

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

ESCUELA DE POSGRADO



**RIESGO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO EN LAS ZONAS
DE VIDA Y PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO HUAYLLABAMBA EN LA
PROVINCIA DE JAÉN**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO
EN CAMBIO CLIMÁTICO AGRICULTURA Y DESARROLLO
RURAL SOSTENIBLE**

ESTUDIANTE: Bach. Romal Alexander Villalobos Santos

ASESORES: M.Sc. José Ney Ríos Ramírez

Dr. Manuel Emilio Milla Pino

JAÉN – PERÚ

2026

Romal Alexander Villalobos Santos

RIESGO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO EN LAS ZONAS DE VIDA Y PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO HUAYLL...

 Quick Submit Quick Submit Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3519228609

Fecha de entrega

27 mar 2026, 10:38 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

27 mar 2026, 10:41 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

N_LA_SUBCUENCA_DEL_R_O_HUAYLLABAMBA_EN_LA_PROVINCIA_DE_JA_N.pdf

Tamaño del archivo

3.8 MB

104 páginas

24.649 palabras

144.507 caracteres



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huamán Mera

DIRECTOR (a) DE LA ESCUELA DE POSGRADO

8% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN



Dr. Alexander Huamán Mera
DIRECTOR (a) DE LA ESCUELA DE POSGRADO

ANEXO 16

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO (X) /DOCTOR()

En la ciudad de Jaén, el día 13 de abril del año 2026, siendo las 10:00 horas, el sustentante **Romal Alexander Villalobos Santos** defiende en sesión pública presencial (X) / a distancia () la Tesis titulada: **RIESGO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO EN LAS ZONAS DE VIDA Y PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO HUAYLLABAMBA EN LA PROVINCIA DE JAÉN**, para obtener el Grado Académico de Maestro (X)/Doctor () En Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible, ante el Jurado Evaluador conformado por:

Presidente: Dr. Lenin Quiñones Huatangari

Secretario: Dr. Alexander Huamán Mera

Vocal: Dra. Zadith Nancy Garrido Campaña

El sustentante procedió hacer la exposición de la investigación, haciendo especial mención de sus aportaciones a la sociedad y/o ciencia. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el sustentante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del sustentante, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis de Maestría (X)/Doctorado (), en términos de:

Aprobado (X) por Unanimidad (X) / Mayoría () Desaprobado ()



CONTACTO

Oficina Posgrado: 55921533



EMAIL

posgrado@unj.edu.pe



DIRECCIÓN

Calle Jaén - San Ignacio Km 24
Sector Yumbuco



REDES SOCIALES

      
www.unj.edu.pe

Con la mención: En Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible

- Aprobado con excelencia : 19 - 20 ()
- Aprobado con distinción : 17-18 ()
- Aprobado : 14-16 (46)
- Desaprobado : <14 ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en sesión pública.

Siendo las horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Grado Académico de Maestro (X)/Doctor ().



Firmado digitalmente por:
QUIÑONES HUATANGARI Lenin
FAU 20470393508 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 13/04/2020 19:36:13-0500

Dr. Lenin Quiñones Huatangari

Dr. Alexander Huamán Mera

Dra. Zadieth Nancy Garrido Campaña

OBSERVACIONES:

.....
.....



CONTACTO

Teléfono Posgrado: 959211533



EMAIL

posgrado@unepg.pe



DIRECCIÓN

Calle 1ra. de la Virgen - San Ignacio, Km. 24
Sector Yanavaco



REDES SOCIALES

www.unepg.pe

“Año de la recuperación y consolidación de la economía Peruana”**ANEXO N° 7:****Declaración Jurada de Autenticidad y de no plagio
de la Tesis o Trabajo de Investigación (posgrado)**

Yo, Romal Alexander Villalobos Santos, egresado del Programa de Maestría en **Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible** de la Universidad Nacional de Jaén, identificado con DNI 48141424

Declaro bajo juramento que:

7. Soy autor del trabajo titulado:

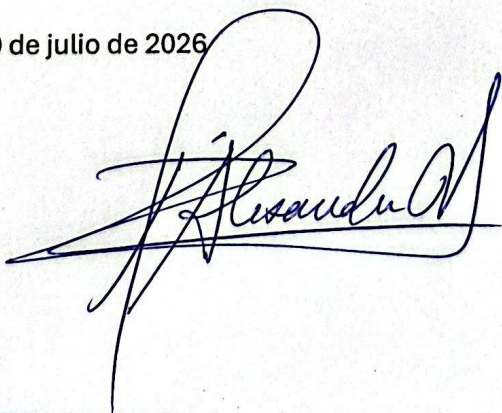
“Riesgo climático y su impacto en las zonas de vida y producción de agua en la subcuenca del río Huayllabamba en la provincia de Jaén”

El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar el **Grado de Maestro** en Ciencias en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible.

8. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
9. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
10. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
11. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 10 de julio de 2026



4. Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.
5. Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor
6. Idéntica a DNI, no se admite digital salvo certificado

Dedicatoria

A Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por acompañarme con su luz en cada paso de este recorrido.

A mi amada madre Trinidad, por su amor inagotable, su ejemplo de entrega y su constante aliento.

A la memoria de mi padre Arturo, quien desde el cielo guía mis decisiones y bendice mis esfuerzos.

A mis hermanos Maribel, Arturo e Iván, por su apoyo fraterno y su presencia en cada etapa de mi vida.

A Karen, mi compañera de vida, por su amor, comprensión y por caminar a mi lado con fe y esperanza.

Y a mi hija Alessandra, mi eterna inspiración, motor de mis sueños y razón más profunda de este logro.

Agradecimiento

A Dios, por concederme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa académica. Su guía constante ha sido mi mayor sostén en cada desafío afrontado durante este proceso de investigación.

A la Universidad Nacional de Jaén, por brindarme la oportunidad de formarme en la Maestría en Cambio Climático, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible, un espacio académico que fortaleció mi compromiso con la sostenibilidad ambiental y el desarrollo rural del país.

Mi más sincero reconocimiento y gratitud a mis asesores, Dr. Ney Ríos Ramírez y Dr. Emilio Milla Pino, por su valiosa orientación, sus aportes técnicos y su acompañamiento constante, que contribuyeron de manera decisiva al desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

A todos quienes, desde la docencia, la gestión académica o la investigación, contribuyen al fortalecimiento de la ciencia y la sostenibilidad desde la Universidad Nacional de Jaén.

I. ÍNDICE

I.	ÍNDICE.....	IV
II.	RESUMEN.....	VI
III.	INTRODUCCIÓN	1
IV.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	31
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
VII.	CONCLUSIONES.....	81
VIII.	RECOMENDACIONES.....	83
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
X.	ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Resumen de las narrativas de las SSP.	13
Tabla 2.	Modelos de circulación global CMIP6.....	15
Tabla 3.	Modelos Climáticos Globales.	19
Tabla 4.	Tipos de modelos hidrológicos (Forest Trends, 2022).....	21
Tabla 5.	Insumos, fuentes y características de los datos utilizados para la modelación hidrológica con el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).....	41
Tabla 6.	Parámetros climáticos utilizados en la modelación hidrológica.....	48
Tabla 7.	Descripción resumida de los escenarios socioeconómicos compartidos (SSP) y su forzamiento radiativo.	50
Tabla 8.	Variaciones mensuales proyectadas de precipitación y temperatura bajo escenarios climáticos SSP5 245 (°C y %).	
Tabla 9.	Variaciones mensuales proyectadas de precipitación y temperatura bajo el escenario SSP 585 (°C y %).	
Tabla 10.	Cambios proyectados en las variables del balance hídrico bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (periodo 2041-2060).	66
Tabla 11.	Distribución de zonas de vida en la subcuenca del río Huayllabamba.....	71
Tabla 12.	Cambio en condiciones climáticas futuras (precipitación, temperatura) bajo Escenario SSP2-4.5 (2041-2060) en las zonas de vida en la subcuenca del río Huayllabamba.....	72
Tabla 13.	Cambio en condiciones climáticas futuras (precipitación t temperatura) bajo Escenario SSP5-8.5 (2041-2060) en las zonas de vida en la subcuenca del río Huayllabamba.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico.....	9
Figura 2. Zonas de vida de la subcuenca del Huayllabamba.....	30
Figura 3. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Huayllabamba	33
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de modelación hidrológica con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), desde la preparación de insumos hasta la calibración, validación y generación de reportes finales.....	40
Figura 5. Modelo Digital de Elevación (MDE) de la subcuenca del río Huayllabamba	44
Figura 6. Mapa de tipos de suelo de la subcuenca del río Huayllabamba.....	46
Figura 7. Mapa de uso y cobertura del suelo de la subcuenca del río Huayllabamba....	47
Figura 8. Mapa de ubicación de las estaciones climáticas consideradas en la modelación hidrológica de la subcuenca del río Huayllabamba	48
Figura 9. Anomalías mensuales proyectadas de precipitación y temperatura bajo el escenario SSP2-4.5 (2041–2060) en la cuenca del río Huayllabamba.....	56
Figura 10. Anomalías mensuales proyectadas de precipitación y temperatura bajo el escenario SSP 585 (2041–2060) en la cuenca del río Huayllabamba	59
Figura 11. Esquema conceptual del ciclo hidrológico simulado por el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).....	
Figura 12. Balance promedio escenario SSP2 4.5 periodo 2041-2060.....	
Figura 13. Balance hídrico anual modelado bajo el escenario SSP2-4.5 (2041–2060) en la Subcuenca del río Huayllabamba	
Figura 14. Mapa de zonas de vida de la subcuenca del río Huayllabamba	70

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Anomalías climáticas en precipitación y temperatura bajo el escenario SSP245 período 41-60.....	93
Anexo 2. Anomalías climáticas en precipitación y temperatura bajo el escenario SSP585 período 41-60.....	94
Anexo 3. Boxplot de Anomalía de precipitación SSP245 y SSP585.....	95
Anexo 4. Boxplot de Anomalía de temperatura máxima SSP245 y SSP585.....	96
Anexo 5. Boxplot de Anomalía de temperatura mínima SSP245 y SSP585.....	97
Anexo 6. Cambios de la precipitación bajo el escenario SSP245 y SSP585.....	98
Anexo 7. Cambios de la temperatura máxima bajo el escenario SSP245 y SSP585	99
Anexo 8. Cambios de la temperatura mínima bajo el escenario SSP245 y SSP585	100
Anexo 9. Descargar y guardar datos historicos de Worldclim	101
Anexo 10. Descargar datos futuros de tres modelos	101
Anexo 11. Cálculo de anomalías	102
Anexo 12. Mapas.....	102

II. RESUMEN

La subcuenca del río Huayllabamba evidencia una creciente alteración climática, manifestada en el desplazamiento de los regímenes pluviométricos y en el incremento sostenido de los gradientes térmicos, lo cual afecta directamente la estructura de las zonas de vida y la dinámica de producción de agua, comprometiendo la regulación natural del ciclo hidrológico; en este contexto, se identificaron los escenarios climáticos futuros SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para evaluar cómo las anomalías proyectadas de temperatura y precipitación modifican la disponibilidad hídrica y la estabilidad ecosistémica, mediante una metodología que integró series climáticas de WorldClim y proyecciones CMIP6, procesamiento estadístico en software R para estimar anomalías y análisis espacial con SIG, complementado con la simulación hidrológica a través del modelo SWAT, que permitió caracterizar cambios en escorrentía, infiltración, flujo base y producción de sedimentos; los resultados muestran un incremento térmico entre 1.5 y 2.5 °C acompañado de mayor variabilidad pluviométrica, condiciones que intensifican la evapotranspiración, reducen la eficiencia de recarga subterránea y elevan la escorrentía superficial, generando un aumento sustancial de erosión y carga de sedimentos, mientras las zonas de vida húmedas presentan mayor riesgo de saturación y deslizamientos y las zonas secas un estrés hídrico más marcado con mayor probabilidad de incendios; en términos amplios, el riesgo climático proyectado disminuye la resiliencia ecosistémica y la estabilidad hídrica anual, exigiendo estrategias de adaptación orientadas a fortalecer la infiltración, proteger áreas de recarga y optimizar la gestión del agua frente a escenarios de creciente variabilidad climática.

Palabras clave: cambio climático, anomalías climáticas, dinámica hidrológica, zonas de vida, riesgo climático.

III. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa un desafío estructural para la sostenibilidad de los recursos naturales, particularmente en territorios caracterizados por alta sensibilidad ecológica y fuerte dependencia de las condiciones climáticas, como las regiones altoandinas del norte peruano (Reyes-Palomino et al., 2022).

En el transcurso de los últimos cincuenta años, el territorio peruano ha evidenciado una drástica reducción de sus áreas glaciares, estimada en aproximadamente el 50 por ciento de su extensión original, en paralelo con una intensificación sostenida de la recurrencia y severidad de fenómenos climáticos extremos, entre los que destacan las sequías prolongadas, heladas meteorológicas, lluvias torrenciales, deslizamientos de masa y los incendios de origen natural o antrópico (Concha Niño de Guzmán et al., 2024). Estas transformaciones están modificando de manera significativa la funcionalidad ecológica de los ecosistemas andinos y comprometiendo los medios de vida rurales, particularmente aquellos dependientes de la agricultura familiar, la disponibilidad hídrica y el acceso estable a alimentos, generando un escenario de creciente vulnerabilidad socioambiental (Lozano-Povis et al., 2021).

El riesgo climático, entendido como el resultado de la interacción entre una amenaza climática, la exposición de los sistemas socioecológicos y su vulnerabilidad estructural, se convierte en un concepto clave para comprender la magnitud de los impactos esperados y diseñar estrategias eficaces de adaptación (Bravo, 2020).

La subcuenca del río Huayllabamba, ubicada en el distrito de Chontalí provincia de Jaén en el departamento de Cajamarca, constituye una unidad prioritaria por su importancia ecológica en la provisión de servicios ecosistémicos, especialmente la regulación hídrica, y por su alta biodiversidad (GORECAJ, 2011). Sin embargo, la intensa presión antrópica producto de la expansión agrícola, extractiva y urbana que ha provocado la fragmentación de sus bosques montanos tropicales, reduciendo la conectividad ecológica y generando una pérdida significativa de biodiversidad vegetal, lo que pone en riesgo la funcionalidad de los ecosistemas y la sostenibilidad de los recursos hídricos que sostienen los medios de vida locales (Dilas-Jiménez et al., 2023).

Las zonas de vida presentes en esta subcuenca, que abarcan desde ecosistemas de bosque montano húmedo hasta áreas de ceja de selva, son esenciales para la captación, almacenamiento y distribución del agua a lo largo del año (GORECAJ, 2011). Sin

embargo, estos sistemas naturales se encuentran cada vez más comprometidos debido a la pérdida de cobertura vegetal, la fragmentación de hábitats, la expansión de la frontera agrícola y la escasa gobernanza ambiental (ONU, 2022). Los efectos del cambio climático que, al modificar las condiciones hidrometeorológicas, agravan la situación y aumentan la vulnerabilidad tanto ambiental como social (Zamora Martínez, 2015).

Desde el punto de vista institucional, el Perú ha avanzado en el desarrollo de políticas y marcos normativos orientados a enfrentar el cambio climático. La Ley Marco sobre Cambio Climático (Ley N.º 30754) y su reglamento establecen lineamientos para la gestión integrada del riesgo climático y promueven la articulación entre los tres niveles de gobierno. Asimismo, entidades como el Ministerio del Ambiente (MINAM), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y los Gobiernos Regionales y Locales, tienen un rol fundamental en la generación de información climática, la planificación territorial, la conservación de ecosistemas hídricos y la implementación de medidas de adaptación (Bravo Alarcón, 2022).

En ese contexto, la investigación tiene como propósito general evaluar el riesgo climático y su incidencia en las zonas de vida y en los sistemas de producción de agua de la subcuenca del río Huayllabamba, mediante un enfoque interdisciplinario e integrador que articula el análisis biofísico del territorio, la modelación climática de escenarios prospectivos y la caracterización geoespacial de la dinámica ecosistémica.

El enfoque adoptado permite identificar de manera espacio-temporal los gradientes de vulnerabilidad climática, analizar los patrones de variabilidad y tendencia de las variables meteorológicas críticas precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial y evaluar su influencia sobre la funcionalidad hídrica y ecológica de las principales unidades de paisaje que estructuran la subcuenca.

Durante la etapa analítica, el estudio integra técnicas de evaluación multicriterio ponderada, herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos de simulación hidrológica, con el objetivo de cuantificar las alteraciones en la oferta natural de agua y determinar su correspondencia con los cambios en la cobertura vegetal, el uso del suelo y los gradientes altitudinales.

Con base en estos procedimientos, delimita zonas críticas de exposición y sensibilidad ambiental, evidenciando la interacción entre los componentes biofísicos,

climáticos y antrópicos del sistema territorial, y define lineamientos estratégicos de adaptación ecosistémica y ordenamiento territorial, orientados hacia la gestión sostenible del recurso hídrico, la preservación de servicios ecosistémicos reguladores y la reducción de vulnerabilidades socioambientales.

El estudio constituye un aporte técnico científico para la comprensión integral del riesgo climático y sus efectos sobre los procesos de regulación hídrica en ecosistemas andinos, fortaleciendo la resiliencia adaptativa de los sistemas territoriales rurales frente a los escenarios de cambio climático proyectados. Asimismo, proporciona fundamentos empíricos y espaciales para la toma de decisiones informadas en materia de planificación y gestión integrada de los recursos hídricos y del territorio, en coherencia con los instrumentos de política climática nacional e internacional, tales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), las Estrategias Regionales de Cambio Climático (ERCC) y el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC, 2021), bajo un enfoque de sostenibilidad, equidad territorial y justicia climática.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Antecedentes de la investigación

En Etiopía se realizó un estudio para investigar el cambio climático y sus efectos en los procesos hidrológicos de la cuenca del río Baro-Akobo, desarrollando se analizaron cuatro escenarios futuros modelos climáticos regionales con corrección de sesgo y su conjunto para analizar los cambios climáticos futuros en los períodos de 2030 (2021-2050) y 2080 (2071-2100) bajo los dos escenarios de Rutas de Concentración Representativas (RCP) 4.5 y (RCP) 8.5 comparando con un lapso de referencia (1981-2010). El modelo calibrado funcionó bien con una eficiencia de Nash-Sutcliffe y un coeficiente de determinación de cada uno de 0.73 para la simulación diaria y de 0.89 y 0.9 para la simulación mensual, respectivamente (Mengistu et al., 2023).

A su vez, se usó la tecnología de detección remota GIS para construir un modelo hidrológico distribuido SWAT con el fin de realizar una simulación de escorrentía en la cuenca del río Hulan, y se utilizó el software SWAT-CUP para corregir y analizar los resultados de la simulación. Los parámetros de deshielo se establecieron para mejorar la precisión del modelo. Los datos de escorrentía recopilados de la Estación Hidrológica de

Lanxi de 2008 a 2020 se utilizaron para verificar el modelo. Los resultados mostraron que el coeficiente de eficiencia (NES) y el coeficiente de correlación (R^2) son 0.75 y 0.84, respectivamente, en el período de validación de 2010 a 2013, mientras que son 0.77 y 0.93 respectivamente, en el período de corrección de 2014 a 2016, cumpliendo los criterios de evaluación del modelo. De los resultados mencionados anteriormente se puede ver que SWAT es aplicable en la cuenca del río Hulan, proporcionando una cierta referencia para la gestión de los recursos hidrológicos y hídricos disponibles en esta región y para la construcción de un modelo hidrológico distribuido de los ríos en esas frías latitudes de regiones altas (Su et al., 2023).

Por su parte se investigaron las características climáticas futuras de la cuenca del río Minab, Irán, considerando tres escenarios CMIP6 (es decir, escenarios SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) del modelo CanESM5 durante 2021-2050 y 2051-2080. Se proyectaron los mapas LULC de la cuenca durante 2035 y 2065, y los impactos individuales y combinados de LULC y el clima sobre el caudal y la evapotranspiración (ET) de la cuenca se evaluaron utilizando el modelo SWAT. Se proyectó que las precipitaciones futuras y la temperatura mínima y máxima de la región aumentarían hasta un 88, 21 y 12 por ciento, respectivamente, en comparación con el período de referencia (1989-2014), (Abbaszadeh et al., 2023).

En otra investigación en Escuintla, Guatemala, se realizó la modelación hidrológica y de cambio climático con el objetivo de estudio, de estimar la producción de agua, la producción de sedimentos y los niveles de erosión utilizando modelos de cambio hidrológico y climático para determinar cambios en la cobertura y el uso del suelo. Empleando para ello el modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) en la interfaz QSWAT (versión 1.4). Consideró una línea base (situación actual) de 1983 al 2018, un escenario de cambio climático RCP 8.5 utilizando el modelo CCS4 (Community Climate System Model, versión 4) al año 2050. (Ramírez Contreras, 2020).

En el Perú, se modeló la disponibilidad hídrica del río Piura, teniendo en cuenta el cambio climático, haciendo uso del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) con el propósito de estudiar el comportamiento hidrológico futuro en la cuenca media y alta del río Piura a mediados del siglo XXI. El desempeño óptimo fue indicado por el modelo SWAT, el cual fue validado y calibrado durante un total de 23 años (1986 - 2008), logrando valores de Nash-Sutcliffe (NSE) y coeficientes de

determinación (R^2) superiores al 75 por ciento en ambos. Las principales variables climáticas se proyectaron con dos escenarios de forzamiento radiactivo RCP 4.5 y RCP 8.5 de dos modelos climáticos globales (MCG) HADGEM2-ES y CSIRO-Mk3-6-0, del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), usando el generador de clima Mark Sim; definiéndose un total de cuatro escenarios futuros. Se analizaron los periodos húmedos (octubre a abril) y secos (mayo a setiembre), al igual que el periodo anual (León Ochoa, 2017).

También se evaluó en la investigación denominada “Aplicación de modelación hidrológica para analizar sequías en escenario de cambio climático, en la Subcuenca del Río Chili Arequipa 2020-2050” donde se aplicó la modelación hidrológica para analizar sequías en escenarios de cambio climático, en la subcuenca del río Chili, Arequipa para los años 2020 - 2050. De manera que se estableció un diseño de tipo no experimental y longitudinal, donde en primer lugar se representó la subcuenca utilizando el modelo hidrológico SWAT, y calculando los índices de performance de este modelo (NASH, PBAIS y R^2). Subsecuentemente, se reportó datos climáticos proyectados hasta el año 2050 y, mediante el método downscaling estadístico, se redujo el sesgo de estos datos, con el fin de ingresarlos al modelo y calcular los caudales proyectados. Finalmente, el comportamiento de las sequías bajo proyecciones climáticas fue examinado mediante el índice de estandarizado de caudal (SSI) y el índice de precipitación estandarizado (SPI). Los resultados mostraron que los índices de rendimiento en la validación y calibración tenían buenos valores. Mostraron que, cuando fueron proyectadas hasta el 2050 bajo el escenario RCP 4.5, se observaron variaciones en la frecuencia y severidad de las diferentes categorías de sequías hidrológicas y meteorológicas. Así, se puede concluir que el proceso de calibración y validación proporciona una manera confiable de representar los procesos hidrológicos de la subcuenca del río Chili a través de modelamiento la calibración y validación, permitiendo determinar variaciones en la frecuencia y severidad de las tormentas bajo proyecciones climáticas (Garay Valdivia & Huanca Diaz, 2022).

4.2. Bases teóricas

4.2.1. *Sistema socioecológico*

Sistema integrado en el que los seres humanos son parte de la naturaleza e incluye tanto las sociedades humanas como los ecosistemas. Y las interacciones e interdependencia de los subsistemas ecológicos que proporcionan la base para las funciones de este sistema. La estructura del sistema se caracteriza por retroalimentaciones recíprocas, lo que enfatiza que los humanos deben ser vistos como parte de la naturaleza, no aparte de ella.” (IPCC, 2022, p. 2923).

4.2.2. *Riesgo climático*

“El potencial de consecuencias adversas para los sistemas humanos o ecológicos, reconociendo la diversidad de valores y objetivos asociados con dichos sistemas. En el contexto de los impactos del cambio climático, los riesgos resultan de interacciones dinámicas entre los peligros relacionados con el clima y la exposición y vulnerabilidad del sistema humano o ecológico afectado a los peligros.” (IPCC, 2022, p. 2921).

4.2.3. *Peligro*

“La posible ocurrencia de un evento o tendencia física natural o inducida por el hombre que puede causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas a la propiedad, infraestructura, medios de vida, prestación de servicios, ecosistemas y recursos ambientales.” (IPCC 2022, p. 2911).

4.2.4. *Exposición*

“La presencia de personas; medios de vida; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o bienes económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente.” (IPCC 2022, p. 2908).

4.2.5. *Vulnerabilidad*

“La propensión o predisposición a verse afectado negativamente. La vulnerabilidad abarca una variedad de conceptos y elementos, incluida la sensibilidad o

susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para afrontarlo y adaptarse.” (IPCC 2022, p. 2927).

4.2.6. Sensibilidad

“El grado en que un sistema o especie se ve afectado, ya sea de manera adversa o beneficiosa, por la variabilidad o el cambio climático. El efecto puede ser directo (por ejemplo, un cambio en el rendimiento de los cultivos en respuesta a un cambio en la media, rango o variabilidad de la temperatura) o indirecto (por ejemplo, daños causados por un aumento en la frecuencia de inundaciones costeras debido al aumento del nivel del mar).” (IPCC, 2022, p. 2922).

4.2.7. Capacidad de afrontamiento

Capacidad de las personas, instituciones, organizaciones y sistemas, mediante el uso de las aptitudes, valores, convicciones, recursos y oportunidades disponibles, para abordar, manejar y superar condiciones adversas a corto o mediano plazo.” (IPCC, 2018, p. 76).

4.2.8. Capacidad de adaptación

“Capacidad de los sistemas, las instituciones, los humanos y otros organismos para adaptarse ante posibles daños, aprovechar las oportunidades o afrontar las consecuencias.” (IPCC, 2018, p. 76).

4.2.9. Impactos

“Las consecuencias de los riesgos realizados en los sistemas naturales y humanos, donde los riesgos resultan de las interacciones de los peligros relacionados con el clima (incluidos los fenómenos meteorológicos/climáticos extremos), la exposición y la vulnerabilidad. Los impactos generalmente se refieren a efectos sobre vidas, medios de subsistencia, salud y bienestar, ecosistemas y especies, activos económicos, sociales y culturales, servicios (incluidos los servicios ecosistémicos) e infraestructura. Los impactos pueden denominarse consecuencias o resultados y pueden ser adversos o beneficiosos. presencia de personas; medios de vida; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o bienes económicos, sociales o

culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente.” (IPCC 2022, p. 2912).

4.2.10. Adaptación

“Proceso de ajuste al clima real o esperado y sus efectos, con el fin de moderar el daño o explotar oportunidades beneficiosas. En los sistemas naturales, el proceso de adaptación al clima real y sus efectos; la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima esperado y sus efectos.” (IPCC 2022, p. 2898).

4.2.11. Resiliencia

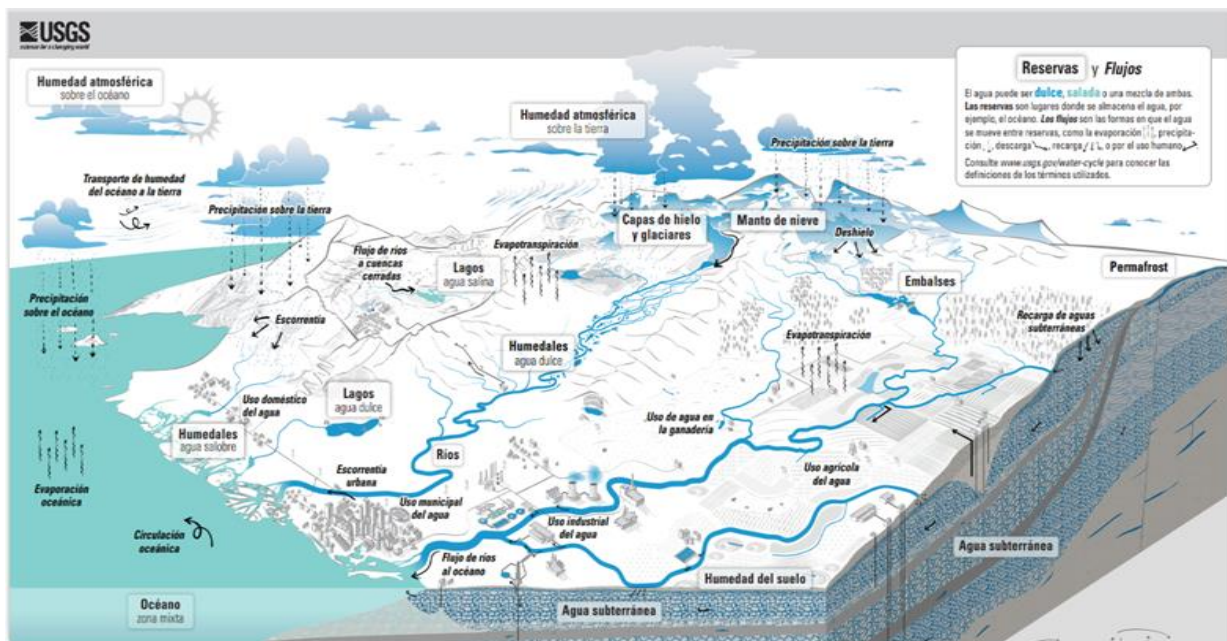
“La capacidad de los sistemas sociales, económicos y ecológicos interconectados para hacer frente a un evento, tendencia o perturbación peligrosos, respondiendo o reorganizándose de manera que mantengan su función, identidad y estructura esenciales. La resiliencia es un atributo positivo cuando mantiene la capacidad de adaptación, aprendizaje y/o transformación.” (IPCC 2022, p. 2920).

4.2.12. Transformación

“Cambio en los atributos fundamentales de los sistemas humanos y naturales.” (IPCC, 2022, p. 2925).

4.2.13. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico describe la distribución del agua en los distintos reservorios naturales y los procesos mediante los cuales se moviliza entre ellos. El agua se almacena principalmente en la atmósfera, en la superficie terrestre y en el subsuelo, y circula a gran escala a través de cuencas hidrográficas, intercambios atmosféricos y flujos subterráneos. Estos procesos de almacenamiento y transferencia se representan de manera esquemática en la figura 1 (Servicio Geológico de EE.UU, 2019).



Nota. Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019

Figura 1. Ciclo hidrológico

4.2.14. Balance hídrico

Originado en la preocupación del balance de materia, es el equilibrio entre los recursos hídricos que entran al sistema y los que fluyen del mismo, en un porcentaje establecido. El agua se evapora mediante la transpiración del suelo y las plantas, ya sea en una superficie libre de agua o incorporada a la atmósfera. Al elevarse el aire húmedo, se enfría lentamente, cuando por el continuo enfriamiento se satura, aparecen las nubes y según el desarrollo que éstas alcancen, se produce la precipitación (Larrinaga Cunningham, 2013).

a. Precipitación: En meteorología, es el término con el cual se denominan las formas de agua en estado líquido (lluvia) o sólido (nieve o granizo) que caen directamente sobre la superficie terrestre (Agua, 2021).

b. Escorrentía: Es un proceso físico que implica el escurrimiento del agua de lluvia vía la red de drenaje hasta la red fluvial. La escorrentía es uno de los procesos básicos que se incluye en el ciclo del agua (Valdivielso, 2020).

Tipos de escorrentía:

- **Escorrentía superficial o directa**

Precipitación que se desintegra en la superficie del suelo debido a la gravedad sin filtrarse en el mismo.

- **Escorrentía hipodérmica**

Es el agua de precipitación que se filtra en la tierra, que se mueve sobre los horizontes superiores y vuelve a aparecer en forma de manantial.

- **Escorrentía subterránea**

Es precipitación que penetra alcanzando la zona freática y circula hasta llegar a la red de drenaje.

c. Evapotranspiración: La transformación del líquido a vapor del suelo y agua de las plantas hacia la atmósfera es conocida como evapotranspiración, ya que el suelo evapora el líquido que contiene las plantas. En el caso de las plantas, el agua de ellas llega hacia la atmósfera a través de las estomas de las hojas (Callañaupa, 2019).

d. Infiltración: Proceso por el cual el agua se mueve desde la superficie del suelo hasta las profundidades. Dependiendo de la forma y estructura del suelo. La infiltración se puede dar de forma saturada o no saturada (Bateman, 2007).

4.2.15. Cuenca hidrográfica

Área geográfica drenada por una corriente de agua que va desde una superficie agrícola atravesada por un río, hasta las grandes cuencas fluviales. Lo que lo constituye en un sistema dinámico, caracterizado por diversas interacciones y relaciones espaciales entre las personas y el medio ambiente (FAO, 2023).

4.2.16. Unidad hidrográfica

Espacios geográficos limitados por líneas divisorias de aguas, relacionadas espacialmente por sus códigos, cuya organización está estructurada jerárquicamente por niveles, en el que la superficie de drenaje es el único criterio de decisión organizativa (ANA, 2009).

4.2.17. Estadística geoespacial

La estadística geoespacial, es una metodología común para habilitar geoespacialmente datos estadísticos y administrativos, y para asegurar que los datos de una variedad de fuentes se puedan integrar con otra información geoespacial basada en la localización (CEPAL, 2021).

4.2.18. Cambio Climático

Es el cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (CMNUCC, 1992).

4.2.19. Escenarios de clima futuro

Son una descripción simplificada y probable del clima que se basa en relaciones climatológicas y se utiliza en la investigación de los efectos del cambio climático antropogénico. El escenario cuantifica y establece las variaciones climáticas futuras en relación con el clima actual. A su vez, sirve como instrumento complementario para elaborar modelos del impacto del cambio climático (Instituto Meteorológico Mundial, 2010).

4.2.20. Escenarios climáticos

En el estudio y evaluación del cambio climático, los escenarios juegan un papel esencial, ya que nos ayudan a comprender las consecuencias a largo plazo de las decisiones a corto plazo, y permiten examinar una variedad de futuros posibles dentro del contexto de incertidumbres fundamentales asociadas a estos (Riahi et al., 2017). En el AR6 del IPCC, un escenario se define como “Una descripción plausible de cómo puede desarrollarse el futuro basada en un conjunto coherente e internamente consistente de supuestos sobre fuerzas impulsoras clave (por ejemplo, tasa de cambio tecnológico (TC), precios) y relaciones.” (IPCC, 2022, p. 2921).

El propósito de los escenarios no es proporcionar predicciones o pronósticos, sino brindar información sobre las implicaciones de eventos y acciones sobre el sistema climático (IPCC, 2022). En este marco, los escenarios utilizados por el IPCC para describir los posibles caminos futuros de desarrollo para las sociedades humanas se

denominan Vías Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways (SSP), por sus siglas en inglés). Los SSP ofrecen un análisis sistemático de posibles futuros socioeconómicos en el contexto de predisposiciones muy diferentes a mitigar y adaptarse al cambio climático a escala global (O'Neill et al., 2017).

Estos escenarios representan narrativas suficientemente genéricas de posibilidades futuras a escala global que proporciona un contexto global para procesos a escalas geográficas más bajas, guiando la planificación a nivel regional, nacional o subnacional (Kriegler et al., 2014). Dado que están diseñados para una amplia gama de combinaciones de desafíos para la mitigación y la adaptación al cambio climático, deben considerarse como casos de referencia para los estudios de esta naturaleza, incluyendo los análisis de riesgo e impacto climático (Riahi et al., 2017).

El IPCC desarrolló cinco SPP centrándose en los niveles de forzamiento radiativo cubiertos por las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) propuestas en el AR5. Las vías se diferencian en función de las tendencias socioeconómicas futuras que podrían dar lugar a la presencia o ausencia de políticas y medidas adicionales explícitas para reducir el forzamiento climático o mejorar la capacidad de adaptación respectivamente (Riahi et al., 2017). Cada escenario está etiquetado para identificar tanto el forzamiento radiativo como el llamado desarrollo socioeconómico correspondiente. Estos escenarios se denominan SSPx-y, donde: “SSPx” se refiere a la ruta socioeconómica compartida que describe las tendencias socioeconómicas subyacentes a los escenarios, y la “y” se refiere al nivel de forzamiento radiativo (en W m^{-2}) resultante del escenario en el año 2100 (IPCC, 2022). En la siguiente tabla describimos los escenarios.

Tabla 1. Resumen de las narrativas de las SSP.

Escenarios	Resumen de la narrativa
SSP1-1.9: Sostenibilidad (bajos desafíos para la mitigación y la adaptación)	El escenario más optimista del IPCC prevé un mundo en el que las emisiones globales de CO ₂ se reduzcan a cero para 2050. En este escenario, existe un cambio en la sociedad hacia prácticas más sostenibles y la atención se desplaza del crecimiento económico al bienestar general. Aumentan las inversiones en salud y educación. Cae la desigualdad. Sólo este escenario cumple con el objetivo establecido en el Acuerdo de París de limitar el calentamiento global a 1.5°C.
SSP1-2.6: A mitad del camino (Desafíos medios para la mitigación y la adaptación)	El siguiente es mejor escenario, las emisiones globales de CO ₂ se reducirán significativamente, pero no tan rápidamente, hasta llegar a cero emisiones netas en 2050. Este escenario considera los mismos cambios socioeconómicos hacia la sostenibilidad que el SPP1-1.9, sin embargo, las temperaturas se estabilizarán alrededor de 1.8°C más para finales de siglo. Las hipótesis se encuentran entre aquellas que coinciden con el SSP1 y el SSP3.
SSP2-4.5: Rivalidad regional: un camino difícil (grandes desafíos para la mitigación y la adaptación)	En este escenario, el nivel de emisiones de CO ₂ ronda los niveles actuales de comenzar a disminuir a mediados de siglo, pero no llegará a cero emisiones en 2100. Los factores socioeconómicos continúan con la misma tendencia que en el pasado. El desarrollo y los ingresos crecen de manera desigual y el progreso hacia la sostenibilidad es lento. La temperatura promedio aumentará a 2.7°C para finales de siglo, lo que significará un alto grado de dificultades en relación a la mitigación y la adaptación.
SSP3-7.0: Desigualdad: (escasos desafíos para la mitigar, grandes retos para la adaptar)	Para 2100, las emisiones y las temperaturas aumentarán de manera constante, y las emisiones de CO ₂ se duplicarán con respecto a los niveles actuales. Los países se vuelven más competitivos entre sí, orientándose hacia la seguridad nacional y garantizando sus propios suministros de alimentos. En este escenario, los avances tecnológicos ocurren en las naciones desarrolladas, pero no todas las poblaciones se benefician de ellos, lo que indica un alto grado para la adaptación. A finales de siglo, la temperatura media habrá aumentado 3.6°C.

SSP5-8.5: Desarrollo impulsado por combustibles fósiles: (grandes retos para la mitigación, escasos desafíos para la adaptación)

Un futuro que debe evitarse a toda costa. Para 2050, se estima que las emisiones de CO₂ se dupliquen a raíz de un crecimiento rápido de la economía global impulsado por la explotación de combustibles fósiles y estilos de vida que consumen mucha energía, lo que representa un alto nivel de desafío para la mitigación. Como resultado, la temperatura global promedio aumentará 4.4°C para el año 2100.

Nota. Climate Central Group (2021); Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN).

4.2.21. Modelos de circulación global (MCGs)

Los modelos de circulación global son representaciones numéricas del sistema climático que, basados en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, permiten simular sus componentes, interacciones y retroalimentaciones con distintos niveles de complejidad, y se utilizan tanto para la investigación como para la predicción del clima en diversas escalas temporales (IPCC, 2018).

4.2.22. Tipos de modelos de circulación global

El CMIP6 reúne más de 100 modelos desarrollados por más de 50 centros de investigación climática, permite formar un conjunto que refleja una amplia gama de posibles escenarios futuros del clima y sus incertidumbres. Este esfuerzo, impulsado desde 1995 por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, busca mejorar la comprensión del sistema climático a lo largo del tiempo, los datos generados ayudan a analizar los efectos de factores naturales y humanos como el aumento de los gases de efecto invernadero en la evolución del clima global (Copernicus, 2021)

4.2.23. Modelos de circulación global CMIP6

Los datos climáticos mensuales futuros a escala reducida del CMIP6 están disponibles en archivos GeoTiff para nueve modelos de circulación general (GCM) y cuatro escenarios SSP, correspondientes a los períodos 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 y 2081–2100. Las variables climáticas consideradas incluyen tn (temperatura mínima media mensual, °C), tx (temperatura máxima media mensual, °C), pr

(precipitación total mensual, mm) y bc (variables bioclimáticas), las cuales se describen y resumen en la Tabla 2 (Wordclim, 2025).

Tabla 2. Modelos de circulación global CMIP6

GCM	Escenario de emisiones	Definición
ACCESO-CM2		Es una familia de modelos diseñada para distintas aplicaciones operativas y de investigación, desde pronósticos meteorológicos hasta proyecciones climáticas. En el ámbito climático, se compone de varios modelos centrales: el Modelo Unificado (UM) del Reino Unido para la atmósfera, el modelo CABLE para los procesos terrestres, el MOM de EE. UU. para el océano y el modelo LANL CICE para el hielo marino, integrando así componentes clave del sistema climático (CSIRO, 2025).
	SSP126	
	SSP245	
	SSP370	
BCC-CSM2-MR	SSP585	Se trata de una versión de alta resolución del Modelo del Sistema Climático del Centro Climático de Beijing (BCC), con una malla T266 para la atmósfera y una resolución más fina en el océano. Este modelo se desarrolló a partir de la versión de resolución media BCC-CSM2-MR, que utiliza una malla T106 en la atmósfera y una resolución de 1° por 1° en el océano, y que sirvió como base para la contribución del BCC al CMIP6 (Wu et al., 2021).
CMCC-ESM2		Modelo que considera la interacción dinámica entre la atmósfera, el océano, el hielo marino y la superficie terrestre, incorporando además la biogeoquímica marina para representar los ciclos globales del

carbono. Su infraestructura integra distintos componentes especializados: CAM5.4 para la atmósfera, NEMO3.6 para el océano, CICE4 para el hielo marino, CLM4.5 para la superficie terrestre y BFM5.1 para la biogeoquímica oceánica. Su desarrollo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CRESCENDO del programa Horizonte 2020 de la Unión Europea (CMCC, 2019).

**EC-Tierra3-
Veg**

EC-Earth3 es la tercera generación del modelo climático desarrollado por el consorcio EC-Earth y también designa su configuración física básica de resolución estándar para la atmósfera y el océano. En total, existen ocho configuraciones distintas de EC-Earth3, cada una diseñada para diferentes propósitos científicos, y todas han sido utilizadas por el consorcio para contribuir a la Fase 6 del Proyecto de intercomparación de Modelos Climáticos- CMIP6 (EC Earth, 2022).

FIO-ESM-2-0

El FIO-ESM versión 2.0, desarrollado por el Instituto de Oceanografía, fue incluido en la Fase 6 del proyecto de intercomparación de Modelos Climáticos (CMIP6). Esta versión representa una mejora respecto a la 1.0, ya que incorpora actualizaciones en todos sus componentes y presenta una mayor resolución (Bao et al., 2020).

GFDL-ESM4

Es un modelo del sistema terrestre desarrollado por el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL) de la NOAA. Forma parte de la cuarta generación de modelos climáticos de GFDL y fue una

contribución clave al Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6- CMIP6 (GFDL, 2019).

GISS-E2-1-G

Es un modelo climático desarrollado por el Goddard Institute for Space Studies (GISS) de la NASA. Forma parte de la serie de modelos Model y fue la principal contribución de GISS al Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6), lanzado oficialmente en 2019 (GFDL, 2019).

**HadGEM3-
GC31-LL**

Es una configuración de baja resolución del modelo climático global acoplado HadGEM3-GC3.1, desarrollado por el Met Office Hadley Centre del Reino Unido. Este modelo fue una de las principales contribuciones del Reino Unido a la Fase 6 del proyecto de intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6), participando en múltiples experimentos, incluidos los históricos y los de escenarios futuros (Ridley et al., 2018).

INM-CM5-0

Modelo climático global desarrollado por el Instituto de Matemáticas Numéricas de la Academia de Ciencias de Rusia (INM RAS). Fue lanzado en 2016 y constituye una evolución del modelo INM-CM4-8, con mejoras significativas en resolución y componentes físicos. Este modelo participó en la Fase 6 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP6), contribuyendo al Sexto Informe de Evaluación del IPCC (Volodin et al., 2019).

**IPSL-CM6A-
LR**

Modelo climático desarrollado por el Instituto Pierre-Simon Laplace que simula las interacciones entre la atmósfera, el océano, el hielo marino y la superficie

terrestre. Diseñado en baja resolución, este modelo fue una de las contribuciones de Francia al CMIP6, y permite analizar el comportamiento climático pasado, presente y futuro, incorporando tanto influencias naturales como humanas sobre el sistema climático global (IPSL, 2018).

MIROC6

Desarrollado en 2017 por instituciones japonesas, el MIROC6 es un modelo climático global de sexta generación que simula de forma integral la atmósfera, los océanos, el hielo marino y la superficie terrestre. Con mejoras en precisión y resolución respecto a versiones anteriores, fue creado para analizar el cambio climático y participar en la Fase 6 del proyecto CMIP (Shiogama et al., 2023).

MPI-ESM1-2- HR

Modelo climático global de alta resolución desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología en Alemania, como parte de la serie MPI-ESM1.2. Fue creado para contribuir al CMIP6, especialmente al subproyecto HighResMIP, que analiza cómo la mayor resolución mejora las simulaciones del clima (Gutjahr et al., 2019).

Resonancia magnética- ESM2-0

Modelo del sistema terrestre desarrollado por el Instituto de Investigación Meteorológica de Japón. Surge como una evolución de los modelos anteriores MRI-CGCM3 y MRI-ESM1 (usados en CMIP5), incorporando diversas mejoras que aumentan significativamente la precisión en la simulación del clima (Yukimoto et al., 2019).

UKESM1-0-LL

Modelo climático de baja resolución desarrollado en el Reino Unido para representar de forma integrada los componentes físicos, químicos y biológicos del sistema terrestre. Basado en el modelo HadGEM3, incluye procesos atmosféricos, oceánicos, de hielo marino y de biogeoquímica, y fue creado para contribuir al CMIP6 con un enfoque en el análisis del cambio climático y sus interacciones con el ciclo del carbono (UKESM, 2018).

4.2.24. Modelos de Circulación Global considerados en el estudio

Entre 2010 y 2015, el SENAMHI llevó a cabo diversos estudios orientados a la construcción de escenarios climáticos en distintas regiones del Perú, reafirmando su papel como entidad técnica responsable de generar proyecciones climáticas a escala nacional, regional y por cuencas hidrográficas. Como parte de estos trabajos, se desarrolló el estudio de Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos, mediante el cual se obtuvieron proyecciones locales de precipitación y de temperaturas máximas y mínimas hacia el año 2050. Para dicho análisis, el SENAMHI utilizó como base distintos Modelos Climáticos Globales (MCG), cuyos principales detalles se presentan en la Tabla 3 (SENAMHI, 2021).

Tabla 3. Modelos Climáticos Globales.

MCGs	Descripción
MPI-ESM1-2-HR	Alta resolución, excelente desempeño en Sudamérica.
FIO-ESM-2-0	Buen balance multivariado.
MIROC6	Disponible en geodata::cmip6_tile.
CanESM5	Frecuentemente usado en estudios peruanos.
CNRM-CM6-1	Históricamente aplicado en cuencas del país.

UKESM1-0-LL	Incluye componentes biofísicos del sistema terrestre.
GFDL-ESM4	Fuerte en precipitación tropical.

4.2.25. Modelación hidrológica

Es una aproximación al sistema actual, con entradas y salidas que son variables hidrológicas y que se basan en ecuaciones que tienen una base física o conceptual. La evaluación de los beneficios hidrológicos de la infraestructura natural a través de modelos incluye entender y analizar el funcionamiento del sistema hidrológico y pronosticar su respuesta frente a diversas alternativas de manejo o escenarios posibles (Ochoa et al., 2022).

4.2.26. Clasificación de modelos hidrológicos:

Según (Cabrera, 2015) se enfoca tres características básicas útiles para la modelización hidrológica de cuencas:

- Según la conceptualización de los procesos fundamentales; pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos;
- Según a la naturaleza de los algoritmos fundamentales; pueden ser determinísticos o estocásticos;
- Según su representación espacial; pueden ser agrupados o distribuidos.
- Según estos modelos hidrológicos los más empleados son los siguientes:

SWAT (Soil and Water Assessment Tool), KINEROS (KINematic runoff and EROSion model), TOPMODEL (TOPographic index MODEL), HEC-HMS y HEC-GeoHMS, (Hydrologic Engineering Center– Hydrologic Modeling System), MODFLOW (Modelo de agua subterránea de diferencias finitas).

4.2.27. Tipos de modelos Hidrológicos

Los modelos hidrológicos pueden agruparse en categorías que van desde enfoques empíricos y conceptuales hasta modelos físicamente distribuidos, dependiendo de la disponibilidad de datos y del grado de detalle requerido. Esta tipología resulta clave para seleccionar el modelo más adecuado en estudios de simulación hidrológica y proyección de escenarios climáticos futuros, tal como se detalla en la Tabla 4

Tabla 4. Tipos de modelos hidrológicos (Forest Trends, 2022)

Modelo Hidrológico	Características	¿Qué información necesita?	Componente de infraestructura natural	Salidas del modelo
SWAT (Torres-Benites et al., 2004)	Soil and Water Assessment Tool. Es un modelo semidistribuido, es un instrumento para la evaluación del suelo y agua. Su propósito consiste en anticipar los efectos de las técnicas de gestión en la producción de corrientes, depósitos y compuestos agrícolas y químicos en las prácticas de manejo. Se trata de un sistema en constante evolución que demanda datos relacionados con el clima, las características del suelo, la topografía, la vegetación y las estrategias de manejo.	Información topográfica disponible en un Modelo Digital de Elevación (DEM); un mapa que indica la cobertura y uso del suelo (LULC); datos de la tabla de propiedades físicas y biológicas del suelo; un mapa que muestra el tipo de suelo, incluyendo su textura y estructura; registros diarios de condiciones climáticas, como precipitación, temperatura máxima y mínima.	La utilización y la disposición del suelo, las acciones realizadas en la superficie y las propiedades de retención en el subsuelo.	Registros cronológicos de láminas de escorrentía, tasas de infiltración (almacenamiento y contribución desde las capas subterráneas), niveles de evaporación y volúmenes de sedimentos transportados, divididos en series diarias, mensuales y anuales.

KINEROS (Vázquez Conde, 2012)	KINematic runoff and EROsion model. Un modelo parcialmente distribuido que se enfoca en eventos específicos permite analizar cuencas con áreas pequeñas (hasta 100 km ²), está basado en los procesos de interceptación, infiltración, escorrentía y erosión. Sujetas a cobertura vegetal y cambio de uso de suelos.	Información topográfica representada en un Modelo Digital de Elevación (DEM); un mapa que muestra la distribución de cobertura y uso del suelo (LULC); datos relacionados con las propiedades físicas y biológicas del suelo; un mapa que identifica los tipos de suelo, incluyendo su textura y estructura; información sobre el tamaño de las partículas en el lecho del cauce; y un registro gráfico de la precipitación a lo largo del tiempo (hietograma).	Uso y cobertura del suelo, intervención en la superficie, y capacidad de almacenamiento del subsuelo.	Registros temporales de caudal, niveles de infiltración, concentración de sustancias, erosión, deposición y generación de sedimentos en la cuenca.
	TOPographic index MODEL. Un modelo hidrológico parcialmente distribuido que se basa en el concepto del índice topográfico. Este índice es un	Datos de topografía representados en un Modelo Digital de Elevación (DEM); información sobre la cantidad de precipitación y evapotranspiración a diversas escalas	Modificaciones realizadas en la capa superficial y propiedades relacionadas con la capacidad de retención en el subsuelo.	Registros cronológicos de la cantidad de escorrentía en diferentes escalas temporales, incluyendo eventos individuales,
TOPMODEL (Gil & Tobón, 2016)				

HEC-HMS y HEC-GeoHMS (Cunderlik & Simonovic, 2004)	marcador que evalúa la probabilidad de que ciertas áreas de la cuenca se saturen por completo, y se apoya en el mecanismo de escorrentía resultante de la saturación excesiva del suelo. Hydrologic Engineering Center– Hydrologic Modeling System. Junto con la interfaz de preprocesamiento HEC-GeoHMS, este sistema está desarrollado para emular todos los procesos hidrológicos en cuencas, abarcando numerosos métodos de análisis convencionales para eventos, como la abstracción, el hidrograma unitario y el tránsito hidrológico.	temporales; y parámetros físicos del subsuelo. Para llevar a cabo el análisis a escala de evento, se necesitan datos como la topografía representada en un Modelo Digital de Elevación (DEM); un mapa que detalla la cobertura y el uso del suelo (LULC); información de la tabla biofísica del suelo; un mapa que identifica los tipos de suelo, incluyendo su textura y estructura; y un registro gráfico de la precipitación para eventos específicos (hietograma).	días, meses y años La utilización y disposición de la tierra, las alteraciones en la superficie, y las propiedades relacionadas con la capacidad de retención en el subsuelo.	Registros temporales de los niveles de caudal durante un evento de lluvia específico o a lo largo del tiempo en una escala continua, que incluyen datos de precipitación y pérdidas debidas a la infiltración.
---	--	--	---	---

Además, permite la simulación continua de procesos como la evapotranspiración, el derretimiento de nieve y el contenido de humedad

**MODEFLOW
(Harbaugh
et al., 2017)**

Se trata de un modelo de agua subterránea implementado mediante el método de diferencias finitas. La estructura del programa se compone de un programa principal y varias subrutinas altamente independientes. Estas subrutinas se organizan en paquetes, y cada uno se enfoca en simular una característica específica del sistema hidrológico, como el flujo de ríos, para garantizar una simulación detallada y	Dependiendo de los objetivos del estudio, es posible que se necesite obtener información topográfica, datos sobre fuentes y sumideros (como ríos, drenajes, lagos, pozos, etc.) y detalles sobre las propiedades hidrogeológicas del área de interés. Además, el modelo es capaz de llevar a cabo simulaciones tanto en régimen estático (para análisis en condiciones estables) como en régimen transitorio (considerando cambios con el tiempo), adaptándose	Los resultados del balance hídrico muestran la comparación de entradas y salidas de agua en diferentes zonas, lo que puede incluir ríos, pozos, lagos y otras áreas de interés. Estos cálculos permiten evaluar cómo se distribuye el flujo de agua en el sistema hidrológico y cómo afecta a cada una de estas zonas en términos de entrada y salida de agua.
---	---	---

específica de así a diversas
diferentes aspectos situaciones y
del sistema necesidades de
hidrológico. análisis
hidrogeológico.

4.2.28. Modelo SWAT.

El Sistema de Evaluación de Suelos y Agua (SWAT) es un modelo diseñado a nivel de cuenca fluvial con el propósito de medir y analizar el efecto de las prácticas de manejo del suelo en cuencas hidrográficas extensas y complejas. SWAT es un modelo hidrológico de dominio público con los siguientes componentes: clima, escorrentía superficial, flujo de retorno, percolación, evapotranspiración, pérdidas de transmisión, almacenamiento en estanques y embalses, crecimiento e irrigación de cultivos, flujo de agua subterránea, ruta de acceso, carga de nutrientes y pesticidas y agua (FAO, 2022).

Es un modelo conceptual de tiempo continuo que se desarrolló a principios de la década de 1990 para ayudar a los administradores de recursos hídricos a evaluar el impacto de la gestión y el clima en los suministros de agua y la contaminación de fuentes no localizadas en cuencas hidrográficas y grandes cuencas fluviales. SWAT es la continuación de más de 30 años de desarrollo de modelos dentro del Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los EE. UU. Y se desarrolló para "ampliar" los modelos a escala de campo a grandes cuencas fluviales. Los componentes del modelo incluyen el clima, la hidrología, la erosión/sedimentación, el crecimiento de las plantas, los nutrientes, los pesticidas, la gestión agrícola, el trazado de arroyos y el trazado de estanques/embalses (Arnold & Fohrer, 2005).

4.2.29. Zonas de vida

Se entiende por zona de vida "un grupo de unidades naturales básicas, áreas de crecimiento vegetal similar dentro de un rango definido de condiciones climáticas" (Aybar Camacho & Lavado-Casimiro, 2017). En el caso del Perú, se reconoce la presencia de 84 de las 104 zonas de vida existentes a nivel mundial, lo que evidencia su notable diversidad ecológica y climática. (MINAM, 2010).

4.2.30. Zonas de vida de Holdridge

Son en su mayoría divisiones climáticas que establecen las condiciones en las que opera un ecosistema. La clasificación que compone este sistema es única en su enfoque cuantitativo, ya que define de manera precisa las relaciones entre los principales factores climáticos y la vegetación en su estado natural. La temperatura biológica, precipitaciones y humedad ambiental, que constituyen los factores climáticos básicos, se consideran "independientes", mientras que los factores biológicos se consideran de naturaleza "dependiente", es decir, sujetos a la acción directa del clima en cualquier región del mundo (Aybar Camacho & Lavado-Casimiro, 2017).

4.2.31. Zonas de vida del Perú

Siguiendo la clasificación de Holdridge, se pueden identificar 66 subbiomas en nuestro país, que surgen de la intersección entre las zonas de vida y las regiones altitudinales. Estos subbiomas reflejan las diversas condiciones ecológicas y climáticas presentes en diferentes áreas geográficas y altitudes dentro del país: bosque húmedo, bosque muy seco, bosque pluvial, bosque seco, bosque muy húmedo, desierto, estepa, matorral, monte y estepa espinosa, monte espinoso, nival, páramo húmedo, páramo muy lluvioso, tundra húmeda, tundra muy húmeda y tundra pluvial (SENAMHI, 2017).

4.2.32. Zonas de vida de la subcuenca del Huayllabamba

El Sistema de Clasificación Ecológica de Holdridge (1978) constituye una de las metodologías más reconocidas a nivel internacional para la delimitación de zonas de vida, integrando variables de biotemperatura media anual, precipitación y altitud como indicadores de las condiciones ecológicas que determinan la distribución natural de la vegetación. En el Perú, esta propuesta fue adaptada a las condiciones biofísicas y climáticas del territorio andino y amazónico por la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales – ONERN (1987), dando origen al Mapa Ecológico del Perú, posteriormente actualizado y estandarizado geoespacialmente por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2019) en el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú. En este marco, las zonas de vida identificadas en la subcuenca del río Huayllabamba se presentan y detallan en la figura 2. (MINAM, 2019).

En el caso de la subcuenca del río Huayllabamba, la aplicación de esta metodología permitió definir ocho zonas de vida diferenciadas, que representan la transición ecológica entre los bosques secos premontanos y los bosques muy húmedos montanos tropicales, evidenciando la heterogeneidad climática, altitudinal y fisiográfica de un territorio comprendido entre los 900 y 3 200 metros sobre el nivel del mar (MINAM, 2019).

a. Bosque húmedo montano bajo tropical (bh-MBT)

Esta zona se sitúa entre los 1800 y 2500 m s. n. m., con temperaturas promedio entre 18 y 22 °C y precipitaciones anuales de 1500 a 2500 mm. Presenta una vegetación mesófila con árboles de porte medio y abundancia de epífitas. Entre las especies características destacan *Podocarpus oleifolius*, *Cedrela montana* y *Weinmannia spp* (MINAM, 2019),

En la subcuenca del Huayllabamba, esta zona cumple un rol importante en la regulación hídrica y en la recarga de acuíferos, siendo además hábitat de especies endémicas asociadas a los bosques de neblina. Su transformación por actividades agrícolas incrementa la erosión y la pérdida de suelos fértiles

b. Bosque húmedo premontano tropical (bh-PMT)

Ubicado entre los 1200 y 1800 m s. n. m. Este ecosistema presenta precipitaciones de 1000 a 2000 mm/año, temperaturas cálidas y una vegetación de transición entre los bosques secos y montañosos (MINAM, 2019).

Actúa como una franja de amortiguamiento ecológico, favoreciendo la conectividad entre ecosistemas de tierras bajas y montanos. Sin embargo, sufre una fuerte presión por la expansión de cultivos de café, cacao y plátano, lo que ha reducido su cobertura original.

c. Bosque muy húmedo montano bajo tropical (bmh-MBT)

Situado entre 2500 y 3000 m s. n. m., con precipitaciones superiores a 2 500 mm/año y temperaturas entre 15 y 18 °C, este ecosistema corresponde a los denominados bosques de neblina. Su alta capacidad para interceptar la humedad

atmosférica lo convierte en una de las zonas más relevantes para la captación y almacenamiento de agua (MINAM, 2019).

La cobertura vegetal incluye helechos arborescentes, musgos, orquídeas y árboles siempreverdes, fundamentales para mantener los caudales ecológicos del río Huayllabamba.

d. *Bosque muy húmedo montano tropical (bmh-MT)*

Este ecosistema se distribuye entre los 3000 y 3200 m s. n. m., caracterizado por alta pluviosidad y temperaturas bajas (12–15 °C). Su vegetación es siempreverde y con gran presencia de epífitas y suelos ricos en materia orgánica, Cumple funciones esenciales en la regulación climática local, la conservación de biodiversidad altoandina y el control de la erosión (Holdridge et al., 1978).

En la subcuenca del Huayllabamba, constituye una transición hacia los ecosistemas páramoides.

e. *Bosque muy seco tropical (bms-T)*

Se encuentra por debajo de los 1000 m s. n. m., con precipitaciones menores de 1000 mm/año y marcada estacionalidad climática. La vegetación está compuesta por árboles caducifolios, arbustos y gramíneas adaptadas a la sequía (MINAM, 2021).

En el norte del Perú, estos ecosistemas representan zonas de alta fragilidad ecológica y baja resiliencia al cambio climático, con procesos de degradación de suelos y desertificación incipiente (Brack Egg, A., 1986).

f. *Bosque pluvial montano tropical (bp-MT)*

Se localiza en sectores de alta precipitación (>3 000 mm/año) y temperaturas templadas (14–18 °C). Presenta vegetación exuberante con musgos, líquenes, orquídeas y árboles cubiertos de epífitas. Estas zonas constituyen los principales reservorios naturales de agua por su elevada capacidad de condensar humedad atmosférica y mantener caudales constantes. Su degradación afecta el ciclo hidrológico regional (MINAM, 2019).

g. *Bosque seco montano bajo tropical (bs-MBT)*

Comprende altitudes de 1000 a 1800 m s. n. m., con precipitaciones anuales entre 500 y 1200 mm y temperaturas medias de 20-25 °C. Su vegetación es caducifolia y los suelos presentan baja fertilidad natural. Su función principal es la protección de laderas y control de erosión, pero enfrenta pérdida de cobertura vegetal por pastoreo y tala. En el contexto del Huayllabamba, su restauración resulta prioritaria para reducir la sedimentación de cauces (MINAM, 2019).

h. Bosque seco premontano tropical (bs-PMT)

Se desarrolla entre los 900 y 1500 m s. n. m., con precipitaciones entre 400 y 1000 mm. Su vegetación es xerofítica, con especies como ***Prosopis pallida***, ***Bursera graveolens*** y ***Capparis scabrida*** (Brack Egg, A., 1986).

Este ecosistema es uno de los más amenazados del norte peruano, debido al cambio de uso de suelo y la sobreexplotación de leña. Su conservación es clave para mantener el equilibrio hídrico y edáfico en los sectores bajos de la subcuenca (MINAM, 2021).

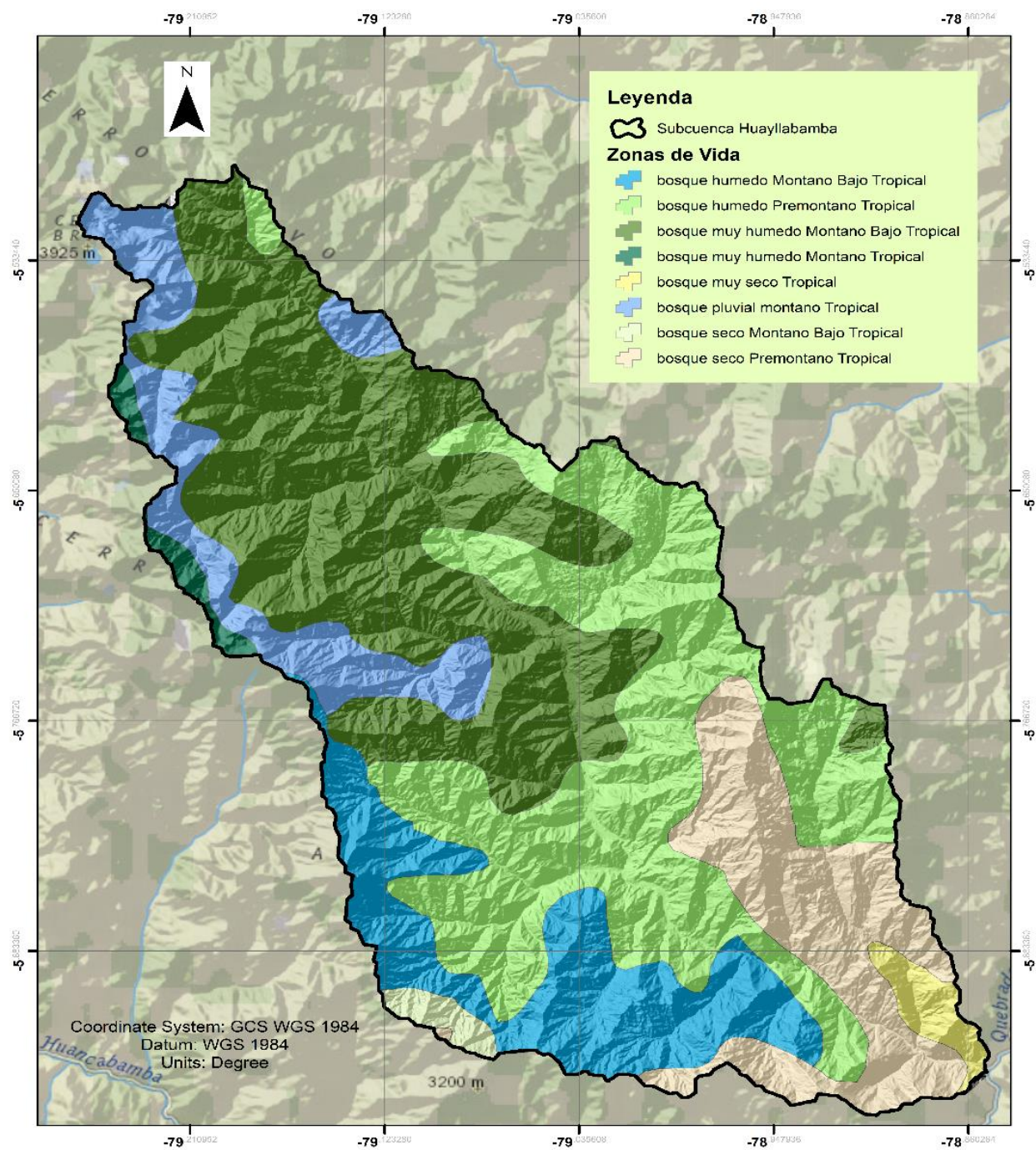


Figura 2. Zonas de vida de la subcuenca del Huayllabamba

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Tipo y diseño de estudio

5.1.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo básica, dado que se orienta a la generación de nuevo conocimiento científico de manera sistemática y metódica, sin buscar una aplicación inmediata, sino con el propósito de ampliar la comprensión teórica y empírica de una realidad específica (Castro Maldonado et al., 2023).

Su finalidad principal consiste en explicar los procesos, interrelaciones y dinámicas ambientales que intervienen en la configuración del riesgo climático y su impacto sobre las zonas de vida y los sistemas de producción de agua en la subcuenca del río Huayllabamba.

Desde esta perspectiva, el estudio profundiza en los fundamentos conceptuales y metodológicos relacionados con la evaluación del riesgo climático, el análisis biofísico del territorio y la modelación hidrológica, aportando nuevos elementos de análisis científico que contribuyen al cuerpo de conocimientos del campo del cambio climático, la gestión ambiental y los recursos hídricos.

Por tanto, la investigación se inscribe dentro de la investigación básica pura, al buscar comprender las relaciones causa-efecto entre variables climáticas, ecológicas e hidrológicas, y no necesariamente intervenir o modificar la realidad estudiada, sino describirla, analizarla y explicarla de forma integral.

5.1.2. Diseño de estudio

Es no experimental y de tipo longitudinal prospectivo, dado que no contempla la manipulación deliberada de las variables independientes, sino que se limita a observar, analizar y registrar los fenómenos tal como ocurren en su contexto natural. Este diseño permite examinar la evolución temporal de las variables climáticas, hidrológicas y ecológicas bajo estudio, mediante la recolección y análisis de información en dos o más momentos distintos en el tiempo, con el fin de identificar tendencias, variaciones y relaciones de dependencia entre ellas (Castro Maldonado et al., 2023).

El carácter longitudinal prospectivo del estudio se sustenta en que las mediciones se realizan a partir de datos observados y proyecciones futuras, lo que permite comparar los valores de variables como precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal

entre periodos pasados, presentes y escenarios climáticos proyectados, favoreciendo así la comprensión de los cambios espacio-temporales en la vulnerabilidad y el riesgo climático. Este diseño posibilita establecer inferencias sobre el comportamiento de dichas variables dentro del marco de la modelación climática e hidrológica, manteniendo un enfoque observacional, analítico y predictivo, sin alterar las condiciones naturales del sistema, en coherencia con los objetivos de evaluación y proyección del riesgo climático en la subcuenca del río Huayllabamba.

5.2. Ubicación

La investigación se desarrolló en la subcuenca del río Huayllabamba, la cual presenta una superficie aproximada de 1161.38 km² (116 138 ha) y forma parte de la cuenca del río Chamaya. Su centroide se localiza en las coordenadas -5.75618° de latitud sur y -79.0601° de longitud oeste, en la provincia de Jaén, departamento de Cajamarca. De acuerdo con la metodología Pfafstetter para la delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas (UH), utilizada por la Autoridad Nacional del Agua en la elaboración del Mapa de UH del Perú, esta subcuenca corresponde al nivel 5. Asimismo, se encuentra comprendida entre los distritos de Chontalí, Pomahuaca, Colasay y Jaén, tal como se muestra en la Figura 3.

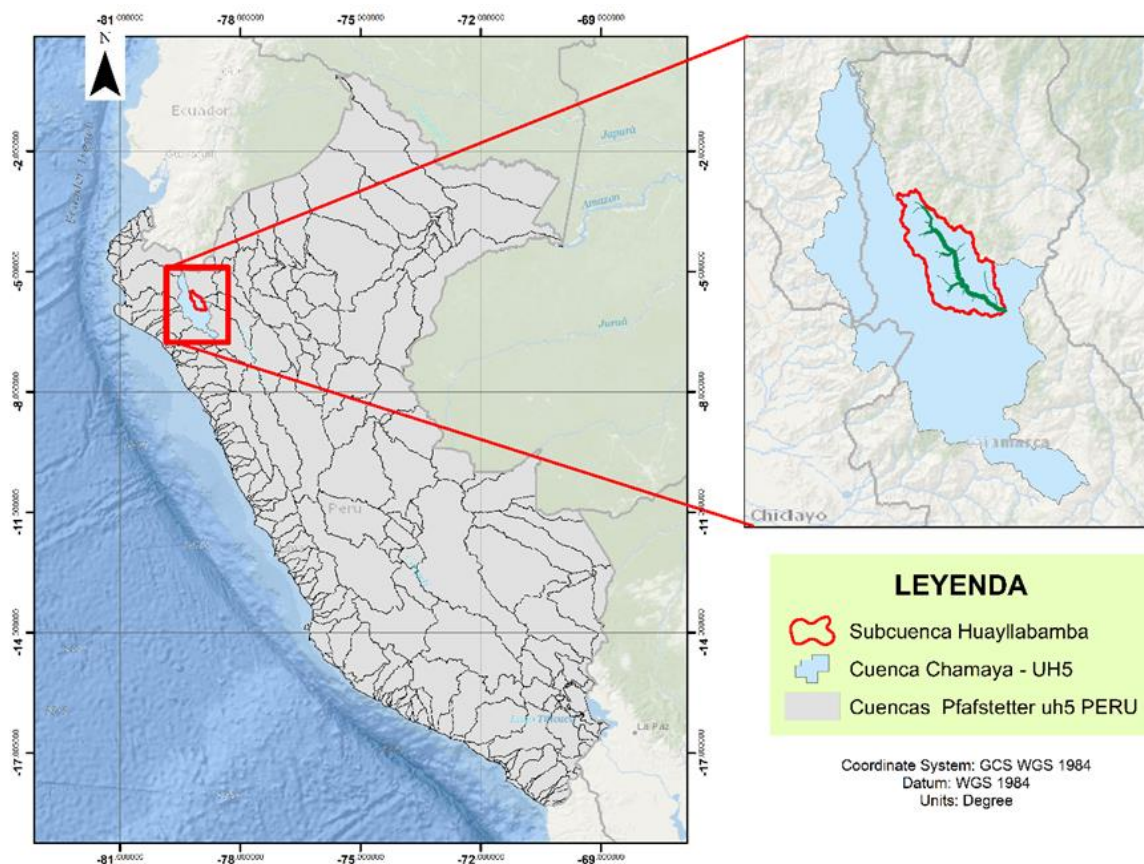


Figura 3. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Huayllabamba

5.3. Población

La población de estudio está conformada por la totalidad del territorio comprendido dentro de la subcuenca del río Huayllabamba, definida como la unidad hidrográfica y ecológica de análisis. Esta subcuenca se localiza en la provincia de Jaén, departamento de Cajamarca, e involucra sectores pertenecientes a los distritos de Chontalí, Pomahuaca, Colasay y Jaén, con una extensión aproximada de 1161.38 km². Asimismo, el análisis climático e hidrológico del estudio se desarrolló considerando el horizonte prospectivo 2041–2060, correspondiente a las proyecciones futuras de los escenarios climáticos SSP del CMIP6.

Desde el punto de vista metodológico, la consideración del área total de la subcuenca como población de estudio responde al principio de integralidad espacial e hidrológica, bajo el cual los procesos climáticos, ecológicos e hidrológicos presentan interacciones continuas y dependientes dentro del mismo sistema territorial (Gaspari et al., 2013).

En ese sentido, la delimitación total de la subcuenca garantiza la representatividad estadística del conjunto de variables (precipitación, temperatura, evapotranspiración, cobertura vegetal y uso del suelo), al abarcar la totalidad de las unidades fisiográficas y ecosistémicas que intervienen en la generación, regulación y distribución del recurso hídrico.

El uso de la población total, en lugar de una muestra parcial, se justifica técnicamente por la heterogeneidad espacial y ambiental del territorio, la cual dificulta establecer una muestra probabilística representativa sin incurrir en sesgos. Por ello, la investigación adopta un enfoque de censo espacial completo, en el que cada unidad de respuesta hidrológica (HRU) o unidad de paisaje constituye una observación geoespacial equivalente a un dato poblacional, lo que permite incorporar todas las variaciones territoriales relevantes y realizar inferencias válidas sobre la dinámica climática e hidrológica de toda la subcuenca. Este enfoque garantiza la validez estadística, ecológica e hidrológica del análisis, asegurando consistencia espacial, continuidad hidrológica y coherencia ecosistémica en la evaluación del riesgo climático.

5.4. Muestra

En el estudio, la muestra coincide con la población, dado que se considera la totalidad del territorio comprendido en la subcuenca del río Huayllabamba, ubicada en la provincia de Jaén, departamento de Cajamarca, con una extensión aproximada de 1161.38 km². El análisis climático e hidrológico se desarrolla para el horizonte prospectivo 2041–2060, correspondiente a las proyecciones futuras de los escenarios climáticos del CMIP6.

Esta decisión metodológica se sustenta en que la investigación aborda un análisis integral del sistema hidrográfico y ecológico, por lo que resulta necesario incluir todas las unidades espaciales que conforman la subcuenca.

Al asumir la totalidad del territorio como muestra, se garantiza la representatividad de las variables físicas, climáticas e hidrológicas bajo estudio —precipitación, temperatura, evapotranspiración, cobertura vegetal y uso del suelo—, evitando sesgos de selección y preservando la coherencia espacial del análisis geoespacial e hidrológico.

De esta manera, cada unidad de respuesta hidrológica (HRU) o celda de análisis dentro del modelo constituye un elemento muestral dentro de un censo espacial completo,

lo que otorga validez estadística y ecológica a los resultados obtenidos en la evaluación del riesgo climático y la dinámica de producción hídrica de la subcuenca.

5.5. Variables de estudio

5.5.1. Variable independiente

-Riesgo climático

La variable riesgo climático se establece como variable independiente, dado que constituye el factor de origen o agente desencadenante que incide sobre los componentes biofísicos y ecológicos de la subcuenca del río Huayllabamba.

En términos operativos, el riesgo climático se cuantifica a partir de indicadores derivados de modelos climáticos y escenarios proyectados, tales como la anomalía de temperatura, el déficit hídrico, la variación en la precipitación efectiva y la evapotranspiración potencial (ETP).

Su comportamiento define la intensidad, frecuencia y persistencia de los eventos climáticos adversos, modulando la respuesta ecológica del territorio y su capacidad de regulación hídrica.

5.5.2. Variable dependiente

-Zonas de vida

La variable zonas de vida se considera dependiente, debido a que su distribución espacial, estructura ecológica y dinámica funcional están condicionadas directamente por las variaciones climáticas. Bajo el enfoque del sistema ecológico de Holdridge (1978), las zonas de vida representan unidades ecológicas homogéneas que resultan de la interacción entre la temperatura media anual, la precipitación y la altitud, factores todos ellos determinados por el comportamiento del clima.

En ese sentido, los cambios en la temperatura, la humedad relativa o la precipitación —producidos por la intensificación del riesgo climático— modifican los gradientes térmicos e hídricos que definen los límites de las zonas de vida. Ello ocasiona desplazamientos altitudinales y variaciones en la cobertura vegetal, lo que altera la composición florística, la capacidad de retención de humedad y la funcionalidad ecosistémica de cada bioma.

En el caso de la subcuenca del río Huayllabamba, el aumento de la variabilidad climática y los escenarios de cambio proyectado (RCP 4.5 y RCP 8.5) influyen en la distribución y extensión de los bosques secos, húmedos y muy húmedos tropicales, demostrando que las zonas de vida responden de manera sensible a los cambios térmicos e hídricos inducidos por el riesgo climático.

Por tanto, esta variable depende del clima en cuanto a su configuración, límites espaciales y estabilidad ecológica, constituyéndose en un indicador biofísico de la respuesta de los ecosistemas frente al cambio climático.

-Producción de agua

La variable producción de agua se define como dependiente, ya que su magnitud, variabilidad y sostenibilidad temporal dependen de las condiciones climáticas y ecológicas que caracterizan el territorio. El riesgo climático influye de manera directa sobre los procesos del ciclo hidrológico: precipitación, infiltración, escorrentía, evapotranspiración y recarga subterránea, determinando así la cantidad y distribución del recurso hídrico disponible.

Desde una perspectiva ecohidrológica, la producción de agua está condicionada por dos factores principales:

(1) la precipitación efectiva y la evapotranspiración potencial, que determinan el balance hídrico atmosférico, y:

(2) la cobertura vegetal y las zonas de vida predominantes, que controlan la infiltración, el almacenamiento y la liberación gradual del agua.

Por consiguiente, la alteración climática de los ecosistemas provoca variaciones en la regulación hídrica natural, afectando la oferta de agua superficial y subterránea.

Para efectos de esta investigación, la producción de agua se evalúa mediante el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el cual simula el comportamiento hidrológico de la subcuenca bajo distintos escenarios climáticos.

El modelo permite estimar volúmenes de escorrentía, caudales medios, flujo base y rendimiento hídrico anual, mostrando cómo la modificación de las variables climáticas, especialmente la precipitación y la temperatura, impacta de forma significativa en la capacidad de generación y regulación del recurso agua.

De este modo, la producción de agua se establece como una variable dependiente de las condiciones climáticas y ecológicas (zonas de vida), dado que su estabilidad y sostenibilidad derivan de la funcionalidad de los ecosistemas que conforman la subcuenca.

Un incremento del riesgo climático conlleva alteraciones en la disponibilidad y temporalidad del agua, manifestando la dependencia hidrológica del sistema frente a los cambios climáticos y ecológicos.

5.6. Metodología

5.6.1. Modelación hidrológica

Se desarrolló mediante la aplicación del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), herramienta de simulación hidrológica de base física desarrollada por el United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service (USDA–ARS). Dicho modelo permitió simular los procesos del ciclo hidrológico, la escorrentía superficial, la evapotranspiración, la infiltración, la recarga de acuíferos y la producción de sedimentos en cuencas hidrográficas, considerando la interacción entre el clima, el suelo, la vegetación y el uso del territorio.

La ejecución del modelo SWAT contempló tres fases metodológicas principales (Figura 4): i) el preprocesamiento de datos, ii) el análisis de sensibilidad, calibración y validación, y iii) la simulación de escenarios climáticos futuros, los cuales se describen a continuación:

a. Fase I: Preprocesamiento de datos:

Durante esta fase se realizó la construcción, integración y parametrización de la base de datos geoespacial, climática y edáfica utilizada en la modelación. Se emplearon las fuentes de información:

- **Modelo Digital de Elevación (MDE):** obtenido del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), con una resolución espacial de 30 metros, que permitió delimitar la cuenca, generar la red de drenaje y calcular las pendientes del terreno.
- **Mapa de cobertura y uso actual del suelo:** elaborado a partir de información del Ministerio del Ambiente (MINAM) y del Instituto Geográfico Nacional (IGN),

procesada en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante el software ArcGIS.

- **Mapa de tipos de suelo:** obtenido del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y complementado con información edafológica disponible del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

- **Datos climáticos:** se utilizaron registros históricos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación provenientes de estaciones del SENAMHI. Para la modelación futura, se incorporaron datos del WorldClim versión 2.1, los cuales integran las proyecciones climáticas del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) bajo los escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas (Shared Socioeconomic Pathways–SSP2–4.5 y SSP5–8.5). Esta base permitió representar adecuadamente la variabilidad espacial y altitudinal de las variables climáticas (Fick & Hijmans, 2017), garantizando consistencia con los lineamientos del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC AR6) (Riahi et al., 2017).

b. Fase II: Análisis de sensibilidad, calibración y validación

Esta fase se desarrolló únicamente cuando se dispuso de series históricas de caudales observados en la cuenca o subcuenca modelada. El proceso comprendió tres etapas:

1. **Análisis de sensibilidad:** se identificaron los parámetros hidrológicos de mayor influencia sobre la simulación del caudal, tales como el número de curva (CN2), la conductividad hidráulica saturada (SOL_K), la capacidad de retención de humedad del suelo (SOL_AWC) y la profundidad efectiva del perfil del suelo (SOL_Z).

2. **Calibración:** se ajustaron los valores de los parámetros del modelo para optimizar la correspondencia entre los caudales simulados y los observados, reduciendo los errores estadísticos mediante técnicas de optimización automática y manual.

3. **Validación:** se verificó la capacidad predictiva del modelo utilizando un conjunto independiente de datos, evaluando el desempeño mediante indicadores estadísticos como el Coeficiente de Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), el Error Medio Cuadrático (RMSE) y el Coeficiente de Determinación (R^2).

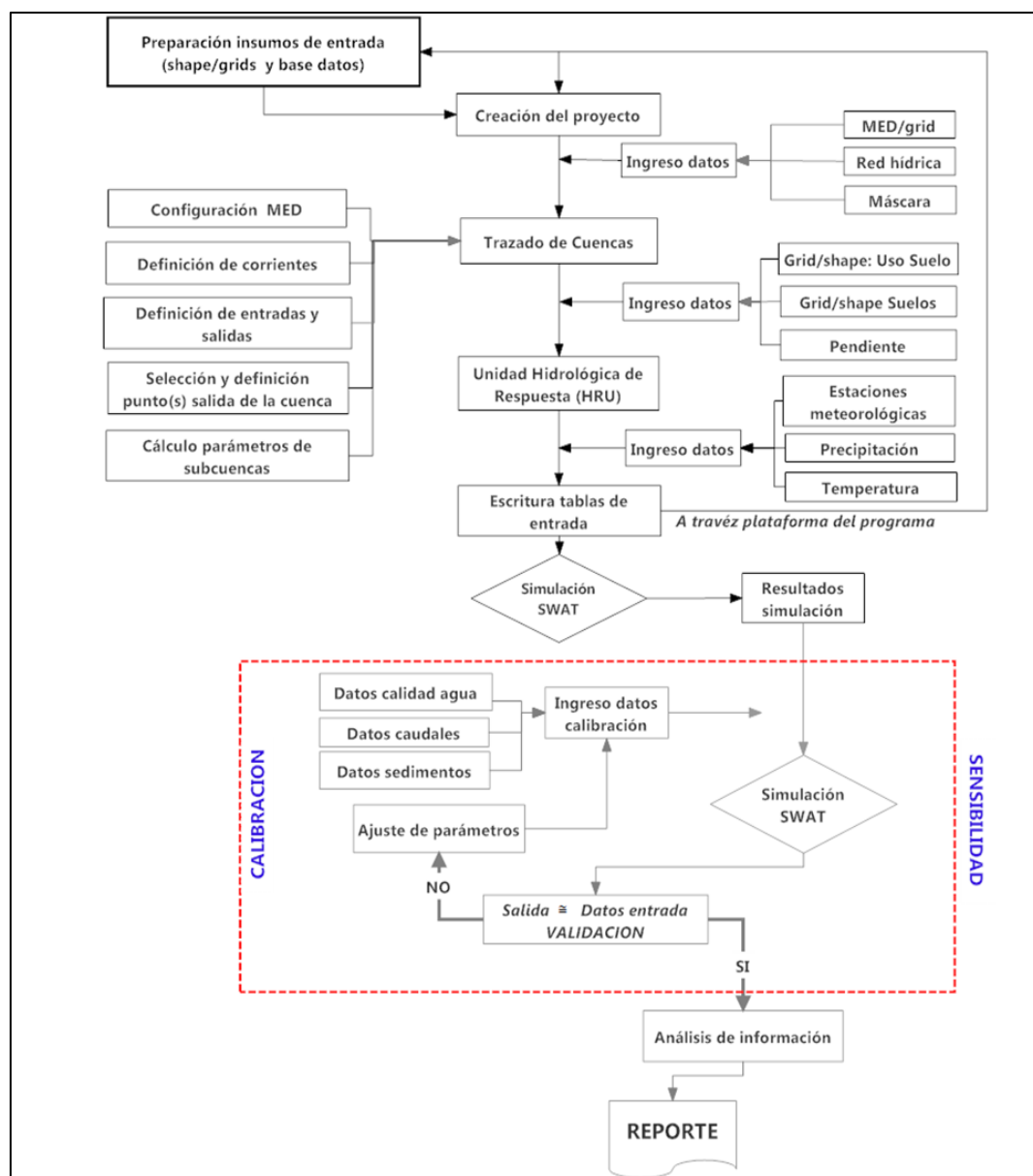
El cumplimiento de valores $NSE > 0,5$ y $R^2 > 0,6$ se consideró indicador de un desempeño hidrológico satisfactorio (Moriasi & Pai, 2015).

c. Fase III: Simulación de escenarios climáticos

Una vez calibrado y validado el modelo, se ejecutó la simulación hidrológica bajo los escenarios climáticos SSP2–4.5 y SSP5–8.5, utilizando las proyecciones CMIP6 integradas en WorldClim v2.1. El escenario SSP2–4.5 representó un contexto de mitigación intermedia, con estabilización de emisiones y un aumento moderado de temperatura global hacia finales del siglo XXI ($\approx 2,5$ °C). Por el contrario, el escenario SSP5–8.5 simuló una trayectoria intensiva en emisiones, caracterizada por un desarrollo económico altamente dependiente de combustibles fósiles y un incremento proyectado superior a 4 °C, lo cual permitió analizar la respuesta hidrológica del sistema bajo condiciones climáticas extremas (Riahi et al., 2017).

Las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima se ajustaron al formato climático requerido por el modelo SWAT, preservando la resolución espacial de 1 km² y la escala temporal mensual.

Los resultados obtenidos evaluaron la variación en la producción de agua, escorrentía superficial y balance hídrico total, así como identificar zonas de mayor vulnerabilidad hídrica y ecológica dentro de la subcuenca del río Huayllabamba.



Nota. Elaboración propia a partir de la metodología del modelo SWAT (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2011).

Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de modelación hidrológica con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), desde la preparación de insumos hasta la calibración, validación y generación de reportes finales

Insumos Modelo SWAT - Datos:

Se consideró el uso de datos de alta resolución espacial y temporal del año 2025 consistentes, con el objetivo de representar de manera precisa el comportamiento hidrológico de las cuencas de nivel 5 en el territorio peruano, conforme a la clasificación establecida por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Este nivel de detalle permitió analizar con mayor exactitud la dinámica de los procesos hidrológicos —precipitación, escorrentía, infiltración, evapotranspiración y recarga subterránea, fundamentales para la simulación hidrológica realizada mediante el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

Base de datos:

La Tabla 5 resume las bases de datos empleadas.

Tabla 5. Insumos, fuentes y características de los datos utilizados para la modelación hidrológica con el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

Insumo	Fuente de información	Característica del dato
Modelo de elevación Digital (MED)	AlosPalsar AW3D30	• Formato ráster, tamaño de celdas de 30*30 m. • Proyección del dato WGS 1984 UTM Zona 17S. • Unidad: msnm
Suelos	SoilGrids — global gridded soil information (2020)	• El formato ráster indica los nombres de los suelos presentes. Proyección del dato WGS 1984 UTM Zona 17S
Propiedades Suelos (base de datos usersoil)	Elaboración propia, con base en información obtenida de la plataforma SoilGrids	Matriz de datos con información biofísica y química de los suelos presentes en la cuenca
Uso de la tierra/ Cobertura de la tierra	MINAM, 2015. Mapa nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva / Ministerio del Ambiente, Perú. Ministerio del Ambiente Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural.	• Formato ráster tamaño de celdas de 30*30 m. • Proyección del dato WGS 1984 UTM Zona 17S. • Unidad: Categoría de uso/cobertura

Clima (registros y estadísticos de clima)	Global Weather Data for SWAT https://www.uoguelph.ca/watershed/w3s/ Conjunto de datos de precipitación y temperatura a alta resolución espacial y temporal que combina observaciones satelitales y datos de estaciones meteorológicas	Registros climáticos diarios (precipitación y temperatura a escala diaria) # estaciones: 22 Periodo: 2001-2019 Estadísticas a nivel mensual de para las 22 estaciones meteorológicas sintéticas.
Escenarios de Cambio climático	SSP 245 – 2041-2060 SSP 585 – 2041-2060 Fuente: WorldClim https://www.worldclim.org/	Derivados del CMIP6 de cuatro Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés): MPI-ESM1-2-HR de Alemania (Max Planck Institute for Meteorology), FIO-ESM-2-0 de China (First Institute of Oceanography Earth System Model), MIROC6 (Model for Interdisciplinary Research on Climate) de Japón y UKESM1-0-LL del Reino Unido (UK Earth System Model, Low Resolution).

Nota. Elaboración propia a partir de (Almeida-Ñauñay et al., 2024).

Se detallan las características de cada insumo:

5.6.2. Modelo de elevación digital AW3D30 (DEM)

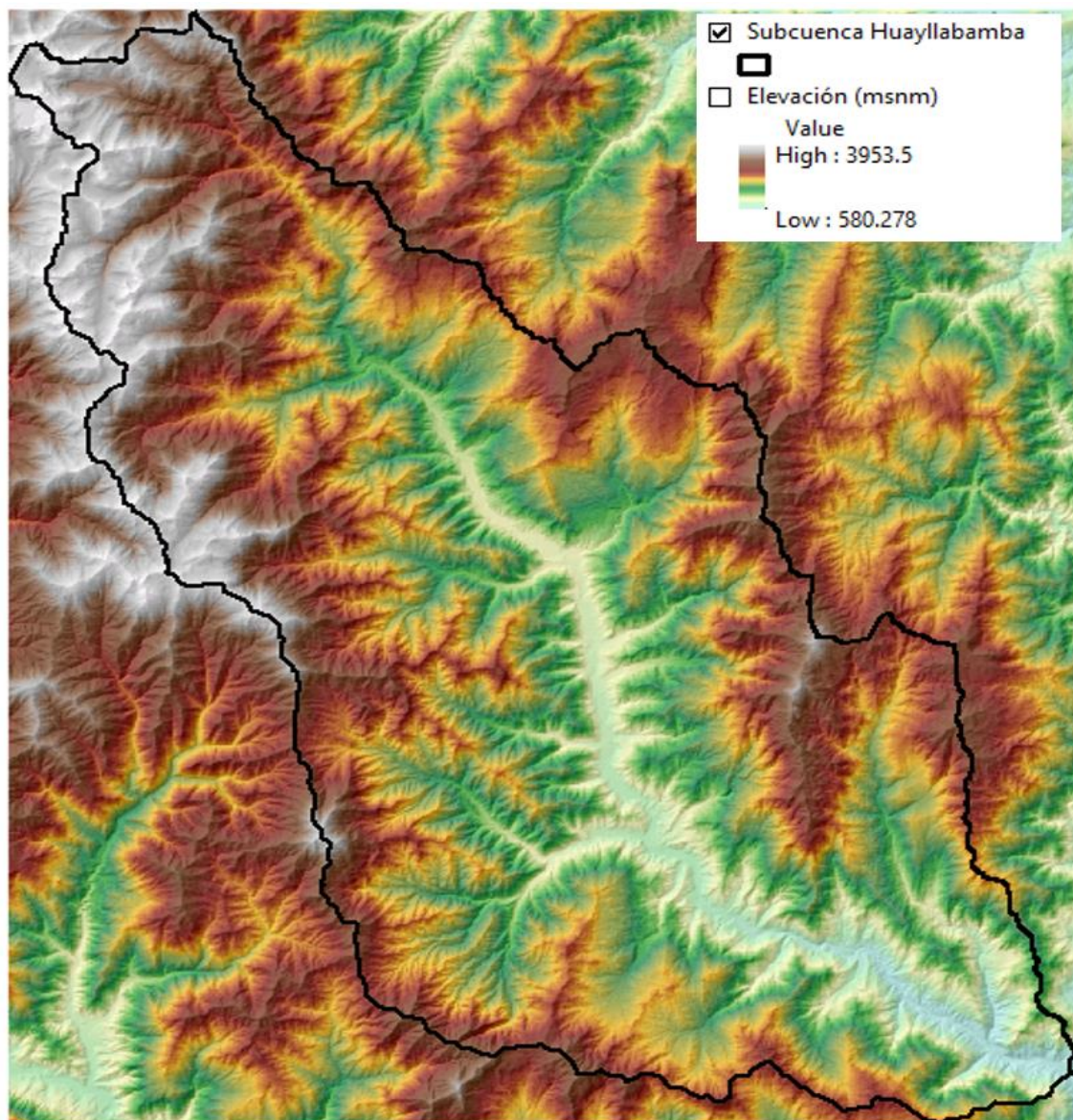
El ALOS World 3D – 30 m (AW3D30) correspondió a un Modelo Digital de Superficie (DSM) de cobertura global, con una resolución horizontal de aproximadamente 30 metros (1 segundo de arco). Este modelo fue desarrollado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA), a partir de imágenes capturadas por el sensor Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) a bordo del satélite Advanced Land Observing Satellite (ALOS), durante el periodo comprendido entre 2006 y 2011 (Abdallah et al., 2024).

El AW3D30 presentó las características técnicas principales:

- **Cobertura espacial:** global, abarcando la mayoría de las superficies terrestres.
- **Resolución espacial (horizontal):** aproximadamente 30 metros (1 segundo de arco), lo que permitió realizar un análisis detallado de la topografía a escala global.
- **Resolución vertical:** precisión promedio de ± 5 metros en áreas planas, con variaciones en terrenos con pendiente pronunciada o densa vegetación, manteniendo una exactitud adecuada para aplicaciones en modelación hidrológica, cambio climático y estudios topográficos.
- **Fuente de datos:** imágenes obtenidas por el sensor PRISM a bordo del satélite ALOS, operado por la JAXA entre 2006 y 2011.
- **Disponibilidad:** el producto se distribuyó de forma gratuita para fines científicos y no comerciales, lo que promovió su uso en investigaciones de tipo geoespacial, hidrológica y ambiental.

El Modelo Digital de Elevación (MDE) derivado del ALOS World 3D – 30 m (AW3D30) fue preprocesado mediante el algoritmo Fill Sinks de Wang y Liu (2006) en el entorno del software System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA GIS), con el fin de eliminar depresiones espurias, corregir inconsistencias topográficas y garantizar la continuidad hidrológica del terreno. Este procedimiento permitió obtener una superficie altimétrica optimizada y coherente, adecuada para su integración en la

modelación hidrológica realizada con el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), tal como se presenta en la Figura 5.



Nota. Elaboración propia a partir de datos de JAXA (2023).

Figura 5. Modelo Digital de Elevación (MDE) de la subcuenca del río Huayllabamba

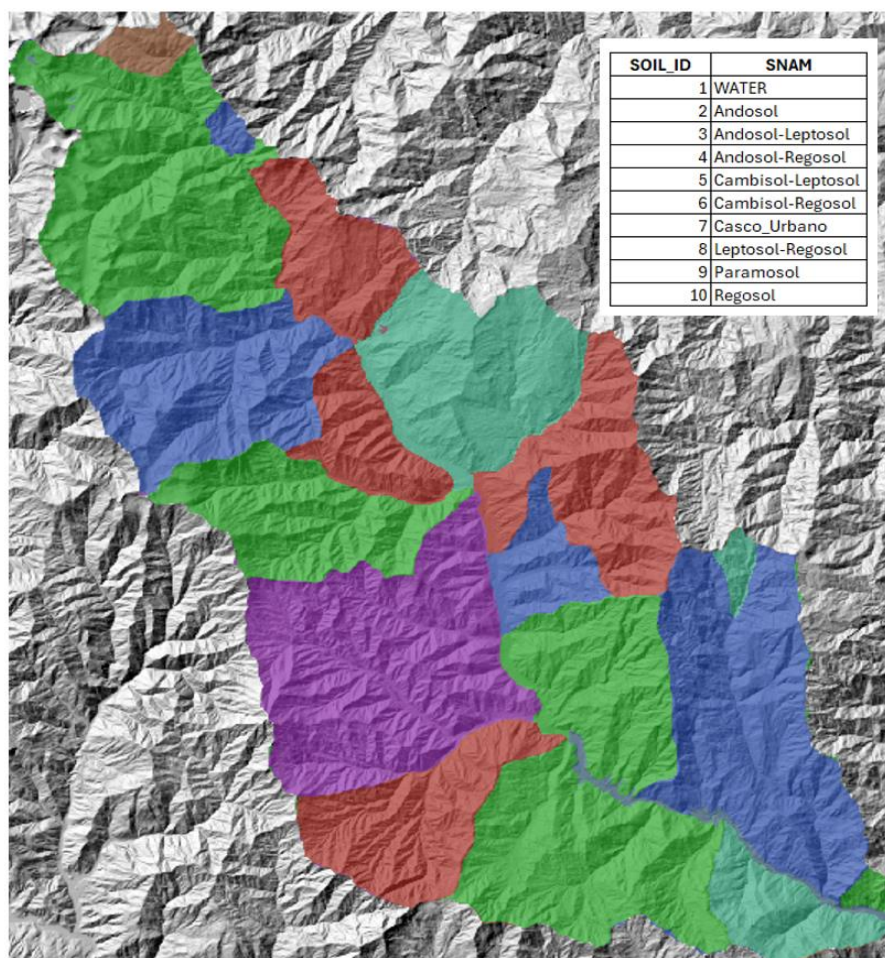
Suelos

La información sobre los tipos de suelo se derivó de la base de datos disponible en la plataforma de suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), la cual proporcionó información detallada sobre taxonomía, propiedades edáficas y textura del suelo expresada en porcentajes de arena, limo y arcilla. La clasificación se realizó conforme a los criterios del sistema Soil

Taxonomy, desarrollado por el Soil Survey Staff (2014), lo que permitió identificar y caracterizar las principales unidades edáficas presentes en la subcuenca (FAO, 2020).

El grupo hidrológico del suelo (Hydrologic Soil Group) se determinó siguiendo la metodología propuesta por el United States Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service (USDA–NRCS, 2009), basada en la combinación de parámetros texturales y permeabilidad. Este procedimiento permitió definir la capacidad de infiltración y escurrimiento de cada tipo de suelo, información esencial para la modelación hidrológica en el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (FAO, 2020).

En total, se identificaron nueve tipos de suelos distribuidos heterogéneamente en la subcuenca del río Huayllabamba, reflejando la diversidad edafoclimática y fisiográfica del territorio, tal como se muestra en la Figura 6.



Nota. Elaboración propia a partir de datos de FAO (2020)

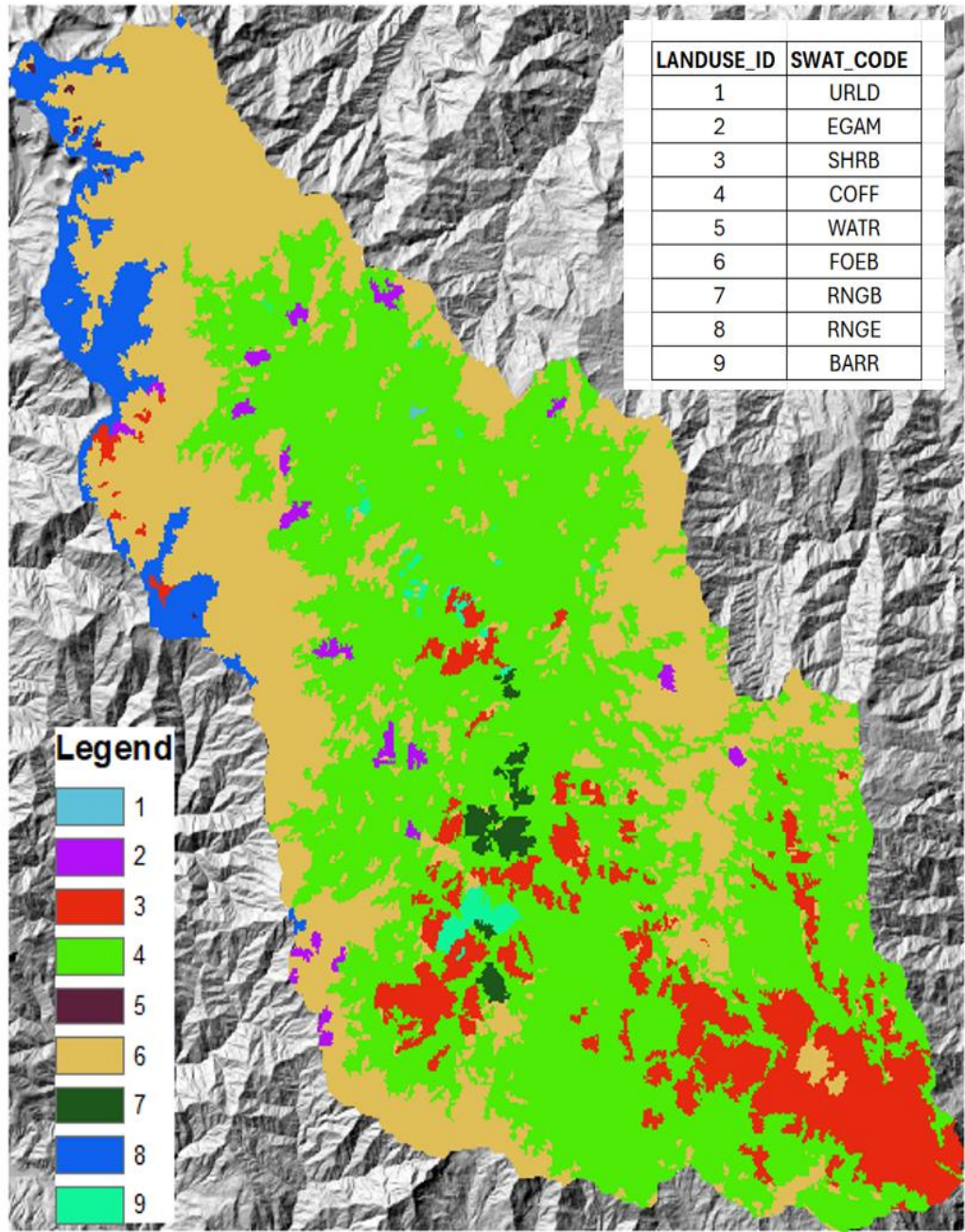
Figura 6. Mapa de tipos de suelo de la subcuenca del río Huayllabamba

Cobertura y uso de suelo (CUS)

La información sobre cobertura y uso del suelo se generó con base en el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2015), el cual fue procesado en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG). Se identificaron nueve clases principales de cobertura vegetal, las cuales fueron reclasificadas conforme a la tipología de vegetación establecida por el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

Esta reclasificación permitió armonizar la estructura categórica del mapa original con los requerimientos del modelo hidrológico, garantizando la correspondencia entre los tipos de cobertura y los parámetros hidrológicos asociados a procesos de

evapotranspiración, infiltración, escorrentía y retención hídrica, tal como se presenta en la Figura 7.

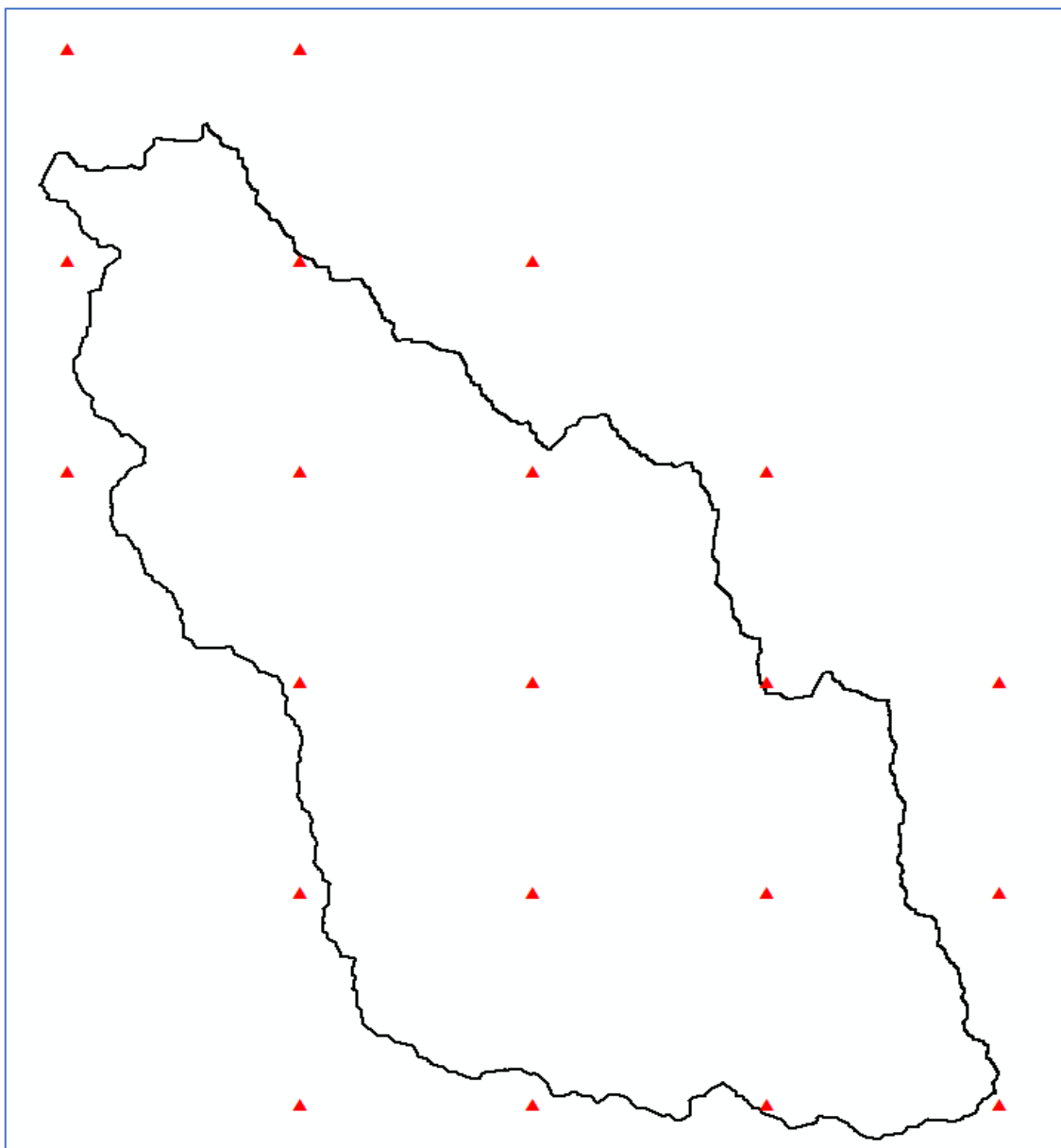


Nota. Elaboración propia a partir de datos del Ministerio del Ambiente – MINAM (2015)

Figura 7. Mapa de uso y cobertura del suelo de la subcuenca del río Huayllabamba

Clima

Con base en una serie temporal de 19 años de registros climáticos diarios provenientes de 22 estaciones meteorológicas, se generó el patrón climático representativo de la cuenca, el cual permitió caracterizar la variabilidad espacio-temporal de las principales variables atmosféricas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, tal como se muestra en la Figura 8 (SWAT, 2025).



Nota. Elaboración propia a partir de datos de Global Weather Data for SWAT (USDA–ARS, 2020).

Figura 8. Mapa de ubicación de las estaciones climáticas consideradas en la modelación hidrológica de la subcuenca del río Huayllabamba

Tabla 6. Parámetros climáticos utilizados en la modelación hidrológica.

Parámetro	Descripción
TAV_MAX	Promedio mensual de la temperatura máxima diaria (°C)
TAV_MIN	Promedio mensual de la temperatura mínima diaria (°C)
TAVSTD_MAX	Desviación estándar mensual de la temperatura máxima diaria (°C)
TAVSTD_MIN	Desviación estándar mensual de la temperatura mínima diaria (°C)
PCPMM	Promedio mensual de la precipitación diaria (mm H ₂ O)
PCPSTD	Desviación estándar mensual de la precipitación diaria (mm H ₂ O/día)
PCPSKW	Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria
PR_W1	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco
PR_W2	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo
PCPD	Promedio mensual del número de días de lluvia
RAINHHMX	Máxima lluvia de media hora por mes (mm H ₂ O)
SOLARAV	Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m ² /día)
DEWPT	Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío (°C)
WINDAV	Promedio mensual de la velocidad del viento diaria (m/s)

Nota. Elaboración propia a partir de los parámetros climáticos definidos por el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) y la base de datos Global Weather Data for SWAT (USDA–ARS, 2020).

5.6.3. Escenarios de cambio climático

Se entiende como una representación plausible del desarrollo futuro, construida a partir de un conjunto coherente de supuestos sobre variables socioeconómicas, tecnológicas y ambientales que determinan la evolución del sistema climático (Pörtner et al., 2022). Dentro de este marco, las Rutas Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways – SSP) constituyen un grupo de escenarios diseñados para apoyar los estudios de impacto climático y la evaluación de políticas de mitigación y adaptación. Estos escenarios no pretenden predecir el futuro, sino explorar las posibles trayectorias de desarrollo humano y sus implicaciones sobre el cambio climático, proporcionando un contexto sistemático para analizar cómo distintas combinaciones de

crecimiento económico, innovación tecnológica, desigualdad social y gestión ambiental pueden influir en la capacidad global de mitigarse y adaptarse a dicho fenómeno, tal como se muestra en la Tabla 7(O’Neill, 2024).

Tabla 7. Descripción resumida de los escenarios socioeconómicos compartidos (SSP) y su forzamiento radiativo.

Escenarios	Forzamiento radiativo (W m ⁻²)	Resumen de la narrativa
SSP1: Sostenibilidad (Bajos desafíos para la mitigación y la adaptación)	1.9	El escenario más optimista del IPCC prevé un mundo en el que las emisiones globales de CO2 se reduzcan a cero para 2050. En este escenario, existe un cambio en la sociedad hacia prácticas más sostenibles y la atención se desplaza del crecimiento económico al bienestar general. Aumentan las inversiones en salud y educación. Cae la desigualdad. El mundo ha evitado los peores impactos del cambio climático, aunque el clima extremo es más común. Sólo este escenario cumple con el objetivo establecido en el Acuerdo de París de limitar el calentamiento global a 1.5°C.
	2.6	Las emisiones globales de CO2 se reducirán significativamente, pero no tan rápidamente, hasta llegar a cero emisiones netas en 2050. Bajo este forzamiento radiativo se considera los mismos cambios socioeconómicos hacia la sostenibilidad que el SPP1-1.9, sin embargo, las temperaturas se estabilizarán alrededor de 1.8°C para finales de siglo.
SSP2: A mitad del camino (Desafíos medios para la mitigación y la adaptación)	4.5	En este escenario, el nivel de emisiones de CO2 ronda los niveles actuales de comenzar a disminuir a mediados de siglo, pero no llegará a cero emisiones en 2100. Los factores socioeconómicos continúan con la misma tendencia que en el pasado. El desarrollo y los ingresos crecen de manera desigual y el progreso hacia la sostenibilidad es lento. La temperatura promedio aumentará a 2.7°C para finales de siglo, lo que representará un nivel alto de desafíos para la adaptación y la mitigación.
SSP3-7.0: Rivalidad regional: un camino difícil	7.0	Para 2100, las emisiones y las temperaturas aumentarán de manera constante, y las emisiones de CO2 se duplicarán con respecto a los niveles actuales. Los países se vuelven más competitivos

Escenarios	Forzamiento radiativo (W m ⁻²)	Resumen de la narrativa
(grandes desafíos para la mitigación y la adaptación)		entre sí, orientándose hacia la seguridad nacional y garantizando sus propios suministros de alimentos. Bajo este escenario, la tecnología avanza en los países desarrollados, pero no toda la población logra beneficiarse de ello, lo cual representa un nivel alto para la adaptación. A finales de siglo, la temperatura media habrá aumentado 3.6°C.
SSP5: Desarrollo impulsado por combustibles fósiles: tomar la autopista (grandes desafíos para la mitigación, pocos desafíos para la adaptación)	8.5	Un futuro que debe evitarse a toda costa. Para 2050, se espera que las emisiones de CO ₂ se dupliquen a raíz de un crecimiento rápido de la economía global impulsado por la explotación de combustibles fósiles y estilos de vida que consumen mucha energía, por lo que representa un elevado nivel de desafío para la mitigación. Como resultado, la temperatura global promedio aumentará 4.4°C para el año 2100.

Nota. Adaptado de Climate Central Group (Climate Central Group, 2021)

En el presente estudio se consideraron los escenarios SSP2–4.5 y SSP5–8.5, correspondientes a trayectorias de forzamiento radiativo intermedio y alto, respectivamente, de acuerdo con las proyecciones del IPCC (2022) y la descripción de las Rutas Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways – SSP) propuestas por (Riahi et al., 2017).

5.6.4. Cálculo de anomalías climáticas

Se analizaron cambios en las variables climáticas de temperatura máxima (°C), mínima (°C) y precipitación (mm) a nivel mensual proyectados al periodo 2041-2060 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 con respecto a una condición climática histórica definida por el periodo 1970-2000. Ambos conjuntos de datos fueron descargados de WorldClim 2.1 (Fick & Hijmans, 2017), a una resolución espacial de 30 arcseg (~1 km² en el Perú).

Se utilizaron datos proyectados que consisten en resultados estadísticamente reducidos y ajustados por sesgo, derivados del CMIP6 de cuatro Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés): MPI-ESM1-2-HR de Alemania (Max Planck

Institute for Meteorology), FIO-ESM-2-0 de China (First Institute of Oceanography Earth System Model), MIROC6 (Model for Interdisciplinary Research on Climate) de Japón y UKESM1-0-LL del Reino Unido (UK Earth System Model, Low Resolution).

Estos modelos fueron seleccionados en base a tres estudios sobre MCGs aplicables a Sudamérica y Perú. En particular, el estudio sobre Perú se fundamenta en la “Tercera Comunicación Nacional”, que identifica los MCGs a utilizar para proyectar condiciones climáticas futuras en el país.

Bajo cada escenario climático, se calculó la media aritmética para ensamblar los datos de cada modelo y generar un único resultado proyectado, el cual se utilizó para realizar las comparaciones con respecto al clima histórico. Una vez que se tienen los datos ensamblados, se utilizan la ecuación (1) y la ecuación (2) para calcular los cambios:

$$\Delta pcp (\%) = \frac{pcpFUT - pcpREF}{pcpREF} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

Δpcp (%): Anomalía de la precipitación mensual acumulada en porcentaje.

$pcpFUT$: Valores de precipitación mensual acumulada futura en mm.

$pcpREF$: Valores de precipitación mensual acumulada de referencia en mm.

$$\Delta tmp (^{\circ}C) = tmpFUT - tmpREF \quad (2)$$

Δtmp ($^{\circ}C$): Anomalía de la temperatura en grados celsius ($^{\circ}C$).

$tmpFUT$: Valores de temperatura futura en $^{\circ}C$.

$tmpREF$: Valores de temperatura de referencia en $^{\circ}C$.

5.7. Metodología: Evaluación del impacto del cambio climático sobre las zonas de vida en la subcuenca del río Huayllabamba

a. Delimitación del área de estudio

Se utilizó un shapefile nacional de Zonas de Vida del Perú, el cual fue delimitado geográficamente para restringir el ámbito de análisis a la subcuenca del río Huayllabamba, localizada en la región andina norte del país (MINAM, 2019). Este procedimiento aseguró la preservación de la categorización ecológica original contenido

en la capa nacional y permitió identificar las unidades ecológicas presentes dentro de la subcuenca, constituyendo la base cartográfica necesaria para el análisis comparativo entre las condiciones biofísicas actuales y las proyecciones climáticas futuras.

b. Procesamiento de datos climáticos

Se utilizaron capas ráster de anomalías climáticas que representaron el cambio proyectado en temperatura (°C) y precipitación (%) bajo dos escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas (Shared Socioeconomic Pathways – SSP) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC):

- **SSP2–4.5**, correspondiente a una trayectoria intermedia de emisiones y forzamiento radiativo.
- **SSP5–8.5**, asociada a una trayectoria de altas emisiones.

Estas anomalías fueron procesadas en el lenguaje de programación R, empleando las bibliotecas raster, terra y rgdal, que permitieron realizar el tratamiento y estandarización de los datos climáticos. Las principales operaciones incluyeron:

- La reproyección de las capas ráster a un sistema de coordenadas compatible con el shapefile de zonas de vida de la subcuenca.
- La aplicación de filtros y la verificación de coherencia espacial y estadística de los datos, considerando resolución, extensión y detección de valores atípicos.
- La normalización y el cálculo de estadísticas descriptivas preliminares por píxel, con el propósito de garantizar la consistencia de los insumos antes de su análisis espacial comparativo.

5.8. Análisis de estadísticas zonales

Una vez validadas las capas de anomalías, se importaron a ArcMap donde se aplicó la herramienta "Zonal Statistics as Table" para calcular estadísticas climáticas dentro de los polígonos de cada zona de vida. Para cada escenario y variable climática se obtuvieron:

- Promedio (mean)
- Mínimo y máximo

- Desviación estándar

El análisis se realizó separadamente para:

- Temperatura máxima
- Temperatura mínima
- Precipitación

Este procedimiento permitió caracterizar cuantitativamente el impacto proyectado del cambio climático en cada unidad ecológica presente en la subcuenca.

5.9. Evaluación de umbrales de cambio

Posteriormente, se establecieron umbrales críticos de cambio climático en función de la sensibilidad ecológica de las zonas de vida. Por ejemplo:

- Temperaturas $> +2\text{ }^{\circ}\text{C}$ como indicativo de posible migración altitudinal forzada.
- Cambios en precipitación $> \pm 5$ por ciento como disparadores de alteraciones en la disponibilidad hídrica y riesgos asociados (erosión, deslizamientos, estrés hídrico).

5.10. Interpretación de impactos

Con base en los resultados estadísticos, se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de los impactos ecosistémicos esperados por zona de vida. Este análisis incluyó:

- Cambios en la estructura y composición de la vegetación.
- Vulnerabilidad a plagas, enfermedades y fenómenos extremos.
- Riesgos para los servicios ecosistémicos clave (agua, suelo, biodiversidad).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Identificación de los diferentes tipos de escenarios de simulaciones climáticas para la subcuenca del río Huayllabamba en la provincia de Jaén

6.1.1. Escenario SSP2-4.5, periodo 2041-2060

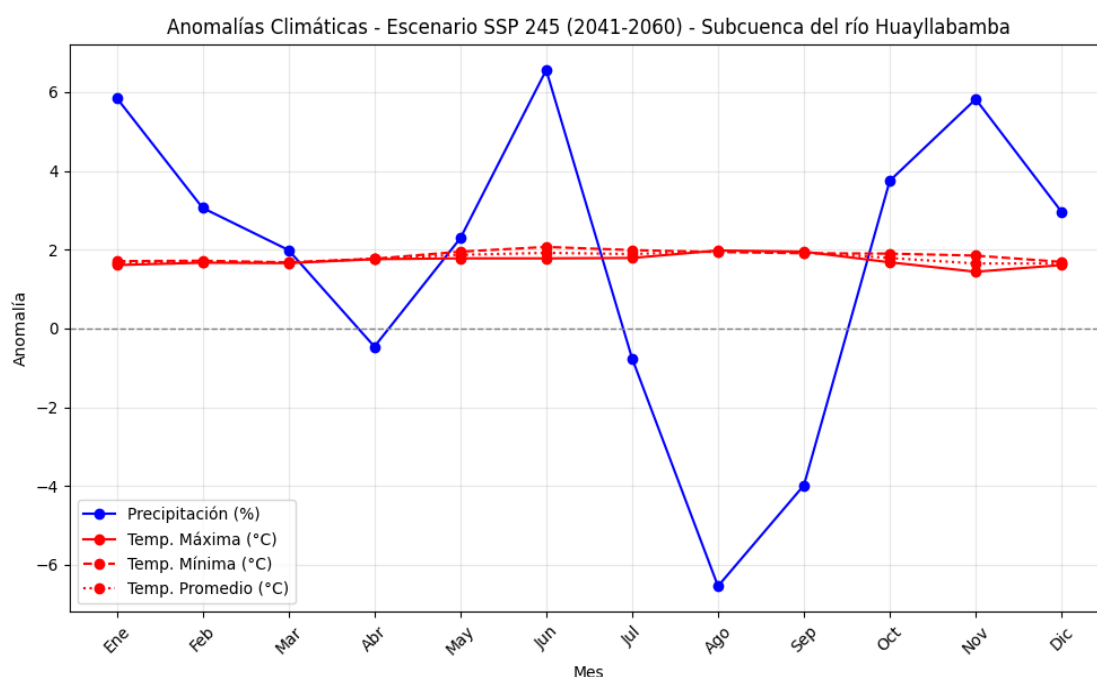
Las proyecciones climáticas para la cuenca del río Huayllabamba durante el periodo 2041–2060 bajo el escenario SSP 245 indican un aumento generalizado de la temperatura, con anomalías anuales de +1.73 °C en la máxima, +1.85 °C en la mínima y +1.79 °C en la temperatura promedio, evidenciando un calentamiento sostenido durante todo el año.

La precipitación anual muestra un ligero incremento de +1.71 por ciento, aunque con alta variabilidad estacional: aumentos en los meses lluviosos (junio, enero, noviembre) y descensos marcados en la estación seca, especialmente en agosto (–6.54 por ciento) y septiembre (–3.98 por ciento). Este patrón sugiere un clima más cálido con lluvias más intensas, pero también con sequías más pronunciadas en la época seca, lo que podría afectar la disponibilidad hídrica, la agricultura y los ecosistemas locales, demandando medidas de adaptación y manejo más resilientes, tal como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Variaciones mensuales proyectadas de precipitación y temperatura bajo escenarios climáticos SSP2-4.5 (°C y %).

MES	Precipitación (%)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	5.85	1.61	1.71	1.66
2	3.06	1.67	1.72	1.69
3	1.99	1.66	1.68	1.67
4	(0.46)	1.76	1.77	1.77
5	2.29	1.78	1.95	1.87
6	6.56	1.78	2.07	1.92
7	(0.76)	1.79	1.99	1.89
8	(6.54)	1.98	1.94	1.96
9	(3.98)	1.95	1.91	1.93
10	3.75	1.68	1.90	1.79
11	5.82	1.44	1.85	1.65
12	2.96	1.61	1.69	1.65
Anual	1.71	1.73	1.85	1.79

Nota. Elaboración propia a partir de simulaciones del modelo climático CMIP6 y análisis hidrometeorológico en la subcuenca del río Huayllabamba (2025).



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados del modelo climático CMIP6 (escenario SSP2-4.5) y simulaciones hidrometeorológicas de la cuenca del río Huayllabamba (2025).

Figura 9. Anomalías mensuales proyectadas de precipitación y temperatura bajo el escenario SSP2-4.5 (2041–2060) en la subcuenca del río Huayllabamba

Las anomalías de temperatura observadas bajo el escenario SSP2-4.5 evidencian un proceso de calentamiento sostenido en la subcuenca del río Huayllabamba, coherente con los patrones proyectados para los Andes tropicales. El incremento anual cercano a +1.8 °C coincide con las estimaciones del (Masson-Delmotte et al., 2021); que identifica a las montañas tropicales como regiones particularmente vulnerables al aumento térmico debido a su menor capacidad de regulación atmosférica y a la amplificación altitudinal del calentamiento. Estudios recientes en cuencas altoandinas del Perú y Ecuador (Drenkhan et al., 2023); han demostrado que aumentos térmicos de esta magnitud reducen la humedad del suelo, incrementan la evapotranspiración y generan una mayor presión sobre los sistemas agrícolas y ecosistémicos.

Por otro lado, el incremento promedio anual de precipitación (+1.71 por ciento) oculta una marcada variabilidad estacional que constituye uno de los efectos más significativos del cambio climático proyectado. La intensificación de lluvias en meses húmedos y la disminución en la estación seca coinciden con la tendencia identificada por (Espinoza et al., 2015); para la región andina, donde el calentamiento oceánico y los

cambios en la circulación atmosférica fortalecen los eventos de lluvia intensa, al tiempo que alargan las sequías estacionales. Esta redistribución temporal del agua incrementa el riesgo de déficit hídrico para la agricultura local, especialmente en cultivos sensibles como café, plátano y pastos, cuyas fases críticas coinciden con los meses de menor pluviosidad.

Las disminuciones significativas registradas en agosto -6.54 por ciento y septiembre -3.98 por ciento refuerzan la vulnerabilidad de la cuenca durante la estación seca. El SENAMHI (2021) reporta que en la Sierra norte estas reducciones estacionales pueden intensificarse en escenarios climáticos futuros, afectando la recarga de acuíferos y la disponibilidad del recurso hídrico para la población rural. Este comportamiento podría amplificar los procesos de degradación ambiental, como erosión y pérdida de fertilidad del suelo, tal como han señalado (Sarpa et al., 2015); en cuencas tropicales de montaña.

En conjunto, los resultados del escenario SSP2-4.5 sugieren que la subcuenca del río Huayllabamba enfrentará un clima más cálido, más variable y con extremos más acentuados, lo que demanda estrategias de adaptación como el reforzamiento de la infraestructura natural, la conservación de suelos, la cosecha de agua y la gestión anticipada del recurso hídrico. Estos cambios proyectados también requieren un fortalecimiento de la gobernanza local del agua para enfrentar adecuadamente la presión climática futura.

6.1.2. Escenario SSP5-8.5, periodo 2041-2060

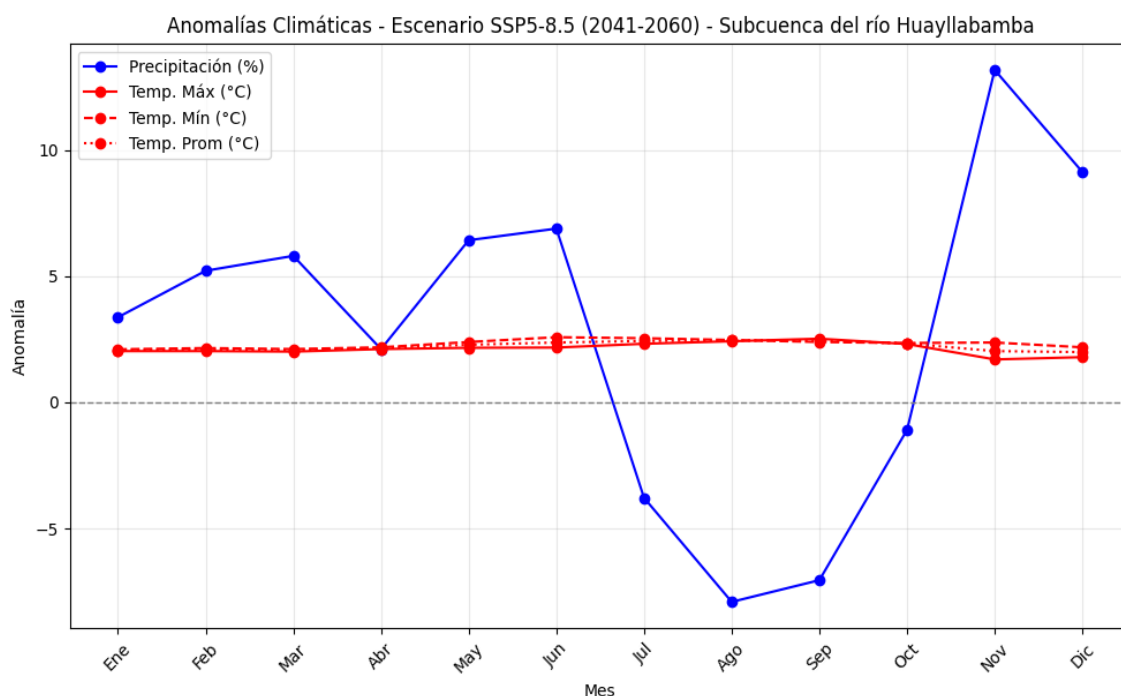
Durante el periodo 2041–2060 bajo el escenario climático más severo SSP 585, la cuenca del río Huayllabamba experimentaría un incremento térmico significativo, con anomalías anuales de $+2.13$ °C en temperatura máxima, $+2.32$ °C en mínima y $+2.22$ °C en promedio, evidenciando un calentamiento más pronunciado que en escenarios moderados. La precipitación anual aumentaría moderadamente en $+2.69$ por ciento, aunque se mantendría una fuerte variabilidad estacional: destacan incrementos importantes en noviembre $+13.16$ por ciento y diciembre $+9.12$ por ciento, contrastando con reducciones notables en los meses secos, especialmente en agosto -7.90 por ciento y septiembre -7.04 por ciento. Este patrón sugiere un futuro con temperaturas mucho más elevadas durante todo el año, lluvias más intensas en la estación húmeda, y sequías más severas y prolongadas en la seca, lo cual podría agravar los riesgos de estrés hídrico,

incendios forestales, afectación a cultivos y desbalances en los sistemas ecológicos y productivos de la cuenca, según se muestra en la Tabla 9.

Tabla 8. Variaciones mensuales proyectadas de precipitación y temperatura bajo el escenario SSP5-8.5 (°C y %).

MES	Precipitación (%)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	3.37	2.03	2.10	2.06
2	5.21	2.03	2.15	2.09
3	5.80	2.01	2.11	2.06
4	2.11	2.11	2.18	2.15
5	6.42	2.16	2.39	2.28
6	6.88	2.17	2.58	2.37
7	(3.78)	2.32	2.54	2.43
8	(7.90)	2.42	2.47	2.45
9	(7.04)	2.52	2.39	2.45
10	(1.09)	2.31	2.35	2.33
11	13.16	1.70	2.37	2.03
12	9.12	1.79	2.18	1.99
Anual	2.69	2.13	2.32	2.22

Nota. Elaboración propia a partir de simulaciones del modelo climático CMIP6 (escenario SSP5-8.5) y análisis hidrometeorológico en la subcuenca del río Huayllabamba (2025).



Nota. Elaboración propia a partir de simulaciones del modelo climático CMIP6 (escenario SSP 585) y análisis hidrometeorológico de la cuenca del río Huayllabamba (2025).

Figura 10. Anomalías mensuales proyectadas de precipitación y temperatura bajo el escenario SSP5-8.5 (2041–2060) en la cuenca del río Huayllabamba.

Las proyecciones climáticas bajo el escenario SSP5-8.5 evidencian un calentamiento acelerado en la subcuenca del río Huayllabamba, con incrementos superiores a +2 °C en temperatura máxima, mínima y promedio. Este patrón de calentamiento intensificado es característico de los sistemas montaños tropicales y coincide con lo señalado por (Pepin et al., 2015), quienes demuestran que el calentamiento dependiente de la altitud (elevation-dependent warming) tiende a ser más pronunciado en regiones elevadas debido a la reducción de la eficiencia de enfriamiento por convección y a cambios en la cobertura de nubes. Asimismo, investigaciones globales recientes (Chan et al., 2024), identifican a los Andes como uno de los “puntos críticos” donde el aumento de la temperatura supera rápidamente el promedio mundial bajo escenarios de altas emisiones, generando una presión térmica sin precedentes sobre ecosistemas frágiles.

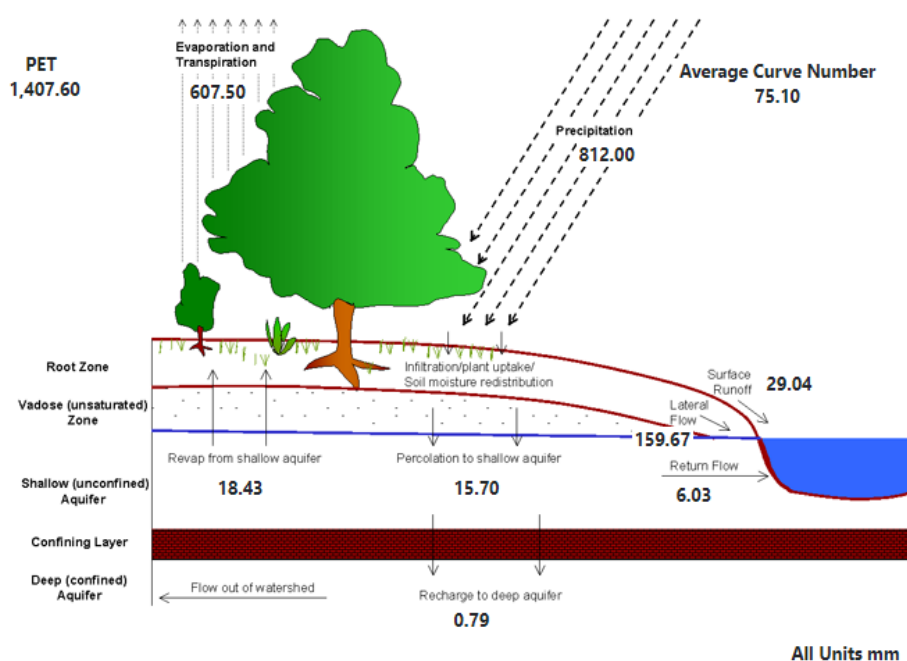
Este aumento térmico también se asocia a un incremento sostenido de la evapotranspiración y la pérdida de humedad edáfica, procesos ampliamente descritos por (Na et al., 2026) , quienes indican que los escenarios de calentamiento intensivo generan una intensificación hidrológica caracterizada por una mayor demanda atmosférica de agua. De igual manera, (Jose et al., 2022); demostraron que la recarga de acuíferos disminuye significativamente cuando las anomalías térmicas superan los +2 °C, aun cuando la precipitación no disminuya de manera proporcional, lo que coincide con los patrones esperados para la subcuenca del Huayllabamba. Estos cambios alteran la dinámica del balance hídrico, reduciendo la capacidad del suelo para almacenar humedad y aumentando la vulnerabilidad del flujo base durante los meses secos.

Finalmente, un calentamiento superior a +2 °C provoca efectos directos sobre la resiliencia ecológica y los sistemas productivos de montaña. Estudios recientes en bosques montanos tropicales (Nieves, 2025), advierten que el incremento de temperatura acelera el desplazamiento altitudinal de especies, reduce la estabilidad fisiológica de la vegetación y aumenta la susceptibilidad de los agroecosistemas a plagas y enfermedades. En cultivos como café, cacao y frutales, (Lozano Povis et al., 2021), reportan que temperaturas mayores a 2 °C incrementan el estrés térmico, reducen la productividad y alteran los ciclos fenológicos. Bajo este marco, el escenario SSP5-8.5 configura un futuro climático en el que el aumento térmico constituye uno de los factores de mayor presión sobre la funcionalidad hídrica, ecológica y agrícola de la subcuenca del río Huayllabamba.

6.2. Anomalías climáticas de precipitación y temperatura bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en la subcuenca del río Huayllabamba

6.2.1. Impacto Balance hídrico (Producción de agua)

Se presentan los cambios en las variables hidrológicas de la subcuenca del río Huayllabamba bajo escenarios de SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2041-2060, según se muestra en la Figura 11.



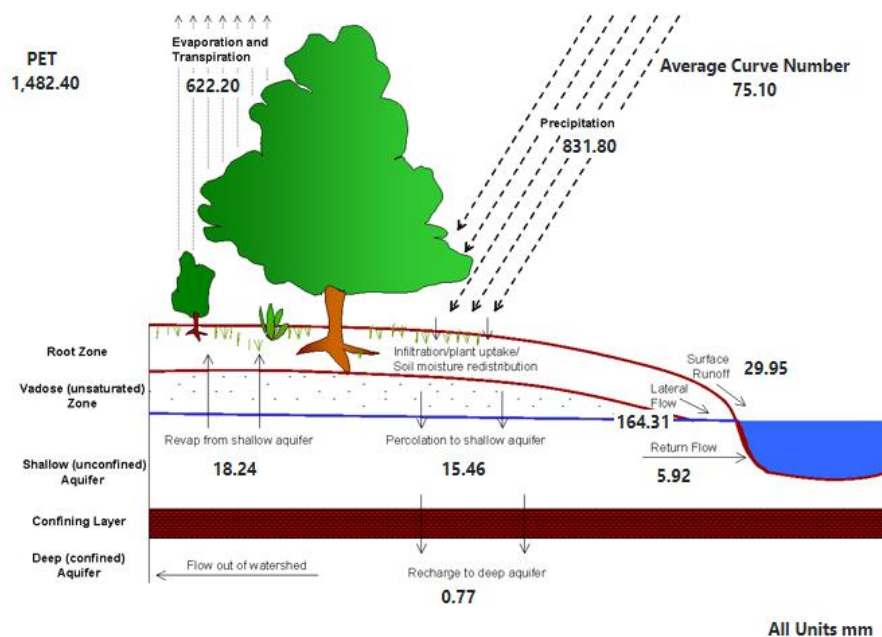
Nota. Adaptado de Neitsch et al. (2011), modificado a partir de Arnold et al. (2012).

Figura 11. Esquema conceptual del ciclo hidrológico simulado por el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

6.2.2. Comportamiento hídrico - escenario SSP2-4.5 (2041–2060)

Bajo el escenario SSP2-4.5 (2041–2060), la subcuenca del río Huayllabamba experimentaría cambios moderados pero significativos en su balance hídrico, caracterizados por un ligero aumento en la precipitación (+2.44 mm) y una mayor demanda atmosférica de agua, evidenciada por el incremento de la evapotranspiración potencial (+5.35 mm) y real (+2.46 mm). Aunque el almacenamiento de agua en el suelo (SW) aumentaría (+3.32 mm), se observa una preocupante reducción del flujo subterráneo base (GW_Q: -8.83 mm) y de la percolación profunda (PERC: -3.34 mm), lo que sugiere una menor recarga de acuíferos y mayor vulnerabilidad en la estación seca.

Además, el aumento del escurrimiento superficial (SURQ: +2.80 mm) y la producción de sedimentos (SYLD: +15.11 t/ha) podrían indicar un deterioro progresivo del suelo y un incremento en los procesos erosivos, afectando la calidad del agua y la estabilidad de la infraestructura hídrica. Estos resultados evidencian la necesidad de implementar medidas de adaptación orientadas a conservar el suelo, mejorar la infiltración y garantizar un uso más eficiente del agua ante un clima más cálido y variable, según se muestra en la Figura 12.



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados del modelo hidrológico SWAT con forzantes climáticos CMIP6-SSP2-4.5 para la cuenca del río Huayllabamba (2025).

Figura 12. Balance promedio escenario SSP2-4.5 periodo 2041-2060

Los resultados del escenario SSP2-4.5 evidencian un patrón de intensificación moderada del ciclo hidrológico, caracterizado por un aumento marginal de la precipitación que resulta insuficiente para compensar el incremento más pronunciado de la evapotranspiración. Este comportamiento coincide con lo reportado por (Gonzales et al., 2021), quienes señalan que el calentamiento incrementa la demanda evaporativa atmosférica, reduciendo la eficiencia con la que las cuencas tropicales retienen y redistribuyen el agua. En la subcuenca del Huayllabamba, esta intensificación se evidencia en el aumento del déficit hídrico y en la disminución del flujo subterráneo base, lo cual compromete la disponibilidad de agua en la temporada seca.

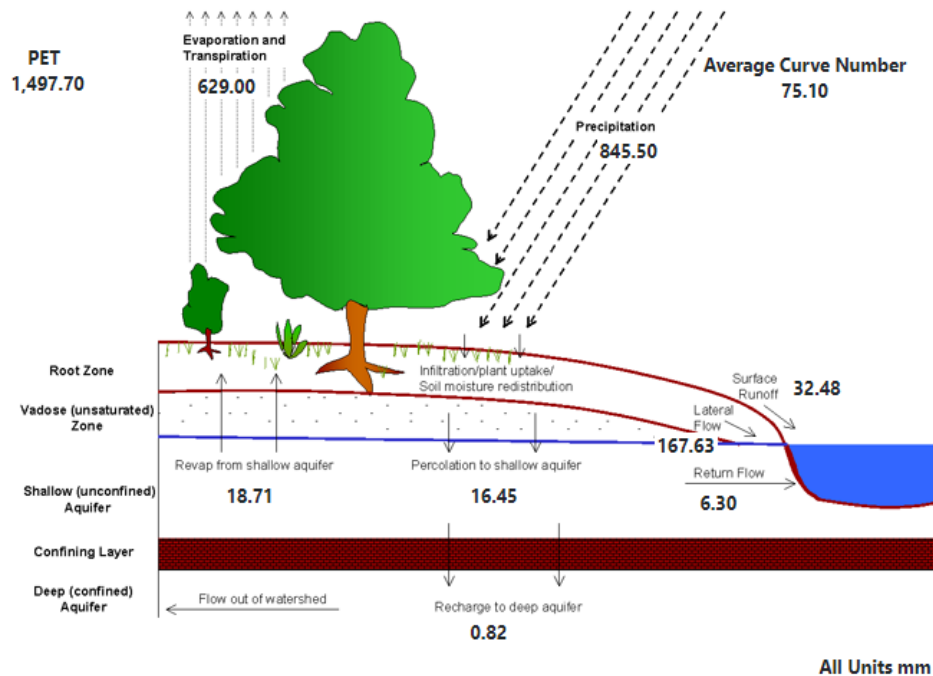
La reducción de la percolación profunda y del flujo base sugiere una menor capacidad del sistema suelo-acuífero para almacenar y liberar agua, efecto ampliamente descrito por (Guo et al., 2021) quienes documentan que, bajo escenarios de calentamiento moderado, los procesos de recarga se debilitan a pesar de ligeros incrementos en la precipitación. Paralelamente, el incremento del escurrimiento superficial y la mayor producción de sedimentos concuerdan con los hallazgos de (Eekhout & de Vente, 2022), donde se observa que la combinación de lluvias más concentradas y suelos más secos favorece la erosión acelerada y aumenta la vulnerabilidad de la infraestructura hídrica y de los sistemas agrícolas.

En síntesis, el escenario SSP2-4.5 proyecta un sistema hidrológico menos eficiente, con menor recarga subterránea, mayor pérdida de agua por evapotranspiración y una intensificación de los procesos erosivos. Esto confirma la necesidad de adoptar estrategias de adaptación basadas en soluciones naturales como conservación de suelos, revegetación y aumento de la infiltración tal como recomiendan (Lalonde Morgan & Drenkhan, 2025) para cuencas andinas bajo escenarios de cambio climático. Tales medidas serán fundamentales para sostener la regulación hídrica y la producción de agua en la subcuenca del río Huayllabamba hacia mediados del siglo XXI.

6.2.3. Comportamiento hídrico - escenario SSP5-8.5 (2041–2060)

En el escenario SSP5-8.5 (2041–2060), la subcuenca del río Huayllabamba enfrenta un escenario hidrológico más extremo y desafiante, con un mayor incremento en la precipitación (+4.13 mm) acompañado por un marcado aumento en la evapotranspiración potencial (+6.45 mm) y real (+3.61 mm), lo que implica una atmósfera más demandante de agua. El almacenamiento de agua en el suelo (SW: +4.84 mm) también aumentaría, pero esta mejora se vería compensada por flujos superficiales significativamente más altos (SURQ: +11.90 mm), lo que incrementa el riesgo de inundaciones, erosión y pérdida de nutrientes. A diferencia del escenario SSP2-4.5, aquí se proyecta una recuperación del flujo base subterráneo (GW_Q: +3.09 mm) y una percolación más profunda (PERC: +4.37 mm), posiblemente como resultado de lluvias más intensas, aunque irregulares. El caudal anual total (WYLD) se incrementa considerablemente (+5.83 mm), y la producción de sedimentos alcanza niveles preocupantes (+24.81 t/ha), reflejando una fuerte degradación del suelo. En conjunto, este escenario exige acciones urgentes de adaptación climática, enfocadas en el control de

escorrentía, la protección de fuentes de agua subterránea y la conservación del suelo para mitigar impactos en la agricultura, el abastecimiento hídrico y la infraestructura rural, según se muestra en la Figura 13.



Nota. Elaboración propia a partir de los resultados del modelo hidrológico SWAT con forzantes climáticos CMIP6-SSP5-8.5 para la cuenca del río Huayllabamba (2025).

Figura 13. Balance hídrico anual modelado bajo el escenario SSP5-8.5 (2041–2060) en la subcuenca del río Huayllabamba

El balance hídrico anual estimado para la subcuenca del río Huayllabamba muestra la estructura fundamental del funcionamiento del sistema bajo condiciones climáticas futuras, destacando la interacción entre la precipitación (845.50 mm), la evapotranspiración (629.00 mm) y los procesos de almacenamiento e intercambio entre los distintos compartimentos del suelo. Estos resultados evidencian que una proporción considerable del agua ingresada al sistema retorna a la atmósfera, lo que coincide con estudios recientes que indican una intensificación de la demanda evaporativa en cuencas altoandinas bajo escenarios de calentamiento climático (Arias et al., 2023), la magnitud de la evapotranspiración sugiere que la vegetación cumple un papel clave en la redistribución de la humedad del suelo, regulando la disponibilidad hídrica temporal.

Asimismo, la Figura 13 evidencia procesos relevantes de infiltración, percolación y recarga hacia los acuíferos superficiales y profundos. La percolación hacia el acuífero

somero (16.45 mm) y la recarga al acuífero profundo (0.82 mm) indican que, aunque existe un flujo descendente que contribuye a la reserva subterránea, su magnitud es limitada frente al total de agua precipitada. Este patrón se ha registrado en otras cuencas montañosas donde la elevada evapotranspiración y la baja capacidad de retención del suelo restringen la recarga profunda a pesar de incrementos moderados en la lluvia (Jasechko et al., 2024).

El flujo lateral (167.63 mm) emerge como uno de los componentes más importantes del balance hídrico, representando un aporte significativo al caudal del río y reflejando la fuerte influencia de la topografía en la dinámica hidrológica andina. La prevalencia de este flujo confirma que las pendientes pronunciadas favorecen el movimiento horizontal del agua en el perfil del suelo, reduciendo el tiempo de residencia y aumentando la conectividad hidrológica. Este comportamiento coincide con investigaciones que reportan que los flujos laterales dominan en cuencas de montaña, especialmente bajo escenarios de lluvias más intensas y eventos extremos (Jasechko et al., 2024).

Por otro lado, la escorrentía superficial (32.48 mm) y el retorno hacia el cauce (6.30 mm) muestran que una fracción del agua precipitada no logra infiltrarse, lo que puede estar asociado tanto a la intensidad de las precipitaciones como a las características físicas del suelo, representadas en el valor del Curve Number promedio (75.10). Valores elevados de CN suelen asociarse con suelos compactados o con baja cobertura vegetal, lo cual incrementa el riesgo de escorrentía y erosión. Diversos estudios recientes advierten que este tipo de respuesta hidrológica podría intensificarse en escenarios de cambio climático, aumentando la vulnerabilidad del territorio a procesos erosivos y a la movilización de sedimentos (Correa et al., 2016a). En conjunto, la figura sintetiza un sistema hidrológico altamente sensible a las variaciones climáticas, en el que la interacción entre infiltración, evapotranspiración y escorrentía condiciona la disponibilidad de agua para los ecosistemas y los usos humanos.

6.2.4. Principales impactos en el balance hídrico bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5

En el escenario SSP5-8.5 (2041–2060), la subcuenca del río Huayllabamba enfrenta un escenario hidrológico más extremo y desafiante, con un mayor incremento en la precipitación (+4.13 mm) acompañado por un marcado aumento en la evapotranspiración

potencial (+6.45 mm) y real (+3.61 mm), lo que implica una atmósfera más demandante de agua. El almacenamiento de agua en el suelo (SW: +4.84 mm) también aumentaría, pero esta mejora se vería compensada por flujos superficiales significativamente más altos (SURQ: +11.90 mm), lo que incrementa el riesgo de inundaciones, erosión y pérdida de nutrientes. A diferencia del escenario SSP2-4.5, aquí se proyecta una recuperación del flujo base subterráneo (GW_Q: +3.09 mm) y una percolación más profunda (PERC: +4.37 mm), posiblemente como resultado de lluvias más intensas, aunque irregulares. El caudal anual total (WYLD) se incrementa considerablemente (+5.83 mm), y la producción de sedimentos alcanza niveles preocupantes (+24.81 t/ha), reflejando una fuerte degradación del suelo. En conjunto, este escenario exige acciones urgentes de adaptación climática, enfocadas en el control de escorrentía, la protección de fuentes de agua subterránea y la conservación del suelo para mitigar impactos en la agricultura, el abastecimiento hídrico y la infraestructura rural.

Tabla 9. Cambios proyectados en las variables del balance hídrico bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (periodo 2041–2060).

Variable Balance hídrico	%Cambio_SSP245	%Cambio_SSP585
PRECIPmm	2.441639006	4.130602452
PETmm	5.354904462	6.447815931
ETmm	2.461330212	3.608138342
SWmm	3.324978461	4.841172954
PERCmm	-3.339983206	4.367673594
SURQmm	2.805650741	11.8977308
GW_Qmm	-8.836494826	3.087891547
WYLDmm	2.577821391	5.82834572
SYLDt_ha	15.10837938	24.8120562

Nota. Elaboración propia con base en simulaciones del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), ejecutadas con datos climáticos de WorldClim v2.1 y proyecciones CMIP6 (Fick & Hijmans, 2017).

Los cambios proyectados en el balance hídrico de la subcuenca del río Huayllabamba muestran respuestas contrastantes entre los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, revelando diferentes grados de estrés hidrológico asociados a la intensidad del cambio climático. Bajo el escenario intermedio SSP2-4.5, los incrementos en la precipitación (+2.44 mm), la evapotranspiración potencial (+5.35 mm) y la

evapotranspiración real (+2.46 mm) señalan un sistema ligeramente más húmedo, aunque con una atmósfera más demandante de agua. Este comportamiento coincide con estudios regionales que proyectan un aumento moderado de la humedad atmosférica y de la variabilidad pluviométrica hacia mediados del siglo XXI (Hong et al., 2025). Sin embargo, la reducción de la percolación profunda (−3.34 mm) y del flujo base (−8.84 mm) sugiere una disminución en la capacidad de recarga subterránea, lo que puede comprometer la estabilidad del caudal en época seca, un fenómeno ampliamente documentado en cuencas andinas sometidas a escenarios de calentamiento intermedio (Jasechko et al., 2024).

En contraste, el escenario de altas emisiones SSP5-8.5 presenta una intensificación notable de la dinámica hidrológica, evidenciada por un aumento más pronunciado de la precipitación (+4.13 mm) y de la evapotranspiración (+6.45 mm en PET; +3.61 mm en ET). Esta combinación proyecta un clima más cálido y con mayor humedad disponible, pero sujeto a eventos más extremos e irregulares, lo cual coincide con las tendencias globales reportadas por el IPCC (2021) y las simulaciones CMIP6 para la región andina (Yang et al., 2025). Aunque el almacenamiento de agua en el suelo también aumentaría (+4.84 mm), este beneficio se ve contrarrestado por un incremento muy superior en la escorrentía superficial (+11.90 mm), lo que eleva el riesgo de desbordes, erosión y pérdida de nutrientes edáficos. Este patrón es característico de escenarios de mayor forzamiento radiativo, donde las lluvias intensas superan la capacidad de infiltración del suelo, incrementando la vulnerabilidad hidrológica (Wongchuig et al., 2016).

Un aspecto clave es la recuperación del flujo base subterráneo (+3.09 mm) y el aumento de la percolación profunda (+4.37 mm) bajo SSP5-8.5, a diferencia de las reducciones observadas en SSP2-4.5. Esta respuesta podría interpretarse como un efecto de las lluvias más intensas, que generan pulsos de recarga más marcados, pero menos estables en el tiempo. La literatura reciente sugiere que, en escenarios de precipitaciones extremas, la recarga puede aumentar temporalmente, aunque sin garantizar la sostenibilidad del recurso subterráneo en el largo plazo debido a la mayor variabilidad climática (Taucare et al., 2020). Asimismo, el caudal anual total aumenta en ambos escenarios, pero es significativamente mayor en SSP5-8.5 (+5.83 mm), reafirmando un sistema más dinámico, pero también más expuesto a fluctuaciones extremas.

Finalmente, la producción de sedimentos se incrementa de manera importante en ambos escenarios, con un aumento de +15.10 t/ha en SSP2-4.5 y un nivel crítico de +24.81 t/ha en SSP5-8.5. La intensificación de los procesos erosivos bajo el escenario de altas emisiones refleja una mayor degradación del suelo y un aumento de los riesgos asociados a la pérdida de fertilidad, asolvamiento de ríos y afectación de la infraestructura hidráulica. Este comportamiento coincide con las evaluaciones recientes sobre la vulnerabilidad de cuencas andinas frente a eventos de precipitación intensa (Rosas et al., 2023). En conjunto, los resultados sugieren que, mientras el escenario SSP2-4.5 representa un estrés hidrológico moderado, el escenario SSP5-8.5 configura un contexto de alta exposición y riesgo, que demanda estrategias de adaptación robustas orientadas al manejo de escorrentía, conservación de suelos y protección de fuentes de agua subterránea.

6.2.5. *Impactos hidrológicos en la subcuenca del río Huayllabamba bajo escenarios climáticos.*

a. Cambios en la disponibilidad y comportamiento del agua

1. Aumento de la precipitación total, más marcado en SSP 585, lo que podría intensificar eventos de lluvia extrema.
2. Incremento de la evapotranspiración potencial y real, reduciendo la eficiencia del uso del agua por cultivos y ecosistemas.
3. Mayor almacenamiento de agua en el suelo, lo que podría mejorar la humedad disponible temporalmente, pero dependerá del uso y cobertura vegetal.

b. Alteraciones en los flujos hidrológicos

1. Incremento significativo del escurrimiento superficial (SURQ), especialmente en SSP 585, lo que eleva el riesgo de inundaciones y arrastre de suelos.
2. Reducción del flujo subterráneo base (GW_Q) en SSP 245, comprometiendo la disponibilidad de agua en temporada seca.
3. Aumento del caudal total (WYLD), con implicaciones para la infraestructura hidráulica y planificación del recurso hídrico.

c. Degradación ambiental y del suelo

1. Aumento de la producción de sedimentos (SYLD), indicando mayor erosión y pérdida de suelo fértil.

2. Mayor vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos y pérdida de calidad del agua por arrastre de sedimentos y contaminantes.

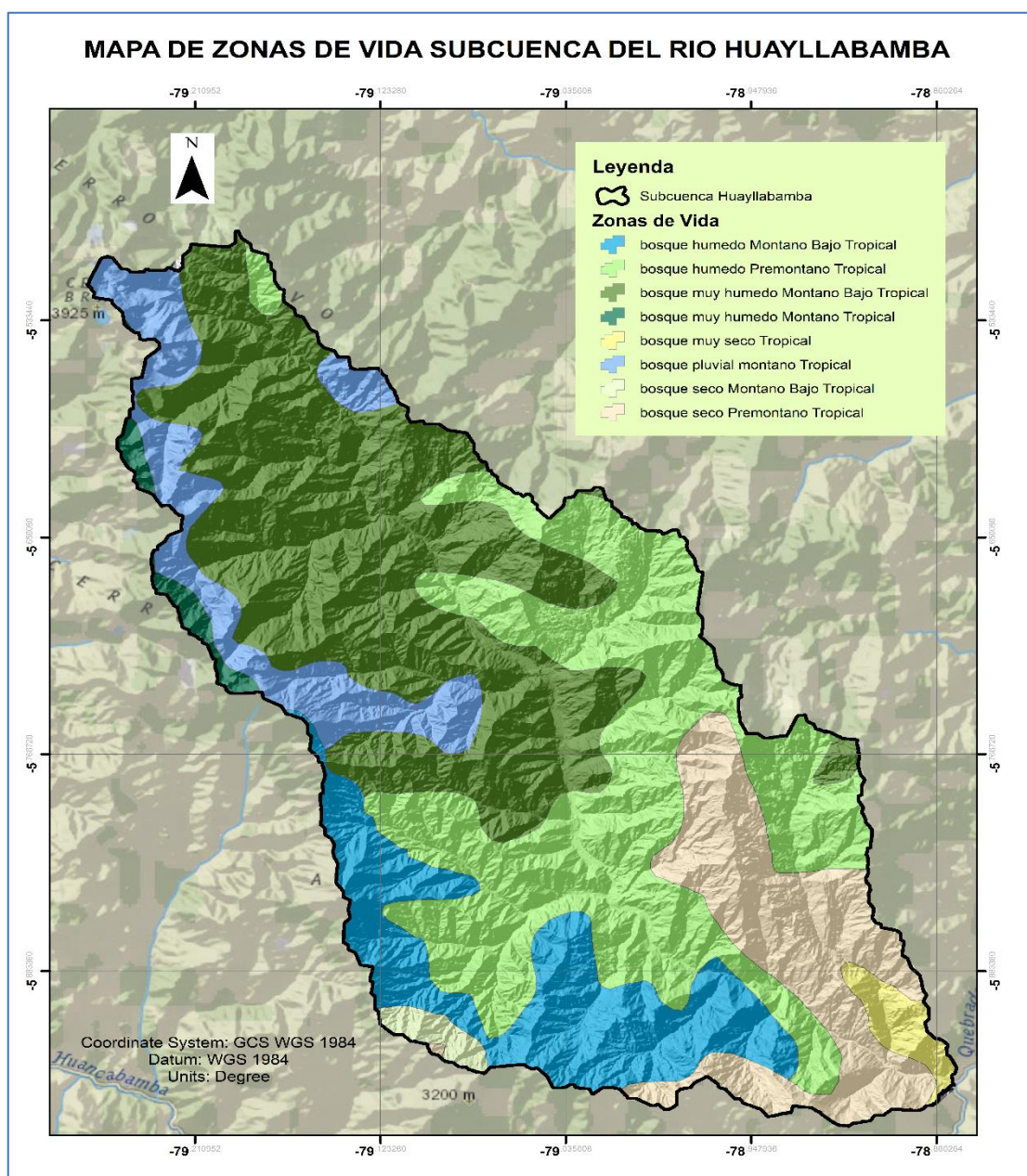
d. Implicancias para la gestión y el desarrollo

1. Mayor presión sobre los sistemas de riego y abastecimiento, por la irregularidad en la disponibilidad hídrica.
2. Riesgo creciente para infraestructura y caminos rurales por flujos extremos y sedimentación.
3. Necesidad urgente de estrategias de adaptación hídrica, como conservación de suelos, reforestación, cosecha de agua y fortalecimiento de la gobernanza del agua.

6.3. Analizar los riesgos e impactos climáticos actuales y futuros bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en las zonas de vida de la subcuenca del río Huayllabamba

6.3.1. Impacto zonas de vida

En la subcuenca se identifican ocho zonas de vida de las cuales el bosque húmedo Montano Bajo Tropical, el Bosque húmedo Premontano Tropical y el Bosque muy húmedo Montano Bajo Tropical abarca el 75.4 por ciento del área de la subcuenca (Figura 14, Tabla 11).



Nota. Elaboración propia a partir de la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1967) y análisis geoespacial mediante SIG con base en información del **Instituto Geográfico Nacional (IGN)** y el **Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)**, 2025

Figura 14. Mapa de zonas de vida de la subcuenca del río Huayllabamba

Tabla 10. Distribución de zonas de vida en la subcuenca del río Huayllabamba.

Zona De Vida	Área (ha)	%
Bosque seco Montano Bajo Tropical	1079.95	0.93
Bosque muy humedo Montano Tropical	1350.2	1.16
Bosque muy seco Tropical	1783.17	1.53
Bosque pluvial montano Tropical	10120.1	8.68
Bosque seco Premontano Tropical	14347.1	12.31
Bosque humedo Montano Bajo Tropical	14452.6	12.40
Bosque humedo Premontano Tropical	34773.2	29.83
Bosque muy humedo Montano Bajo Tropical	38681.7	33.18
Totales	116,588.02	100.00

Nota.: Elaboración propia con base en el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú (MINAM, 2019), adaptado de la clasificación ecológica de Holdridge (1978) y ONERN (1987).

6.3.2. Condiciones climáticas (precipitación y temperatura) de las zonas de vida bajo Escenario SSP2-4.5 (2041–2060)

Se evidencian incrementos de temperatura: oscilan entre +1.55 °C y +1.70 °C para la temperatura máxima y entre +1.70 °C y +1.73 °C para la mínima. Cambios en Precipitación: Aumentos de entre +4 y +7 por ciento, según la zona de vida. Tendencia General: Mayor disponibilidad hídrica (especialmente en zonas húmedas), pero también incremento de la evapotranspiración y el riesgo de plagas. En zonas secas, el beneficio del alza pluviométrica puede verse limitado por el aumento de la temperatura.

Tabla 11. Cambio en condiciones climáticas futuras (precipitación, temperatura) bajo Escenario SSP2-4.5 (2041–2060) en las zonas de vida en la subcuenca del río Huayllabamba.

Zona de Vida	Cambio Precip (%).	Cambio T. Máx (°C)	Cambio T. Mín (°C)	Principales Impactos
Bosque húmedo Montano Bajo Tropical	+5.11% a +7.11% (media 6.16%)	~1.60	~1.71	- Mayor humedad y productividad, pero más evapotranspiración. - Proliferación de plagas y enfermedades. - Desplazamiento altitudinal de especies sensibles al calor.
Bosque húmedo Premontano Tropical	+4.59% a +6.92% (media 5.57%)	~1.63	~1.72	- Posible beneficio en productividad si las lluvias coinciden con la demanda hídrica. - Favorece expansión de especies más termófilas. - Mayor riesgo de enfermedades.
Bosque muy húmedo Montano Bajo Tropical	+4.59% a +7.11% (media 6.06%)	~1.60	~1.71	- Aumento de saturación de suelos y deslaves. - Incremento en la descomposición y actividad microbiana. - Mayor proliferación de hongos y enfermedades.

Zona de Vida	Cambio Precip (%).	Cambio T. Máx (°C)	Cambio T. Mín (°C)	Principales Impactos
Bosque muy húmedo Montano Tropical	+6.64% a +7.24% (media 6.81%)	~1.55	~1.70	- La mayor alza de precipitación (>6%). - Riesgo de deslizamientos y erosión. - Fuerte desarrollo de epífitas, musgos y plagas fúngicas.
Bosque muy seco Tropical	+4.44% a +5.19% (media 4.88%)	~1.69	~1.73	- Ligeramente más lluvias, pero el calor (+1.7 °C) puede aumentar la evaporación. - Riesgo de incendios si las lluvias se concentran en periodos cortos.
Bosque pluvial Montano Tropical	+5.58% a +7.24% (media 6.48%)	~1.57	~1.70	- Alta pluviosidad reforzada, propensa a deslizamientos. - Incremento de epífitas y musgos. - Cambios en la fenología (floración, fructificación).
Bosque seco Montano Bajo Tropical	+6.10% a +6.82%	~1.58	~1.70	- Aumento notable de lluvia (+6.5%) que reduce la aridez.

Zona de Vida	Cambio Precip (%).	Cambio T. Máx (°C)	Cambio T. Mín (°C)	Principales Impactos
	(media 6.56%)			- Posible transición hacia formaciones más húmedas. - Evapotranspiración elevada en estaciones secas.
Bosque seco Premontano Tropical	+4.49% a +6.25% (media 5.16%)	~1.66	~1.72	- Puede alivianar el déficit hídrico estacional, pero la subida térmica incrementa la evaporación. - Cambios en la estructura del bosque, favoreciendo especies más cálidas.

Nota. Elaboración propia con base en datos de proyección climática de WorldClim v2.1 (Fick & Hijmans, 2017) y modelos CMIP6 (IPCC, 2021).

Las proyecciones climáticas bajo el escenario SSP2-4.5 muestran que todas las zonas de vida presentes en la subcuenca del río Huayllabamba experimentarán incrementos consistentes tanto en precipitación como en temperatura, aunque con magnitudes variables según la gradiente altitudinal y el tipo de formación vegetal. Las temperaturas máximas se incrementarían entre +1.55 °C y +1.70 °C, mientras que las mínimas aumentarían entre +1.70 °C y +1.73 °C, evidenciando un calentamiento más marcado durante la noche, patrón que coincide con lo reportado en estudios recientes sobre el comportamiento térmico futuro en ecosistemas tropicales montanos (IPCC, 2021; Pabón-Caicedo et al., 2023). De forma paralela, la precipitación muestra aumentos entre +4 y +7 por ciento, lo que sugiere una mayor disponibilidad hídrica anual, especialmente en las zonas húmedas y muy húmedas, aunque su efecto positivo podría verse moderado

por el incremento de la evapotranspiración en respuesta al calentamiento atmosférico (Avila-Diaz et al., 2025).

En las zonas de bosque húmedo premontano y montano bajo, el incremento de humedad puede traducirse en una mayor productividad primaria y un fortalecimiento de la biomasa aérea, siempre que la distribución temporal de las lluvias coincida con las necesidades hídricas de los sistemas agrícolas y forestales. No obstante, el aumento térmico favorece la expansión de especies termófilas y la proliferación de plagas, un fenómeno ampliamente documentado en ecosistemas tropicales afectados por el cambio climático (Matta & Malcon, 2023). En formaciones muy húmedas como el bosque pluvial montano tropical, los escenarios de incremento superior al 6 por ciento de precipitación incrementan la saturación de suelos, elevando el riesgo de deslizamientos y procesos erosivos, especialmente en pendientes pronunciadas. Este comportamiento es coherente con evidencias de mayor inestabilidad geomorfológica en áreas montañosas bajo condiciones de mayor humedad y calentamiento sostenido (Correa et al., 2016).

En contraste, las zonas de vida más secas, como el bosque muy seco tropical y el bosque seco montano bajo, muestran incrementos menores de precipitación (entre +4.4 y +5.2 por ciento), los cuales podrían atenuar parcialmente el déficit hídrico estacional. Sin embargo, el aumento de temperatura cercano a 1.7 °C incrementaría la evaporación, reduciendo la eficiencia del incremento pluviométrico y manteniendo condiciones de estrés hídrico significativo. Estudios recientes indican que en zonas semiáridas incluso pequeños aumentos de temperatura pueden amplificar el riesgo de incendios y afectar la regeneración natural, especialmente si las lluvias se concentran en eventos breves o irregulares (Stoner & Sanchez, 2009).

Finalmente, los cambios proyectados en todas las zonas de vida sugieren un proceso de reorganización ecológica gradual, caracterizado por desplazamientos altitudinales de especies sensibles al calor, mayor presencia de organismos asociados a humedad elevada (epífitas, hongos, musgos) y modificaciones en la fenología de plantas y cultivos. Estas transformaciones, ampliamente documentadas en ecosistemas de montaña frente al cambio climático, pueden alterar los patrones de productividad agrícola, la disponibilidad de agua y los servicios ecosistémicos esenciales (Cooperación Suiza, 2023). En conjunto, las tendencias observadas para 2041–2060 indican que el escenario SSP2-4.5, aunque moderado, generará impactos significativos que requieren estrategias de adaptación diferenciadas para cada zona de vida.

Impactos de los cambios (Escenario SSP2-4.5):

1. Calentamiento moderado ($\approx 1.6^{\circ}\text{C}$): con posibles variaciones según piso ecológico, pero suficiente para alterar la distribución altitudinal de especies y favorecer la expansión de plagas.
2. Aumento de precipitación generalizado: (+4 a +7 por ciento), especialmente en bosques muy húmedos. Esto puede mejorar la disponibilidad hídrica y la productividad, pero también conlleva riesgos de erosión, deslizamientos y mayor incidencia de hongos o insectos.
3. Cambios en la composición de especies que migrarían en respuesta a nuevas condiciones térmicas y pluviométricas.

6.3.3. Condiciones climáticas (precipitación y temperatura) de las zonas de vida bajo escenario SSP5-8.5 (2041–2060)

Incrementos de temperatura: alrededor de $+2,0^{\circ}\text{C}$ hasta $+2,1^{\circ}\text{C}$ (en algunos casos, $+2,5^{\circ}\text{C}$).

Cambios en Precipitación: Oscilan entre +1 y +5 por ciento en la mayoría de las zonas de vida, pudiendo llegar a +5 por ciento o más en áreas muy húmedas.

Tendencia General: Calentamiento más intenso, con riesgos mayores de evapotranspiración, estrés hídrico e incendios en zonas secas. En bosques húmedos, la mayor precipitación puede derivar en saturación de suelos, deslizamientos y proliferación de patógenos.

Tabla 12. Cambio en condiciones climáticas futuras (precipitación temperatura) bajo Escenario SSP5-8.5 (2041–2060) en las zonas de vida en la subcuenca del río Huayllabamba.

Zona de Vida	Cambio Precip.	Cambio T. Máx (°C)	Cambio T. Mín (°C)	Principales Impactos
Bosque húmedo Montano Bajo Tropical	+2.60% a +5.09% (media 3.96%)	~2.02	~2.10	- Mayor disponibilidad hídrica relativa, pero evapotranspiración más alta. - Posible alteración en fenología (floración, fructificación). - Favorece la expansión de plagas. - Ligero aumento de precipitación (~3%).
Bosque húmedo Premontano Tropical	+1.19% a +5.00% (media 2.97%)	~2.04	~2.10	- Subida térmica ~2 °C que intensifica la demanda de agua. - Migración altitudinal de especies termófilas.
Bosque muy húmedo Montano Bajo Tropical	+1.19% a +4.82% (media 3.60%)	~2.01	~2.09	- Ya con alta humedad, el alza térmica promueve plagas y descomposición acelerada. - Riesgo de saturación de suelos en pendientes.
Bosque muy húmedo Montano Tropical	+4.27% a +5.08% (media 4.64%)	~1.98	~2.07	- Mayor precipitación, reforzando la niebla y la humedad extrema. - Altas probabilidades de deslizamientos y erosión. - Expansión de epífitas y hongos.

Zona de Vida	Cambio Precip.	Cambio T. Máx (°C)	Cambio T. Mín (°C)	Principales Impactos
Bosque muy seco Tropical	+1.61% a +2.68% (media 2.08%)	~2.09	~2.11	- Aumento poco significativo de lluvia en comparación con la subida térmica. - Mayor estrés hídrico y probabilidad de incendios en la estación seca.
Bosque pluvial Montano Tropical	+2.69% a +5.13% (media 4.17%)	~1.99	~2.08	- Aun más humedad en una zona ya muy lluviosa. - Favorecimiento de epífitas, musgos y riesgos de deslaves. - Alteraciones en la dinámica de niebla y polinizadores.
Bosque seco Montano Bajo Tropical	+4.36% a +5.25% (media 4.77%)	~1.98	~2.10	- Incremento de precipitación cercano al 5%. - Temperaturas más altas (~2 °C) que podrían compensar parcialmente el beneficio hídrico. - Posible transición a formaciones más húmedas.
Bosque seco Premontano Tropical	+1.61% a +3.75% (media 2.49%)	~2.07	~2.10	- Alza térmica significativa (~2 °C), con demanda mayor de agua. - Pequeña ganancia en precipitación no siempre suficiente para contrarrestar la evaporación.

Nota. Elaboración propia a partir de las simulaciones del modelo climático CMIP6 bajo el escenario SSP5-8.5 (2041–2060) y del análisis de las zonas de vida de Holdridge (1967) en la subcuenca del río Huayllabamba, procesadas mediante modelación climática y SIG (2025).

Bajo el escenario SSP5-8.5 se proyecta un calentamiento más intenso en la subcuenca, con incrementos térmicos cercanos a +2.0–2.1 °C y máximos puntuales de hasta +2.5 °C. Estas variaciones son coherentes con la amplificación del calentamiento observada en ecosistemas montanos tropicales, donde las temperaturas nocturnas aumentan con mayor rapidez, modificando la fenología vegetal y acelerando procesos metabólicos (Pepin et al., 2022; IPCC, 2021). Aunque las precipitaciones también muestran incrementos entre +1 y +5 por ciento, este beneficio hídrico se ve parcialmente compensado por una mayor demanda evaporativa, un patrón ya documentado para regiones tropicales en escenarios de altas emisiones (Avila-Diaz et al., 2025).

En las zonas húmedas y muy húmedas, el aumento moderado de la precipitación, sumado al alza térmica, podría intensificar la saturación de suelos y la inestabilidad de laderas, elevando la probabilidad de deslizamientos, erosión y proliferación de hongos y epífitas. Estos impactos son consistentes con estudios que muestran que el aumento de la humedad en combinación con temperaturas elevadas incrementa la descomposición de la materia orgánica y favorece la expansión de patógenos en ecosistemas montanos (Matta & Malcon, 2023). Además, una mayor humedad atmosférica puede alterar la dinámica de nieblas orográficas, afectando procesos clave como la interceptación hídrica y la polinización (Ávila et al., 2025).

En contraste, las zonas de vida más secas muestran incrementos pluviométricos modestos (1.6–3.7 por ciento), insuficientes frente al marcado aumento de temperatura cercano a 2 °C, lo que intensifica el estrés hídrico, eleva la probabilidad de incendios forestales y reduce la regeneración natural. La literatura reciente sostiene que, en ambientes semiáridos, incrementos mínimos de lluvia no compensan las pérdidas por evaporación bajo condiciones de calentamiento acelerado (Cuentas, 2024). En conjunto, el escenario SSP5-8.5 configura un futuro climático más exigente, impulsando transformaciones ecológicas aceleradas y demandando estrategias de adaptación diferenciadas para cada zona de vida.

Impactos de los cambios (Escenario SSP2-4.5):

1. Calentamiento más intenso (≥ 2 °C) que en SSP2-4.5, incrementando procesos de evapotranspiración y estrés térmico.

2. Precipitación en alza, pero en menor proporción respecto al escenario anterior en algunas zonas secas; ello podría intensificar la aridez estacional. En bosques muy húmedos, la mayor lluvia puede agravar problemas de deslaves y saturación.
3. Riesgo de desequilibrios ecológicos debido a la expansión de especies termófilas, la proliferación de plagas, la alteración fenológica y posibles incendios (sobre todo en bosques secos).

VII. CONCLUSIONES

7.1. Sobre el balance hídrico y producción de agua

Los resultados hidrológicos proyectados bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 evidencian modificaciones significativas en el balance hídrico de la subcuenca del río Huayllabamba. Aunque ambos escenarios muestran un incremento en la precipitación, este se encuentra acompañado de un aumento simultáneo en la evapotranspiración potencial y real, lo que reduce la eficiencia del uso del agua y amplifica la demanda atmosférica. Esta combinación de mayor lluvia y mayor evaporación constituye una condición típica de cuencas altoandinas expuestas a escenarios de calentamiento climático.

El almacenamiento de agua en el suelo presenta una mejora leve; sin embargo, el comportamiento de los flujos subterráneos refleja una dinámica contrastante. En SSP2-4.5 se observa una reducción marcada del flujo base, afectando especialmente el abastecimiento hídrico durante la estación seca. En cambio, en SSP5-8.5 se proyecta una recuperación moderada de la recarga subterránea, posiblemente asociada a eventos de lluvia más intensos, aunque menos constantes. La intensificación de la escorrentía superficial y el aumento en la producción de sedimentos bajo ambos escenarios evidencian procesos erosivos que comprometen tanto la estabilidad física de los suelos como la calidad del agua.

En conjunto, estos cambios implican un riesgo significativo para la producción sostenible de agua, especialmente durante los periodos de estiaje. Los resultados destacan la urgencia de impulsar estrategias de adaptación hídrica que aborden simultáneamente la conservación del suelo, el fortalecimiento de la infiltración y la gestión eficiente de la demanda de agua en contextos de variabilidad climática creciente.

7.2. Sobre las zonas de vida

Las proyecciones climáticas muestran incrementos térmicos consistentes entre +1.5 °C y +1.7 °C bajo SSP2-4.5, y hasta +2.5 °C en SSP5-8.5. Estos cambios generan condiciones favorables para el desplazamiento altitudinal de especies, incrementan la evapotranspiración y potencian la proliferación de plagas y enfermedades en todos los ecosistemas evaluados.

Las variaciones de precipitación, con incrementos entre 4 y 7 por ciento en SSP2-4.5 y entre 1 y 5 por ciento en SSP5-8.5, presentan efectos contrastantes según la zona de vida. En zonas húmedas y muy húmedas, la mayor lluvia puede derivar en saturación de suelos, deslizamientos, erosión acelerada y mayor presencia de patógenos. En zonas secas, en cambio, el incremento proyectado puede ser insuficiente para compensar el aumento de la temperatura, intensificando el estrés hídrico y las probabilidades de incendios forestales.

Estas condiciones climáticas proyectadas se traducen en transformaciones ecosistémicas significativas, incluyendo cambios en la estructura y composición de los bosques, migración altitudinal de flora y fauna, y mayor frecuencia de eventos extremos como sequías, incendios y deslizamientos. Esto demanda planes de adaptación diferenciados para cada zona de vida, considerando su vulnerabilidad particular.

VIII. RECOMENDACIONES

8.1. Para la gestión del balance hídrico

Fortalecer estrategias integradas de adaptación hídrica, implementando prácticas de manejo del suelo orientadas a reducir la escorrentía y aumentar la infiltración, tales como reforestación con especies nativas, zanjas de infiltración, terrazas de absorción, barreras vivas y manejo de cobertura vegetal. Estas medidas deberían ser promovidas y articuladas con entidades competentes como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Ministerio del Ambiente (MINAM), Gobierno Regional de Cajamarca, Proyecto Especial Jaén, San Ignacio y Bagua y el Programa Nacional de Siembra y Cosecha de Agua, dado su rol estratégico en la gestión integrada de cuencas, la conservación de ecosistemas y la implementación de acciones de adaptación frente al cambio climático en territorios rurales y andinos.

Promover la cosecha y almacenamiento de agua a través del Gobierno Regional de Cajamarca mediante la construcción de microreservorios, sistemas de captación de agua de lluvia y estructuras de retención que permitirá enfrentar la creciente irregularidad estacional del caudal.

El Ministerio del Ambiente a través del Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático- PROBOSQUES, deberá proteger las zonas de recarga hídrica en áreas donde se proyecta una reducción del flujo base; la conservación de suelos permeables y de coberturas forestales densas para sostener el abastecimiento de agua durante la época seca.

Implementar, a través del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú- SENAMHI, estaciones meteorológicas e hidrológicas locales, así como sistemas de alerta temprana, que permitan fortalecer la capacidad de monitoreo climático e hídrico en el territorio. Esta medida contribuirá a una gestión adaptativa más precisa y oportuna, sustentada en datos meteorológicos, facilitando la toma de decisiones informadas para la prevención de riesgos asociados a eventos extremos. Asimismo, se promoverá la participación activa de las comunidades locales en los procesos de vigilancia y respuesta, garantizando un enfoque integral y sostenible de adaptación frente al cambio climático.

El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego deberá fomentar tecnologías como el riego por goteo, sistemas presurizados y la adopción de cultivos más resistentes a la sequía, lo cual reducirá presiones sobre el recurso hídrico.

8.2. Para la gestión de las zonas de vida

Las Municipalidades distritales de Chontalí, Pomahuaca y Colasay deberán priorizar la vigilancia en zonas con alta pendiente para prevenir deslizamientos, y fortalecer estrategias contra incendios forestales en zonas secas altamente vulnerables.

El Gobierno Regional de Cajamarca en coordinación con las Municipalidades de Chontalí, Pomahuaca y Colasay deberán mantener y recuperar los bosques nativos para regular el ciclo hidrológico, reducir la erosión y proteger la biodiversidad frente a cambios climáticos acelerados.

Incorporar la variabilidad climática proyectada en la planificación territorial del Gobierno Regional de Cajamarca, Municipalidad Provincial de Jaén y Municipalidad distrital de Chontalí, promoviendo prácticas como agroforestería, reconversión productiva y el uso de cultivos menos vulnerables a estrés térmico o hídrico.

Incentivar la generación de datos climáticos a través del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú- SENAMHI, así como la participación de comunidades locales de los distritos de Chontalí, Pomahuaca y Colasay en el monitoreo, lo que permitirá una adaptación más efectiva y socialmente legitimada.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaszadeh, M., Bazrafshan, O., Mahdavi, R., Sardooi, E. R., & Jamshidi, S. (2023). Modeling Future Hydrological Characteristics Based on Land Use/Land Cover and Climate Changes Using the SWAT Model. *Water Resources Management*, 37(10), 4177-4194. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03545-6>
- Abdallah, A., Al-MISTAREHI, B., & Shtayat, A. (2024). Evaluation of the Applications of using Global free Digital Elevation Models and GNSS-RTK data for Agricultural purposes in Egypt using Machine Learning. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 0(0), 0-0. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2024.326709.1374>
- Almeida-Ñauñay, Andrés. F., Sanz, E., María Tarquis, A., José Martín-Sotoca, J., & Zubelzu, S. (2024). *Hydrological parameters modelling in catchments based on a geographical database*. 8407. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-8407>
- ANA. (2009, mayo 15). *Autoridad Nacional del Agua (ANA)*. <https://www.geoidep.gob.pe/autoridad-nacional-del-agua-ana>
- Arias, P., Rendón, M., Martinez, A., & Allan, R. (2023). Changes in atmospheric moisture transport over tropical South America: An analysis under a climate change scenario. *Climate Dynamics*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06833-4>
- Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563-572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- Avila, A., Rodrigues Torres, R., Quesada, B., Oliveira, L., Uribe, A., Arias, P., da Costa Ruv Lemes, M., Zuluaga Aristizábal, C., & Cerón, W. L. (2025b). Projections of Atmospheric Moisture Transport Over South America in a Changing Climate. *International Journal of Climatology*, 1-17. <https://doi.org/10.1002/joc.70207>
- Avila-Diaz, A., Rodrigues Torres, R., Quesada, B., Oliveira, L., Uribe, A., Arias, P., da Costa Ruv Lemes, M., Zuluaga Aristizábal, C., & Cerón, W. L. (2025a). Projections of Atmospheric Moisture Transport Over South America in a Changing Climate. *International Journal of Climatology*, 1-17. <https://doi.org/10.1002/joc.70207>
- Aybar Camacho, C. L., & Lavado-Casimiro, W. (2017). Atlas de zonas de vida del Perú: Guía explicativa. Nota Técnica N° 003 SENAMH-DHI-2017. *Repositorio Institucional - SENAMHI*. <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/259>
- Bao, Y., Song, Z., & Qiao, F. (2020). FIO-ESM Version 2.0: Model Description and Evaluation. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 125(6), e2019JC016036. <https://doi.org/10.1029/2019JC016036>
- Bateman, A. (2007). *HIDROLOGIA BASICA Y APLICADA*.
- Brack Egg, A. (1986). *Enciclopedia «ECOLOGÍA DEL PERÚ»*. <https://www.peruecologico.com.pe/libro.htm>
- Bravo Alarcón, F. (2022). El proceso político de las iniciativas legislativas climáticas en el Perú: La tortuosa travesía de la Ley Marco sobre Cambio Climático (2008-2018). *Revista*

- Kawsaypacha: sociedad y medio ambiente*, 9, 11-33.
<https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202201.001>
- Bravo, P. G. S. (2020). *Amenazas de cambio climático, métricas de mitigación y adaptación en ciudades de América Latina y el Caribe*.
- Cabrera. (2015). *Modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Civil*. <https://docplayer.es/39368091-Modelos-hidrologicos-juan-cabrera-civ-eng-universidad-nacional-de-ingenieria-facultad-de-ingenieria-civil.html>
- Callañaupa, S. (2019, abril 23). *¿Qué es la evapotranspiración?*
<https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/74075-que-es-la-evapotranspiracion-por-la-ing-stephany-callanaupa>
- Cap02.pdf*. (s. f.). Recuperado 24 de octubre de 2023, de
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1140/cap02.pdf
- Castro Maldonado, J. J., Gómez Macho, L. K., & Camargo Casallas, E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75), 140-174.
<https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- CEPAL. (2021). *Perspectivas globales y regionales sobre la integración de la información estadística y geoespacial*. <https://repositorio.cepal.org/items/8c7bfbe9-af8c-4af5-95ff-c16a95b344c2>
- Chan, W.-P., Lenoir, J., Mai, G.-S., Kuo, H.-C., Chen, I.-C., & Shen, S.-F. (2024). Climate velocities and species tracking in global mountain regions. *Nature*, 629(8010), 114-120.
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07264-9>
- Climate Central Group. (2021). *2021 in Review: Global Temperature Rankings | Climate Central*. Climate Central.org. <https://www.climatecentral.org/climate-matters/2021-review-global-temps>
- CMCC. (2019). CMCC-ESM - Earth System Model. CMCC. <https://www.cmcc.it/models/cmcc-esm-earth-system-model>
- CMNUCC. (1992). *CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>.
<https://unfccc.int/gcse?q=QUE%20ES%20EL%20CAMBIO%20CLIMATICO>
- Concha Niño de Guzmán, R. F., Úbeda Palenque, J., Gómez Cahuaya, E. W., Granados Alegre, H., Iparraguirre Ayala, J. E. A., Vásquez Choque, E. P., & Braucher, R. (2024). Geomorfología y evolución glaciar en el centro del Perú: Vinculaciones entre las cordilleras Pariaqaqa (Lima) y Huaytapallana (Junín) - [Boletín P 2]. En *Repositorio Institucional INGEMMET*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/5088>
- Cooperación Suiza. (2023). *Las cuencas altoandinas enfrentan el cambio climático: Resultados de siete estudios de caso sobre vulnerabilidad – Cooperación Suiza en Perú*. Cooperación

- Suiza en el Perú. <https://www.cooperacionsuiza.pe/las-cuencas-altoandinas-enfrentan-el-cambio-climatico-resultados-de-siete-estudios-de-caso-sobre-vulnerabilidad/>
- Copernicus. (2021). *Las últimas proyecciones del clima futuro ya están disponibles* | Copernicus. <https://climate.copernicus.eu/latest-projections-future-climate-now-available>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., & Norton, L. D. (2016a). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *CATENA*, 147, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., & Norton, L. D. (2016b). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *CATENA*, 147, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>
- CSIRO. (2025). Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS). <https://research.csiro.au/access/about/what/>
- Cuentas, A. (2024). Cambio climático y biodiversidad en los bosques secos del noroccidente peruano. En Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, *Colapso climático en la región andina. Dimensiones ecosistémicas, socioeconómicas y sociopolíticas* (1.^a ed., pp. 79-117). spue. <https://doi.org/10.17163/abyaups.95.732>
- Dilas-Jiménez, J. O., Mugruza-Vassallo, C. A., & Peña, J. L. M. (2023). Composición, diversidad y estructura arbórea en un bosque de neblina sobre 2 100 msnm en el Perú. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 11(1), Article 1.
- Drenkhan, F., Huggel, C., Hoyos, N., & Scott, C. (2023). Hydrology, water resources availability and management in the Andes under climate change and human impacts. *Journal of Hydrology Regional Studies*, 49, 101519. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101519>
- EC Earth. (2022). *EC-Tierra3 – EC-Tierra*. <https://ec-earth.org/ec-earth/ec-earth3/>
- Eekhout, J. P. C., & de Vente, J. (2022). Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. *Earth-Science Reviews*, 226, 103921. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103921>
- Espinoza, J., Chavez, S., Ronchail, J., Junquas, C., Takahashi, K., & Lavado, W. (2015). Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation: Rainfall hotspots over the southern tropical Andes. *Water Resources Research*, 51. <https://doi.org/10.1002/2014WR016273>
- FAO. (2020). *FAO SOILS PORTAL* | Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/soils-portal/en/>
- FAO. (2022). *Herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT)* | Tierra y Agua | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura | Tierra y Agua | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1111246/>
- FAO. (2023). *Gestión de Cuencas Hidrográficas*. <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules-alternative/watershed-management/basic-knowledge/es/>

- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Forest Trends. (2022, enero 1). *Guía de modelación hidrológica Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica para la infraestructura natural*. Guía de modelación hidrológica Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica para la infraestructura natural. <https://www.forest-trends.org/>
- Garay Valdivia, M. F., & Huanca Diaz, L. C. (2022). *Aplicación de modelación hidrológica para analizar sequías en escenario de cambio climático, en la Subcuenca del Río Chili Arequipa 2020-2050*. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/7275>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). <https://doi.org/10.35537/10915/27877>
- GFDL. (2019). *News & Events – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*. <https://www.gfdl.noaa.gov/news-events/>
- Gonzales, J., Rumeo, B., Arrollo, J., & Bueno, R. (2021). *Limited potential for bird migration to disperse plants to cooler latitudes* | *Nature*. <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03665-2>
- GORECAJ. (2011). *ZONIFICACION ECOLOGICA Y ECONOMICA*.
- Guo, Q., Planer-Friedrich, B., & Yan, K. (2021). Tungstate thiolation promoting the formation of high-tungsten geothermal waters and its environmental implications. *Journal of Hydrology*, 603, 127016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127016>
- Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., von Storch, J.-S., Brüggemann, N., Haak, H., & Stössel, A. (2019). Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3241-3281. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>
- Holdridge, L., Agrícolas (IICA), I. I. de C., & Jiménez Saa, H. (1978). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). <https://hdl.handle.net/11324/7936>
- Hong, C., Zhong, R., Xu, M., He, P., Mo, H., Qin, Y., Shi, D., Chen, X., He, K., & Zhang, Q. (2025). Interactions Among Food Systems, Climate Change, and Air Pollution: A Review. *Engineering*, 44, 215-233. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.12.021>
- iAgua, redaccion. (2021, diciembre 23). *¿En qué consiste la precipitación atmosférica?* [Text]. iAgua; iAgua. <https://www.iagua.es/respuestas/que-consiste-precipitacion-atmosferica>
- Instituto Metereológico Mundial. (2010, agosto 16). *Escenarios de cambio climático*. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/cambio-climatico/escenarios-de-cambio-climatico/>
- IPCC. (2018). https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/es/annexsanexo-1.html
- IPSL. (2018). *IPSL-CM6A-LR – Mi CMS*. <https://cmc.ipsl.fr/ipsl-climate-models/ipsl-cm6/>

- Jasechko, Perrone, & Fang. (2024). (PDF) *Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally*. https://www.researchgate.net/publication/377663334_Rapid_groundwater_decline_and_some_cases_of_recovery_in_aquifers_globally
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R., Fallatah, O., & Kirchner, J. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, 625, 715-721. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>
- Jose, J., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Roustan, Y., & Schertzer, D. (2022). Scale invariant relationship between rainfall kinetic energy and intensity in Paris region: An evaluation using universal multifractal framework. *Journal of Hydrology*, 609, 127715. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127715>
- Lalonde Morgan, & Drenkhan, F. (2025). (PDF) Scientific evidence of the hydrological impacts of nature-based solutions at the catchment scale. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1002/wat2.1744>
- Larrinaga Cunningham, H. (2013, noviembre 4). *Balance hidrico*. <https://www.slideshare.net/cindysimo/balance-hidrico-27914339>
- León Ochoa, R. F. (2017). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2877>
- Lozano Pavis, A., Alvarez Montalván, C., & Moggiano, N. (2021). Climate change in the Andes and its impact on agriculture: A systematic review. *Scientia Agropecuaria*, 12, 101-108. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.012>
- Lozano-Pavis, A., Alvarez-Montalván, C. E., Moggiano, N., Lozano-Pavis, A., Alvarez-Montalván, C. E., & Moggiano, N. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: Una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101-108. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.012>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., & Zhou, B. (Eds.). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Matta & Malcon. (2023). (PDF) *Impacts of anthropogenic climate change on tropical montane forests: An appraisal of the evidence*. Orly. https://www.researchgate.net/publication/369330416_Impacts_of_anthropogenic_climate_change_on_tropical_montane_forests_an_appraisal_of_the_evidence
- Mengistu, A. G., Woldesenbet, T. A., Dile, Y. T., & Bayabil, H. K. (2023). Modeling the impacts of climate change on hydrological processes in the Baro–Akobo River basin, Ethiopia. *Acta Geophysica*, 71, 1915-1935. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00956-8>

- MINAM. (2019). *Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú* | SINIA. Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>
- MINAM. (2021). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Perú: Un insumo para la actualización de la Estrategia Nacional ante el Cambio Climático* | SINIA. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/plan-nacional-adaptacion-cambio-climatico-peru-un-insumo>
- Moriasi, G., & Pai. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Na, W., Grgas-Svirac, A. V., & Najafi, M. R. (2026). Intensifying hydroclimatic swings under a warming climate: Disentangling anthropogenic climate change and internal variability in North America. *Global and Planetary Change*, 256, 105171. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2025.105171>
- Nieves, V. A. (2025). Analysis of Climate Change Impacts on Andean Forests Using Potential Distribution Models (2010-2069). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 51(1), 89-104. <https://doi.org/10.18172/cig.6341>
- Ochoa, Cuadros Adriazola Jose, Edwin Arapa Guzman, Natalia Aste Cannock, Eric Ochoa Tocachi, & Vivien Bonnesoeur. (2022, enero 1). *Guia de modelación hidrológica para la infraestructura natural*. <https://www.forest-trends.org/>
- O'Neill, O. (2024). Modeling the impacts of climate change on hydrological processes in the Baro–Akobo River basin, Ethiopia | Request PDF. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00956-8>
- ONU. (2022). *Biodiversidad: Nuestra defensa natural más fuerte contra el cambio climático* | Naciones Unidas. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/biodiversity>
- Paiva, K., Rau, P., Montesinos, C., Lavado-Casimiro, W., Bourrel, L., & Frappart, F. (2023). Hydrological Response Assessment of Land Cover Change in a Peruvian Amazonian Basin Impacted by Deforestation Using the SWAT Model. *Remote Sensing*, 15(24), 5774. <https://doi.org/10.3390/rs15245774>
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., ... Mountain Research Initiative EDW Working Group. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424-430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M. M. B., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., & Rama, B. (Eds.). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

- Ramírez Contreras, A. O. (2020). *Modelación hidrológica y de cambio climático para simular la producción de agua, los niveles de erosión y producción de sedimentos, con diferentes coberturas de suelo en la subcuenca aguná, escuintla, Guatemala*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10340>
- Reyes-Palomino, S. E., Cano Ccoa, D. M., Reyes-Palomino, S. E., & Cano Ccoa, D. M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(1), 53-64. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Ridley, J., Menary, M., Kuhlbrodt, T., Andrews, M., & Andrews, T. (2018). *MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 CMIP* (Versión 20230213) [Application/x-netcdf]. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.419>
- Rosas, M. A., Viveen, W., & Vanacker, V. (2023). Spatial variation in specific sediment yield along the Peruvian western Andes. *CATENA*, 220, 106699. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106699>
- SENAMHI. (2017). *Zonas de vida del Perú*. <https://idesep.senamhi.gob.pe/geovisoridesep/go?accion=05.06.001.03.001.521.0000.00.00>
- SENAMHI. (2021). *Catalogo de Metadatos Cartográficos—SENAMHI*. <https://idesep.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/search?resultType=details&sortBy=relevance&any=2050&from=1&to=20>
- Serpa, D., Nunes, J. P., Santos, J., Sampaio, E., Jacinto, R., Veiga, S., Lima, J. C., Moreira, M., Corte-Real, J., Keizer, J. J., & Abrantes, N. (2015). Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Science of The Total Environment*, 538, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.033>
- Servicio Geológico de EE.UU. (2019, octubre 12). *El Ciclo del Agua*. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish>
- Shiogama, H., Tatebe, H., Hayashi, M., Abe, M., Arai, M., Koyama, H., Imada, Y., Kosaka, Y., Ogura, T., & Watanabe, M. (2023). MIROC6 Large Ensemble (MIROC6-LE): Experimental design and initial analyses. *Earth System Dynamics*, 14(6), 1107-1124. <https://doi.org/10.5194/esd-14-1107-2023>
- Stoner, K., & Sanchez, G. (2009). Ecology and regeneration of tropical dry forests in the Americas: Implications for management. *Forest Ecology and Management*, 258, 903-906. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.019>

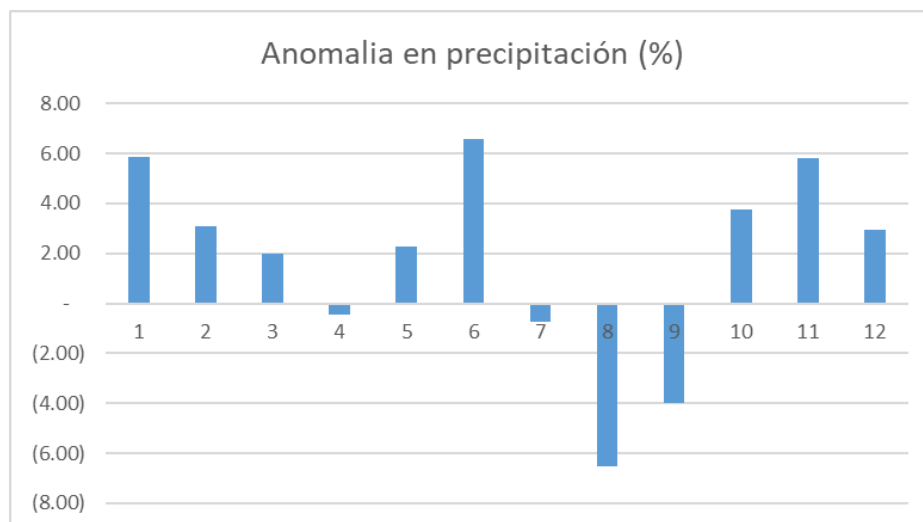
- Su, Q., Dai, C., Zhang, Z., Zhang, S., Li, R., & Qi, P. (2023). Runoff Simulation and Climate Change Analysis in Hulan River Basin Based on SWAT Model. *Water (Switzerland)*, 15(15). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w15152845>
- SWAT. (2025). *Global Data | SWAT | Soil & Water Assessment Tool*. <https://swat.tamu.edu/data/>
- Taucare, M., Daniele, L., Viguié, B., Vallejos, A., & Arancibia, G. (2020). Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of The Total Environment*, 722, 137824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>
- UKESM. (2018, julio 25). *UKESM*. <https://ukesm.ac.uk/cmip6/>
- Valdivielso, A. (2020, septiembre 2). *¿Qué es la escorrentía?* [Text]. iAgua; iAgua. <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-escorrentia>
- Volodin, E., Mortikov, E., Gritsun, A., Lykossov, V., Galin, V., Diansky, N., Gusev, A., Kostykin, S., Iakovlev, N., Shestakova, A., & Emelina, S. (2019). *INM INM-CM5-0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP* [Dataset]. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.12322>
- Wongchuig, S., de Mello, C., Chou, S. C., Curi, N., & Darrell, N. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *CATENA*, 147, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.003>
- Wordclim. (2025). *Clima futuro, resolución espacial de 30 segundos—Documentación de WorldClim 1*. https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim30s.html
- Wu, T., Yu, R., Lu, Y., Jie, W., Fang, Y., Zhang, J., Zhang, L., Xin, X., Li, L., Wang, Z., Liu, Y., Zhang, F., Wu, F., Chu, M., Li, J., Li, W., Zhang, Y., Shi, X., Zhou, W., ... Hu, A. (2021). BCC-CSM2-HR: A high-resolution version of the Beijing Climate Center Climate System Model. *Geoscientific Model Development*, 14(5), 2977-3006. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2977-2021>
- Yang, X., Chen, Y., Qiu, H., Bento, V., Song, H., Shui, W., Zeng, J., & Wang, Q. (2025). *Enhancing Evapotranspiration Estimates Under Climate Change: The Role of CO₂ Physiological Feedback and CMIP6 Scenarios*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2560>
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yabu, S., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Obata, A., Adachi, Y., & Ishii, M. (2019). The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 97(5), 931-965. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>
- Zamora Martínez, M. C. (2015). Cambio climático. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(31), 04-07

ANEXOS

Anexo 1

Anomalías climáticas en precipitación y temperatura bajo el escenario SSP245 período
2041-2060

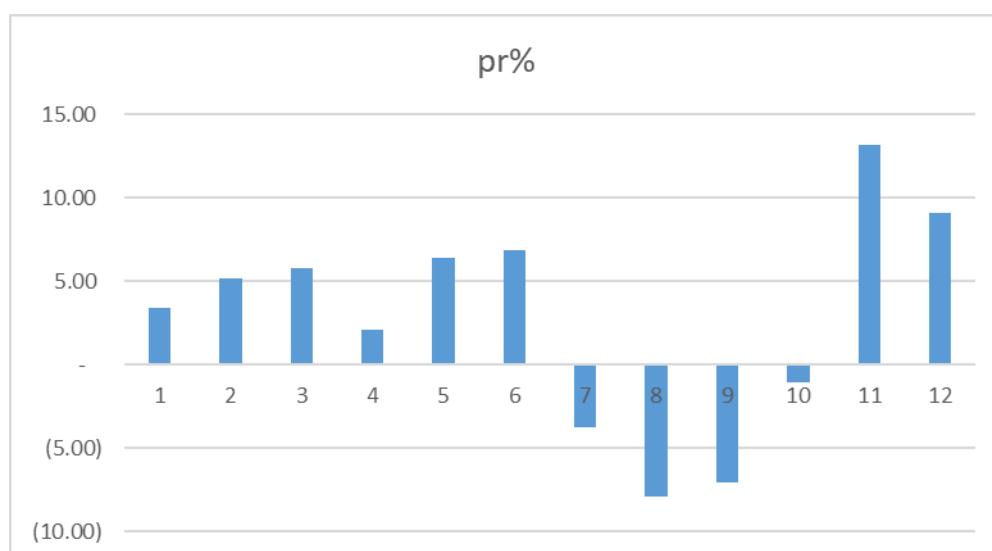
MES	pr%	tmx®	tmn®	tav®
1	5.85	1.61	1.71	1.66
2	3.06	1.67	1.72	1.69
3	1.99	1.66	1.68	1.67
4	(0.46)	1.76	1.77	1.77
5	2.29	1.78	1.95	1.87
6	6.56	1.78	2.07	1.92
7	(0.76)	1.79	1.99	1.89
8	(6.54)	1.98	1.94	1.96
9	(3.98)	1.95	1.91	1.93
10	3.75	1.68	1.90	1.79
11	5.82	1.44	1.85	1.65
12	2.96	1.61	1.69	1.65
Annual	1.71	1.73	1.85	1.79



Anexo 2

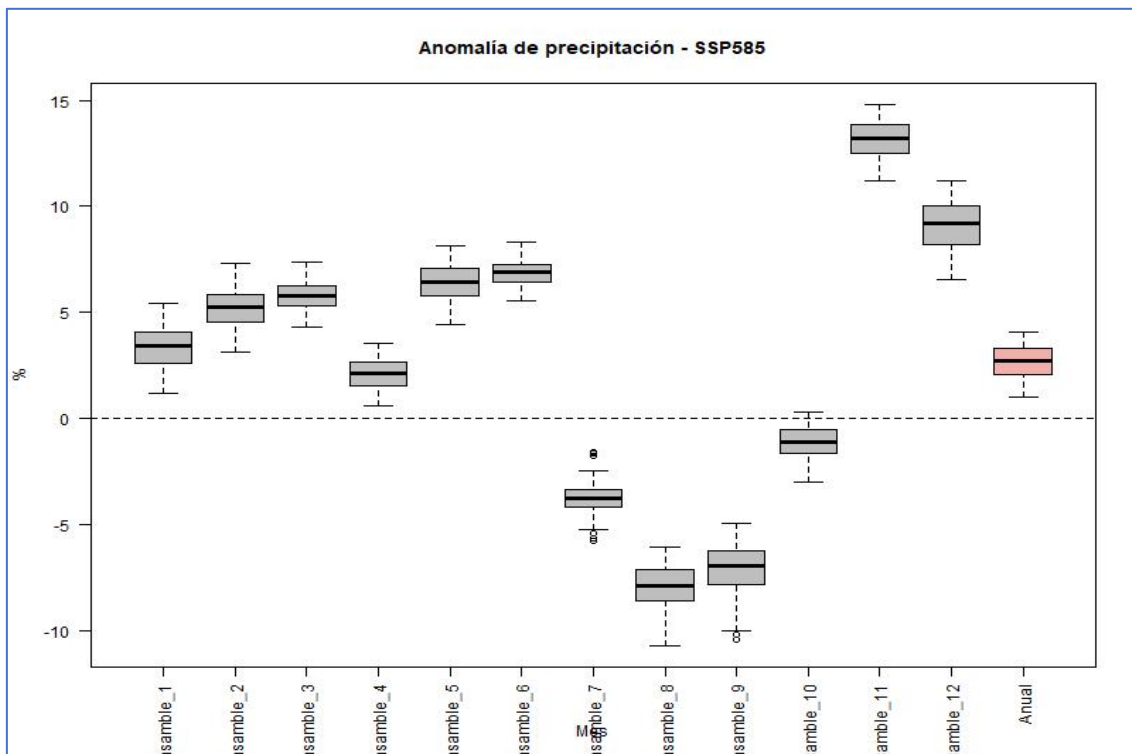
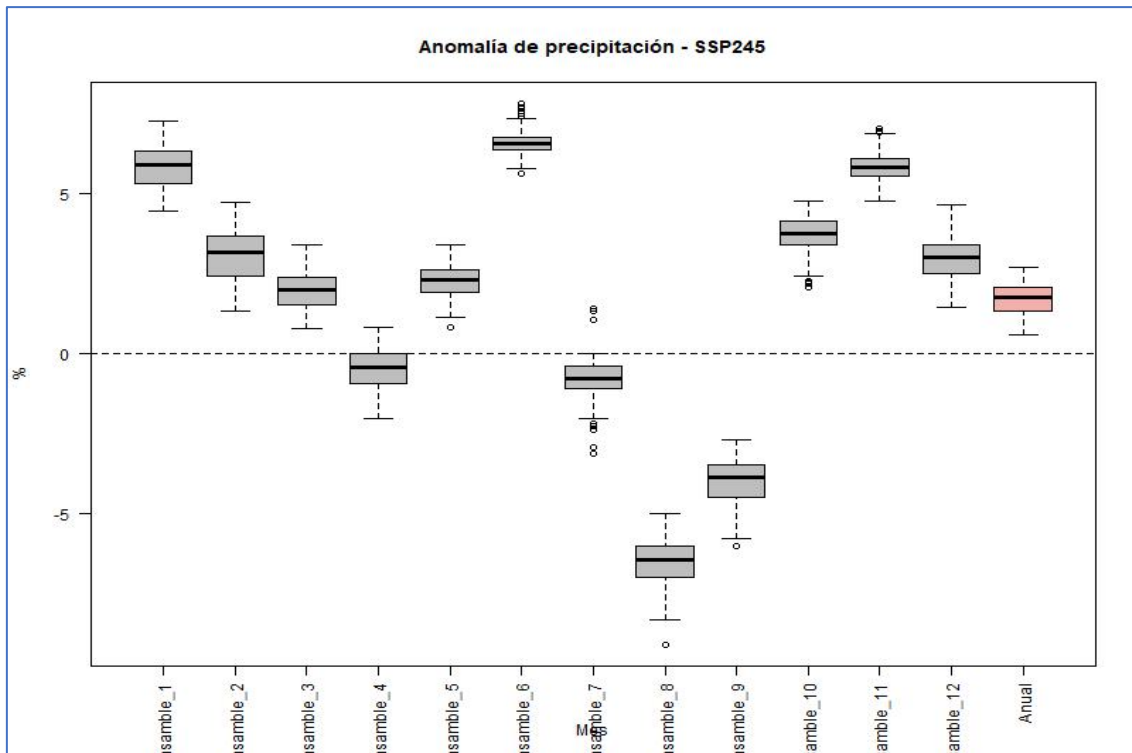
Anomalías climáticas en precipitación y temperatura bajo el escenario SSP585 período
2041-2060

MES	pr%	tmx®	tmn®	tav®
1	3.37	2.03	2.10	2.06
2	5.21	2.03	2.15	2.09
3	5.80	2.01	2.11	2.06
4	2.11	2.11	2.18	2.15
5	6.42	2.16	2.39	2.28
6	6.88	2.17	2.58	2.37
7	(3.78)	2.32	2.54	2.43
8	(7.90)	2.42	2.47	2.45
9	(7.04)	2.52	2.39	2.45
10	(1.09)	2.31	2.35	2.33
11	13.16	1.70	2.37	2.03
12	9.12	1.79	2.18	1.99
Annual	2.69	2.13	2.32	2.22



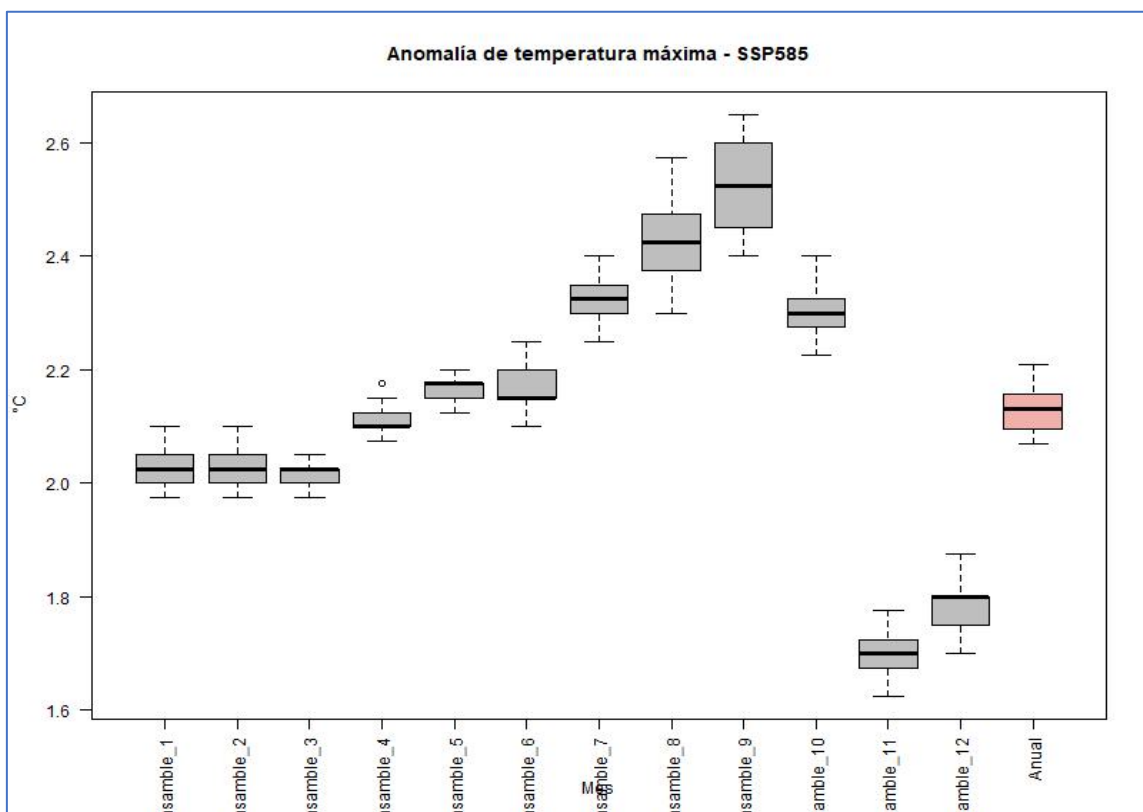
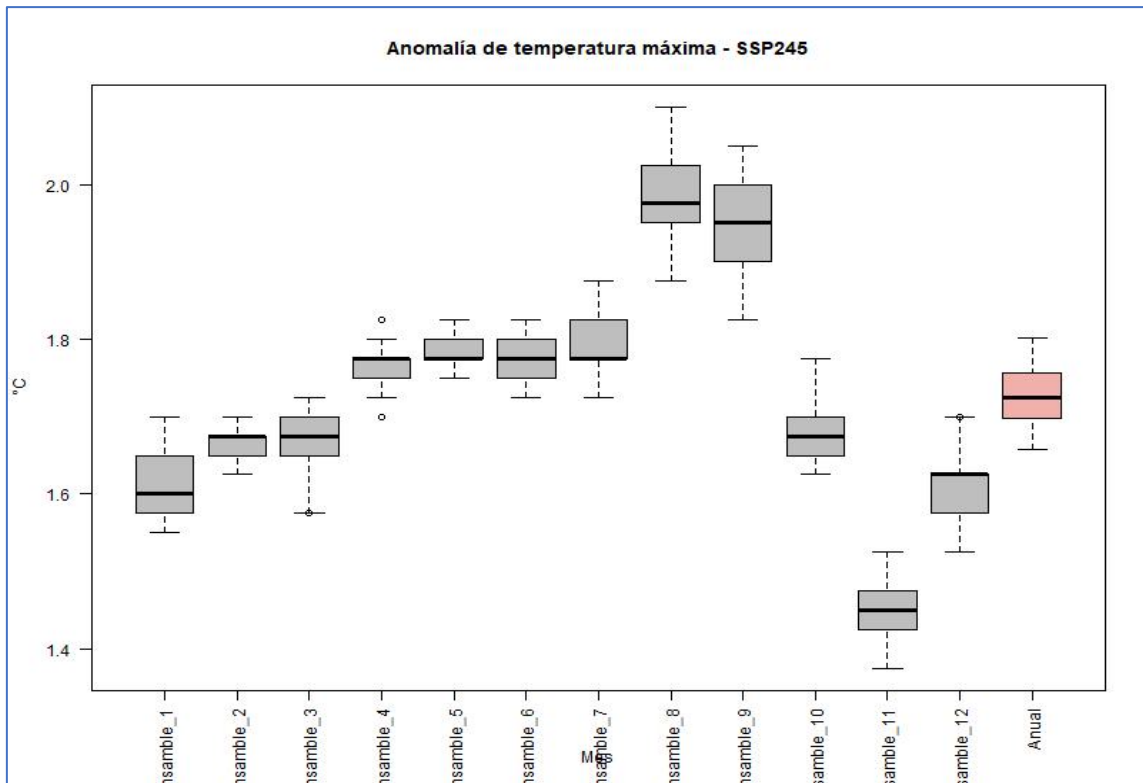
Anexo 3

Boxplot de anomalía de precipitación para los escenarios: SSP245 y SSP585



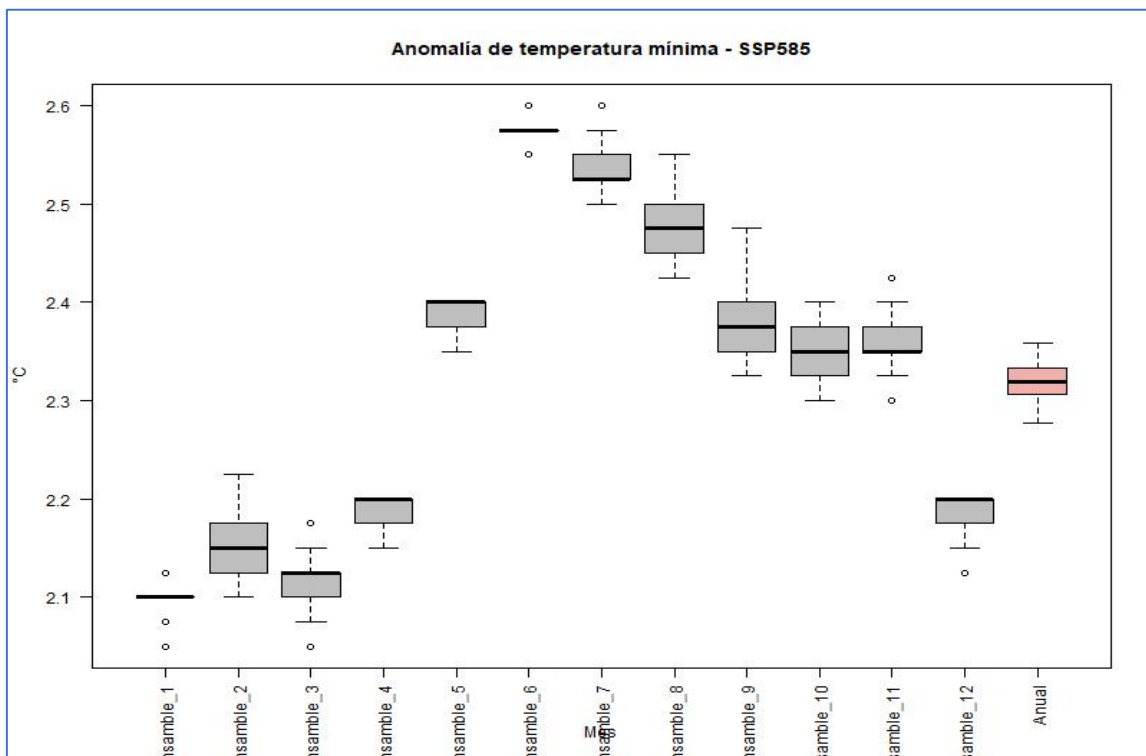
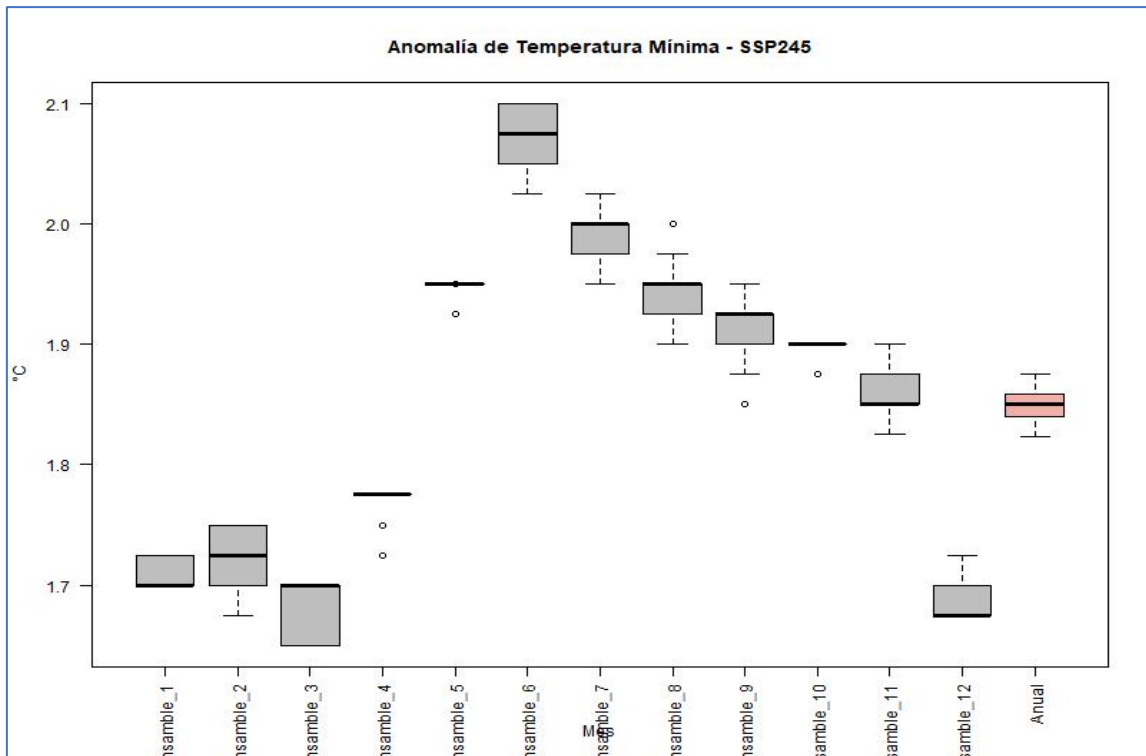
Anexo 4

Boxplot de anomalía de temperatura máxima para los escenarios: SSP2-4.5 y SSP5-8.5



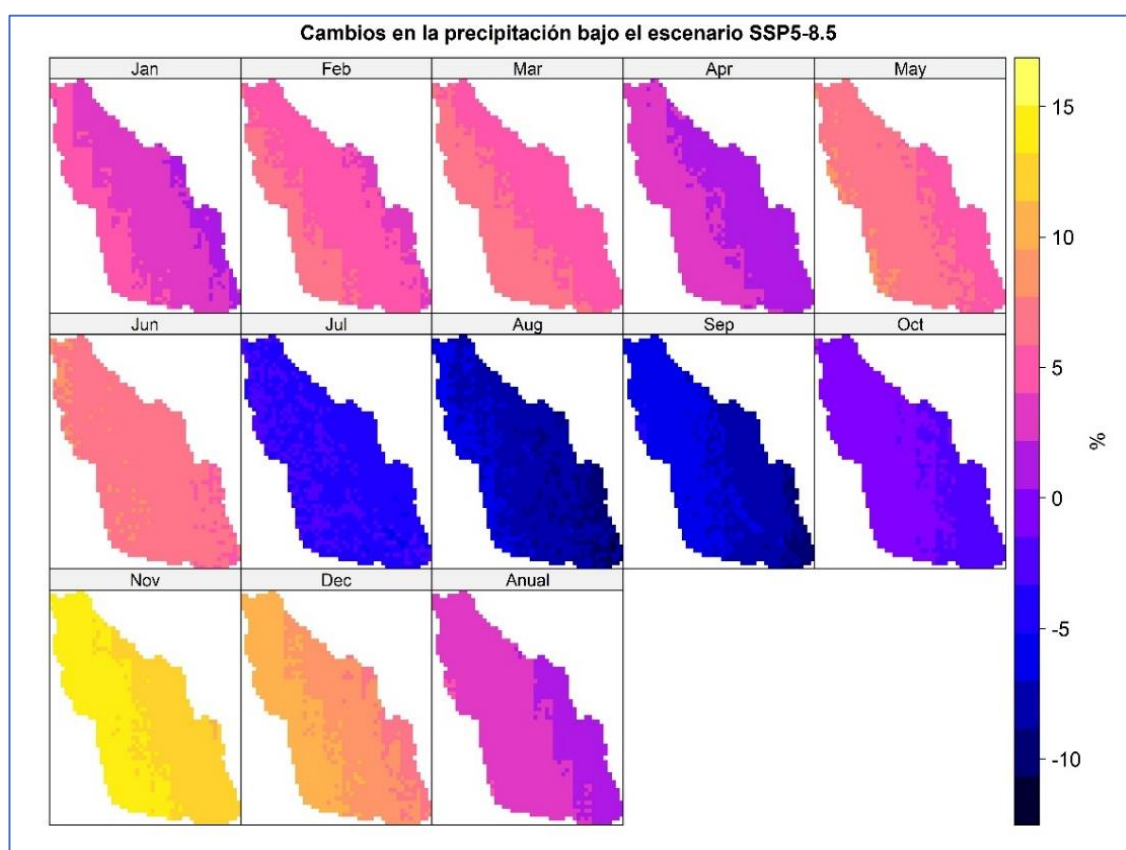
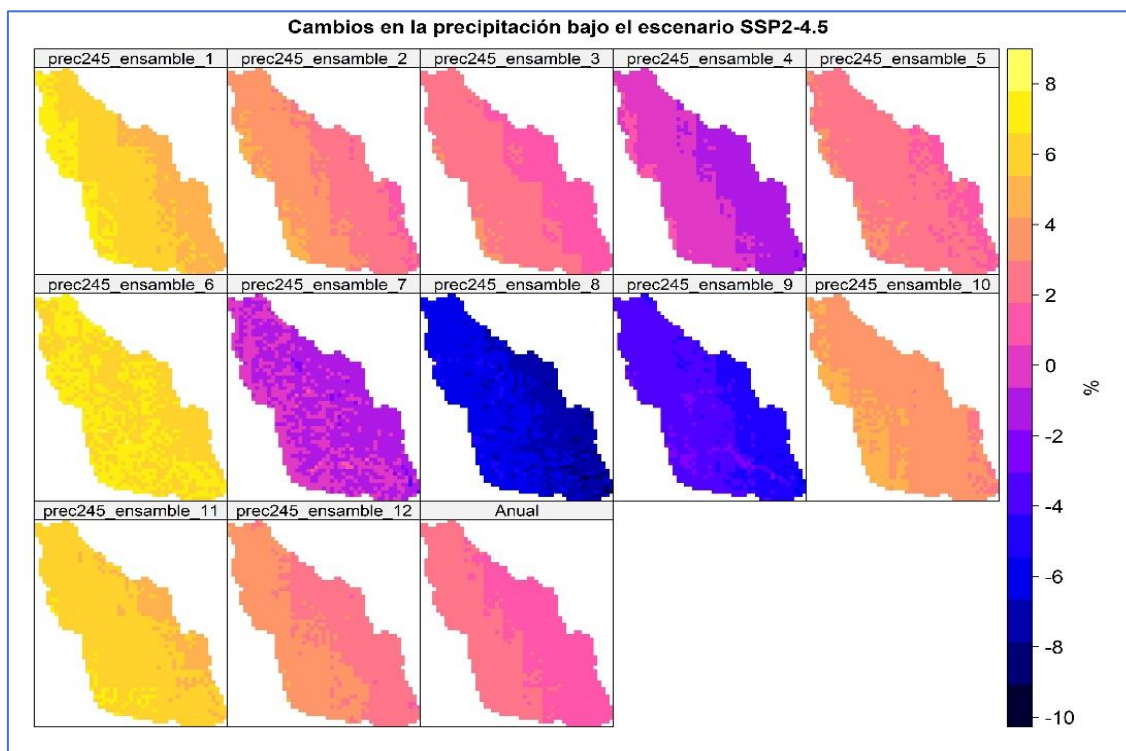
Anexo 5

Boxplot de anomalía de temperatura mínima para los escenarios: SSP2-4.5 y SSP5-8.5



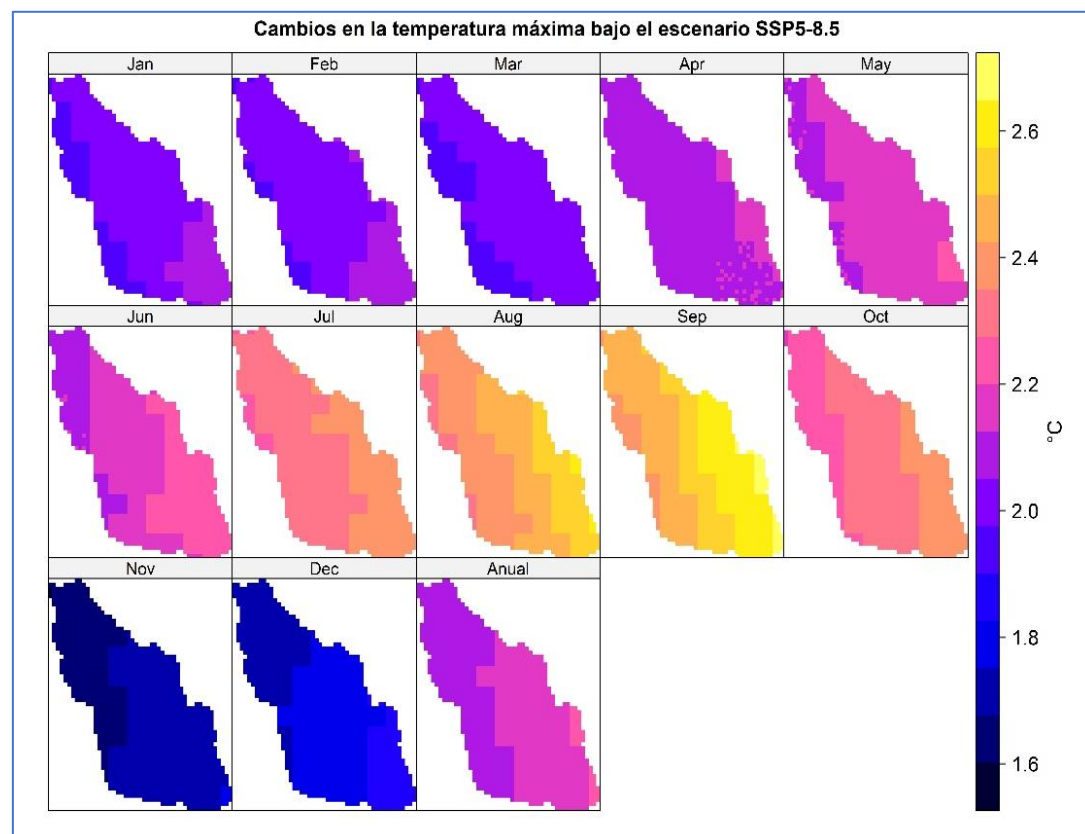
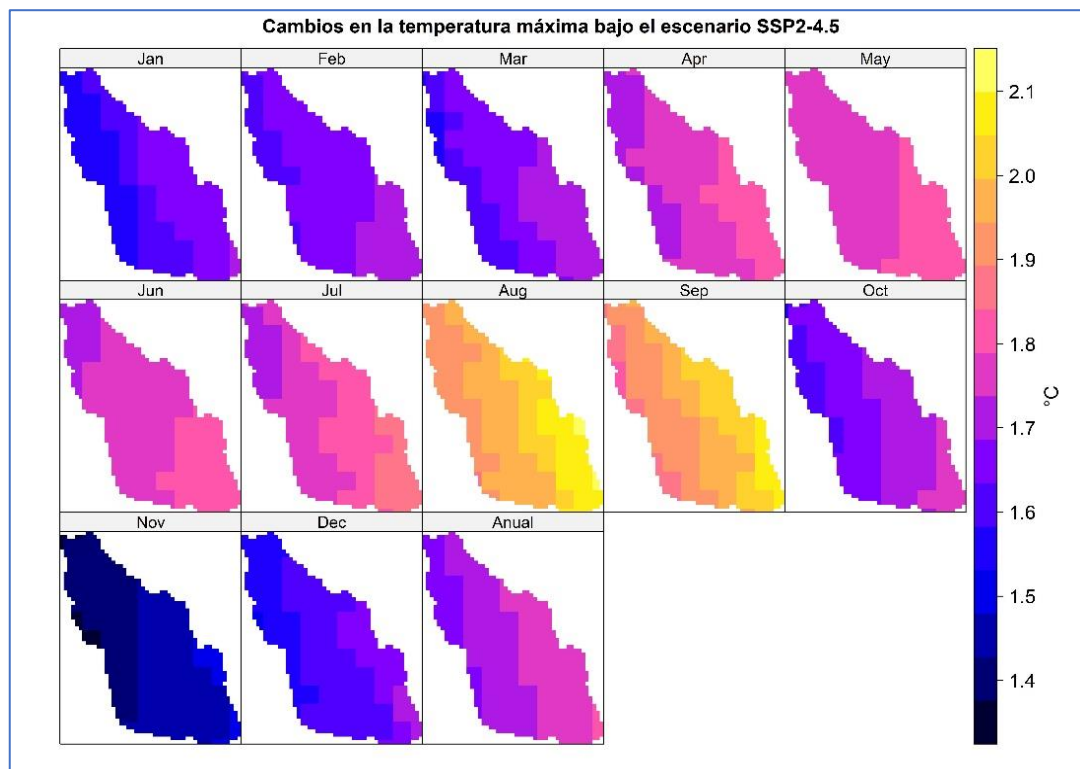
Anexo 6

Cambios de la precipitación bajo los escenarios: SSP245 y SSP585



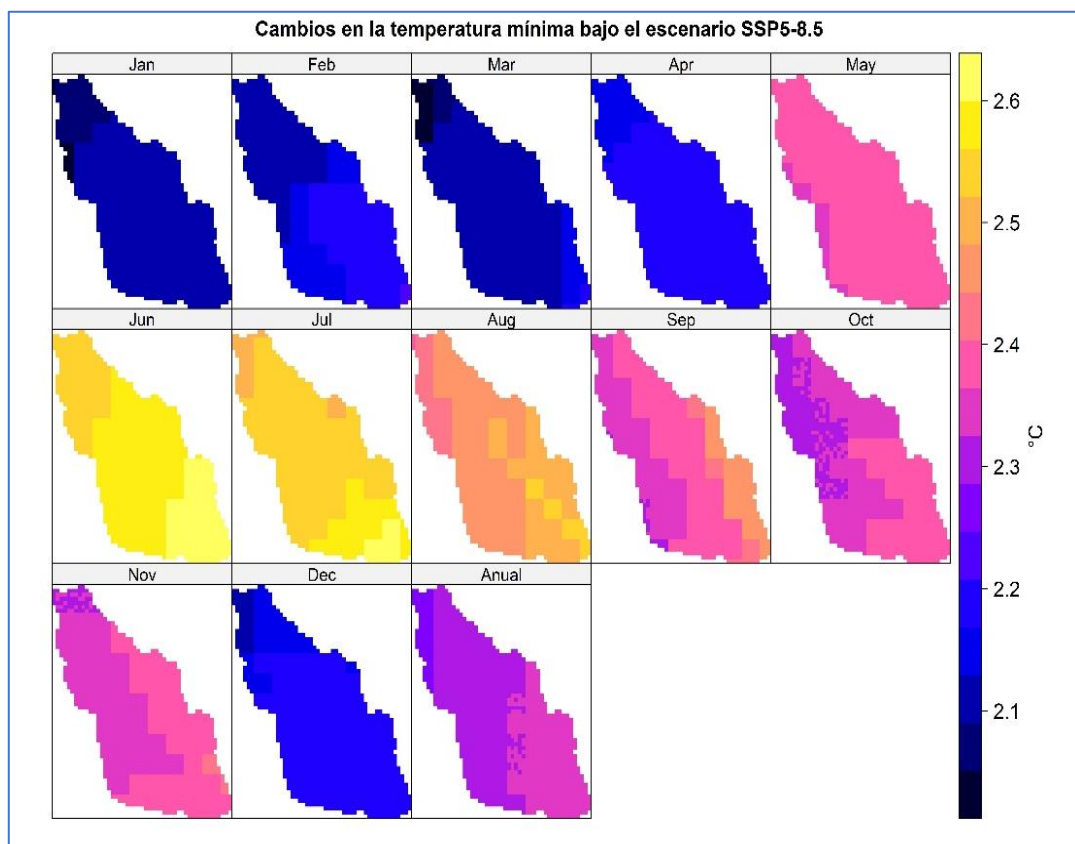
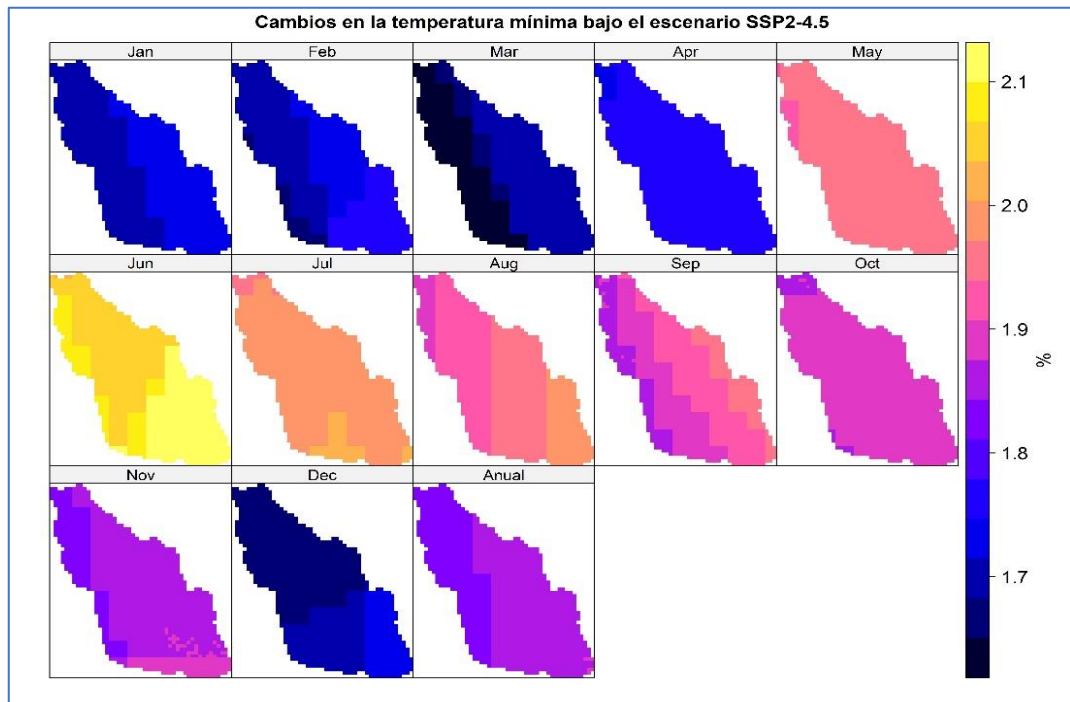
Anexo 7

Cambios de la temperatura máxima bajo los escenarios: SSP2-4.5 y SSP5-8.5



Anexo 8

Cambios de la temperatura mínima bajo los escenarios: SSP2-4.5 y SSP5-8.5



Anexo 9

Descargar y guardar datos históricos de Worldclim

```
1 # Tres modelos climáticos: CNRM, EC-Earth3P y HadGEM3 (Fuente: SEMANI 2010, https://idesep.senamhi.gob.pe/portaides)
2 # Tres escenarios climáticos: ssp370 y ssp585
3 # Período de referencia: 1970-2000
4 # Período futuro: 2041-2060
5 # Variables climáticas: prec, tmax y tmin
6 # Fuente de datos: WorldClim 2.1 a una resolución de 1 km2 (datos mensuales)
7
8 setwd("C:/RomaL")
9 g <- gc(reset = T)
10 rm(list = ls())
11
12 pacman::p_load(terra, geodata, raster, glue, sf, dplyr, RColorBrewer, ggplot2, ggspatial, tidyr, exactextractr)
13
14 huayllabamba <- terra::vect("./Huayllabamba.shp")
15 huayllabamba <- terra::project(huayllabamba, "EPSG:4326")
16 plot(huayllabamba)
17
18 ### Descargar y guardar datos históricos como .tiff y .csv
19 prec.pf <- geodata::worldclim_country(country = "PER", var = "prec", path = "./tmpr") %>% terra::crop(., huayllabamba)
20 tmax.pf <- geodata::worldclim_country(country = "PER", var = "tmax", path = "./tmpr") %>% terra::crop(., huayllabamba)
21 tmin.pf <- geodata::worldclim_country(country = "PER", var = "tmin", path = "./tmpr") %>% terra::crop(., huayllabamba)
22
23 meses <- c("Jan", "Feb", "Mar", "Apr", "May", "Jun",
24            "Jul", "Aug", "Sep", "Oct", "Nov", "Dec")
25
26 names(prec.pf) <- meses
27 names(tmax.pf) <- meses
28 names(tmin.pf) <- meses
29
30 dir.create("./historicos", recursive = T)
31
32 terra::writeRaster(x = prec.pf, filename = "./historicos/prec.pf.tif", overwrite = T)
33 terra::writeRaster(x = tmax.pf, filename = "./historicos/tmax.pf.tif", overwrite = T)
34 terra::writeRaster(x = tmin.pf, filename = "./historicos/tmin.pf.tif", overwrite = T)
35
36 prec.pf.tbl <- terra::as.data.frame(prec.pf, xy = T)
37 write.csv(prec.pf.tbl, "./historicos/prec.pf.csv", row.names = F)
```

Anexo 10

Descargar datos futuros de tres modelos

```
1 # Cinco modelos climáticos: MPI-ESM1-2-HR, FIO-ESM-2-0, MIROC6, UKESM1-0-LL, GFDL-ESM4 (Fuente: Zhang, M.-Z., Xu, Z.,
2
3 # Sung, M.-K., et al. (2021). Climate Change Projection in the Twenty-First Century Simulated by NIMS-KMA CMIP6; t
4 # Dos escenarios climáticos: ssp245 y ssp585
5 # Período de referencia: 1970-2000
6 # Período futuro: 2041-2060
7 # Variables climáticas: prec, tmax y tmin
8 # Fuente de datos: WorldClim 2.1 a una resolución de 1 km2 (datos mensuales)
9
10 setwd("C:/RomaL")
11 g <- gc(reset = T)
12 rm(list = ls())
13
14 pacman::p_load(terra, geodata, raster, sf, dplyr, RColorBrewer, ggplot2, tidyr, exactextractr)
15
16 huayllabamba <- terra::vect("./Huayllabamba.shp")
17 huayllabamba <- terra::project(huayllabamba, "EPSG:4326")
18 plot(huayllabamba)
19 xy <- terra::centroids(huayllabamba) %>% terra::crds()
20 print(xy) ##### -79.06006 -5.756184 #####
21
22
23 ## ssp245 -
24 #precipitacion
25 prec.m1.245 <- geodata::cmip6_tile(lon = -79.06006, lat = -5.756184,
26                                   model = "MPI-ESM1-2-HR",
27                                   ssp = "245",
28                                   time = "2041-2060",
29                                   path = "./tmpr",
30                                   var = "prec")
31
32 prec.m2.245 <- geodata::cmip6_tile(lon = -79.06006, lat = -5.756184,
33                                   model = "FIO-ESM-2-0",
34                                   ssp = "245",
35                                   time = "2041-2060",
36                                   path = "./tmpr",
37                                   var = "prec")
```

Anexo 11

Cálculo de anomalías

```
3-Calculo de anomalias.R
1 # Tres modelos climáticos: CNRM, EC-Earth3P y HadGEM3 (Fuente: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/)
2 # Tres escenarios climáticos: ssp245 y ssp585
3 # Periodo de referencia: 1970-2000
4 # Periodo futuro: 2041-2060
5 # Variables climáticas: prec, tmax y tmin
6 # Fuente de datos: WorldClim 2.1 a una resolución de 1 km2 (datos mensuales)
7
8 setwd("C:/Roma1")
9
10 g <- gc(reset = T)
11 rm(list = ls())
12
13 pacman::p_load(terra, geodata, raster, sf, dplyr, tidyr)
14
15 ## Cargar datos para realizar calculo de anomalias
16
17 #historicos
18 prec.pf <- terra::rast("./historicos/prec.pf.tif")
19 tmax.pf <- terra::rast("./historicos/tmax.pf.tif")
20 tmin.pf <- terra::rast("./historicos/tmin.pf.tif")
21
22 #245
23 prec.245 <- terra::rast("./futuro/ssp245/prec245_ensamble.tif")
24 prec.245 <- terra::crop(prec.245, prec.pf)
25
26 tmax.245 <- terra::rast("./futuro/ssp245/tmax245_ensamble.tif")
27 tmax.245 <- terra::crop(tmax.245, tmax.pf)
28
29 tmin.245 <- terra::rast("./futuro/ssp245/tmin245_ensamble.tif")
30 tmin.245 <- terra::crop(tmin.245, tmin.pf)
31
32 #585
33 prec.585 <- terra::rast("./futuro/ssp585/prec585_ensamble.tif")
34 prec.585 <- terra::crop(prec.585, prec.pf)
35
36 tmax.585 <- terra::rast("./futuro/ssp585/tmax585_ensamble.tif")
```

Anexo 12

Mapas

```
4-Mapas.R
1 # Tres modelos climáticos: CNRM, EC-Earth3P y HadGEM3 (Fuente: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/)
2 # Tres escenarios climáticos: ssp245, ssp370 y ssp585
3 # Periodo de referencia: 1970-2000
4 # Periodo futuro: 2041-2060
5 # Variables climáticas: prec, tmax y tmin
6 # Fuente de datos: WorldClim 2.1 a una resolución de 1 km2 (datos mensuales)
7
8 setwd("C:/Roma1")
9 g <- gc(reset = T)
10 rm(list = ls())
11
12 pacman::p_load(terra, geodata, raster, sf, dplyr, tidyr)
13
14 a.prec.245 <- rast("./anomalias/a.prec.245.tiff")
15 a.prec.585 <- rast("./anomalias/a.prec.585.tiff")
16
17 a.tmax.245 <- rast("./anomalias/a.tmax.245.tiff")
18 a.tmax.585 <- rast("./anomalias/a.tmax.585.tiff")
19
20 a.tmin.245 <- rast("./anomalias/a.tmin.245.tiff")
21 a.tmin.585 <- rast("./anomalias/a.tmin.585.tiff")
22
23 #####
24 raster::spplot(a.prec.245,
25               main = "Cambios en la precipitación bajo el escenario SSP2-4.5",
26               colorkey = list(space = "right",
27                               labels = list(cex = 1.2), # Tamaño del texto
28                               title = "%") # Título de la escala
29 )
30 dev.print(jpeg, filename = "./jpg/prec.245.jpg", width = 18, height = 8, units = "in", res = 600)
31
32
33 raster::spplot(a.prec.585,
34               main = "Cambios en la precipitación bajo el escenario SSP5-8.5",
35               colorkey = list(space = "right",
36                               labels = list(cex = 1.2), # Tamaño del texto
37                               title = "%") # Título de la escala
```