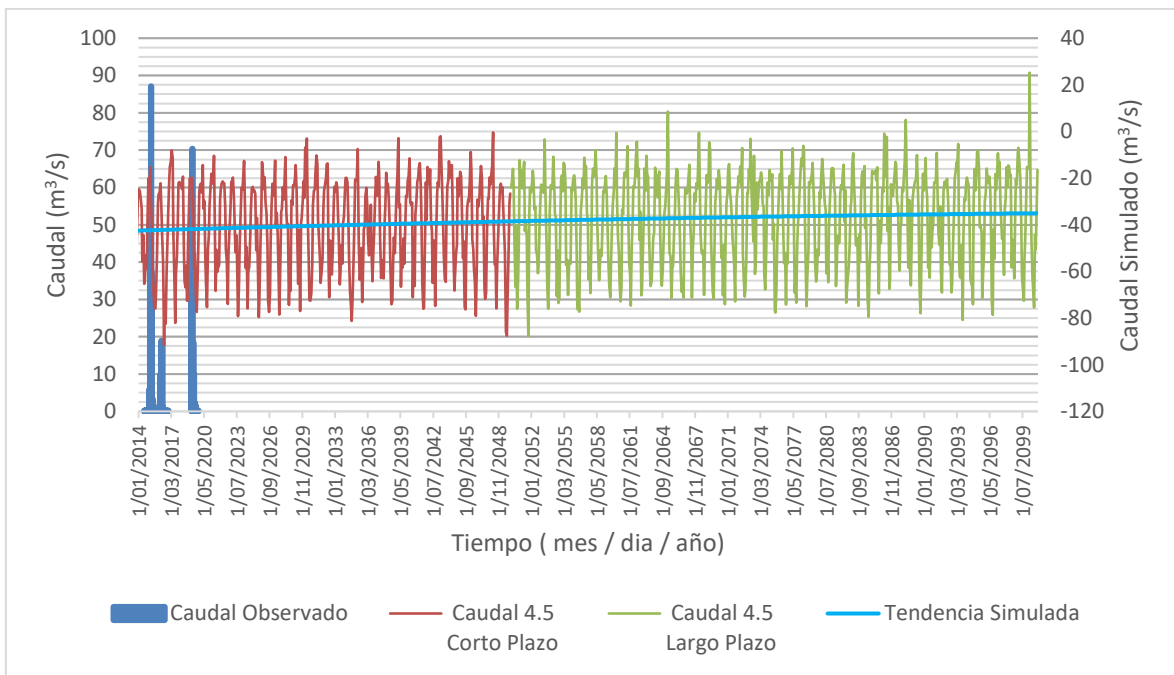


Figura 43. Caudal proyectado RCP 4.5 – Modelo HADGEM2-ES

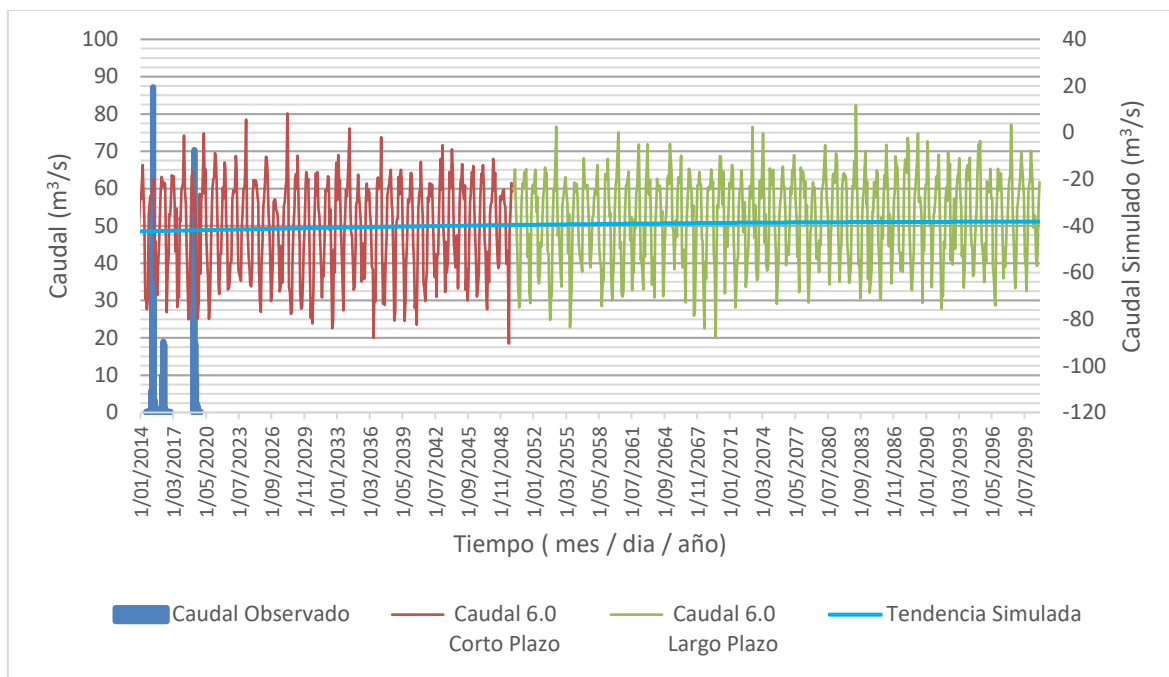


Figura 44. Caudal proyectado RCP 6.0 – Modelo HADGEM2-ES

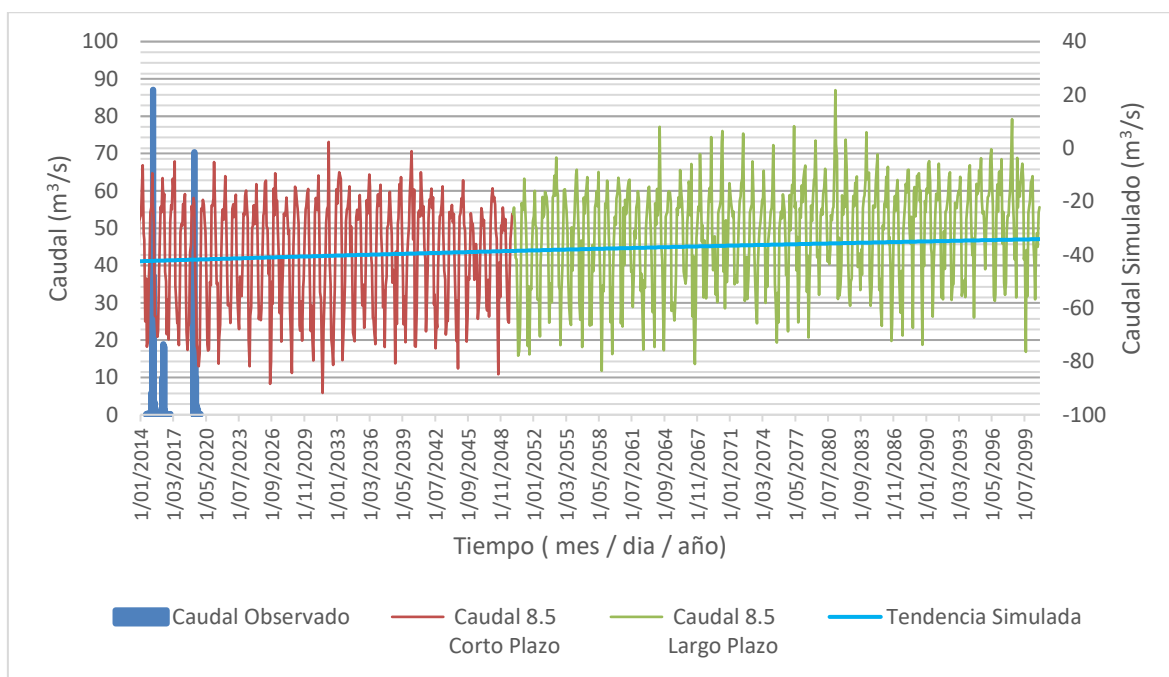


Figura 45. Caudal proyectado RCP 8.5 – Modelo HADGEM2-ES

2.5.1.4.1.3 Caudal Proyectado – Modelo MIROC5

El caudal simulado que se obtuvo de la información del modelo climático MIROC. Muestra que los escenarios RCP 2.6, 4.5 y 8.5 tienen una tendencia negativa a largo y corto plazo (ver **Figura 46, 47 y 49**). Solo el escenario RCP 6.0 se observó una tendencia positiva (ver **Figura 48**). Con respecto al flujo a lo largo de los años, solo el RCP 4.5 (ver **Figura 47**) es constante.

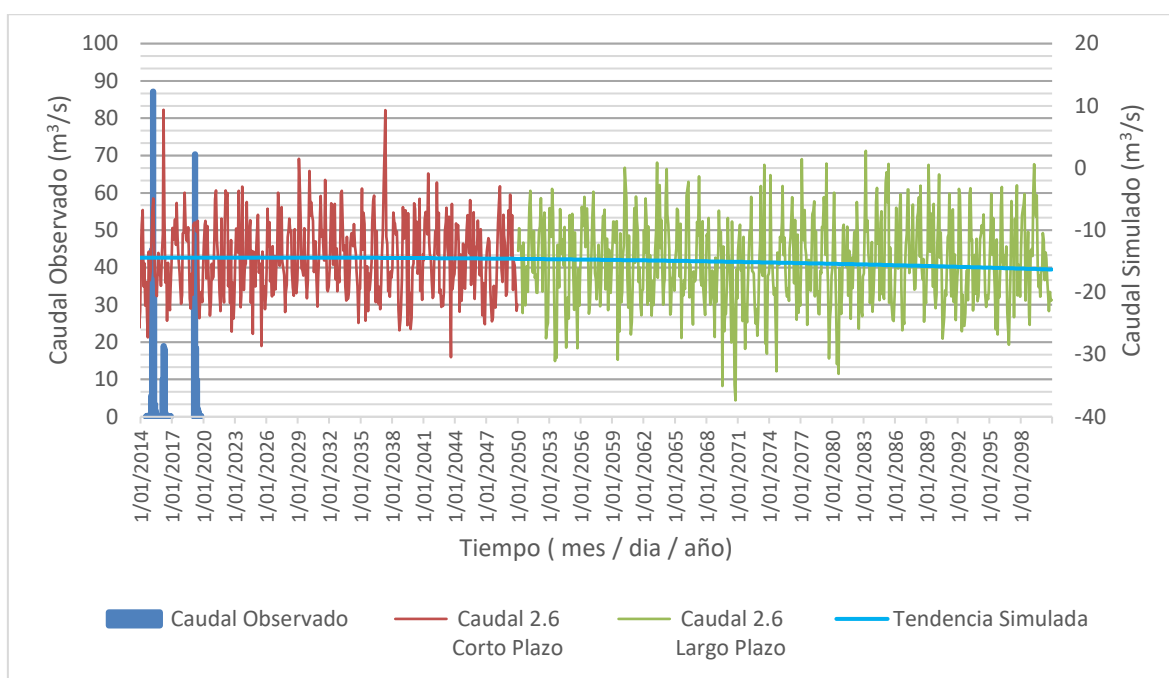


Figura 46. Caudal proyectado RCP 2.6 – Modelo MIROC5

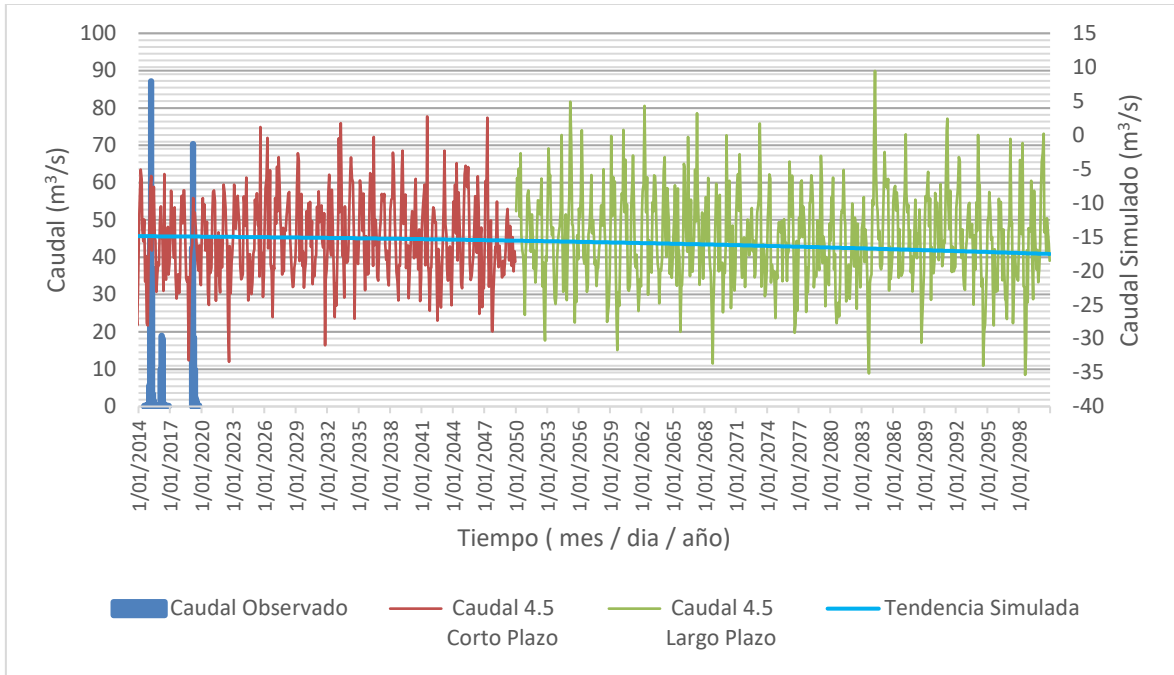


Figura 47. Caudal proyectado RCP 4.5 – Modelo MIROC5

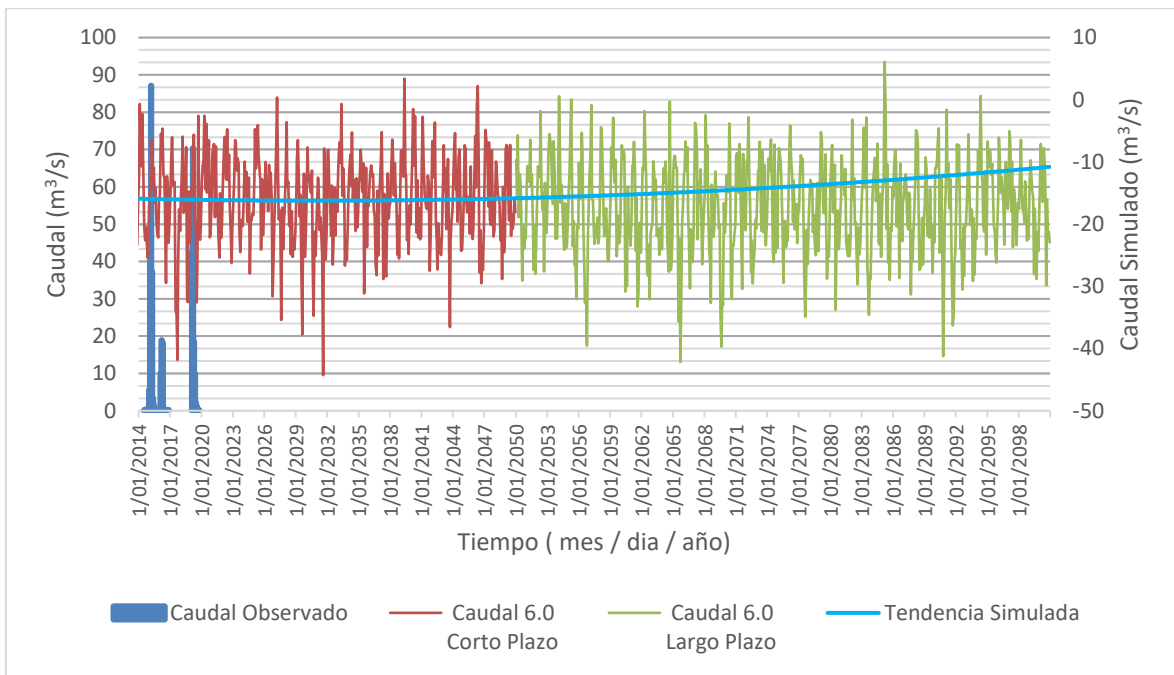


Figura 48. Caudal proyectado RCP 6.0 – Modelo MIROC5

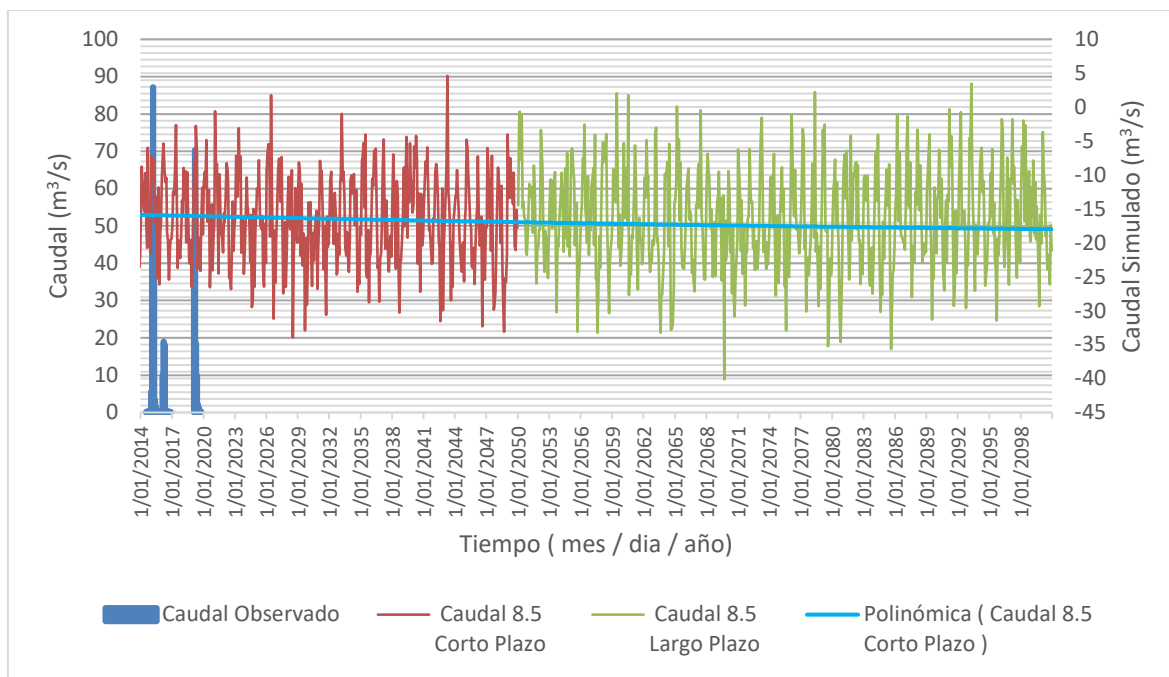


Figura 49. Caudal proyectado RCP 8.5 – Modelo MIROC5

2.5.1.4.1.4 Caudal Proyectado – MRI – CGCM3

Haber empleado los datos climáticos del modelo MRI-CGCM3 se obtuvo un caudal que posee una tendencia positiva para todos los escenarios (RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5). Pero esto no se ve reflejado en la tasa de producción de agua dulce a corto plazo. Los escenarios RCP 4.5 y 8.5 muestran un flujo constante a largo plazo (2100). Toda la información antes mencionada se observó en las **Figuras 50, Figura 51, Figura 52 y Figura 53.**

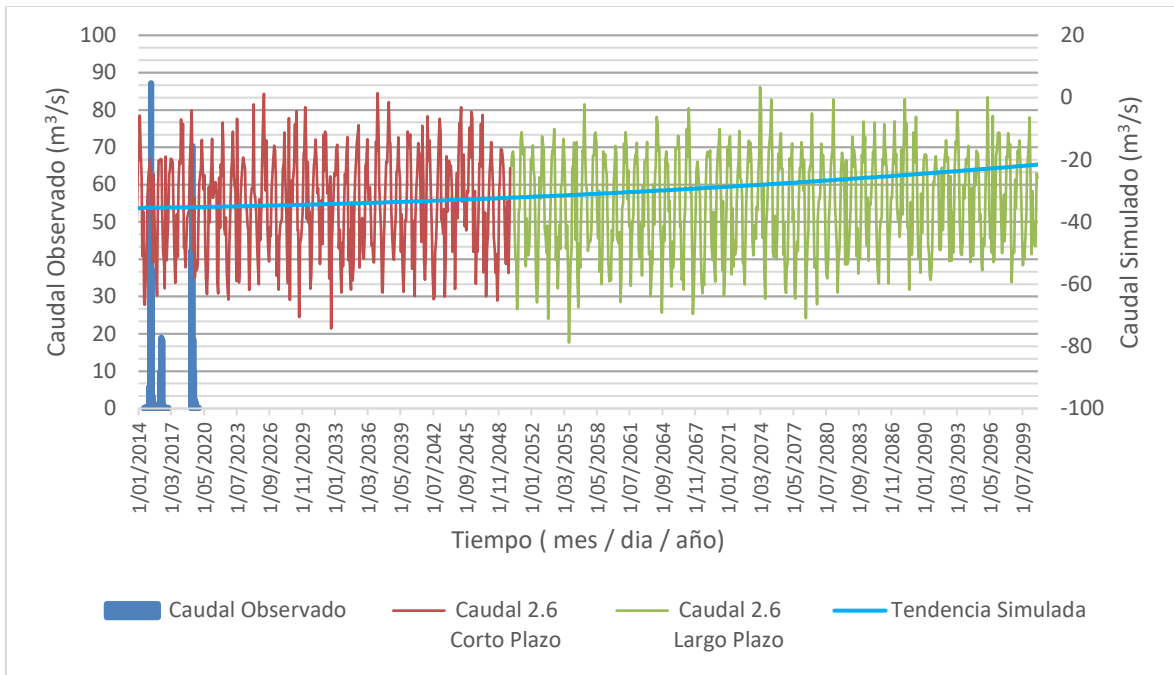


Figura 50. Caudal proyectado RCP 2.6 – Modelo MRI – CGCM3

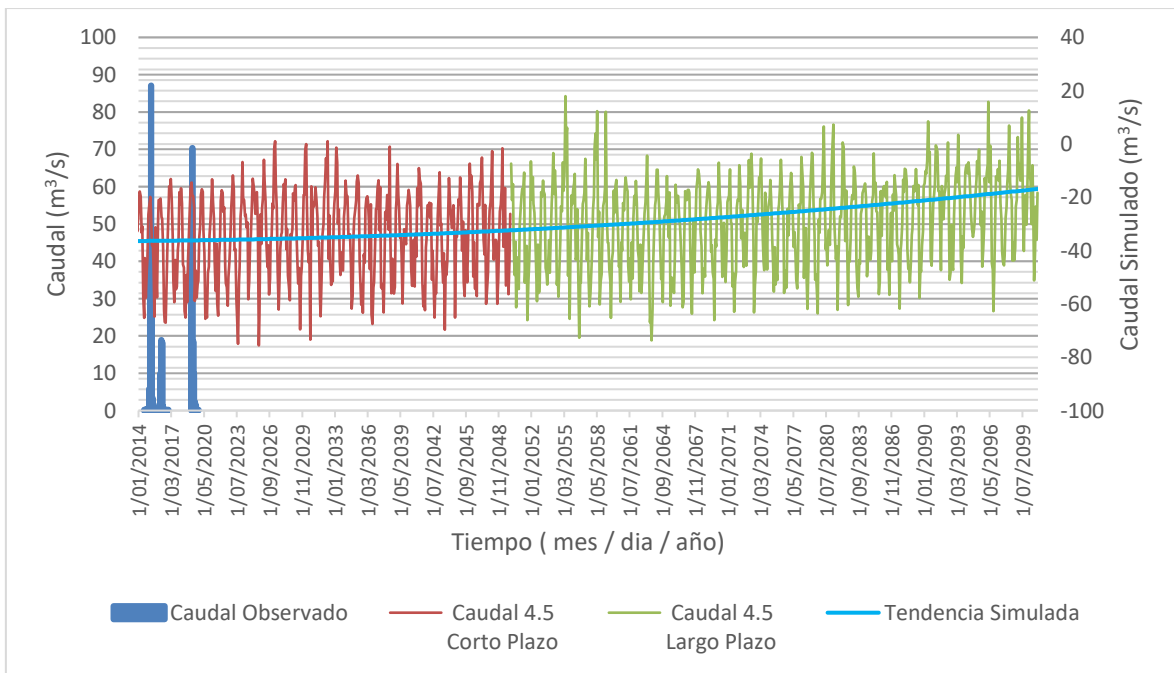


Figura 51. Caudal proyectado RCP 4.5 – Modelo MRI – CGCM3

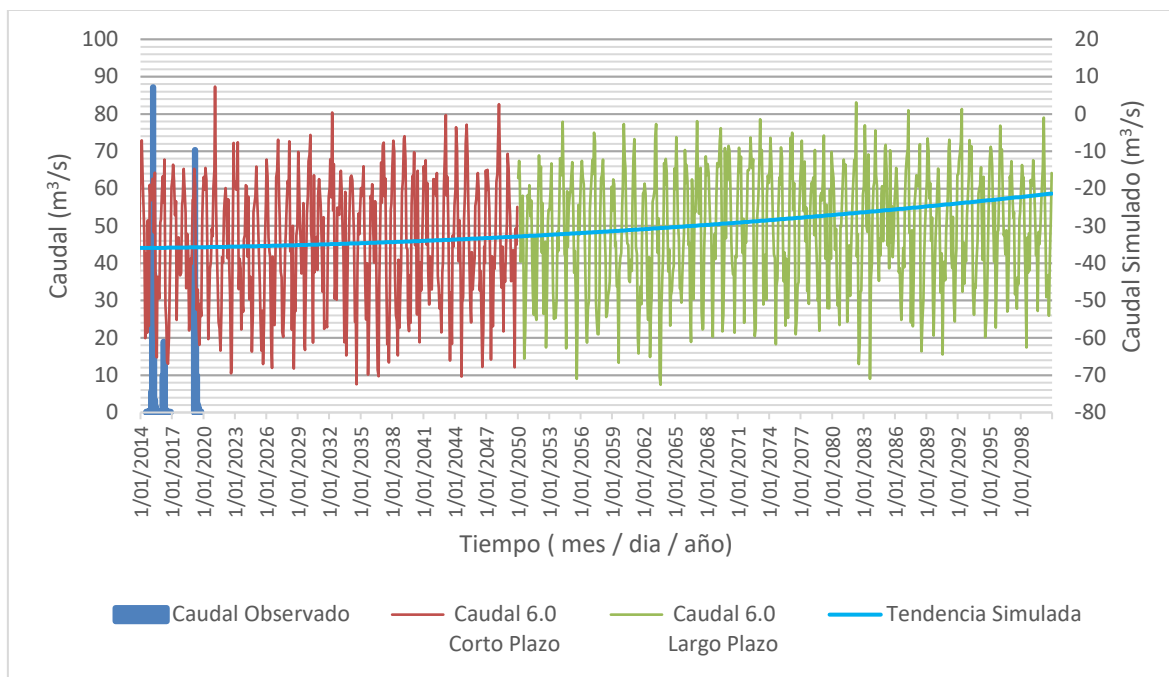


Figura 52. Caudal proyectado RCP 6.0 – Modelo MRI – CGCM3

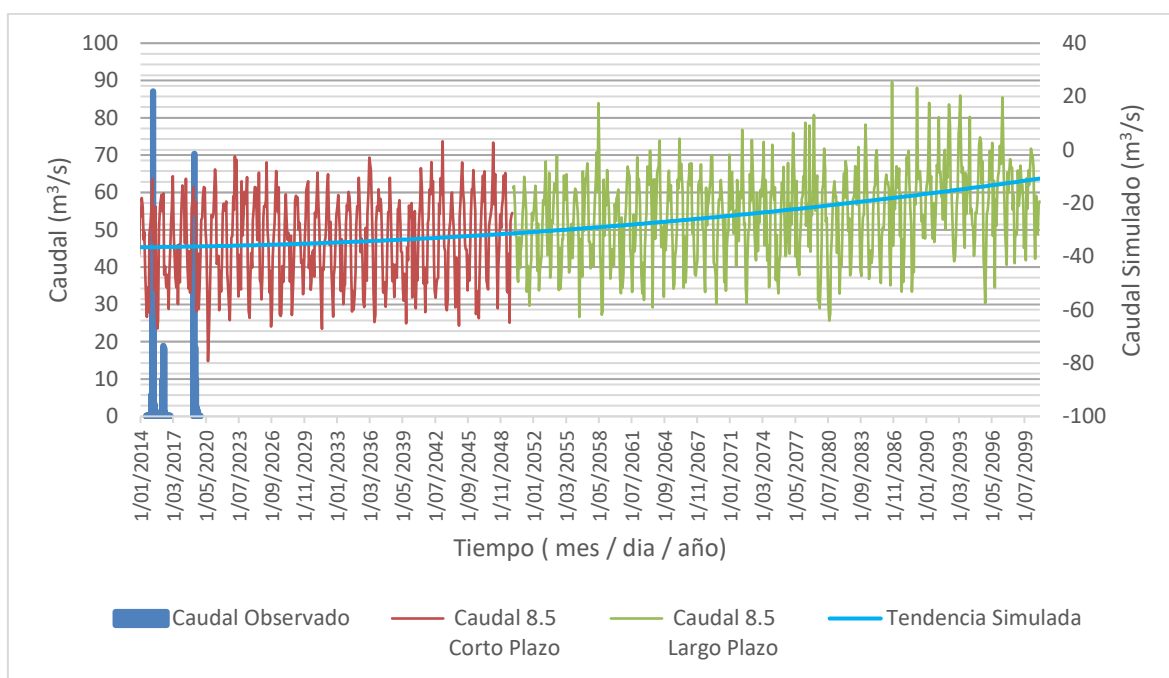


Figura 53. Caudal proyectado RCP 8.5 – Modelo MRI – CGCM3

2.5.1.4.2 Predicción de la Temperatura para el año 2050 y 2100

La predicción de la temperatura promedio de la cuenca Yauca se usó los modelos climáticos (MCG) que plantean diversos escenarios (RCP), como se ha mencionado anteriormente. Esto se realiza para poder saber cómo podría ir variando la temperatura a corto (año 2050) y largo plazo (año 2100). Adicional a ello, en todos los escenarios muestran que la temperatura varía entre -35°C y 0°C .

2.5.1.4.2.1 Temperatura – CSIRO-MK3-6-0

El escenario RCP 2.6 muestra una tendencia lineal positiva, del aumento de la temperatura a corto y largo plazo, al igual que los escenarios RCP 4.5 y 6.0. Pero el RCP 8.5 muestra una tendencia exponencial a largo plazo (ver ANEXO N.º 12 Valores Promedio de Temperatura - CSIRO-MK3-6-0).

2.5.1.4.2.2 Temperatura – HADGEM2-ES

Un RCP 2.6, 4.5 y 6.0 muestran una tendencia lineal positiva, en cambio el RCP 8.5 muestra una tendencia exponencial a largo plazo. Pero la temperatura no supera los 0°C (ver ANEXO N.º 14 Valores Promedio de Temperatura – HADGEM2 – ES).

2.5.1.4.2.3 Temperatura – MIROC 5

El modelo climático MIROC5 mostro una tendencia negativa a corto y largo plazo en sus diversos escenarios (RCP), donde la temperatura varía entre 6°C y -6°C (ver ANEXO N.º 16 Valores Promedio de Temperatura – MIROC 5).

2.5.1.4.2.4 **Temperatura – MRI-CGCM3**

Los escenarios RCP 4.5 y 8.5 tienen una tendencia exponencial positiva de la temperatura a corto y largo plazo, en comparación con los escenarios RCP 2.6 y 6.0 poseen una tendencia positiva lineal. Pero todos los escenarios antes mencionados la temperatura varía entre 5°C y -25°C (ver ANEXO N.º 18)

Valores Promedio de Temperatura – MRI – CGCM3

2.5.1.4.3 **Predicción de la Precipitación para el año 2050 y 2100**

2.5.1.4.3.1 **Precipitación – CSIR-MK3-6-0**

En el ANEXO N.º 11

Valores Promedio de Precipitación - CSIRO-MK3-6-0 se menciona el comportamiento de la precipitación a largo plazo. Donde se muestra una línea de tendencia lateral para los diversos escenarios que fueron obtenidos de los modelos climáticos y la precipitación varía entre 1 mm/día y 6 mm/día

2.5.1.4.3.2 **Precipitación – HADGEM2-ES**

El ANEXO N.º 13

Valores Promedio de Precipitación – HADGEM2 – ES muestra que el RCP 2.6 posee una tendencia lateral en comparación con los RCP 4.5, 6.0 y 8.5 que tienen una tendencia positiva ascendente y los valores de la precipitación a largo y corto plazo es de 2 mm/día a 10 mm/día.

2.5.1.4.3.3 **Precipitación – MIROC5**

Se presento en el ANEXO N.º 15

Valores Promedio de Precipitación – MIROC 5 las tendencias laterales del modelo MIROC5 de acuerdo a los escenarios climáticos (RCP). Donde la

precipitación varía entre 2 mm/día y 8 mm/día a lo largo de los años de 1981 al 2100.

2.5.1.4.3.4 Precipitación – MRI-CGCM3

Se exhibió en el ANEXO N.º 17 Valores Promedio de Precipitación – MRI – CGCM3 la variación de la precipitación que fluctúa entre 2 mm/día y 10 mm/día y la tendencia lateral a excepción del RCP que posee una tendencia positiva.

2.5.1.4.4 Impactos Potenciales del Cambio Climático Sobre la Cuenca Yauca

La determinación de los impactos del Cambio Climático sobre la cuenca Yauca se realizó, haciendo un análisis de acuerdo al caudal, temperatura y precipitación.

2.5.1.4.4.1 Impacto Climático Sobre el Caudal

En la **Tabla 34** se mostró los caudales promedio anual de la cuenca Yauca. Donde todos los modelos climáticos arrojaron que tienen un flujo de agua promedio anual inferior, comparado con el caudal observado. Para obtener un análisis más preciso, se determinó la variación del caudal simulado anual con respecto al caudal observado anual (ver **Tabla 35**). Donde el modelo climático MIROC que plantea un escenario RCP 2.6 posee una variación de 1%.

La **Tabla 35** permitió hacer un análisis más profundo, para determinar el impacto del Cambio Climático sobre la cuenca, donde los modelos climáticos CSIRO-MK3-6-0 y HADGEM-ES muestran los peores escenarios, debido a que el caudal puede ser inferior a 0 m³/s.

Se realizo un análisis mensual, de acuerdo a los escenarios que plantearon cada modelo climático, Donde se observó que el periodo húmedo es entre los meses de enero a mayo y un periodo seco que inicia en junio a diciembre.

La **Figura 54** represento el escenario RCP 2.6 donde el modelo climático MIROC5 tiene un mejor flujo en la temporada húmeda en comparación con los otros modelos, pero el flujo que genero no se aproxima al caudal real mensual.

Considerando un escenario RCP 4.5 (ver **Figura 55**) el modelo climático MRI-CGCM3 tiene un mejor rendimiento en la época húmeda, pero no se aproxima al caudal mensual real observado. MRI-CGCM3 presenta un caudal que se oscila entre 0 y 10 m³/mensual.

El RCP 4.5 (ver **Figura 56**) muestra que, el modelo MIROC5 tiene un caudal mensual, casi constante en el periodo húmedo y MRI-CGCM3 presenta dos picos en los meses de febrero y abril.

La **Figura 57** (RCP 8.5), muestra que el modelo MIROC5 posee un flujo que inferior a 10m³/mensual y el modelo MRI-CGCM3 no se visualiza, concluyéndose que posee un caudal igual a 0m³/mensual.

En todos los escenarios el modelo HADGEM-ES presenta un pico entre los meses de enero a abril y CSIRO-MK3-6-0 no se visualiza en las gráficas.

Tabla 34.

Caudal Promedio Anual

Escenario	Caudal Promedio Anual Observado	Modelo (m ³ /año)			
		CSIRO-MK3-6-0	HADGEM-ES	MIROC5	MRI-CGCM3
2.6	15.8	-29	-13	0	-7
4.5		-33	-11	-1	0

6.0	-33	-15	-2	-4
8.5	-27	-8	-2	-32

Nota: La presente tabla muestra el caudal promedio anual de los modelos climáticos comparados con el caudal real observado. Donde todos los escenarios demuestran un flujo anual inferior a 0 m³/año.

Tabla 35.

Variación del Caudal Promedio Anual

Escenario	Modelo			
	CSIRO-MK3-6-0	HADGEM-ES	MIROC5	MRI-CGCM3
2.6	-186%	-85%	1%	-45%
4.5	-207%	-71%	-7%	-1%
6	-206%	-97%	-13%	-28%
8.5	-172%	-49%	-14%	-203%

Nota: La presente tabla muestra que, los modelos climáticos poseen una variación negativa con respecto al caudal real anual. Excepto el modelo climático MIROC 5 que posee una variación 1%.

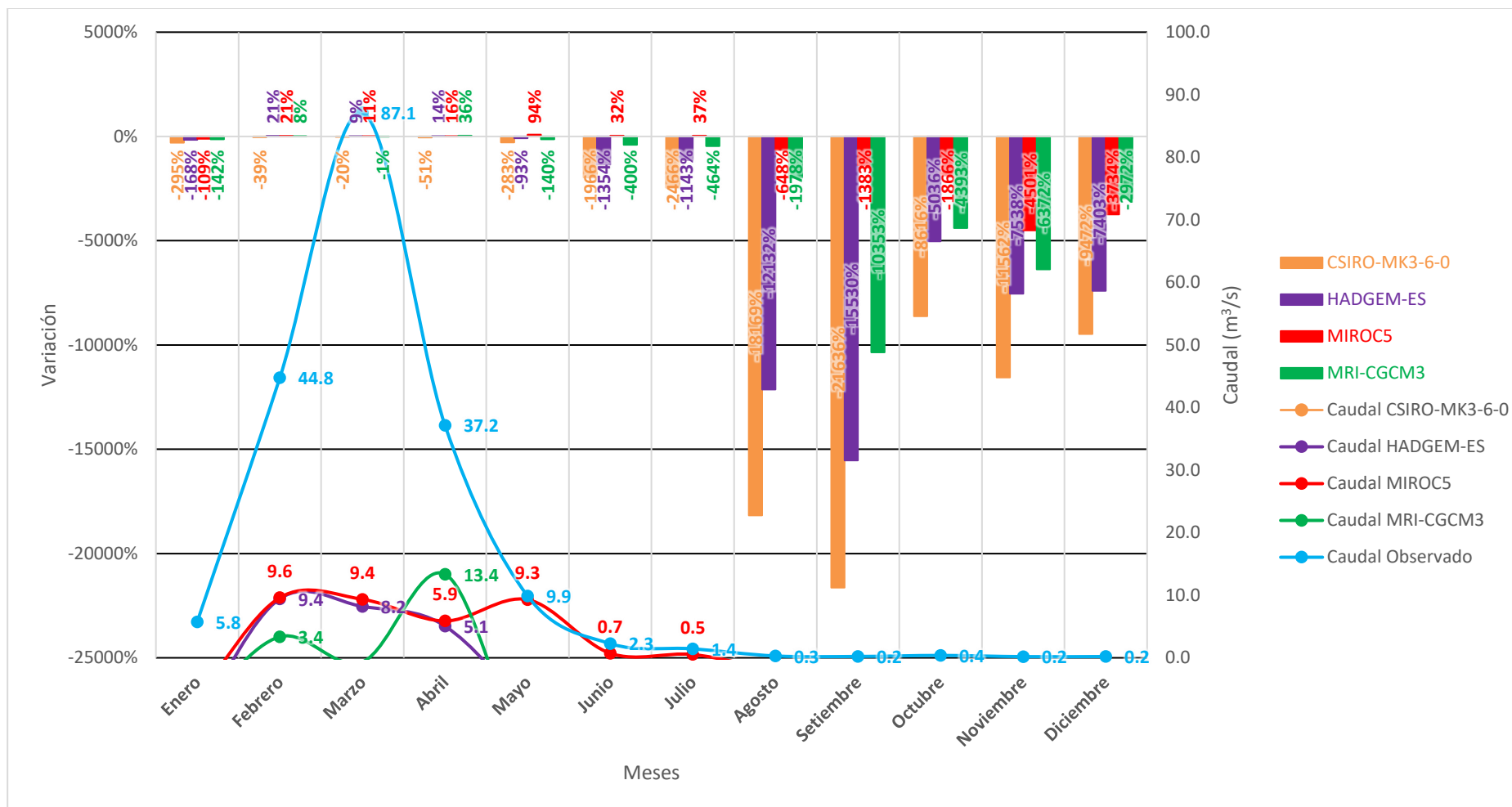


Figura 54. Variación del Caudal de la Cuenca Yauca – RCP 2.6

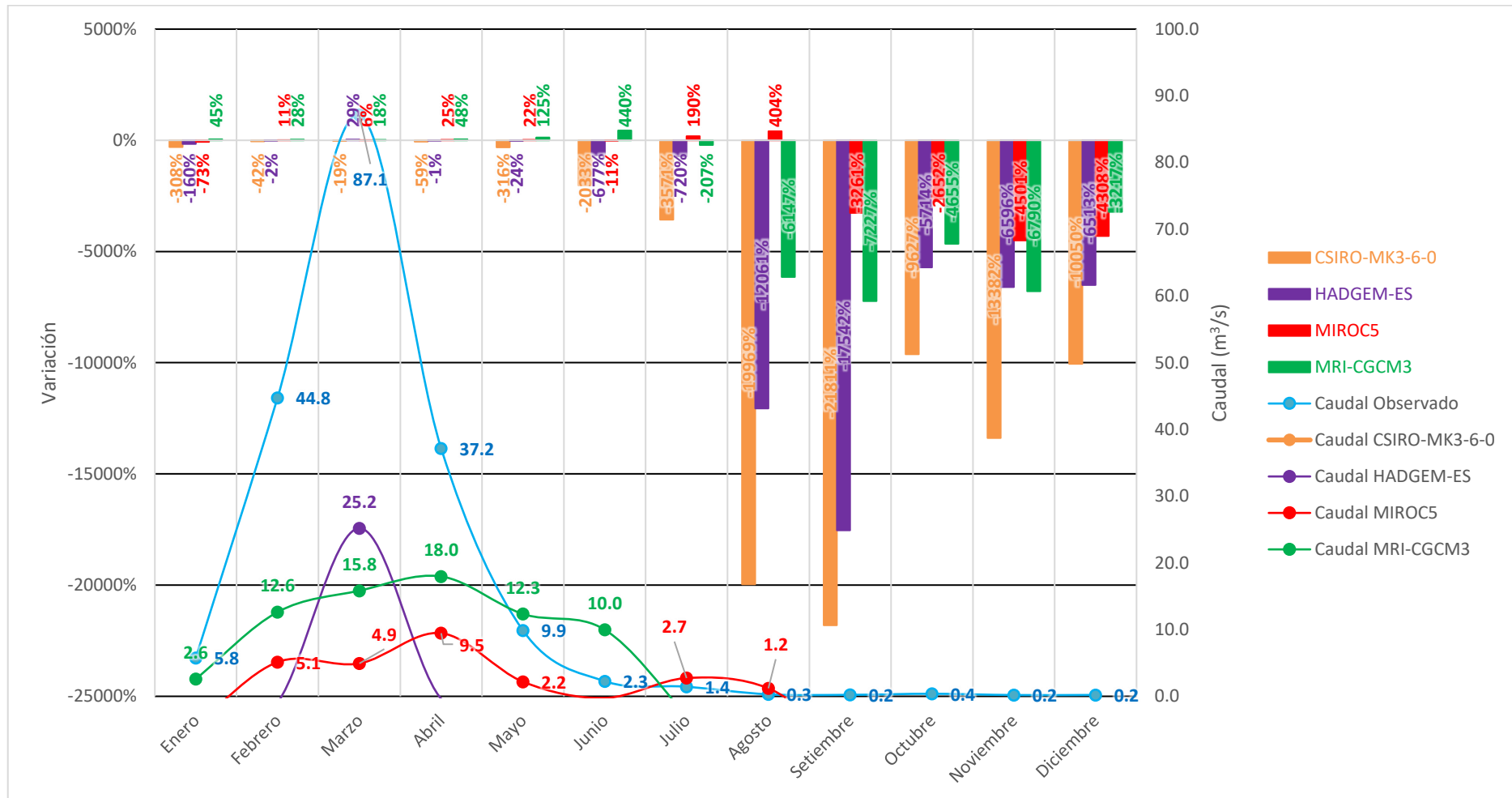


Figura 55. Variación del Caudal de la Cuenca Yauca – RCP 4.5

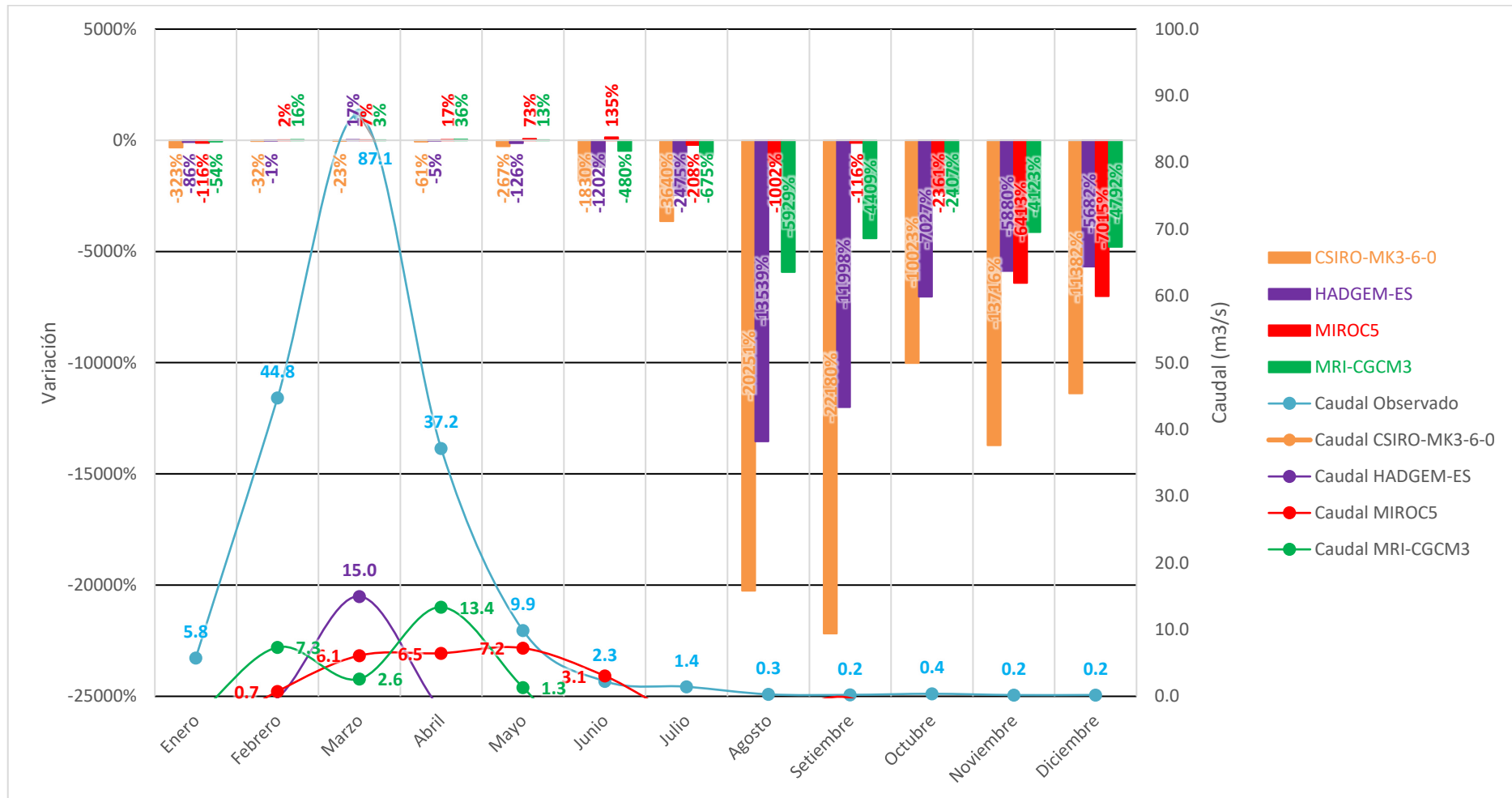


Figura 56. Variación del Caudal de la Cuenca Yauca – RCP 6.0

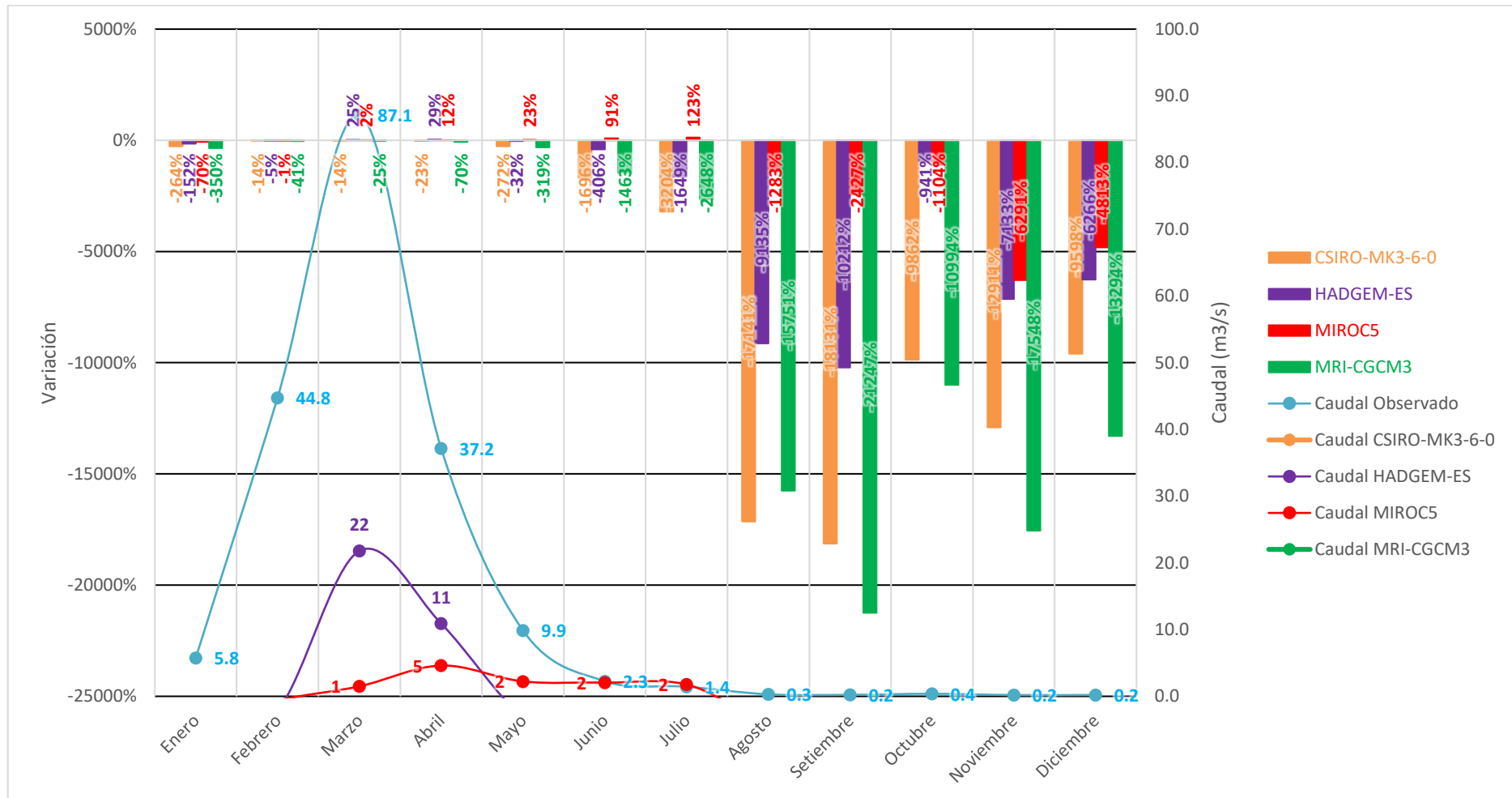


Figura 57. Variación del Caudal de la Cuenca Yauca – RCP 8.5

2.5.1.4.4.2 Impacto Climático Sobre la Temperatura

Se realizó el cálculo de la temperatura promedio anual de la cuenca, para poder determinar los impactos del cambio climático sobre la cuenca.

La **Tabla 36** muestra la temperatura promedio anual de acuerdo a los modelos climáticos y los escenarios que plantearon cada uno de ellos. Donde el modelo CSIRO-MK3-6-0 han obtenido valores que varían entre 1°C y 2°C para cada RCP, El modelo climático MRI-CGCM3 muestra que la temperatura promedio para el año 2100 (RCP 2.6 y 8.5) puede variar entre 2° y 1°C y para el año 2050 (RCP 4.5 y 6.0) de igual forma.

Para determinar el impacto del Cambio Climático, con respecto a la temperatura, se empleó un análisis de variación. Donde se muestra que el modelo climático CSIRO-MK3-6-0 posee una variación de 13% y 12% para cada escenario (ver **Tabla 37**). Pero el modelo HADGEM2-ES posee una variación negativa entre -30% y -40%. Con respecto a los modelos MRI-CGM3 plantean una variación negativa a largo plazo (RCP 2.6 y 8.5) y a corto plazo (RCP 4.5 y 6.0) posee una variación positiva. El modelo climático MIROC5 tiene un comportamiento contrario, al modelo que se explicó anteriormente.

Se realizó un análisis a nivel mensual donde se observó que, las temperaturas disminuyen entre los meses de febrero a agosto (inverno) y de setiembre a diciembre (temporada calurosa) comienza a ascender.

Considerando un escenario RCP 2.6 y RCP 8.5 (**Figura 58** y **Figura 61**) se muestra que el modelo MIROC5 no presentó una variación mensual de la temperatura muy drástica. En comparación con los modelos MRI-CGCM3 y

HADGEM2-ES la temperatura desciende de manera progresiva en la temporada de invierno.

El RCP 4.5 y RCP 6.0 (ver **Figura 59** y **Figura 60**) mostro que el modelo climático MRI-CGCM3 no posee una variación de temperatura mensual muy drástica. Los modelos MIROC5 y HADGEM2-ES muestran una variación progresiva entre los meses de invierno.

Tabla 36.

Temperatura Promedio Anual

Escenarios	Temperatura Promedio Anual Observada	Modelos (°C)			
		CSIRO-MK3-6-0	HADGEM2-ES	MRI-CGCM3	MIROC5
2.6	16.36	2.19	-6.46	-4.58	2.19
4.5		2.17	-6.42	2.17	-1.76
6.0		1.87	-6.62	1.87	-3.35
8.5		1.92	-4.84	-0.33	1.92

Nota: La presente tabla muestra las temperaturas promedio anual de los modelos climáticos, que son comparados con respecto a la temperatura promedio anual observada de la cuenca Yauca.

Tabla 37.

Variación de la Temperatura Promedio Anual

Escenarios	Modelos			
	CSIRO-MK3-6-0	HADGEM2-ES	MRI-CGCM3	MIROC5
2.6	13%	-40%	-28%	13%
4.5	13%	-39%	13%	-11%
6.0	11%	-40%	11%	-20%
8.5	12%	-30%	-2%	12%

Nota: La presente tabla muestra la variación de la temperatura de acuerdo a la temperatura promedio de la cuenca y los diversos escenarios que plantean los modelos climáticos, para largo corto plazo.

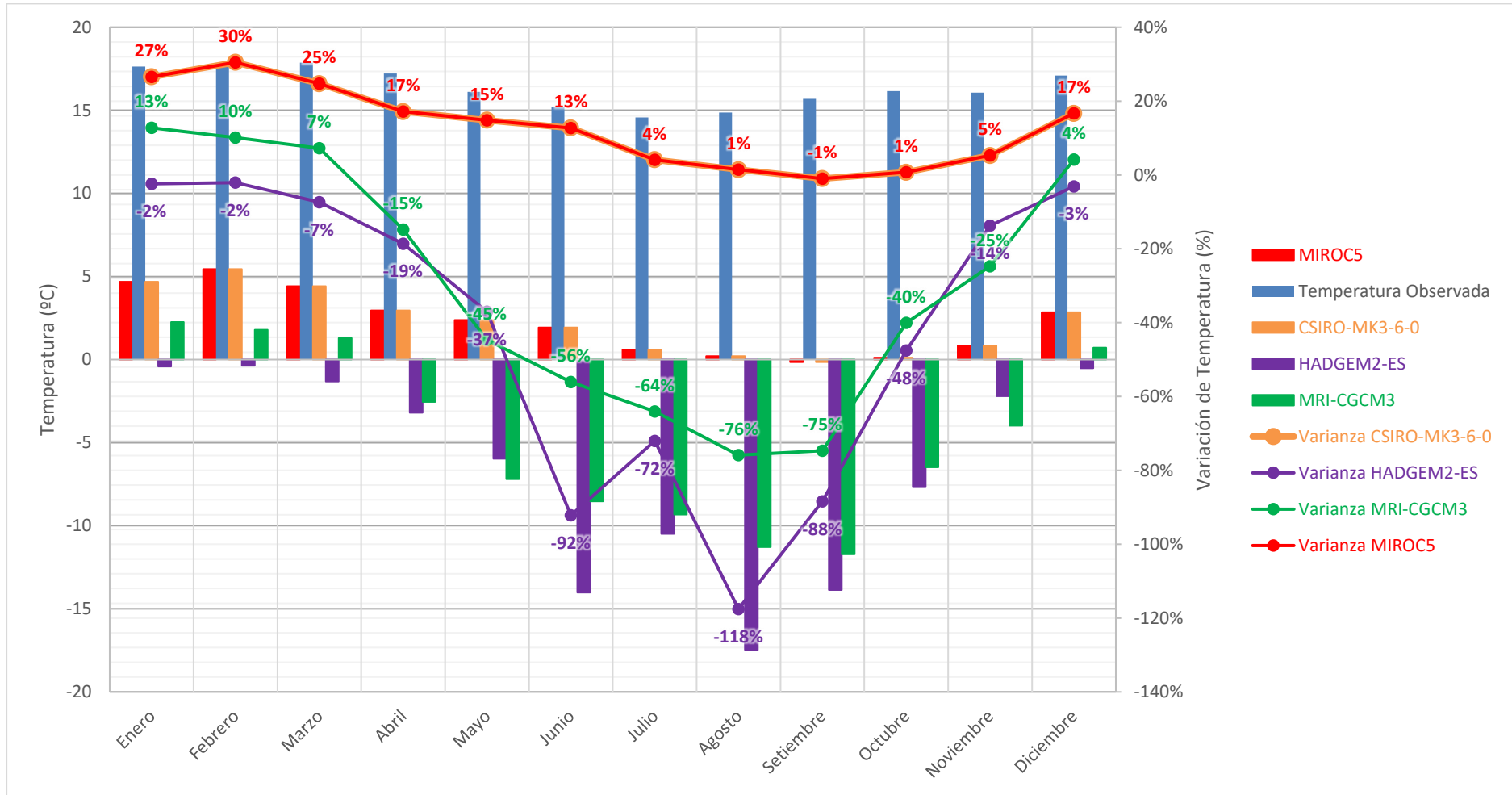


Figura 58. Variación de Temperatura – RCP 2.6

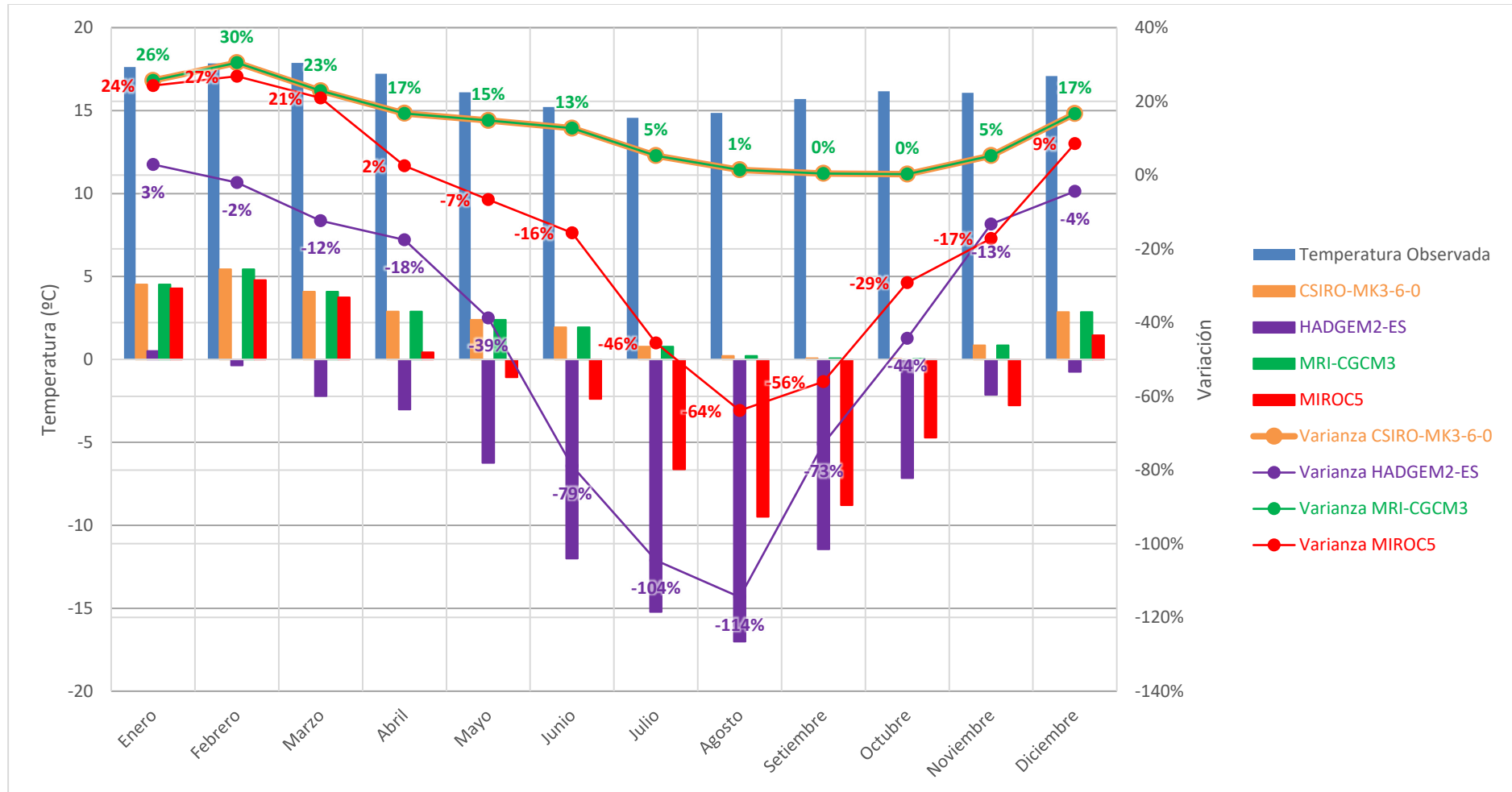


Figura 59. Variación de Temperatura – RCP 4.5

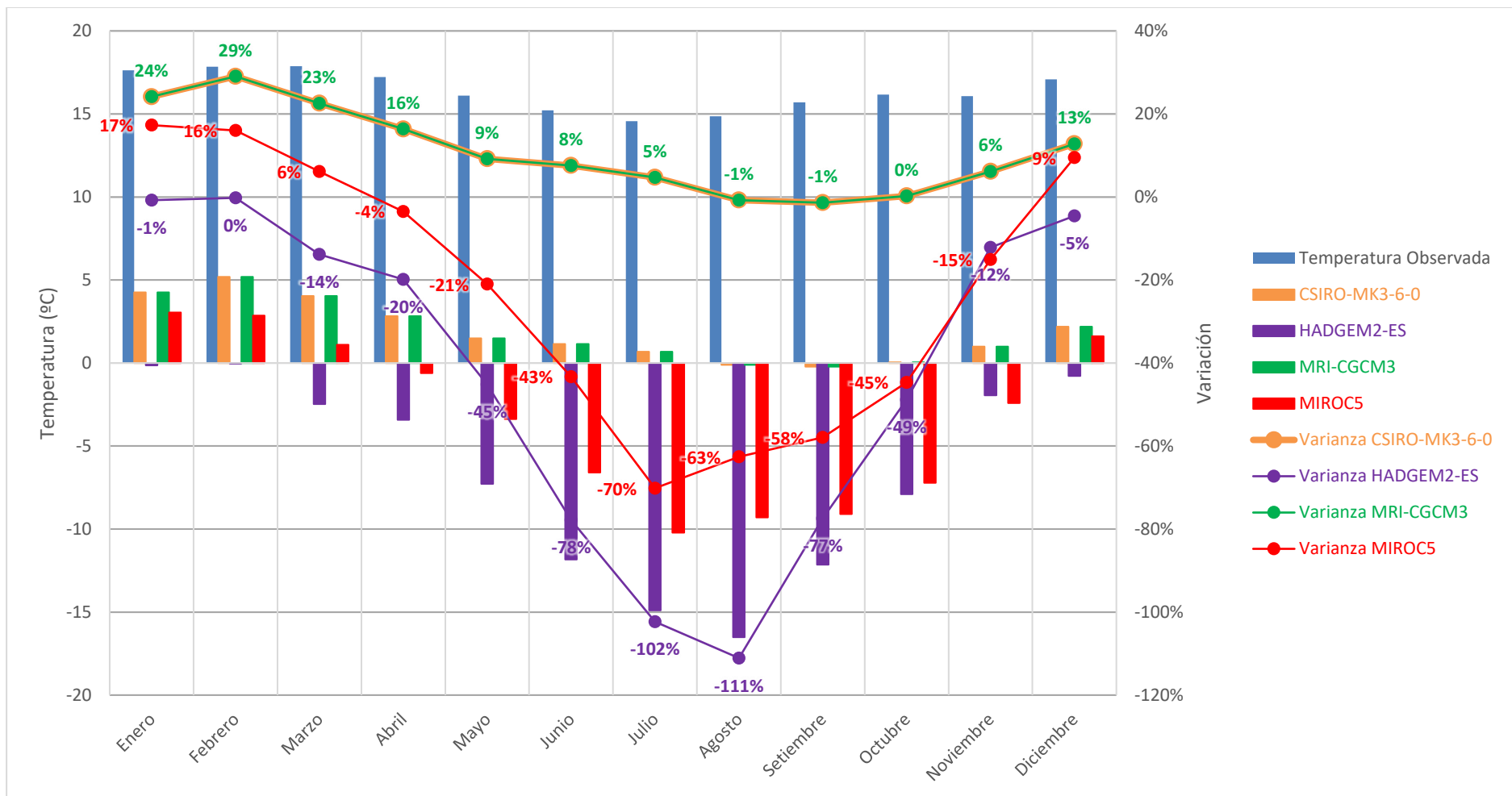


Figura 60. Variación de Temperatura – RCP 6.0

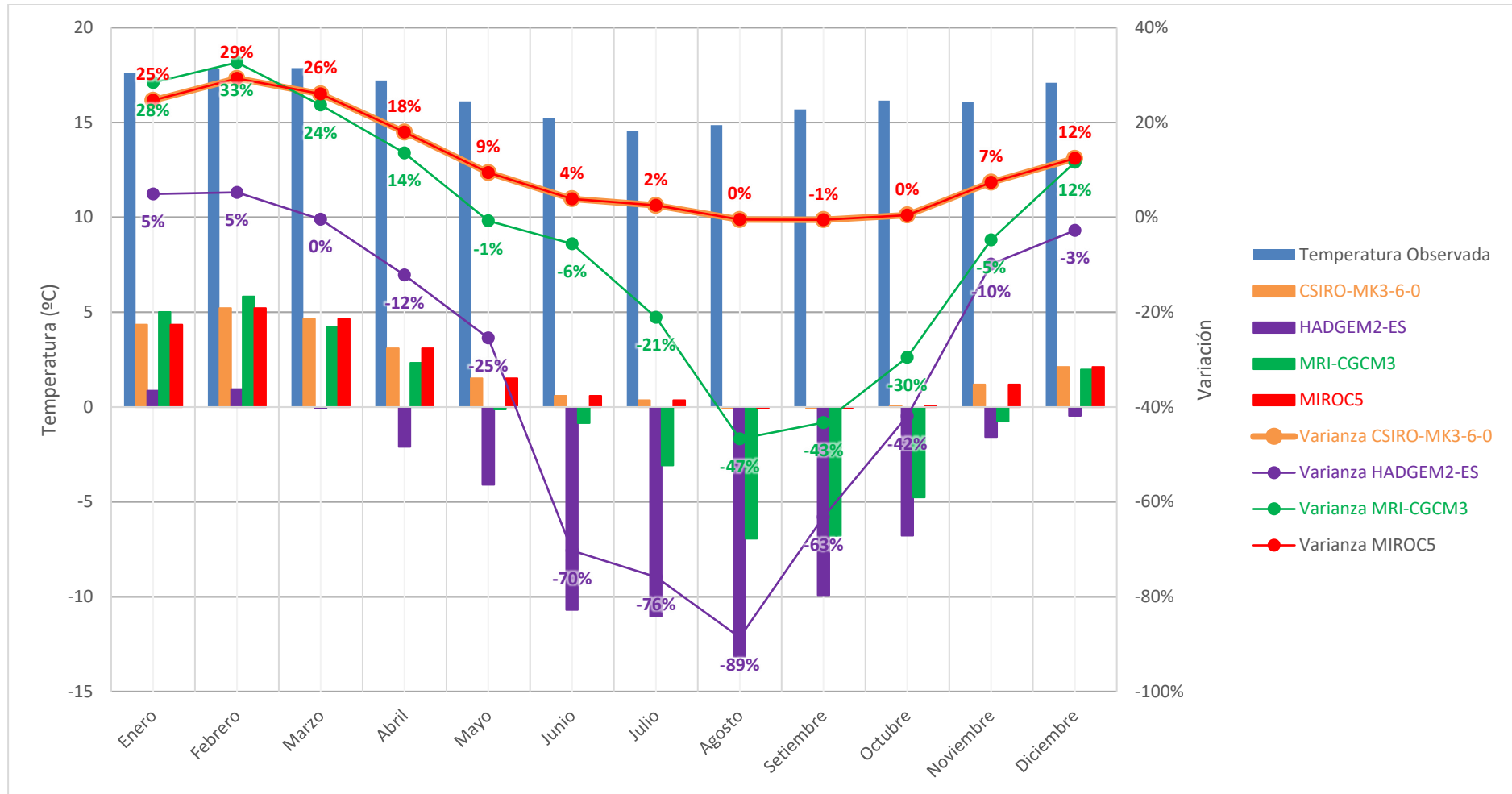


Figura 61. Variación de Temperatura – RCP 8.5

2.5.1.4.4.3 Impacto Climático Sobre la Precipitación

La **Tabla 38** se determinó la precipitación promedio anual observada y simulada de acuerdo a los modelos climáticos. Donde la precipitación varía para cada escenario entre 4, 12, 10 y 7 mm/mensual, para los modelos CSIRO-M3-6-0, HADGEM2-ES, MRI-CFCM3 y MIROC respectivamente. Estos valores que se han obtenido por los MCG, son superiores con respecto a la precipitación observada.

Se determinó el impacto del cambio climático a través de la de la variación de la precipitación promedio anual (ver **Tabla 39**) donde se muestra que la precipitación que se propone por los Modelos Circulares Generales (MCG) son superiores en más de un 100%.

También se realizó un análisis a nivel mensual donde concluyo que la época húmeda inicia en abril y va descendiendo hasta el mes de diciembre.

Los RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 (ver **Figura 62** a la **Figura 65**) se muestra que el modelo CSIRO-MK3-6-0 posee un comportamiento similar a la precipitación real. Los modelos HADGEM2-ES y MRI-CGCM3 poseen similares comportamientos y presenta un pico entre los meses de abril a julio. El modelo MIROC5 podemos mencionar que tiene un comportamiento medio de los modelos expuestos anteriormente.

Tabla 38.

Precipitación Promedio Anual

Escenarios	Precipitación Promedio Anual Observada	Modelos			
		CSIRO-MK3-6-0	HADGEM2-ES	MRI-CGCM3	MIROC5
2.6	1.5	4.8	12.0	10.3	7.8

4.5	4.9	12.2	10.7	7.4
6.0	4.9	11.0	10.3	7.2
8.5	5.3	11.4	11.6	7.4

Nota: La presente tabla muestra los modelos climáticos, donde se ha calculado la precipitación promedio anual y se compara con respecto a la precipitación anual observada, para cada escenario. Donde se observa que existe un aumento a largo y corto plazo.

Tabla 39.

Variación de la Precipitación Promedio Anual

Escenarios	Modelos			
	CSIRO-MK3-6-0	HADGEM2-ES	MRI-CGCM3	MIROC5
2.6	325%	806%	695%	522%
4.5	332%	821%	720%	498%
6.0	332%	743%	691%	483%
8.5	360%	766%	783%	499%

Nota: La presente tabla muestra, la variación de la precipitación promedio anual porcentual, donde se observa que existe un aumento de la precipitación en más de 100%.

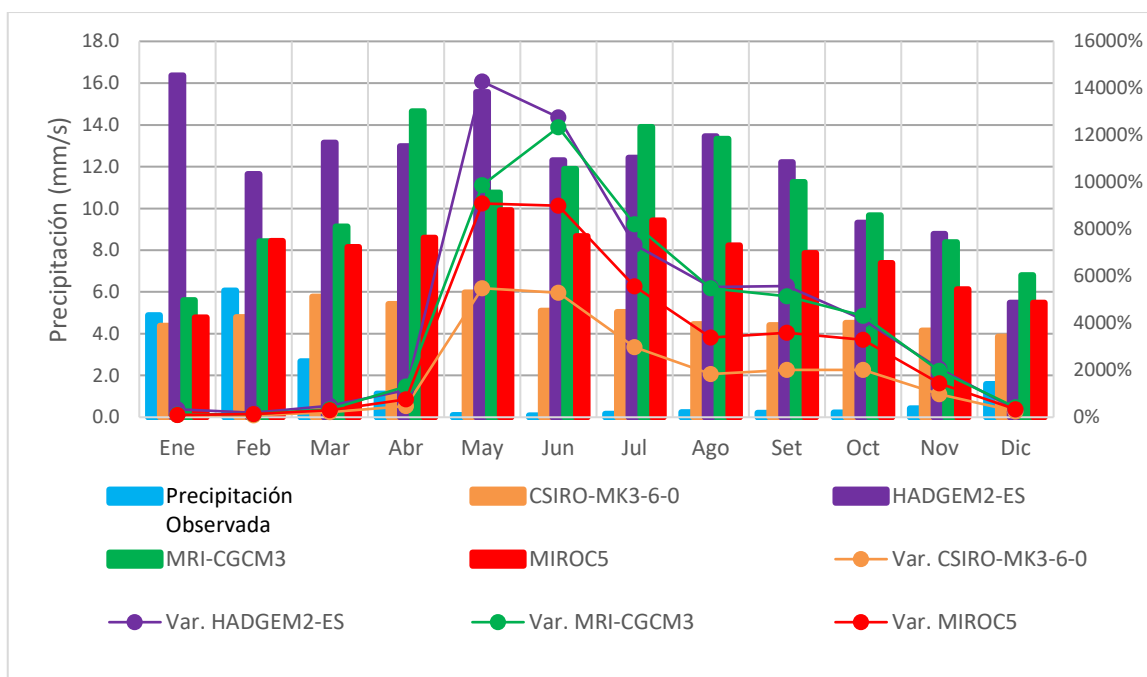


Figura 62. Variación de la Precipitación – RCP 2.6

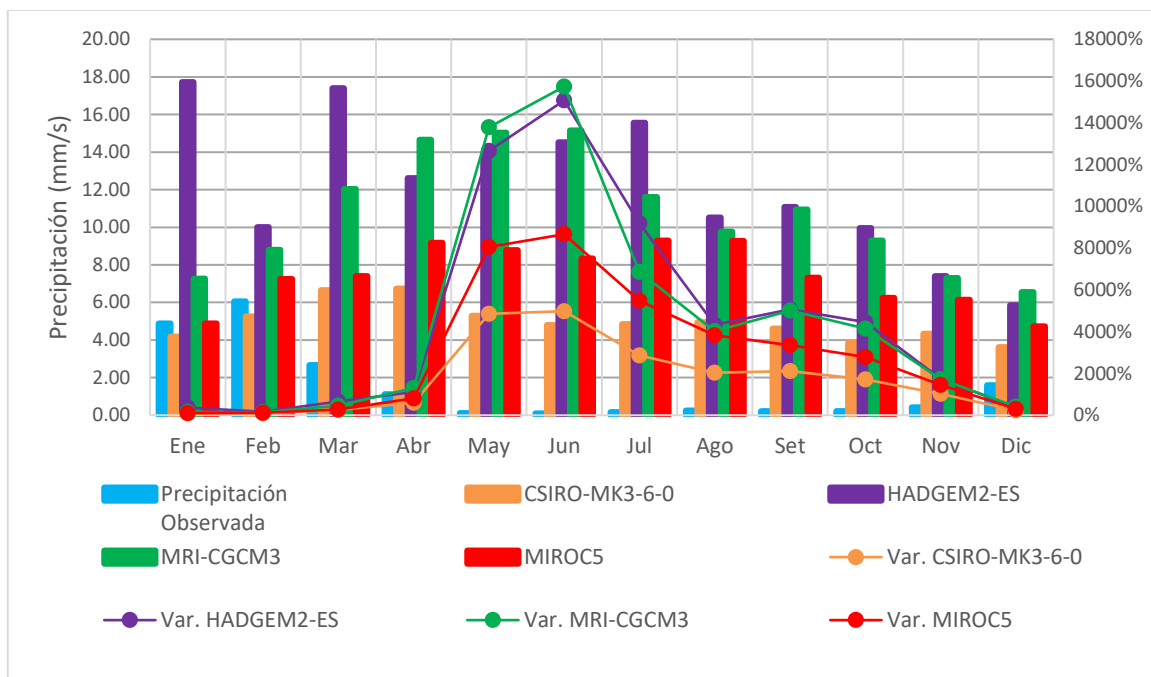


Figura 63. Variación de la Precipitación – RCP 4.5

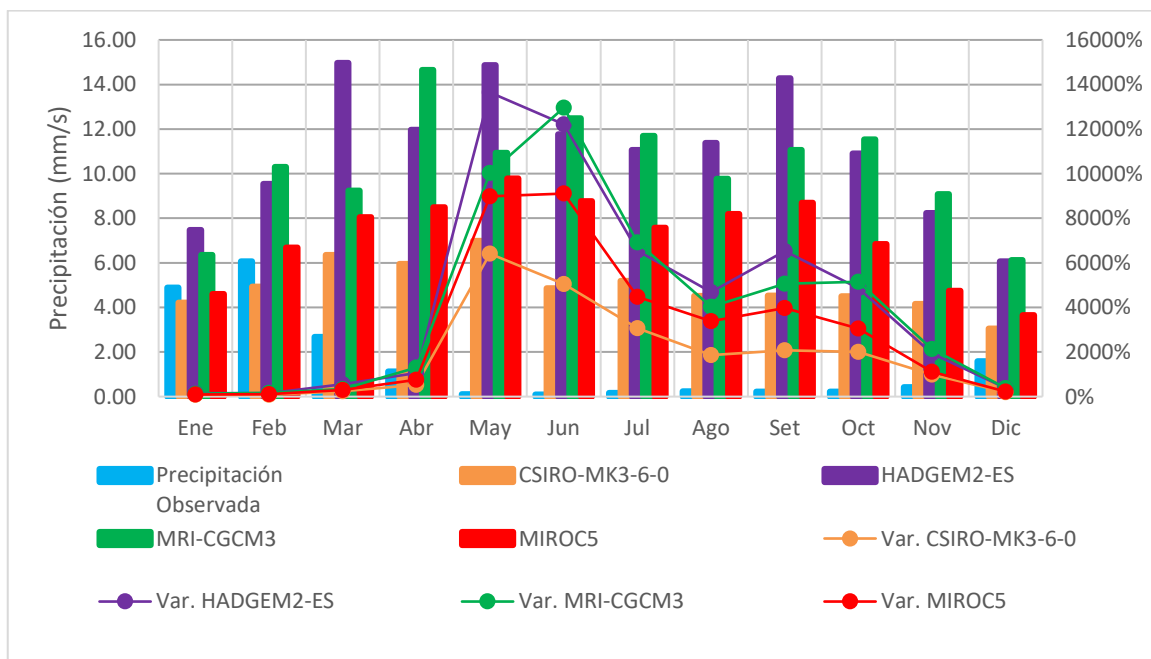


Figura 64. Variación de la Precipitación – RCP 6.0

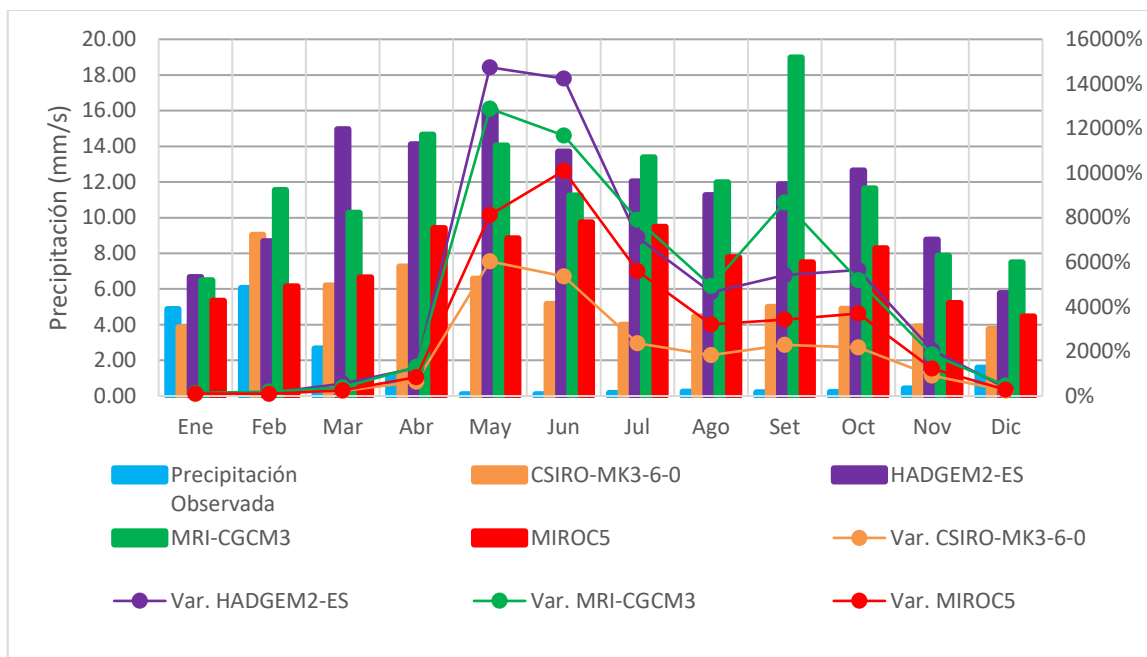


Figura 65. Variación de la Precipitación – RCP 8.5

2.6. Aspectos Éticos

La metodología de investigación no atenta contra el bienestar público ni con ningún componente ambiental. Debido a que todas las mediciones se realizan a través de equipos satelitales, que no tienen contacto físico con la superficie o con estaciones climatológicas e hidrológicas que han sido ubicadas por SENAMHI que pueden ser retiradas en cualquier momento y regresar a su condición inicial el área de estudio.

Al contrario, con esta investigación, se busca solucionar un problema de vital importancia, que es determinar cómo impacta el cambio climático en la cuenca. Pero basados en los antecedentes locales, se menciona que, en la época seca, la oferta hídrica que genera la cuenca del río Yauca, no satisface a la demanda de los sectores económicos.

Toda la información que se genere, como parte del proceso de la investigación será de vital utilidad para proponer un plan de gestión de la cuenca del río Yauca.

CAPÍTULO III.

RESULTADOS

3.1. Variables Afectadas por el Cambio Climático Y Necesaria en el Modelo SWAT

Se determino las variables necesarias para el modelo hidrológico SWAT que a su vez son afectadas por el cambio potencial del Cambio Climático, a través del uso de la revisión sistemática, que permitió identificar aquellas variables que forman parte de la ecuación del modelo hidrológico SWAT (ver Ecuación 7) fueron categorizadas y clasificadas (ver **Tabla 12**) para poder posteriormente ser reclasificadas, para que la extensión de ArcGIS (ArcSWAT) pueda reconocerlos

Estas variables que fueron categorizadas en geomorfológica que se divide en tipo de suelo (ver Anexo N.º 2), uso de suelo (ver Anexo N.º 3), pendiente de la cuenca (ver Anexo N.º 4). La variable hidrológica que se identificaron las sub cuencas y el sistema hídrico de la cuenca (ver Anexo N.º 5) y las variables climáticas.

En la **Tabla 2** se mostró, aquellas variables climáticas que se ven afectadas por el cambio climático y las evidencias que se tiene para correlacionar las variantes con dicho fenómeno. Estas variantes son precipitación, la temperatura y los recursos hídricos.

3.2. Calibración y Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT

El proceso de calibración se fue llevado a cabo, a través del programa SWAT-CUP que posee en su interior el algoritmo SUFI-2 (ver Ecuación 8). Este algoritmo es el responsable del proceso de calibración, debido a que realiza un numero de simulaciones y compara el caudal real con el caudal obtenido por la mejor simulación (Simulación numero 21).

Los parámetros adimensionales (ver **Tabla 27**) de la simulación seleccionada son reajustados y obtener un caudal que se aproxime mucho mas a la realidad (ver **Tabla 29**). Adicional a ello, como parte del proceso de calibración se uso los valores de la Curva Numero que fueron calculadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y se ajustaron de igual forma (ver **Tabla 30**).

Se realizo el proceso de validación del modelo, con ayuda del coeficiente estadístico Nash (ver **Tabla 5**) que permitió determinar el rendimiento del modelo. Para validar el caudal simulado se comparo el caudal observado del año 2016 con el caudal generado por el modelo SWAT. Obteniéndose un excelente rendimiento por el modelo (ver **Tabla 33 y Figura 34**).

Los Modelos Circulares Generales (MCG) que plantean las Rutas de Concentración Representativas (RCP), que son escenarios climáticos (ver **Tabla 4**) que poseen información histórica a corto (año 2050) y largo plazo (año 2100). Se introdujeron, como información climática, el modelo hidrológico ajustado y validado, para predecir los impactos del cambio climático sobre la cuenca del rio Yauca.

3.3. Descripción de las Predicciones del Impacto Potencial del Cambio Climático Generadas por el Modelo SWAT

Se predijo el caudal para el año 2050 y 2100 (ver **Figura 40** a la **Figura 53**) empleado los modelos climáticos (MCG) que a su vez emplea las RCP. El resultado que se ha obtenido es, el caudal presenta una tendencia positiva o negativa a corto plazo. En la **Tabla 40** se hace mención de la tendencia del caudal, para los diversos escenarios, de acuerdo al modelo climático. Donde el modelo climático CSIRO-MK3-6-0 y HADGEM2-ES poseen una tendencia similar en un RCP 2.6 y 4.5 pero difiere en los RCP 6.0 y 8.5. El modelo MRI-CGCM3 posee una tendencia positiva en todos

los escenarios y el modelo MIROC5 posee una tendencia a largo plazo (RCP 2.6 y 8.5) negativa leve y a corto plazo varia entre negativa y positiva.

En la **Tabla 41** muestra si los modelos climáticos, pueden generar un caudal mayor a $0 \text{ m}^3/\text{s}$ de acuerdo a cada escenario (RCP). El modelo CSIRO-MK3-6-0 no genera ningún flujo a corto y a largo plazo. El modelo HADGEM2-ES solo genera un flujo cuando se encuentra en un escenario RCP 6.0 con un horizonte al año 2050 como también el modelo MIROC y ambos modelos climáticos al año 2100 con un RCP 4.5 poseen un caudal superior a $0 \text{ m}^3/\text{s}$. El modelo MRI-CGCM3 a corto plazo tiene un caudal nulo y a largo plazo bajo un escenario RCP 6.0 presenta el mismo comportamiento.

A si mismo se analizó el caudal promedio anual (ver **Tabla 34**), para determinar la variación porcentual (ver **Tabla 35**) y se concluyó que los modelos CSIRO-MK3-6-0 y HADGEM-ES tiene una variación negativa, mucho mayor al 100% con respecto al caudal promedio anual observado. En comparación con los modelos climáticos MIROC5 y MRI-CGCM3 obtuvieron una variación negativa inferior al 50%.

A un nivel mensual se determino que el modelo MIROC5 y MRI-CGCM3 poseen un flujo casi constante y los dos modelos (CSIRO-MK3-6-0 y HADGEM-ES) no muestran un caudal constante, entre los meses de avenida (febrero a mayo) y esto se observó en las **Figuras 54** a la **Figura 57**.

Con respecto a la temperatura se mostró en la **Tabla 36**, que existe una variación negativa del 13% ($2.1 \text{ }^\circ\text{C}$), 40% ($-6.4 \text{ }^\circ\text{C}$), 15% ($2 \text{ }^\circ\text{C}$) y 20% ($3 \text{ }^\circ\text{C}$) para los modelos CSIRO-MK3-6-0, HADGEM2-ES, MRI-CGCM3 y MIROC5 respectivamente. Esto se traduce que a corto plazo y largo plazo la temperatura ira

disminuyendo. Esto sucederá entre los meses de febrero a setiembre (ver **Figura 58** a la **Figura 60**). Esta información que se menciona previamente se describe en la

Tabla 42.

La precipitación promedio anual como se mostró en la **Tabla 38** a aumentado y esto se observo a mayor detalle a través de la variación (ver **Tabla 39**). La variación de la precipitación proyectada con respecto a la precipitación real (1.5 mm/año), aumenta en más de 100% a corto y largo plazo. Este evento natural sucederá entre los meses de febrero a julio como se muestra en las **Figuras 62** a la **Figura 65**, pero se resumen la temporada húmeda en la **Figura 66**.

Tabla 40.

Tendencia del caudal

Escenarios	Tendencia de los Modelos			
	CSIRO-MK3-6-0	HADGEM2-ES	MRI-CGCM3	MIROC5
2.6	Positiva - Acentuada	Positiva - Acentuada		Negativa - Leve
4.5	Positiva - Leve	Positiva - Leve	Positiva - Acentuada	Negativa - Acentuada
6.0	Positiva - Acentuada	Positiva - Leve		Positiva - Acentuada
8.5	Negativa - Acentuada	Positiva - Acentuada		Negativa - Leve

Nota: La presente tabla se hace mención de las tendencias o rectas de la gráfica estadística. Cuando se menciona la acentuación y leve se referencia al nivel de inclinación.

Tabla 41.

Producción de Agua de acuerdo los RCP y MCG

Horizonte (años)	Escenarios	Flujo de agua de los Modelos (m ³ /s)			
		CSIRO-MK3-6-0	HADGEM2-ES	MIROC5	MRI-CGCM3
2050	2.6			Negativa	
	4.5	Negativa	Negativo	Positiva	Negativa

	6.0		Positivo		
	8.5		Negativo	Negativa	
	2.6		Negativo	Negativa	
2100	4.5	Negativo			Positiva
	6.0		Positivo	Positiva	Negativa
	8.5				Positiva

Nota: La presente tabla muestra el lujo de agua que genera la cuenca considerando como información base el escenario climático y el modelo climático. La palabra Negativo hace referencia que posee un caudal igual o inferior a 0 m³/s y la palabra Positiva denota que existe un caudal superior a 0m³/s.

Tabla 42.

Variación de Temperatura Mensual de acuerdo a los RCP

Escenarios	Modelos Climáticos	Variación De Temperatura %	Temperatura (°C)	Meses	Temporada
RCP 2.6, 4.5, 6.0 Y 8.5	CSIRO-MK3-6-0	13	2.1	Febrero a Setiembre	Invierno
	HADGEM2-ES	40	-6.4		
	MRI-CGCM3	15	2		
	MIROC5	20	3		

Nota: La presente table muestra las variaciones de la temperatura con respecto a los escenarios y modelos climáticos para los meses de febrero a setiembre.

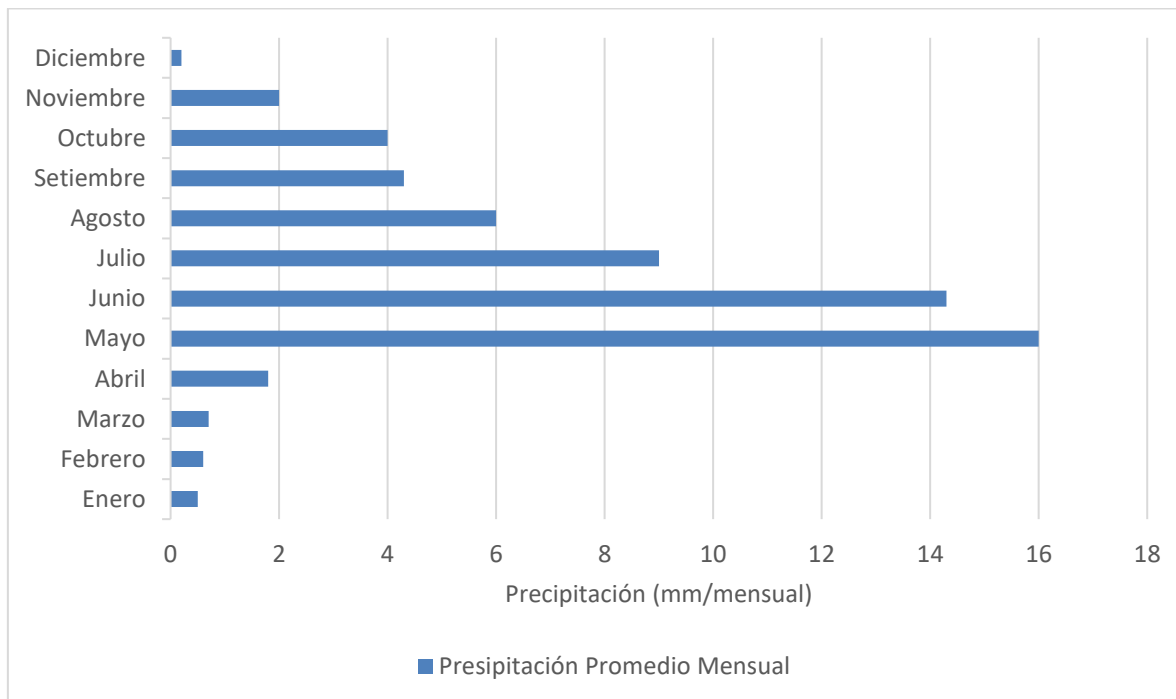


Figura 66. Variación Máxima de la Precipitación – RCP 2.6

CAPÍTULO IV.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

En la presente investigación se ha permitido determinar las variables que se ven afectadas por el cambio climático y que a su vez son requeridas por el modelo SWAT. Estas variables son la pendiente, el tipo de suelo, uso de suelo que se encuentran dentro de la categoría de geomorfología y la temperatura, precipitación que forman parte de la categoría climática y las variables hidrológicas, las cuales el caudal observado. El investigador Rivera Toral y otros investigadores (2012) quien cita a Dr. Jeff Arnold, quien es el autor de la ecuación SWAT, en la investigación titulada *Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México* y el investigador Leon Ochoa y otros (2019) en su investigación que lleva como título *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático*. Han hecho uso de las mismas variables que se ha obtenido como resultado de la revisión sistemática, ya que son elementos indispensables dentro de la fórmula o modelo hidrológico SWAT.

En el proceso que se llevó a cabo para recopilar la información geográfica e histórica se presentaron diversas limitaciones, como la ubicación de estaciones hidrográficas y climáticas que posean información histórica completa. Es por ello que se empleó información de simulaciones matemáticas y estadísticas a partir de una red de estaciones a nivel nacional (Data Pisco). Otra de las limitaciones que se tuvieron que afrontar, es la escasez de información geográfica a nivel local, como son el tipo de suelo y el uso de suelo de la cuenca Yauca de igual forma se ha empleado información general que se extrajo a través de imágenes satelitales. La información de que fue

recopilada de fuentes generales, que han sido empleadas para introducirse en el modelo SWAT, tiene como resultado información general, que puede dar noción de los cambios que podrían suceder por el impacto climático.

Por otro lado, el proceso de calibración del modelo, se empleó el algoritmo SUFI-2 que según el investigador Jodar Abellan y otros investigadores (2018) quien realizó su investigación titulada *Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrográfica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT* menciona que la ecuación SUFI-2 es la que mejor se adapta al caudal observado. Esta afirmación, se corroboró en el proceso de calibración donde se obtuvo buenos resultados. Esto fue explicado en la **Figura 31** donde se realiza el proceso de calibración y en la **Figura 32** se observó que el caudal simulado, tiene un mejor ajuste, con respecto al caudal observado.

El investigador Del Aguila (2021) menciona en su investigación que se tituló *Modelamiento del proceso hidrográfico en cuencas de la sierra central del Perú* que el modelo SWAT es mucho más fiable para determinar los impactos del cambio climático y el resultado que se obtuvo del modelamiento menciona que habría un aumento en el caudal de 29.4% y 34.1% en la cuenca de Anya y en Mchique. Para medir la fiabilidad o rendimiento del modelo SWAT se empleó el estadístico de Nash, que permitió clasificar a través de la aplicación de una fórmula matemática, que compara el caudal simulado con respecto al caudal observado, generando así un valor adimensional. Este valor es comparado de acuerdo a una serie de rangos y determinar de esa forma el rendimiento del modelo (ver **Tabla 5**).

Con respecto a nuestro resultado que se obtuvo que el modelo SWAT tiene un excelente rendimiento con un valor de 0.91 (ver **Tabla 33**).

En lo que corresponde a la descripción y predicción del impacto potencial del cambio climático. El autor Ccama y otros investigadores que aplicaron el modelo SWAT en la investigación titulada como *Modelamiento de la vulnerabilidad del recurso hídrico considerando la incidencia del cambio climático en la cuenca del río Chancay-Lambayeque usando SWAT* demostro que, la temperatura, precipitación y caudal tienden a un incremento hasta 3 °C, 59.7 % y 62.9% correspondientemente para el año 2100. Con relación a la presente investigación se demostró que el caudal tiene una tendencia negativa para el año 2050 y 2100, esto representa una variación de entre 1% a 80% siendo los meses de enero a junio que corresponde a los meses de lluvia. Con respecto a la temperatura tiene una tendencia a disminuir de 16.5 °C a -6.5°C con una variación de 40% y finalmente la precipitación se predijo que tendrá un aumento en más de 100%.

Para realizar las predicciones se requirieron de modelos climáticos (MCG), entre ellos se tienen al modelo CSIRO-MK3-6-0, HADGEM-ES, MIROC5 que a su vez plantearon las Rutas de Concentración Representativas o escenarios climaticos.

Esta predicción que se mencino, afecta a las zonas agricolas de que posee la cuenca Yauca y aumenta los problemas sociales que ya se han reportado dentro del estudio de linea base hidrológica de la ANA. La implicancia con respecto a la presente investigación, es debido a que busca servir de base para realizar otros estudios que conlleven a la gestión del recurso hídrico.

La autora Ramos Jauregui (2014) con la investigación titulada, *Estimación del Efecto del Cambio Climatico en la Precipitación en la Costa Norte del Perú Usando Simulaciones de Modelos Climáticos Globales* planteo cuarenta modelos MCG donde obtuvo que nueve de ellos tienen un buen ajuste con respecto a la temperatura y

precipitación. Entre estos MCG se encuentra los modelos MIROC5, MRI-CGCM3, HADGGEM2-ES. Pero también obtuvo como resultados modelos que se ajustan relativamente, como CSIRO-MK3-6-0. Estos resultados obtenidos por la investigadora, coinciden con nuestros resultados, ya que las variaciones de los primeros dos modelos se aproximan al caudal, precipitación y temperatura. En comparación con los modelos HADGEM2-ES y CSIRO-MK3-6-0.

El uso de la información histórica que tiene un horizonte para el año 2100 es un instrumento considerado de vital importancia, debido a la falta de información real a nivel local. Como sucedió en el presente estudio por la falta de evidencia bibliográfica, geográfica y climática.

4.2. Conclusiones

4.2.1. Conclusión con respecto al objetivo número uno

Se concluyó que las variables necesarias para el modelo hidrológico SWAT y que ayuden a predecir, los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca del río Yauca son las variables geomorfológicas que a su vez posee la pendiente, el uso y tipo de suelo. Las variables climáticas que contempla la temperatura y precipitación e hidrológicas (caudal, red hídrica).

4.2.2. Conclusión con respecto al objetivo número dos

Se llegó a la conclusión que la calibrar y aplicar el modelo SWAT para predecir los impactos potenciales del cambio climático sobre la cuenca del río Yauca. Se deben de usar el algoritmo SUFI-2 para la etapa de calibración y para determinar el rendimiento del modelo se emplea el estadístico de Nash.

Con el modelo calibrado se debe de emplear los Modelos Circular Geocéntrico o también llamados modelos climáticos para predecir el impacto potencial del cambio climático a corto (año 2050) y largo plazo (año 2100).

4.2.3. Conclusión con respecto al objetivo número tres

Se concluyo que para describir las predicciones obtenidas por el modelo SWAT sobre el impacto potencial del cambio climático sobre la cuenca del rio Yauca. Se deben de determinar la variación del caudal, temperatura y precipitación a largo plazo y correlacionar con la serie de alteraciones climáticas que conlleva el aumento o disminución de estas variables. Como son la disminución de la temperatura genera problema en la agricultura y la abundancia de precipitación acelera el proceso de desertificación conjuntamente con la ausencia de caudal.

4.3. Recomendaciones

Con respecto al primer objetivo y la conclusión número uno, se recomienda usar el modelo SWAT para poder determinar los impactos del cambio climático sobre la cuenca del rio Yauca. Ya que permite determinar el flujo que genera la cuenca, a través de diversos escenarios (RCP) que nos dejen predecir cambios que podrían suceder para el año 2050 y 2100.

Se recomienda usar el programa SWAT 12 debido a que es de libre acceso y no conlleva costos adicionales para las investigaciones. La información que es introducida al modelo a través del programa ArcSWAT, tiene que ser lo más precisa, esto ayudará a tener resultados mucho más exactos, con respecto al área de estudio que se está investigando.

Tomando en consideración el segundo objetivo y conclusión número dos, se recomienda buscar una base de datos que tenga un mayor alcance histórico, para el proceso de calibración y validación, que se realizar a través del algoritmo SUFI2, de cómo resultados valores iguales o superiores a 0.9 y sean clasificados, como un modelo preciso, por los coeficientes estadísticos de NASH.

Se recomienda usar información local de la zona a estudiar, ya que esto ayudará a tener un grado mayor de confiabilidad con respecto a los resultados. Pero si se desea realizar un estudio, que tenga como delimitación geográfica la cuenca Yauca se recomienda realizar, un estudio previo del tipo de suelo y actividades económicas, ya que esto influenciara en el flujo de agua que genera la cuenca.

Para terminar con respecto al objetivo y conclusión número tres, se sugiere usar los modelos MIROC5 y MRI-CGCM3 como herramientas o escenarios predatorias para determinar los impactos del cambio climático. Ya que se demuestra un cambio drástico en las variables climáticas y esto influye en el caudal.

Finalmente, se recomienda utilizar otro programa como QSWAT, que se basa en el modelo SWAT, para comparar resultados y poder predecir el impacto que puede ocasionar el cambio climático sobre la cuenca.

REFERENCIAS

- 2W2E GmbH. (29 de noviembre de 2021). *Tecnología y datos del ecosistema de water weather energy*. Obtenido de SWAT-CUP es un programa de incertidumbre de calibración para SWAT. También se puede utilizar para realizar análisis de validación y sensibilidad.: <https://www.2w2e.com/home/SwatCup>
- Agua, Autoridad Nacional del. (2015). *Generación del Mapa Temático de Curva Numero CN ANA*. ANA. Obtenido de <https://www.udocz.com/apuntes/55918/generacion-del-mapa-tematico-de-curva-numero-cn-ana-apoyame-con-un-me-gusta-gracias>
- Alarcón Hincapié, J., Zafra Mejía, C., & Echevarri Prieto, L. (2019). Cambio climático y recursos hídricos en Colombia. *U.D.C.A*, 22(2), 1-10. Obtenido de <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/1368/1836>
- Alencar da Silva Alves, K. M., Parodi D`avila, M. C., Silva Móbrega, R., & Opazo Albarran, D. (2019). Variabilidad Espacial y Temporal de la Cobertura Vegetal de los años 1984 a 2011 en la Cuenca Hidrográfica del Río Moxotó, Pernambuco, Brazil. *Diálogo andino*(58), 139-150. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-26812019000100139&lang=pt
- ANA. (2003). *Estudio de balance hídrico superficial de la cuenca del río Yauca*. Ayacucho y Arequipa: Autoridad Nacional del Agua. Obtenido de http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/estudio_hidrologico_yauca_0_0_3.pdf
- ANA. (2011). *Codificación y clasificación de cursos de agua superficiales del Perú*. Autoridad Nacional del Agua y Ministerio de Agricultura [Archivo PDF]. Obtenido de

<https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/596/ANA0000382.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANA. (11 de Noviembre de 2021). *Autoridad Nacional del Agua*. Obtenido de Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos - SNIRH: <http://sial.minam.gob.pe/picota/contenido/sistema-nacional-informacion-recursos-hidricos-snirh>

ANA. (21 de Noviembre de 2021). *Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego*. Obtenido de La Autoridad Nacional del Agua: <https://www.ana.gob.pe/contenido/la-autoridad-nacional-del-agua>

Andrades, J., Cuesta, L., Camargo, C., López, J., Torres, H., & Osorio, A. (2020). Propuesta metodológica para la construcción y selección de modelos digitales de elevación de alta precisión. *Colombia Forestal*, 23(2), 34-46. Obtenido de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/15155/15965>

Aparicio Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Grupo Noriega.

Arango Sales, H. (2003). Gestión de contenidos: el homo sapiens desde la antigüedad hasta la era digital. *ACIMED*, 11(5), 1-5. Recuperado el 01 de Noviembre de 2021, de Scielo: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352003000500009

Asuzar Véliz, F. A., & Lavado Casimiro, W. S. (2020). Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage. *Water*, 2-26. Obtenido de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/654>

Ballinas, M., Esperón Rodríguez, M., & Barradas, V. L. (2015). Estimating evapotranspiration in the central mountain region of Veracruz, Mexico. *Bosque*,

36(3), 445-457. Recuperado el 02 de Noviembre de 2021, de
<https://www.scielo.cl/pdf/bosque/v36n3/art11.pdf>

Bravo Morales, N. F. (2017). *Teledetección espacial Landsat, Sentinel2, Aster LIT y Modis*.

Universidad Nacional Agraria de la Selva. Obtenido de https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf

Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología Superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana.

Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Ccama Vilca, J. W., Turpo Turpo, R. E., & Lujano, L. E. (2020). Modelamiento de la vulnerabilidad del recurso hídrico considerando la incidencia del cambio climático en la cuenca del río Chancay-Lambayeque usando SWAT. *Universidad Peruana Unión*, 1-18. Obtenido de <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3330>

Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Correa Álvarez, P. F., Gonzáles Gonzáles, D., & Pacheco Alemán, J. G. (2016). ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE. SU REGULACIÓN JURÍDICA EN ECUADOR. *Universidad y Sociedad*, 8(3), 179-183. Recuperado el 01 de Noviembre de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202016000300024

Del Aguila Ríos, S. (2021). Modelamiento del proceso hidrológico en cuencas de la sierra central del Perú. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4659>

- Díaz Carvajal, Á., & Mercado Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Universidad del Norte*, 35(2), 452-470. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/852/85252030011/html/#B1>
- ESA. (19 de Noviembre de 2021). *ESA eduspace*. Obtenido de La misiones Earth Explorer de la ESA: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM3407SXIG_0.html
- Esri. (14 de Noviembre de 2021). *Esri*. Obtenido de ArcGIS Resouces: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- FAO. (1992). *Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas*. Roma: Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación. Obtenido de <https://www.fao.org/3/T0165S/T0165S00.htm>
- FAO. (12 de Abril de 2017). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de Escasez de Agua: Uno de los mayores reos de nuestro tiempo: <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1185408/>
- FAO. (18 de Noviembre de 2021). *Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de Portal de suelos de la FAO: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faounesco/es/>
- FAO. (18 de Noviembre de 2021). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de FAO: <https://www.fao.org/about/es/>
- Faustino, J., & Garcia, S. (2018). *Manual de manejo de cuencas [Archivo PDF]*. Obtenido de https://www.uv.mx/oabcc/files/2018/11/MANUAL-DE-MANEJO-DE-CUENCAS_COMPLETO.pdf

- Faustino, J., & Jiménez, F. (2000). *Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Enseñanza. Obtenido de https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8431/Manejo_de_cuencas_hidrograficas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- FECYT. (2004). *Meteorología y Climatología*. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.
- Forero Cantor, G. A., Saldarriaga Muñoz, J. P., & Vargas Romero, M. (2017). Cambio climático: Impactos y perspectivas de investigación desde una visión Multidisciplinar. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas Universidad de Nariño*, 2(122-138), 17. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/tend/v18n2/v18n2a08.pdfv>
- François Mas, J. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- Gámez Morales, W. R. (2015). *Texto basico autoformativo de topografia general*. Univesidad Nacional Agraria.
- García Reinoso, P. L., Méndez Monroy, J. F., & Zarate Jiménez, M. F. (2017). Delimitación de regiones hidrológicas en Colombia. *Ingeniería y Desarrollo*, 25(1), 132-151. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612017000100132
- Giaccone, E., Colombo, N., & Acquavotta, F. (2015). Climate variations in a high altitude Alpine basin and their effects on a glacial environment (Italian Western Alps). *Afmòsfera*, 28(2), 117-128. Recuperado el 02 de Noviembre de 2021, de <https://www.elsevier.es/en-revista-atmosfera-76-articulo-climate-variations-in-high-altitude-S0187623615300047>

- Gómez Vargas, J. S., Gonzales Velásquez, E. D., & Morales Pérez, I. D. (2018). Percolación de lixiviados y contaminación de aguas subterráneas análisis sistematico de literatura [Tesis de licenciatura, Universidad Cooperativa de Colombia]. Obtenido de https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/6451/4/2018_percolacion_lixivados_contaminacion.pdf
- Guerrero Padilla, A. M., Leiva Gonzáles, S. L., & Rodríguez Rodríguez, E. F. (2020). Disponibilidad hidrica según sectores de riego en la cuenca del rio Virú, Perú. *Arnaldoa*, 27(1), 283-302. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2413-32992020000100283
- Guevara Pérez, E. (2015). *Métodos para el análisis de variables hidrológicas y ambientales*. ANA. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3940>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill. Obtenido de <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Huaman, Y., Moreira Turcq, P., Espinoza, R., Llanos, R., Apaéstegui, J., Turcq, B., & Willems, B. (2020). Influencia de los cambios climaticos en la acumulacion de carbono en Bofedales Altoandinos durante los ultimos 2500 años. *Ecología Aplicada*, 1(35-41), 19. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162020000100035&script=sci_arttext
- IPCC. (2013). *Cambio climatico 2013*. Noruega: Grupo Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático. Obtenido de

[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FIN
AL_SPANISH.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FIN_AL_SPANISH.pdf)

IPCC. (2019). *Calentamiento Global de 1,5 °C*. Ginebra: IPCC. Recuperado el 02 de
Noviembre de 2021, de
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_s
panish.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf)

J Selva Andina Biosph. (2016). El agua en América Latina. *Jornal of the Selva Andina
Biosphere*, 4(2), 46-74. Obtenido de
[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-
38592016000200001](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592016000200001)

Jiménez Fernández, P., Jimenez Madrid, A., & Gemár, G. (2019). Effects of climate change
on hydrological planning: Proposal actions in the Guadalhorce River Basin / Efectos
del cambio climático en la planificación hidrológica: propuesta de actuación en la
cuenca del río Guadalhorce. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(5), 226-240.
Obtenido de <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1513>

Jodar Abellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Climate change impact assessment on
a hydrologic basin under natural regime (SE, Spain) using a SWAT model. *Revista
Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240-253. Obtenido de
<http://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/564>

Jodar Abellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio
climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un
modelo SWAT. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 35(3), 240-253. Obtenido
de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-
87742018000300240](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742018000300240)

- Lagos Zuñiga, M. Á., & Vargas Mes, X. (2014). Potenciales influencias del cambio climático en crecidas pluviales en una cuenca andina. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), 19-38. Recuperado el 02 de Noviembre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000200002
- Leon Ochoa, R., Portuguez Maurtua, D. M., & Chávarri Velarde, E. A. (2019). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático. *Revista de Investigadores Altoandinos*, 21(3), 182-193. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2313-29572019000300004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- León, J., Seyler, F., & Puerta, A. (2011). Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat sobre el cauce principal del río Orinoco. *Ingeniería e investigación*, 91-99. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092011000300010
- López Franco, M. L., Lovato Torres, S. G., & Abad Peña, G. (2018). El impacto de la cuarta revolución industrial en las relaciones sociales y productivas de la industria del plástico IMPLASTIC S.A. en Guayaquil - Ecuador: retos y perspectivas. *Universidad y Sociedad*, 10(5), 153-160. Recuperado el 01 de Noviembre de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202018000500153
- López Pérez, A., Martínez Menes, M. R., & Fernández Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 121-137. Obtenido de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100007

Lujano Laura, E., Sosa Sarmiento, J. D., Lujano Laura, A., & Lujano Laura, R. (2016). Modelación hidrológica semidistribuida en la región hidrográfica del Titicaca: caso de estudio cuenca del río Ramis, Perú. *Revista investigación altoandina*, 431-438.

Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092011000300010

Maderey Rascón, L. E., & Jiménez Román, A. (2005). *Principios de Hidrogeografía estudio del ciclo hidrológico*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Marin Clemente, C. R. (2015). Comparison of Methods to Estimate Water Availability on Forest Watersheds. *Terra Latinoamericana*, 33(1), 17-26. Recuperado el 02 de Noviembre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792015000100017&script=sci_abstract&tlng=en

Martínez Bencardino, C. (2012). *Estadística y muestreo*. Ecoe Ediciones.

Máximo Villón, B. (2002). *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Maya Muñoz, G. (2020). Cambio climático: ¿la humanidad culpable? *Ensayos de Economía*, 30(56), 7-10. Recuperado el 02 de Noviembre de 2021, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2619-65732020000100007

Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para el muestreo de suelos*. Ministerio del Ambiente. Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjFv7qzoZf0AhUbI7kGHQxkD8QQFnoECAyQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.minam.gob.pe%2Fcalidadambiental%2Fwp->

content%2Fuploads%2Fsites%2F22%2F2013%2F10%2FGUIA-PARA-EL-
MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf

Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. Alfaomega Grupo Editor.

Morejón Miranda, Y. M., Vega Carreño, M. B., Escarrè Esteve, A., Peralta Vital, J. L.,

Quitero Silveiro, A., & González Piedra, J. I. (2015). Analisis de balance hidrico en
cuencas hidrograficas de la sierra de los Organos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*,

36(2), 94-108. Obtenido de

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000200008

N. Demers, M. (2009). *Fundamentals of geographic information systems*. John Wiley &
Sons .

NASA. (11 de Noviembre de 2021). *Jef Propulsion Laboratory California Institute of*

Technology. Obtenido de Estados Unidos publica datos mejorados de elevación de

la tierra del transbordador: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

NASA. (25 de Noviembre de 2021). *MODIS moderate resolution imaging*

spectroradiometer. Obtenido de Productos del Indice de Vegetación MODIS (NDVI

y EVI): <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). *Herramienta de*

Evaluación de Suelo y Agua Documentación Teórica. SWAT. Obtenido de

<https://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>

Olaya, V. (2014). *Sistema de Información Geográfica*. CreateSpace Independent Publishing

Platform. Obtenido de https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

ONU. (04 de Noviembre de 2021). *Cambio Climatico*. Obtenido de Cambio Climatico:

<https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

- Oñate Valdivieso, F., Bosque Sendra, J., Sastre Merlin, A., & Ponce, M. V. (2016). Calibración, Validación y Evaluación de un Modelo Hidrológico Concentrado en un Área Montañosa al Sur del Ecuador. *Agrociencia*, 50(8), 945-963. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000800945&script=sci_abstract
- Organización de las Naciones Unidas. (19 de Noviembre de 2021). *Organización de las Naciones Unidas*. Obtenido de Datos de la tierra EOSDIS (NASA): <https://www.un-spider.org/links-and-resources/gis-rs-software/earth-data-eosdis-nasa>
- Osorio Cárdenas, K. R., & Cerquera Martínez, N. (2020). *Revisión de aplicaciones del modelo SWAT para simular el transporte de agroquímicos en cuencas hidrográficas*. Universidad de Antioquia. Obtenido de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj5i5zZr5j0AhV_IbkGHZakBTgQFnoECC0QAQ&url=https%3A%2F%2Fbiotecadigital.udea.edu.co%2Fbitstream%2F10495%2F14985%2F10%2FCerqueraNataly_2020_ModeloTransporteAgroquimicos.pdf&usg=AOvV
- Peña, D. (2014). *Fundamentos de Estadística*. Madrid: Alianza Editorial.
- Pereira Pérez, Z. (2011). Los diseños de método mixto en la investigación en educación: Una experiencia concreta. *Revista Electronica Educare*, 14(1), 15-29. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1941/194118804003.pdf>
- Pucha Cofrep, F., Fries, A., Cánovas Garcia, F., Oñate Valdivieso, F., González Jaramillo, V., & Pucha Cofrep, D. (2017). *Fundamentos de SIG aplicado con ArcGIS*. UNIGIS.
- Ramírez Granados, P. (2011). Elementos de Cartografía Matemática y su Aplicación en la Elaboración de las Cartas Geográficas. *Revista Geográfica de América Central*, 1(46), 15-36. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4517/451744670001.pdf>

- Ramos Jauregui, L. Y. (2014). *Estimación del Efecto del Cambio Climático en la Precipitación en la Costa Norte del Perú Usando Simulaciones de Modelos Climáticos Globales*. Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/47>
- Revueltas, J., Zabaleta, A., Mercado, T., & Aguirre, S. (2020). Cambio en el clima local y su efecto en la regulación hídrica en microcuencas del departamento de Magdalena, Norte de Colombia. *Información tecnológica*, 31(6), 193-206. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642020000600193&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Ricardo Trezza. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar? *Bioagro*, 20(2), 89-95. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612008000200002
- Rivera Toral, F., Pérez Nieto, S., Ibáñez Castillo, L. A., & Hernández Saucedo, F. R. (2012). Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia*, 46(2), 101-105. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000200001
- Rstudio. (26 de Noviembre de 2021). *Rstudio*. Obtenido de Equipo Rstudio: <https://www.rstudio.com/>
- Sabino, C. (1992). *El proceso de Investigación*. Lumen.
- Sánchez Flores, F. A. (2019). Fundamentos episémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: Consensos y disensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*. Obtenido de

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-

25162019000100008

Sánchez Galindo, M., Fernández Reynoso, D. S., Matínez Menes, M., Rubio Granados, E., & Ríos Berber, J. D. (2021). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo Oaxaca, Mexico, con SWAT. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(5), 141-156. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222017000500141&script=sci_arttext

SENAMHI. (2015). *Generación de base de datos de precipitación mensual grillada de alta resolución a nivel nacional 1981-2013*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Obtenido de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/439>

SENAMHI. (2017). *Usp de producto grillado Pisco de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Obtenido de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/260>

SENAMHI. (21 de Noviembre de 2021). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*. Obtenido de ¿Quiénes somos?: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=senamhi>

Shankar Dwivedi, R. (2017). *Remote Sensing of Soils*. Springer.

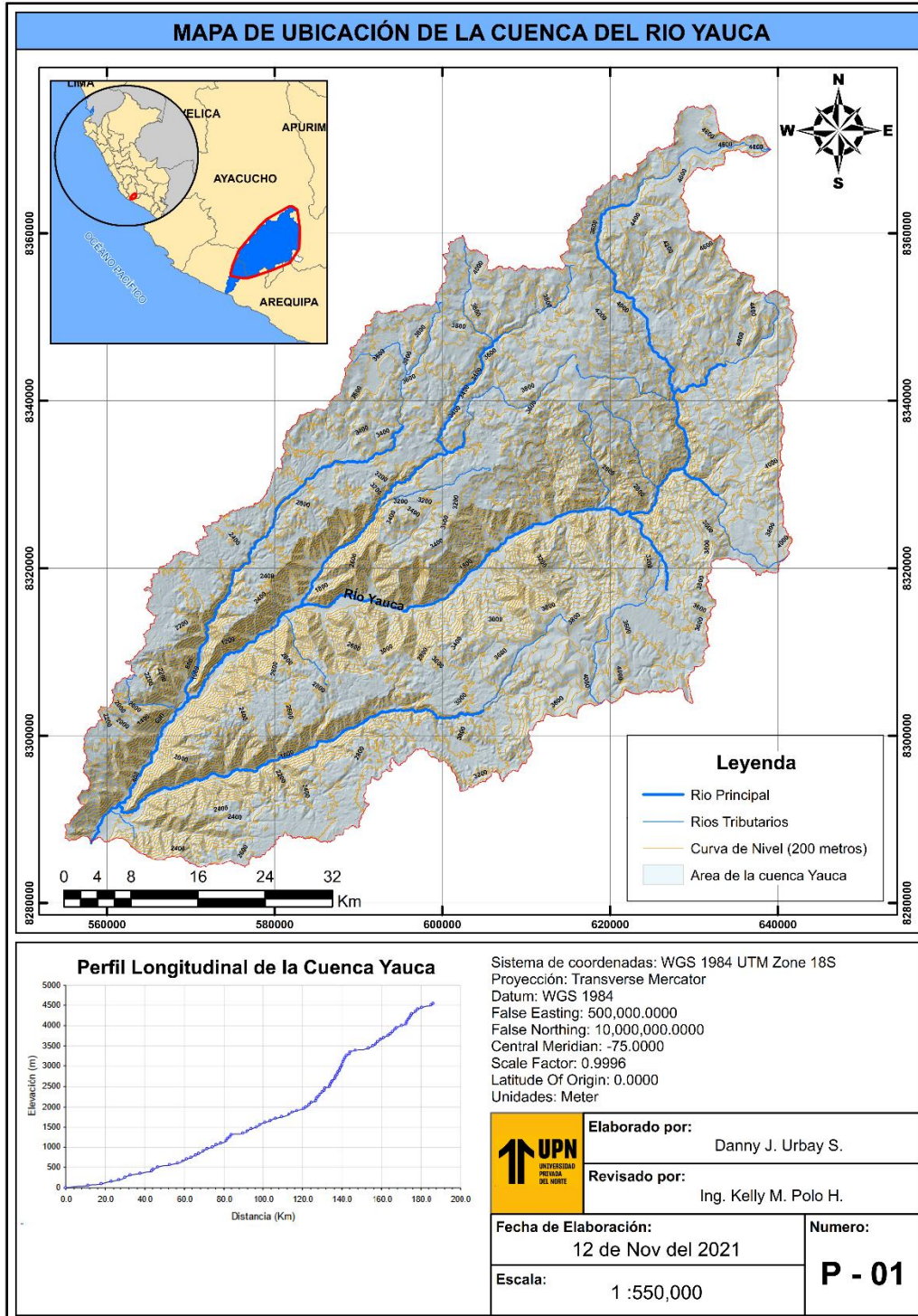
Suárez Almiñana, S., Solera, A., Andreu, J., & García Romero, L. (2019). Análisis de incertidumbre de las proyecciones climáticas en relación a las proyecciones climáticas en relación a las aportaciones históricas en la cuenca del Júcar. *Universidad Politécnica de Valencia*, 24(2), 89-99. Obtenido de <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/12149/12490>

- SwatViewer. (27 de Marzo de 2022). *SwatViewer*. Obtenido de SwatViewer:
<https://swatviewer.com/>
- Tino Rodríguez, E. (2017). *Programando con R*. Copyright.
- Uribe, N. (2005). *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*. Centro Internacional de Agricultura Tropical Internacional Center for Tropical Agriculture. Obtenido de <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Valladares Martel, E. A. (2017). Respuesta hidrológica de la cuenca del río Santa en condiciones de cambio climático [Tesis Licenciatura]]. Universidad Nacional Agraria la Molina. Obtenido de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3367/valladares-martel-ernesto-adolfo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vásquez Villanueva, A., Mejía Marcacuzco, A., Faustino Manco, J., Terán Manco, R., Vásquez Romero, I., Díaz Rimarachin, J., . . . Alcántara Ramos, J. (2016). *Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Velázquez Zapata, J. A., Troin, M., & Dávila Ortiz, R. (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 3(18), 341-351. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v18n3/1405-7743-iit-18-03-00341.pdf>
- Velázquez, J. A., Troin, M., & Caya, D. (2015). Hydrological Modeling of the Tampoan River in the Context of Climate Change. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(5), 17-30. Obtenido de <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1167/1070>

ANEXOS

ANEXO N.º 1

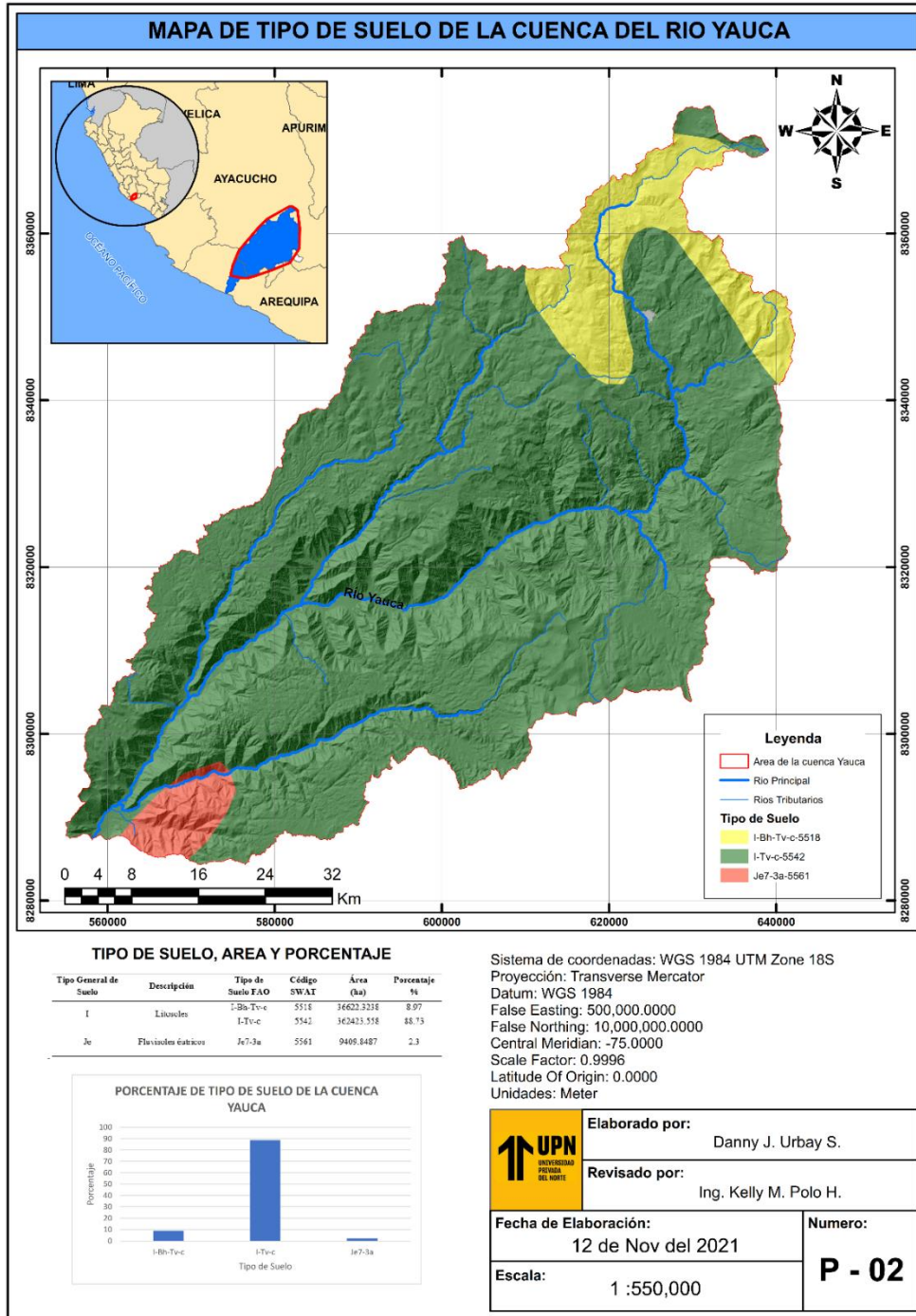
Mapa de Ubicación de la Cuenca del Río Yauca.



Nota: En el mapa se muestra, las curvas de nivel cada 200 metros, la red hidrográfica que recorre toda la cuenca y el perfil longitudinal que muestra la altitud de acuerdo al plano horizontal.

ANEXO N.º 2

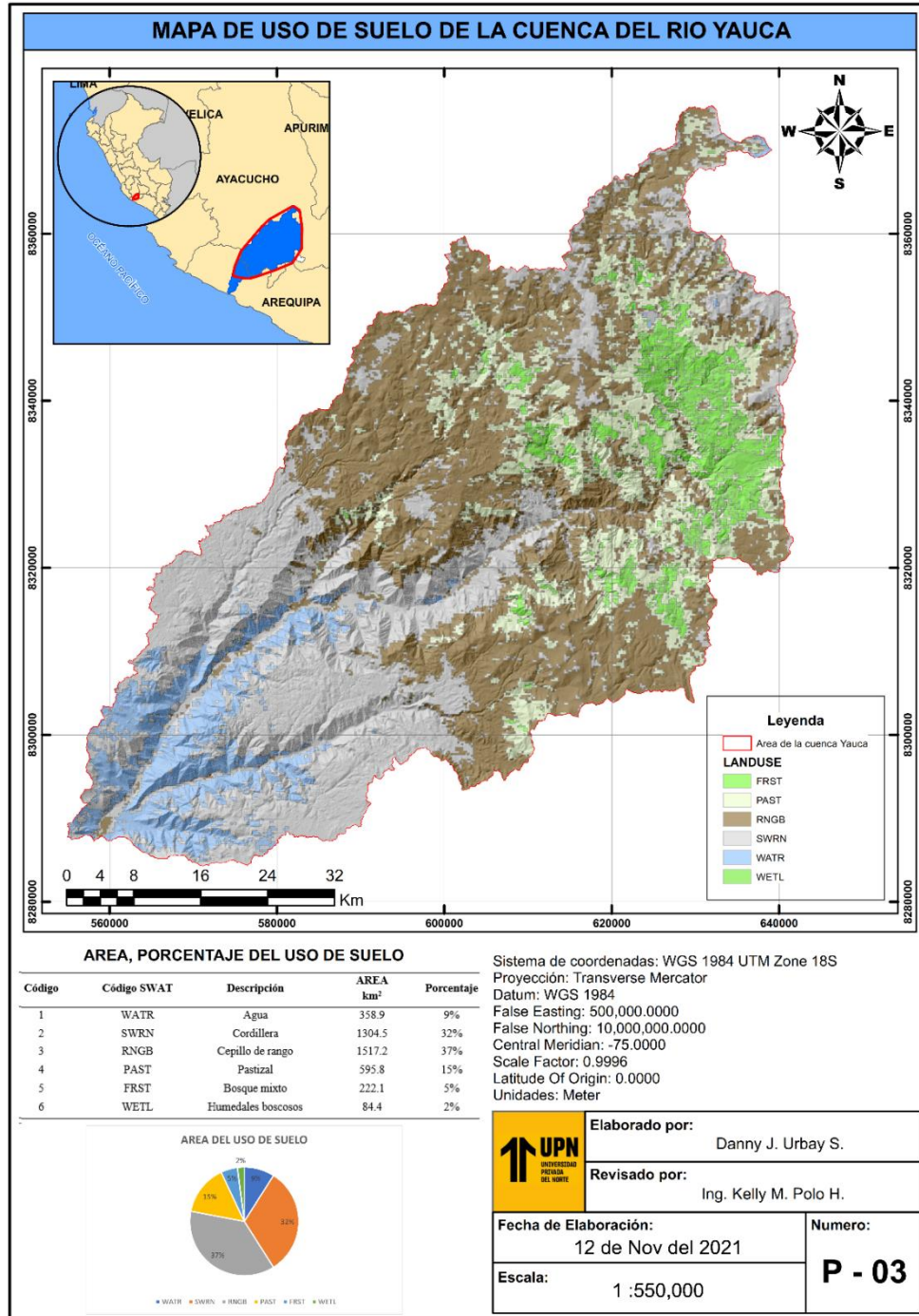
Mapa de Tipo de Suelo de la Cuenca Yauca



Nota: El presente mapa muestra, el tipo de suelo de la cuenca del rio Yauca, que fue previamente delimitado y también se muestra los porcentajes de su composición. Se uso el sistema de coordenadas WGS 1984 UTM – 18S.

ANEXO N.º 3

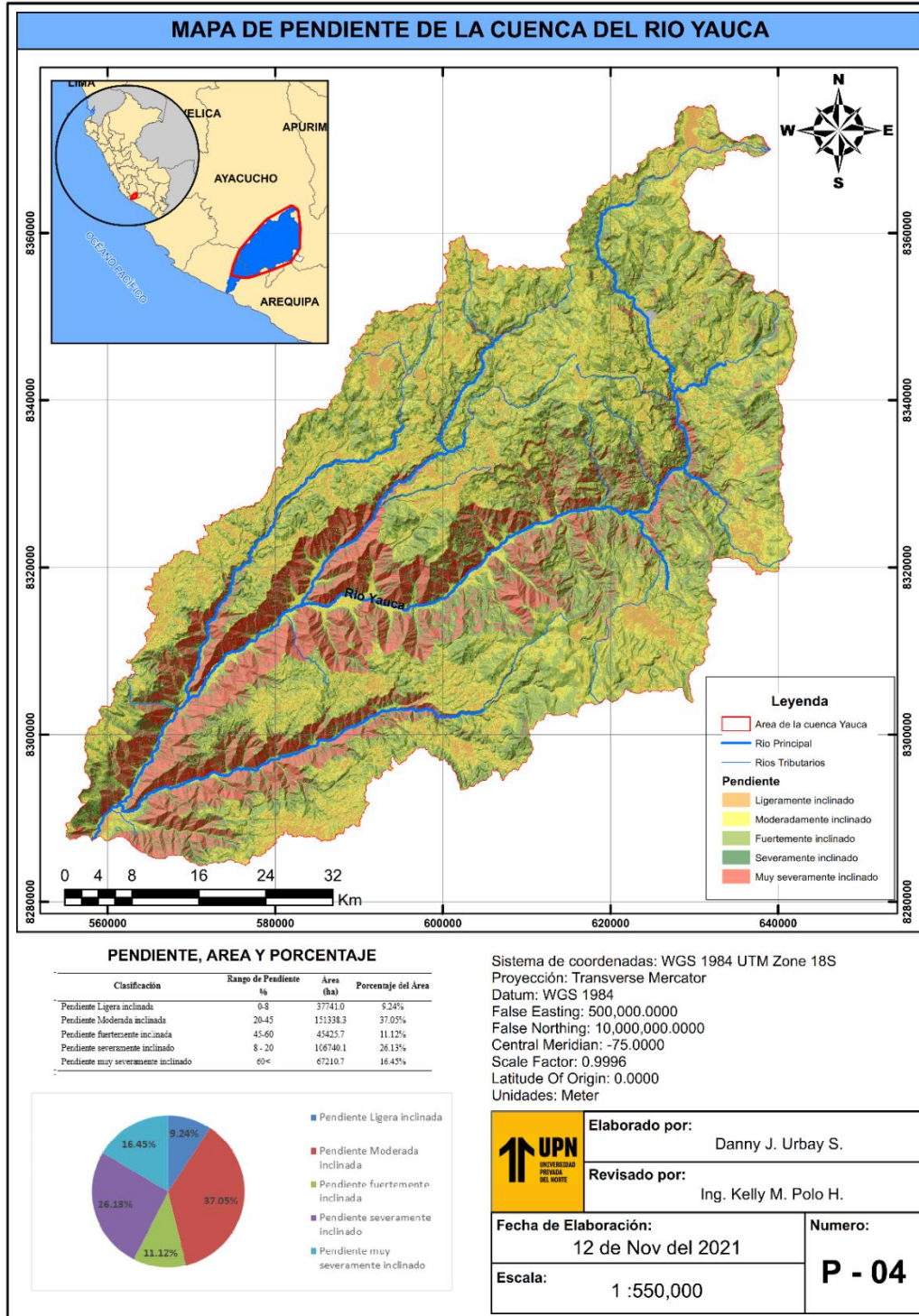
Uso de Suelo de la Cuenca Yauca.



Nota: El presente mapa muestra el uso del suelo de la cuenca del rio Yauca y se describe las categorías en el cuadro inferior, con sus respectivos porcentajes y el área en hectáreas,

ANEXO N.º 4

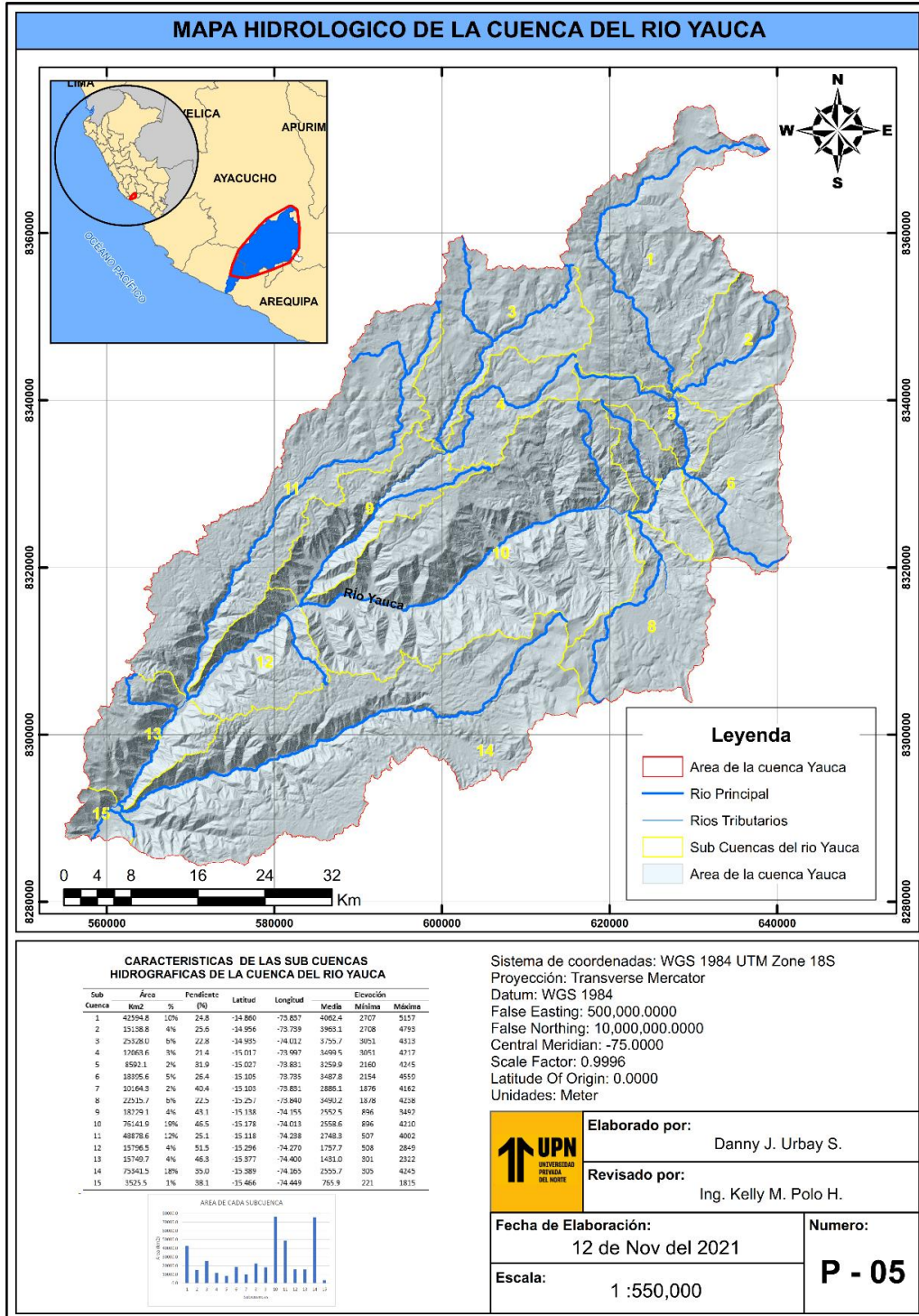
Pendiente de la Cuenca Yauca



Nota: El presente mapa muestra, aquellas zonas que poseen una pendiente moderada, muy inclinada, ligeramente inclinada y su cuadro se muestra en la parte inferior con los porcentajes y el área que corresponde.

ANEXO N.º 5

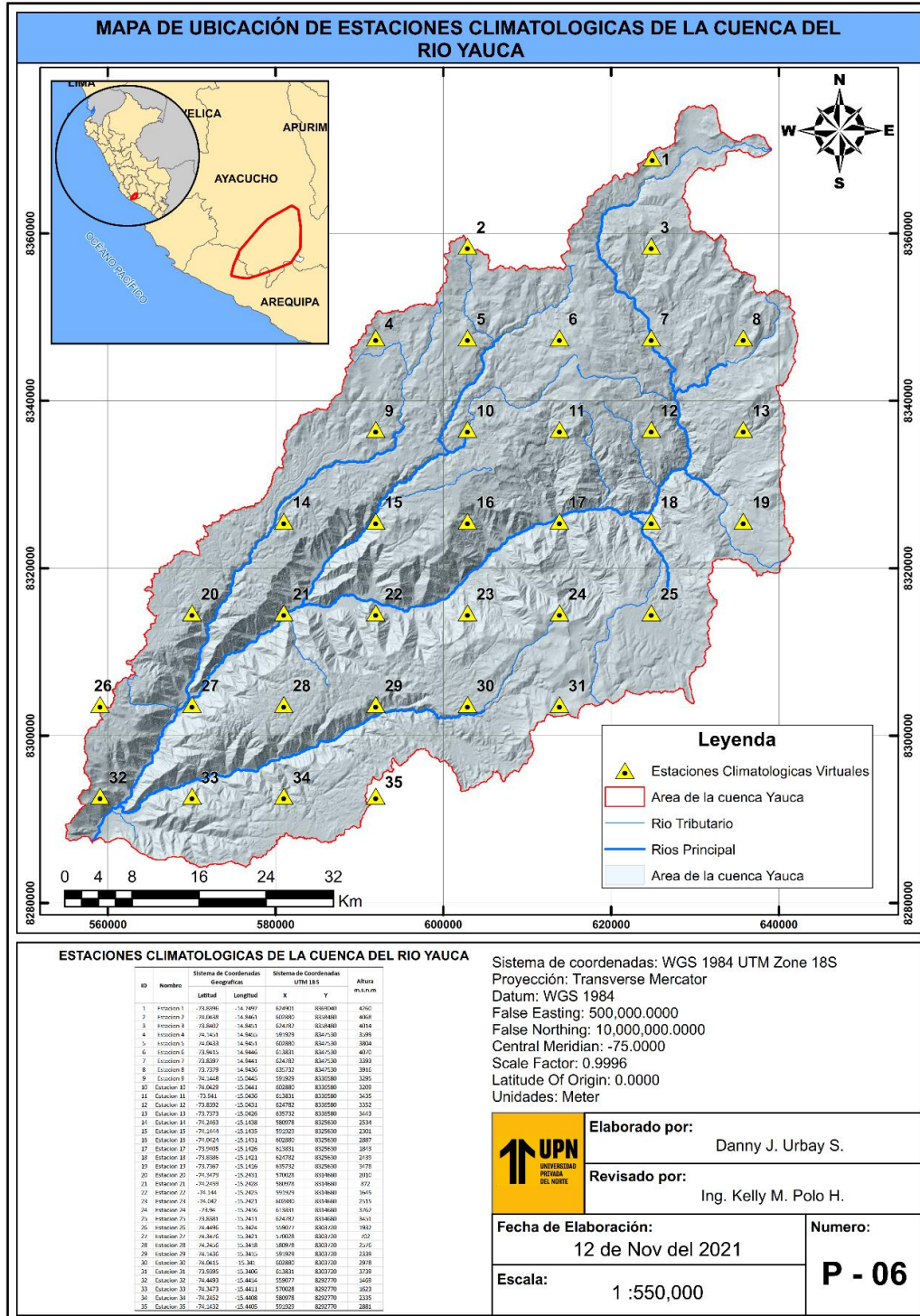
Mapa de la Subcuenca del Rio Yauca



Nota: El presente mapa muestra la red hidrológica de la cuenca del rio Yauca y las sub cuencas que la conforman, con también se muestra un cuadro con los datos técnicos de la cuenca.

ANEXO N.º 6

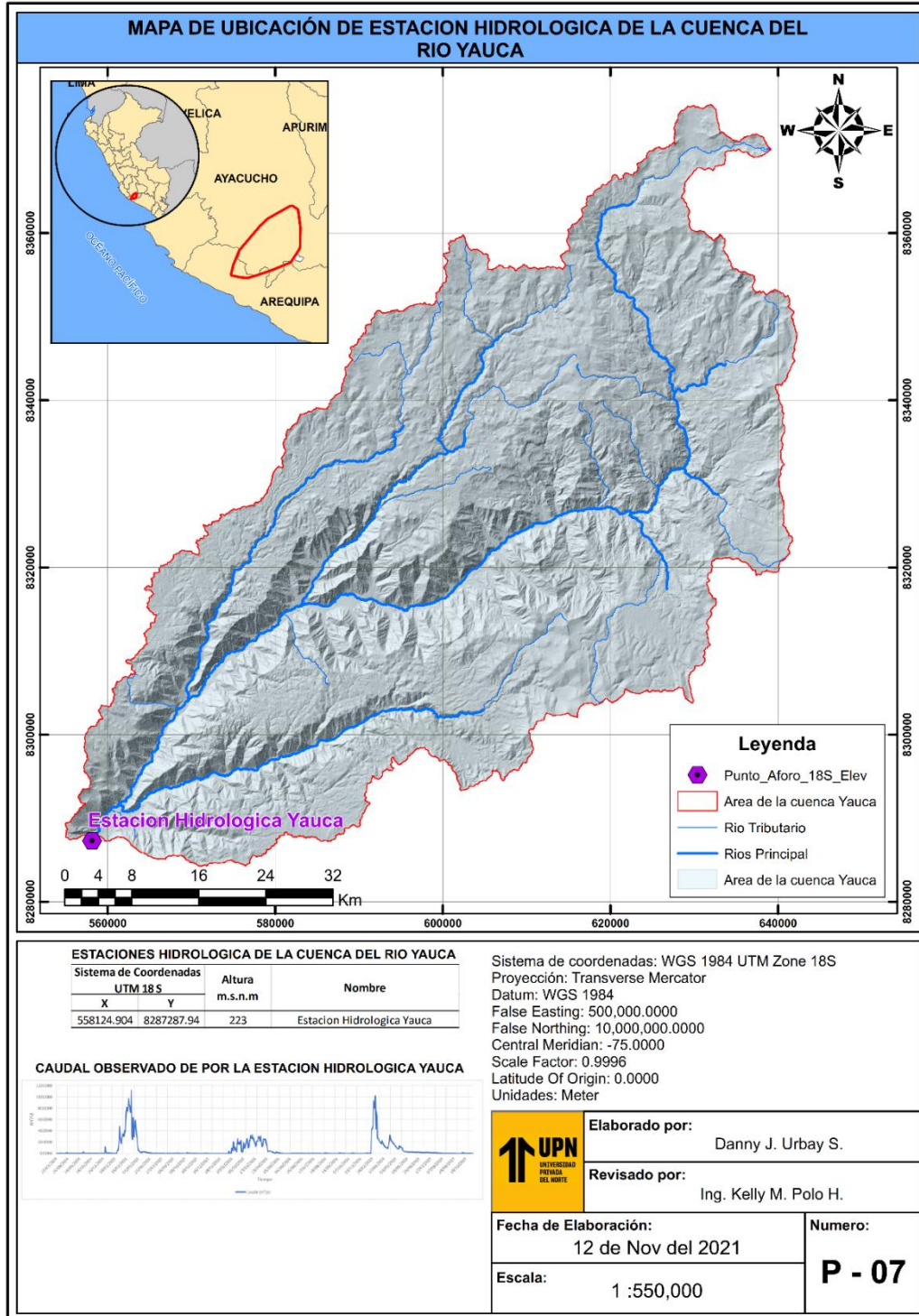
Mapa de Ubicación de Estaciones Climáticas Virtuales



Nota: El presente mapa muestra, la ubicación de las estaciones virtuales que se simularon para la descarga de información de Data Pisco y se realice el proceso de calibración. El cuadro muestra la altura y las coordenadas

ANEXO N.º 7

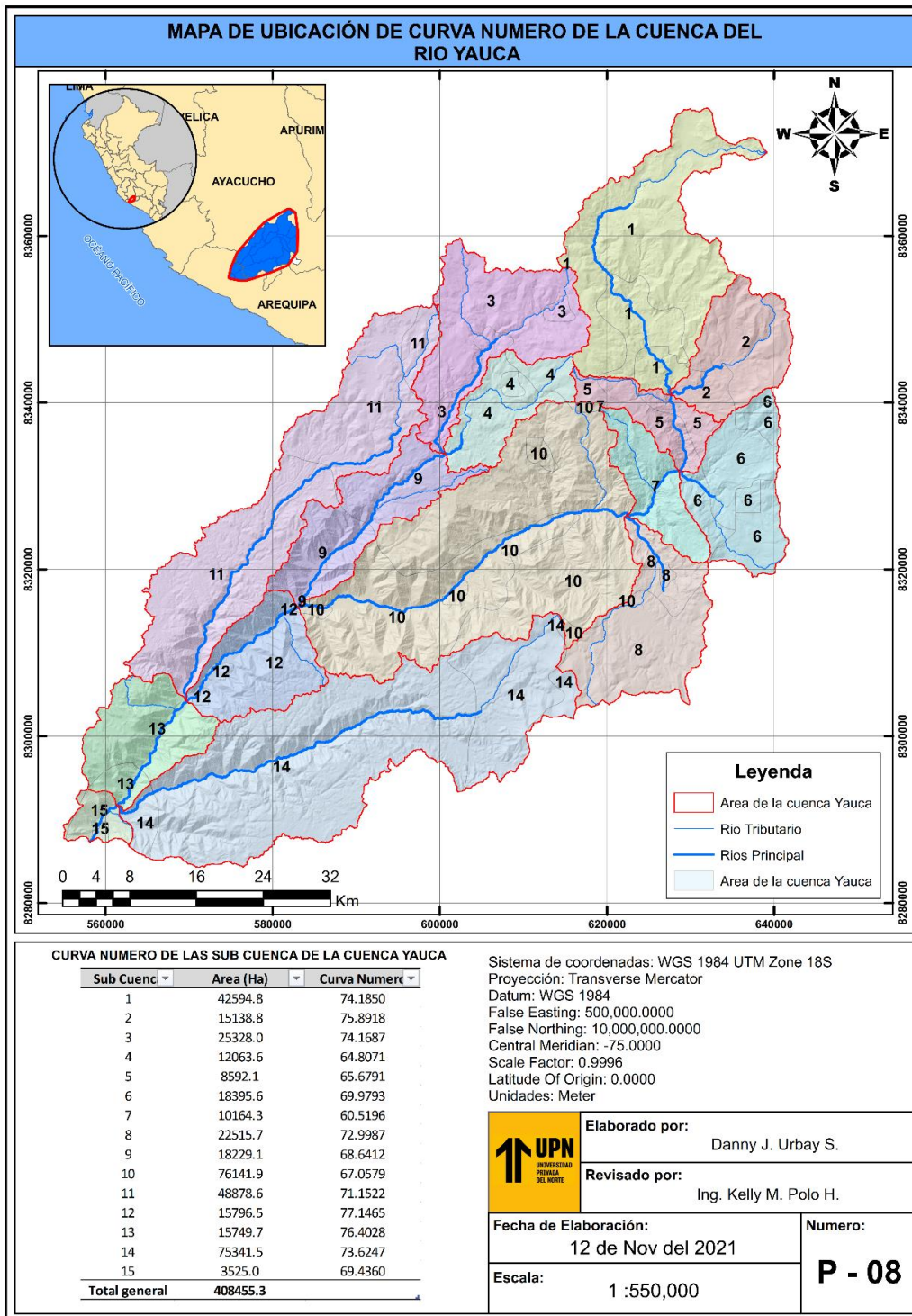
Mapa de Ubicación de Estación Hidrológica Yauca



Nota: El presente mapa muestra, la ubicación de la estación hidrológica que fue extraída del SNIRH y el caudal observado que registro dicha estación. Como también sus coordenadas en UTM – 18S y su altura.

ANEXO N.º 8

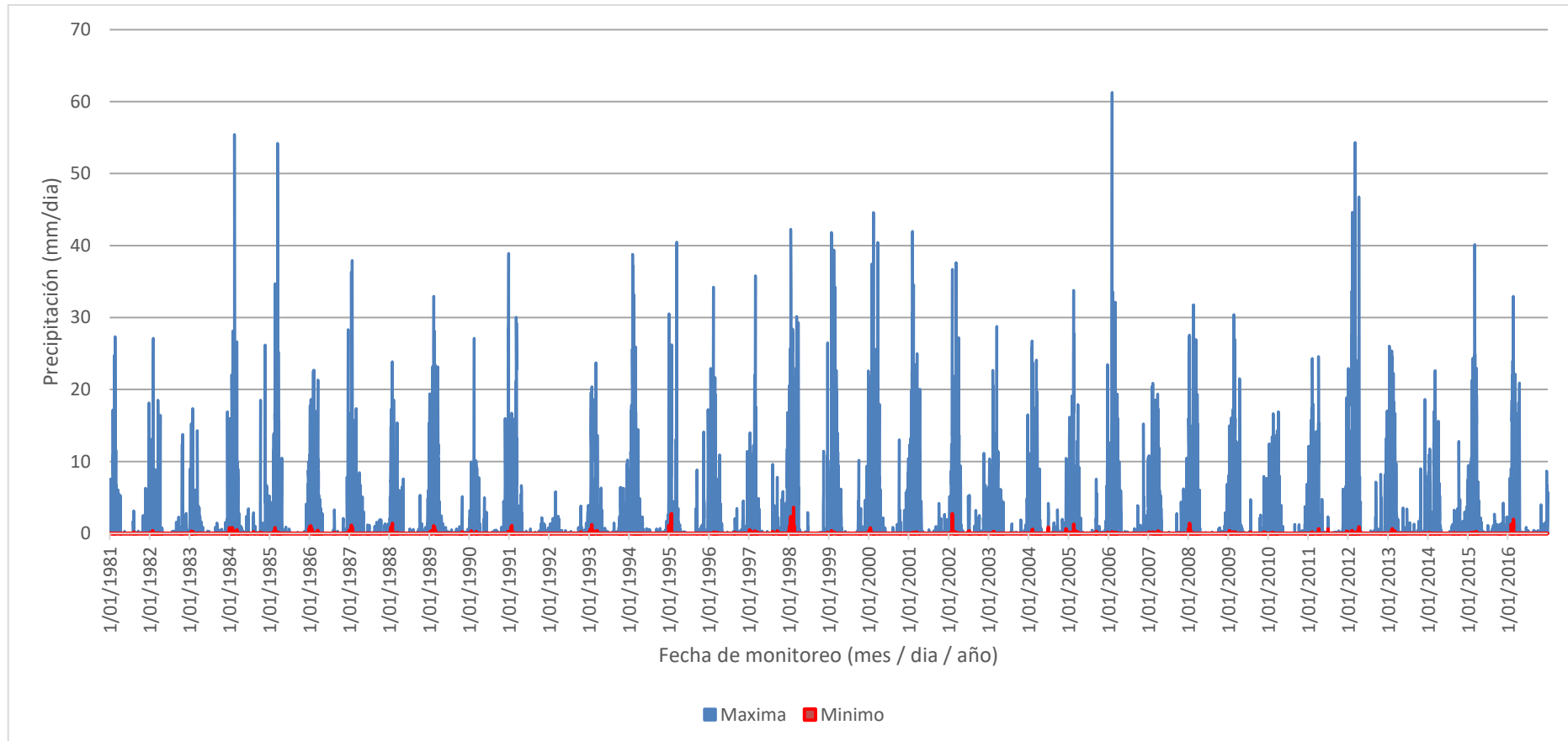
Curva Número de la Cuenca Yauca



Nota: El presente mapa muestra, la distribución de la curva numero de acuerdo a las sub cuencas que conforman el rio Yauca y el área que abarca en hectáreas.

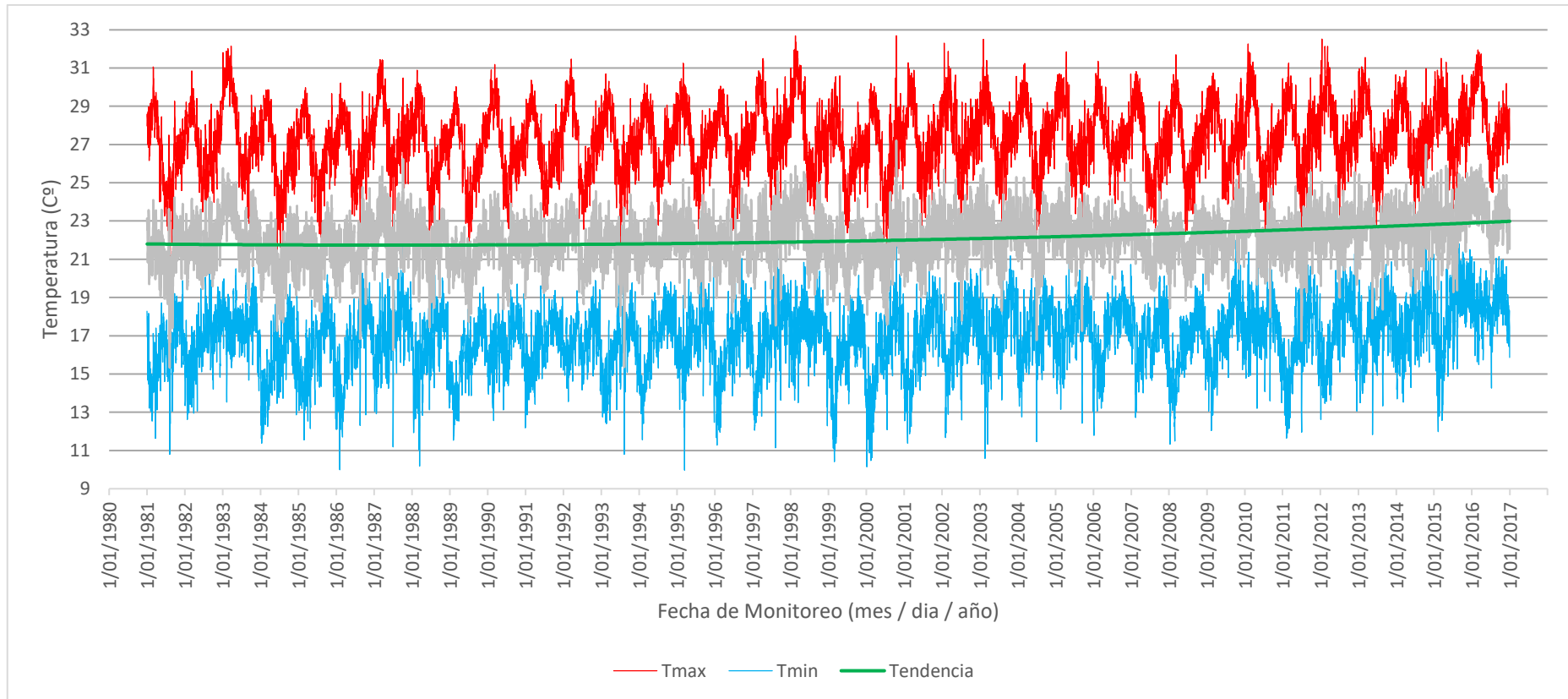
ANEXO N.º 9

Precipitación Promedio Mensual de la Cuenca Yauca



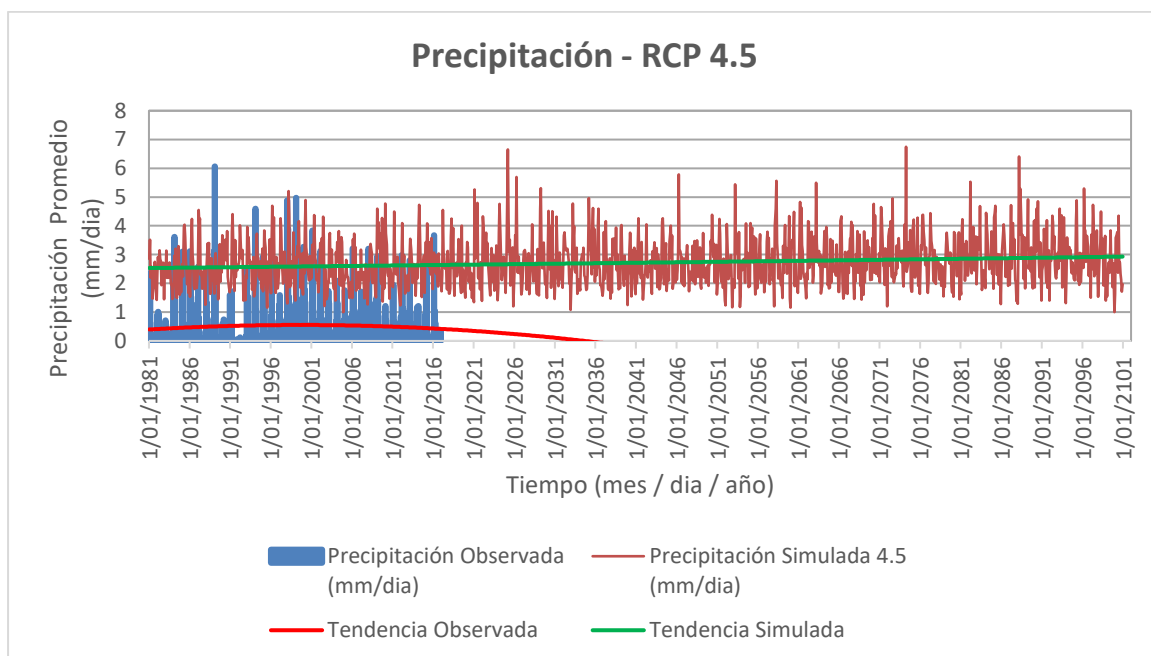
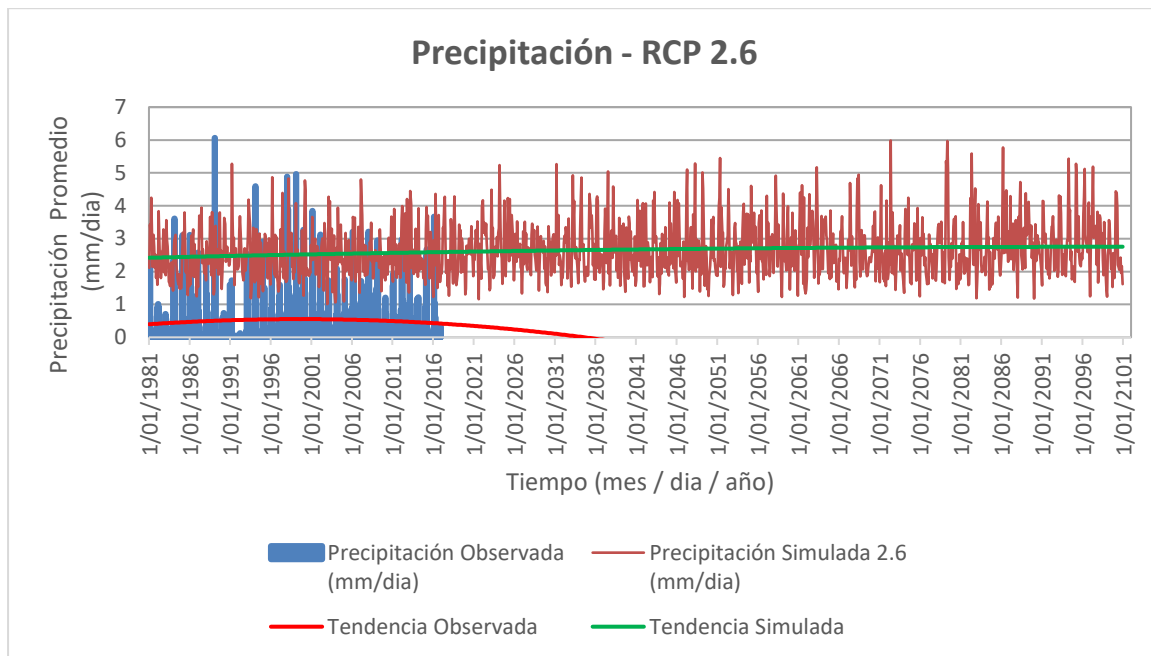
ANEXO N.º 10

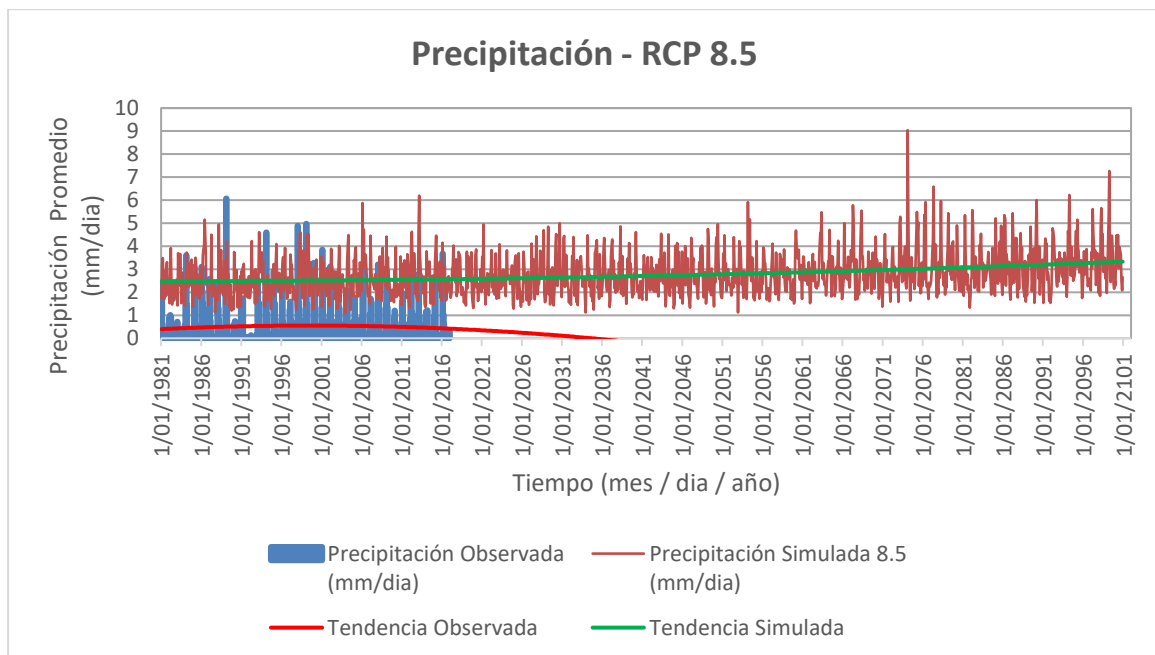
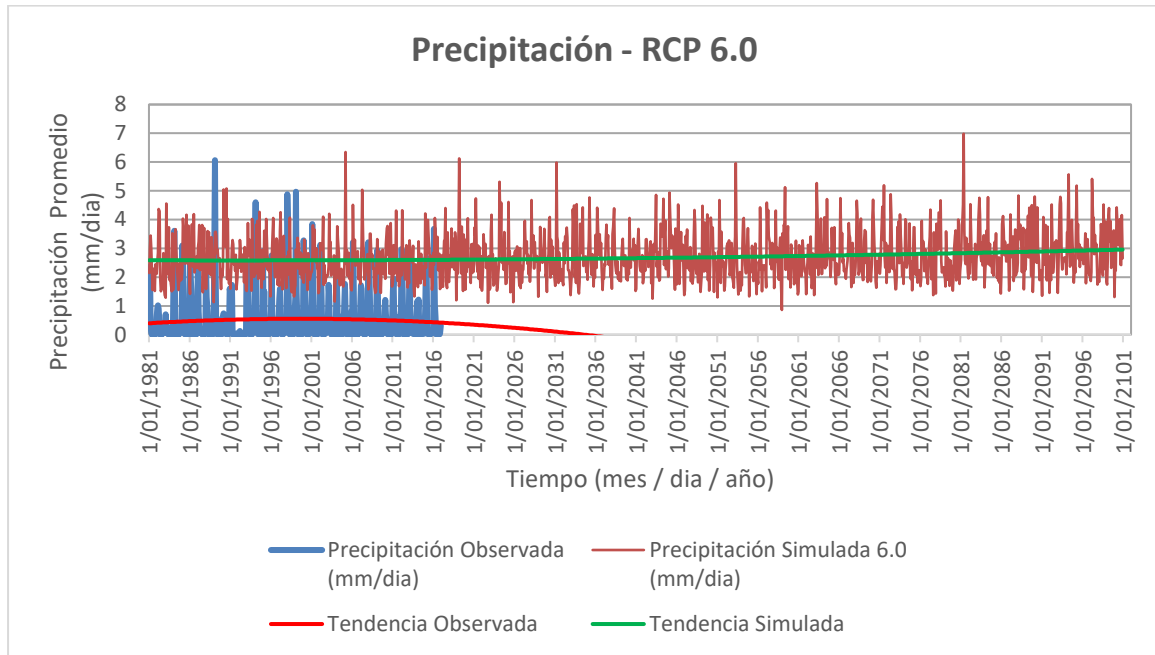
Temperatura Máxima y Mínima Mensual de la Cuenca Yauca



ANEXO N.º 11

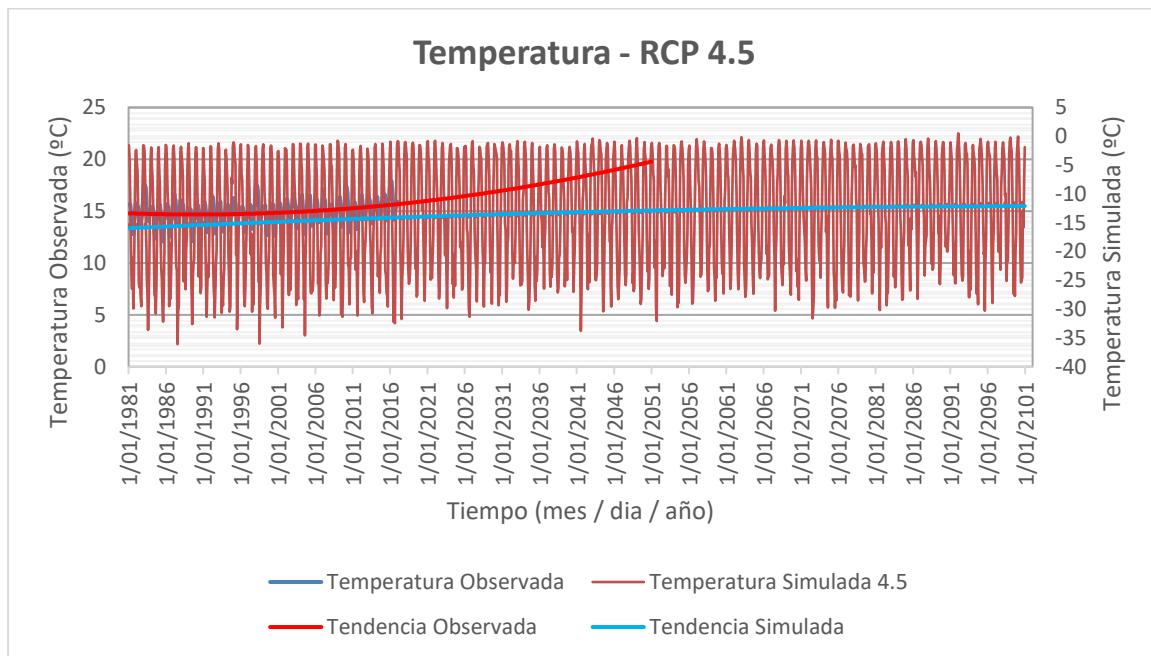
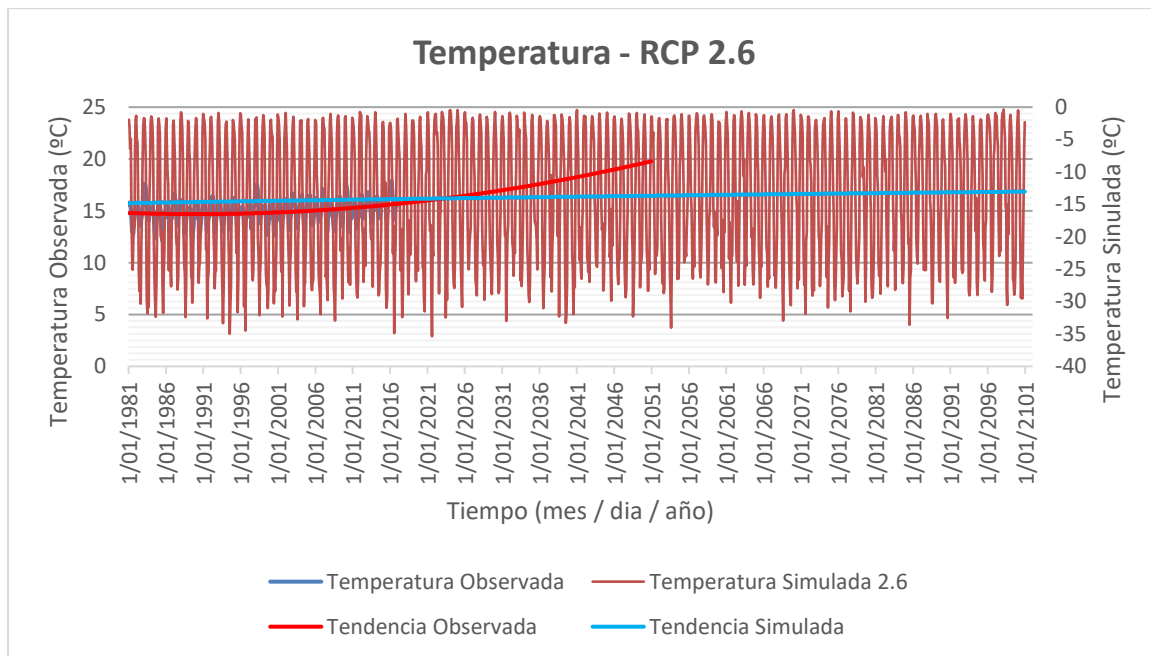
Valores Promedio de Precipitación - CSIRO-MK3-6-0

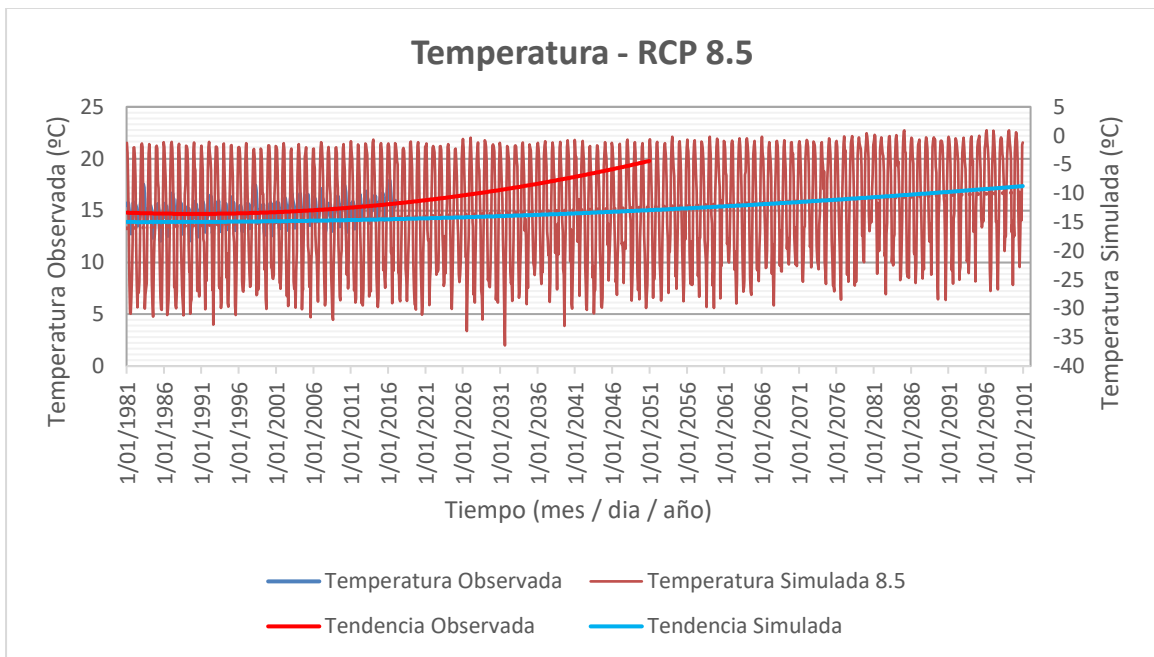
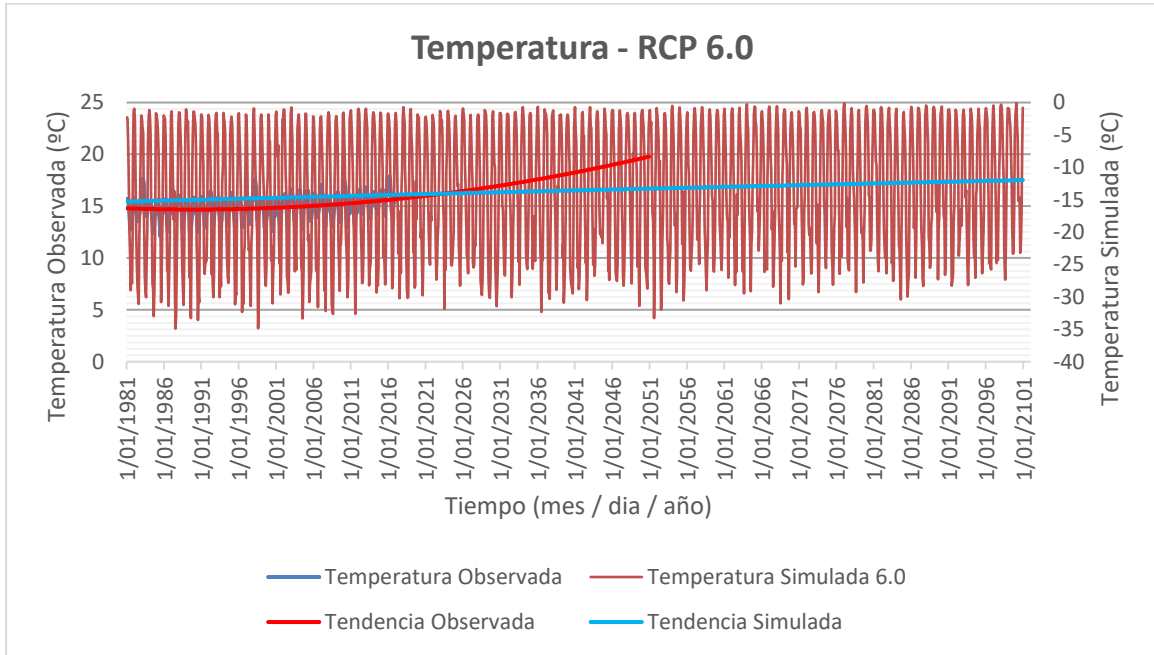




ANEXO N.º 12

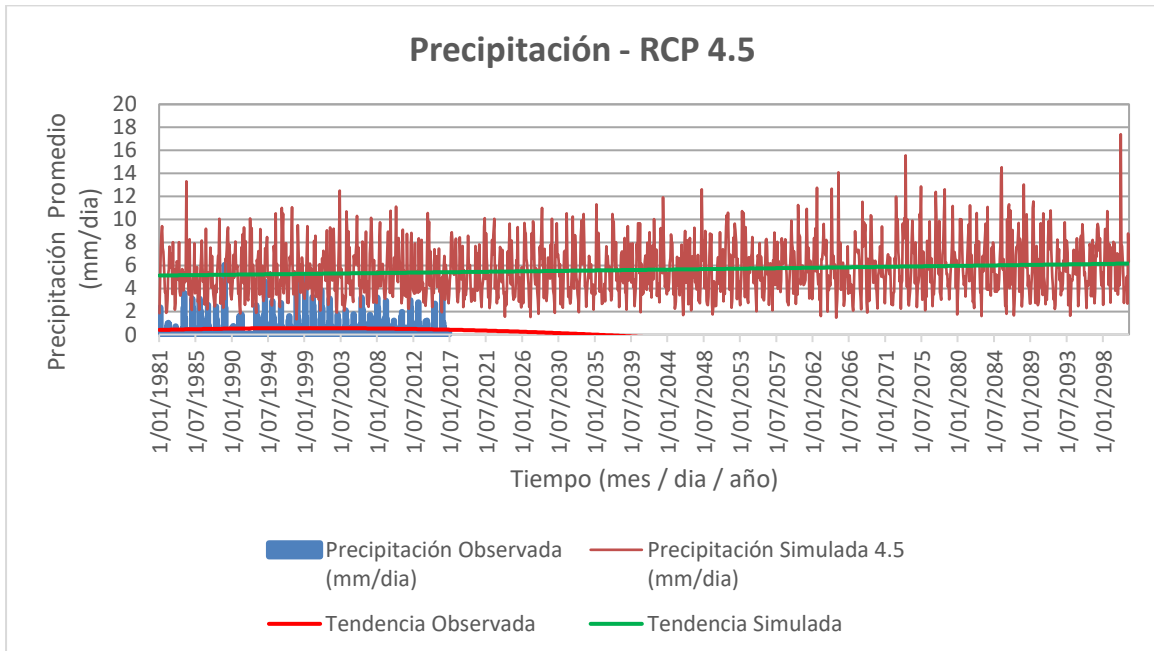
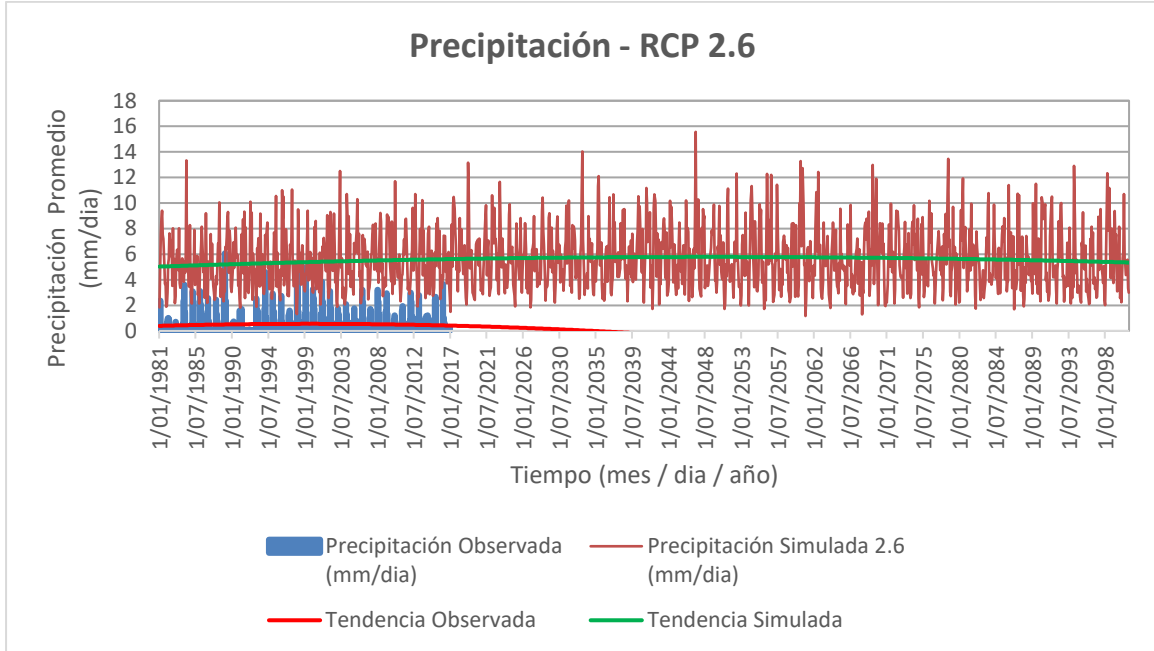
Valores Promedio de Temperatura - CSIRO-MK3-6-0

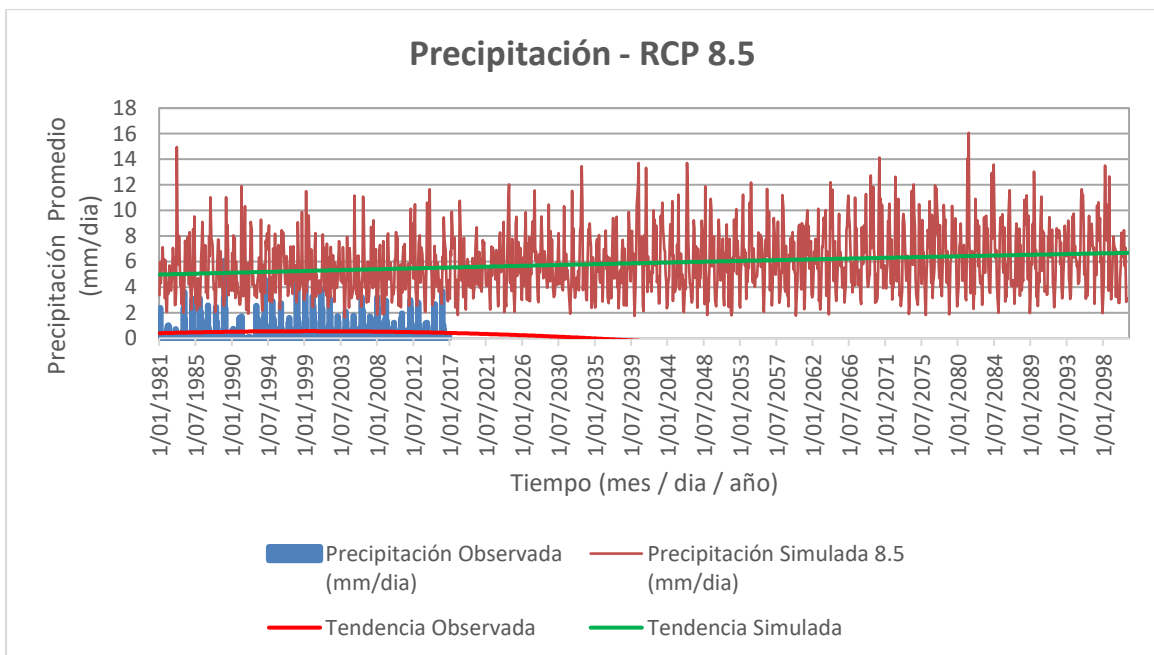
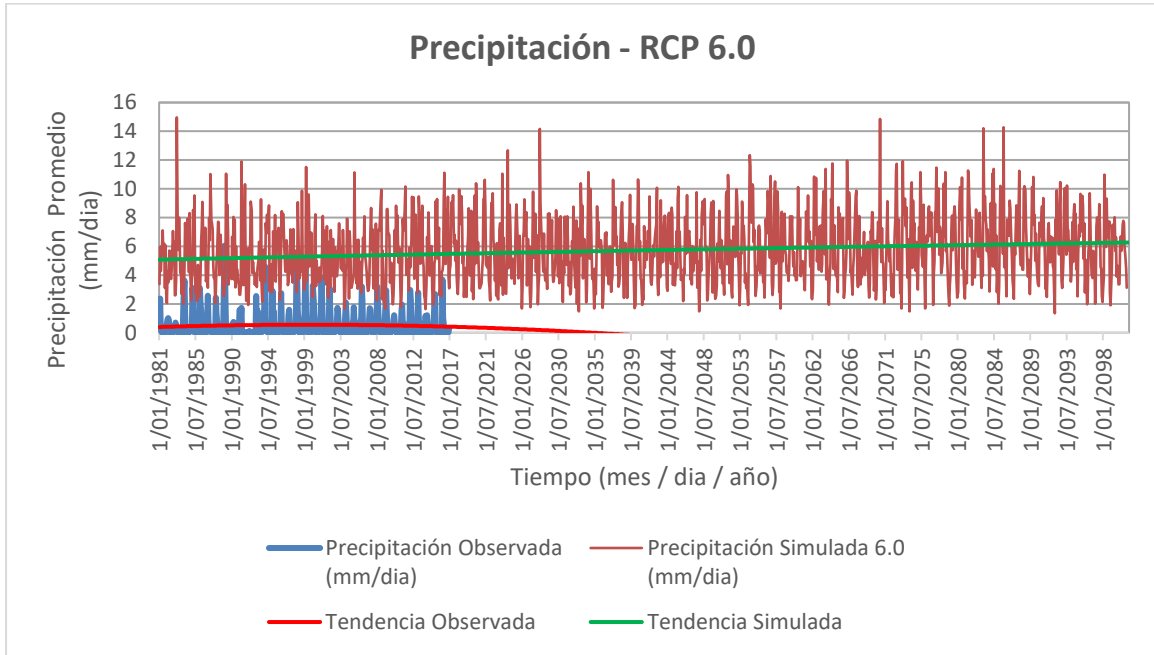




ANEXO N.º 13

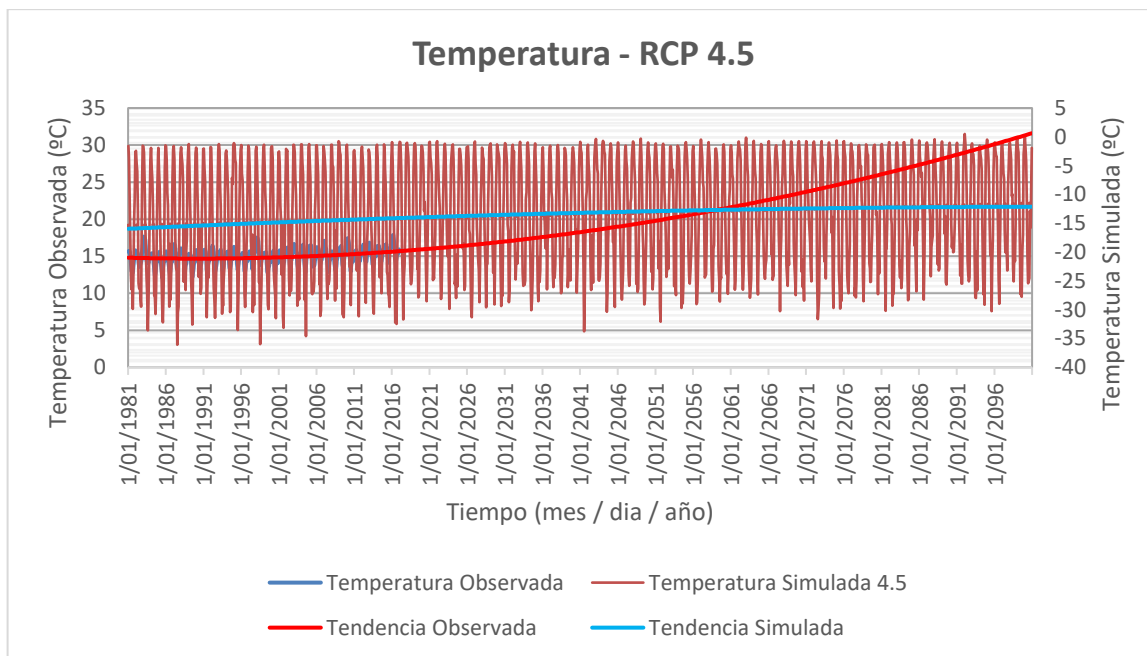
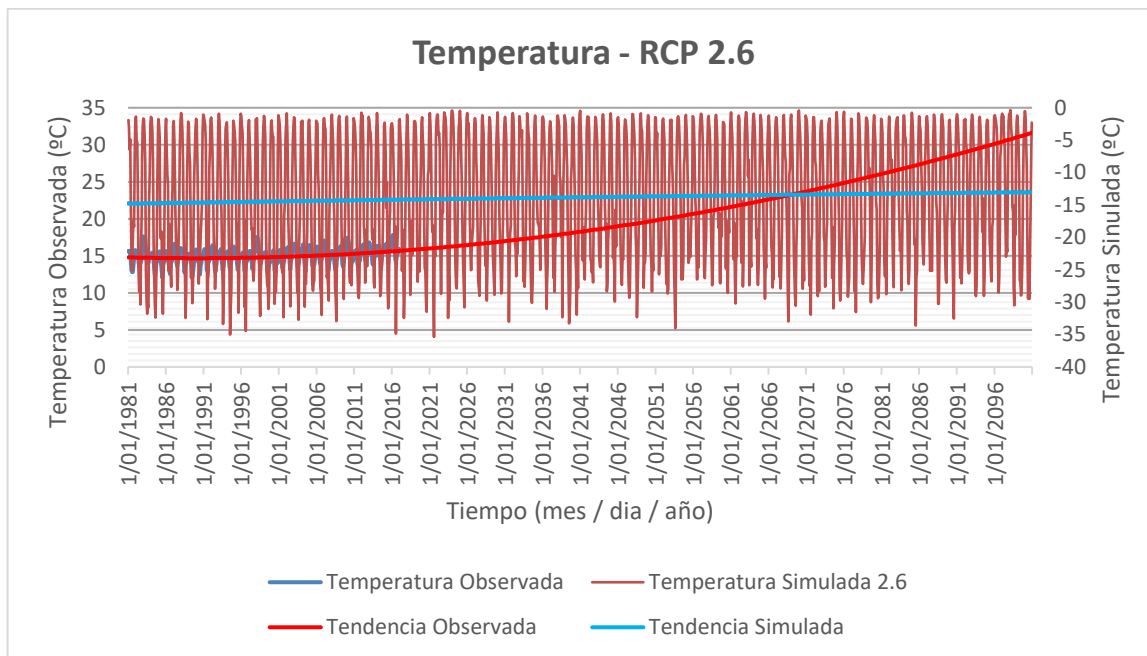
Valores Promedio de Precipitación – HADGEM2 – ES

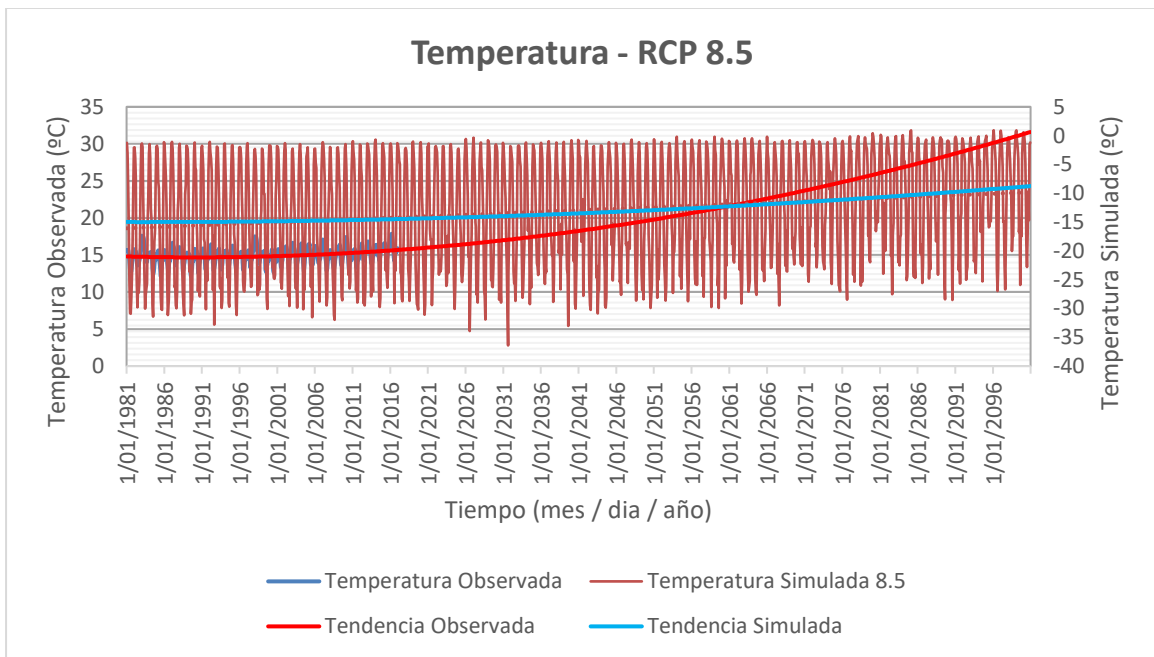
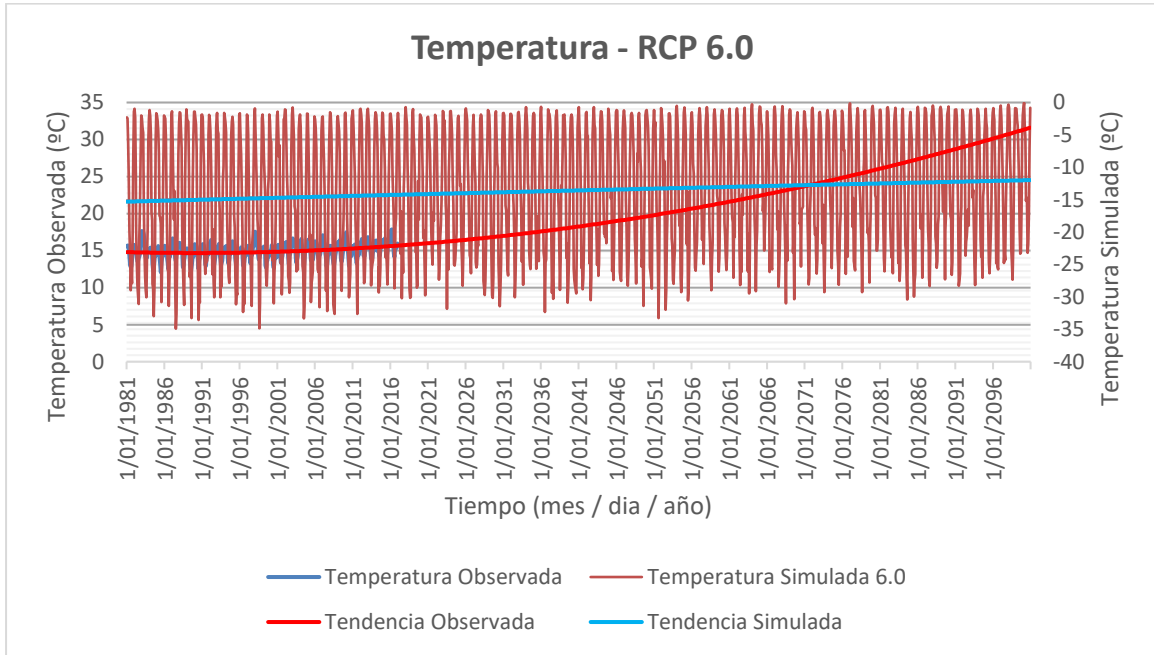




ANEXO N.º 14

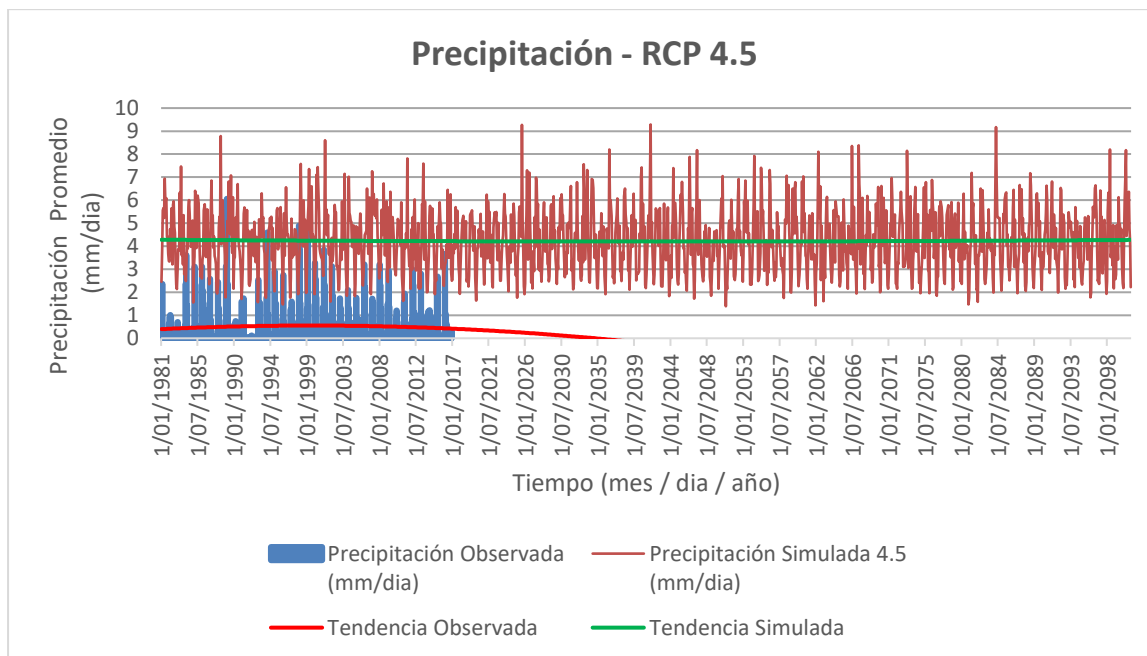
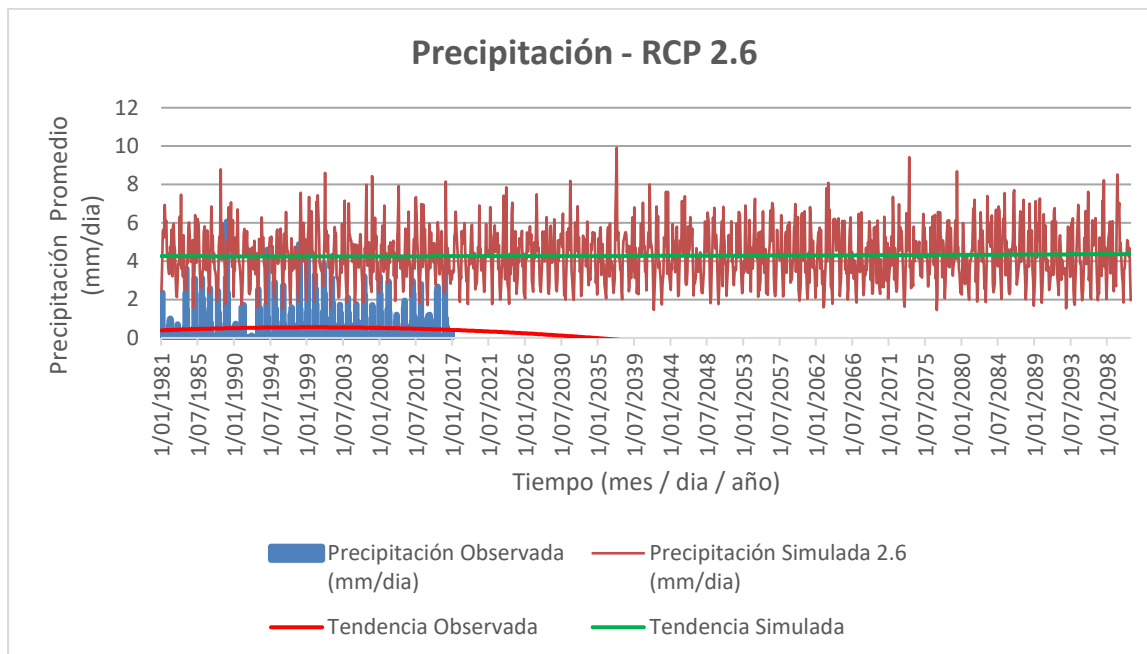
Valores Promedio de Temperatura – HADGEM2 – ES

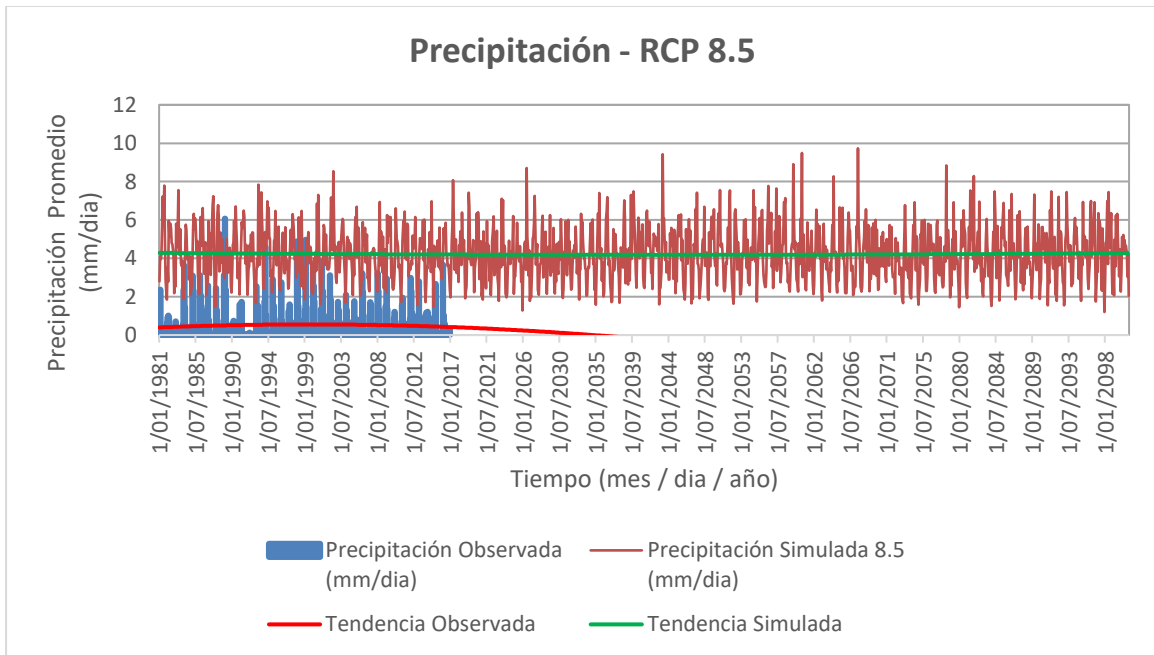
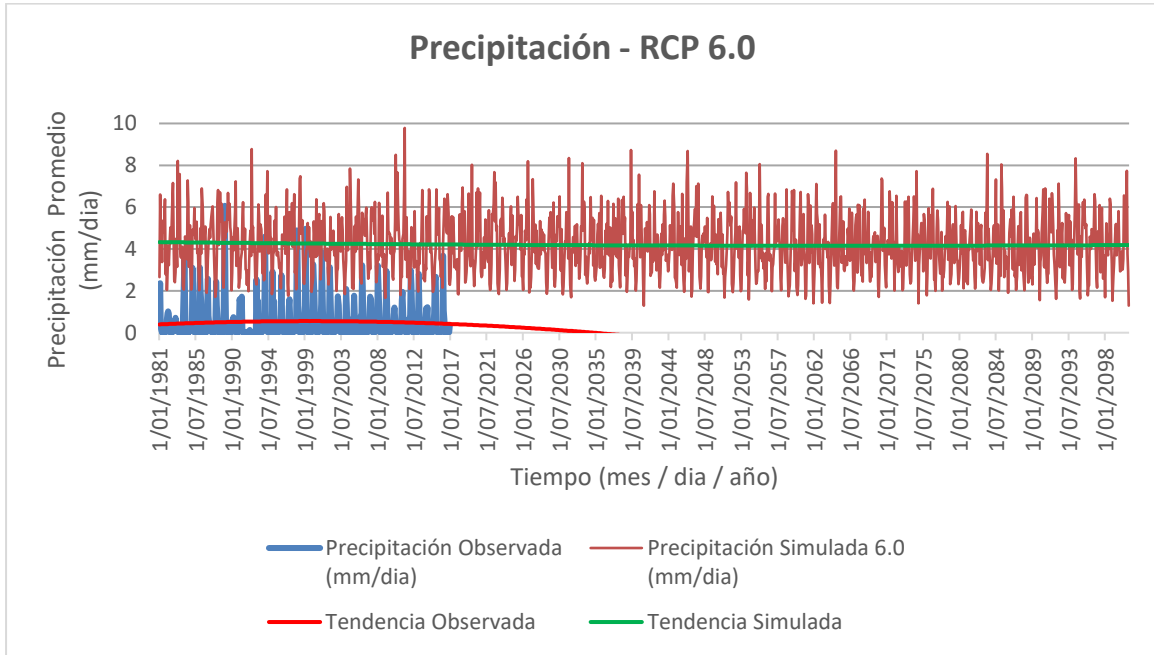




ANEXO N.º 15

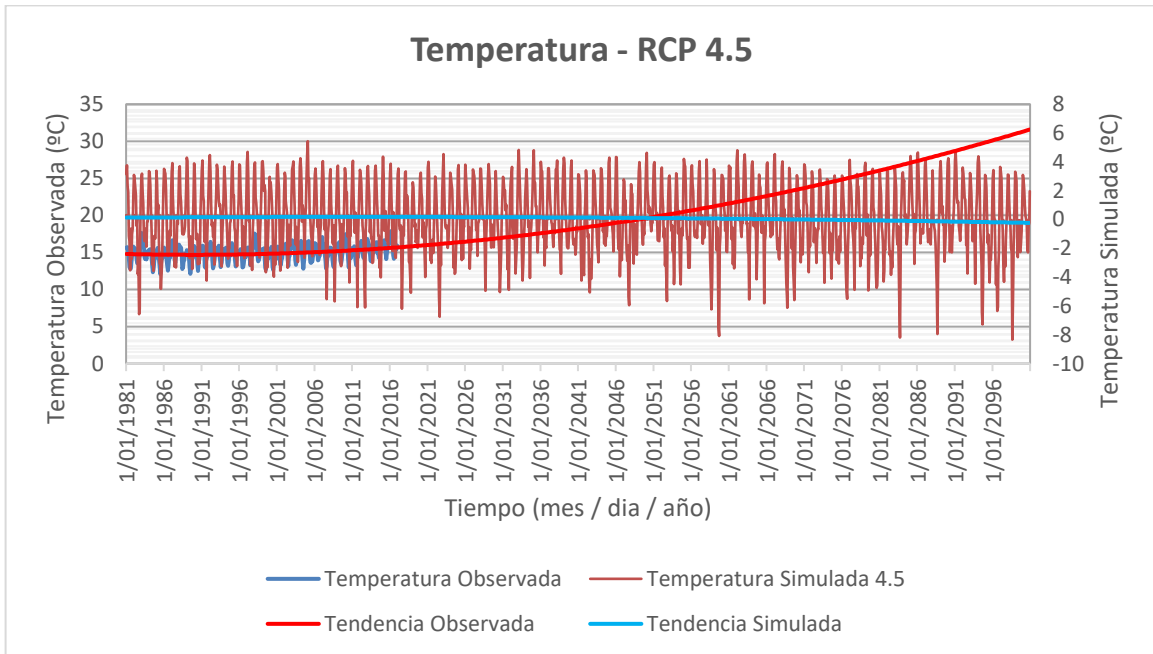
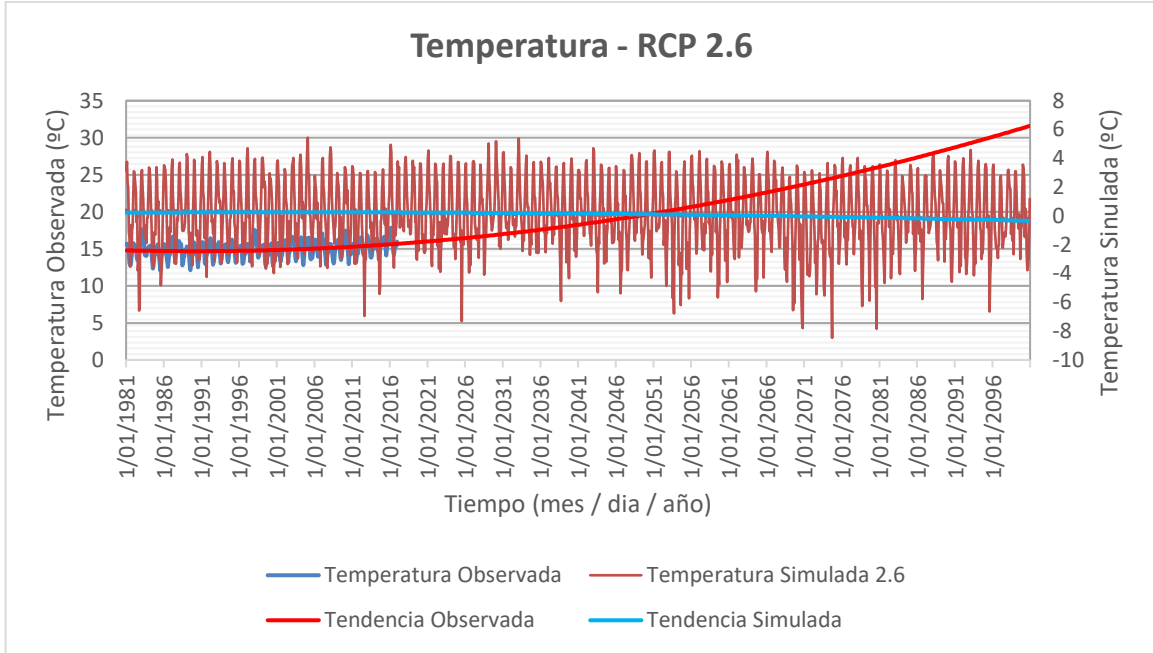
Valores Promedio de Precipitación – MIROC 5

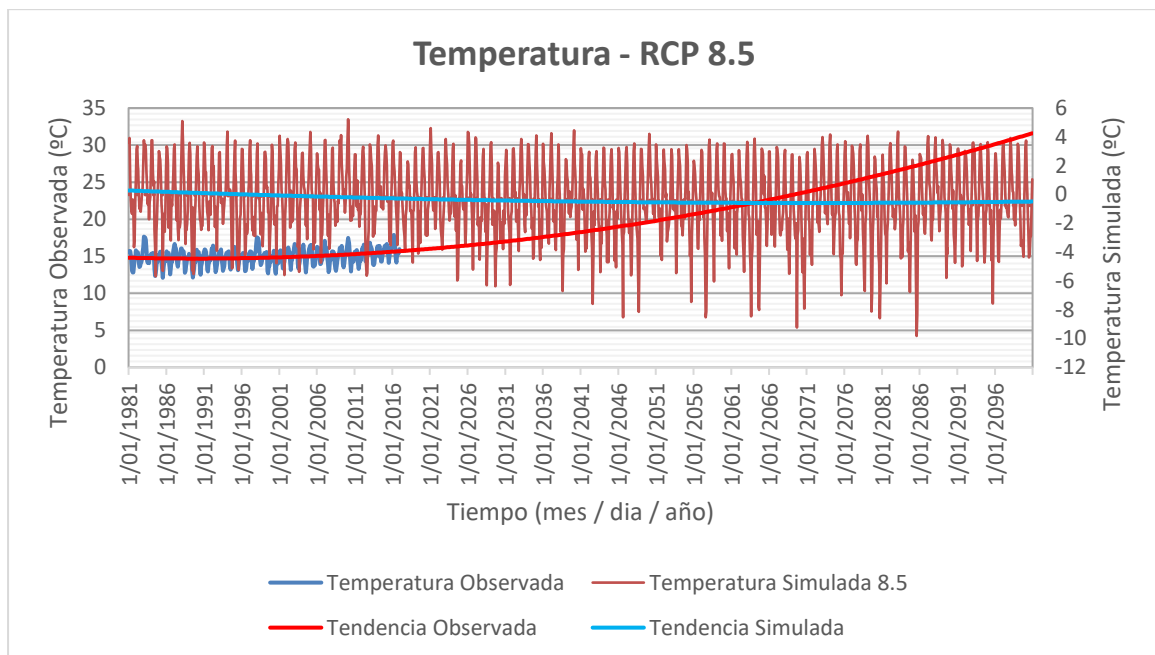
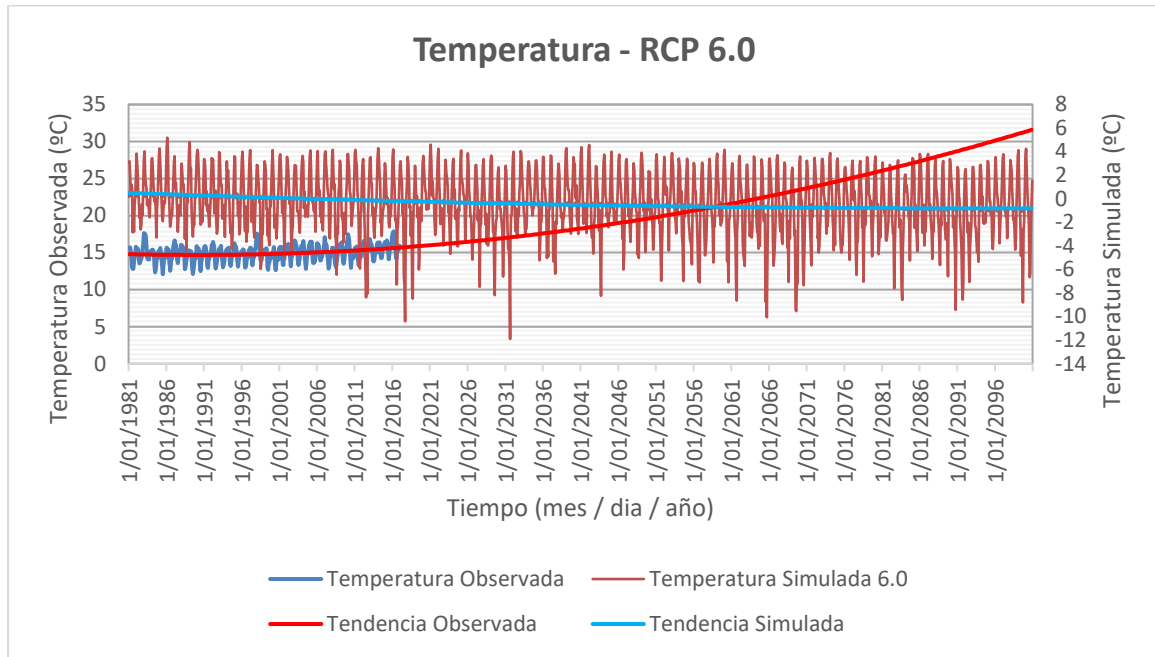




ANEXO N.º 16

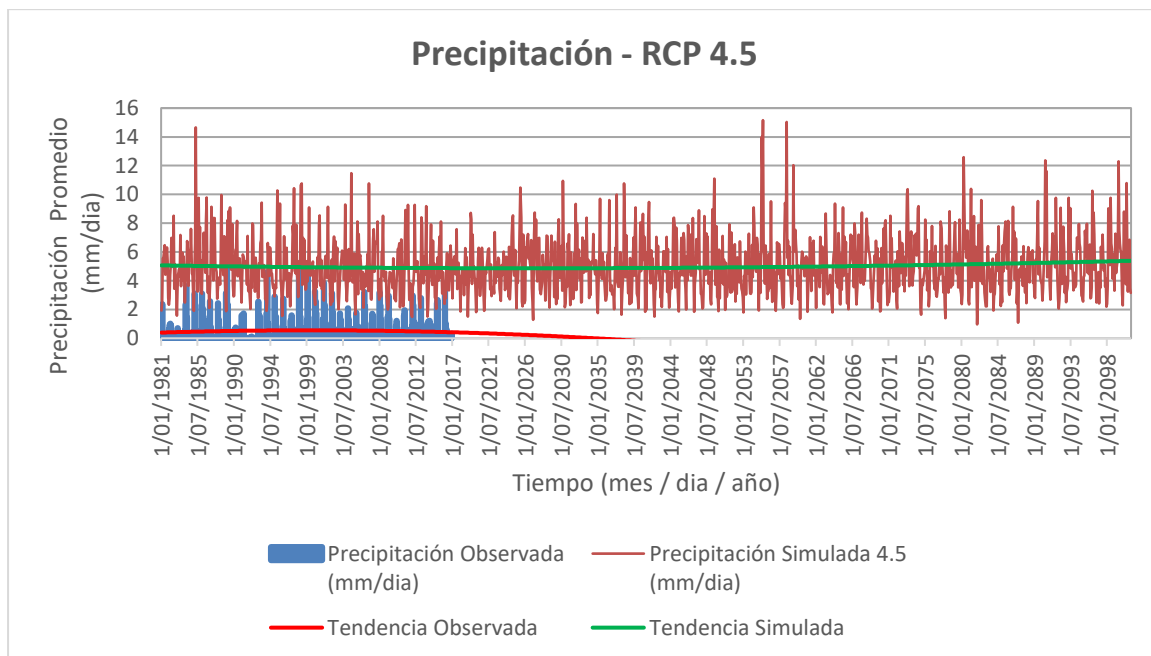
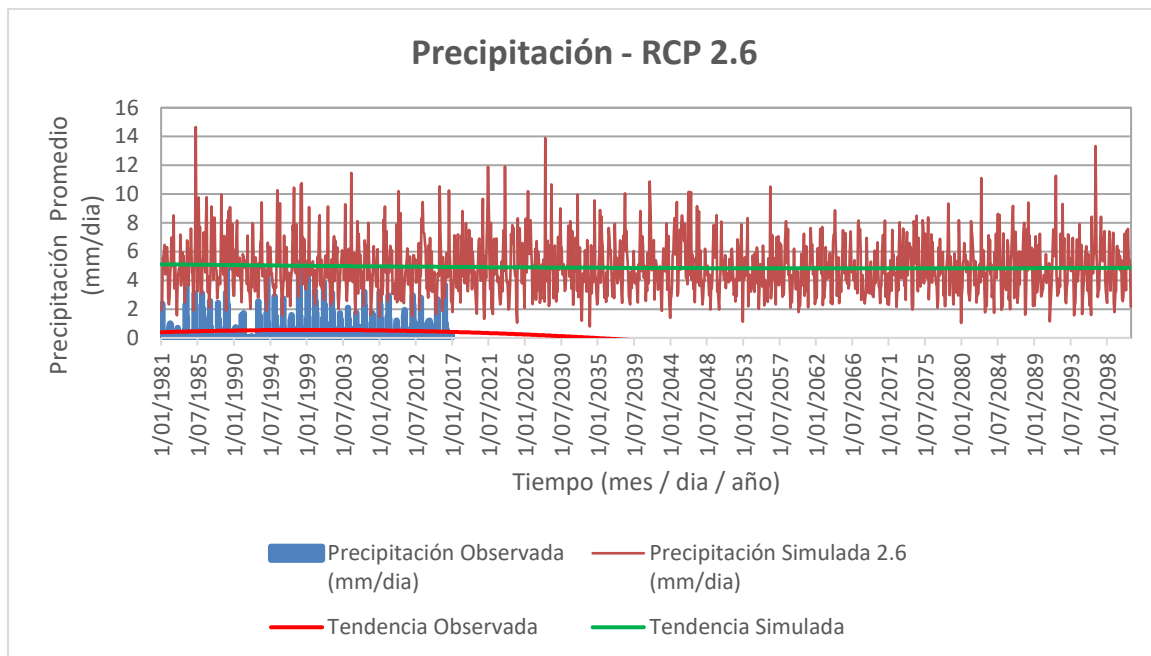
Valores Promedio de Temperatura – MIROC 5

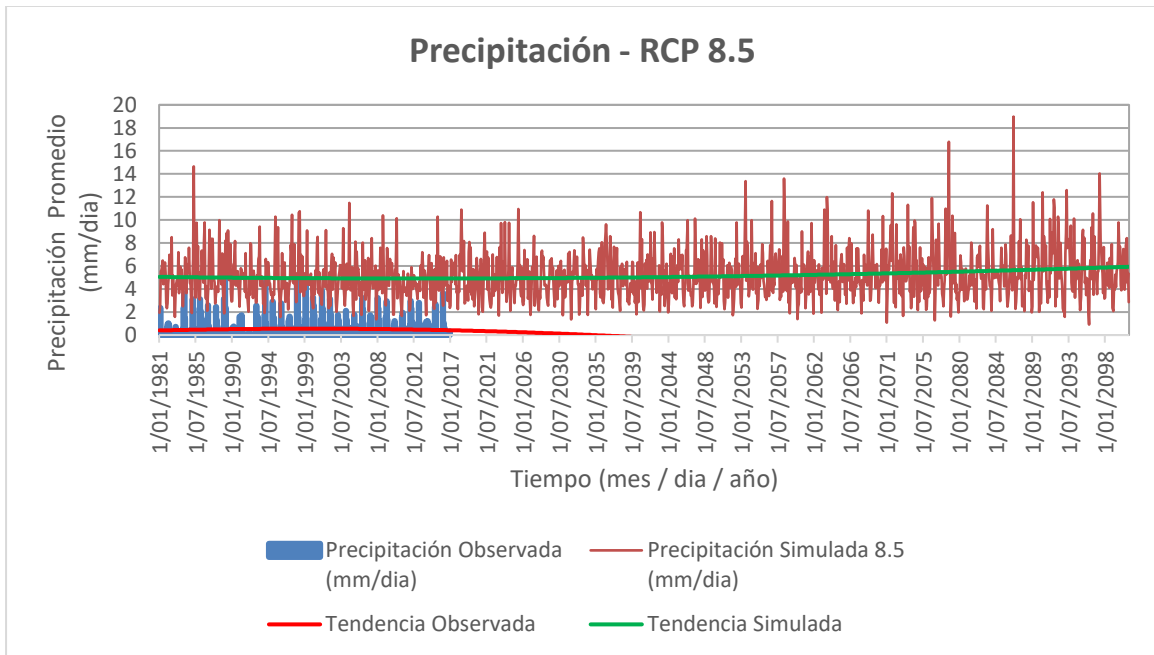
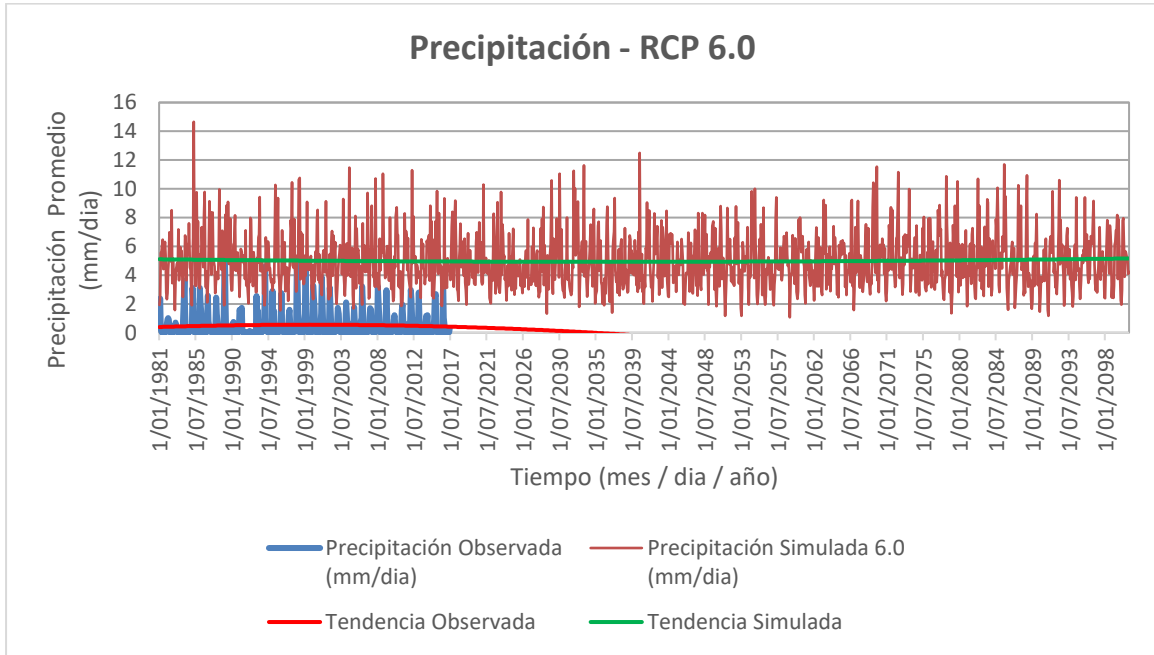




ANEXO N.º 17

Valores Promedio de Precipitación – MRI – CGCM3





ANEXO N.º 18

Valores Promedio de Temperatura – MRI – CGCM3

