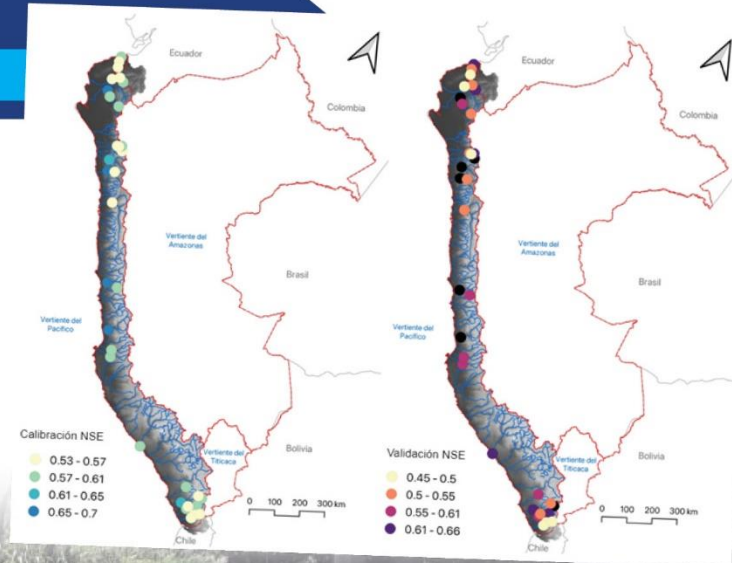
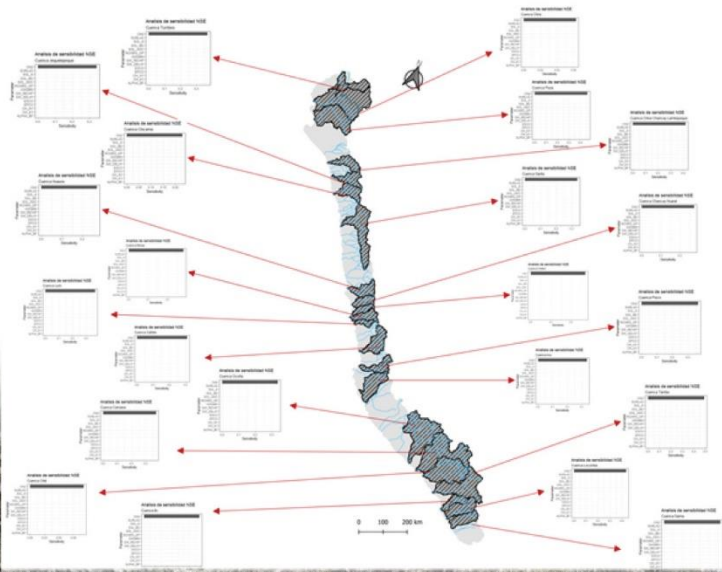


MONITOREO HIDROLÓGICO EN TIEMPO CUASI REAL EN LA VERTIENTE DEL PACÍFICO EMPLEANDO EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT ESTUDIO FINAL



Citar:

Traverso, K.; Lavado-Casimiro, W. y Felipe, O. (2022). *Monitoreo hidrológico en tiempo cuasi real en la vertiente del Pacífico empleando el modelo hidrológico SWAT.* Estudio Final. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI.
<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1780>

**MONITOREO HIDROLÓGICO
EN TIEMPO CUASI REAL EN
LA VERTIENTE DEL PACÍFICO EMPLEANDO
EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT
ESTUDIO FINAL**





DIRECTORIO

PhD. Guillermo Antonio Baigorria Paz
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL
SENAMHI

REVISORES DEL ESTUDIO

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

AUTORES

MSc. Kevin Arnold Traverso Yucra
PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

Lima-Perú

Mayo – 2022

Contenido

Resumen	7
1. Introducción	8
3.1. Modelo hidrológico SWAT	11
3.2. Preparación de datos y construcción del modelo	13
3.3. Configuración del modelo SWAT	15
3.4. Análisis de sensibilidad de parámetros de calibración	16
3.5. Calibración del modelo.	17
3.5.1. Criterios de desempeño.	19
3.6. Operativización del modelo hidrológico.	20
4. Resultados.....	22
4.1. Sensibilidad del modelo hidrológico	22
4.2. Regionalización y transferencia de parámetros.....	23
4.2.1. Método de agrupamiento Fuzzy C-Means.....	23
4.3. Calibración y validación hidrológica del modelo SWAT.....	25
4.4. Operativización del modelo hidrológico	25
5. Discusiones	27
5.1. Modelamiento hidrológico.....	27
5.2. Análisis de sensibilidad	27
5.3. Operativización en tiempo cuasi-real del modelo.....	27
6. Resumen y conclusiones	29
7. Referencias bibliográficas	30

Contenido de figuras

Figura 1. a) Sudamérica b) Perú y vertientes hidrográficas y c) Delimitación de la vertiente del Pacífico y ubicación de las cuencas analizadas para el modelamiento hidrológico en SWAT, modelo numérico de terreno y estaciones hidrológicas.	10
Figura 2. Representación esquemática del proceso de modelado e implementación de la operativización del modelo SWAT en la vertiente del Pacífico peruano.....	11
Figura 3. Representación esquemática del concepto del balance hidrológico SWAT, (Abbas & Xuan, 2019).....	12
Figura 4. Información empleada para el modelamiento en SWAT, a) Delimitación de subcuencas, b) Modelo numérico de terreno, c) Uso cobertura de suelo y d) Tipo de suelo.	14
Figura 5. Proceso metodológico del análisis de sensibilidad de parámetros por FAST, adaptado de (Cukier et al., 1973)	17
Figura 6. Esquematización de la implementación del proceso operativo del modelado hidrológico a tiempo cuasi-real en SWAT en la vertiente del Pacífico.....	21
Figura 7. Resultados del análisis de sensibilidad del modelamiento hidrológico empleando el algoritmo FAST.	22
Figura 8. Esquematización de regionalización hidrológica, mediante el análisis basada en similitud. Adaptado de (Guo et al., 2021).	23
Figura 9. Resultados del análisis de regionalización mediante la metodológica de Fuzzy C-Means en la vertiente del Pacífico.	24
Figura 10. Resultados obtenidos de las métricas de eficiencia a partir de la transferencia de valores de parámetros encontrados en el proceso de calibración y validación de la vertiente del Pacífico.	26

Contenido de tablas

Tabla 1: Información, resolución de pixel y descripción de los datos empleados en el modelo SWAT.	15
Tabla 2: Parámetros seleccionados empleados para la calibración y validación del modelo hidrológico SWAT.....	18

MONITOREO HIDROLÓGICO EN TIEMPO CUASI REAL EN LA VERTIENTE DEL PACÍFICO EMPLEANDO EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT

Resumen

El tener conocimiento de los procesos hidrológicos y tener cuantificado la información de caudales permite que la gestión de recursos hídricos presente el comportamiento hidrológico actual, realice predicción de tendencias, establezca grados de afectación (eventos como inundaciones y sequías) y realice predicciones a corto plazo permitiendo evaluar la toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo. De tal modo que el desarrollo de herramientas de monitoreo hidrológico permitan establecer el conocimiento de la información hidrológica muy cercana a la realidad; este estudio se ha centrado en emplear el modelo hidrológico SWAT (“Soil and Water Assessment Tools”) en la vertiente del Pacífico peruano y llevarlo a un sistema operativo de monitoreo hidrológico de tiempo cuasi-continuo; durante su desarrollo el modelo fue calibrado y validado empleando información registrada de caudales del periodo 1981 – 2020, evaluándolo en dos etapas 1. desarrollo y parametrización del modelo hidrológico SWAT, empleando información física y climática 2. Evaluación de la sensibilidad de parámetros del modelo hidrológico, 3. Regionalización hidrológica, y 4. Calibración y validación del modelado hidrológico con el objetivo de determinar parámetros y sus valores óptimos y 2) Realizar la validación del modelado hidrológico, evaluando la capacidad predictiva de los parámetros encontrados en el proceso de calibración; se ha encontrado eficiencias diarias de NSE próximas a 0.5 a 0.75. Posteriormente finalizado los pasos de parametrización, calibración y validación hidrológica, se ha realizado el proceso de operativización del modelo, esto mediante la actualización diaria de los datos climáticos disponibles (precipitaciones y temperaturas) del producto PISCO-OPERATIVO, agregándolos al modelamiento de manera automática, seguidamente realizando la ejecución diaria del modelo hidrológico, obteniendo finalmente las salidas de los caudales en toda la vertiente del Pacífico peruano a un nivel discreteado de subcuencas.

PALABRAS CLAVE: Monitoreo hidrológico, Modelo SWAT, Modelamiento hidrológico superficial, Vertiente del Pacífico.

1. Introducción

El riesgo de la escasez de agua es un problema mundial que se acelera debido al aumento de la demanda sectorial de agua a escala de cuenca causada por la distribución temporal desigual de las precipitaciones. La inconsistencia espacio-temporal entre la disponibilidad y la demanda puede crear un riesgo de escasez de agua en todo el mundo. La rápida industrialización, urbanización, crecimiento de la población, mejores niveles de vida y modificaciones en los patrones de consumo de agua, parte de diferentes sectores antropogénicos para la intensificación de la demanda de agua. Por otro lado, el cambio climático en términos de patrones climáticos alterados, el aumento de los gases de efecto invernadero y la deforestación, impactan en la variación del caudal que afecta la disponibilidad de agua a escala de cuenca (Turrall et al., 2011).

Las características climáticas en Sudamérica, están superpuestas a las variaciones as de norte a sur, donde existen importantes asimetrías de este a oeste, en todo el continente forzadas por la presencia de la cordillera de los Andes y condiciones de frontera impuestas por un Pacífico sureste frío y atlántico suroeste cálido (Garreaud et al., 2009). Las precipitaciones a lo largo de la vertiente y costa del Pacífico de Sudamérica, están caracterizadas por un complejo patrón de variabilidad espacial y estacional relacionado con su extensión meridional y la prominente topográfica de la cordillera de los Andes (Garreaud et al., 2009; Waylen & Poveda, 2002); la topográfica escarpada inhibe el flujo atmosférico transversal de la costa e interrumpe un viento geotrópicamente equilibrado, induciendo a un gradiente de presión a nivel del mar hacia el norte a lo largo de la costa (Muñoz & Garreaud, 2005).

La vertiente hidrográfica del Pacífico peruano cubre una extensión de 278,482 km², representa un 22 % del territorio nacional constituye 62 ríos y quebradas que principalmente drenan sus aguas al Océano Pacífico; los caudales se producen de tres a cuatro meses al año, principalmente entre los meses de diciembre a marzo, periodo durante el cual se estima que fluye un 60% y 70% del escurrimiento total anual, durante el resto del año se tiene un periodo de estiaje (ANA, 2012). Las cuencas que desembocan en el Océano Pacífico del Perú se caracterizan por tener pequeñas cuencas con pendientes desnudas y empinadas que favorecen la erosión e inundaciones durante eventos de lluvias intensas; las precipitaciones son más abundantes a lo largo de la costa norte y disminuyen hacia el sur, donde las condiciones son extremadamente áridas (Garreaud et al., 2009).

En ese sentido el desarrollo del presente estudio, conlleva a la extensa revisión literaria sobre el modelamiento hidrológico que realiza el modelo SWAT que se ha utilizado ampliamente en muchos países (Meaurio et al., 2015; Rahman et al., 2013; Wang et al., 2014) y se ha probado ampliamente para la simulación hidrológica a diferentes escalas espaciales para investigar estrategias de gestión en cuencas hidrológicas y respuesta de la calidad del agua (Debele et al., 2010; Fontaine et al., 2002; Santhi et al., 2001; Shawul et al., 2013). En ese contexto el objetivo principal de este estudio es desarrollar

el modelamiento hidrológico operativo de la vertiente del Pacífico peruano, comprendiendo las complejas relaciones entre la topografía, uso/cobertura de suelo, tipo de suelo y clima con respecto a la respuesta hidrológica de la vertiente del Pacífico empleando el modelo SWAT de escorrentía pluvial distribuida de base física para la simulación superficial. El modelamiento hidrológico propuesto por (Asurza-Véliz & Lavado-Casimiro, 2020) propusieron una metodología de regionalización de parámetros de base física, estimando la escorrentía superficial en el periodo 1981-206 y cuantificó la incertidumbre asociada al proceso de regionalización de parámetros; este estudio fue tomado como base para el proceso de simulación y operativización del modelado hidrológico.

En primer lugar, el modelo SWAT se ha calibrado y validado en las múltiples cuencas a lo largo del Pacífico. En segundo lugar, se han evaluado diferentes componentes hidrológicos, principalmente el rendimiento hídrico, y sus afluentes. Además, se ha seguido un enfoque de diagnóstico adoptando diferentes pruebas estadísticas para investigar si el balance hídrico ha cambiado en la región de estudio a partir de la transferencia de parámetros del modelo. En tercer lugar se ha implementado el proceso operativo de asimilación de datos climáticos diarios de precipitación y temperaturas, datos disponibles del producto grillado PISCO (Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) OPERATIVO; este producto reúne las precipitaciones diarias y han sido asimiladas como ingreso al modelo hidrológico, logrando la simulación diaria del modelo SWAT en la vertiente del Pacífico peruano, obteniendo una respuesta de conocimiento actual y condición de la escorrentía superficial. En consecuencia, se ha logrado dar operatividad al modelado hidrológico y llevar el proceso físico a un proceso computacional operativo; proporcionando variables hidrológicas de la salida de las subcuencas analizadas como la escorrentía superficial para lograr objetivos de gestión de cuenca y pronóstico.

2. Área de estudio

La vertiente del Pacífico presenta una superficie de drenaje de 290 888 km², esto considerando las cuencas transfronterizas, por el norte considerando los aportes del Ecuador y por el sur los aportes de Chile respectivamente como se muestra en la Figura 1; se encuentra situada entre las coordenadas 80.3° - 69.8° Oeste y 3.4° - 18.5° Sur, presenta una variación altitudinal de 0 a 6 685 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). La características geomorfológicas de las cuencas en la VP, son de pendientes desnudas y escarpadas que favorece al proceso de erosión e inundación en periodos lluviosos; la escasez de las precipitaciones a lo largo del Pacífico esta relacionado con el hundimiento de la troposfera media a gran escala sobre el sudeste del Océano Pacífico subtropical, reforzado por el afloramiento costero de agua fría (Lavado et al., 2012).

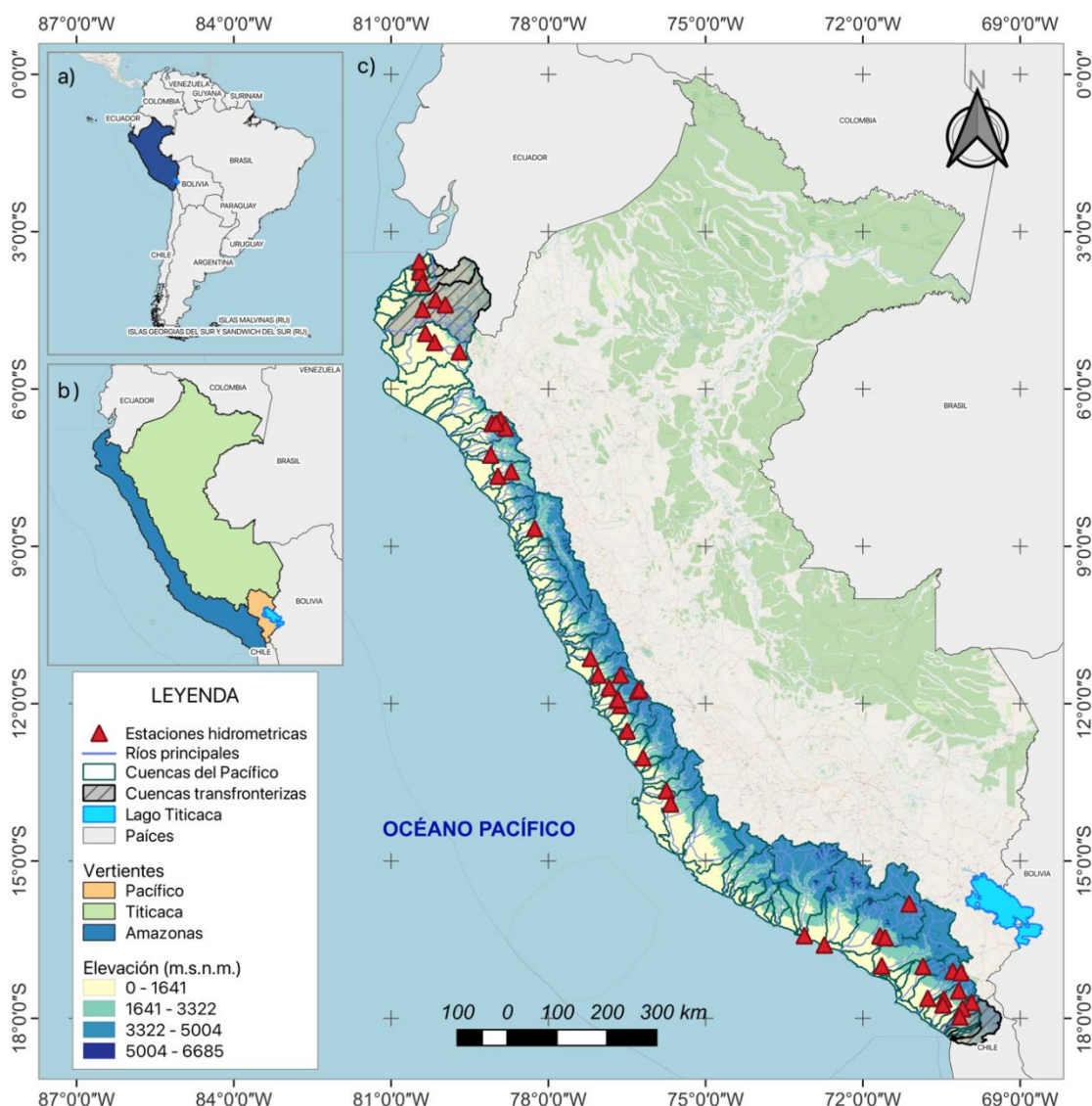


Figura 1. a) Sudamérica b) Perú y vertientes hidrográficas y c) Delimitación de la vertiente del Pacífico y ubicación de las cuencas analizadas para el modelamiento hidrológico en SWAT, modelo numérico de terreno y estaciones hidrológicas.

3. Materiales y métodos

La representación metodológica empleada en este estudio, se muestra en la Figura 2. Primeramente, se recopiló los datos grillados de topografía, uso/cobertura de suelo y tipo de suelo, del mismo modo los datos climáticos. Seguidamente se ha construido y realizado la modelización hidrológica realizando el proceso de calibración y validación del modelado. Finalmente se ha realizado el proceso de operativización y puesta en marcha en tiempo cuasi-real del modelo, pudiendo estimar los caudales diarios en todas las subcuencas de análisis.

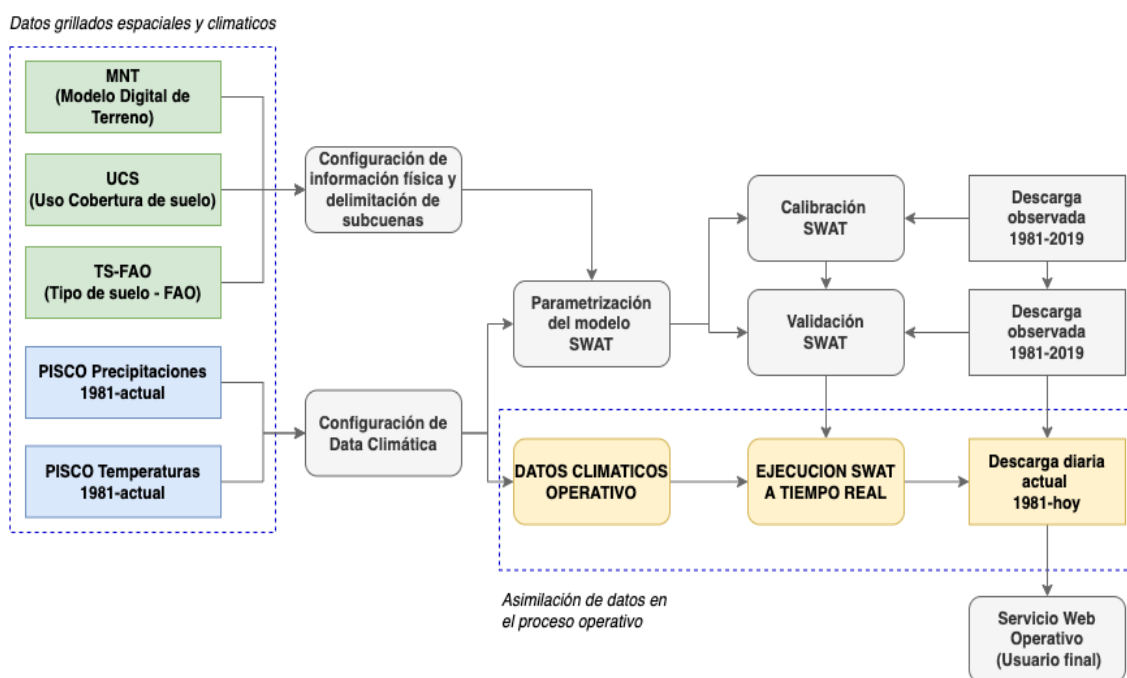


Figura 2. Representación esquemática del proceso de modelado e implementación de la operativización del modelo SWAT en la vertiente del Pacífico peruano.

3.1. Modelo hidrológico SWAT

El modelo hidrológico de tiempo continuo llamado SWAT (“Soil and Water Assessment Tools”) es de dominio público, ha sido desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del USDA (USDA-ARS) y Texas A&M Agrilife Research, por parte del sistema universitario Texas A&M; el objetivo de SWAT fue predecir el impacto en la gestión del rendimiento de agua, sedimentos y productos químicos agrícolas en grandes cuencas, para cumplir el objetivo se requiere a) calibración, b) utiliza insumos fácilmente disponibles para grandes áreas y c) computacionalmente eficiente para operar grandes cuencas (Arnold, 1998); el ciclo hidrológico del modelo SWAT viene representado por la ecuación de balance:

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

Las variables de la ecuación representan: SW_t es el contenido final de agua en el suelo, SW_o es el contenido inicial de agua en el suelo, t es el tiempo en días, R_{day} representa la precipitación en el día i , Q_{surf} representa la escorrentía en la superficie del día i , ET_a es la evapotranspiración en el día i , W_{seep} es el agua que ingresa a la zona vadosa desde el perfil del suelo y Q_{gw} representa el caudal de retorno en el día i .

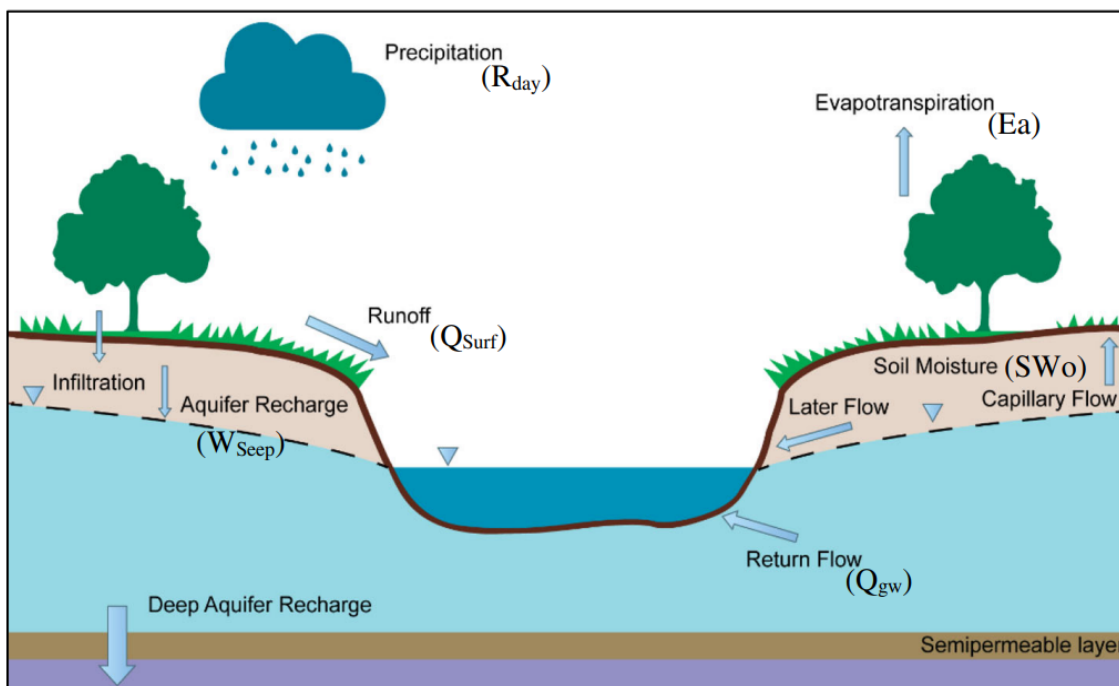


Figura 3. Representación esquemática del concepto del balance hídrico SWAT, (Abbas & Xuan, 2019).

En SWAT se realiza la división de cuencas en HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica), permitiendo distintos cálculos de ET para varios usos de tierra y suelo, se emplea los métodos de Priestley-Taylor (PRIESTLEY & TAYLOR, 1972), Penman-Monteith (Monteith, 1965) o Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985). Se ha tomado como cálculo el método de Hargreaves por que proporciona estimaciones de Evapotranspiración de referencia (ET_o) cuando los datos de evapotranspiración medidos son escasos y solo se requiere de información de temperaturas máximas, mínimas y medias en la superficie del aire (Hargreaves & Allen, 2003; Jung et al., 2016). El modelo no contempla el ingreso de reservorios, lagos o cualquier otra influencia hidráulica (Asurza-Véliz & Lavado-Casimiro, 2020).

3.2. Preparación de datos y construcción del modelo

Los datos empleados básicos para la modelización en SWAT, son la información climática, que fue obtenida del producto PISCO por sus siglas en inglés (“Peruvian Interpolated data of SENAHIS’s Climatological and Hydological Observations”) con una resolución temporal diaria, tiene una cobertura espacial en todo el territorio peruano abarcando una extensión de 0°–18° Sur y 68°–82°Oeste; la información diaria de precipitaciones corresponde al producto PISCOop_Pp producto de precipitaciones diarias, este producto ha sido realizado empleando la metodología de genRE (van Osnabrugge et al., 2017); por otro lado también se ha empleado el producto de temperaturas máximas y mínimas PISCOt en su versión 1.1, esta información tiene las mismas características espaciales que el producto de precipitaciones; la información se encuentra en la biblioteca de datos de IRI: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAHMI/.HSR/.PISCO>

El Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolución, ha sido tomada de la base de datos de HydroSHEDS por sus siglas en inglés (“Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales”), presentando una resolución de 90 m x 90 m (Figura 2b), la información que fue necesaria para el proceso de la delimitación de las subcuencas, donde se ha determinado 3958 subcuencas (Figura 1a) para el modelamiento hidrológico, recopilando la información de arroyos, gradiente de pendiente y pendientes de cauces.

Los datos de uso/cobertura de suelo fue obtenida del proyecto ESA CCI-LC (European Space Agency and Climate Change Initiative – Land Conver), que tiene una resolución de pixel de 300m, empleando la imagen del 2015, reclasificando la información para ser empleada en el modelo SWAT, se ha encontrado 11 clases de uso/cobertura de suelo, estas categorías se clasificaron en AGRL, RNGB, FRST, FRSE, FRSD, PAST, BARR, WETF, WETL, URML y WATR (Figura 2c); cada uso encontrado presenta diferentes tipos de vegetación superficial, en su mayoría en la vertiente del Pacífico se encuentra la mayor zona árida, que influye en la evapotranspiración y el agua subterránea de cada cuenca.

La base de datos de suelos (resolución 1 km) que se obtuvo de la base de datos Digital Soil Map eh the Wold (DSMW) de fuente de la FAO (La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (Figura 2d) y fue adaptado para la vertiente del pacífico, se ha reclasificado la base de suelos obteniendo 12 clases de suelos, dos de ellas son de características hidráulicas de agua y glacial.

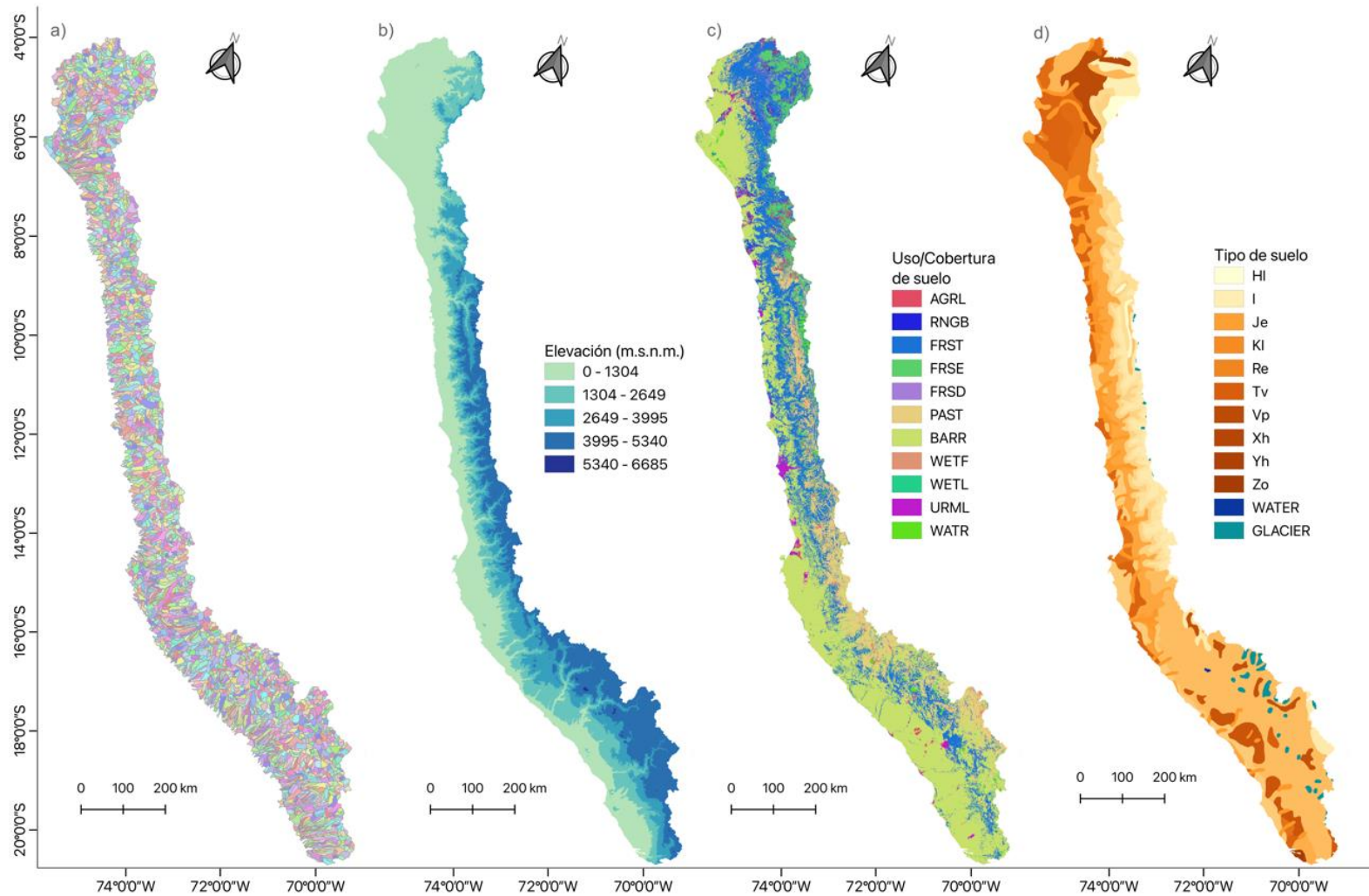


Figura 4. Información empleada para el modelamiento en SWAT, a) Delimitación de subcuencas, b) Modelo numérico de terreno, c) Uso cobertura de suelo y d) Tipo de suelo.

Tabla 1: Información, resolución de pixel y descripción de los datos empleados en el modelo SWAT.

Tipo de información	Resolución de pixel	Descripción / Fuente
Topográfica	90 m	Modelo digital de terreno (MNT) de la base HydroSHEDS (Lehner et al., 2013) (https://www.hydrosheds.org/)
Uso/Cobertura de suelo	300 m	Representación de la clasificación de uso/cobertura de suelo del año 2015, ESA-CCI-LAND COVER (CCI-LC-PUCV2, 2017) (https://www.esa-landcover-cci.org/)
Tipo de suelo	1000 m	Digital Soil Map of the World (DSMW) – FAO – SOIL (https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/)
Precipitación	~10 km	Datos grillados de precipitación del Perú (Aybar et al., 2019) (https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/)
Temperatura	~10 km	Datos grillados de precipitación del Perú (Huerta et al., 2018) (https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/)
Caudales observados		Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (https://www.gob.pe/senamhi)

La información de caudales, ha sido recopilada de la base de datos del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), recopilando la información de un total de 42 estaciones hidrológicas, los caudales observados se encuentran de manera diaria que serán necesarios para la calibración y validación del modelo hidrológico, los datos en el periodo temporal van desde 1981–2020.

3.3. Configuración del modelo SWAT.

El desarrollo del modelado en la VP, ha sido posible gracias a la interfaz QSWAT que está escrita en el lenguaje de programación Python; para que QSWAT se instale y sea funcional primero se debe instalar QGIS (<https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>); el diseño de esta interfaz se divide en dos partes 1) QSWAT Control, que contiene el código que reacciona a las entradas interactivas de los usuarios y 2) QSWAT Functions, que contiene el código para realizar ciertas tareas como fusionar subcuencas o ajustar la red de ríos (Dile et al., 2016).

En SWAT, una cuenca se divide en múltiples subcuencas QSWAT utiliza un conjunto de programas llamado: Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM, <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5>) para realizar varias funciones de geoprocesamiento (Tarboron, 1997; Tesfa et al., 2011; Wilson, 2012). La delimitación de las subcuencas en toda la vertiente del Pacífico considera las cuencas pertenecientes al Perú, Ecuador y Chile, de estos últimos dos países se comparte cuencas por lo que para realizar un óptimo modelado hidrológico se han de considerar, esto conlleva a un proceso computacional largo, el área de las subcuencas para la delimitación de ha definido un área de 50 km² esto se realiza mediante el panel de configuración.

Luego se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) que consiste en obtener las características homogéneas de uso, manejo, topografía y tipo de suelo de la tierra. Las HRU se representan un porcentaje del área de la subcuenca y pueden no ser contiguas o identificadas espacialmente dentro de la simulación en SWAT; alternativamente, una cuenca se puede subdividir en solo subcuencas que se caracterizan por el uso dominante de la tierra, el tipo de suelo y el manejo de suelo (<https://swat.tamu.edu/media/116389/swatsetup.pdf>). El modelo SWAT se configuro a partir de los datos de entrada descritos en la Tabla 1; el modelo hidrológico de la VP se determinó considera 3158 subcuencas, el método de cálculo de evapotranspiración es el de Hargreaves y el método de almacenamiento variable se empleó parapara simular la escorrentía e infiltración superficial. Una explicación a detalle sobre la configuración de los modelos en SWAT, analice (Neitsch et al., 2011).

3.4. Análisis de sensibilidad de parámetros de calibración

FAST por sus siglas en inglés (“Fast Parameter Sensitivity Analysis”) fue presentado por (Cukier et al., 1973) para realizar el análisis de sensibilidad no lineal de un modelo multiparamétrico, en el que las varianzas condicionales están representadas por coeficientes de la expansión de la serie múltiple de Fourier de la función de respuesta y se aplica el teorema ergódico para transformar la integral multidimensional en una integral unidimensional en evaluación de los coeficientes de Fourier.

La Figura 5, explica el proceso operativo e implementación de la metodología de sensibilidad de parámetros FAST aplicada al modelo hidrológico SWAT; se explica mediante los pasos 1. Ingreso de parámetros de calibración o a modificarse del modelo (los parámetros incluyen los valores numéricos obtenidos aleatoriamente). 2. Ejecución del modelo hidrológico SWAT en “n” iteraciones, obteniendo los caudales necesarios, 3. Análisis espectral de los resultados obtenidos, finalmente 4. Saluda de varianza V, donde se obtiene los valores numéricos a partir del índice de sensibilidad FAST. Por otro lado, se definió que 22 unidades hidrográficas son las más representativas en toda la vertiente del Pacífico peruano, debido a que se cuenta con un amplio registro de información de caudales, el paso siguiente fue establecer 200 iteraciones por cada unidad hidrográfica analizada, obteniendo un total de 4400 simulaciones.

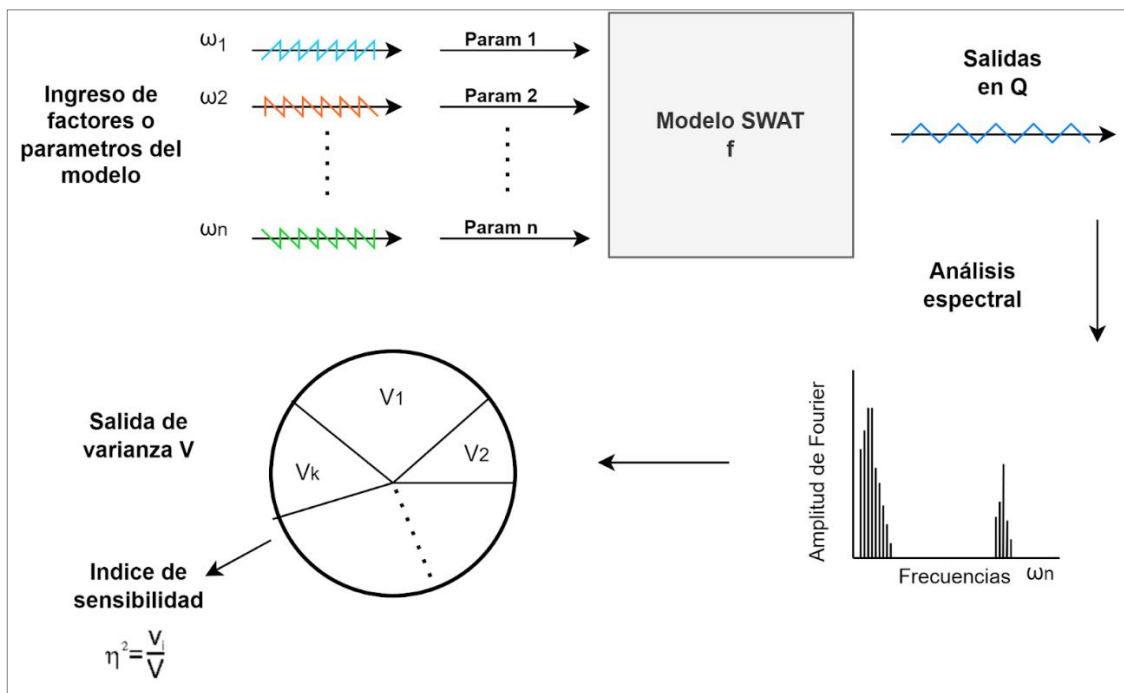


Figura 5. Proceso metodológico del análisis de sensibilidad de parámetros por FAST, adaptado de (Cukier et al., 1973)

3.5. Calibración del modelo.

El algoritmo de calibración Particle Swarm Optimization (PSO) es un algoritmo de búsqueda global basado en la población desarrollado por (Kennedy & Eberhart, 1995) y (Eberhart & Kennedy, 1995). Una característica que distingue a PSO de los algoritmos evolutivos es la falta de operadores genéticos; en cambio, cada individuo de la población, denominado partículas en la terminología de PSO, ajusta su trayectoria de vuelo alrededor del espacio de búsqueda multidimensional de acuerdo con su propia experiencia de vuelo y la de todas las partículas vecinas en el enjambre (Eberhart & Shi, 1998). PSO se inicializa con una población de soluciones aleatorias y busca óptimos actualizando la generación. En cada iteración, cada partícula se actualiza siguiendo dos valores ideales. El primer valor es la mejor solución obtenida hasta ahora, llamado valor óptimo individual (pbest). El segundo valor ideal que sigue el optimizador de enjambre de partículas es la mejor solución que ha logrado hasta ahora cualquier partícula de la población, denominada gbest. Después de alcanzar los dos valores ideales, las partículas renuevan su velocidad y posiciones con la siguiente ecuación:

$$v[] = v[] + b1 \times rand[] \times (pbest[] - present[]) + b2 \times rand() \times (gbest[] - present[]) \quad (2)$$

$$Present [] = present + v[] \quad (3)$$

Donde $v[]$, es la velocidad de la partícula, $present[]$ es la partícula actual, $rand()$ es un número aleatorio entre (0, 1), $b1$ y $b2$ son factores de aprendizaje.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los parámetros seleccionados, los rangos de valores de calibración y los procesos que influyen en el ciclo del agua. Estos parámetros corresponden a la generación de escorrentía superficial y de flujo base, evaporación, tipos de suelo y enrutamiento de canales. Los límites inferior y superior de los rangos de los parámetros se modificaron antes de la calibración en relación con los valores predeterminados para garantizar un espacio suficiente para los parámetros y, al mismo tiempo, garantizar una convergencia rápida.

Tabla 2: Parámetros seleccionados empleados para la calibración y validación del modelo hidrológico SWAT.

Nombre	Definición	Rango	Proceso
CN2	Número de curva de condición de humedad II de SCS para áreas permeables	40 – 60	Escorrentía
ESCO	Coeficiente de compensación de la evaporación del suelo	0.4 – 0.8	Evaporación
SURLAG	Coeficiente de retraso de escorrentía superficial	0.05 – 5	Escorrentía
RCHRG_DP	Fracción de percolación del acuífero profundo	0 – 1	Agua subterránea
GWQMN	Nivel de agua umbral en un acuífero poco profundo para flujo base (mm H ₂ O)	1200 – 1900	Agua subterránea
GW_REVAP	Coeficiente de "revaporización" del agua subterránea	0.02 – 0.1	Agua subterránea
GW_DELAY	Retraso del agua subterránea (días)	45 - 65	Agua subterránea
ALPHA_BF	Constante de recesión de flujo base (días)	0.25 – 0.65	Agua subterránea
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm / h)	10 – 200	Escorrentía
EPCO	Factor de compensación de la absorción de la planta	0.2 – 0.6	ET
SOL_AWC	Capacidad de almacenamiento de agua disponible en el suelo (mm H ₂ O / mm suelo)	0.03 – 0.30	Escorrentía
CH_N2	Valor n de Manning para el canal principal	0.016 – 0.1	Enrutamiento
CH_K2	Conductividad hidráulica efectiva en aluviones del canal principal (mm / h).	40 – 80	Enrutamiento
OV_N	Valor "n" de Manning para el flujo terrestre	0.4 – 0.6	Escorrentía

3.5.1. Criterios de desempeño.

Los modelos de cuencas hidrográficas son herramientas poderosas para simular el efecto de los procesos hidrológicos, la gestión de cuencas hidrográficas y los recursos hídricos; (Moriassi et al., 2007) establece una metodología de evaluación de modelos en términos de datos simulados y datos observados, realizando una revisión extensa de la literatura publicada relacionada con la calibración, validación y aplicación de modelos de cuencas hidrográficas. Calibrar un modelo de base física como SWAT, es importante recordar que todos los parámetros de ingreso del modelo deben mantenerse dentro de un rango realista y que ningún procedimiento automático pueda reemplazar el comportamiento físico real de la cuenca (Arnold et al., 2012), el proceso de calibración ha considerado un periodo de calentamiento de dos años.

El rendimiento del modelo en la simulación de la escorrentía superficial se evaluó gráficamente y utilizando medidas estadísticas multicriterio que incluyen, coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970), la medida de bondad de ajuste KGE (Kling et al., 2012) que se desarrolló para proporcionar el diagnóstico de la descomposición entre la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

La Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es un proceso estadístico normalizado, que determina la magnitud relativa la varianza residual (ruido), en comparación con la varianza de los datos medidos (información observada). Cuando el valor de NSE es "0" indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, si $NSE = 1$ corresponde a la coincidencia perfecta de los valores observados y simulados, si el estadístico varía de $-\infty$ a 0 , indica que la media observada es mejor predictora que el modelo; NSE se determina mediante la siguiente expresión donde S_i son los valores simulados, O_i son los valores observados y N es la cantidad total de datos.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

La medida de bondad de ajuste KGE se desarrolló para proporcionar el diagnóstico de la descomposición entre la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el error cuadrático medio (MSE), facilitando el análisis de la importancia relativa de los diferentes componentes como son: corrección, sesgo y variabilidad, en el contexto de eficiencia de la hidrología es un índice para asegurar los sesgos, variabilidad y sesgo que no estén correlacionados entre sí. La medida de eficiencia de Kling-Gupta va desde $-\infty$ a 1 , cuando esta está más cerca de 1 el modelo es más preciso; KGE se describe en las siguientes ecuaciones:

$$KGE = 1 - ED \quad (5)$$

$$ED = \sqrt{(s[1] * (r - 1))^2 + (s[2] * (vr - 1))^2 + (s[3] * (\beta - 1))^2} \quad (6)$$

$$r = \text{Coef. de correlacion producto} - \text{momento de Pearson} \quad (7)$$

$$\beta = \mu_s / \mu_o \quad (8)$$

$$vr = \begin{cases} \alpha & , \text{metodo} = "2009" \\ \gamma & , \text{metodo} = "2012" \end{cases} \quad (9)$$

$$\alpha = \sigma_s / \sigma_o \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o} \quad (11)$$

3.6. Operativización del modelo hidrológico.

El proceso operativo fue posible mediante la utilización del lenguaje de programación R, y la tarea programada de Windows; la implementación del paquete SWATplusR desarrollado por (Schürz, 2019) permitió desarrollar el código de programación que realiza la ejecución y modelamiento diaria de SWAT en un computador denominado "Computador de ejecución", estos pasos del procedimiento operativo se resumen en la Figura 5 y se explica el procedimiento en cuatro pasos:

- **Primer paso:** Se realizó mediante la conexión al servidor FTP del SENAMHI, donde se encuentran los datos del producto Operativo de precipitaciones, posteriormente se descargó los datos de precipitación al ordenador donde se encuentra el modelo hidrológico SWAT.
- **Segundo paso:** A partir de la descarga de información diaria climática, es posible convertir esta información en formato de ingreso de datos al modelo hidrológico, por lo que se transformó la información en la actualización de datos climáticos para la simulación hidrológica.
- **Tercer paso:** Realizar la ejecución del modelo hidrológico diario con los datos climáticos actualizados y asimilados al modelo SWAT.
- **Cuarto paso:** Llevar los datos de menara que el proceso de generación de información hidrológica operativa sea accesible para el usuario.

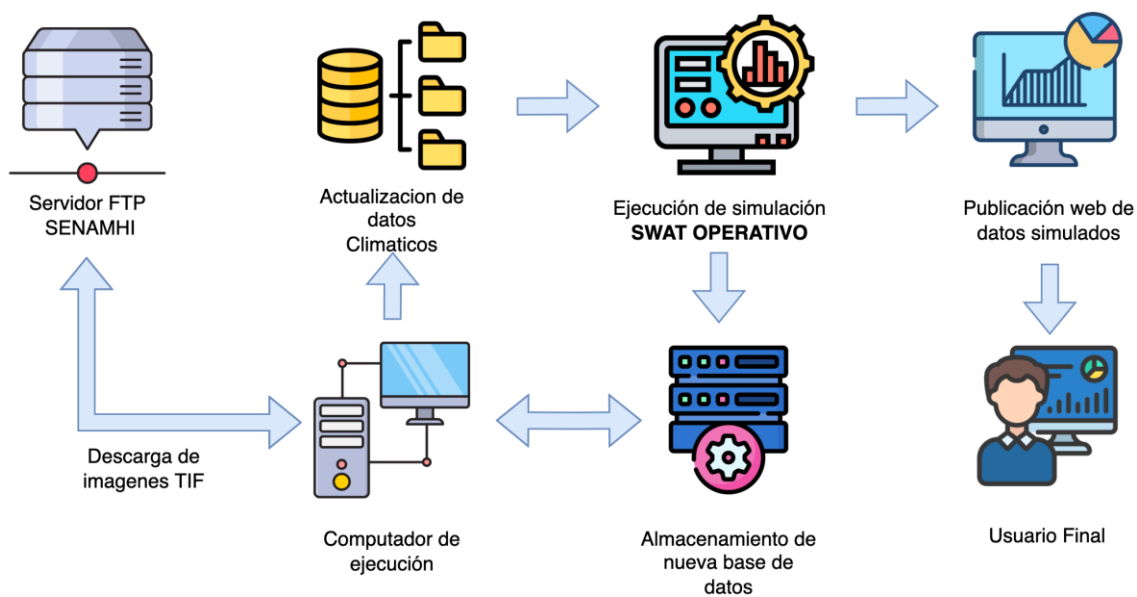


Figura 6. Esquematización de la implementación del proceso operativo del modelado hidrológico a tiempo cuasi-real en SWAT en la vertiente del Pacífico.

4. Resultados

4.1. Sensibilidad del modelo hidrológico

La sensibilidad del modelo hidrológico, es posible medirla a través de las iteraciones que se realizan en el proceso de calibración del modelo hidrológico, los valores estimados de esta sensibilidad se describen en el valor de la varianza obtenida en FAST; a partir de estos resultados es posible definir los parámetros más susceptibles al modelo, también los parámetros más sensibles que generan grandes alteraciones con una mínima modificación de su valor (Rafiei Emam et al., 2018). Los dos parámetros más sensibles obtenidos, muestran una clara sensibilidad en el parámetro “CN2”, parámetro que describe el número de curva de condición tipo II, según el SCS; el segundo parámetro más sensible es SURLAG, parámetro influyente en el proceso de retraso de la escorrentía superficial en las cuencas analizadas ver Figura 7.

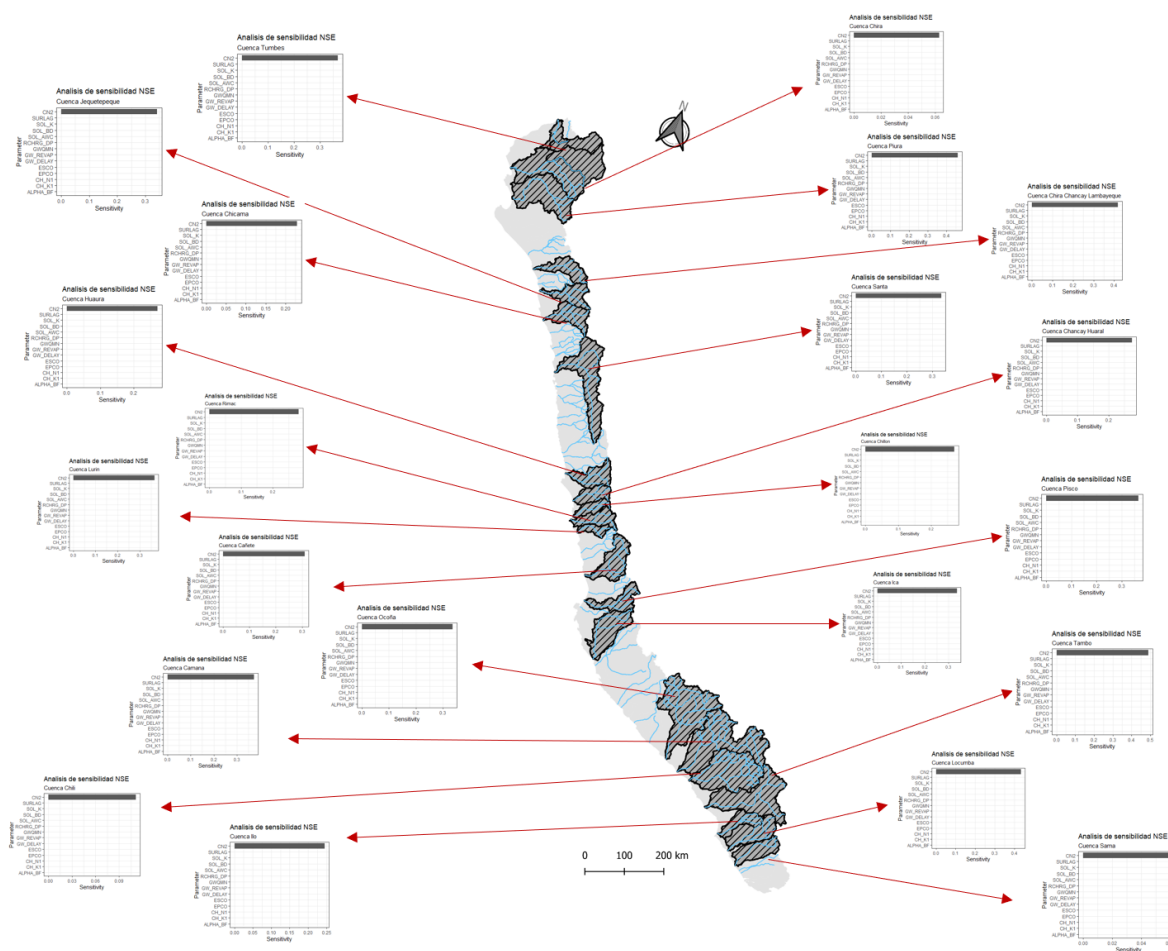


Figura 7. Resultados del análisis de sensibilidad del modelamiento hidrológico empleando el algoritmo FAST.

4.2. Regionalización y transferencia de parámetros

Existen distintas clasificaciones de regionalización en hidrología; en general, el método de regionalización incluye tres categorías que se basan en: similitud, basadas en regresión y basadas en firmas hidrológicas. La regionalización basada en la similitud implementa la regionalización de parámetros a través de diferentes medidas de similitud de cuencas (Merz & Blöschl, 2004). La proximidad espacial se refiere a encontrar una o más cuencas donantes (aforadas) que sean adyacentes a la cuenca objetivo (sin aforar) en el espacio, y regionalizar sus parámetros a la cuenca objetivo por interpolación o promediación. El método de similitud física implica la clasificación de cuencas. Se refiere a un enfoque de regionalización para encontrar una o más cuencas donantes que tengan atributos de cuenca similares (como el tipo de clima, el uso de la tierra y las condiciones geológicas) a la cuenca objetivo (Guo et al., 2021).

MÉTODOS DE PARAMETRIZACIÓN HIDROLÓGICA Regionalización basada en similitud

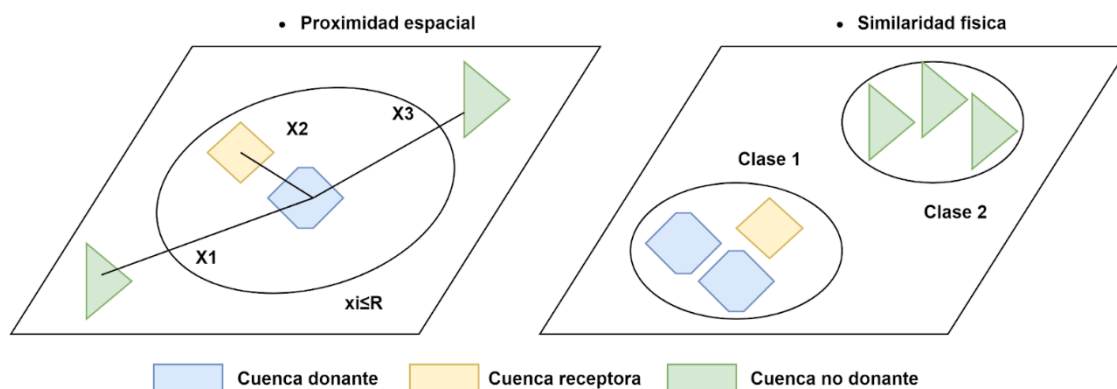


Figura 8. Esquematación de regionalización hidrológica, mediante el análisis basada en similitud. Adaptado de (Guo et al., 2021).

4.2.1. Método de agrupamiento Fuzzy C-Means

(Bezdek, 1981) Introdujo el método de agrupamiento Fuzzy C-Means en 1981, una extensión del método de agrupamiento Hard C-Mean. FCM es un algoritmo de agrupamiento no supervisado que se aplica a una amplia gama de problemas relacionados con el análisis de características, el agrupamiento y el diseño de clasificadores. FCM se aplica ampliamente en ingeniería agrícola, astronomía, química, geología, análisis de imágenes, diagnóstico médico, análisis de formas y reconocimiento de objetivos. Este algoritmo se utiliza para el análisis basado en la distancia entre varios puntos de datos de entrada. Los grupos se forman de acuerdo con la distancia entre los puntos de datos y los centros de los grupos se forman para cada grupo.

La regionalización hidrológica de la vertiente del pacifico está basada en las características climáticas (precipitaciones, temperaturas, evapotranspiración) y características geográficas (área, longitud, pendiente) de las subcuencas delimitadas del modelo hidrológico.

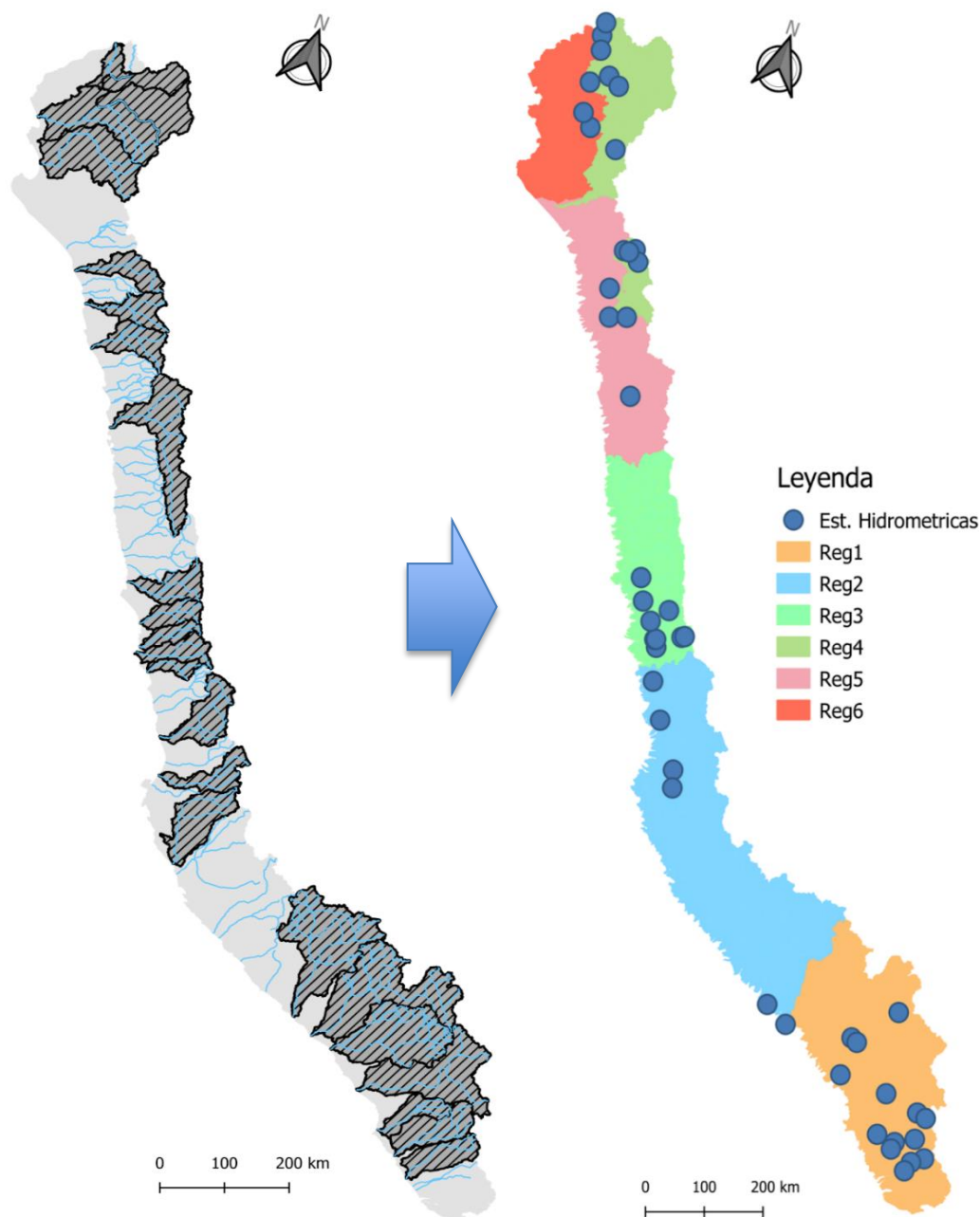


Figura 9. Resultados del análisis de regionalización mediante la metodológica de Fuzzy C-Means en la vertiente del Pacífico.

4.3. Calibración y validación hidrológica del modelo SWAT.

El paquete HydroPSO en R (Zambrano-Bigiarini & Rojas, 2013) proporciona una amplia gama de técnicas estadísticas y gráficas para evaluar de manera sólida los diferentes aspectos del hidrograma para la evaluación del rendimiento del modelo. En este estudio se seleccionaron tres criterios estadísticos: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). NSE mide la eficiencia del modelo como una fracción de la varianza del flujo de la corriente medida reproducida por el modelo al replicar valores individuales. Los valores de NSE entre 0.9 y 0,5 se consideran satisfactorios (Geza et al., 2009); la métrica KGE muestra un buen desempeño en la estacionalidad del modelado hidrológico, estos resultados se obtuvieron al transferir los parámetros encontrados en la vertiente del pacifico.

4.4. Operativización del modelo hidrológico

Se ha realizado de manera satisfactoria el modelamiento hidrológico en la vertiente del Pacífico peruano, el proceso de Operativización ha logrado actualizar los datos climáticos de ingreso al modelo, y simultáneamente la gran potencialidad que brinda el lenguaje de programación en R ha permitido que el modelo pueda ejecutarse de manera diaria como se explica en la sección 3.5. Por lo que la generación de información adecuada para la gestión de recursos hídricos, y la asimilación de procesos operativos, conlleva a generar herramientas tecnológicas para una mejor gestión de los recursos hídricos a corto, mediano y largo plazo.

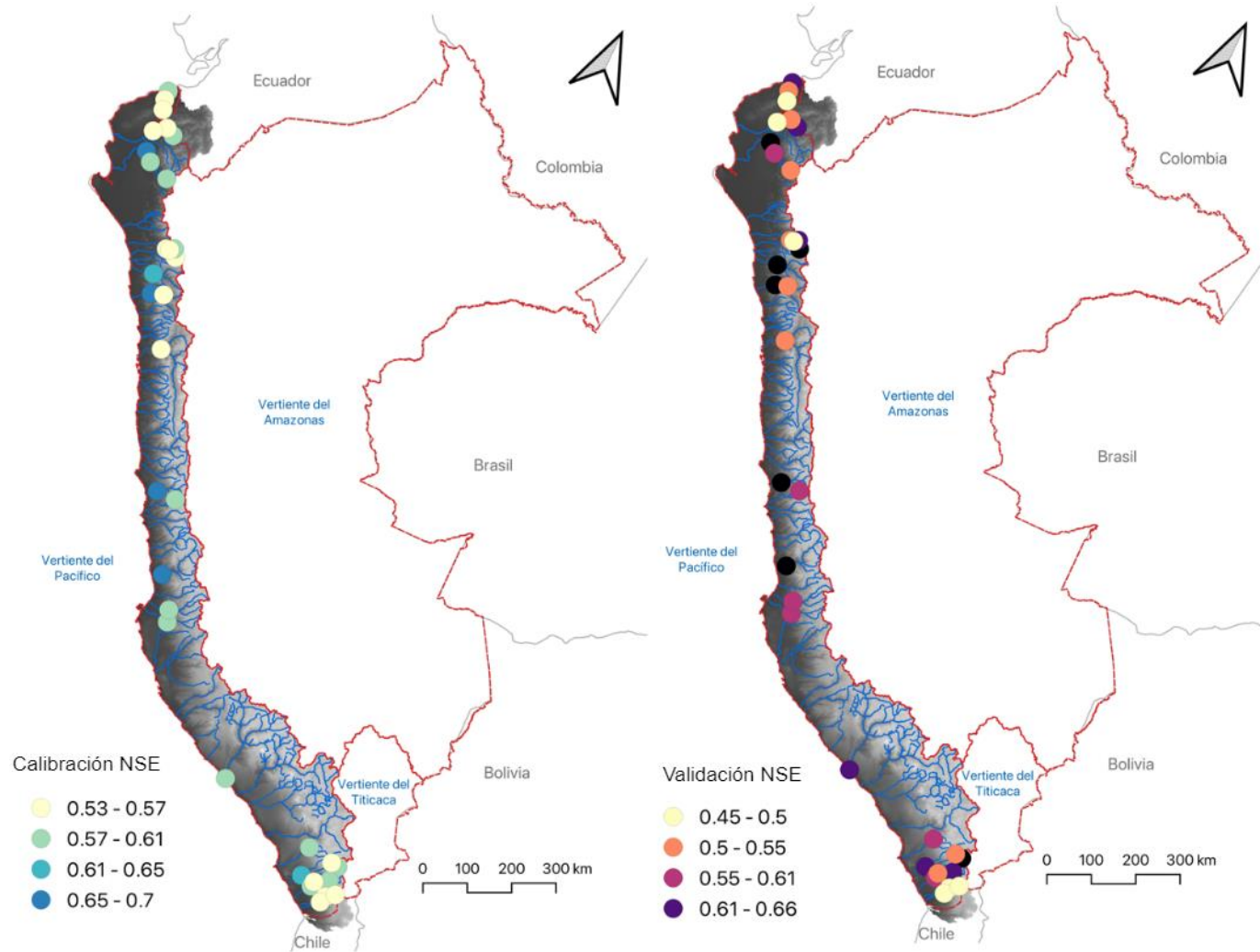


Figura 10. Resultados obtenidos de las métricas de eficiencia a partir de la transferencia de valores de parámetros encontrados en el proceso de calibración y validación de la vertiente del Pacífico.

5. Discusiones

5.1. Modelamiento hidrológico

La modelización en SWAT, es una buena herramienta para reproducir registros de caudales, y simular cuencas donde no se disponga información observada o datos de aforos; esto dependerá de la exactitud de la calidad de la información de partida o los datos iniciales ingresados al modelo; por ello el proceso de calibración con datos reales en los puntos de la cuenca o en cuencas de similares características físicas y climáticas serán de fundamental desarrollo para conseguir resultados más fiables.

Los resultados de la modelización hidrológica sin análisis de incertidumbre no son fiables. Debido a la gran cantidad de modelos hidrológicos y métodos de análisis de incertidumbre, es importante evaluar el rendimiento de los métodos de incertidumbre correspondientes al tipo de modelo hidrológico en diferentes áreas (Rafiei Emam et al., 2018). Utilizamos el modelo hidrológico SWAT para simular la escorrentía superficial, y lo mas recomendable es la utilización de algoritmos de incertidumbre para evaluar la incertidumbre del modelo SWAT y cuantificar la incertidumbre de los parámetros.

5.2. Análisis de sensibilidad

El proceso de análisis de sensibilidad de parámetros, conlleva a un alto costo computacional en tiempo debido a la extensión de la vertiente de estudio y las 22 unidades hidrográficas analizadas; por otro lado, se ha planteado utilizar la mayor cantidad de parámetros más sensibles esto se ha seleccionado según la revisión bibliográfica de distintas investigaciones, donde se obtuvo que los parámetros mas sensibles de CN2 y SURLAG, parámetros relacionados con el proceso de escorrentía en los cauces, son los parámetros más sensibles, no se ha tratado de modificar el resto de parámetros ya que al realizar esto, el modelo pierde su composición y base física de simulación hidrológica.

5.3. Operativización en tiempo cuasi-real del modelo

La modelización hidrológica, implica que, se ha desarrollado el lenguaje de programación (lenguaje R) para la adaptación de nuevos datos climáticos, así mismo la asimilación de estos datos y la simulación del modelo, permitiendo encontrar los caudales diarios a partir de este proceso de actualización, este tipo de información generada en tiempo cuasi-real, presenta un nuevo enfoque en cuanto al monitoreo hidrológico. En consecuencia se ha desarrollado una nueva técnica de operatividad del modelo hidrológico a partir de la base de estudios como (Asurza-Véliz & Lavado-Casimiro, 2020) que establecen una metodología de simulación y regionalización de parámetros en la VP y dan un enfoque apropiado para la adaptación en un modelo operativo.

El proceso computacional de los pasos de actualización de datos climáticos, así como la simulación hidrológica SWAT, requiere el consumo alto de recursos computacionales de procesamiento (Procesador Intel Core I7 3.2 GHz) y memoria ram (32 GB) del ordenador en ejecución. El siguiente paso es la implementación de un servicio web donde el usuario pueda acceder a la información generada, realizar pronósticos en caudales en corto, mediano y largo plazo.

6. Resumen y conclusiones

El presente estudio desarrolla una metodología de operatividad del modelo SWAT, permitiendo generar las variables hidrológicas de salida en cada subcuenca analizada como puede ser los caudales, precipitaciones, evapotranspiración, humedad de suelo etc. Debido a que SWAT permite la modelización a gran escala, se ha determinado subcuencas de análisis más pequeñas gracias al uso de un modelo digital de terreno de alta resolución (~90m), permitiendo representar adecuadamente los cauces y quebradas, para que estos sean más próximos a la realidad. Se permite conocer de manera actual (a partir de operatividad del modelado) las condiciones hidrológicas y las afectaciones o consecuencias que pueden presentarse en tiempo actual, tanto por eventos como sequías, pero sobre todo en inundaciones y crecidas es posible monitorear los cauces y precipitaciones a escala de subcuencas (3158 subcuencas) en toda la vertiente del Pacífico.

En el presente estudio se no se consideró la influencia antropogénica (parte hidráulica), sino se tuvo el enfoque de simulación de caudales naturales para comprender el comportamiento hidrológico en función de la sensibilidad del parámetro, mientras que se realizaron calibraciones automáticas basadas en el algoritmo PSCO para obtener los valores óptimos para un conjunto de iteraciones. Cuando se tiene en cuenta el rango completo de complejidad, la escorrentía generada por el modelo coincide mejor con la escorrentía observada. A pesar de la limitación del rendimiento del modelo a escala subsidiaria, la información obtenida de este estudio puede aplicarse a regiones similares de terreno complejo para evaluar los impactos del cambio de uso de la tierra y el cambio climático en la disponibilidad y el uso del agua.

El proceso operativo está sujeto a un proceso de validación y actualización de los datos de caudales, con el objeto de representar adecuadamente el proceso computacional y el proceso físico. El estado actual del estudio, se encuentra en la etapa de elaboración de la plataforma web del SENAMHI para el presente monitoreo de caudales, esto permitirá tener estimaciones de inundaciones y sequías a corto, mediano y largo plazo; se espera incluir los valores de humedad de suelo para realizar el análisis de las sequías hidrológicas y agrícolas.

7. Referencias bibliográficas

- Abbas, S. A., & Xuan, Y. (2019). Development of a New Quantile-Based Method for the Assessment of Regional Water Resources in a Highly-Regulated River Basin. *Water Resources Management*, 33(9), 3187–3210. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02290-z>
- ANA. (2012). *Recursos hídricos en el Perú*. Autoridad Nacional del Agua, Perú. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1888>
- Arnold, J. G. (1998). LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT. *AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION*, 34(1), 73–89. [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(00\)00483-4](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(00)00483-4)
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Griensven, A. van, Liew, M. W. Van, Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). *SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION*. 55(4), 1491–1508. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=42256>
- Asurza-Véliz, F. A., & Lavado-Casimiro, W. S. (2020). Regional parameter estimation of the SWAT model: Methodology and application to river basins in the Peruvian pacific drainage. *Water (Switzerland)*, 12(11), 1–25. <https://doi.org/10.3390/w12113198>
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 0(0), 1. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Bezdek, J. C. (1981). *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*.
- CCI-LC-PUCV2. (2017). *Land Cover CCI Product User Guide Version 2.0*.
- Cukier, R. I., Fortuin, C. M., Shuler, K. E., Petschek, A. G., & Schaibly, J. H. (1973). Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. I Theory. *Journal of Chemical Physics*, 59(8), 3873–3878. <https://doi.org/10.1063/1.1680571>
- Debele, B., Srinivasan, R., & Gosain, A. K. (2010). Comparison of process-based and temperature-index snowmelt modeling in SWAT. *Water Resources Management*, 24(6), 1065–1088. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9486-2>
- Dile, Y. T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2016). Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling and Software*, 85, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.004>
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). New optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39–43. <https://doi.org/10.1109/mhs.1995.494215>
- Eberhart, R., & Shi, Y. (1998). Comparison between Generic Algorithm and Particle

- Swarm Optimization. *PervasiveHealth: Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, 137–139. <https://doi.org/10.1145/3429889.3430294>
- Fontaine, T. A., Cruickshank, T. S., Arnold, J. G., & Hotchkiss, R. H. (2002). Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology*, 262(1–4), 209–223. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00029-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00029-X)
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Geza, M., Poeter, E. P., & McCray, J. E. (2009). Quantifying predictive uncertainty for a mountain-watershed model. *Journal of Hydrology*, 376(1–2), 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.025>
- Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., & Wang, Z. (2021). Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(1), 1–32. <https://doi.org/10.1002/wat2.1487>
- Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53–63. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2003)129:1(53))
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Ambient Air Temperature. *Paper - American Society of Agricultural Engineers*, 96–99.
- Huerta, A. ., Aybar, C. ., & Lavado-Casimiro, W. (2018). PISCO temperatura v.1.1. In *Senamhi - Dhi-2018* (Vol. 1).
- Jung, C. G., Lee, D. R., & Moon, J. W. (2016). Comparison of the Penman-Monteith method and regional calibration of the Hargreaves equation for actual evapotranspiration using SWAT-simulated results in the Seolma-cheon basin, South Korea. *Hydrological Sciences Journal*, 61(4), 793–800. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.943231>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimisation. *James Kennedy*, 927, 5–13. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61111-8_2
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- Lavado, W., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J. C., & Guyot, J. L. (2012). Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 625–642. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672985>
- Lehner, B., Verdin, K., & Jarvis, A. (2013). HydroSHEDS Technical Documentation

- Version 1.2. In *EOS Transactions* (Vol. 89, Issue 10). <http://www.hydrosheds.org>
- Meaurio, M., Zabaleta, A., Uriarte, J. A., Srinivasan, R., & Antigüedad, I. (2015). Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed. *Journal of Hydrology*, 525, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.050>
- Merz, R., & Blöschl, G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287(1–4), 95–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.028>
- Monteith, J. (1965). Evaporation and environment. Symposia of the Society for Experimental Biology. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205–234.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Muñoz, R. C., & Garreaud, R. D. (2005). Dynamics of the low-level jet off the west coast of subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 133(12), 3661–3677. <https://doi.org/10.1175/MWR3074.1>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., & Williams, J. . (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. In *Texas Water Resources Institute*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>
- PRIESTLEY, C. H. B., & TAYLOR, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)
- Rafiei Emam, A., Kappas, M., Fassnacht, S., & Linh, N. H. K. (2018). Uncertainty analysis of hydrological modeling in a tropical area using different algorithms. *Frontiers of Earth Science*, 12(4), 661–671. <https://doi.org/10.1007/s11707-018-0695-y>
- Rahman, K., Maringanti, C., Beniston, M., Widmer, F., Abbaspour, K., & Lehmann, A. (2013). Streamflow Modeling in a Highly Managed Mountainous Glacier Watershed Using SWAT: The Upper Rhone River Watershed Case in Switzerland. *Water Resources Management*, 27(2), 323–339. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0188-9>
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin tith point and nonpoint sources. In *Archives Italiennes de Biologie* (Vol. 37, Issue 1, pp. 1169–1188). <https://doi.org/10.4449/aib.v112i1.2721>

- Schürz, C. (2019). *SWATplusR: Running SWAT2012 and SWAT+ Projects in R*.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.3373859>
- Shawul, A. A., Alamirew, T., & Dinka, M. O. (2013). Calibration and validation of SWAT model and estimation of water balance components of Shaya mountainous watershed, Southeastern Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(11), 13955–13978. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-13955-2013>
- Tarboron, G. (1997). *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. 33(2), 309–319. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Tesfa, T. K., Tarboton, D. G., Watson, D. W., Schreuders, K. A. T., Baker, M. E., & Wallace, R. M. (2011). Extraction of hydrological proximity measures from DEMs using parallel processing. *Environmental Modelling and Software*, 26(12), 1696–1709. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.018>
- Turrall, H., Burke, J., & Faurès, J.-M. (2011). *Climate change, water and food security*. <https://www.fao.org/3/i2096e/i2096e.pdf>
- van Osnabrugge, B., Weerts, A. H., & Uijlenhoet, R. (2017). genRE: A Method to Extend Gridded Precipitation Climatology Data Sets in Near Real-Time for Hydrological Forecasting Purposes. *Water Resources Research*, 53(11), 9284–9303. <https://doi.org/10.1002/2017WR021201>
- Wang, G., Yang, H., Wang, L., Xu, Z., & Xue, B. (2014). Using the SWAT model to assess impacts of land use changes on runoff generation in headwaters. *Hydrological Processes*, 28(3), 1032–1042. <https://doi.org/10.1002/hyp.9645>
- Waylen, P., & Poveda, G. (2002). El Niño-Southern Oscillation and aspects of western South American hydro-climatology. *Hydrological Processes*, 16(6), 1247–1260. <https://doi.org/10.1002/hyp.1060>
- Wilson, J. P. (2012). Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137(1), 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.012>
- Zambrano-Bigiarini, M., & Rojas, R. (2013). A model-independent Particle Swarm Optimisation software for model calibration. *Environmental Modelling and Software*, 43, 5–25. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.01.004>