

DOI: 10.24850/j-tyca-15-01-03

Artículos

Impacto del cambio climático en las descargas futuras de una cuenca altoandina de Perú al 2100

Impact of climate change on future discharges from a high Andean basin in Peru to 2100

Sandra del Aguila¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8051-3575>

Francisco Espinoza-Montes², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0093-7050>

¹Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú, sandra.delaguila@unsch.edu.pe

²Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, franciscoespinozamontes@gmail.com

Autora para correspondencia: Sandra del Aguila, sandra.delaguila@unsch.edu.pe

Resumen

El objetivo de esta investigación fue analizar el impacto del cambio climático en el comportamiento de las descargas mensuales en la cuenca Anya, afluente del Mantaro, Junín, al 2100, con el modelo SWAT (Soil and



Water Assessment Tool). Se obtuvieron datos grillados diarios de precipitación y temperaturas de PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) entre 1981 y 2015, y caudales promedio mensuales medidos en la estación hidrométrica Anya. Para el análisis del efecto espacio temporal del cambio climático en la temperatura y precipitación, y su influencia en el escurrimiento de la cuenca, se utilizaron cinco modelos climáticos globales (ACCES1.0, bcc_csm1, BNU_ESM, CMCC_CM y GISS_E2) en dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y 8.5). La simulación se realizó para el periodo 2070-2100, considerándose como periodo base 1980-2010. El modelo funcionó satisfactoriamente con los valores estadísticos de Nash-Sutcliffe (NSE), PBIAS y coeficiente de determinación (R^2). En la cuenca, los resultados promedio muestran un incremento de precipitación (entre 4.63 y 8.14 %) y temperatura (de 2.3 a 4.2 °C), en escenarios RCP 4.5 y 8.5 al 2100. Asimismo, habría un incremento de caudales en comparación con el periodo base, obteniéndose que, en promedio, el caudal en la cuenca aumentaría en 2.4 y 12.6 % en los escenarios RCP 4.5 y 8.5, respectivamente. Se concluye que el incremento de temperatura y precipitación influirá en una mayor esorrentía y riesgo de inundaciones en las áreas de cultivo en la cuenca.

Palabras clave: PISCO-SENAMHI, SWAT, modelos climáticos globales (MCGs), escenarios RCP.

Abstract

The objective of this research was to analyze the impact of climate change on the behavior of monthly discharges in the Anya basin, a tributary of the Mantaro, Junin, at 2100, with the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. Daily gridded data on precipitation and temperatures were obtained from PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) between 1981 and 2015 and average monthly flows measured at the Anya hydrometric station. For the analysis of the space-time effect of climate change on temperature and precipitation and its influence on basin runoff, five global climate models (ACCES1.0, bcc_csm1, BNU_ESM, CMCC_CM and GISS_E2) were used in two emission scenarios (RCP 4.5 and 8.5). The simulation was carried out for the period 2070-2100, considering 1980-2010 as the base period. The model worked satisfactorily with the statistical values of Nash-Sutcliffe (NSE), PBIAS and coefficient of determination (R^2). In the basin, the average results show an increase in precipitation (between 4.63 and 8.14 %) and temperature (from 2.3 to 4.2 °C), in RCP 4.5 and 8.5 scenarios by 2100. Likewise, there would be an increase in flows in comparison with the base period, obtaining that, on average, the flow in the basin would increase by 2.4 and 12.6 % in the RCP 4.5 and 8.5 scenarios, respectively. It is concluded that the increase in temperature and precipitation will influence a greater runoff and risk of flooding in the cultivation areas in the basin.

Keywords: PISCO-SENAMHI, SWAT, global climate models (GCM), RCP scenarios.

Recibido: 28/02/2022

Aceptado: 06/06/2022

Publicado online: 15/07/2022

Introducción

Los temas relacionados con los recursos hídricos son ampliamente difundidos y discutidos en todo el mundo debido a que son indispensables para la vida en el planeta; por tanto, los estudios para evaluar su distribución en el tiempo y el espacio son de suma importancia (Almeida, Pereira, & Pinto, 2018). En ese sentido, la aplicación de modelos hidrológicos para la simulación de lluvia-escorrentía y predicción de inundaciones ha recibido una gran atención en los últimos años y se han llevado a cabo numerosos estudios de investigación en tales campos (Nazari, Masoud, & Karakouzian, 2020). Los modelos hidrológicos buscan capturar los mecanismos físicos de generación de la escorrentía superficial y recarga de los acuíferos subterráneos a partir de la precipitación y la evapotranspiración (Ocampo & Vélez, 2013).

Conocer e identificar los procesos predominantes en las cuencas permiten la gestión y planificación de los recursos hídricos con el objetivo de predecir el comportamiento hidrológico de una cuenca ante diferentes escenarios climáticos, permitiendo desarrollar estrategias de gestión eficaces (Ashu & Lee, 2020). Esto requiere analizar el riesgo de escasez de agua, forzada por el clima cambiante, las alteraciones del uso de la

tierra, el crecimiento de la población y la industrialización para allanar el camino para la planificación y gestión sostenibles de los sistemas de recursos hídricos (Swain, Mishra, Sahoo, & Chatterjee, 2020). Asimismo, el cambio de uso (cobertura) del suelo influye en los ecosistemas, ocasionando transformaciones en la tasa de dotación de servicios ecosistémicos hídricos, asumiendo un papel importante en el ciclo hidrológico, pues, por ejemplo, el proceso de la evapotranspiración depende del tipo de cobertura, clima y capacidad de agua disponible para las plantas, además de incrementar la escorrentía superficial o atenuarla (González-Celada, Ríos, Benegas-Negri, & Argotty-Benavides, 2021).

Actualmente existen muchos modelos hidrológicos que permiten simular la descarga de los ríos con mayor precisión, facilidad y rapidez que el método de medición tradicional. Entre ellos está el modelo SWAT, que es un modelo a escala de cuenca integrado con ArcGIS para ayudar a mejorar la precisión del resultado simulado lluvia-escorrentía utilizando las propiedades físicas de la cuenca (Asurza & Lavado, 2020). La comprensión de los procesos hidrológicos dentro de una cuenca es fundamental para una mejor gestión de los recursos hídricos, por lo que en este estudio se aplicó SWAT, aceptado internacionalmente como una herramienta robusta para el modelado interdisciplinario de los recursos hídricos (Abbaspour, Vaghefi, & Srinivasan, 2017). El modelo hidrológico semidistribuido SWAT ha sido aplicado de manera exitosa para simular agua estacional y contaminante en cuencas hidrográficas agrícolas, y sus usos se han calibrado y validado con éxito en muchas regiones alrededor del mundo (Gomáriz & Sarría, 2018; Deng, Pisani, Hernández, & Li, 2020). Asimismo, SWAT tiene la capacidad de incorporar anomalías

climáticas y cambios de cobertura en el proceso de simulación (Neitsch, Arnold, Kiniry, Williams, & King, 2005).

El impacto del cambio climático se evalúa utilizando modelos climáticos globales (MCGs) de la Fase 5 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) (Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012), que reúne una variedad de MCGs que han crecido en complejidad a lo largo del tiempo, mejorando la representación de los procesos e incorporando nuevas incertidumbres asociadas con las distintas parametrizaciones. Sin embargo, aún presentan cierta dispersión entre ellos y en la definición de algunas variables (Penalba & Pántano, 2019). Varios estudios se han centrado en los posibles impactos del cambio climático en los recursos hídricos (Molina-Navarro *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2020), probándose diferentes escenarios de emisiones (p. ej., RCP 4.5 y RCP 8.5). La actividad agrícola está directamente relacionada con los recursos hídricos y la seguridad alimentaria, por tanto, el cambio climático tiene efectos directos e indirectos en la producción de alimentos debido a modificaciones de temperatura, lluvias irregulares y ocurrencia de eventos climáticos extremos (Wongchuig, Mello, & Chou, 2018).

La cuenca de estudio está ubicada en los Andes centrales del Perú y sus escurrimientos contribuyen al caudal del río Mantaro, donde el 71 % de las zonas agrícolas reciben agua exclusivamente de lluvia (IGP, 2005). Además, la producción agrícola de la cuenca del río Mantaro abastece a la ciudad capital de Lima y es la cuenca de mayor densidad poblacional de las regiones montañosas peruanas (Wongchuig *et al.*, 2018).

Con base en lo descrito, el objetivo de esta investigación fue realizar el modelamiento hidrológico y simulación de las descargas mensuales con SWAT, usando las variaciones de precipitación y temperatura extraídas de modelos climáticos globales (MCGs) en dos escenarios de emisiones-RCP 4.5 y RCP 8.5 para el periodo 2070-2100 (tomando a 1980-2010 como periodo base), a fin de analizar el impacto del cambio climático en las descargas mensuales en el futuro.

Materiales y métodos

Área de estudio

La cuenca del río Anya se encuentra ubicada en la zona central altoandina del Perú, situada en la margen izquierda del río Mantaro, entre 11.98° a 11.89° de latitud sur y 75.28° a 75.21° de longitud oeste (Figura 1). Su área de drenaje es de 48.03 km²; no obstante, el área hasta el punto de aforo es 41.7 km²; longitud del curso principal de 11.3 km, con caudal promedio anual 0.51 m³/s; su altitud media es de 3 700 msnm, con una pendiente de 20.9 %. La precipitación promedio multianual es de aproximadamente 800 mm y tiene un comportamiento estacional, donde el 84 % precipita entre septiembre y marzo, con lluvias esporádicas en abril y mayo, siendo nula entre junio y agosto. La zona de vida predominante —según el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge (Sabino, Lavado, & Aybar, 2019)— es el Bosque seco montano

bajo tropical (bs-MBT), ocupando un 65.22 % del área de la cuenca; dicha predominancia tiene correspondencia con la cantidad de precipitación. El clima en la zona es variado por la diversidad de pisos altitudinales; sin embargo, en promedio, le corresponde un clima templado frío.

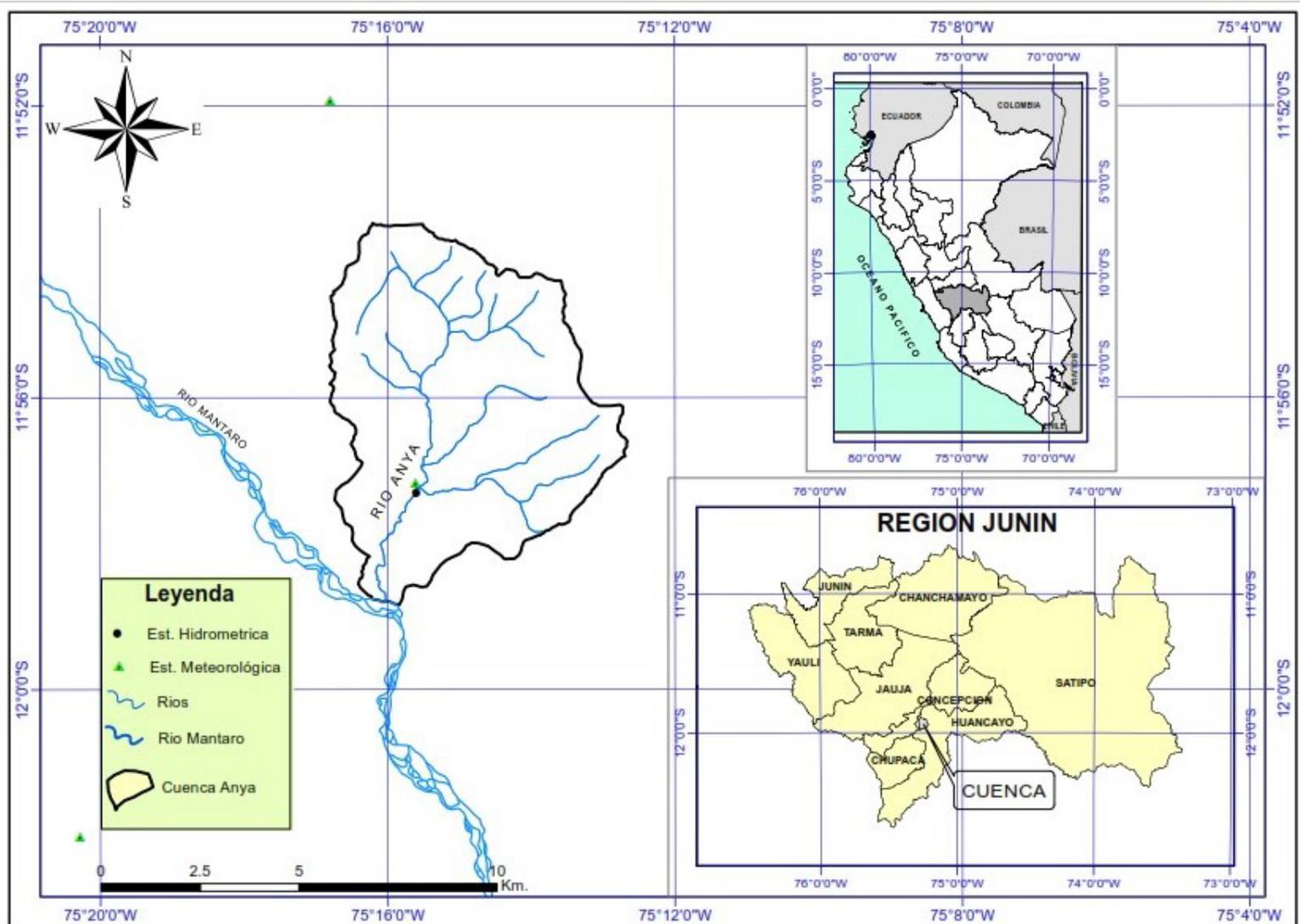


Figura 1. Ubicación de la cuenca Anya, Junín, Perú.

La cobertura vegetal actualizada a octubre de 2019 está compuesta de 41.4 % de cultivos, siendo los más representativos de la zona los siguientes: papa, maíz, cebada, habas, olluco y avena, principalmente para el autoconsumo; 18.9 %, plantaciones forestales de eucaliptos; 26.1 % de herbazales; 8.5 % de matorrales andinos propios de montañas subhúmedas; el 5.1% restante corresponde al área urbana. Los suelos dominantes son 70 % francos y 30 % francos arcillosos, con un pH entre 3.8 y 6.6 de predominancia ácida. Según PDC (2013), en cuanto a características socioeconómicas de la cuenca, la tendencia observada es a la intensificación del proceso de urbanización, que se manifiesta en un 67 % de población urbana y 33 % de población rural (Guabloche & Saldarriaga, 2013).

Fuente de datos y procesamiento

Datos climáticos

Para la cuenca Anya no existen datos climáticos diarios de extensión suficiente que, según la OMM (2017), deben ser de 30 años para el cálculo de las normales climatológicas estándar, por lo que se utilizó el conjunto de datos de precipitación y temperatura diaria en cuadrícula PISCO del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) en el periodo comprendido entre enero de 1981 y diciembre de 2015. PISCO está basado en datos pluviométricos del Perú e información satelital

CHIRPS (Funk, Peterson, & Landsfeld, 2015), en una cuadrícula de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ de resolución espacial. La mayor precisión de las estimaciones de precipitación con PISCO se circunscribe a regiones calibradas, como la costa del Pacífico, y las laderas oriental y occidental de los Andes del Perú (Aybar *et al.*, 2017; Llauca, Lavado-Casimiro, Montesinos, Santini, & Rau, 2021). Además, PISCO es utilizado por SENAMHI en Perú con fines operativos, para el monitoreo de sequías e inundaciones a escala nacional, y se aplicó, por ejemplo, para el modelado hidrológico de la cuenca del río andino Vilcanota (Fernandez-Palomino, Hattermann, Krysanova, Vega-Jácome, & Bronstert, 2021) y otras cuencas peruanas (Llauca *et al.*, 2021). El uso de PISCO es relativamente reciente en estudios hidrológicos y debe acompañarse con el uso de comandos en lenguaje R para extraer información en coordenadas previamente indicadas (Asurza & Lavado, 2020). El conjunto de datos PISCO está disponible públicamente en <https://piscoprec.github.io/>, y respalda los estudios hidrológicos y las prácticas de gestión del agua (Aybar *et al.*, 2020).

En este caso, se utilizaron las coordenadas de tres estaciones, una dentro de la cuenca, para la validación de PISCO, utilizándose el coeficiente de correlación entre los datos de precipitación medido entre diciembre de 2013 y marzo de 2015, y precipitación grillada de PISCO del mismo periodo (Tabla 1). No fue necesario realizar el proceso de corrección del sesgo de los datos obtenidos con PISCO debido al tamaño de la cuenca ($<100 \text{ km}^2$), ya que un solo pixel cubre toda la cuenca, es decir, los datos de precipitación de un pixel representan la precipitación promedio de la cuenca de interés y es suficiente para el modelamiento

hidrológico. Los datos de descargas medias (m^3/s) utilizados para la calibración y validación del modelo se registraron en la estación hidrométrica Anya por el programa VLIR-UNALM (VLIR & UNALM, 2015). Los datos de radiación solar (MJ/m^2s^2), velocidad del viento (m/s) y humedad relativa (%) se generaron con la herramienta de simulación del clima de SWAT.

Tabla 1. Puntos de reducción de escala de Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCO).

Punto	Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (msnm)
X ₁	Anya	-11.9552	-75.2600	3 279
X ₂	Ingenio	-11.8653	-75.2800	3 390
X ₃	Huayao	-12.0335	-75.3381	3 360

Datos del suelo, cobertura vegetal y topografía

Se trabajó con el mapa de cobertura vegetal actualizado a octubre de 2019, definido y digitalizado a partir de imágenes PlanetScope del satélite SkySat-C (lanzado en el 2016), resolución espacial de 3 metros, 4 bandas (RGB, NIR) y formato de archivo GeoTIFF. El mapa de suelos se obtuvo de la zonificación ecológica y económica de la región Junín (MINAM, 2015) proyectada en el sistema de coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM), Datum y elipsoide de referencia WGS-84, escala 1/100 000, disponible desde el geoservidor del Ministerio del Ambiente del Perú

(MINAM) (<https://geoservidor.minam.gob.pe/>). Se utilizó el modelo de elevación digital del satélite ASTER (MED), versión 3, con resolución espacial de 1 arco segundo (aproximadamente 30 metros de posición horizontal en el ecuador terrestre). Dentro del ArcMap 10.5 se cargó la extensión ArcSWAT descargado desde <https://swat.tamu.edu/>, compatible con la versión de ArcMap.

Datos de modelos climáticos globales (MCGs)

Con fines comparativos entre escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 se utilizaron datos de precipitación y temperatura mensual de cinco modelos pertenecientes al CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase) obtenidos desde la página del explorador del clima Climate Explorer <https://climexp.knmi.nl/start.cgi> (conjunto de datos y evaluación del clima europeo), escogiéndose modelos que mejor representan los sistemas sinópticos que modulan el clima de Sudamérica (Acuña, Flores, Llacza, & Rorher, 2019). Los modelos globales son capaces de reproducir las características básicas del ciclo estacional de la precipitación del presente, sin embargo, hay algunas discrepancias en reproducir cuantitativamente la exactitud estacional sobre las principales cuencas del continente (Lujano, Hidalgo, Diaz, Tapia, & Lujano, 2016), por tanto, es deseable su evaluación. Se seleccionaron los RCP 4.5 y 8.5 porque representan un extremo estable y una proyección de cambio climático de alto nivel (Ashu & Lee, 2020). El escenario RCP 4.5 sugiere un mundo que utiliza tecnologías y estrategias que conducen a un forzamiento radiativo

estabilizado de 4.5 W/m² en el 2100. Por el contrario, el escenario RCP 8.5 advierte que el alto crecimiento de la población, la falta de tecnologías desarrolladas y las altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) favorecen a que el forzamiento radiativo alcance los 8.5 W/m² en el año 2100, siendo el más crítico de los CMIP5 (González-Celada *et al.*, 2021).

Para encontrar la variación del clima futuro se aplicó la metodología del cambio delta (Ramírez & Jarvis, 2010), con la cual se pudieron estimar las variaciones entre las simulaciones de los modelos climáticos actuales y futuros, agregando los cambios a las series temporales observadas. Se utilizó la suma absoluta para temperaturas (en grados centígrados) y los cambios relativos para la precipitación (en porcentaje), tomando como periodo base de 1980 a 2010 y como periodo futuro de 2070 a 2100 (Tabla 2) para cada modelo de la Tabla 3.

Tabla 2. Cambio delta de precipitación y temperaturas mensuales.

$PREC. \text{ camb} = \left(\frac{PREC. \text{ fut} - PREC. \text{ hist}}{PREC. \text{ hist}} \right)$	$T. \text{ camb} = T. \text{ fut} - T. \text{ hist}$
<ul style="list-style-type: none"> PREC.camb. = cambio de precipitación (%) 	<ul style="list-style-type: none"> T.camb. = cambio de temperatura (°C)
<ul style="list-style-type: none"> PREC.fut.= promedio multianual de la precipitación acumulada (2070-2100), promedio anual (series de tiempo) 	<ul style="list-style-type: none"> T.fut.= promedio multianual de la temperatura (2070-2100) promedio anual (series de tiempo)
<ul style="list-style-type: none"> PREC.hist.= promedio multianual de la precipitación acumulada estacional o anual (1980-2010) 	<ul style="list-style-type: none"> T.hist.= promedio multianual de la temperatura acumulada estacional o anual (1980-2010)

Tabla 3. Modelos climáticos globales (MCGs) analizados en este estudio.

Núm.	Nombre del modelo	País	Resolución atmosférica (km)
1	ACCES1.0	Australia	192 x 145
2	bcc-csm1-1	China	281 x 279
3	BNU-ESM	China	142
4	GISS-E2-rp2	EUA	110 x 110
5	CMCC-CM	Italia	82.5 x 82.5

Se utilizó el factor de corrección multiplicativo para corregir las sobreestimaciones de precipitación de los MCGs según la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{P_{obs}}{P_{sim}} \quad (1)$$

Donde F_c es el factor de corrección; P_{obs} , la precipitación observada, y P_{sim} es la precipitación simulada de un determinado modelo.

Luego las precipitaciones y temperaturas modificadas, según las variaciones establecidas en el cambio delta, se utilizaron como entrada para simular los caudales futuros en el SWAT.

La Tabla 4 contiene la descripción y fuente de los datos de la cuenca utilizados para el modelamiento hidrológico con SWAT.

Tabla 4. Descripción y fuente de datos de la cuenca Anya usados en el SWAT.

Datos	Fuente	Resolución espacial/temporal
Modelo de elevación digital (MED)	ASTER versión 3 https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/	12.5 m
Mapa de cobertura y uso de suelo	Satélite SkySat- C. Imágenes PlanetScope	3 m
Mapa de suelos	Zonificación ecológica económica Junín https://geoservidor.minam.gob.pe/	3 m
Datos diarios de precipitación (mm), temperatura máxima (°C) y temperatura mínima (°C)	PISCO: http://www.senamhi.gob.pe/?p=observacion-de-inundaciones (periodo 1981-2015)	5 km/día
Precipitación observada (mm)	Estaciones Anya, Ingenio y Huayao (2013-2015)	
Descargas (m ³ /s)	Estación hidrométrica Anya. Programa VLIR-UNALM (2013-2015)	Promedio/día
Modelos climáticos globales	Climate Explorer: https://climexp.knmi.nl/start.cgi	Promedio 150 km

Calibración y validación del modelo SWAT

Dada la poca extensión del registro de caudales, el periodo de simulación fue de agosto de 2012 a marzo de 2015, con periodo de calentamiento del modelo definido en 16 meses (agosto 2012-noviembre 2013). Se utilizaron 10 meses para la calibración y el resto para la validación (06 meses), es decir: calibración (diciembre 2013-septiembre 2014) y validación (octubre 2014-marzo 2015). Se utilizó la opción de calibración manual de parámetros del programa SWAT, considerando las medidas de eficiencia propuestas por Moriasi *et al.* (2007), entre ellas, eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE), porcentaje del sesgo (PBIAS) y coeficiente de determinación (R^2). R^2 indica la fuerza de relación lineal entre los valores observados y simulados, que van de 0 a 1, donde 1 indica una coincidencia perfecta. NSE es una estadística normalizada que establece la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la varianza de los datos medidos ("información") (Nash & Sutcliffe, 1970). NSE muestra qué tan bien se ajusta la gráfica de datos observados *versus* simulados a la línea 1:1, variando entre $-\infty$ y 1, siendo $NSE = 1$ el valor óptimo. El desempeño del modelo se considera satisfactorio cuando R^2 y NSE son mayores a 0.5 para caudal (Moriasi *et al.*, 2007). El sesgo porcentual (PBIAS), que subestima la tendencia promedio de los datos calibrados a ser más grandes o más pequeños que los datos observados, se utiliza como un indicador del rendimiento del modelo (Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1999). El valor óptimo es cero y los valores absolutos bajos indican mejores simulaciones. En pasos de tiempo mensuales, un

PBIAS menor del 25 % para el flujo de la corriente después de la calibración se considera satisfactorio (Moriasi *et al.*, 2007). La información general sobre los criterios de evaluación y/o calificaciones de desempeño de modelos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Calificaciones de desempeño por métodos estadísticos. NSE: eficiencia de Nash-Sutcliffe; PBIAS: sesgo porcentual; R^2 : coeficiente de determinación.

NSE	PBIAS	R^2	Calificación de rendimiento
$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS \leq \pm 10$	$0.75 < R^2 \leq 1.00$	Muy bueno
$0.60 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 < PBIAS \leq \pm 15$	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	Bueno
$0.36 < NSE \leq 0.60$	$\pm 15 < PBIAS \leq \pm 25$	$0.50 < R^2 \leq 0.60$	Satisfactorio
$0.00 < NSE \leq 0.36$	$\pm 25 < PBIAS \leq \pm 50$	$0.25 < R^2 \leq 0.50$	Malo
$NSE \leq 0.00$	$\pm 50 \leq PBIAS$	$0.50 \leq R^2$	Inapropiado

Fuente: adaptado de Moriasi *et al.* (2007).

Resultados

Precipitación y temperatura mensual en cuadrícula PISCO

Se calcularon los estadísticos de las series de precipitación y temperatura multianual para la cuenca Anya, obtenida con PISCO entre 1981 y 2015. La precipitación total multianual resultó de 741.8 mm, siendo los meses de mayor y menor precipitación febrero y julio, respectivamente; la temperatura promedio multianual resultante fue de 11.2 °C, con temperaturas mayores en diciembre y enero, siendo julio el mes más frío (Tabla 6). El mes de mayor precipitación fue febrero, siendo los meses de estiaje los de menor desviación estándar (Figura 2).

Tabla 6. Estadísticos de precipitación y temperatura en la cuenca Anya entre 1981 y 2015.

Mes	Precipitación (mm)				Temperatura (°C)			
	Prom.	Mín.	Máx.	Desv. est.	Prom.	Mín	Máx	Desv. est.
Ene	122.5	63.8	206.6	34.4	12.4	11.3	13.8	0.58
Feb	132.8	50.2	233.7	40.6	12.1	11.2	13.8	0.63
Mar	117.9	63.5	169.4	30.9	11.8	10.9	13.2	0.59
Abr	54.5	24.2	115.5	21.4	11.2	10.3	12.7	0.52
May	14.8	1.5	32.0	7.4	10.4	9.0	11.3	0.55
Jun	5.6	0.0	35.3	6.4	9.8	8.9	10.9	0.56
Jul	4.0	0.0	21.4	4.1	9.1	7.9	10.3	0.55
Ago	11.4	0.1	31.6	8.6	10.2	9.5	11.4	0.49
Sep	33.0	10.8	70.6	13.0	11.2	10.2	12.3	0.47
Oct	63.8	19.8	124.8	21.4	12.0	11.2	12.7	0.37
Nov	71.0	31.5	143.4	25.5	12.3	11.6	13.0	0.40
Dic	110.4	48.1	179.3	30.7	12.4	11.6	13.3	0.36
Mín.	4.0	0.0	21.4	4.1	9.1	7.9	10.3	0.4
Máx.	132.8	63.8	233.7	40.6	12.4	11.6	13.8	0.6

Total precipitación: 741.8 mm; media anual de temperatura: 11.2 °C.

Fuente: elaborado con la base de datos PISCO.

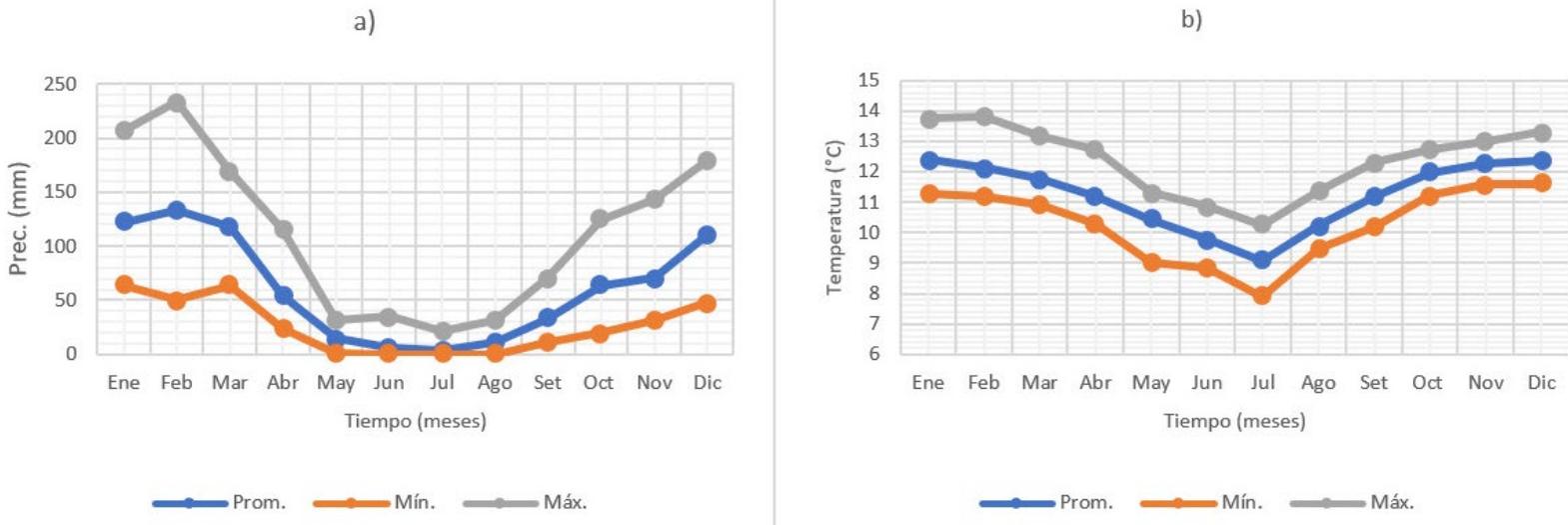


Figura 2. Precipitación (a) y temperatura (b) en la cuenca Anya obtenidas de la base de datos PISCO (1981-2015).

La Figura 3 muestra el comportamiento tendencial de ambas variables en el periodo entre 1981 y 2015; se nota que la precipitación tuvo un leve incremento, no obstante la temperatura tuvo un aumento significativo de aproximadamente 0.8 °C en el periodo considerado, verificándose la tendencia de calentamiento de la zona. Es importante destacar que en las dos últimas décadas del siglo XX, el Perú enfrentó dos fenómenos de El Niño costero de intensidad fuerte: el primero en el periodo 1982-1983, y el segundo en el periodo 1997-1998 (SENAMHI, 2014), razón por la cual la Figura 3b muestra un notable incremento de la temperatura en los años 1983 y 1998, demostrando la influencia del fenómeno El Niño costero en las temperaturas de la cuenca interandina Anya. Con respecto a la precipitación, los resultados no son concluyentes, pero se nota que en el evento de 1983 la precipitación disminuyó, porque

el calentamiento en el Pacífico Central puede suprimir la lluvia en las partes altas de las cuencas (Lavado & Espinoza, 2014). No obstante, en el año 1998 la precipitación total anual fue igual al promedio de la zona.

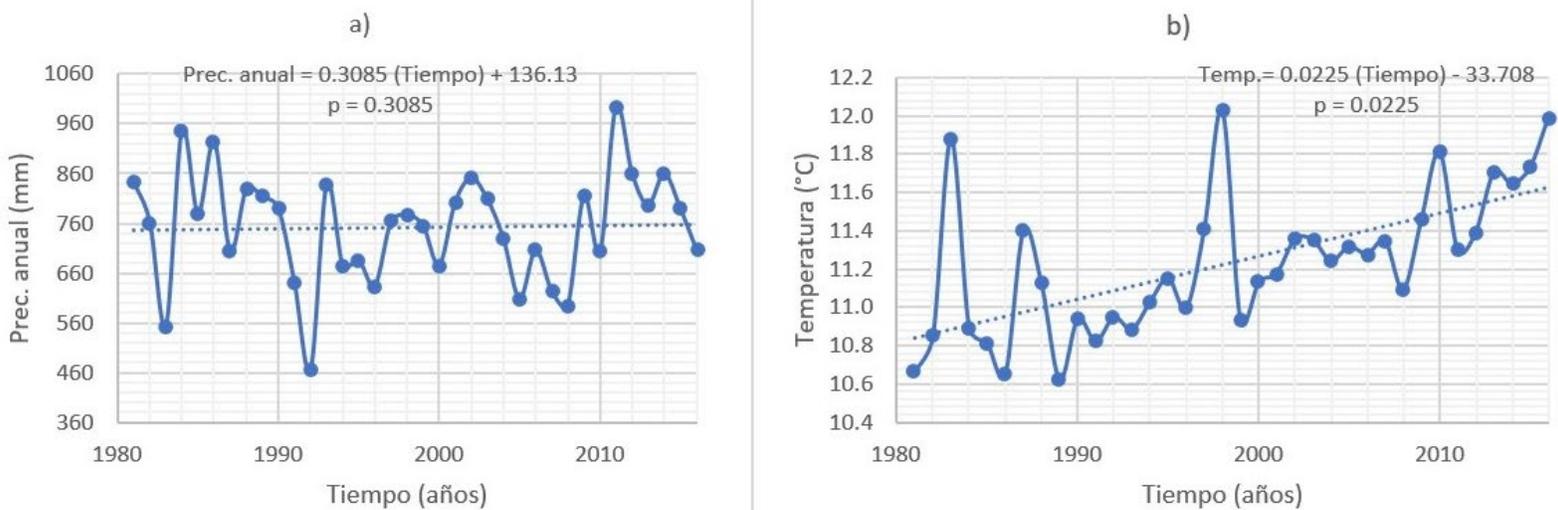


Figura 3. Tendencias de precipitación (a) y temperatura (b) en la cuenca Anya obtenidas de la base de datos PISCO (1981-2015).

Aplicación de data grillada PISCO

En principio, se estableció el nivel de correlación entre los datos de precipitación media mensual registrada (datos obtenidos para la cuenca entre 2013 y 2015) y la precipitación media obtenidas de la base de datos PISCO para el mismo periodo, obteniéndose un coeficiente de determinación $R^2 = 0.91$ (muy bueno) (Figura 4). Del mismo modo, para la temperatura media mensual se obtuvo un coeficiente de determinación

$R^2 = 0.63$ (bueno), lo que permitió verificar que los datos obtenidos con el producto grillado PISCO son adecuados para ser ingresados al modelo SWAT en periodos más largos.

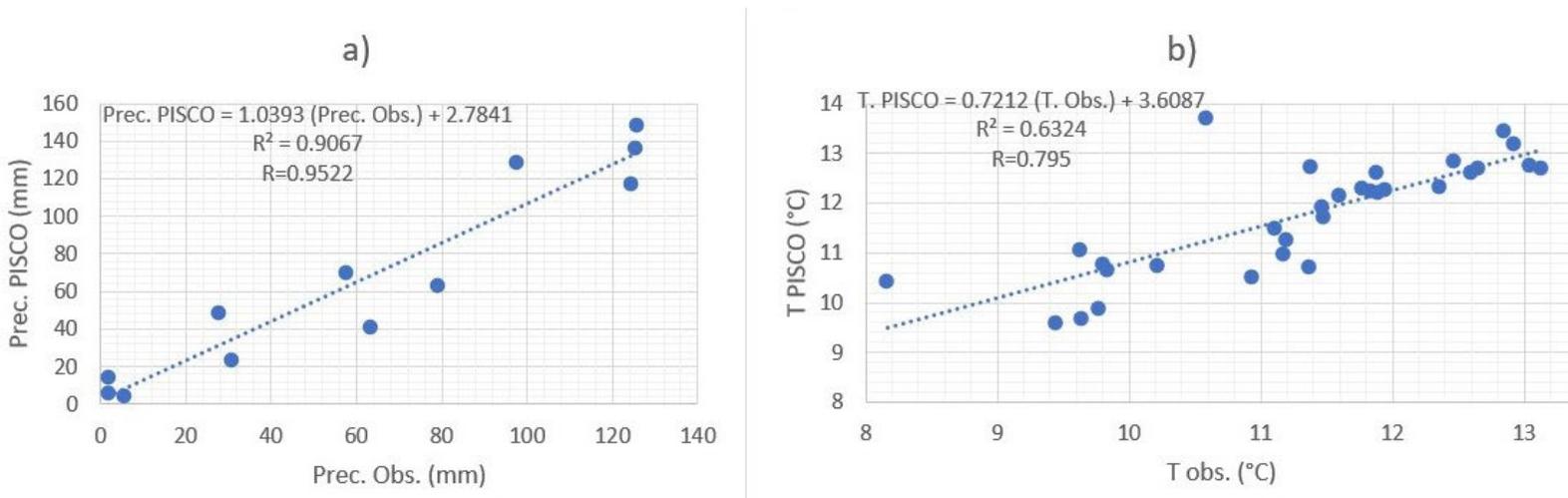


Figura 4. Correlación entre datos observados mensuales (2013-2015) y datos grillados PISCO: a) precipitación, b) temperatura.

Validación de modelos CMIP5-precipitación y temperatura proyectados con MCGs

Al comparar las precipitaciones obtenidas con la base de datos PISCO y las simuladas con los MCGs en la cuenca para el periodo de 1981-2015 se nota una sobrestimación de las precipitaciones simuladas respecto de las obtenidas con PISCO (Figura 5a), tal como lo reportaron Lujano *et al.* (2016) para el altiplano peruano. Sin embargo, pese a que no cuantifican con exactitud los valores observados, es evidente que las salidas de los

MCGs reproducen de modo adecuado la estacionalidad de la precipitación en la zona, por lo cual el coeficiente de determinación (R^2) entre precipitación observada y simulada es "muy bueno" en todos los casos (Tabla 7). En cuanto a la temperatura, todos los MCGs también la sobrestiman, verificándose que el rango térmico no está siendo representado adecuadamente, notándose rangos menores que el observado de 3.3 °C.

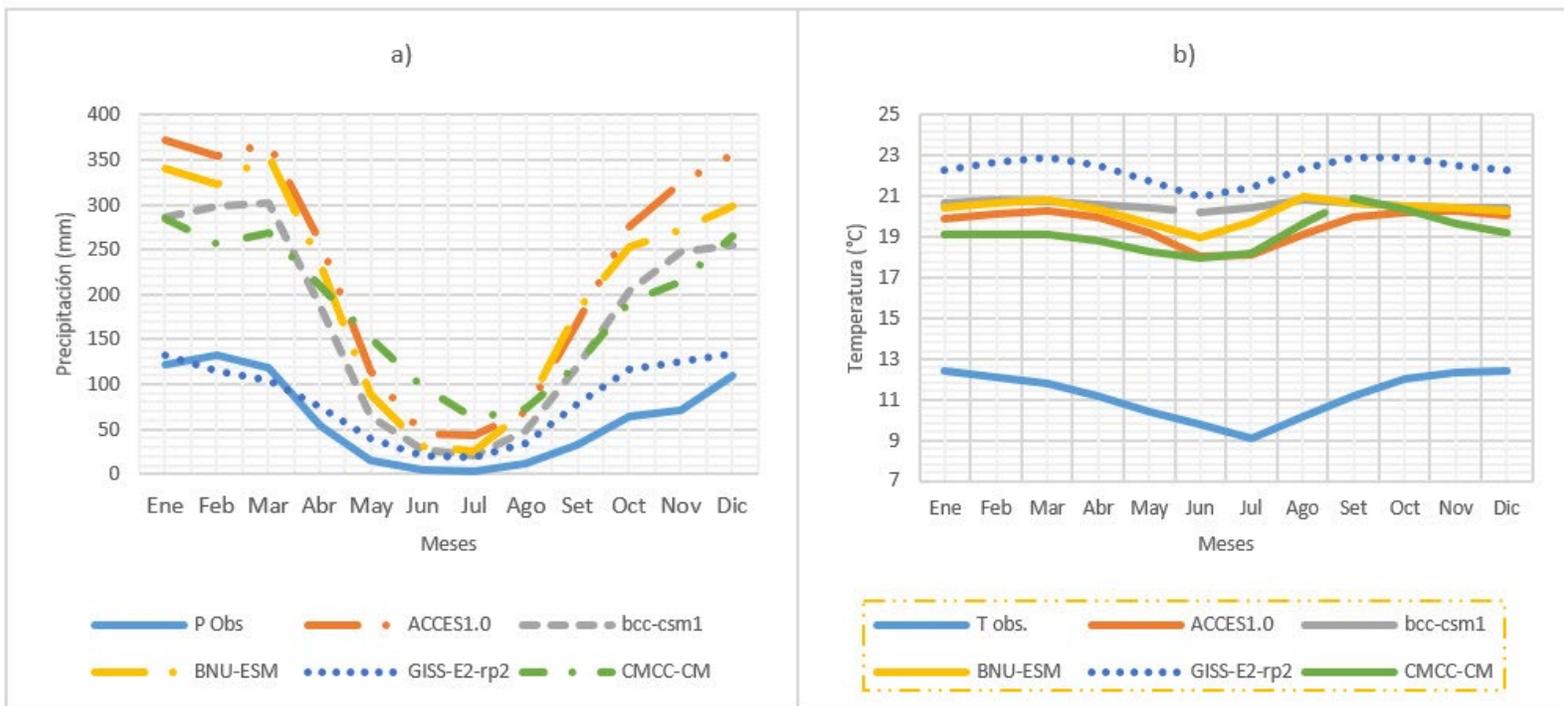


Figura 5. Precipitación (a) y temperatura (b) según MCGs *versus* base de datos PISCO en el periodo 1981-2015.

Tabla 7. Coeficientes de determinación (R^2) de la variable precipitación calculada a partir de la base de datos PISCO y datos simulados con MCGs en el periodo 1981-2015.

MCG	R^2
ACCES1.0	0.915
bcc-csm1	0.941
BNU-ESM	0.907
GISS-E2-rp2	0.791
CMCC-CM	0.900

Los valores de precipitación promedio mensual de los MCGs fueron reducidos por el factor multiplicativo estimado mediante la Ecuación (1). En seguida, la variación de la precipitación y temperatura mensual se calculó a través de la diferencia entre los resultados de los modelos en el periodo futuro (2070-2100) y el periodo base (1980-2010) (cambio delta). La evaluación del cambio climático al 2100 en el escenario RPC 4.5 y los cinco MCGs da como resultado que, en cuatro modelos, se espera un aumento de la precipitación en la cuenca y solo en un caso —modelo BNU-ESM— la precipitación total anual disminuiría (-0.51 %); no obstante, en el promedio de los modelos, la variación del porcentaje de precipitación será de 4.63 %. En general, la precipitación futura es muy compleja e incierta, porque se presentan diferencias entre escenarios RCP y MCGs. Respecto a la temperatura en el escenario RCP 4.5, el incremento del promedio anual será de 2.3 °C. En el escenario RCP 8.5 se espera un

aumento del porcentaje promedio anual de precipitación del 8.14 % y de 4.5 °C de la temperatura (Figura 6). Los resultados son similares a lo reportado por investigadores del SENAMHI, quienes indican que habrá un progresivo incremento de las temperaturas máxima y mínima en toda la zona en relación con el clima actual (Avalos *et al.*, 2013).

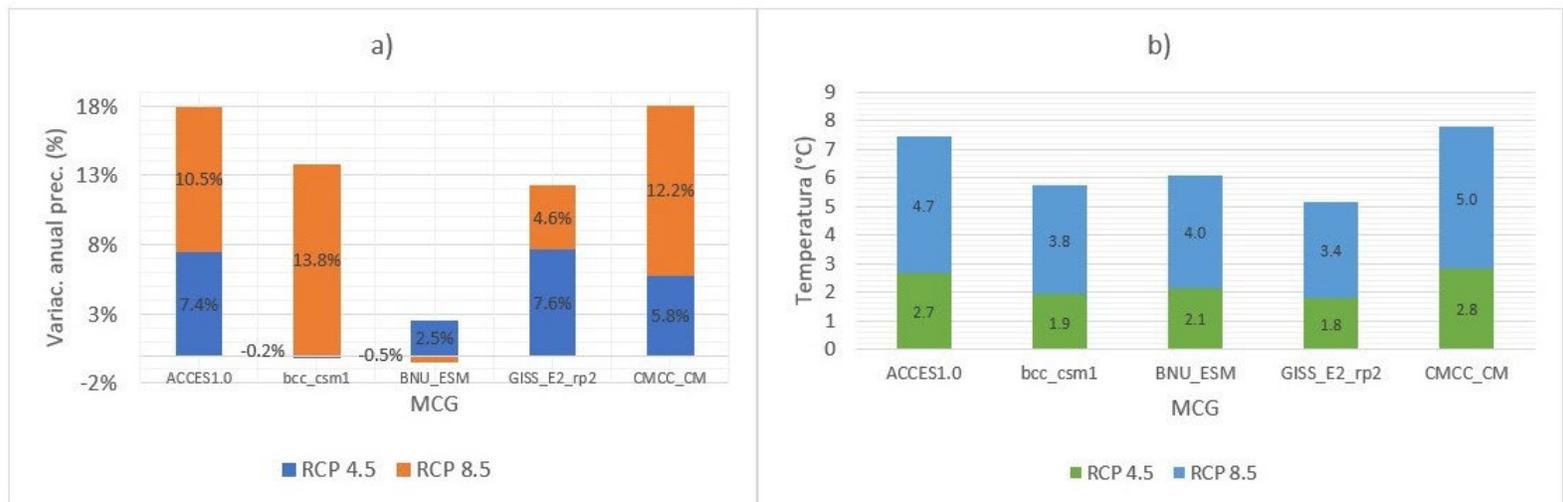


Figura 6. Proyecciones de la precipitación (a) y temperatura (b) con los cinco MCGs al 2100 en escenarios RCP 4.5 y 8.5.

Parámetros seleccionados del modelo SWAT

Para la calibración del modelo se definieron y seleccionaron de forma manual un total de 12 parámetros potencialmente influyentes, teniendo como referencia los parámetros seleccionados para la cuenca andina del

río Vilcanota de Fernandez-Palomino *et al.* (2021), relacionados con el flujo base, la unidad de respuesta hidrológica y la rugosidad (Arnold, Moriasi, & Gassman, 2012). Se hizo variar el parámetro CN_2 (curva número en condición de humedad II, intermedia), asociado con la escorrentía superficial. Entre los parámetros SWAT calibrados, solo dos (SOL_AWC, GW_REVAP) pueden alterar el balance hídrico, ya que influyen en la evapotranspiración y, posteriormente, en la estimación de la escorrentía. Los parámetros restantes influyen en el agua subterránea (GW_DELAY, RCHRG_DP, GWQMN, ALPHA_BF) y el enrutamiento del flujo (CH_N2) sin afectar la pérdida de agua del sistema. El parámetro RCHRG_DP indica el volumen de agua filtrado en el acuífero profundo en relación con la recarga total que ingresa a los acuíferos y brindan una idea de la recarga que ingresa a los acuíferos profundos en las cuencas andinas peruanas, que sustentan el flujo prolongado de la estación seca en estas cuencas (Fernandez-Palomino *et al.*, 2021). Los parámetros seleccionados y resultados calibrados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros del modelo SWAT utilizados en la cuenca Anya.

Ítem	Parámetro	Definición	Valor	Mejor simulación
			inicial	Simulación 21
1	*R_CN2.mgt	Número de curva del SCS para la condición II de humedad	*	+4 %
2	V_ALPHABF.gw	Factor alpha del flujo base (d)	0.048	0.4
3	V_GWDELAY.gw	Desfase agua subterránea (d)	31	60
4	V_GWQMN.gw	Nivel del umbral freático para iniciar flujo de retorno (mm)	1 000	1 000
5	V_GWREVAP.gw	Coefficiente de revalorización del agua subterránea	0.02	0.182
6	V_RCHRGDP.gw	Fracción de percolación del acuífero profundo	0.05	0.05
7	V_REVAPMN.gw	Profundidad del acuífero superficial para producir revap. (mm)	750	1 050
8	V_CANMX.hru	Almacenamiento máximo de la cubierta vegetal	0	15
9	V_ESCO.hru	Factor de compensación de ET del suelo	0.95	0.64
10	V_EPCO.hru	Factor de compensación de la captación de las plantas	1	0.7
11	R_CHN2.rte	N. de Manning del cauce principal	0.014	0.137
12	*R_SOLK.sol	Conductividad hidráulica saturada (mm h ⁻¹)	*	-4 %

*Varía de acuerdo con el tipo de suelo.

Calibración y validación del modelo SWAT

El valor PBIAS para la calibración y validación del caudal en el río Anya es positivo, lo que indica la subestimación del modelo. La diferencia entre los valores simulados y observados se puede atribuir a varios factores, básicamente la poca data de caudales registrados no permite una calibración y validación automática, que es necesaria para utilizar el SWAT CUP. Las fuentes de incertidumbre en este caso son los errores de medición, del instrumento y los errores del modelo. Sin embargo, con base en los valores de NSE y R^2 , los resultados de calibración y validación son satisfactorios (Tabla 9).

Tabla 9. Indicadores estadísticos de desempeño mensual del modelo.

Indicador	Etapas de calibración	Calificación de desempeño	Etapas de validación	Calificación de desempeño
NSE	0.62	Bueno	0.46	Satisfactorio
PBIAS	6.72 %	Muy bueno	7.43 %	Muy bueno
R^2	0.81	Muy bueno	0.96	Muy bueno

Evaluación del cambio climático en las descargas futuras (2070-2100)

Luego de la calibración, se incorporaron al modelo hidrológico SWAT la precipitación y temperatura ajustadas según las variaciones por escenario RCP y por MCG, manteniendo constante la topografía, división de cuencas y tipo de suelo. La Tabla 10 contiene las descargas mensuales simuladas en condición actual, y las salidas de las descargas simuladas en SWAT con datos climáticos modificados según los cinco MCGs ensayados. El promedio anual de los MCGs mostró un incremento de +2.4 y +12.6 % en los escenarios RCP 4.5 y 8.5, respectivamente. La Figura 7 muestra los hidrogramas mensuales de descargas promedio proyectadas en la cuenca Anya para el periodo 2070-2100 en los escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. Se visualiza un incremento del escurrimiento en los meses húmedos alcanzando su mayor nivel de variación en marzo. Se evidencia que el promedio de descargas se incrementaría en los meses de abril y mayo, resultado similar a lo obtenido por Lujano *et al.* (2016) en la cuenca del río Ramis en Puno, sin embargo, las descargas disminuirían en los meses de julio a diciembre.

Tabla 10. Descargas medias mensuales simuladas actual y en el horizonte 2070-2100 en m³/s.

Mes	Q sim act	Acces 1.0 4.5	Acces 1.0 8.5	bcc - csm 4.5	bcc - csm 8.5	BNU - ESM 4.5	BNU - ESM 8.5	CMCC - CM 4.5	CMCC - CM 8.5	GISS - E2 4.5	GISS - E2 8.5
Ene	1.01	0.96	1.01	0.82	1.20	1.02	1.00	0.91	1.22	0.68	0.81
Feb	1.11	1.22	1.29	1.05	1.32	1.27	1.23	1.30	1.46	0.89	1.07
Mar	1.40	1.52	1.63	1.49	1.63	1.45	1.46	1.64	1.93	1.44	1.41
Abr	0.91	1.21	1.27	1.15	1.28	1.18	1.19	1.28	1.43	1.21	1.14
May	0.56	0.89	0.93	0.84	0.93	0.82	0.82	1.00	1.14	0.83	0.79
Jun	0.16	0.14	0.15	0.12	0.15	0.11	0.10	0.18	0.24	0.04	0.11
Jul	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.06	0.03	0.04
Ago	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03
Set	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06
Oct	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03
Nov	0.22	0.09	0.09	0.07	0.11	0.09	0.06	0.09	0.11	0.06	0.08
Dic	0.97	0.79	0.81	0.62	0.84	0.83	0.68	0.84	1.01	0.35	0.63
Media	0.54	0.58	0.61	0.52	0.64	0.58	0.56	0.62	0.73	0.47	0.52
Máx.	1.40	1.52	1.63	1.49	1.63	1.45	1.46	1.64	1.93	1.44	1.41
Mín.	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03
Var.		7.4 %	13.1 %	-3.0 %	17.4 %	6.6 %	3.1 %	14.0 %	34.4 %	-12.8%	-4.7 %

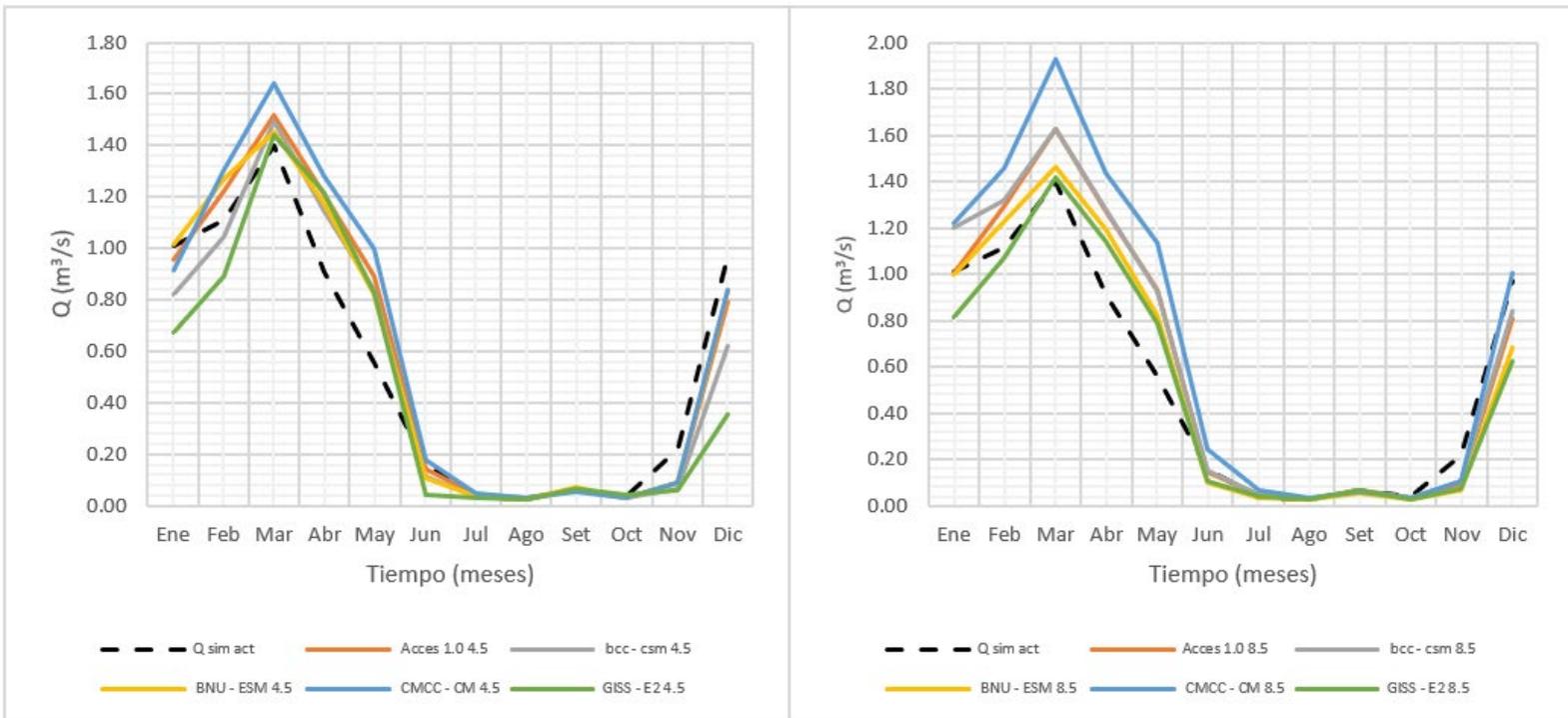


Figura 7. Variación de las descargas del río Anya en escenarios climáticos RCP 4.5 y 8.5 en el horizonte 2070-2100.

Discusión

Con el producto grillado PISCO se están superando limitaciones en el uso de modelos matemáticos en muchas cuencas del Perú por la escasez de datos diarios de precipitación, ya que permite calibrar un mayor número de cuencas para fines operacionales de pronóstico diario de caudales, utilizando diferentes modelos hidrológicos (Aybar *et al.*, 2017). Los productos de precipitación basados en satélites son fuentes alternativas

prometedoras para regiones con escasas observaciones. Sin embargo, es necesario utilizar datos terrestres para reducir el sesgo de dichas estimaciones, ya que pueden ser erróneas o sesgadas (Fernandez-Palomino *et al.*, 2022). No obstante, la mayor precisión de las estimaciones de precipitación con PISCO se obtiene en regiones calibradas, como la costa del Pacífico, y las laderas oriental y occidental de los Andes de Perú (Aybar *et al.*, 2020; Llauca *et al.*, 2021). Por tanto, se corrobora que PISCO tiene validez en regiones de la sierra del Perú, con altos coeficientes de correlación (Salas, 2019), por lo que su uso para el valle del Mantaro en Junín resulta eficiente y confiable. Los resultados muestran que el modelo SWAT representa de forma correcta la estacionalidad de los componentes principales del ciclo hidrológico. Sin embargo, el modelo no cuantifica de manera correcta las altas tasas de flujo durante los periodos húmedos, como lo reportaron Asurza y Lavado (2020), concluyendo que puede ser usado como apoyo para estudios de balance hídrico y manejo del agua en el drenaje del Pacífico peruano. El enfoque y los métodos desarrollados se pueden replicar en cualquier otra región del Perú.

Para la calibración del modelo, en la cuenca Anya existen limitaciones de datos observados, característica típica de cuencas poco instrumentadas; sin embargo, Arnold, Srinivasan, Muttiah y Williams (1998) mencionan que el SWAT no requiere calibración para cumplir con su propósito de predicción en este tipo de cuencas. No obstante, se alcanzó un buen ajuste de calibración del caudal medio mensual, que permitió el uso del modelo SWAT para la proyección del cambio climático en las descargas futuras de la cuenca. A veces, las incertidumbres debido

a la calidad de los datos observados impiden un buen modelado hidrológico. Por tanto, se necesitan más estudios para cuantificar las incertidumbres en el modelado hidrológico debido a errores en los datos de descarga observados en las cuencas andinas (Fernandez-Palomino, 2021).

La anomalía de precipitación juega un rol importante en la probabilidad de inundaciones y erosión en la cuenca, dado que la cantidad e intensidad de lluvia son los principales factores que se modifican con el cambio climático (González-Celada *et al.*, 2021), y es lo que se puede verificar en el comportamiento de la precipitación en la zona actualmente, notándose que en la cuenca Anya, las temperaturas son mayores y las precipitaciones son más intensas y de corta duración. Estos resultados indican el aumento en la concentración de eventos de lluvia a lo largo del siglo XXI, lo que sugiere que eventos individuales de lluvia pueden tener mayor potencial físico para el riesgo de erosión a finales del siglo (Wongchuig *et al.*, 2018). Desde el punto de vista climático, es sabido que un promedio mensual de precipitación suministra información valiosa sobre la pluviometría de un territorio, pero no dice nada acerca de la frecuencia o número de días de lluvia, ni tampoco del desglose de las cantidades registradas en los días lluviosos (Sarricolea & Romero, 2015). La erosión hídrica en la cuenca Anya es mayor en los meses de altas precipitaciones debido a las características geomorfológicas y de paisaje del área de estudio, donde el factor topográfico es indicador de pendientes pronunciadas y, por consiguiente, de mayor intensidad de procesos erosivos (Del Águila & Mejía, 2021).

Al analizar el cambio climático en regiones ubicadas en los Andes centrales, Acuña *et al.* (2019) obtuvieron resultados similares en cuanto a la precipitación utilizando tres modelos globales del CMIP3, con una posible variación de la precipitación anual de $\pm 15\%$ en el peor escenario de emisiones, lo cual tendrá repercusión directa en las descargas. Asimismo, Álvarez y Villaverde (2015), al realizar la modelación hidrológica ante el cambio climático en la cuenca del río Lurín (vertiente del océano Pacífico-costa peruana), determinaron que habrá un incremento en la disponibilidad del recurso hídrico (aumento de caudales), y los periodos húmedos y secos serán más intensos en el futuro. Pilares (2018), en su investigación para la cuenca del río Cabanillas en Puno (vertiente del lago Titicaca-zona altoandina sur del Perú), obtuvo que la variación promedio anual de descargas es positiva en todos los escenarios y modelos probados.

Conclusiones

En la actualidad, en la cuenca Anya el cambio climático se manifiesta en la alteración de las variables temperatura y precipitación. Los resultados promedio muestran un incremento de precipitación entre 4.63 y 8.14 %, y temperatura de 2.3 a 4.2 °C, en escenarios RCP 4.5 y 8.5 al 2100, respectivamente. Para la evaluación del cambio climático a futuro se extrajo información de cinco modelos climáticos globales (MCGs) en dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y 8.5) para simularlos en SWAT. Se logró comprobar que, para los dos escenarios, habrá un aumento en la

precipitación y la temperatura en la zona, lo cual incidirá en el incremento de la escorrentía superficial. Por tanto, se concluye que en la cuenca Anya habrá un alza de los caudales en ambos escenarios de emisiones: del 2.4 % en RCP 4.5 y del 12.6 % en RCP 8.5. Sin embargo, cabe destacar que las proyecciones de cambio climático contienen varias incertidumbres asociadas con la resolución de los modelos climáticos globales; no obstante, estos resultados muestran la vulnerabilidad potencial de la agricultura en condiciones de calentamiento global.

Los indicadores estadísticos de bondad de ajuste de modelos hidrológicos demuestran que el modelo SWAT permite reproducir la capacidad de escurrimiento de la cuenca Anya, cuya ejecución se realizó en un entorno SIG, utilizando de entrada los mapas de cobertura y tipos de suelo, los que pueden ser actualizados a partir de imágenes satelitales, como en este caso, en que se actualizó el mapa de cobertura vegetal. Además, el modelo SWAT demostró ser muy útil para modelar el cambio climático a partir de registros obtenidos de base de datos como PISCO del SENAMHI y modelos climáticos globales (MCGs).

Respecto al probable aumento de los caudales influenciados por el cambio climático, es importante que se realice la adecuada gestión del recurso hídrico en la cuenca Anya, respetando las fajas marginales del río y evitándose todo tipo de construcciones en ellas. Asimismo, es necesario continuar con las prácticas de conservación de suelos (control de cárcavas) y reforestación, de preferencia con especies nativas. Se resalta la importancia del monitoreo hidrológico, y conocimiento de la dinámica de uso y gestión de recursos hídricos, para lograr mejores ajustes hidrológicos en zonas de alta intervención antrópica, incrementando el

uso potencial de la modelación hidrológica como herramienta de planificación.

Agradecimientos

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y a la Universidad Nacional del Centro del Perú, instituciones donde se nos permite ejercer la docencia y la investigación.

Referencias

- Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., & Srinivasan, R. (2017). A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 international SWAT conference. *Water* (Switzerland), 10(1). Recuperado de <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- Acuña, D., Flores, W., Llacza, A., & Rorher, M. (2019). Escenarios futuros de cambio climático desde modelos globales para localidades de los Andes centrales. *Anales Científicos*, 80(2), 476-494. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7546798>
- Almeida, R. A., Pereira, S. B., & Pinto, D. B. (2018). Calibration and validation of the SWAT hydrological model for the Mucuri river basin. *Engenharia Agrícola*, 38(1), 55-63. Recuperado de <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p55-63/2018>

- Álvarez, T., & Villaverde, R. (2015). *Balance hídrico futuro en la cuenca del río Lurín a través de la modelación hidrológica ante el cambio climático* (tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2157>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., & Gassman, P. W. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1491-1508. Recuperado de <https://swat.tamu.edu/media/99051/azdezasp.pdf>
- Ashu, A., & Lee, S. (2020). Reutilización de agua de drenaje agrícola en una cuenca de uso de suelo mixto. *Agronomía*, 9(1), 6. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/agronomy9010006>
- Asurza, F., & Lavado, W. (2020). Estimación de parámetros regionales del modelo SWAT: metodología y aplicación a cuencas hidrográficas en el drenaje del Pacífico peruano. *Agua*, 12(11), 3198. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/w12113198>

- Aybar, C., Lavado-Casimiro, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Obando, O. (2017). *Uso del producto grillado "PISCO" de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico* (Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017). Lima-Perú. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>
- 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 Science Journal*, 65(5), 770-785. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Avalos, G., Oria, C., Jacome, G., Acuña, D., Llacza, A., & Cubas, F. (2013). *Cambio climático en la cuenca del río Mantaro. Proyecciones para el año 2030*. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
- Del Águila, S., & Mejía, A. (2021). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando sistemas de información geográfica. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(2), 538-562. Recuperado de <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-12>
- Deng, C., Pisani, B., Hernández, H., & Li, Y. (2020). Assessing the impact of climate change on water resources in a semi-arid in central Mexico using a SWAT model. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(2), 1-19. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n2a150819>

- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Vega-Jácome, F., & Bronstert, A. (2021). Towards a more consistent eco-hydrological modelling through multi-objective calibration: A case study in the Andean Vilcanota River basin, Peru. *Hydrological Science Journal*, 66, 59-74. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1846740>
- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2022). A novel high-resolution gridded precipitation dataset for Peruvian and Ecuadorian watersheds: Development and hydrological evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 309-336. Recuperado de <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>
- Funk, C., Peterson, P., & Landsfeld, M. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066, Recuperado de <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gomáriz, F., & Sarría, F. (2018). Efecto de la subdivisión de cuencas y la estimación de variables climáticas en la simulación hidrológica con el modelo SWAT en cuencas semiáridas mediterráneas. *Papeles de Geografía*, (64), 114-113. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.6018/geografia/2018/331531>

- González-Celada, G., Ríos, N., Benegas-Negri, L., & Argotty-Benavides, F. (2021). Impacto del cambio climático y cambio de uso/cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(6), 363-421. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-06-09
- Guabloche, J., & Saldarriaga, M. (2013). Aspectos económicos y sociales de la región Junín. *Revista Moneda, Banco Central de Reserva del Perú*, 155, 2-17. Recuperado de <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Revista-Moneda/moneda-155/moneda-155-02.pdf>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143. Recuperado de [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135))
- IGP, Instituto Geofísico del Perú. (2005). Diagnóstico de la cuenca del Mantaro bajo la visión del cambio climático. Serie: evaluación local integrada de cambio climático para la cuenca del río Mantaro, vol. 2. Lima, Perú: Fondo Editorial del Consejo Nacional del Ambiente-Consejo Nacional del Ambiente. Recuperado de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/715>

- Lavado, W., & Espinoza, J. C. (2014). Entendiendo los impactos de diferentes tipos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú. *Boletín técnico: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño, Instituto Geofísico del Perú*, 1 (3), 4-7. Recuperado de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5043>
- Lujano, E., Hidalgo, L. S., Diaz, R., Tapia, B., & Lujano, A. (2016). Cambios proyectados de los recursos hídricos bajo escenarios de emisiones RCP 4.5 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. Recuperado de <https://doi.org/10.18271/ria.2016.200>
- 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, 1048, Recuperado de <https://doi.org/10.3390/w13081048>
- MINAM, Ministerio del Ambiente. (2015). *Mapa de zonificación ecológica económica del departamento de Junín. Sistema Nacional de Información Ambiental-SINIA*. Recuperado de <http://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/junin/>

- Molina-Navarro, E., Hallack-Alegría, M., Martínez-Pérez, S., Ramírez-Hernández, J., Mungaray-Moctezuma, A., & Sastre-Merlín, A. (2016). Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. *Agricultural Water Management*, 175(SI1), 29-42. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.029>
- Moriasi, D. N., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R. L., Hermel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASAE*, 50, 885-900. Recuperado de DOI: 10.13031/2013.23153
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nazari, M., Masoud, T., & Karakouzian, M. (2020). Análisis de sensibilidad de la resolución DEM y parámetros efectivos de rendimiento de escorrentía en el modelo SWAT: un estudio de caso. *Revista de Suministro de Agua: Investigación y Tecnología-Aqua*, 69(1), 39-54. Recuperado de <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.044>
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., & King, K. (2005). *Soil and water assessment tool theoretical documentation*. Texas, USA: Agricultural Research Service. Recuperado de <https://swat.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>

- Ocampo, O., & Vélez, J. (2013). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Colombia*. DOI: <https://doi.org/10.22395/rium.v13n24a3>
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2017). *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre la generación de un conjunto definido de productos nacionales de vigilancia del clima*. (Nº 1204). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- PDC, Plan de Desarrollo Concertado. (2013). *Plan de Desarrollo Concertado del distrito San Pedro de Saño-Huancayo*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/294120690/PDC-SANO-2013-2021>
- Penalba, O., & Pántano, V. (2019). Proyecciones de los flujos de agua en el suelo a partir de los modelos climáticos globales del CMIP5 en Sudamérica y su impacto regional. *Revista Argentina de Agrometeorología*. Recuperado de https://www.siteaada.org/_files/ugd/cf1a17_db661b62ac7e4910b830787e59313cea.pdf?index=true
- Pilares, I. (2018). *Disponibilidades hídricas reguladas del reservorio Lagunillas y Río Verde para usos múltiples en la cuenca del río Cabanillas* (tesis de doctorado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3675>

- Ramírez, J., & Jarvis, A. (2010). Downscaling global circulation model outputs: The delta method decision and policy analysis working paper No. 1. *International Center for Tropical Agriculture*, 1, 1-18. Recuperado de <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/90731>
- Sabino, E., Lavado, W., & Aybar, C. (2019). *Estimación de las zonas de vida de Holdridge en el Perú*. Servicio Nacional de Meteorología y Climatología del Perú. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-87.pdf>
- Salas, M. (2019). *Estimación de la carga de sedimentos en la cuenca del río Pitumarca mediante el uso del modelo SWAT* (tesis de Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16823>
- Sarricolea, P., & Romero, H. (2015). Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 183(62), 169–183. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000300010>
- SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2014). *El fenómeno El NIÑO en el Perú*. Recuperado de https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/07/Dossier-El-Ni%C3%B1o-Final_web.pdf

- Swain, S. S., Mishra, A., Sahoo, B., & Chatterjee, C. (2020). Water scarcity-risk assessment in data-scarce river basins under decadal climate change using a hydrological modelling approach. *Journal of Hydrology*, 590, 125260. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125260>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485-498. Recuperado de <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- VLIR & UNALM, Vlaamse Interuniversitaire Raad University Development Cooperation & Universidad Nacional Agraria La Molina. (2015). *Actividades claves dentro de la UNALM*. Lima, Perú: Vlaamse Interuniversitaire Raad University Development Cooperation y Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Wongchuig, S. C., Mello, C. R., & Chou, S. C. (2018). Projections of the impacts of climate change on the water deficit and on the precipitation erosive indexes in Mantaro River Basin, Peru. *Journal of Mountain Science*, 15(2), 264-279. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4418-8>