

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca llave bajo
escenarios del cambio climático**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Bach. Katerin Quispe Chahuara
Bach. Celenia Huanca Quispe

Asesor:

Mg. Joel Hugo Fernández Rojas

Lima, octubre de 2021

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

Mg. Joel Hugo Fernández Rojas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA ILAVE BAJO ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO”** constituye la memoria que presenta el los Bachilleres Katerin Quispe Chahuara y Celenia Huanca Quispe para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 18 días del mes de octubre del año 2021.



Joel Hugo Fernández Rojas

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los **15 días** día(s) del mes de **octubre del año 2021** siendo las **8:30 horas**, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga**, el secretario: **Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio**, y los demás miembros: **Mg. Iliana Del Carmen Gutierrez Rodriguez** y el Ing. **Orlando Alan Poma Porras** y el asesor **Mg. Joel Hugo Fernández Rojas**, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca llave bajo escenarios del cambio climático"

de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **KATERIN QUISPE CHAHUARA**

.....b) **CELENIA HUANCA QUISPE**

.conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**

(Nombre del Título profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **KATERIN QUISPE CHAHUARA**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADA	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

Candidato (b): **CELENIA HUANCA QUISPE**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADA	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente
Mg. Milda Amparo
Cruz Huaranga



Asesor
Mg. Joel Hugo
Fernández Rojas



Candidato/a (a)
Katerin

Secretario
Mg. Jackson Edgardo
Pérez Carpio



Miembro
Mg. Iliana del Carmen
Gutierrez Rodriguez

Miembro
Ing. Orlando Alan
Poma Porras



Candidato/a (b)
Celenia

Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca Ilave bajo escenarios del cambio climático

Evaluation of the water availability on the Ilave basin under climate change scenarios

Katerin Quispe Chahuara*^{1,a}, Celenia Huanca Quispe^{1,b}, Joel Hugo Fernández Rojas²

Resumen

Actualmente, los cambios drásticos del clima vienen amenazando la demanda hídrica, aumentando la presión en cantidad y calidad sobre los recursos hídricos disponibles a nivel global. La presente investigación se realizó en el ámbito del altiplano peruano, con el objetivo de evaluar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca Ilave bajo escenarios del cambio climático, con el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), la calibración y validación del modelo SWAT se realizó en un periodo de 30 años (1986 - 2016) utilizando datos climáticos diarios y caudales diarios. Para la evaluación a futuro se adoptaron los datos de los modelos climáticos globales (MCG) MIROC6 y MPI-ESM1-2-LR del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) en los escenarios de trayectoria SSP4.5 y SSP8.5, los datos futuros de los MCG (2025 - 2050) se redujeron de escala en DAWSALING. La precipitación en los escenarios del cambio climático proyecta una disminución de -38.08 mm a -0.29 mm, la mayor disminución de precipitación se da en época de lluvia y se incrementa en época de estiaje, la temperatura máxima aumenta en un 0.06°C y la temperatura mínima disminuye en un -0.20%. En cuanto al caudal se predice una disminución del recurso hídrico en la época de lluvia variando entre -41.2% a 40.0% mientras que para la época seca proyecta un descenso de -33.8% a -0.1%. Es así que las variaciones de temperatura y precipitación se reflejan en el caudal, concluyendo que el recurso hídrico disminuirá en -41.2% para el año 2050.

Palabras clave: Cambio climático, Disponibilidad hídrica, Modelos climáticos globales, SWAT.

Abstract

Currently, drastic changes in the climate are threatening the demand for water, increasing the pressure in quantity and quality on the water resources available globally. This research was carried out in the area of the Peruvian highlands, with the objective of evaluating the availability of water resources in the Ilave basin under climate change scenarios, with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model, the calibration and validation of the model SWAT was conducted over a 30-year period (1986 - 2016) using daily weather data and daily flows. For the future evaluation, the data from the global climate models (MCG) MIROC6 and MPI-ESM1-2-LR of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) were adopted in the trajectory scenarios SSP4.5 and SSP8.5, the Future CGM data (2025-2050) were scaled down in DAWSALING. Precipitation in climate change scenarios projects a decrease from -38.08 mm to -0.29 mm, the greatest decrease in precipitation occurs in the rainy season and increases in the dry season, the maximum temperature increases by 0.06 ° C and the minimum temperature decreases by -0.20%. Regarding the flow, a decrease in the water resource is predicted in the rainy season, varying between -41.2% to 40.0%, while for the dry season it projects a decrease from -33.8% to -0.1%. Thus, the variations in temperature and precipitation are reflected in the flow, concluding that the water resource will decrease by -41.2% by the year 2050.

Keywords: Climate change, Water availability, Global climate models, SWAT.

Autor correspondiente: katerin.qc@upeu.edu.pe

^a Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1215-7534>

^b Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1479-1686>

² Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1761-2818>

Introducción

Uno de los principales problemas actuales que afronta la humanidad debido a los cambios globales del clima son las alteraciones en el sistema hidrológico, las variaciones de temperatura y precipitación impactan directamente en la evapotranspiración, la humedad del suelo, la escorrentía, y en el volumen del flujo del agua superficial. La cuenca del río Ilave ya viene afrontando diversos eventos extremos como sequías e inundaciones que ocasionan pérdida de hectáreas de cultivos, viviendas destruidas, centros educativos afectados y gran parte de la población rural damnificada, esto debido a las variaciones en el proceso hidrológico que es resultado del cambio climático (CC) y afectan negativamente a la población, en el crecimiento económico, agricultura, biodiversidad y disponibilidad hídrica.

De acuerdo al quinto informe del grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) el CC es uno de los principales desafíos del siglo XXI (Romero et al., 2018), es el problema ambiental más relevante a nivel mundial debido a los efectos en el incremento de la temperatura media global, variaciones de las precipitaciones y elevación del nivel del mar (Bando et al., 2007), la temperatura media global de la superficie terrestre observada en los años 2006–2015 fue de 0.87°C y 0.99°C (Stocker et al., 2013), existen investigaciones científicas que prueban que de 1880 a 2017 la temperatura media mundial ha subido en 1 °C y está aumentando a un ritmo de 0,2 °C por década (Leung et al., 2019), si no se reduce las emisiones de gases de efecto invernadero es probable que la temperatura de la superficie terrestre sea superior a 1.5°C en todos los escenarios climáticos para fines del siglo XXI (Jarraud et al., 2012). Estos cambios están alterando las condiciones hidrológicas, presentando diversos efectos en

los sistemas globales de recursos hídricos (Yang et al., 2011). Diversas investigaciones científicas afirman que en el futuro habrá una reducción en la disponibilidad del recurso hídrico debido a los efectos del CC, ya que a largo plazo existen pronósticos de escasez de agua (Chávez et al., 2015), Sin embargo, con un calentamiento global de 1.5°C frente a 2°C se podría disminuir en más del 50% la proporción de población vulnerable frente a la escasez de agua, debido al CC (Masson et al., 2019).

El Perú es vulnerable frente a los cambios globales del clima denotado en variaciones de temperatura media global, precipitación, humedad y la escorrentía, esto lleva a la posibilidad de cambios en el ciclo hidrológico en consecuencia se presenta efectos significativos en el agua como inundaciones y sequias (Alarcón et al., 2019), esto afecta principalmente en el desarrollo económico del país.

Los modelos hidrológicos son una herramienta importante para evaluar los impactos del CC en el recurso hídrico de las cuencas bajo escenarios de CC basados en las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (Anand et al., 2018). Para evaluar el comportamiento hidrológico de una cuenca a largo plazo en relación al CC se utilizan modelos basados en procesos como la herramienta de evaluación del suelo y el agua (SWAT, por sus siglas en inglés) para representar los procesos de generación de escorrentía, la influencia del uso de agua y los mecanismos de retroalimentación entre la disponibilidad y el uso de agua (Guug et al., 2020). La herramienta SWAT tiene establecido su aplicabilidad para estudios de impacto hidrológico, se ha empleado ampliamente para simular y evaluar los efectos de los cambios de la hidrología de las cuencas y uso de suelos (Anand et al., 2018).

Los escenarios del cambio climático representan de manera simplificada el clima del futuro y se construye para ser utilizada en

investigaciones de simulación de impactos del CC antropogénico (Rios, 2016). Las simulaciones de modelos climáticos globales (GCM) archivadas por el proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP) son una de las fuentes más importantes para la proyección cuantitativa del clima para el siglo XXI (Baker et al., 2014), estos GCM son utilizados como herramienta principal para analizar los cambios climáticos extremos del pasado y futuro (Kim et al., 2020).

La cuenca del río Ilave se caracteriza por ser una zona de producción agrícola, pecuaria y de crecimiento poblacional, estas son afectadas por el cambio climático (Ticona, 2016). Según el inventario de fuentes hídricas elaborado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en la cuenca Ilave hay 1836 manantiales, 1300 quebradas, 67 ríos, 27 bofedales y 14 lagunas (Ancco et al., 2009), estas fuentes hídricas enfrentan la amenaza de la pérdida de volumen de agua disponible por el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación pluvial (Aguilar, 2017).

Ante este contexto es primordial evaluar la disponibilidad hídrica futura a fin de proponer planes de acción para una gestión

estable y sostenible del agua, para lo cual existen herramientas como el modelo SWAT que permiten simular y evaluar las variaciones del sistema hídrico en una cuenca y los MCG que nos permite investigar las causas y los efectos del cambio climático.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación es evaluar la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca Ilave bajo escenarios del cambio climático del CMIP6 de las rutas SSP 4.5 y SSP 8.5 de los modelos climáticos globales MIROC6 y MPI-ESM1-2-LR utilizando el modelo SWAT para una planificación y gestión sostenible.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

la Cuenca del río Ilave se encuentra ubicada dentro de la región hidrográfica del Titicaca (Perú) a una altitud de 3,805 – 5,400 msnm, entre las coordenadas UTM (WGS84, zona 19 sur): Este 352,353.0 – 452,052.0, Norte 8'104,770.0 – 8'248,751.0. Cuenta con una extensión aproximada de 7743 km² y abarca las superficies de las Provincias de Puno, el Collao y Chucuito.

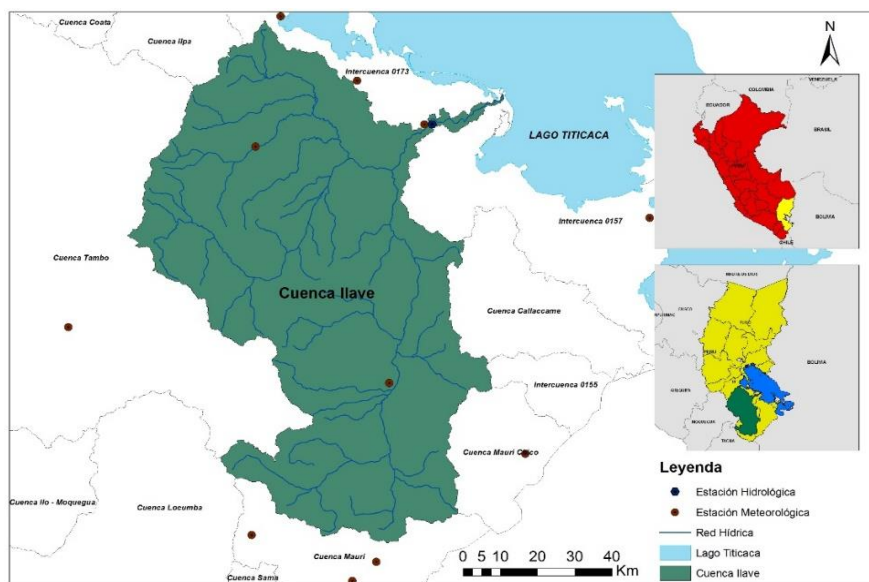


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

Modelo Hidrológico SWAT

El modelo SWAT es un modelo hidrológico distribuido de tiempo continuo que fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas del manejo de suelo en la generación del agua de las cuencas hidrográficas, requiere de información específica sobre datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, radiación solar y dirección del viento) y espaciales para simular el ciclo hidrológico (Uribe, 2010). El ciclo hidrológico simulado por SWAT se basa en la siguiente ecuación de equilibrio hidrológico.

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

Donde: SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm); SW_0 : es el contenido

Tabla 1:
Información suministrada al modelo.

Información	Fuente	Descripción	Formato
DEM	SRTM/NASA	Modelo digital de elevación (resolución espacial de ~90 m)	Raster
Cobertura vegetal y uso de suelo	MINAM	Mapa de capacidad de uso mayor de tierras.	Polygon shapefile
Unidades de suelo (Edafología)	ONERN	Mapa fisiográfico del Perú.	Polygon shapefile
Hidrografía	ANA	Delimitación y red de drenaje hidrográfica de la cuenca Ilave	Polygon shapefile
Hidrografía	ANA SENAMHI	Estaciones hidrometeorológicas	Polygon shapefile
Cartografía básica	IGN	Cartas nacionales de cuenca Ilave	Polygon shapefile

Se estableció una clasificación de uso de suelo entre el mapa de cobertura vegetal

de agua inicial en el día (mm); t : es el tiempo (día); R_{day} : es la cantidad de precipitación en el día (mm); Q_{surf} : es la cantidad de escorrentía superficial por día (mm); W_{secp} : es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en el día (mm); Q_{qw} : es la cantidad de flujo de retorno en el día (mm).

El modelo SWAT divide a la cuenca hidrográfica en sub-cuencas, para transformar en unidades de respuesta hidrológica (HRU por sus siglas en inglés), que consisten en combinarlos de manera homogénea el suelo, cobertura vegetal y pendiente en la cuenca (Uribe, 2010).

Data de entrada del modelo

Información geográfica

La información obtenida se presenta en la siguiente tabla.

del Ministerio del Ambiente y los códigos del uso de suelo de SWAT. Usando el mapa de

Fisiografía de la ONERN del Perú, se extrajeron los polígonos de las unidades de suelo, a cada una de éstas se le asignó la información de las propiedades de suelos de la cuenca Ilave. Usando la base de datos del SOILGRIDS (<https://soilgrids.org/>) se ingresó los valores de las características del suelo (Profundidad, textura, densidad aparente, contenido de carbono orgánico, arcilla, limo, arena entre otros.), la capacidad de agua disponible y la conductividad hidráulica del suelo se calculó con el software SPAW Soil Water Characteristics, algunos valores faltantes se completó con la base de datos armonizado de suelo (HWSO) elaborado por la FAO y UNESCO (<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/ExternalWorld-soil-database/HTML/>).

Información climática

La data histórica de las variables meteorológicas (precipitación total diaria, temperatura máxima y mínima media diaria) para el periodo 1986 – 2016 requeridas por el modelo fueron descargadas de la base de datos grillados PISCO del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/index.html?Set-Language=es>). Se consideraron las mismas coordenadas de las 12 estaciones meteorológicas, las versiones utilizadas para precipitación es PISCOp v2.1 y para temperatura PISCOp v1.1, con una resolución espacial de (~5km) y una resolución temporal diaria. La información fue descargada en escala diaria mediante código de programación en Rstudio. los parámetros de humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar son utilizados de la base de datos global del SWAT.

Información hidrográfica

La cuenca Ilave cuenta con una estación hidrométrica (Puente Ilave), los datos históricos de caudal diario promedio fueron recopilados del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI para el periodo de 1986 – 2016.

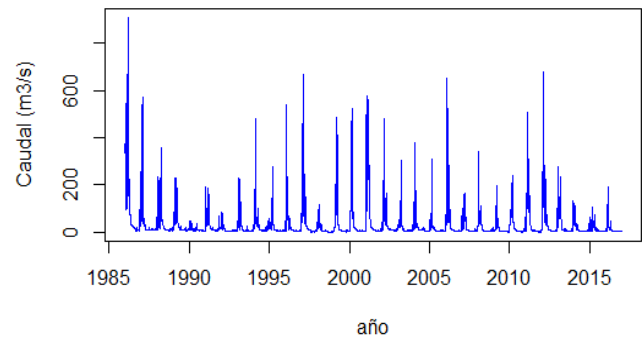


Figura 2: Caudal diario promedio registrado en la estación Puente Ilave (1986 – 2016).

Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos (EDA) de las series Hidrometeorológicas consistió en hallar la existencia o no de alguna tendencia y la homogeneidad de las series mediante métodos gráficos y numéricos (Castro et al., 2010). Mediante las pruebas estadísticas de Lillie.test y t.test se confirmó la distribución normal y la homogeneidad de los datos de las 13 estaciones hidrometeorológicas de la cuenca Ilave, con resultados de P-Value = 0.3 y P-Value = 0.4.

Análisis de sensibilidad

Calibrar el modelo requiere identificar parámetros que son más sensibles a cambios en sus valores, de modo que un cambio pequeño generaría cambios significativos en los resultados finales (Perez et al., 2017). Para el presente modelo

desarrollado en SWAT se utilizó el programa SWAT - CUP (Calibration and Uncertainty Programs For SWAT) y el algoritmo SUFI - 2 (Sequential Uncertainty Fitting 2).

Previo al análisis de sensibilidad se realizó una comparación entre los caudales simulados y observados para el periodo 1986 – 2016. Con el fin de reducir la incertidumbre sobre los parámetros que son usados en la calibración, se aplicó el análisis de sensibilidad utilizando parámetros generalmente recomendados con valores predeterminados. Según (Arnold et al., 2012); se deben evaluar el “*t-Stat*” que expresa la sensibilidad del parámetro y “*p-value*” que representa la importancia de la sensibilidad y se deben incluir los parámetros que tengan un factor “*p-value*” mayor a 0.2.

Se identificó a 12 parámetros como los más sensibles (CN2, GW_DELAY, GW_REVAP, REVAPMN, GWQMN, SURLAG, ESCO, EPCO, CANMX, CH_N2,

RCHRG_DP, SOL_AWC), estas fueron aplicadas en la etapa de calibración y validación.

Calibración y validación del modelo

La calibración y validación del modelo se realizó con datos diarios para el periodo de 1986 – 2016, considerando 3 años como periodo de calentamiento (1986 – 1988), 18 años para la etapa de calibración (1989 – 2007) y 9 años para la etapa de validación (2008 – 2016). El proceso de calibración consistió en realizar múltiples simulaciones con el objetivo de encontrar los valores óptimos para cada parámetro, seguidamente para evaluar la precisión del modelo se pasó a la etapa de validación donde se utilizaron los valores óptimos de los parámetros seleccionados en la etapa de calibración.

Tabla 2:
Valores de parámetros calibrados del modelo SWAT.

Nº	Parámetro	Definición de parámetros	Rango	Valor ajustado
1	r_CN2.mgt	Numero de curva de escorrentía inicial.	0 – 0.1	0.055000
2	v_GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo del agua subterránea (días)	30 – 100	61.500000
3	v_GW_REVAP.gw	Coefficiente de agua subterránea	0.01– 0.5	0.083500
4	v_REVAPMN.gw	Umbral de la profundidad del agua en el acuífero superficial (mm)	30 – 100	33.500000
5	v_GWQMN.gw	Umbral de profundidad de aguade acuífero superficial	4000 – 5000	4950.000000
6	v_SURLAG.hru	Coefficiente de retraso del agua lluvia en la superficie	1 – 15	14.300000
7	v_ESCO.hru	Factor de compensación de evaporación del suelo	0.01– 1	0.455500
8	v_EPCO.hru	Factor de compensación de absorción de la planta	0.01 – 0.5	0.328500
9	v_CANMX.hru	Máximo almacenamiento por retención debido a la cobertura vegetal	30 – 100	40.500000
10	v_CH_N2.rte	Valor n de Manning para el canal principal	0.01– 0.3	0.198500
11	v_RCHRG_DP.gw	Coefficiente de percolación al acuífero profundo	0.01 – 0.5	0.279500
12	r_SOL_AWC.sol	Capacidad de agua disponible (mm agua/mm suelo)	0.01 – 0.5	0.377500

*El calificador (r_) indica que el parámetro se multiplica por 1 más el valor.
El calificador (v_) se refiere a la sustitución del parámetro por el valor.

Para evaluar el desempeño del modelo en la etapa de calibración y validación se utilizaron 3 índices estadísticos: coeficiente de determinación (R²), Nash-Sutcliffe (NSE), el sesgo porcentual (PBIAS) (Moriassi et al., 2015).

Tabla 3:
Estimadores empleados para el ajuste del modelo SWAT.

Denominación	Ecuación	Variables
Nash-Sutcliffe Efficiency	$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]$	Y_i^{obs} : es el caudal observado Y_i^{sim} : es el caudal simulado en el tiempo i

		Y^{mean} : es el promedio de las caudales observados.
Coefficiente de determinación	$R^2 = 1 - \frac{n - 1 \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{n \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}$	n : es el número de observaciones \bar{y}_i : media simulaciones (m3/s).
Porcentaje de sesgo	$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$	Y_i^{obs} : es el valor observado y Y_i^{sim} : es el valor simulado.

Escenarios climáticos proyectados

Validación de los modelos climáticos globales (MCG) del CMIP6

Los modelos climáticos globales de buen ajuste para representar el clima a futuro (2025 – 2050) para la cuenca Ilave fueron MIROC6 Y MPI-ESM1-2-LR y los

escenarios climáticos corresponden a las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP4.5 Y SSP8.5). la selección de los modelos a utilizar se realizó comparando la variable precipitación total promedio multimensual donde muestran un coeficiente de determinación (R2) “bueno”.

Tabla 4:
Validación de los modelos climáticos globales (CMIP6).

MCG	R2
MIROC6	0.61
MPI-ESM1-2-LR	0.62

La Figura 3 muestra los resultados de precipitación promedio multimensual para el periodo (1986 – 2016) de la cuenca Ilave.

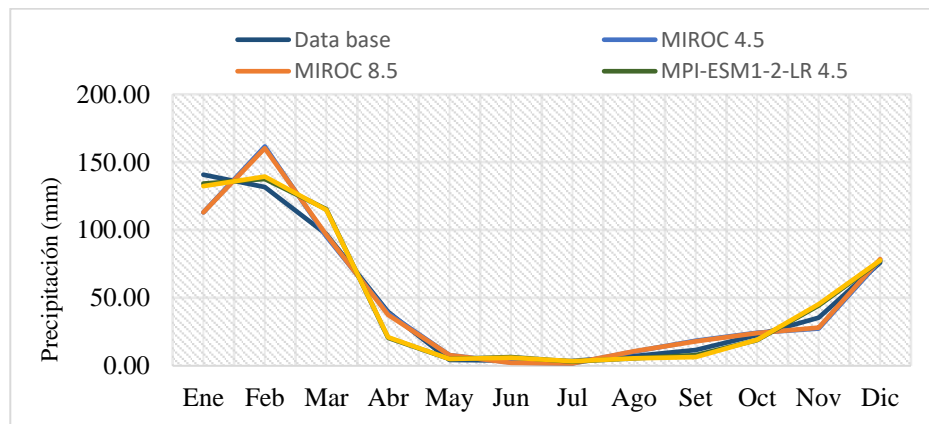


Figura 3: Precipitación total promedio multimensual.

Reducción de escala (Dawscaling)

Se utilizó el modelo lineal Quantile Mapping en el software Rstudio con el script adaptado por (Gudmundsson, 2016), fueron considerados datos observados de la zona en estudio (1986 - 2016) y una serie de datos de los MCG (1986 – 2050), posteriormente los datos de salida fueron utilizados en el modelo SWAT.

Tabla 5:
Rendimiento del modelo SWAT.

Etapa	Rendimiento del modelo		
	NSE	R2	PBIAS
Calibración	0.81	0.86	-10.5
Validación	0.79	0.82	-1.6

Efectos del cambio climático

La evaluación del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica de cuenca del

Resultados

Calibración y validación

La etapa de calibración y validación del modelo SWAT (1989 – 2007) (2008 - 2016) presentan resultados satisfactorios para la cuenca Ilave, con un NSE = 0.81, R2 = 0.86 y PBIAS = -10.5 para calibración y un NSE = 0.79, R2 = 0.82 y PBIAS = -1.6 para validación.

rio Ilave se realizó comparando los 4 escenarios futuros (MIROC6 4.5, MIROC6 8.5, MPI-ESM1-2-LR 4.5 y MPI-ESM1-2-LR 8.5) con el modelo validado (SWAT).

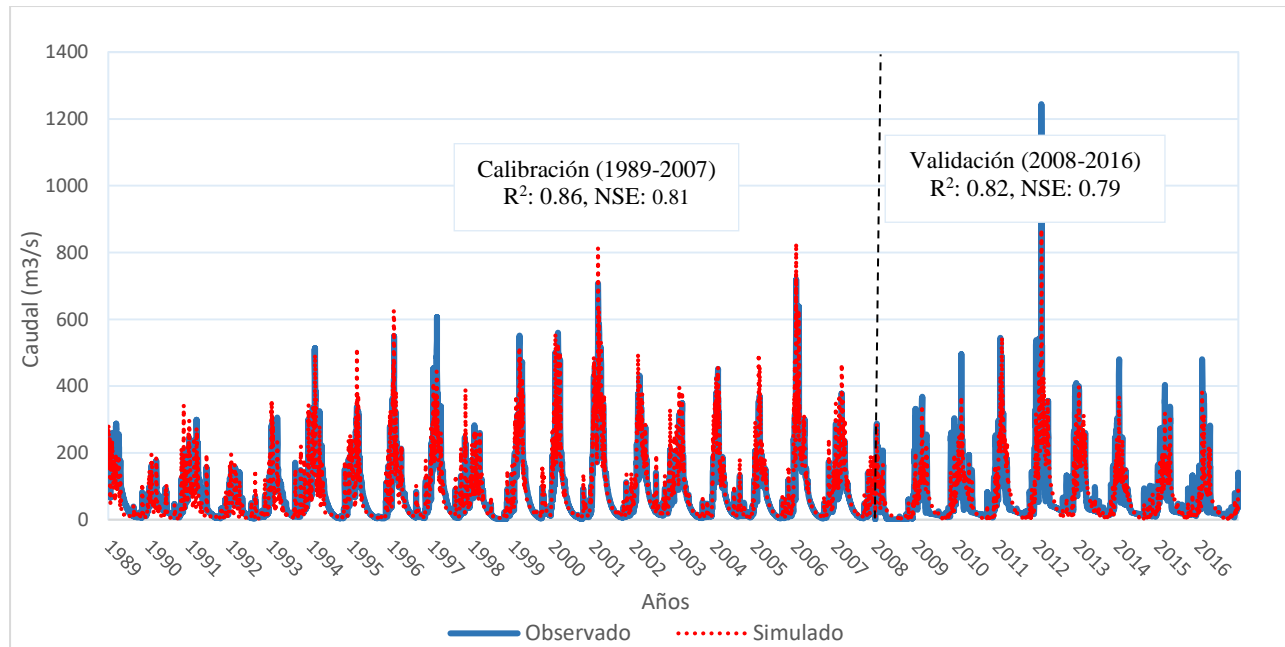


Figura 4: Caudales observados y simulados para el periodo de calibración y validación.

Evaluación de cambios en la precipitación y temperatura

La variación porcentual de precipitación mensual para el futuro (2025 – 2050) comparados con el periodo base para el modelo MIROC6 para las rutas SSP 4.5 y SSP 8.5 aumentaron en un 0.07% y 0.02% durante la época seca (mayo – setiembre) y disminuyen en un -0.16% y -0.07% durante la época de lluvia (octubre - abril), para el modelo MPI-ESM1-2-LR de las rutas SSP 4.5 y SSP 8.5 disminuyen en un -0.15% y -0.18% en la época seca y en un -0.18% durante la época de lluvia.

La variación de temperatura máxima promedio mensual entre los modelos MIROC6 y MPI-ESM1-2-LR para las rutas SSP 4.5 y SSP 8.5 proyectan un incremento

en 0.8 °C durante la época seca y en 0.6 °C durante la época de lluvia y la variación porcentual de la temperatura mínima disminuye en -0.35% en la época seca y -0.23% durante la época de lluvia.

Variación de la disponibilidad hídrica futura

En la Tabla 6 se presenta los caudales promedios mensual de la cuenca Ilave del escenario base (1986 – 2016) y los escenarios futuros (2025 – 2050), se puede observar que en los cuatro escenarios futuros los caudales máximos proyectados se presentan en el mes de febrero y el caudal mínimo se presenta en el mes de setiembre.

Tabla 6:
Caudal promedio mensual de los escenarios.

Escenario	Caudal promedio mensual (m3/s)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Escenario Base	183.9	208.1	158.5	94.6	37.8	25.8	18.6	19.9	16.6	28.3	47.3	91.6
MIROC6 4.5	186.2	300.2	277.4	196.4	111.1	58.0	29.7	18.8	22.7	34.0	47.4	96.9
MIROC6 8.5	215.2	334.7	301.1	220.2	121.5	61.3	30.4	19.8	21.3	30.5	49.3	106.2
MPI-ESM1-2-LR 4.5	209.8	316.8	322.2	206.9	111.7	59.4	28.3	14.6	11.0	16.6	48.0	120.6
MPI-ESM1-2-LR 8.5	214.1	321.5	352.1	213.2	117.3	60.0	29.7	16.8	11.9	17.0	51.0	122.6

La Tabla 7 indica la variación de la disponibilidad hídrica de la cuenca Ilave entre el escenario base y los escenarios futuros, en la época de estiaje se puede identificar variaciones desde +221.0 % a -

33.8 % y en la época de lluvia se presentan variaciones desde +132.7 % a -41.2%, las variaciones más altas se presentan entre los meses de abril a junio.

Tabla 7:

Variación porcentual del caudal promedio mensual

Escenario	Promedio mensual (%)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
MIROC6 4.5	1.3	44.2	75.0	107.5	193.6	124.9	59.7	-5.3	36.5	20.3	0.1	5.7
MIROC6 8.5	17.0	60.8	90.0	132.7	221.0	137.7	63.1	-0.1	28.1	8.0	4.1	15.9
MPI-ESM1-2-LR 4.5	14.1	52.2	103.3	118.7	195.2	130.2	52.0	-26.3	-33.8	-41.2	1.4	31.6
MPI-ESM1-2-LR 8.5	16.4	54.5	122.1	125.3	209.9	132.6	59.3	-15.5	-28.4	-40.0	7.8	33.8
Promedio	12.2	52.9	97.6	121.0	205.0	131.3	58.5	-11.8	0.6	-13.2	3.4	21.8

En la Figura 5 se muestra la variación porcentual del caudal promedio mensual para el horizonte (2025 – 2050) de la cuenca Ilave.

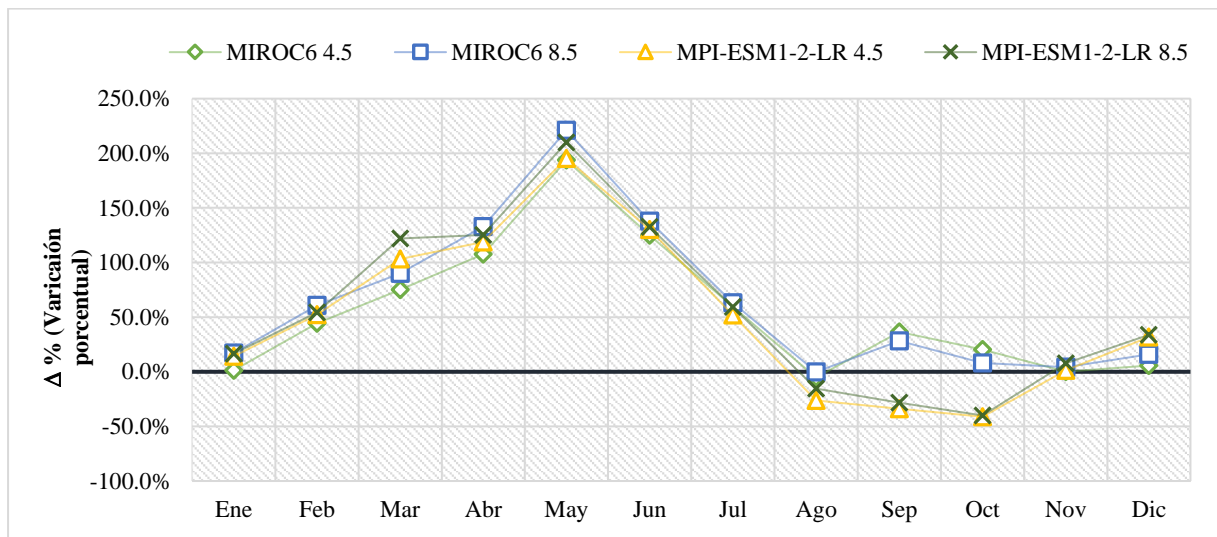


Figura 5: Variación porcentual del caudal promedio mensual proyectado al futuro (2025 - 2050).

Discusiones

Los resultados de calibración del modelo SWAT para el periodo (1989 – 2007) mostraron una eficiencia de NSE de 81% indicando que el ajuste del modelo es “muy bueno”, por otro lado, los resultados de validación para el periodo (2008 – 2016) mostraron un ajuste “bueno” con un NSE, de

79%, resultados que son considerados como un patrón adecuados para simular el caudal de los ríos según (Moriasi et al., 2015). los resultados satisfactorios de calibración y validación para la cuenca Ilave indican que pueden ser utilizados como una herramienta de gestión y planificación en cuencas hidrográficas (Guevara et al., 2014).

El análisis de las variaciones de precipitación futura para el altiplano peruano (2025 – 2050) muestran una disminución de hasta -38.08 mm en un escenario extremo de SSP 8.5 y un -0.29 mm en un escenario de SSP 4.5, estos resultados presentan una coincidencia con (Lujano et al., 2014) que afirma la disminución de precipitación en un -9.7% para el horizonte 2071-2100 en la cuenca Ilave, de la misma forma (Moya et al., 2015) nos afirma el descenso de la precipitación en el sur del altiplano peruano. Cabe recalcar que la mayor disminución de precipitación se da en época de lluvia y se incrementa en época de estiaje, así mismo la temperatura máxima aumenta en un 0.66°C y la temperatura mínima disminuye en un -0.29%, analizando éstas investigaciones el aumento de la temperatura y la disminución de precipitación en los meses de lluvia podría tener un efecto significativo en el volumen de los caudales. Según (Jodar et al., 2018), en las próximas décadas la precipitación, escorrentía superficial y recarga de acuífero disminuirán, mientras que la temperatura aumenta entre 1.5 °C y 1.7 °C, lo que resulta evidente que la gestión de los recursos hídricos será un reto para las autoridades locales, así mismo de acuerdo al sexto informe de evaluación del cambio climático 2021 (IPCC, 2021) las alteraciones en el ciclo hidrológico conlleva una mayor intensidad de las precipitaciones, inundaciones y sequías en diversas regiones, con mayor incremento de precipitación en las latitudes altas y disminución en las regiones subtropicales,

Los resultados del volumen del caudal futuro para el año 2050 en los escenarios SSP 4.5 y SSP 8.5 de los modelos MIROC6 y MPI-ESM1-2-LR del CMIP6 nos indica que habrá una disminución del recurso hídrico con mayor frecuencia en la época de lluvia variando entre -41.2% a 40.0%, mientras que para la época seca se proyecta un descenso de -33.8% a -0.1%, La mayor

disminución del caudal en la cuenca Ilave ocurrirán en los meses de agosto, setiembre y octubre y se incrementaran en los meses de abril, mayo y junio. Estos resultados corroboran las investigaciones realizadas por (Lujano et al., 2014) y (Lujano et al., 2016) donde menciona una disminución del recurso hídrico anual de -29.3% y -48% para el horizonte 2071-2100 en la cuenca Ilave, así mismo (Laura, 2019) indica una disminución del recurso hídrico hasta en -24% para el futuro 2020-2100 en un escenario extremo, es sí que la disminución de la disponibilidad hídrica en la época seca incrementaría la demanda del agua en uso agrícola y poblacional lo que pondría en riesgo el caudal ecológico y posiblemente la viabilidad de futuros proyectos de infraestructura hidráulica (Leon et al., 2019), según (Felipe et al., 2015) los impactos del cambio climático afectaran en la disponibilidad del agua en la vertiente del Titicaca con una disminución de -28% para el año 2050, así mismo la reducción del volumen del agua superficial captada por la red de drenaje natural en el periodo de estiaje implica a grandes retos por reducir la brecha hídrica y el desarrollo socio económico de los habitantes (Vázquez et al., 2021), estos resultados nos muestran que en un futuro cercano nos espera una disminución del recurso hídrico con un impacto de mayor o menor magnitud.

Conclusiones

El modelo matemático semidistribuido SWAT es una herramienta adecuada para analizar periodos de excesos y déficit hídricos en cuencas hidrográficas. La calibración y validación del modelo SWAT fue evaluado mediante 3 índices estadísticos: R², NSE, PBIAS, donde los resultados presentan una eficiencia entre “buena” y “muy buena” con un NSE de 81% y 79% en la salida, para la serie (1986 – 2016).

Las precipitaciones proyectadas de los GCM indican una disminución de -38.08mm para un escenario extremo, el descenso de las precipitaciones se da en la época de lluvia y se incrementa en la época de estiaje. Los resultados de las simulaciones de los modelos MIROC6 y MPI-ESM1-2-LR en los escenarios SSP 4.5 y SSP 8.5 para el horizonte (2025-2050) muestran un porcentaje de disminución del caudal en un -41.2% a 40% en los meses de lluvia y una disminución con menor frecuencia de -33.8% a -0.1% en la época de estiaje, estos resultados predicen el impacto del cambio climático en la cuenca Ilave donde se predispone disminuciones de caudal en un futuro cercano, por lo que se deduce que será una zona afectada por la disponibilidad hídrica.

Estos resultados pueden ser considerados para la elaboración de planes de gestión de los recursos hídricos, implementar sistemas de alerta temprana, identificar áreas propensas a sequías e inundaciones de la cuenca Ilave en relación al cambio climático en programas de desarrollo, garantizando de esta manera el manejo sostenible del recurso hídrico

Referencias Bibliográficas

- Aguilar Lima, J. C. (2017). Analisis de tendencias de temperatura y precipitación pluvial en la cuenca del río Ilave. *Universidad Nacional Del Altiplano*, 87. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5108>
- Alarcón Hincapié, J., Zafra Mejía, C., & Echeverri Prieto, L. (2019). Cambio climático y recursos hídricos en Colombia Climate change and water resources in Colombia. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 2, 1–10. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1368>
- Anand, J., Gosain, A. K., & Khosa, R. (2018). Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model. *10 December*, 644, 503–519. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.017>
- Ancco Carita, C., Laura Quispe, V., Cambillo Castro, C. E., Ticona Salazar, M., Huaycani Incacutipa, R., Huarachi Quispe, E. S., Santander Tumi, J. C., Pari Carrión, F., Llerena Chipana, O. D., & Quispe Vargas, L. V. (2009). Evaluación De Los Recursos Hídricos En La Cuenca Del Río Ilave. In *ANA - Volumen I*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3888>
- Arnold, Kiniry, Srinivasan, Williams, Haney, & Neitsch. (2012). Soil & Water Assessment Tool SWAT -Beginner SWAT Training Manual. *Spatial Science Laboratory Texas A&M Agrilife Research*. <http://swatmodel.tamu.edu>
- Baker, N. C., & Huang, H. P. (2014). A comparative study of precipitation and evaporation between CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles in semiarid regions. *Journal of Climate*, 27(10), 3731–3749. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00398.1>
- Bando Murrieta, U., Garrido, A., Altamirano del Carmen, M. Á., & Martínez Fernández, J. (2007). Proyecciones de cambio climático para las cuencas de México. *Las Cuencas Hidrográficas de México*, 2100, 138–141. <https://micrositios.inecc.gob.mx/cuenca/diagnostico/28-proyecciones-cambio-climatico.pdf>
- Castro, L., & Carvajal Escobar, J. (2010). Analisis De Tendencia y

- Homogeneidad De Series Climatológicas. *9 de Diciembre, 1692–9918*, 15–25. <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434002.pdf>
- Chávez Jiménez, A., & González Zeas, D. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *Ribagua*, *2*(1), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.001>
- Felipe Obando, O., Sánchez Bernardo, T., & Astorayme Valenzuela, M. (2015). Actualización de los escenarios de disponibilidad hídrica en el Perú en contexto de cambio climático. *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología*, 89. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-75.pdf>
- Gudmundsson, L. (2016). Package “qmap” Statistical Transformations for Post-Processing Climate Model Output. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012.bernexp>
- Guevara, O. C., Cazenave, G., Vazquez, A. G., Collazos, G., & Vives, L. (2014). Empleo del modelo hidrológico SWAT en regiones de llanuras. Aplicación en una cuenca rural, arroyo Santa Catalina, Provincia de Buenos Aires. *II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*, *October*, 10. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/47531/Documento_completo.pdf?sequence=3
- Guug, S. S., Abdul Ganiyu, S., & Kasei, R. A. (2020). Application of SWAT hydrological model for assessing water availability at the Sherigu catchment of Ghana and Southern Burkina Faso. *HydroResearch*, *3*, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.10.002>
- IPCC. (2021). SEXTO INFORME DE EVALUACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO 2021. *Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático (IPCC)*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf
- Jarraud, M., & Steiner, A. (2012). Climate Change 2014 Synthesis report. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107025). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.003>
- Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *35*(3), 240–253. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>
- Kim, Y. H., Min, S. K., Zhang, X., Sillmann, J., & Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes*, *29*, 100269. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100269>
- Laura Santos, J. W. (2019). Efecto del Cambio Climático en la Oferta Hídrica Superficial de la Cuenca del Rio Ilave - Puno. *Universidad Altiplano Puno, 051*, 363543. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/13718/Laura_Santos_Jorge_Washington.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Leon, R., Portuguez, D., & Chávarri, E. (2019). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú,

- considerando la incidencia del cambio climático. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 182–193. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.476>
- Leung, J. Y. S., Russell, B. D., & Connell, S. D. (2019). Adaptive Responses of Marine Gastropods to Heatwaves. *One Earth*, 1(3), 374–381. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.025>
- Lujano-Laura, E., Hidalgo-Sanchez, L. S., Tapia-Aguilar, B., & Lujano-Laura, A. (2016). Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP4.5 y 8.5 de modelos climáticos globales del CMIP5 en el Altiplano Peruano. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 18(2), 195–204. <https://doi.org/10.18271/ria.2016.200>
- Lujano Laura, E., Diaz Aguilar, R. D., Lujano Laura, A., & Quispe Aragon, J. P. (2014). Evaluacion De La Disponibilidad Hídrica Actual Y Futura En El Contexto Del Cambio Climatico En Las Cuencas Ilave Y Ramis. *Revista Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Investigation*, 16(02). <https://doi.org/10.18271/ria.2014.61>
- Masson Delmotte, V., Panmao, Z., Maycock, T., Moufouma Okia, W., & Matthews, R. (2019). Impactos del Calentamiento Global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial. In *IPCC*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Moya Alvarez, A. S., Ortega León, J. M., & Jurado Pacheco, X. (2015). Evaluación del Modelo Climático Global MIROC5 y estimaciones de temperatura y precipitaciones para las zonas sur y norte del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 05(02), 1–8. <https://doi.org/10.18259/acs.2015028>
- Perez Valdivia, C., Cade Menun, B., & Mc Martin, D. W. (2017). Hydrological modeling of the pipestone creek watershed using the Soil Water Assessment Tool (SWAT): Assessing impacts of wetland drainage on hydrology. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 14(October), 109–129. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.10.004>
- Rios Patrón, E. (2016). Manejo De Cuencas Y Adaptación Al Cambio Climático. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas, August 2015*. https://www.researchgate.net/publication/281374585_MANEJO_DE_CUENCAS_Y_ADAPTACION_AL_CAMBIO_CLIMATICO
- Romero Cuéllar, J., Buitrago Vargas, A., Quintero Ruiz, T., & Francés, F. (2018). Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia. *Ribagua*, 5(1), 63–78. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1454574>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2013). Contribucion del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluacion del

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *IPCC*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- Ticona Mamani, A. C. (2016). Modelación hidrológica de escenarios futuros de caudales medios con la aplicación del modelo hidrológico weap en la cuenca del río Ilave - Puno. *Universidad Nacional Del Altiplano*, 105. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4617>
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. *SWAT Soil and Water Assessment Tool*, 1–47. <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Vázquez-Ochoa, L. A., Correa-Sandoval, A., Vargas-Castilleja, R. D. C., Vázquez-Sauceda, M. D. L. L., & Rodríguez-Castro, J. H. (2021). Modelo hidrológico, calidad del agua y cambio climático: soporte para la gestión hídrica de la cuenca del río Soto la Marina. *CienciaUAT*, 16(1), 20–41. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1498>
- Yang, N., Men, B. H., & Lin, C. K. (2011). Impact analysis of climate change on water resources. *Procedia Engineering*, 24, 643–648. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2710>