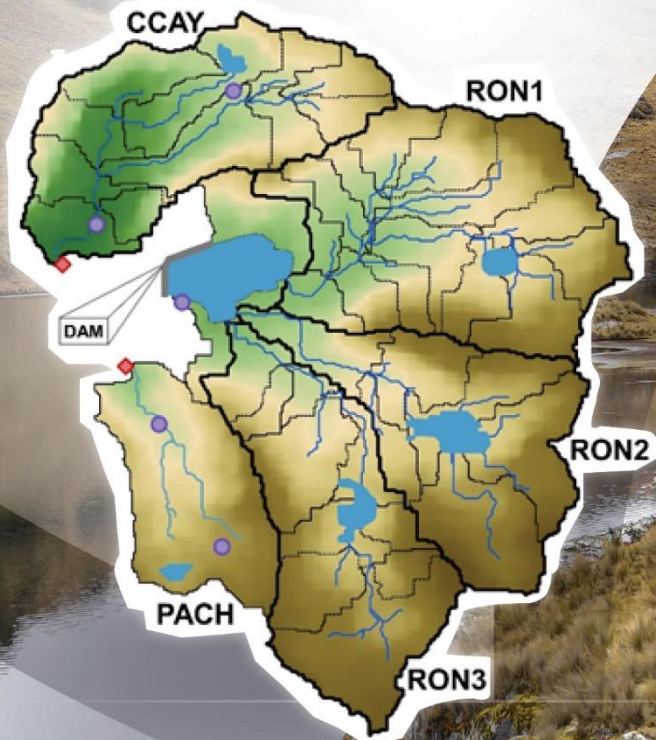
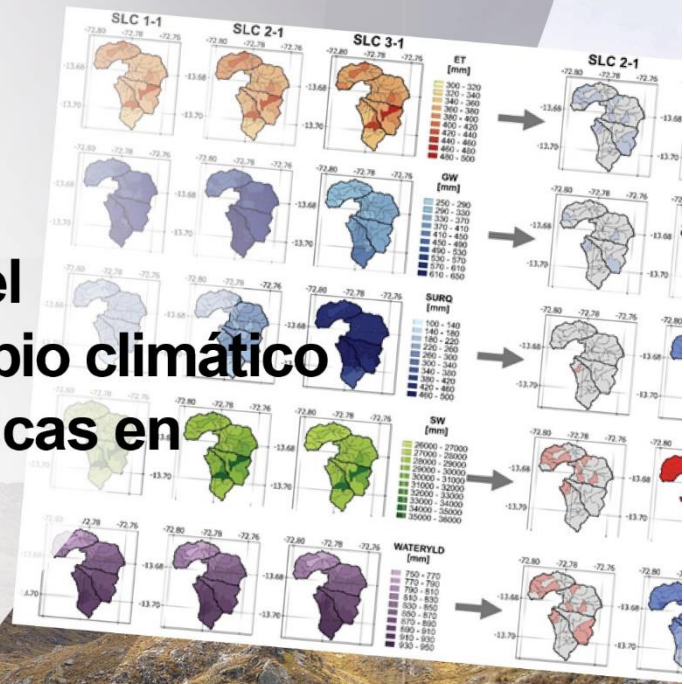


Evaluación de los impactos del cambio de uso de suelo y cambio climático sobre las respuestas hidrológicas en el contexto de los MERESE

Caso: Cuenca andina peruana



Dirección de Hidrología
Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
Marzo 2024

Foto: (c) Nicolas Villaume, 2018



Evaluación de los impactos del cambio de uso de suelo y cambio climático sobre las respuestas hidrológicas en el contexto de los MERESE. Caso: Cuenca andina peruana

Danny Daniel Saavedra Ore
Cristian Albert Montesinos Cáceres
Waldo Sven Lavado Casimiro

Evaluación de los impactos del cambio de uso de suelo y cambio climático sobre las respuestas hidrológicas en el contexto de los MERESE

Caso: Cuenca andina peruana

Presidente Ejecutivo

MSc. Gabriela Teófila Rosas Benancio

Director de Hidrología

MSc. Oscar Gustavo Felipe Obando

Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro

Autores:

Danny Daniel Saavedra Ore

Cristian Albert Montesinos Cáceres

Waldo Sven Lavado Casimiro

Diseño y diagramación por:

Danny Daniel Saavedra Ore

Primera edición: marzo de 2024

Depósito Legal N° 2024-04297

Estudio disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/3346>

© Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Jr. Cahuide N°785, Jesús María, Lima – Perú. Teléfono: (01) 614-1414

www.gob.pe/senamhi

Todos los derechos reservados

Prohibida la reproducción de este estudio por cualquier medio, total o parcialmente sin permiso expreso.

Referencia sugerida:

Saavedra, D.D., Montesinos, C.A. & Lavado, W.S. (2023). *Evaluación de los impactos del cambio de uso de suelo y cambio climático en las respuestas hidrológicas en el contexto de los MERESE. Caso: Cuenca andina peruana*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/3346>

CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
Área de estudio	4
2. DATOS Y MÉTODOS	5
2.1 Recopilación de Datos	5
2.2 Métodos	7
2.2.1 Modelo Hidrológico SWAT	8
2.2.2 Escenarios de cambios futuros	9
3 RESULTADOS	10
3.1 Análisis de Sensibilidad	11
3.2 Calibración y Validación	11
3.3 Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo	12
3.4 Evaluación de los efectos del cambio climático	14
3.5 Evaluación de los efectos de los cambios combinados	15
3.6 Cambios en el balance hídrico anual	16
4 DISCUSIÓN	19
4.1 Incertidumbre en la simulación y limitaciones	19
4.2 Impacto del cambio de Uso de Suelo en la hidrología	20
4.3 Proyecciones del cambio climático e impactos en la hidrología	20
4.4 Impactos combinados del cambio climático y cambio de uso de suelo en la hidrología	21
4.5 Importancia del MERESE en los Servicios Ecosistémicos considerando escenarios cambiantes	22
5 CONCLUSIONES	25
6 REFERENCIAS	27

Lista de Figuras:

Figura 1. Área de estudio y mapa de ubicación de estaciones pluviométricas e hidrológicas.....	5
Figura 2. Diagrama de flujo de metodología para evaluar impactos de cambio de uso de suelo y cambio climático	7
Figura 3. Mapa de escenarios de cambio de uso de suelo.....	9
Figura 4. Comparación de datos diarios observados y simulados para la cuenca de CCAY. Parte superior, resultados de calibración. Parte inferior, resultados de validación.....	12
Figura 5. Efecto de escenarios de cambio de uso de suelo. Parte superior, valores medios mensuales. Parte inferior, cambios porcentuales de valores medios mensuales.....	13
Figura 6. Parte derecha, distribución espacial de valores de ET, GW, SURQ, SW y WYLD. Parte izquierda, distribución de cambios porcentuales de ET, GW, SURQ, SW y WYLD.....	14
Figura 7. Efecto de escenarios de cambio climático. Parte superior, valores medios mensuales. Parte inferior, cambios porcentuales de valores medios mensuales.....	15
Figura 8. Efecto de escenarios de cambios combinados. Parte superior, valores medios mensuales. Parte inferior, cambios porcentuales de valores medios mensuales.....	16
Figura 9. Partición de precipitación media anual (diagonal; mm/año) en escorrentía (eje x; mm/año) y evapotranspiración (eje y; mm/año) media anual para el escenario actual, cambio de uso de suelo y cambio climático. Se muestran los resultados para cada subcuenca de estudio.....	17
Figura 10. Cambios proyectados en la escorrentía (eje x; mm/año) y evapotranspiración (eje y; mm/año) media anual para el escenario actual, cambio de uso de suelo y cambio climático. Se muestran los resultados para cada subcuenca de estudio.....	17

Lista de Tablas:

Tabla 1. Descripción de datos utilizados en este estudio.....	6
Tabla 2. Descripción de escenarios de cambio climático.....	10
Tabla 3. Configuración de escenarios combinados.....	10
Tabla 4. Parámetros utilizados para análisis de sensibilidad del modelo SWAT.....	11
Tabla 5. Valores acumulados medios anuales de flujos y estados para las cuatro cuencas principales de estudio.....	18

RESUMEN

Los Pagos por Servicios Ecosistémicos (PSE) se han convertido en uno de los instrumentos de política pública más populares a nivel mundial para contrarrestar los efectos de la degradación del suelo y del cambio climático sobre los recursos hídricos. En el Perú los PSE son implementados a través de los programas del Mecanismo de Remuneración por Servicios Ecosistémicos (MERESE) que promueven las Empresas Prestadoras de Servicios (EPS). En la actualidad hay poca evidencia científica sobre los impactos de las intervenciones de PSE en los recursos hídricos, y mucho menos en el contexto de los MERESE. Esta investigación se centra en evaluar el impacto del cambio de uso del suelo y cambio climático sobre las respuestas hidrológicas considerando el contexto del MERESE implementado por la EPS EMUSAP ABANCAY en la cabecera de cuenca del río Mariño en el sur de los Andes peruanos. Se utilizaron datos hidrometeorológicos del Sistema de Monitoreo Ecohidrológico de Rontoccocha (SMEHR) y del modelo hidrológico SWAT para representar el comportamiento hidrológico de la cuenca. Los resultados muestran que el impacto de los escenarios de cambio de uso de suelo sobre los recursos hídricos es relativamente menor (incremento de hasta 1 % de la escorrentía media anual para el escenario pesimista), en comparación con los efectos de los escenarios de cambio climático (incremento de hasta 26 % de la escorrentía media anual). Nosotros concluimos que el escenario proyectado del MERESE al 2050 favorable a la forestación no va aportar significativamente a los recursos hídricos en la cuenca de estudio, produciendo que se tengan que reevaluar otras alternativas más eficientes y sostenibles de conservación de ecosistemas.

Palabras clave: Servicios ecosistémicos, uso del suelo, cambio climático, pagos por servicios ecosistémicos, modelo hidrológico SWAT, cuenca andina peruana, MERESE, hidrología.

Evaluación de los impactos del cambio de uso de suelo y cambio climático en las respuestas hidrológicas en el contexto de los MERESE

Caso: Cuenca andina peruana

1. INTRODUCCIÓN

El rápido desarrollo económico, el crecimiento de la población, el deterioro del medio ambiente ecológico y el cambio climático ha provocado que en la actualidad los recursos hídricos sean el centro de prioridad para la población en todo el mundo, principalmente al momento de realizar su asignación o distribución a los diferentes usos de agua (Afonso de Oliveira Serrão et al., 2022; Aghsaei et al., 2020; C. Zhang et al., 2021). Este problema es mayor en las regiones andinas debido a que en esta zona se albergan diferentes servicios ecosistémicos (SE) vulnerables a condiciones de climas cambiantes (Bonnesoeur et a., 2019; Monge-Salazar et al., 2022; Ochoa Tocachi et al., 2016). Los SE proveen beneficios directos o indirectos a los seres humanos desde los ecosistemas (Corvalán et al., 2005; Díaz et al., 2015; Silvestri et al., 2013; Wezel et al., 2014). En la actualidad, los SE se encuentran seriamente afectados en forma negativa, principalmente en los servicios de regulación del agua, erosión del suelo, contaminación del agua y del aire, pérdida de la biodiversidad, entre otros (Alam, 2018; Hasan et al., 2020; Kay et al., 2019; Su et al., 2020).

En todo el mundo, más de cincuenta millones de personas dependen de los servicios ecosistémicos suministrados por las regiones andinas (Bonnesoeur et a., 2019; Doornbos, 2015). Por esta razón, existe la necesidad de centrar las investigaciones en las regiones andinas ya que aquí también se presentan los mayores desafíos hídricos, como en el caso de los andes bolivianos y peruanos donde, por ejemplo, la forestación puede desempeñar un papel de mejorar el suministro y regulación del agua o, por lo contrario, empeorar los problemas dependiendo de cómo y dónde se planten la forestación (Bonnesoeur et a., 2019). En ese sentido, comprender los procesos hidrológicos relacionados a los servicios ecosistémicos se convierte en una tarea relevante y necesario, y más aún al considerar los entornos cambiantes (Chen et al., 2019; Hasan et al., 2020). El cambio de uso de suelo y el cambio climático, se han convertido en los factores más importantes al momento de construir escenarios de cambio, debido a que en forma individual o combinada tienden a producir cambios relevantes en los recursos hídricos y sus procesos hidrológicos relacionados (Afonso de Oliveira Serrão et al., 2022; Chen et al., 2019; Hasan et al., 2020; Morán-Tejeda et al., 2015; Ougahi et al., 2022; Son et al., 2022; Tamm et al., 2018; Tan et al., 2022; Y. Zhang et al., 2020).

Contrarrestar los efectos producidos por los climas cambiantes (es decir, cambio climático y cambio de uso de suelo), se ha vuelto una tarea desafiante tanto en el ámbito político, económico y social. Sin embargo, en estos últimos años diversos países del mundo están implementando los programas de Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE) (Bhatta et al., 2014; Grima et al., 2016; Immerzeel et al., 2008; Lopes Simedo et al., 2020; Oliveira Fiorini et al., 2020; Perevochtchikova et al., 2021; Scullion et al., 2011), como un instrumento de política pública popular (Derissen & Latacz-Lohmann, 2013;

Perevochtchikova et al., 2021). En el Perú, el PSE es implementado de forma obligatoria en las Empresas Prestadoras de Servicios (EPS) mediante el programa del Mecanismo de Retribución por Servicios Ecosistémicos – MERESE (D. S. No 009-2016-MINAM, 2016), que consiste principalmente en realizar actividades de conservación y recuperación de los ecosistémicos, mediante un acuerdo entre los contribuyentes (es decir, comunidades campesinas) y los retribuyentes (es decir, la EPS). En Sudamérica, el MERESE se ha convertido en una experiencia exitosa, debido a que: (i) es un mecanismo sostenible que garantiza sus fondos de conservación a través de las tarifas del servicio de agua potable, y (ii) ha generado un buen impacto social al fortalecer las relaciones entre la EPS y las comunidades que se ubican en las regiones andinas (Dextrea et. al., 2022).

Los impactos en la hidrología producidos por los climas cambiantes mayormente son realizados utilizando escenarios de cambio de uso de suelo y cambio climático. El uso de suelo es un cambio antropogénico importante en la superficie terrestre, ya que llega a afectar diferentes procesos hidrológicos y con ello diferentes servicios ecosistémicos vitales para el bienestar humano (Hasan et al., 2020; Steffen et al., 2017). Se ha identificado que los cambios de uso de suelo y cobertura del suelo, afecta consistentemente los componentes del balance hídrico, incluidos el caudal, la escorrentía superficial, el agua subterránea y la evapotranspiración haciendo que sea importante cuantificarlo con precisión (Afonso de Oliveira Serrão et al., 2022; Hasan et al., 2020; Teklay et al., 2021; Hasan et al., 2020). Ochoa-Tocachi et al., (2016), encontraron que los impactos del uso de tierra son diversos y sus magnitudes son en función de las propiedades de la cuenca, la vegetación y el tipo de manejo, siendo las intervenciones antropogénicas las que generan mayor variabilidad del caudal y reducciones significativas en la capacidad de regulación y rendimiento hídrico en las cuencas, independientemente de las propiedades hidrológicas del bioma original. Por otro lado, el cambio climático puede afectar las condiciones regionales de precipitación, temperatura y evapotranspiración, llegando a producir cambios significativos en la escorrentía (por ejemplo, incrementos en la intensidad y frecuencia de las inundaciones y sequías) (Y. Zhang et al., 2020). Estos efectos son reconocibles en todo el mundo, y producen incrementos de la frecuencia e intensidad de eventos extremos de inundaciones y sequías (Pham et al., 2019; Vaghefi et al., 2019; Zarrineh et al., 2020; Martínez-Retureta et al., 2021). Andrés et al. (2014) evaluaron el impacto del cambio climático en la cuenca andina peruana del río Vilcanota, donde encontraron que se espera un incremento de la escorrentía total en la temporada de lluvia, pero menos almacenamientos temporales (por ejemplo, nieve, humedad del suelo, etc), que producirá menos suministro de agua especialmente en la temporada de seca.

Los ecosistemas de agua dulce (es decir, ríos, lagos, aguas subterráneas) respaldan la prestación de los servicios ecosistémicos potenciales para diferentes usos de agua, por ejemplo, el suministro y regulación del agua, y retención de sedimentos (Pham et al., 2019). Pham et al., (2019) evaluaron el impacto de escenarios acoplados de cambio de uso de suelo y cambio climático en los servicios ecosistémicos potenciales en la cuenca del río Taro en Italia, ellos encontraron que la producción de agua va disminuir un 20 % debido al incremento de la demanda de la evapotranspiración y cambios en los patrones de la precipitación. En cambio, Tamm et al., (2018), encontraron que existe una fuerte correlación lineal entre el cambio de la cobertura de bosque con el caudal de los ríos, encontrando que una reducción del 5 % de la cobertura de bosque representa un incremento de 1 %

en la escorrentía anual, pero en la variación mensual los cambios son poco significativos. Pero según (Chen et al., 2019), encontraron que en la cuenca del río Jinsha se espera que el cambio de uso de suelo ejerza poco impacto en la escorrentía y sus eventos extremos asociados, y en cambio, el cambio climático producirá un incremento en un futuro cercano. La baja producción de agua y la superpoblación son las principales causas de la escasez extrema de agua, haciendo necesario que se fortalezcan los proyectos de conservación e incremento de almacenamientos de agua principalmente en la temporada de lluvia (C. Zhang et al., 2021). Este último, hace que la comprensión de las condiciones climáticas presentes y futuras se vuelven relevantes en la determinación de vulnerabilidad y el desarrollo de estrategia de adaptación a escenarios cambiantes (Anand et al., 2018; Martínez-Retureta et al., 2021). En ese sentido, la presente investigación tiene el objetivo de responder las preguntas de investigación:

- i. ¿Cuál es el impacto del cambio de uso de suelo y cambio climático en las respuestas hidrológicas en una cuenca andina peruana?
- ii. ¿Cuál es la relevancia del programa MERESE en un contexto de escenarios cambiantes?

Para alcanzar a responder estas preguntas, se hace uso del modelo hidrológico Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua (SWAT, por sus siglas en inglés) (Arnold et al., 2012), y datos climáticos del Sistema de Monitoreo Ecohidrológico de Rontoccocha (SMEHR). Los resultados de este estudio podrían ayudar a la gestión integral y sostenible del recurso hídrico en la cuenca de estudio (Martínez-Retureta et al., 2021; Tamm et al., 2018).

Área de estudio

El área estudio se ubica en la cabecera de cuenca del río Mariño, en los andes del sureste del Perú (ver Figura 1), donde la EPS EMUSAP ABANCAY ejecuta el programa de nombre MERESE en el territorio de las Comunidades de Atumpata y Micaela Bastidas. Desde el año 2016 se ha instalado el Sistema Monitoreo Ecohidrológico de Rontoccocha (SMEHR) en base a la metodología de cuencas pares propuesto por Iniciativa Regional Hidrológico de Ecosistemas Andinos (IMHEA, Célleri et al., 2012), donde se tiene establecido una cuenca testigo (cuenca del río Pachacani - PACH) y dos cuencas intervenidas (cuenca del río Ccayllahuasi – CCAY, y cuenca de la laguna de Rontoccocha - RON), que en conjunto representa un 5 % del área de la cuenca del río del Mariño. En este estudio, solo se han considerado las dos cuencas intervenidas de CCAY y RON y no la cuenca testigo PACH, debido a que estas cuencas son aportantes principales para uso de agua para consumo poblacional y para riego de la ciudad de Abancay.

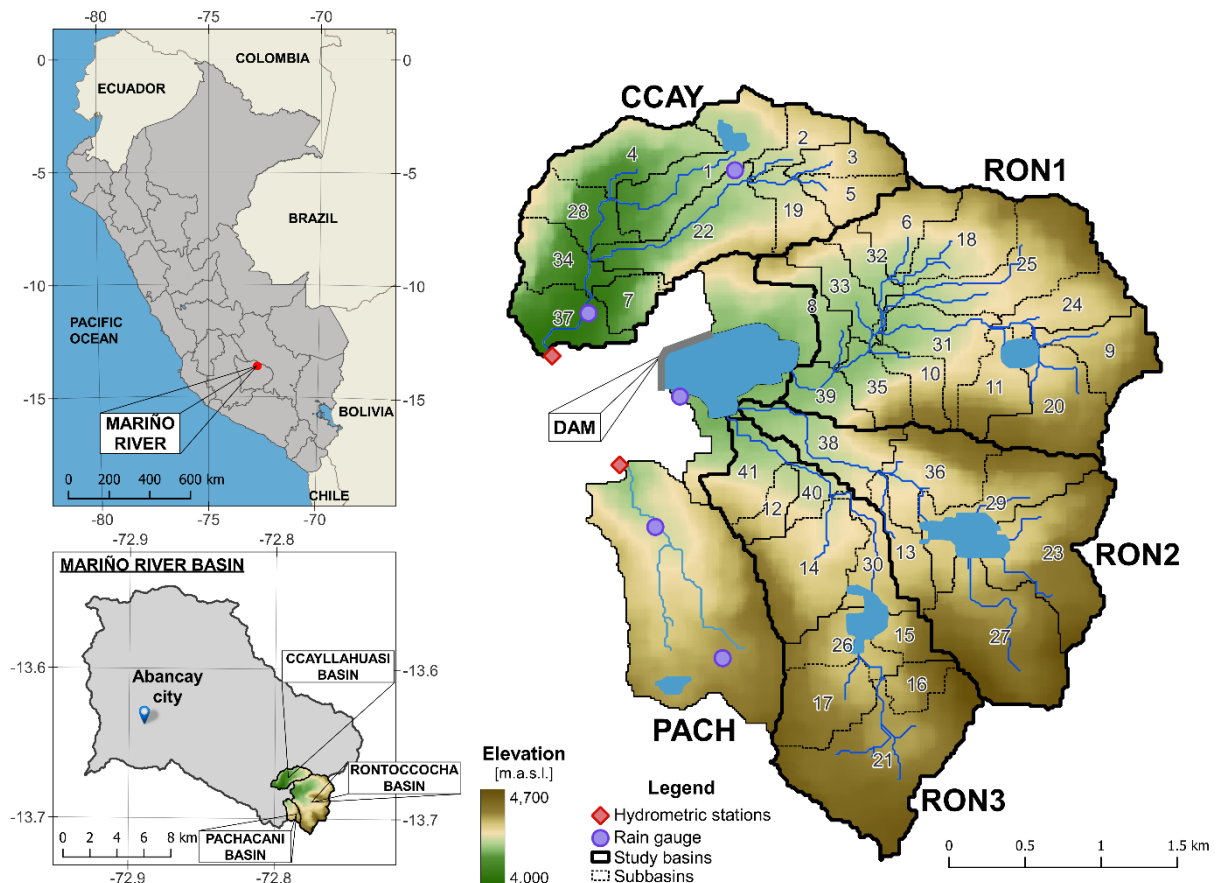


Figura 1. Área de estudio y mapa de ubicación de estaciones pluviométricas e hidrológicas
Fuente: Elaboración propia

La cuenca CCAY se encuentra en el territorio de la Comunidad de Atumpata, y tiene un área de 2.55 km² con un rango de elevaciones de 4076 a 4531 msnm y una pendiente promedio de 37.6 %. En cambio, la cuenca de RON se encuentra entre las Comunidades de Atumpata y Micaela Bastidas, pero en este caso, a fin evaluar la hidrología en sus principales vertientes, se identificaron tres subcuencas representadas por RON1, RON2, y RON3 (ver Figura 1), donde, (i) RON1 tiene un área de 3.28 km², un rango de elevaciones de 4263 a 4650 msnm y una pendiente promedio de 32.7 %, (ii) RON2 tiene un área de 2.33 km², un rango de elevaciones de 4255 a 4736 msnm y una pendiente promedio de 34.4 %, y (iii) RON3 tiene un área de 2.51 km², un rango de elevaciones de 4255 a 4736 msnm y una pendiente promedio de 30 %.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1 Recopilación de Datos

El modelo hidrológico SWAT requiere de diferentes datos, que para este estudio han sido obtenidos de diversas fuentes (ver Tabla 1). La topografía es definida con el modelo digital de elevación (DEM) Alos Palsar de resolución espacial de 12.5 m que, también ha sido utilizado para determinar las

subcuencas y pendientes del área de estudio. El uso de suelo fue determinado utilizando la clasificación supervisada con la imagen satelital Landsat 08 OLI/TIRS, obteniendo como resultados los usos de suelo de 91.6 % pastizales (PAST), 1.9 % bosque (FRST), 4 % bofedales (WETL) y 2.5 % agua (WATR). El tipo de suelo es determinado en base Digital Soil Map of the World (DSMW) – FAO – SOIL de resolución espacial de 1000 m, obteniendo el tipo de suelo único de litosol y con una textura de suelo de Franco arcilloso-arenoso. Los datos de precipitación y temperaturas diarias han sido tomados del portal web del Sistema de Monitoreo Ecohidrológico de Rontoccocha (SMEHR) y fueron extendidos con los datos del producto grillado PISCO operativo (Datos Interpolados Peruanos de Observaciones Climatológicas e Hidrológicas del SENAMHI) (Millán-Arancibia & Lavado-Casimiro, 2023)(Aybar et al., 2019; Huerta, 2022a; Huerta, 2022b) utilizando el método de corrección de sesgo de *Quantile Delta Mapping* (QDM, (Cannon et al., 2015)). El registro de caudales diarios ha sido obtenido del SMEHR. Finalmente, los GCM son tomados de NEX-GDDP-CMIP6 (Thrasher et al., 2012), que consta de 31 modelos para la precipitación y 28 modelos para la temperatura máxima y mínima, esto para los escenarios de SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Tabla 1. Descripción de datos utilizados en este estudio

Datos	Descripción / Fuente
Topográfica	Modelo Digital de Elevación (DEM, por su descripción en inglés) ALOS PALSAR de resolución espacial de 12.5 m. https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/
Uso/Cobertura de suelo	Clasificación supervisada con uso imagen satelital Landsat 08 OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor, por su descripción en inglés) de resolución espacial de 30 m, descargados en el mes de julio del 2019. https://earthexplorer.usgs.gov/
Tipo de suelos	Digital Soil Map of the World (DSMW) – FAO – SOIL, de resolución espacial de 1000 m. https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/
Precipitación	Uso de cinco estaciones pluviométricas con resolución de 0.2 mm obtenido del SMEHR / Datos grillados de precipitación a resolución espacial de ~10km (Aybar et al., 2020; Millán-Arancibia & Lavado-Casimiro, 2023). http://merese.emusapabancay.com.pe/ https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/
Temperatura	Cinco estaciones con datos de temperaturas a resolución temporal de 1 hora obtenido del SMEHR / Datos grillados de temperatura máxima y mínima a resolución espacial de ~10km (Huerta, 2022a; Huerta, 2022b). http://merese.emusapabancay.com.pe/ https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/
Caudales observados	Una estación con datos de caudal diario del SMEHR. http://merese.emusapabancay.com.pe/
Cambio Climático	Proyecciones climáticas escaladas de precipitación y temperatura a resolución espacial de 27.83 km. https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6

2.2 Métodos

El flujo metodológico aplicado para el desarrollo de la investigación es descrito en la Figura 2, donde los principales pasos a seguir son: (i) configuración del modelo hidrológico SWAT en base a los datos de uso de suelo, tipo de suelo, DEM y datos meteorológicos, (ii) calibración y validación del modelo hidrológico SWAT con respecto a los datos observados de caudales disponibles del SMEHR, (iii) descarga y procesamiento de datos de los GCM para las variables de precipitación y temperatura (31 y 28 modelos, respectivamente) del CMIP6 para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 a fin de obtener seis escenarios de cambio climático utilizando cambios deltas para la mediana y los percentiles de 95% y 5% del conjunto de los GCM para los periodos de evaluación de 2025-2055 (tiempo futuro) y 1994-2014 (tiempo actual), (iv) configuración de dos escenarios de cambio de uso de suelo (escenario proyectado de intervención del MERESE al 2050 con forestación, y escenario pesimista), (v) configuración de 21 escenarios futuros (es decir, combinación de escenarios de usos de suelo y cambio climático), y (vi) ejecución de modelo hidrológico SWAT con parámetros calibrados y evaluación de resultados obtenido con los escenarios futuros.

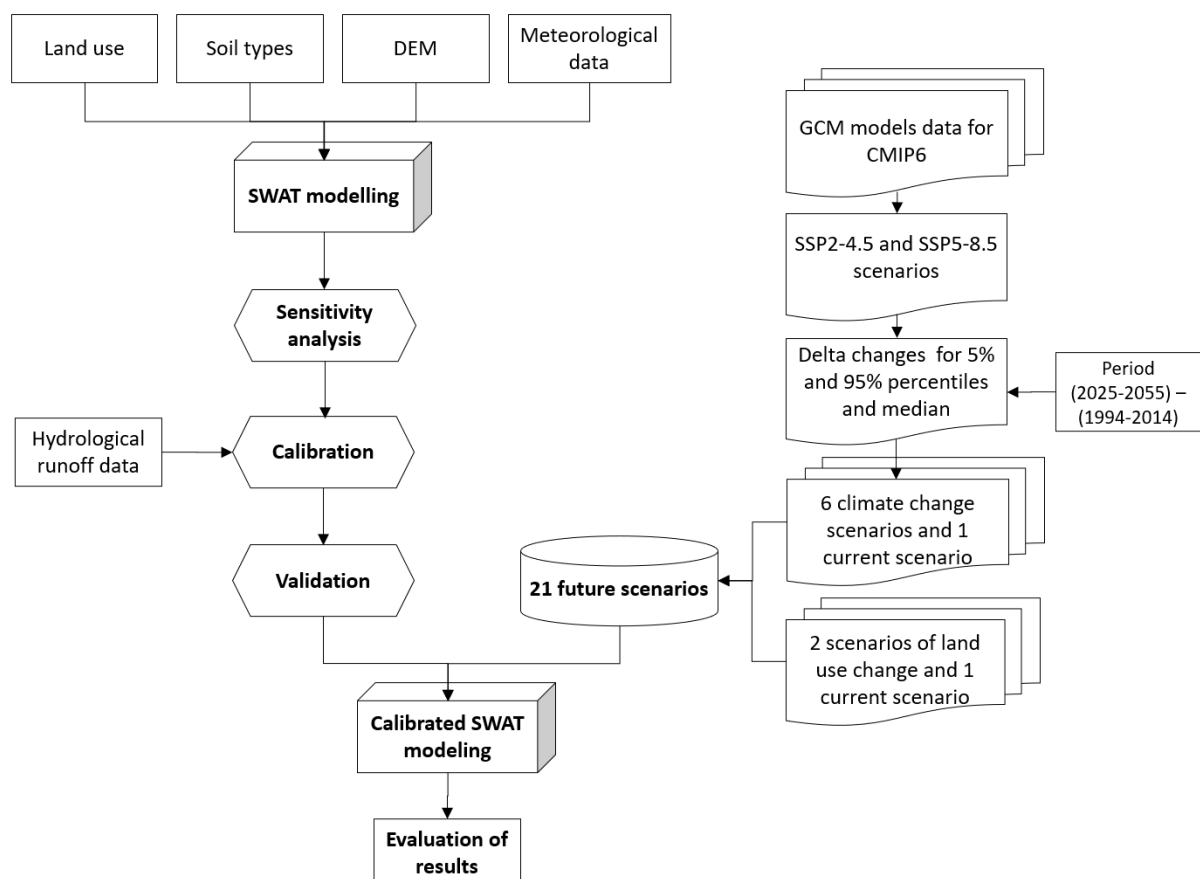


Figura 2. Diagrama de flujo de metodología para evaluar impactos de cambio de uso de suelo y cambio climático

Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Modelo Hidrológico SWAT

La Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua (SWAT, por sus siglas en inglés) es un modelo hidrológico semidistribuido de base física y basado en procesos, desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS) en principios del año 1990 (Arnold et al., 2012). Actualmente, SWAT es un modelo utilizado ampliamente en estudios de diferentes partes del mundo para la toma de decisiones sobre el recurso hídrico tanto en calidad y en cantidad (Asurza-Véliz & Lavado-Casimiro, 2020; Ougahi et al., 2022; Son et al., 2022; Tadesse et al., 2015; Traverso Yucra et al., 2022; Wagner et al., 2022). La cuenca primero es configurada en subcuencas según el DEM, para luego ser subdividido en Unidades de Respuesta Hidrológicas (URH) que son clasificadas según la topografía, uso de suelo y tipo de suelo del área de estudio (Chen et al., 2019). En el modelo SWAT el ciclo hidrológico es simulado utilizando la ecuación (1) de balance hídrico, descrita de la siguiente manera (Y. Zhang et al., 2020):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Donde SW_t es el contenido de agua final del suelo (mm); SW_0 es el contenido de agua preliminar del suelo (mm); t es el paso de tiempo (día); R_{day} , Q_{surf} y E_a son las cantidades de precipitación, escorrentía superficial y evaporación en el día i (mm), respectivamente; W_{seep} es la cantidad de agua que ingresa a la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mm), Q_{gw} es la cantidad de los flujos de retorno en el día i (mm).

Para este estudio, el modelo SWAT se utiliza a escala temporal diaria y es configura en 41 subcuencas en total y 345 URH configurados en base a la topografía, uso de suelo y tipo de suelo. Se eligió el método Hargreaves para calcular la evapotranspiración de referencia, se utiliza el número curva del Servicio de Conservación de Suelos para calcular la escorrentía superficial, y el método de almacenamiento variable para el enrutamiento del flujo.

El análisis de sensibilidad, calibración y validación ha sido realizado utilizando el paquete R-SWAT (Nguyen et al., 2022), que es una herramienta de interfaz gráfica en el entorno de R. Se utilizó el método de análisis de sensibilidad global con un enfoque de regresión lineal multivariada con parámetros generados a partir de un muestreo de hipercubo latino uniforme (por ejemplo, algoritmo de ajuste de incertidumbre secuencial - SUFI-2, Abbaspour et al., (2004)) donde se consideraron 500 iteraciones y la función objetivo de Nash-Sutcliff (ecuación 2) (Krause et al., 2005). Asimismo, un enfoque similar a SUFI-2 (Abbaspour et al., 2004) se utilizó para la calibración y validación para los periodos de 2016-2017 y 2018-2019, respectivamente, y con la función objetivo de Nash-Sutcliff.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QS_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QS_i - \overline{QO})^2} \quad (2)$$

Donde, QO_i y QS_i corresponde al caudal observado y simulado, respectivamente, \overline{QO} es la media de los caudales observados, N es el número total de datos observados.

2.2.2 Escenarios de cambios futuros

i. Escenarios de cambio de uso de suelo

En base al uso de suelo actual (SL1), se construyeron dos escenarios de cambios futuros de uso de suelo denominados escenario proyectado del MERESE al 2050 (SL2) y pesimista (SL3) (ver Figura 3). El escenario de uso de suelo proyectado del MERESE, ha sido construido en base a proyecciones de forestación con árboles nativos de queuña que la EPS EMUSAP ABANCAY S.A. espera lograr al año 2050 mediante el programa MERESE que actualmente vienen implementando. Este escenario implica un incremento al 19.8 % el área forestada en el área de estudio y, asimismo, una disminución al 73.8 % del área con pastizales. El escenario de uso de suelo pesimista, ha sido construido considerando una degradación fuerte en el área de estudio, implicando que los usos de suelo de bosque (FRST), pastizales (PAST) y bofedales (WETL) sean cambiados por el uso de suelo desnudo (BARR), solo quedando el uso de suelo de agua (WATR).

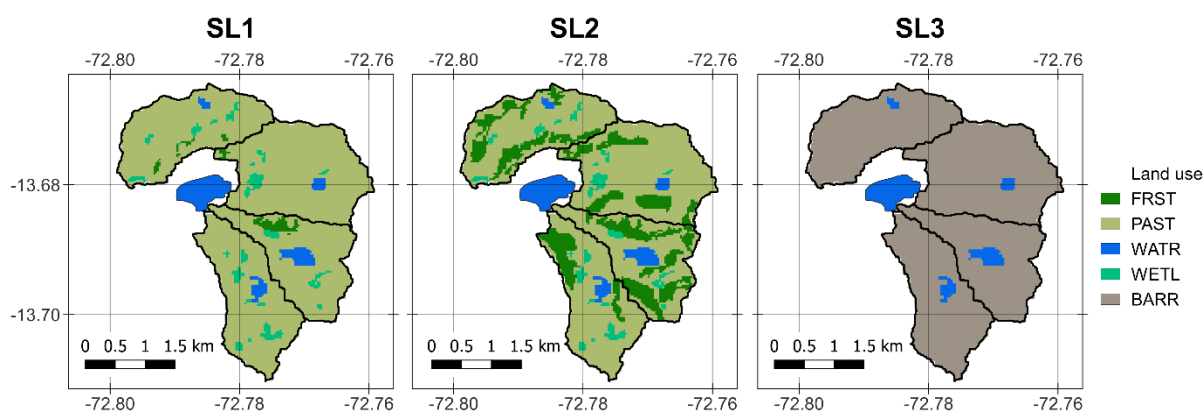


Figura 3. Mapa de escenarios de cambio de uso de suelo.

Fuente: Elaboración propia

ii. Escenarios de cambio de uso de suelo

El impacto del cambio climático, ha sido evaluado mediante la construcción de seis escenarios de proyecciones de cambios futuros. En este caso, se utilizaron un total de 31 modelos para la precipitación y 28 modelos para la temperatura máxima y mínima, para los escenarios Shared Socioeconomic Pathway (SSP, Riahi et al., 2017) de SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Los GCM representan una de las principales fuentes de incertidumbres al momento de realizar evaluación de impacto de cambio climático. Para afrontar este problema se desarrollaron diferentes metodologías de selección de los GCM. Por ejemplo, la aplicación de criterios de selección que logren identificar al conjunto de mejores GCM que representen el comportamiento de la hidrología en el periodo histórico para una área de estudio determinada, a fin de que estos modelos seleccionados logren una mejor representación en el periodo futuro (Bağçacı et al., 2021; Lun et al., 2021), Un segundo caso, es la aplicación de estadísticos que logren acoplar o representar el comportamiento del conjunto de los GCM (Dhakai et al., 2018; Ficklin et al., 2013; Goyburo et al., 2023). En este estudio, se aplicó la mediana, el percentil 5% y percentil 95% del conjunto de los GCM, logrando obtener seis conjuntos

de series de tiempo pertenecientes a las variables de precipitación, temperatura máxima y mínima, y para los dos escenarios de SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (ver Tabla 2).

Para construir estos seis escenarios futuros, se aplicaron cambios delta mensuales determinados a partir de la comparación del periodo histórico (1994 - 2014) y el periodo futuro (2025-2055) de los seis conjuntos de series de tiempo descritos en el párrafo anterior (ver Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de escenarios de cambio climático.

Escenario	Variable	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
SC2 5% (SSP2-4.5)	Prec. [%]	0.0	0.0	1.3	47.0	11.6	18.5	19.8	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
	Tmáx. [+/-]	1.1	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.2	1.1
	Tmín. [+/-]	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.6	0.9
SC3 95% (SSP2-4.5)	Prec. [%]	4.3	8.4	9.9	11.4	12.8	13.5	16.5	12.5	3.5	4.1	-0.7	-7.9
	Tmáx. [+/-]	1.2	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	0.9	1.1	1.3
	Tmín. [+/-]	1.3	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.1	1.1	1.1	1.0	1.2
SC4 mediana (SSP2-4.5)	Prec. [%]	-16.4	17.2	13.9	16.1	11.0	7.3	11.2	19.8	0.4	0.0	0.0	0.0
	Tmáx. [+/-]	1.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4
	Tmín. [+/-]	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1
SC5 5% (SSP5-8.5)	Prec. [%]	0.0	0.0	3.3	46.9	19.4	19.9	22.4	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	Tmáx. [+/-]	1.4	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.3	1.3	1.4	1.4
	Tmín. [+/-]	1.5	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	0.8	1.1
SC6 95% (SSP5-8.5)	Prec. [%]	7.3	11.1	11.7	13.8	14.8	16.8	18.3	16.7	-5.9	10.6	8.2	0.2
	Tmáx. [+/-]	1.6	1.4	1.3	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.2	1.5	1.6
	Tmín. [+/-]	1.7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	1.4	1.3	1.6
SC7 mediana (SSP5-8.5)	Prec. [%]	-4.3	16.4	15.2	15.3	13.1	9.8	10.7	27.5	-0.5	0.0	0.0	0.0
	Tmáx. [+/-]	1.6	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6
	Tmín. [+/-]	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4

Fuente: Elaboración propia.

iii. Combinación de escenario de cambio de uso de suelo y climático

Para evaluar los impactos combinados del cambio climático y el uso de suelo sobre los procesos hidrológicos, se construyeron un total de veintiuno combinaciones de escenarios (ver Tabla 3), el escenario SCL11 es construido tomando en cuenta solo el clima y uso de suelo actual. Los escenarios SLC21 y SLC31 son construidos con el clima actual y los usos de suelo proyectado del MERESE y pesimista. Los escenarios SLC12, SLC13, SLC14, SLC15, SLC16 y SLC17 son construidos con el uso de suelo actual y seis escenarios de cambio climático. Finalmente, los escenarios SLC22, SLC23, SLC24, SLC25, SLC26, SLC27, SLC32, SLC33, SLC34, SLC35, SLC36 y SLC37 son construidos en base a los dos usos de suelo futuros y seis escenarios de cambio climático.

Tabla 3. Configuración de escenarios combinados.

Escenario	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7
SL1	SLC 1-1	SLC 1-2	SLC 1-3	SLC 1-4	SLC 1-5	SLC 1-6	SLC 1-7
SL2	SLC 2-1	SLC 2-2	SLC 2-3	SLC 2-4	SLC 2-5	SLC 2-6	SLC 2-7
SL3	SLC 3-1	SLC 3-2	SLC 3-3	SLC 3-4	SLC 3-5	SLC 3-6	SLC 3-7

	Escenario actual
	Escenario de cambio de uso de suelo
	Escenario de cambio climático
	Escenario combinado

Fuente: Elaboración propia

3 RESULTADOS

3.1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad ha sido realizado utilizando un total de quince parámetros obtenidos de la literatura (ver Tabla 4). Se ejecutaron un total de 400 iteraciones, logrando obtener como resultado un total de siete parámetros sensibles mediante la evaluación del p_valor, dichos parámetros se clasifican con respecto a los procesos de: escorrentía (CN2 y SOL_K), agua subterráneos (ALPHA_BF, RCHRG_DP), enrutamiento (CH_K2 y CH_N2), y evaporación (ESCO). Siendo el parámetro más sensible el número de curva (CN2).

Tabla 4. Parámetros utilizados para análisis de sensibilidad del modelo SWAT

Ítems	Parámetros	Abrev.	Proceso
1	Tiempo de retraso en la recarga de acuíferos (días)	GW_DELAY	Agua subterránea
2	Número de curva de condición de humedad II de SCS para áreas permeables (%)	CN2	Escorrentía
3	Conductividad hidráulica saturada (%)	SOL_K	Escorrentía
4	Constante de recesión del flujo base (días)	ALPHA_BF	Agua subterránea
5	Coefficiente de compensación de la evaporación del suelo (-)	ESCO	Evaporación
6	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial, días (-)	SURLAG	Escorrentía
7	Conductividad hidráulica efectiva en aluviones del canal principal (mm/h)	CH_K2	Enrutamiento
8	Fracción de percolación de acuíferos profundos.	RCHRG_DP	Agua subterránea
9	Nivel de agua umbral en un acuífero poco profundo para flujo base (mm H ₂ O)	GWQMN	Agua subterránea
10	Coefficiente de compensación de la absorción de la planta (-)	EPCO	Evapotranspiración
11	Capacidad de agua disponible (%)	SOL_AWC	Escorrentía
12	Coefficiente de Mannings "n" para el canal principal	CH_N2	Enrutamiento
13	Valor 'n' de Manning para el flujo terrestre (-)	OV_N	Escorrentía
14	Profundidad umbral del agua en el acuífero somero para que se produzca "revap" o percolación al acuífero profundo (mm H ₂ O).	REVAPMN	Agua subterránea
15	Coefficiente de "revaporización" del agua subterránea (-)	GW_REVAP	Agua subterránea

Fuente: Elaboración propia

3.2 Calibración y validación

La calibración fue ejecutada considerando los parámetros identificados como más sensibles obtenidos en el ítem anterior, donde se realizaron un total de 500 iteraciones con el paquete R-SWAT, obteniendo resultados satisfactorios con respecto a los caudales observados (ver Figura 4, parte superior), y con valores de las métricas de rendimiento entre bueno a muy bueno: NSE=0.81; KGE=0.90; RMSE=0.04; PBIAS=1.30; y R²=0.83. En la Figura 4, parte superior derecha, se observa que

el gráfico de dispersión presenta una ligera subestimación de los resultados de la simulación en comparación con los datos observados, principalmente en los flujos altos, y una dispersión ligera en subestimar y sobrestimar los flujos medios y bajos. La validación fue ejecutada en base al conjunto de parámetros calibrados, donde encontramos rendimientos buenos a pesar de los escasos datos que se presenta de los caudales observados (ver Figura 4, parte inferior), siendo los valores de métricas de rendimiento: NSE=0.66; KGE=0.76; RMSE=0.02; PBIAS=-10; y R2=0.67. En la Figura 4, parte inferior derecha, se observa una ligera dispersión en sobreestimar y subestimar los flujos altos, medios y bajos

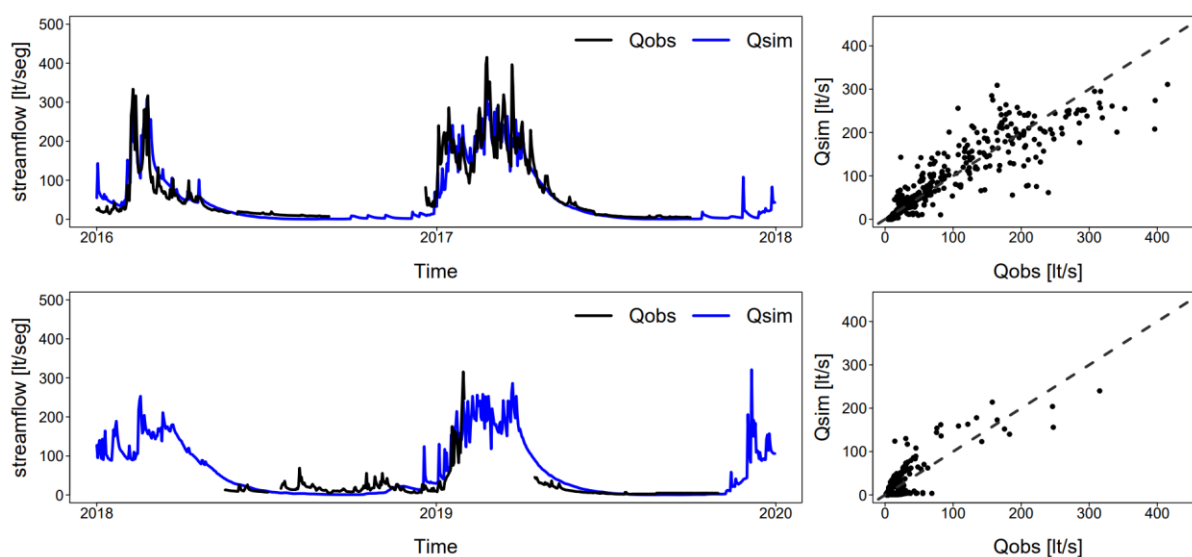


Figura 4. Comparación de datos diarios observados y simulados para la cuenca de CCA Y. Parte superior, resultados de calibración. Parte inferior, resultados de validación.

Fuente: Elaboración propia

3.3 Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo

Los escenarios de cambio de uso de suelo proyectado del MERESE al 2050 (SLC21) y pesimista (SLC31), fueron corridos en el modelo SWAT y con el conjunto de parámetros calibrados, para ser evaluados y comparados con respecto al escenario actual (SLC11). Los resultados de la ejecución son mostrados utilizando gráficos de caudales medios mensuales (Figura 5, parte superior) y cambios porcentuales con respecto al escenario actual (Figura 5, parte inferior). Asimismo, también mostramos los cambios en cinco principales flujo y estados (es decir, Evapotranspiración real (ET), Agua Subterránea (GWQ), Escorrentía superficial (SURQ), Humedad del suelo (SW) y producción de agua (WYLD)) (ver Figura 5 y Tabla 5).

El escenario SLC21, representa un cambio de uso de suelo favorable a la forestación (es decir se proyecta un incremento del 19.8 % del área forestada). Los cambios esperados en los caudales medios mensuales son insignificantes con respecto al escenario SLC11 (ver Figura 6, línea verde discontinua), representando que la forestación, no tendría un impacto relevante en los caudales y,

tampoco en los flujos y estados (ver Tabla 5). Sin embargo, en los mapas de flujos y estados mostrados en forma espacial (ver Figura 6), se observan áreas con un ligero incremento en la ET y GWQ, una ligera disminución en SW y WYLD, y cambios poco significativos en SURQ, esto producto de la forestación.

El escenario SLC31, representa un cambio de uso de suelo pesimista (es decir, los usos de suelo de pastizal, bosque y bofedal serían cambiados a suelo desnudo). En este caso, se presentan cambios significativos de los caudales medios mensuales con respecto al escenario SLC11 (ver Figura 5, línea verde continua), primero durante los meses de septiembre a febrero (estaciones de primavera y verano, periodo húmedo) se muestra un incremento de hasta un 9 % en promedio de las cuatro subcuencas estudiadas, es decir, hasta un 10 % (CCAY), 11 % (RON1), 8 % (RON2) y 8 % (RON3), pero luego durante los meses de marzo a agosto (otoño e invierno, periodo seco) disminuyen en -9 % en promedio de las cuatro subcuencas estudiadas, es decir, hasta un -9 % (CCAY), -11 % (RON1), -9 % (RON2) y -9 % (RON3). Sin embargo, en los flujos y estados (ver Figura 6) observamos que el escenario SLC31 producirá que se incrementen los valores de SURQ y WYLD, y disminución en ET, GWQ y SW.

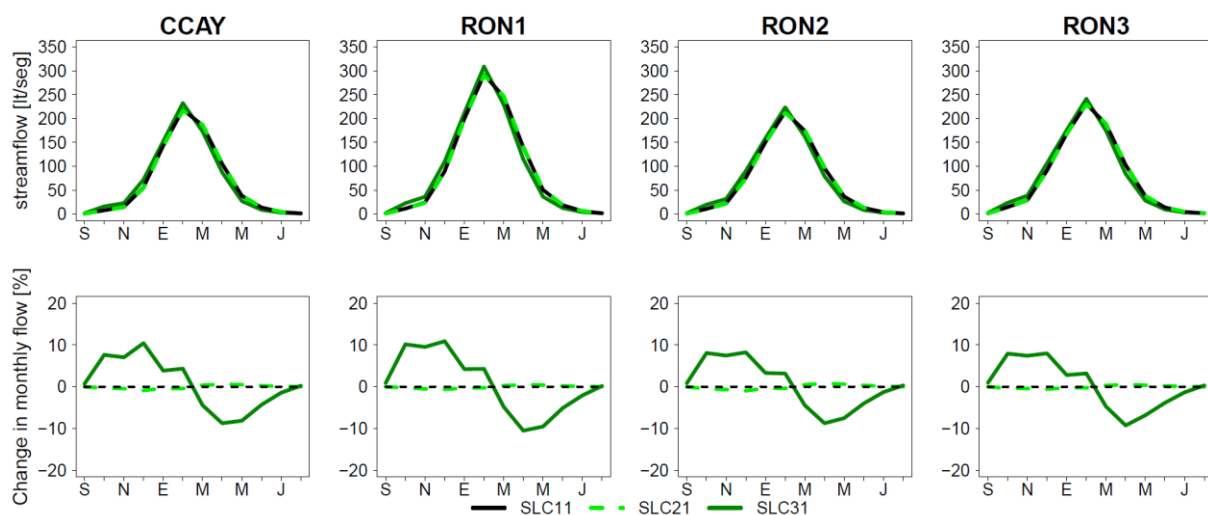


Figura 5. Efecto de escenarios de cambio de uso de suelo. Parte superior, valores medios mensuales. Parte inferior, cambios porcentuales de valores medios mensuales.

Fuente: Elaboración propia

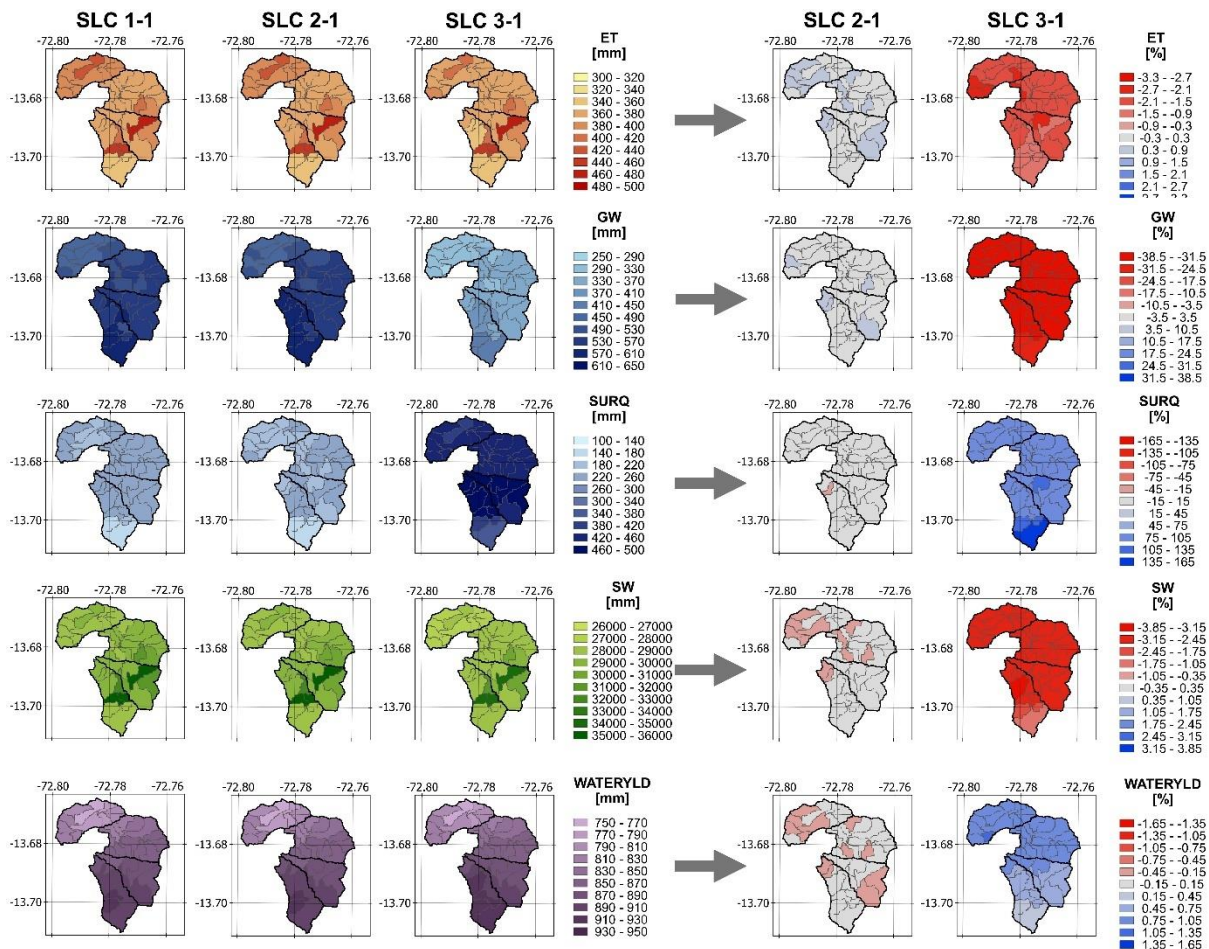


Figura 6. Parte derecha, distribución espacial de valores de ET, GW, SURQ, SW y WYLD. Parte izquierda, distribución de cambios porcentuales de ET, GW, SURQ, SW y WYLD.

Fuente: Elaboración propia

3.4 Evaluación de los efectos del cambio climático

Seis escenarios de cambio climático han sido corridos con el modelo SWAT y con el conjunto de parámetros calibrados, para ser evaluados y comparados con respecto al escenario actual (SLC11). Los resultados muestran que todos los escenarios muestran incrementos en los caudales medios mensuales (ver Figura 7), donde, los menores cambios se presentan entre los meses de julio a septiembre y, los mayores cambios se presentan entre los meses de octubre a junio. También se logra observar que en el mes de diciembre se presentan los valores más altos de cambio, correspondiente, de hasta un 35 % aproximadamente y, principalmente para los escenarios SLC15 y SLC12. En general, los resultados muestran gran dispersión entre los valores obtenidos por cada escenario y por cada mes, con mayor dispersión observada entre los meses de octubre a marzo, donde se presentan los valores más altos del caudal medio mensual.

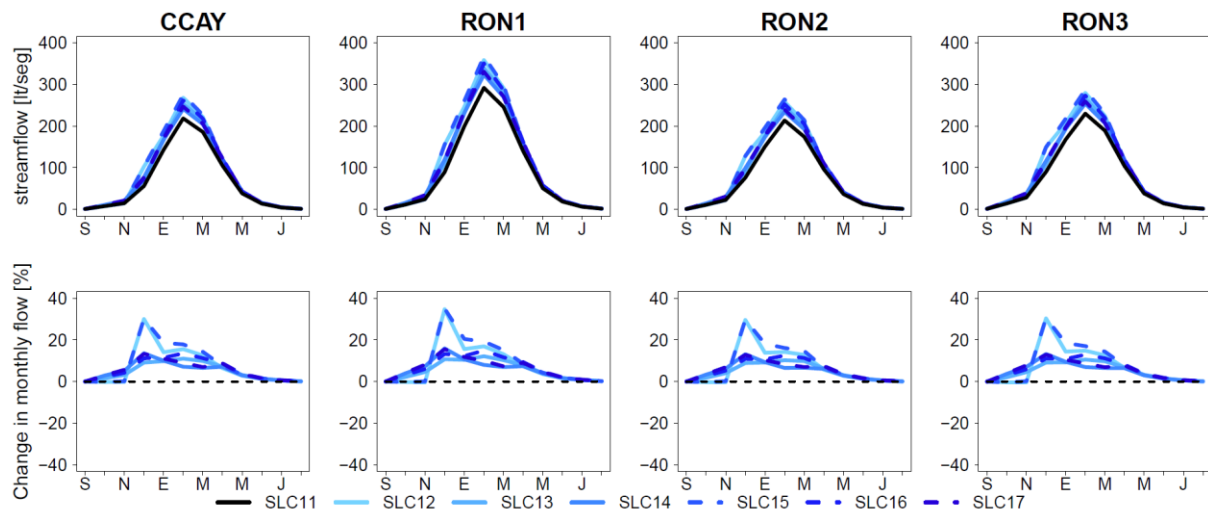


Figura 7. Efecto de escenarios de cambio climático. Parte superior, valores medios mensuales. Parte inferior, cambios porcentuales de valores medios mensuales.

Fuente: Elaboración propia

3.5 Evaluación de los efectos de los cambios combinados

Se construyeron doce escenarios de cambio combinado a partir de los escenarios de cambio de uso de suelo (dos) y cambio climático (seis), que, fueron corridos con el modelo SWAT y con el conjunto de parámetros calibrados. Los resultados muestran que los cambios combinados de uso de suelo y cambio climático impactan significativamente en los caudales medios mensuales (ver Figura 8 y Tabla 6). En general, se presenta cambios de incremento en los caudales medios mensuales, donde entre los meses de agosto a septiembre los cambios son poco significativos, pero entre los meses de octubre a julio los cambios son mayores, con excepción de los meses de abril, mayo, junio y julio, donde los cambios son negativos para los escenarios combinados con el escenario de cambio de uso de suelo SLC31 (es decir, SLC25, SLC26, SLC27, SLC35, SLC36 y SLC37). Al igual que los resultados encontrados en los escenarios de cambio climático, aquí, también en el mes de diciembre se presenta los mayores cambios en el caudal medio mensual, de hasta un 53 % aproximadamente y principalmente para los escenarios SLC15 y SLC12. Todos los resultados de escenarios de cambio climático muestran gran dispersión entre los valores obtenidos por cada escenario y por cada mes, con mayor dispersión observada entre los meses de octubre a marzo, donde se presentan los valores más altos del caudal medio mensual.

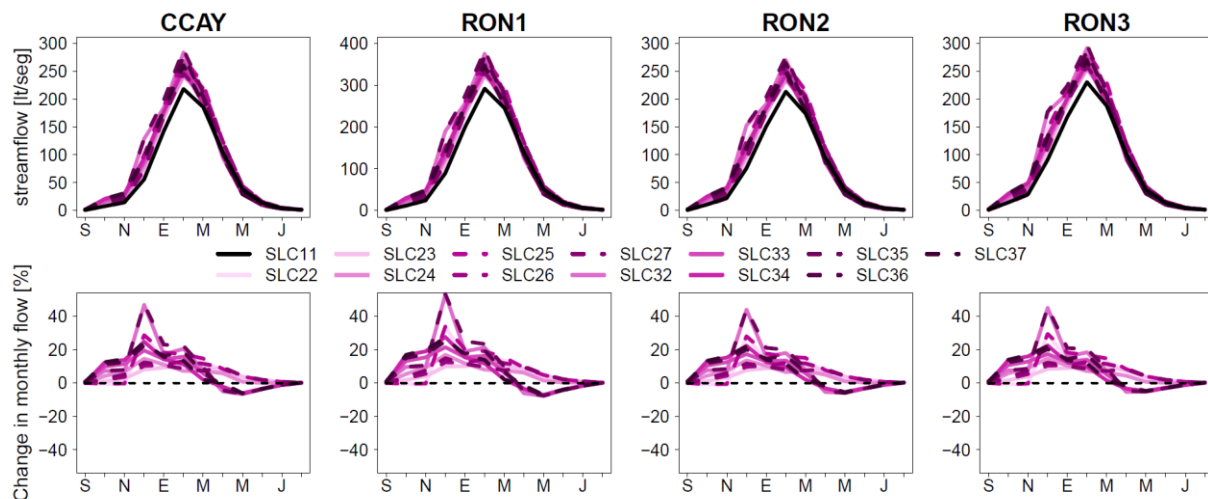


Figura 8. Efecto de escenarios de cambios combinados. Parte superior, valores medios mensuales. Parte inferior, cambios porcentuales de valores medios mensuales.

Fuente: Elaboración propia

3.6 Cambios en el balance hídrico anual

Analizando, los cambios en el balance hídrico anual mostrados en la Figura 9 y 10, donde las líneas diagonales representan la precipitación anual promedio para cada uno de los escenarios (considerar que, para el escenario actual y los escenarios de cambio de uso de suelo, la línea es la misma, debido a que no hay cambios en la precipitación) y los símbolos representan los valores de ET y escorrentía anual promedio. La intersección de estas líneas con el eje “x” indica que toda la precipitación se convierte en escorrentía, mientras que la intersección con el eje “y” indica que el sistema convierte toda la precipitación en ET. En la Figura 9, los símbolos y colores representan diferentes escenarios de cambio de uso de suelo y cambio climático. Si el símbolo está ubicado en la línea diagonal representa una simulación con cambios insignificantes en el almacenamiento, pero si el símbolo está ubicado debajo de la línea 1:1 denotan aumentos en el almacenamiento y los de arriba denotan disminuciones en el almacenamiento (ver Figura 10).

En la Figura 9 y 10, observamos comportamientos similares en las cuatro subcuencas estudiadas, donde todos los escenarios muestran una misma dirección de cambio, que es principalmente el incremento de la escorrentía. Los escenarios de cambio de uso del suelo, en general, muestran cambios poco significativos en el balance anual de agua respecto al escenario actual, donde para el escenario proyectado MERESE SLC21 los cambios son prácticamente nulos, mientras que el escenario pesimista SLC31 muestra un ligero aumento de la escorrentía y una ligera disminución de la ET (incremento de hasta 1 % de la escorrentía media anual para el escenario pesimista, ver Figura 10). Los escenarios de cambio climático muestran cambios más relevantes, que en general muestran aumentos significativos de la escorrentía y un ligero aumento de la ET, que se produce principalmente por el aumento de la precipitación en la zona de estudio (incremento de hasta 26 % de la escorrentía media anual, ver Tabla 2 y Figura 9 y 10). En resumen, los resultados muestran que independientemente los escenarios de cambio de uso del suelo no influyen significativamente en el

balance hídrico, en comparación con los escenarios de cambio climático, donde los cambios son relevantes.

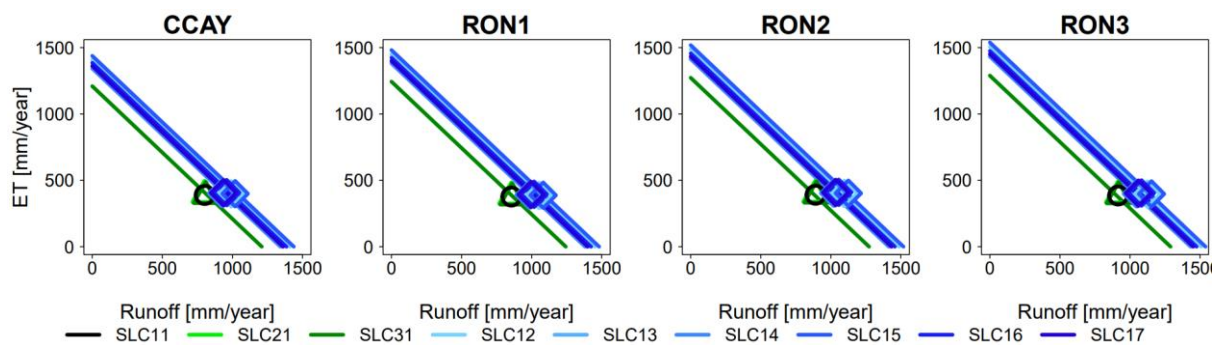


Figura 9. Partición de precipitación media anual (diagonal; mm/año) en escorrentía (eje x; mm/año) y evapotranspiración (eje y; mm/año) media anual para el escenario actual, cambio de uso de suelo y cambio climático. Se muestran los resultados para cada subcuenca de estudio.

Fuente: Elaboración propia

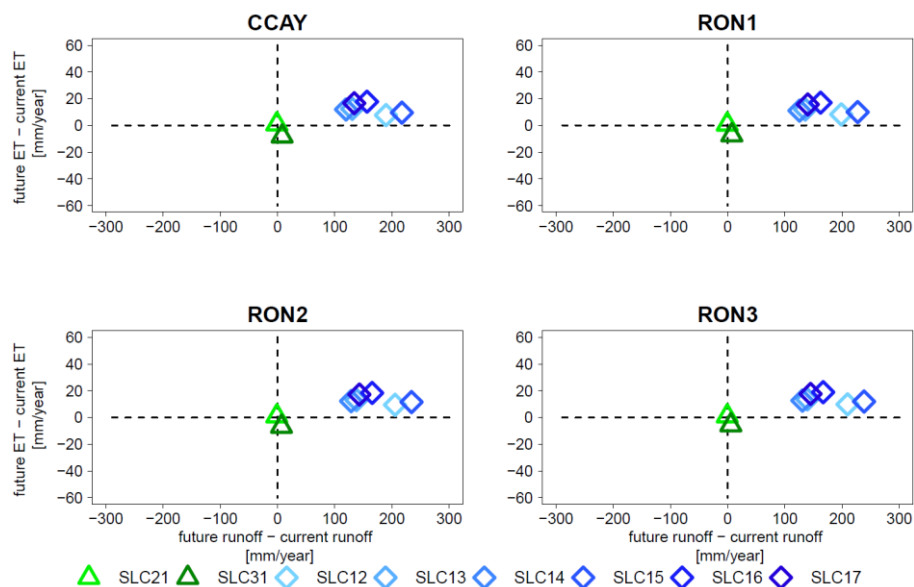


Figura 10. Cambios proyectados en la escorrentía (eje x; mm/año) y evapotranspiración (eje y; mm/año) media anual para el escenario actual, cambio de uso de suelo y cambio climático. Se muestran los resultados para cada subcuenca de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Valores acumulados medios anuales de flujos y estados para las cuatro cuencas principales de estudio.

ESCENARIOS	CCAY					RON1					RON2					RON3				
	ET	GWQ	SURQ	SW	WYLD	ET	GWQ	SURQ	SW	WYLD	ET	GWQ	SURQ	SW	WYLD	ET	GWQ	SURQ	SW	WYLD
SLC11	390	488	224	28591	805	378	534	237	29352	855	391	558	240	30782	891	385	577	229	30798	912
SLC21	391	497	212	28500	804	378	542	226	29283	854	392	570	225	30722	890	386	589	213	30748	911
SLC31	381	313	435	27759	813	370	349	454	28522	862	384	364	469	29939	898	380	385	457	29987	918
SLC12	397	560	331	28451	996	386	609	350	29185	1053	401	635	358	30568	1096	395	659	343	30531	1121
SLC13	402	540	294	28592	936	389	589	310	29325	990	404	614	314	30689	1029	399	636	300	30629	1051
SLC14	402	538	285	28662	926	389	587	301	29376	980	403	612	307	30716	1019	398	634	293	30644	1042
SLC15	399	570	347	28421	1024	388	620	367	29152	1082	403	646	374	30526	1125	397	670	359	30482	1150
SLC16	407	550	309	28698	962	395	599	325	29424	1017	410	624	330	30781	1056	404	647	315	30701	1079
SLC17	406	543	294	28714	940	393	593	310	29431	994	408	617	315	30758	1034	403	639	301	30680	1056
SLC22	398	571	316	28347	995	387	619	337	29102	1052	402	650	338	30469	1095	396	674	323	30441	1120
SLC23	403	551	280	28490	935	390	599	297	29240	989	405	629	295	30585	1027	400	650	281	30533	1050
SLC24	398	538	245	27434	929	386	591	261	28146	983	401	618	259	29435	1022	396	625	250	29493	1044
SLC25	400	582	331	28317	1023	388	630	353	29068	1081	404	662	354	30423	1124	399	686	338	30386	1149
SLC26	408	561	294	28596	961	395	609	312	29338	1016	411	639	310	30672	1055	406	662	295	30599	1077
SLC27	407	554	280	28613	939	394	602	297	29346	994	410	632	296	30653	1032	404	654	282	30581	1055
SLC32	389	351	581	27591	1004	378	388	608	28332	1061	393	404	629	29736	1103	389	428	616	29770	1127
SLC33	393	340	535	27220	945	382	377	558	28475	998	397	393	574	29871	1036	393	416	560	29882	1058
SLC34	393	339	526	27777	935	381	376	549	28509	988	396	392	566	29883	1027	392	415	553	29882	1049
SLC35	390	357	600	27439	1033	380	394	628	28176	1090	395	410	649	29573	1133	391	433	636	29613	1157
SLC36	398	345	556	27792	971	387	382	579	28543	1025	402	398	596	29938	1064	398	421	582	29936	1086
SLC37	397	341	538	27809	949	385	379	561	28546	1003	400	394	578	29912	1042	396	417	565	29913	1064

Nota: Los escenarios de cambio de uso de suelo, cambio climático, y cambios combinados son representados por los colores establecidos en la Tabla 4.

Fuente: Elaboración propia

4 DISCUSIÓN

4.1 Incertidumbre en la simulación y limitaciones

La evaluación de los impactos del cambio climático y uso de suelo en los recursos hídricos, implica varias fuentes de incertidumbre que pueden ser producto de: (i) los datos de entrada al modelo hidrológico (McMillan et al., 2011; Renard et al., 2010), (ii) las decisiones en las opciones metodológicas al momento de realizar la modelación hidrológica (Addor et al., 2014; Chegwidan et al., 2019; Dwarakish & Ganasri, 2015; Hattermann et al., 2018; Pelorosso et al., 2009; Saavedra et al., 2022), y (iii) errores al momento de elegir el modelo hidrológico a utilizar, este último, es debido a que mayormente la elección de un modelo hidrológico es basada en el legado y no la idoneidad (Addor & Melsen, 2019). En esta investigación utilizamos el modelo hidrológico SWAT, porque ha logrado representar adecuadamente los procesos hidrológicos más relevantes en la cuenca y porque ha sido utilizado en diversas investigaciones con objetivos similares a este estudio (Afonso de Oliveira Serrão et al., 2022; Chen et al., 2019; Morán-Tejeda et al., 2015; Osei et al., 2019; Wang & Stephenson, 2018).

El conjunto de parámetros ha sido seleccionado en base a la calibración con el paquete R-SWAT, que en su versión actual solo incluye pocas funciones objetivo configuradas en el mismo paquete y no permite agregar otra función objetivo, dado que esto podría mejorar los resultados de la modelación o permitir la aplicación de alguna estrategia de calibración. La ejecución del modelo es basada en el mapa de uso de suelo obtenido para el año 2019 y para la estación de invierno, lo que podría causar errores en sobreestimar o subestimar los resultados obtenidos para algunos años, lo que aumenta la incertidumbre en los resultados de ET y SM, principalmente en los cambios de estación del año.

Una gran limitación al momento de realizar evaluaciones de impacto de cambio climático y cambio de uso de suelo en cuencas altoandinas peruanas, es la falta de datos meteorológicos e hidrológicos, el cual, ha sido reportado en muchas investigaciones (Lavado Casimiro et al., 2011; Llauca et al., 2021; Saavedra et al., 2022). En este caso, considerando que el área de estudio está en el marco de un proyecto MERESE, se vuelve mucho mayor este desafío, debido a que en la gran mayoría de estas áreas de intervención solo se cuentan con pocos años de registros de datos meteorológicos y mucho menos de datos hidrológicos. Nosotros utilizamos la base de datos del Sistema de Monitoreo Ecohidrológico de Rontoccocha que posee datos de registro de 6 años aproximadamente y lo extendemos a 20 años utilizando la base de datos PISCO de precipitación y temperaturas máximas y mínimas (Aybar et al., 2020; Millán-Arancibia & Lavado-Casimiro, 2023; Huerta, 2022a; Huerta, 2022b), obteniendo muy buenos resultados. En general, a pesar de las limitaciones y fuentes de incertidumbres encontradas, logramos representar correctamente el comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio y los datos de caudal observados con el modelo hidrológico SWAT.

4.2 Impacto del cambio de Uso de Suelo en la hidrología

El cambio de uso de suelo es uno de los factores impulsores más cruciales que afecta el sistema hidrológico, la estructura de la superficie terrestre, y flujos de materiales y energía (Hasan et al., 2020; Wu et al., 2015). Los efectos que producen son diversos y sus magnitudes están en función de las propiedades de la cuenca, la vegetación original y de reemplazo, y el tipo de manejo (Ochoa-Tocachi et al., 2016). Bonnesoeur et al. (2019), muestra que existe un consenso en que cuencas con plantaciones con especies exóticas y en menor medida con bosques naturales presentan una disminución del rendimiento hídrico entre el 20 al 45 %, en comparación con cuencas con uso no forestal. Esto es probablemente debido a que los bosques transpiran más que los pastizales y que las tasas de infiltración mejoran considerablemente cuando los suelos degradados son reemplazados por bosques. Resultados similares fueron encontrados por (Ochoa-Tocachi et al., 2016), donde encontraron que las forestaciones con pinos disminuyen el coeficiente de escorrentía en una cuenca.

(Wongchuig et al., 2023) evalúan los componentes del balance hídrico superficial entre un área de experimento de deforestación al 2050 y otra de control, ellos encontrando que, en términos de almacenamiento del agua terrestre, el área deforestada permanece más húmedo en comparación con el área no deforestada, con valores de +68.7 y +5.5 mm/año, respectivamente, esto debido principalmente a la disminución en ET y aumento en P. Asimismo, se logra encontrar que el aumento de las superficies impermeables (por ejemplo, reducción de áreas forestadas, pastizales y bofedales) producen un aumento significativo de la escorrentía superficial y una reducción de la evapotranspiración y del agua subterránea (Awotwi et al., 2019; Paiva et al., 2023; Bonnesoeur et al. (2019). Por otro lado, la pérdida de bofedales produce efectos negativos en la regulación de flujo en arroyos perennes en la puna húmeda (Wunderlich et al., 2023).

En nuestro caso, consideramos dos escenarios de cambio de uso de suelo, donde nuestros resultados han sido consistentes con los resultados encontrados en las investigaciones antes citadas, es decir, los cambios encontrados con el escenario de forestación es el incremento del ET y GWQ, y disminución de SURQ, SW y WYLD, y de forma contrario con el escenario pesimista, con excepción de SW que muestra una disminución (ver Figura 6 y Tabla 5). Destacamos principalmente que el escenario pesimista es el que produce los cambios más significativos en el proceso hidrológico en comparación con el escenario proyectado del MERESE al 2050, donde los cambios que este produce son muy poco relevantes. Este cambio puede ser debido a que el área de forestación que se proyecta al 2050 no es lo suficientemente grande para producir cambios relevantes.

4.3 Proyecciones del cambio climático e impactos en la hidrología

En este estudio las proyecciones climáticas son representadas por la mediana y los percentiles 5 % y 95 % del conjunto de GCM para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. La precipitación presenta una tendencia clara al incremento en todos los meses, con excepción de algunos meses en el periodo seco. Por otro lado, las temperaturas máximas y mínimas coinciden en presentar una tendencia al incremento en todos los meses. Estos resultados son similares a los encontrados en el Atlas de producción de agua en el Perú (Huerta & Lavado-Casimiro, 2021), donde evalúa la influencia del

cambio climático en la capacidad de producción del agua actual con énfasis en las cuencas tributarias de las EPS a nivel nacional. Ellos encuentran que en la cuenca tributaria de la laguna de Rontoccocha, la escorrentía tiene una señal de cambio de no coincidencia, debido a que de los tres GCM utilizados para evaluar el cambio climático, uno presenta disminución (-16 % - ACCESS 1.0) y los otros dos presentan incremento (+20 % y +3 % - HadGEM2-ES, y MPI-ESM-LR, respectivamente). Estos resultados que presentan gran variabilidad pueden ser producto de varios factores, entre los que se destaca: (i) uso de solo tres GCM para representar el cambio climático en todo el Perú, y (ii) falta de aplicación de una metodología para la selección de los GCM que mejor represente el comportamiento histórico de la hidrología en la cuenca. En nuestro caso, utilizamos 31 GCM para la precipitación y 28 GCM para la temperatura máxima y mínima, y aplicamos la metodología de cambios delta en la mediana y percentiles del 5 % y 95 %, lo que nos permiten tener una mayor representación del comportamiento del conjunto GCM, asimismo, obtener resultados más robustos. En base a lo indicado, en este estudio encontramos que los cambios en incremento que se esperan en las variables de precipitación y temperatura, van a producir el incremento en los flujos y estados de ET, GWQ, SURQ y WYLD, y disminución de SW. Estos cambios son producto del incremento en la cantidad de agua que ingresa a la cuenca y el incremento del poder de evaporación dado por el incremento en las temperaturas.

4.4 Impactos combinados del cambio climático y cambio de uso de suelo en la hidrología

En este estudio también se determinó los impactos combinados del cambio de uso de suelo y cambio climático en los procesos hidrológico (ver Figura 8 y Tabla 5). Los resultados muestran que existe una interacción entre el cambio de uso de suelo y el cambio climático. Los porcentajes de cambios mensuales en el caudal (ver Figura 8) dependen del escenario del cambio de uso de suelo utilizado, es decir, al combinar el escenario de cambio de uso de suelo SLC21 con los escenarios de cambio climático, no se presentan efectos relevantes en los caudales medios mensuales, haciendo que los porcentajes de cambio son principalmente dependientes de los escenarios de cambio climático. En cambio, al combinar el escenario de uso de suelo SLC31 con los escenarios de cambio climático, se muestra un comportamiento diferente en los caudales medios mensuales, producto del efecto de escenario de cambio de uso de suelo pesimista, haciendo que los porcentajes de cambio depende de la interacción de ambos escenarios de cambio, es decir, se observa una ligera disminución en los caudales entre los meses de abril a julio en comparación con los otros meses.

En los flujos y estados (ver Tabla 5) encontramos que la combinación de los escenarios de cambio climático con el escenario cambio de uso de suelo proyectado del MERESE al 2050 produce que se incrementen los valores medios anuales de las variables de ET, GWQ, SURQ y WYLD, y disminuya los valores medio anuales de SW. Pero en el caso de la combinación de los escenarios de cambio climático con el escenario de uso de suelo pesimista se observa mayormente una disminución en los valores medios anuales en las variables de ET, GWQ y SW, y un incremento en los valores medios anuales en las variables de SURQ y WYLD. Estos resultados, demuestran que existe una interacción e influencia notoria entre los escenarios de cambio de uso de suelo y cambio climático.

4.5 Importancia del MERESE en los Servicios Ecosistémicos considerando escenarios cambiantes

Los SE contribuyen significativamente al bienestar humano, siendo algunos esenciales y no tienen sustitutos, y casi todos son cada vez más escasos (Farley & Costanza, 2010; Grizzetti et al., 2016). Los PSE surgen como una forma popular de gestionar estos SE mediante incentivos económicos, debido a que las prestaciones de los SE tienen costos reales y deben desarrollarse mecanismos reales para ser sustentados (Farley & Costanza, 2010). En el caso del Perú, desde hace pocos años los PSE son implementados mediante los MERESE, que han sido construidos principalmente con los objetivos de recuperar los SE para la regulación hídrica, control de erosión de suelos y calidad del agua (Tristán et al., 2022).

Hasta el año 2020 en el Perú se identificó un total de 52 iniciativas de implementación del MERESE (con una clara tendencia al incremento) ejecutadas principalmente por las EPS (Tristán et al., 2022). La falta de evidencia científica para comprender el funcionamiento de los servicios ecosistémicos hídricos en las áreas de implementación de los MERESE es un desafío latente y hasta la fecha no ha sido abordado en su integridad, y más aún al momento de formular proyectos orientados a la conservación, la recuperación y el uso sostenible de los ecosistemas (Tristán et al., 2022). Según Qiu et al., (2019), no existe solución o práctica única para enfrentar desafíos futuros, especialmente bajo condiciones de climas cambiantes, siendo una mejor estrategia la de integrar diferentes prácticas de adaptación que deban ser evaluado considerando cada situación en particular.

En este estudio, abordamos este desafío considerando escenarios de cambio de uso de suelo, cambio climático y cambios combinados en un área de intervención del MERESE ubicado en una zona altoandina peruana. En los escenarios de uso de suelo, se considera un escenario de forestación del MERESE proyectado al 2050, y un escenario pesimista. Los resultados evidencian que el escenario de forestación va producir cambios poco relevantes en el proceso hidrológico, en comparación con el escenario pesimista, donde los cambios son significativamente desfavorables (ver Figura 5 y Tabla 5). Los resultados obtenidos del escenario de forestación pueden ser producto del comportamiento hidrológico de la cuenca, el tamaño del área de estudio y la extensión que representa la forestación proyectada al 2050 en el área de la cuenca. Pero en aspectos hídricos, podemos determinar que la forestación no aporta de forma significativa en nuestra cuenca de estudio, provocando que se deba reevaluar las intervenciones que se proyectan realizar con el MERESE. Una alternativa más adecuada y mucho más rentable que la forestación, sería la conservación y protección de los ecosistemas (por ejemplo, construcción de cercos perimétricos, siembra de pastizales y etc.), debido a que también representa costos menores que otras alternativas de intervención realizadas por el MERESE. Resultados similares, son también encontrados por (Cervantes Zavala, 2022), donde concluyen que, en la Unidad Hidrográfica de Rontoccocha los ecosistemas de bofedal y pajonal son más eficientes que el bosque de *Polylepis*, con respecto al almacenamiento y generación del servicio ecosistémico de regulación hídrica por unidad de área.

Los escenarios de cambio climático y cambio combinado muestran que se va a presentar un incremento en los valores de los caudales y en todas las variables de flujos y estados analizadas en nuestra área de estudio con excepción de SW en algunos escenarios, lo que, representa mayor disponibilidad hídrica en el futuro principalmente en los periodos de lluvia. Este resultado, nos conduce a reevaluar las intervenciones que se están priorizando por el MERESE como, por ejemplo, priorizar las intervenciones que aporten a la regulación hídrica mediante el incremento en los almacenamientos de agua, asimismo, intervenciones que aporte al control de sedimentos como consecuencia del incremento de la escorrentía superficial.

En general, estos resultados también aportan a la gestión de los recursos hídricos, considerando el hecho que la cuenca de estudio suministra de agua para los usos de consumo humano y de riego. Pudiendo aportar a las siguientes implicaciones:

i. Planificación del manejo de cuencas

Los resultados encontrados en este estudio van a apoyar a la planificación de la gestión de la cuenca de Rontoccocha. Porque, el comprender como los impactos de cambio de uso de suelo, cambio climático y cambios combinados afectan los procesos hidrológicos, nos permiten identificar las áreas vulnerables que deben ser priorizadas en el MERESE que actualmente es implementado por la EPS EMUSAP ABANCAY. Asimismo, estos resultados permiten evaluar que intervenciones son las más adecuadas para esta área de estudio, en relación a la forestación, conservación de suelos y control de erosión, con el objetivo de que esto pueda mantener o mejorar la calidad del agua, regular el caudal de los ríos y reducir el riesgo de desastres relacionados con el agua.

ii. Políticas y regulaciones de uso de la tierra

El MERESE en el Perú es una experiencia exitosa en la conservación de los ecosistemas andinos a nivel de Sudamérica, que ha sido posible gracias a la aplicación de diversas políticas y normativas a nivel nacional, pero siempre se ha tenido bastante incertidumbre sobre su efectividad e impactos en los recursos hídricos de las intervenciones que actualmente se vienen realizando. En ese sentido, los resultados de este estudio van a ayudar a tener mayor evidencia que sirva para mejorar las políticas existentes nacionales y locales. En este estudio se destaca que la forestación no siempre es la mejor alternativa para mejorar la regulación hídrica, por ello, se deben evaluar otras alternativas que sean más eficientes en términos hídricos y económico, por ejemplo, la conservación de protección de ecosistemas surge como una alternativa más sostenible y eficiente (por ejemplo, construcción de cercos perimétricos, siembra de pastizales y etc.). Este resultado podría fomentar la creación de políticas de prácticas adecuadas de gestión de la tierra.

iii. Participación y colaboración de las partes interesadas

El MERESE es construido en base a un acuerdo entre los contribuyentes (comunidades campesinas) y retribuyentes (EPS), que permite que estos dos actores construyan una relación de colaboración y apoyo mutuo. Pero es importante resalta que el éxito en la firma del acuerdo entre los contribuyentes y retribuyentes es logrado gracias a la Plataforma de Buena Gobernanza, que es un grupo impulsor conformado por

representantes de entidades públicas, privadas, organizaciones no gubernamentales y universidades. La plataforma consiste en un espacio donde se establecen acuerdos y promueven inversiones a favor del manejo sostenible de los ecosistemas, donde se prioriza la participación activa de sus participantes. Los resultados obtenidos en este estudio, van a apoyar que los espacios de dialogo desarrollados en la plataforma sean más objetivos y en base a evidencia científica.

5 CONCLUSIONES

En esta investigación, se evaluó los impactos del cambio de uso de suelo y cambio climático en las respuestas hidrológicas en el área de intervención del programa MERESE que es implementado por la EPS EMUSAP ABANCAY en la cabecera de cuenca del río Mariño, a fin de determinar la relevancia de este programa en un contexto de escenarios cambiantes. El estudio fue desarrollado en las cuencas de Rontoccocha y Ccayllahuasi que son las áreas de recarga hídrica de las principales fuentes de agua utilizadas para el consumo población y de riego de la ciudad de Abancay. Utilizamos el modelo SWAT que es configurado, calibrado y validado con los datos del Sistema de Monitoreo Ecohidrológico de Rontoccocha (SMEHR) y con la base de datos PISCO. Construimos un total de 21 escenarios individuales y combinados de cambio de uso de suelo y cambio climático, que son ejecutados en el modelo SWAT. Los principales hallazgos son detallados a continuación:

- A pesar de los escasos datos hidrológicos y meteorológicos existentes en el área de estudio, se ha logrado representar el comportamiento hidrológico en las cuencas de estudio y obtener buenos resultados entre los caudales observados y simulados, llegando alcanzar muy buenos rendimientos, por ejemplo, KGE de 0.90 en el periodo de calibración y 0.76 en el periodo de validación.
- El impacto en el cambio de uso de suelo en las respuestas hidrológicas muestra que el escenario SLC21 presenta cambios muy poco significativos con respecto al escenario SLC11 en las variables de Q, ET, GWQ, SURQ, SW y WYLD, llegando a representar que la forestación en la cuenca estudiada no sería relevante en términos hidrológicos. Sin embargo, el escenario SLC31, presenta cambios significativos con respecto al escenario SLC11, donde en el promedio de los caudales medios mensuales se observa un incremento del caudal de hasta el 11 % en el periodo húmedo y una disminución de hasta el -11 % en el periodo seco, lo que representa un incremento de hasta 1 % de la escorrentía media anual. En los flujos y estados, se observa un incremento de SURQ y WYLD, y disminución de ET, GWQ y SW. En cambio, el impacto de cambio climático en las respuestas hidrológicas muestra que se va presentar incrementos en los caudales medios mensuales, con los valores más altos de los caudales medios mensuales en el mes de diciembre de hasta un 35 %, lo que representa un incremento de hasta 26 % de la escorrentía media anual. Estos incrementos también se presentan en todas las variables de flujos y estados con excepción de SW en algunos escenarios.
- En el impacto de cambios combinados en las respuestas hidrológicas muestra que existe una interacción entre el cambio de uso de suelo y cambio climáticos, donde el comportamiento de los porcentajes de los cambios mensuales del caudal depende del escenario de uso de suelo utilizado. Es decir, al combinar el escenario de uso de suelo SLC21 con los escenarios de cambio climático, el porcentaje de cambio depende principalmente de los escenarios de cambio climático debido a que el escenario SLC21 produce cambios poco significativos, y en cambio, al combinar el escenario de uso de suelo SLC31 con los escenarios de cambio

climático, el porcentaje de cambio depende de la interacción de ambos escenarios debido a que ambos escenarios producen cambios significativos.

- En general, se ha identificado que el escenario de forestación va producir cambios poco relevantes en los procesos hidrológicos, en comparación con el escenario pesimista, donde los cambios son significativamente desfavorables. En ese sentido, podemos determinar que en aspectos hídricos la forestación no aporta de forma significativa en nuestra cuenca de estudio. Este resultado nos permite comprender que en el contexto del MERESE una alternativa más adecuada de intervención podría ser la conservación y protección del ecosistema, como, por ejemplo, construcción de cercos perimétricos, siembra de pastizales y etc. En cambio, los escenarios de cambio climático y cambio combinado, muestran que en el futuro se va a presentar una mayor disponibilidad hídrica, lo que, implicaría reevaluar las intervenciones que deberían ser priorizadas por el MERESE en la EPS EMUSAP ABANCAY.

6 REFERENCIAS

- Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., & van Genuchten, M. Th. (2004). Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340-1352. <https://doi.org/10.2113/3.4.1340>
- Addor, N., & Melsen, L. A. (2019). Legacy, Rather Than Adequacy, Drives the Selection of Hydrological Models. *Water Resources Research*, 55(1), 378-390. <https://doi.org/10.1029/2018WR022958>
- Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R., & Seibert, J. (2014). Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments. *Water Resources Research*, 50(10), 7541-7562. <https://doi.org/10.1002/2014WR015549>
- de Oliveira, E.A., Silva, M. T., Ferreira, T. R., Paiva, L. C., Dos Santos, C., Meiguins, A. M., da Silva, V. P.R, de Assis Salviano, F., & Cardoso, D. J. (2022). Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. *International Journal of Sediment Research*, 37(1), 54-69. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.04.002>
- Aghsaei, H., Mobarghaee Dinan, N., Moridi, A., Asadolahi, Z., Delavar, M., Fohrer, N., & Wagner, P. D. (2020). Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran. *Science of The Total Environment*, 712, 136449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136449>
- Alam, M. (2018). Ecological and economic indicators for measuring erosion control services provided by ecosystems. *Ecological Indicators*, 95, 695-701. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.052>
- Anand, J., Gosain, A. K., Khosa, R., & Srinivasan, R. (2018). Regional scale hydrologic modeling for prediction of water balance, analysis of trends in streamflow and variations in streamflow: The case study of the Ganga River basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 16, 32-53. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.007>
- Andres, N., Vegas Galdos, F., Lavado Casimiro, W. S., & Zappa, M. (2014). Water resources and climate change impact modelling on a daily time scale in the Peruvian Andes. *Hydrological Sciences Journal*, 59(11), 2043-2059. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.862336>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. doi: 10.13031/2013.42256
- Asurza-Véliz, F. A., & Lavado-Casimiro, W. S. (2020). Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage. *Water*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/w12113198>
- Awotwi, A., Anornu, G. K., Quaye-Ballard, J. A., Annor, T., Forkuo, E. K., Harris, E., Agyekum, J., & Terlabie, J. L. (2019). Water balance responses to land-use/land-cover changes in the Pra River Basin of Ghana, 1986–2025. *CATENA*, 182, 104129. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104129>
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day.

- Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770-785.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Bağçacı, S. Ç., Yucel, I., Duzenli, E., & Yilmaz, M. T. (2021). Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, 256, 105576. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105576>
- Bhatta, L. D., van Oort, B. E. H., Rucevska, I., & Baral, H. (2014). Payment for ecosystem services: Possible instrument for managing ecosystem services in Nepal. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 10(4), 289-299. <https://doi.org/10.1080/21513732.2014.973908>
- Bonnesoeur, V. V., Locatelli, B., & Ochoa-Tocachi, B. (2019). Impactos de la Forestación en el Agua y los Suelos de los Andes: ¿Qué sabemos?. Resumen de políticas. *Forest Trends*.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Célleri, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., & Villacís, M. (2012). Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de ecosistemas Andinos. *Iniciativa iMHEA*.
- Cervantes Zavala, R. (2022). *Costo efectividad del manejo de ecosistemas altoandinos en la regulación hídrica de la unidad hidrográfica de Rontoccocha, Abancay, Apurímac* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5180>
- Chegwidden, O. S., Nijssen, B., Rupp, D. E., Arnold, J. R., Clark, M. P., Hamman, J. J., Kao, S.-C., Mao, Y., Mizukami, N., Mote, P. W., Pan, M., Pytlak, E., & Xiao, M. (2019). How Do Modeling Decisions Affect the Spread Among Hydrologic Climate Change Projections? Exploring a Large Ensemble of Simulations Across a Diversity of Hydroclimates. *Earth's Future*, 7(6), 623-637. <https://doi.org/10.1029/2018EF001047>
- Chen, Q., Chen, H., Wang, J., Zhao, Y., Chen, J., & Xu, C. (2019). Impacts of Climate Change and Land-Use Change on Hydrological Extremes in the Jinsha River Basin. *Water*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071398>
- Corvalán, C., Hales, S., McMichael, A. J. (Eds.). (2005). *Ecosystems and human well-being: Health synthesis*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9241563095>
- Derissen, S., & Latacz-Lohmann, U. (2013). What are PES? A review of definitions and an extension. *Ecosystem Services*, 6, 12-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.002>
- Dextre, R. M., Eschenhagen, M. L., Hernández, M. C., Rangelcroft, S., Clason, C., Couldrick, L., & Morera, S. (2022). Payment for ecosystem services in Peru: Assessing the socio-ecological dimension of water services in the upper Santa River basin. *Ecosystem Services*, 56, 101454. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101454>
- Dhakal, K., Kakani, V. G., & Linde, E. (2018). Climate Change Impact on Wheat Production in the Southern Great Plains of the US Using Downscaled Climate Data. *Atmospheric and Climate Sciences*, 8(2). <https://doi.org/10.4236/acs.2018.82011>
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M., Ash, N., Larigauderie, A., Adhikari, J. R., Arico, S., Báldi, A., Bartuska, A., Baste, I. A., Bilgin, A., Brondizio, E., Chan, K. M., Figueroa, V. E., Duraiappah, A., Fischer, M., Hill, R., ... Zlatanova, D. (2015). The IPBES Conceptual

- Framework—Connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
- Doornbos, B. (2015). El valor de los bosques andinos en asegurar agua y suelo en un contexto de creciente riesgo climático: ¿(re) conocemos lo imperdible?. Helvetas.
- Decreto Supremo N.º 009-2016-MINAM. (2016, julio 21). *Aprueban Reglamento de la Ley N° 30215. Ley de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos*.
<https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/317526-009-2016-minam>
- Dwarakish, G.S. & Ganasri, B.P. (2015). Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geoscience*, 1(1), 1-18.
<https://doi.org/10.1080/23312041.2015.1115691>
- Farley, J., & Costanza, R. (2010). Payments for ecosystem services: From local to global. *Ecological Economics*, 69(11), 2060-2068. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.06.010>
- Ficklin, D. L., Stewart, I. T., & Maurer, E. P. (2013). Climate Change Impacts on Streamflow and Subbasin-Scale Hydrology in the Upper Colorado River Basin. *PLOS ONE*, 8(8), 1-17.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071297>
- Goyburo, A., Rau, P., Lavado-Casimiro, W., Buytaert, W., Cuadros-Adriazola, J., & Horna, D. (2023). Assessment of Present and Future Water Security under Anthropogenic and Climate Changes Using WEAP Model in the Vilcanota-Urubamba Catchment, Cusco, Perú. *Water*, 15(7), 1-20.
<https://doi.org/10.3390/w15071439>
- Grima, N., Singh, S. J., Smetschka, B., & Ringhofer, L. (2016). Payment for Ecosystem Services (PES) in Latin America: Analysing the performance of 40 case studies. *Ecosystem Services*, 17, 24-32.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.010>
- Grizzetti, B., Lanzanova, D., Liqueste, C., Reynaud, A., & Cardoso, A. C. (2016). Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy*, 61, 194-203. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.008>
- Hasan, S. S., Zhen, L., Miah, Md. G., Ahamed, T., & Samie, A. (2020). Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development*, 34, 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100527>
- Hattermann, F. F., Vetter, T., Breuer, L., Su, B., Daggupati, P., Donnelly, C., Fekete, B., Flörke, F., Gosling, S. N., Hoffmann, P., Liersch, S., Masaki, Y., Motovilov, Y., Müller, C., Samaniego, L., Stacke, T., Wada, Y., Yang, T., & Krysnova, V. (2018). Sources of uncertainty in hydrological climate impact assessment: A cross-scale study. *Environmental Research Letters*, 13(1), 1-14.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9938>
- Huerta, A. (2022a). Maximum temperature (PISCOT v1.2). figshare. Dataset.
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20522806.v2>
- Huerta, A. (2022b). Minimum temperature (PISCOT v1.2). figshare. Dataset.
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20533715.v2>
- Huerta, A., & Lavado-Casimiro, W. (2021). *Atlas de producción de agua en el Perú: Una evaluación presente y futura con énfasis en las cuencas de aporte de la EPS*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Senamhi.
<http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1610>

- Immerzeel, W., Stoorvogel, J., & Antle, J. (2008). Can payments for ecosystem services secure the water tower of Tibet? *Agricultural Systems*, 96(1), 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.05.005>
- Kay, S., Graves, A., Palma, J. H. N., Moreno, G., Roces-Díaz, J. V., Aviron, S., Chouvardas, D., Crous-Duran, J., Ferreiro-Domínguez, N., García de Jalón, S., Măcicășan, V., Mosquera-Losada, M. R., Pantera, A., Santiago-Freijanes, J. J., Szerencsits, E., Torralba, M., Burgess, P. J., & Herzog, F. (2019). Agroforestry is paying off – Economic evaluation of ecosystem services in European landscapes with and without agroforestry systems. *Ecosystem Services*, 36, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100896>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Lavado Casimiro, W. S., Labat, D., Guyot, J. L., & Ardoin-Bardin, S. (2011). Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Peruvian Amazon–Andes basin. *Hydrological Processes*, 25(24), 3721-3734. <https://doi.org/10.1002/hyp.8097>
- Llauca, H., Lavado-Casimiro, W., Montesinos, C., Santini, W., & Rau, P. (2021). PISCO_HyM_GR2M: A Model of Monthly Water Balance in Peru (1981–2020). *Water*, 13(8), 3-19. <https://doi.org/10.3390/w13081048>
- Lopes Simedo, M. B., Pissarra, T. C. T., Mello Martins, A. L., Lopes, M. C., Araújo Costa, R. C., Zanata, M., Pacheco, F. A. L., & Fernandes, L. F. S. (2020). The Assessment of Hydrological Availability and the Payment for Ecosystem Services: A Pilot Study in a Brazilian Headwater Catchment. *Water*, 12(10), 1-22. <https://doi.org/10.3390/w12102726>
- Lun, Y., Liu, L., Cheng, L., Li, X., Li, H., & Xu, Z. (2021). Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 41(7), 3994-4018. <https://doi.org/10.1002/joc.7055>
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Abreu, N. J., Stehr, A., Duran-Llacer, I., Rodríguez-López, L., Sauvage, S., & Sánchez-Pérez, J.-M. (2021). Estimation of the Climate Change Impact on the Hydrological Balance in Basins of South-Central Chile. *Water*, 13(6), 1-20. <https://doi.org/10.3390/w13060794>
- McMillan, H., Jackson, B., Clark, M., Kavetski, D., & Woods, R. (2011). Rainfall uncertainty in hydrological modelling: An evaluation of multiplicative error models. *Journal of Hydrology*, 400(1), 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.026>
- Millán-Arancibia, C., & Lavado-Casimiro, W. (2023). Rainfall thresholds estimation for shallow landslides in Peru from gridded daily data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(3), 1191-1206. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1191-2023>
- Monge-Salazar, M. J., Tovar, C., Cuadros-Adriazola, J., Baiker, J. R., Montesinos-Tubée, D. B., Bonnesoeur, V., ... & Buytaert, W. (2022). Ecohydrology and ecosystem services of a natural and an artificial bofedal wetland in the central Andes. *Science of The Total Environment*, 838, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155968>
- Morán-Tejeda, E., Zabalza, J., Rahman, K., Gago-Silva, A., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S., Lehmann, A., Tague, C. L., & Beniston, M. (2015). Hydrological impacts of climate and land-use changes in a mountain watershed: Uncertainty estimation based on model comparison. *Ecohydrology*, 8(8), 1396-1416. <https://doi.org/10.1002/eco.1590>

- Nguyen, T. V., Dietrich, J., Dang, T. D., Tran, D. A., Van Doan, B., Sarrazin, F. J., Abbaspour, K., & Srinivasan, R. (2022). An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling & Software*, *156*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105497>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, *30*(22), 4074-4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Oliveira Fiorini, A. C., Mullally, C., Swisher, M., & Putz, F. E. (2020). Forest cover effects of payments for ecosystem services: Evidence from an impact evaluation in Brazil. *Ecological Economics*, *169*, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106522>
- Osei, M. A., Amekudzi, L. K., Wemegah, D. D., Preko, K., Gyawu, E. S., & Obiri-Danso, K. (2019). The impact of climate and land-use changes on the hydrological processes of Owabi catchment from SWAT analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *25*, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100620>
- Ougahi, J. H., Karim, S., & Mahmood, S. A. (2022). Application of the SWAT model to assess climate and land use/cover change impacts on water balance components of the Kabul River Basin, Afghanistan. *Journal of Water and Climate Change*, *13*(11), 3977-3999. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.261>
- 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), 1-10. <https://doi.org/10.3390/rs15245774>
- Pelorosso, R., Leone, A., & Boccia, L. (2009). Land cover and land use change in the Italian central Apennines: A comparison of assessment methods. *Applied Geography*, *29*(1), 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.07.003>
- Perevochtchikova, M., Castro-Díaz, R., Langle-Flores, A., & Von Thaden Ugalde, J. J. (2021). A systematic review of scientific publications on the effects of payments for ecosystem services in Latin America, 2000-2020. *Ecosystem Services*, *49*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101270>
- Pham, H. V., Sperotto, A., Torresan, S., Acuña, V., Jorda-Capdevila, D., Rianna, G., Marcomini, A., & Critto, A. (2019). Coupling scenarios of climate and land-use change with assessments of potential ecosystem services at the river basin scale. *Ecosystem Services*, *40*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101045>
- Qiu, J., Shen, Z., Leng, G., Xie, H., Hou, X., & Wei, G. (2019). Impacts of climate change on watershed systems and potential adaptation through BMPs in a drinking water source area. *Journal of Hydrology*, *573*, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.074>
- Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Thyer, M., & Franks, S. W. (2010). Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, *46*(5). <https://doi.org/10.1029/2009WR008328>
- 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>
- Saavedra, D., Mendoza, P. A., Addor, N., Llauca, H., & Vargas, X. (2022). A multi-objective approach to select hydrological models and constrain structural uncertainties for climate impact assessments. *Hydrological Processes*, 36(1), 1-24. <https://doi.org/10.1002/hyp.14446>
- Scullion, J., Thomas, C. W., Vogt, K. A., Pérez-Maqueo, O., & Logsdon, M. G. (2011). Evaluating the environmental impact of payments for ecosystem services in Coatepec (Mexico) using remote sensing and on-site interviews. *Environmental Conservation*, 38(4), 426-434. <https://doi.org/10.1017/S037689291100052X>
- Silvestri, S., Zaibet, L., Said, M. Y., & Kifugo, S. C. (2013). Valuing ecosystem services for conservation and development purposes: A case study from Kenya. *Environmental Science & Policy*, 31, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.03.008>
- Son, N. T., Le Huong, H., Loc, N. D., & Phuong, T. T. (2022). Application of SWAT model to assess land use change and climate variability impacts on hydrology of Nam Rom Catchment in Northwestern Vietnam. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 3091-3109. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01295-2>
- Steffen, W., Crutzen, P. J., & McNeill, J. R. (2017). The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? En C. Schlottmann, D. Jamieson, C. Jerolmack, & A. Rademacher (Eds.), *Environment and Society: a reader* (pp. 12-31). New York University Press. <https://doi.org/10.18574/nyu/9781479844746.003.0006>
- Su, K., Wei, D., & Lin, W. (2020). Evaluation of ecosystem services value and its implications for policy making in China – A case study of Fujian province. *Ecological Indicators*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105752>
- Tadesse, W., Whitaker, S., Crosson, W., & Wilson, C. (2015). Assessing the Impact of Land-Use Land-Cover Change on Stream Water and Sediment Yields at a Watershed Level Using SWAT. *Open Journal of Modern Hydrology*, 5(3), 68-85. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2015.53007>
- Tamm, O., Maasikamäe, S., Padari, A., & Tamm, T. (2018). Modelling the effects of land use and climate change on the water resources in the eastern Baltic Sea region using the SWAT model. *CATENA*, 167, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.029>
- Tan, X., Liu, S., Tian, Y., Zhou, Z., Wang, Y., Jiang, J., & Shi, H. (2022). Impacts of Climate Change and Land Use/Cover Change on Regional Hydrological Processes: Case of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.783324>
- Teklay, A., Dile, Y. T., Asfaw, D. H., Bayabil, H. K., & Sisay, K. (2021). Impacts of Climate and Land Use Change on Hydrological Response in Gumara Watershed, Ethiopia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(2), 315-332. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.12.001>
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., & Duffy, P. B. (2012). Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309-3314. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3309-2012>
- Traverso, K. A., Lavado-Casimiro, W., & Felipe-Obando, O. (2022). *Monitoreo hidrológico en tiempo cuasi real en la vertiente del pacífico empleando el modelo hidrológico SWAT, estudio final.*

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
<http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1780>
- Tristán, M. C., Saldaña, S., Francesconi, W. & Quintero, M.(2022). *Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos Hidrológicos: estado de avance, cuellos de botella y aprendizajes de las iniciativas en el Perú*. (Documento de Trabajo n.º 2). Ministerio del Ambiente; Alianza Bioversity International; CIAT.
<http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/1087>
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9(1464).
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>
- Wagner, P. D., Bieger, K., Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2022). Representation of hydrological processes in a rural lowland catchment in Northern Germany using SWAT and SWAT+.
Hydrological Processes, 36(5). <https://doi.org/10.1002/hyp.14589>
- Wang, H., & Stephenson, S. R. (2018). Quantifying the impacts of climate change and land use/cover change on runoff in the lower Connecticut River Basin. *Hydrological Processes*, 32(9), 1301-1312. <https://doi.org/10.1002/hyp.11509>
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., & Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>
- Wongchuig, S., Carlo Espinoza, J., Condom, T., Junquas, C., Sierra, J. P., Fita, L., Sörensson, A., & Polcher, J. (2023). Changes in the surface and atmospheric water budget due to projected Amazon deforestation: Lessons from a fully coupled model simulation. *Journal of Hydrology*, 625, 130082. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130082>
- Wu, F., Zhan, J., Su, H., Yan, H., & Ma, E. (2015). Scenario-Based Impact Assessment of Land Use/Cover and Climate Changes on Watershed Hydrology in Heihe River Basin of Northwest China. *Advances in Meteorology*, 2015, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2015/410198>
- Wunderlich, W., Lang, M., Keating, K., Perez, W. B., & Oshun, J. (2023). The role of peat-forming bofedales in sustaining baseflow in the humid puna. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101394>
- Zarrineh, N., Abbaspour, K. C., & Holzkämper, A. (2020). Integrated assessment of climate change impacts on multiple ecosystem services in Western Switzerland. *Science of The Total Environment*, 708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135212>
- Zhang, C., Li, J., Zhou, Z., & Sun, Y. (2021). Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, 12(10). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106974>
- Zhang, Y., Tang, C., Ye, A., Zheng, T., Nie, X., Tu, A., Zhu, H., & Zhang, S. (2020). Impacts of Climate and Land-Use Change on Blue and Green Water: A Case Study of the Upper Ganjiang River Basin, China. *Water*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/w12102661>