



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**INCIDENCIA DE PRECIPITACION GRILLADA EN LA
RESPUESTA HIDROLOGICA SEMIDISTRIBUIDA DE LA
CUENCA HUANCANÉ**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JHON WILBERT ZAPANA ARPASI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2019



DEDICATORIA

A Dios, esa fuerza superior en la que creo, por su compañía en cada etapa de mi vida, ser mi luz, soporte y fortaleza.

A mi querida madre Nancy Arpasi Belizario, por ser esa mujer luchadora, valiente y fuerte que me dio la vida y me enseñó a esforzarme. A ti arquitecta perfecta de mi vida, a quien le debo todo lo que soy, hoy puedo decir este logro es tuyo.

A mi hermano mellizo Jhon Alexander por su apoyo incondicional, el amor, la alegría y el ánimo que no me dejaron desfallecer para poder culminar satisfactoriamente este proyecto.

A mis abuelitos maternos Sixto Arpasi Machaca y Luisa Belizario Pelinco que son mis segundos padres, por ser ejemplo de personas trabajadoras y enseñarme a luchar por lo que uno quiere. El amor que siento por ustedes es inmensurable.

A mi familia, tíos y primos gracias por su apoyo y confianza.

Jhon W. Zapana



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Agrícola por brindarme los conocimientos necesarios para poderme desarrollar como un profesional y personal de éxito.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola, por transmitir sus conocimientos, experiencias y ganas de ser mejores cada día.

A mis miembros del jurado por sus críticas, consejos y recomendaciones que contribuyeron en la mejora de redacción de tesis. En especial a mi asesor M.Sc. Ricardo Bardales, por su tiempo y profesionalismo en la ejecución de tesis.

A todos mis amigos y colegas de la universidad, con quienes compartí grandes momentos marcados en mi vida y porque no han dejado de apoyarme y alentarme desde que nos conocemos.

Un agradecimiento especial a toda mi familia, por haber creído en mí, por sus consejos y palabras de aliento en su debido momento.

Jhon W. Zapana



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES.....	13
1.2. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.3. ANTECEDENTES.....	14
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	18
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.5.1. Objetivo general	19
1.5.2. Objetivo específico.....	19

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. HIDROLOGÍA Y CICLO HIDROLÓGICO	20
2.1.1. Precipitación.....	21
2.1.2. Evapotranspiración	22
2.1.3. Escorrentía superficial	22
2.1.4. Flujo lateral	22
2.1.5. Infiltración y percolación.....	23
2.1.6. Flujo de agua subterránea	23
2.2. MODELOS HIDROLÓGICOS.....	23
2.2.1. Clasificación de modelos hidrológicos.....	24



2.2.2.	Modelos agregados y distribuidos	25
2.2.3.	Entidades hidrológicas de un modelo distribuido	26
2.3.	PERCEPCIÓN REMOTA EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA	27
2.3.1.	Precipitación PISCOp v2.1	28
2.4.	MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO SWAT	28
2.4.1.	Clima.....	31
2.4.2.	Hidrología	32
2.4.3.	Almacenamiento de dosel	33
2.4.4.	Evapotranspiración	33
2.4.5.	Escurrimiento superficial.....	34
2.4.6.	Infiltración.....	37
2.4.7.	Redistribución	39
2.4.8.	Pérdidas por transmisión.....	39

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	41
3.1.1.	Ubicación política.....	41
3.1.2.	Ubicación geográfica	41
3.2.	MATERIALES.....	42
3.2.1.	Información GIS	42
3.2.2.	Información meteorológica	44
3.2.3.	Información hidrométrica	49
3.2.4.	Programas de computo.....	50
3.2.5.	Equipos de computo	50
3.2.6.	Software para modelamiento.....	50
3.3.	METODOLOGÍA	51
3.3.1.	Modelamiento hidrológico.....	51
3.3.2.	Planteamiento de escenarios de distribución con precipitación grillada	66
3.3.3.	Análisis comparativo de distribución estacional y espacial.....	67



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO	68
4.1.1. Análisis exploratorio de datos.....	68
4.1.2. Ejecución del modelo hidrológico SWAT.....	73
4.1.3. Simulación por defecto	75
4.1.4. Calibración y validación	76
4.1.5. Componentes del balance hídrico.....	79
4.2. ESCENARIOS DE DISTRIBUCIÓN - PRECIPITACIÓN GRILLADA ...	80
4.2.1. Escenario 1	80
4.2.2. Escenario 2	82
4.3. ESCENARIOS DE DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL Y ESPACIAL.....	86
4.3.1. Distribución estacional	86
4.3.2. Distribución espacial	88
V. CONCLUSIONES	92
VI. RECOMENDACIONES	93
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
ANEXOS.....	98

Área: Ingeniería y Tecnología.

Línea: Recursos Hídricos.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 18 de noviembre 2019.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama en bloques del sistema hídrico global.....	21
Figura 2.	Clasificación de los tipos de modelos en hidrología	24
Figura 3.	Esquema de elementos del ciclo hidrológico en SWAT.	30
Figura 4.	Simulación de movimiento del agua en SWAT	40
Figura 5.	Mapa de ubicación cuenca del río Huancané.....	42
Figura 6.	Pasos para la obtención del producto GlobalLand30	44
Figura 7.	Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométricas.	46
Figura 8.	Temperatura máxima promedio mensual histórica.	47
Figura 9.	Temperatura mínima promedio mensual histórica.	47
Figura 10.	Mapa de ubicación de estaciones climáticas – WGEN CFSR.....	49
Figura 11.	Hidrograma de caudales medios diarios.....	50
Figura 12.	Flujograma de metodología de investigación.	51
Figura 13.	Delimitación hidrográfica cuenca del río Huancané - SRTM 90m.....	55
Figura 14.	Clasificación de uso de suelo – GlobalLandCover30.....	56
Figura 15.	Clasificación de tipo de suelo – Wold Soil Map 3.6.....	57
Figura 16.	Clasificación porcentual de pendientes	59
Figura 17.	Clasificación de unidades de respuesta hidrológica	60
Figura 18.	Registro de precipitación observada Estación Huancané.	69
Figura 19.	Diagrama de doble Masa de las precipitaciones anuales.....	69
Figura 20.	Vector regional de las estaciones meteorológicas series históricas.	71
Figura 21.	Vector regional de las estaciones series sintéticas.	71
Figura 22.	Subcuencas divididas según módulo SWAT	74
Figura 23.	Hidrograma de simulación estación Huancané periodo 1984-1999.....	75
Figura 24.	Hidrograma de simulación estación Huancané periodo 2000-2016.....	76
Figura 25.	Hidrograma observado vs simulado ajustado periodo 1984-1999.....	77



Figura 26.	Hidrograma observado vs simulado ajustado periodo 2000-2016.....	78
Figura 27.	Balance hídrico promedio anual histórico.	79
Figura 28.	Hidrograma observado vs simulado escenario 1 periodo 1984-1999.	80
Figura 29.	Hidrograma observado vs simulado escenario 1 periodo 2000-2016.	81
Figura 30.	Balance hídrico promedio anual escenario 1.	82
Figura 31.	Hidrograma observado vs simulado escenario 2 periodo 1984-1999.	83
Figura 32.	Hidrograma observado vs simulado escenario 2 periodo 2000-2016.	83
Figura 33.	Balance hídrico promedio anual escenario 2.	84
Figura 34.	Análisis estacional en componentes de balance hídrico.	87
Figura 35.	Análisis estacional del rendimiento hídrico.	88
Figura 36.	Mapas de distribución espacial de precipitación.	90



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ubicación política de la cuenca Huancané.....	41
Tabla 2.	Datos de información geográfica.....	43
Tabla 3.	Ubicación de estaciones meteorológicas.....	45
Tabla 4.	Ubicación de estaciones sintéticas.....	45
Tabla 5.	Ubicación de estación hidrométrica.....	49
Tabla 6.	Clasificación de uso del suelo.....	56
Tabla 7.	Clasificación del tipo de suelo.....	57
Tabla 8.	Clasificación porcentual de pendientes.....	58
Tabla 9.	Parámetros pertinentes para la simulación hidrológica.....	61
Tabla 10.	Criterios para evaluar el rendimiento del modelo hidrológico.....	66
Tabla 11.	Análisis de escenarios de distribución.....	67
Tabla 12.	Análisis de homogeneidad en precipitaciones históricas.....	70
Tabla 13.	Parámetros de análisis vector regional.....	72
Tabla 14.	Parámetros de calibración seleccionados.....	77
Tabla 15.	Estadísticos de eficiencia resultantes.....	85
Tabla 16.	Componentes de balance hidrológico.....	86



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ANA	: Autoridad Nacional del Agua
BFI	: Índice de Flujo Base
CFSR	: Reanálisis del Sistema de Pronostico Climático
CGIAR-CSI	: Consorcio para la Información Espacial del Grupo Consultivo de Investigación Internacional Agrícola
CN	: Curva Numero
DEM	: Modelo de Elevación Digital
HRU	: Unidades de Respuesta Hidrológica
MVR	: Método de Vector Regional
PISCO	: Datos Peruanos Interpolados de las Estaciones Climatológicas e Hidrológicas del SENAMHI
SCS	: Servicio de Conservación de Suelos
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SIG	: Sistema de Información Geográfica
SRTM	: Transbordador Espacial con Misión Topográfica
SWAT	: Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua



RESUMEN

Las relaciones hidrológicas en cuencas pueden estudiarse a través de modelos hidrológicos que representen distintos procesos, sin embargo, la falta de información y datos limitados hacen atractiva la alternativa de utilizar tecnología satelital. El propósito de la presente investigación es evaluar la incidencia de precipitación grillada PISCOp v2.1 en la respuesta hidrológica de la cuenca Huancané utilizando el modelo semidistribuido SWAT. Entonces, se calibró y validó el modelo con series de precipitación histórica para el periodo 1984-2016 mediante el ajuste de 4 parámetros CN (12%), SURLAG (0.10), ESCO (0.80) y RCHRG_DP (0.40), logrando estadísticas de eficiencia NSE (0.59, 0.67), PBIAS (9.1%, -5.1%) a escala diaria y NSE (0.80, 0.85), PBIAS (8.9%, -5.3%) a escala mensual, respectivamente. Posteriormente se establecieron escenarios de distribución con precipitación grillada, manteniendo misma ubicación en estaciones de observación (escenario 1) y considerando estaciones sintéticas (escenario 2), que fueron juzgados para periodos de calibración (1984-1999) y validación (2000-2016) mediante análisis gráfico y estadísticos, manteniendo constante los parámetros. El escenario 1 obtuvo estadísticos de NSE (0.80, 0.81) y PBIAS (6%, -8.9%) mientras que el escenario 2 obtuvo NSE (0.76, 0.82) y PBIAS (19.3%, 2.2%) a escala mensual, reflejando la alta capacidad de PISCO. Finalmente, la incidencia estacional y espacial de los componentes del balance hídrico en su mayoría reflejan similar estacionalidad mensual e influencia del acuífero profundo por flujo subterráneo que explicarían la sobrevaloración especialmente en temporadas de avenida; en cuanto al rendimiento hídrico se logró identificar los aportes proporcionales según la distribución de precipitación en la cuenca.

Palabras clave: PISCOp v2.1, precipitación grillada, rendimiento hídrico, respuesta hidrológica, SWAT.



ABSTRACT

The hydrological relationships in catchments can be studied through hydrological models represent different processes that occur inside, however, lack information and limited data make attractive the alternative of using satellite technology. The purpose of this research is evaluate the incidence of PISCOp v2.1 grid precipitation in the hydrological response of Huancané river catchment using the semidistributed SWAT model. Therefore, the model with historical precipitation series was calibrated and validated for 1984-2016 period, by adjusting 4 parameters CN (12%), SURLAG (0.10), ESCO (0.80) and RCHRG_DP (0.40), achieving statistics of efficiency NSE (0.59, 0.67), PBIAS (9.1%, -5.1%) on daily scale and NSE (0.80, 0.85), PBIAS (8.9%, -5.3%) on monthly scale, respectively. Subsequently distribution scenarios were established with gridded precipitation, maintaining same location in observation stations (scenario 1) and considering synthetic stations (scenario 2), which were judged in calibration periods (1984-1999) and validation (2000 -2016) through graphic and statistical analysis, keeping constant parameters. The scenario 1, statistics NSE (0.80, 0.81) and PBIAS (6%, - 8.9%) were obtained while for scenario 2, values NSE (0.76, 0.82) and PBIAS (19.3%, 2.2%) were obtained at scale monthly, reflecting the high capacity of PISCO. Finally, the incidence was assessed at seasonal and spatial level, where the components of the water balance mostly reflect similar monthly seasonality and influence of the deep aquifer by underground flow that would explain the overvaluation especially in flood seasons; in terms of water performance, it was possible to identify that the contributions are presented proportionally to the distribution of precipitation in the catchment.

Keywords: PISCOp v2.1, Gridded precipitation, SWAT, water performance, hydrological response.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

La gestión de recurso hídrico necesita buen entendimiento sobre el espacio geográfico e información hidroclimática disponible en cuencas, resultando esencial la cuantificación de las mismas a fin de proporcionar información necesaria como base para la planificación hídrica, sin embargo, el escenario se muestra más complicado para territorios que no cuentan con estaciones hidrométricas.

Actualmente, los modelos hidrológicos se han convertido en una valiosa herramienta para hacer frente al amplio espectro de problemas en los recursos hídricos. Además, con los avances de la percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG) se ha impulsado el uso de modelos hidrológicos, dando una nueva dimensión en la modelación hidrológica espacialmente distribuida para investigar el comportamiento hidrológico de cuencas y su relación directa con el clima, la topografía, geología y el uso del suelo. Sin embargo, los avances en la simulación hidrológica se han visto limitados por la dificultad de medir la variabilidad espacio temporal de información requerida. En cualquier caso, disponer de una mejor información no solo conlleva a un mayor conocimiento hidrológico, sino a que es fundamental para mejorar la toma de decisiones.

La situación antes descrita sugiere la necesidad de contar con otras fuentes de información pluviométrica, por su incidencia en el ciclo hidrológico, para lo cual se tiene como alternativa el uso de lluvia estimada por sensoramiento remoto, bajo esta premisa el objetivo de la presente investigación es evaluar la incidencia de precipitación grillada PISCOp v2.1 en la respuesta hidrológica de la cuenca mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), requiere una gran cantidad de información climatológica, topográfica, tipos de suelos y cobertura vegetal. Lo que conlleva a evaluar otras herramientas disponibles en la actualidad como son el uso de información climática grillada y técnicas de sensoramiento remoto. Cuya información validada permite determinar caudales en puntos específicos de la cuenca del río



Huancané, determinando la disponibilidad del recurso hídrico y comportamiento del ciclo hidrológico, lo que servirá como herramienta para la gestión de los recursos hídricos y solución de problemas existentes del territorio.

1.2. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El aprovechamiento de los recursos hídricos en nuestro país, se encuentra restringido y limitado debido a la falta de información de variables climáticas y descargas. Otros factores, entre ellos el económico y la falta de interés en implementar estaciones hidrometeorológicas por parte de organismos del Estado, hacen más complejo entender con aproximación el potencial hídrico de las cuencas.

En efecto, cuando existe falta de información sobre el recurso agua, los estudios para el desarrollo de las diferentes regiones se llevan a cabo imperativamente mediante métodos de simulación, para así evaluar diferentes alternativas y poder seleccionar la que mejor se adapte a la región a analizar, en este sentido se requiere estudios hidrológicos para determinar la disponibilidad de fuentes naturales y para saber si el abastecimiento de la fuente es adecuada en el tiempo, o si en caso requiera estructuras para corregir deficiencias o en su defecto disponer de volúmenes excedentes de agua.

1.3. ANTECEDENTES

Antecedentes de nivel internacional

Ghoraba (2015), desarrolla la investigación con objetivo de simular el flujo de corriente, establecer el balance hídrico y estimar el flujo de entrada mensual a la cuenca Simly Dam para ayudar en la planificación y manejo del recurso. Se llega a la conclusión de que el modelo SWAT ha sido bien documentado como una herramienta efectiva mediante la interfaz de ArcSWAT implementada en el ARCGIS utilizado para modelar la hidrología del área. La calibración y validación del modelo produjo buenos resultados de simulación en periodo mensual, la eficiencia del modelo ha sido evaluado por el coeficiente de determinación y Nash Sutcliffe con porcentajes de calibración de 95% y 84% respectivamente; 84% y 80% para el periodo de validación, lo que indica muy alta capacidad predictiva del modelo. Las prestaciones del modelo se pueden mejorar, además, mediante la integración de algunos otros datos climáticos, como la energía solar, radiación, humedad y viento.



Tomy & Sumam (2016), analizan la adecuación de los datos CFSR, utilizados para resolver los problemas de deficiencia de datos en cuencas hidrográficas, calificados como conjuntos de datos de reanálisis disponible abiertamente que incluye todos los parámetros necesarios como, precipitación, humedad, radiación solar, humedad y velocidad del viento, que se promedian efectivamente a escalas espaciales. Concluye que los datos CFSR brindan mejores resultados cuando el número de estaciones es 3 o menores a esta.

Desta & Lemma (2017) desarrollan la investigación que tuvo como objetivo cuantificar y comparar los componentes de balance hídrico, la descarga de los ríos alimentadores y la evapotranspiración en la región de estudio, utilizando el modelo SWAT. Concluyendo que una disminución de flujo superficial, base, y el incremento de la evapotranspiración ha sido observado en las sub cuencas del lago Ziway incluyendo al lago mismo, lo que conducirá a largo plazo efectos indeseados en el lago. El aumento de trabajos de desarrollo en irrigación en la cuenca es uno de los principales impulsores a reducir el flujo de los ríos Katar y Meki lo que afecta la hidrología del lago Ziway.

(Grusson, Anctil, Sauvage, & Sánchez, 2017), exploran la influencia de un conjunto de datos de clima grillado (SAFRAN y CFSR) cuando se ingresan a la herramienta de agua y suelo SWAT. El modelo calibrado en estaciones meteorológicas se ejecuta sucesivamente con cada cuadrícula de datos, donde el rendimiento de SAFRAN de hasta 64 o 128 km fue deficiente debido a la contracción de la varianza. Asimismo, se descubre que el producto CFSR de 30 km funciona bien en algunos sitios mientras que en otros su rendimiento es considerablemente inferior a los puntos de cuadrícula donde la precipitación es sobrestimada. Los resultados sugieren que la diferencia en la representación del clima es más influyente que su resolución espacial, actuaciones que es confirmado por lo obtenido con el modelo SWAT calibrado.

Antecedentes de nivel nacional

(Zubieta, 2013), tesis que desarrolla el modelo hidrológico distribuido en la cuenca amazónica peruana empleando el modelo MGB-IPH en la subcuenca de los ríos Ucayali, Marañón y Napo, evaluando la utilidad de datos distribuidos basados en la estimación de precipitación satelital como variable de entrada al modelo. La investigación llegó a las siguientes conclusiones:



- Las métricas de desempeño como Nash Sutcliffe (NS) muestran un buen rendimiento del modelo en la Amazonia peruana al emplear el producto 3B42 V7 del TRMM.
- Errores del modelo pueden asociarse a datos de entrada como la distribución espacial y temporal de la lluvia estimada o mejor definición de las unidades de respuesta hidrológica. A ello también se le suma la incertidumbre en las condiciones iniciales del modelo.
- Los errores medios porcentuales de caudales estimados respecto a los observados, orientan a que el empleo del producto 3B42 del TRMM en el modelado hidrológico de la amazonia dispone mayor aproximación a los eventos extremos en periodo de avenidas y estiajes.
- El mapa de unidades de respuesta hidrológica HRU elaborado en base a los mapas de cobertura vegetal y tipo de suelos con información disponible de instituciones gubernamentales de Perú, Ecuador y Colombia, mostrándose territorios diferenciados en cuanto a la distribución espacial en la zona de Ecuador con respecto a Perú, respecto a diferentes bases de información. La mencionada diferenciación podría afectar el rendimiento, que daría origen a errores en el modelo. Por ello es recomendable el modelamiento utilizando mapas de unidades de respuesta hidrológica considerando otras fuentes de información como la FAO o imágenes satelitales.

Los resultados y conclusiones de este trabajo de investigación son de suma importancia, en cuanto a los mapas de unidades de respuesta hidrológica HRU para tener menor incertidumbre, de forma similar menciona donde consideran el error para así llegar a una mejor precisión.

Aybar (2016) caracteriza la variabilidad de la escorrentía y de los factores que la conforman mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Vilcanota, considerando que el mencionado modelo fue capaz de reproducir el registro histórico de caudales luego de la calibración de los parámetros identificados como los más sensibles a generar cambios significativos, con un valor de eficiencia de Nash – Sutcliffe de 0.76 a paso diario y 0.93 a paso mensual. Además, se determinó que los cambios de cobertura ocurridos no son determinantes en la ocurrencia de inundaciones,



demostrándose que el factor más importante para el desencadenamiento de dichos fenómenos es el estado hídrico previo.

Fernández (2016) realizó el estudio del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, donde enfoca en dos ejes; el primero que consiste en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota utilizando el modelo hidrológico SWAT y el segundo en la evaluar la utilidad de la lluvia estimada por el satélite en el modelo hidrológico de la cuenca mencionada. Concluyen que el SWAT es adecuado para el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota, lo cual fue verificado mediante las métricas de incertidumbre (P-factor y R-factor) y de desempeño (NSE y PBIAS). Por el desempeño del modelo SWAT en la simulación de descargas de la cuenca del río Vilcanota, permite inferir que es un modelo adecuado para el modelamiento hidrológico de cuencas ubicadas en los Andes.

Antecedentes de nivel regional

(ANA, 2010) realizó el estudio hidrológico de las cuencas Huancané y Suches, con la finalidad de evaluar y cuantificar la disponibilidad hídrica para la planificación y gestión integral de los recursos hídricos de las cuencas en estudio. Promoviendo su manejo eficiente, equitativo y oportuno, dando énfasis en el uso del agua para riego. Este reporte brinda información respecto al estudio hidrológico en el ámbito de las cuencas Huancané y Suches donde hace mención a la clasificación climática. Esta cuenca corresponde a la región del sub-húmedo a húmedo con temperatura micro térmico. Una modelación hidrológica de precipitación escorrentía, para la generación de las descargas medias mensuales en las sub cuencas de interés se han realizado, por ello se calibro el modelo de acuerdo a la estación hidrométrica Puente Huancané, y en base a los parámetros calibrados en el río, se ha desarrollado el modelamiento hidrológico con series de precipitación total mensual y generación de caudales para las sub cuencas de interés. La disponibilidad hídrica de la cuenca Huancané, se desarrolla a partir del análisis de frecuencia de caudales al 75% de persistencia, para cada una de las subcuencas de interés. La fuente hídrica principal única existente son aguas superficiales provenientes del río de la cuenca Huancané cuya demanda hídrica hasta ese entonces fue de 35.87 hm³/año (33.83 hm³ de uso agrícola de una superficie de 2345.62 ha bajo riego y 2.04 hm³ de uso poblacional) con caudal ecológico estimado de 31.67 hm³.



Fernández (2017) realizó el estudio del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, donde desarrolla la cuantificación del potencial hídrico en la región hidrográfica del Titicaca, caracterizando las cuencas Huancané, Ramis, Coata e Ilave para lo cual realiza el modelamiento hidrológico mediante la aplicación del modelo semidistribuido SWAT, evaluando su desempeño en la simulación de descargas diarias y mensuales, tanto en la etapa de calibración y validación y determinándose el balance hídrico de principales componentes del proceso hidrológico. Este estudio reporta mapas de variabilidad espacial de los principales componentes de balance hídrico como la precipitación, evapotranspiración real, rendimiento hídrico e índice de flujo base.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El hecho de que territorialmente, las cuencas andinas sean las unidades hidrológicas más lejanas del sistema hidrográfico, determina también que sean las más afectadas respecto a la disponibilidad de información (Ortiz, 2015). Esta investigación pretende plasmar la importancia y ventajas que representan los sistemas de información geográfica (SIG) y la bondad de datos grillados PISCOv2.1 para la generación de caudales, utilizando el modelo hidrológico SWAT con el objeto de ofrecer una herramienta que permita la integración sistémica de métodos y técnicas para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, distribución de información y parámetros fisiográficos de una cuenca hidrográfica.

Por otro lado, es importante conocer la incidencia que tendrán en los procesos hidrológicos, para lo cual, SWAT presenta la ventaja de detallar algunas variables del ciclo hidrológico que pueden explicar el funcionamiento sistemático de la cuenca, proporcionando una línea base de caracterización espacial sobre el potencial hídrico que servirá para la toma de decisiones y promover la planificación de los recursos hídricos, entender el funcionamiento hidrológico de la cuenca y en cuanto a las restricciones y bondades que ofrece el sistema natural como generador de agua superficial.



1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

- Evaluar la incidencia de precipitación grillada PISCO en la respuesta hidrológica de la cuenca Huancané mediante el modelo hidrológico SWAT.

1.5.2. Objetivos específicos

- Calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT con datos observados para el periodo 1984-2016.
- Establecer escenarios de distribución utilizando precipitación grillada PISCO para la simulación hidrológica.
- Analizar los escenarios de distribución en la respuesta hidrológica de la cuenca Huancané.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. HIDROLOGÍA Y CICLO HIDROLÓGICO

La hidrología se basa en el estudio del ciclo hidrológico, que es resumido en los procesos de evaporación de las aguas, principalmente de los mares, seguido por otros componentes como la precipitación en sus diferentes formas (nieve, lluvia, granizo, etc.) en base a este proceso el agua puede correr por la superficie hasta alcanzar cauces de arroyos y ríos para llegar al mar, infiltrarse en el terreno y retornar a la superficie (manantiales, puquios, etc.), o en la profundidad tener recorridos subterráneos para finalmente llegar al mar, iniciando así el ciclo nuevamente (Balairón, 2009).

Según (Chow, 1994), considera que las ciencias hídricas están relacionadas con las aguas de la tierra su distribución y circulación, las propiedades físicas y químicas, la interacción ambiental con los seres vivos, particularmente con los seres humanos. Por ello, puede considerarse que la hidrología abarca todas las ciencias hídricas, asimismo de forma más estricta puede definirse como el estudio del ciclo hidrológico, es decir, la circulación ininterrumpida de agua entre la tierra y la atmósfera, forma el foco central de la hidrología.

Según (Mejía, 2012), define al ciclo hidrológico como la interminable circulación que siguen las partículas de agua en cualquiera de sus tres estados (sólido, líquido, gaseoso). La circulación es efectuada de forma natural y durante la misma sufre transformaciones físicas, que alteran su forma pero no su cantidad.

Los fenómenos hidrológicos son considerados extremadamente complicados y es posible que no se entiendan en su totalidad. No obstante, en ausencia de un conocimiento claro pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema. Un sistema es considerado como un conjunto de partes conectadas entre sí que conforman un todo (Chow, 1994). Por lo tanto, el ciclo hidrológico es un sistema de diferentes componentes que se relacionan entre sí. Al agruparse estos componentes en subsistemas para ser analizados en todo el sistema, los subsistemas pueden ser tratados de forma separada y los resultados combinados conforme a las interacciones entre ellos. En la

Figura 1 se representa a estos subsistemas y componentes del sistema hidrológico que intervienen en el ciclo hidrológico.

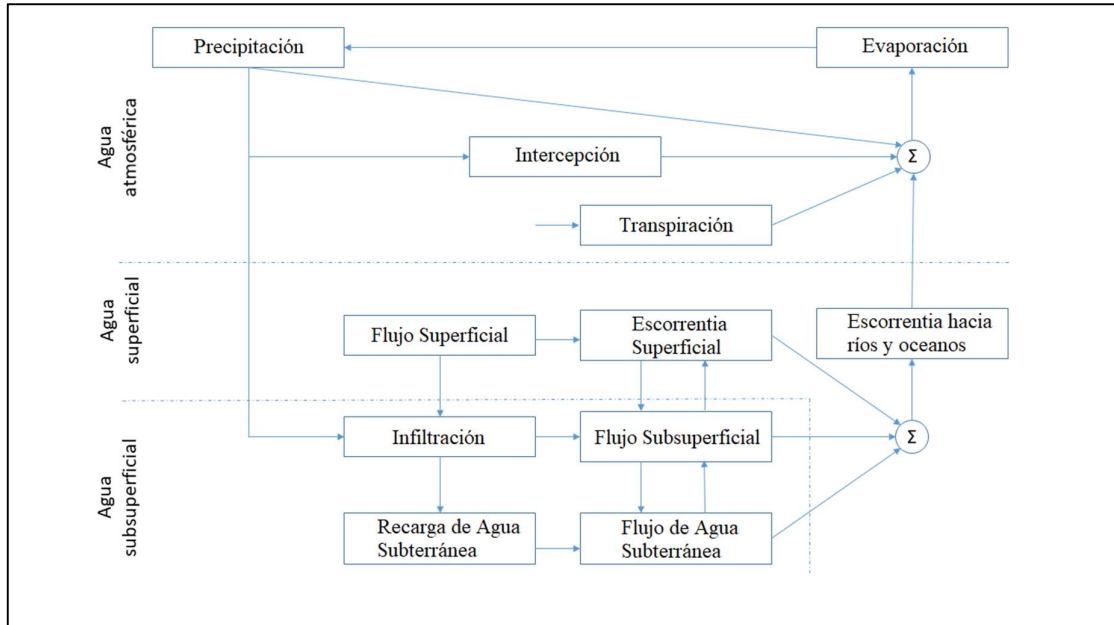


Figura 1. Diagrama en bloques del sistema hídrico global.

Fuente: Chow (1994)

2.1.1. Precipitación

La precipitación es la fuente primaria del agua de superficie terrestre, sus mediciones y análisis forman el punto de partida a estudios respecto al uso y control del recurso agua (Villon, 2004).

La precipitación en su forma líquida puede ser lluvia, rocío, o en forma sólida (nieve, granizo) es considerada como una variable que presenta claramente su carácter aleatorio, variando a través del tiempo (variación temporal) y del espacio (variación espacial), debido a que es común que en un periodo determinado de tiempo, mientras en una zona ocurre lluvia, en otra zona no hay precipitación alguna (Mejía, 2012).

La precipitación incidente es la cantidad total de lluvia medida por encima de la copa de los árboles o en territorios abiertos adyacentes al bosque, por otro lado, la precipitación neta se muestra conformado por gotas de agua que caen o drenan al suelo desde el follaje y las ramas o que se escurren a través de los troncos (C. Aybar, 2016).



2.1.2. Evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración es considerado como la pérdida del agua resultante de la evaporación directa del suelo y transpiración de las plantas. Entonces el fenómeno físico de estado líquido al gaseoso del agua en condiciones naturales, dependen de la disponibilidad de agua para la vegetación y necesitan una importante fuente de energía para que el proceso ocurra adecuadamente (Del Carmen, 2001).

2.1.3. Escorrentía superficial

La escorrentía es entendida como la lámina de agua de circulación libre sobre la superficie terrestre, donde la naturaleza en un determinado territorio está en función a sus características físicas, hidrológicas, vegetativas y climáticas de la misma (Mejía, 2012). Gran porcentaje de escorrentía superficial llega a los arroyos, donde se describe el caudal o flujo y frente a ello se puede producir dos tipos.

- Escorrentía por exceso de infiltración:

Efecto que ocurre en los suelos que no se encuentran saturados. Efectivamente, el suelo al presentarse en un estado muy seco, y debido a sus propiedades o de la cubierta, el proceso de infiltración no es capaz de absorber el agua producida por una lluvia o un deshielo rápido.

- Escorrentía por exceso de saturación:

Efecto que ocurre al presentarse el suelo saturado sin dejar espacio para que se infiltre más agua. Esto puede dar lugar incluso en suelos que normalmente se encuentran en condiciones subsaturadas, permitiendo la infiltración de grandes cantidades de agua en el territorio.

2.1.4. Flujo lateral

El flujo lateral es considerado como agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye sub superficialmente y mantiene alimentado a canales de drenaje, quebradas y ríos. Asimismo, el flujo sub superficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre 0 a 2 metros, mediante un modelo de almacenamiento cinético, que se basa en la ecuación de conservación de la masa considerando el perfil entero del suelo como el volumen de control (Proaño et al., 2006).



2.1.5. Infiltración y percolación

La infiltración hace referencia a la entrada de agua en el perfil de suelo de superficie terrestre, es considerado como continuo cuando la tierra obedece a ser más húmeda, provocando que la reducción del promedio de infiltración con el tiempo hasta alcanzar un valor constante. Su tasa inicial de infiltración está en función del contenido de humedad de la tierra antes de la introducción de agua en el terreno superficial. Asimismo, su tasa final de infiltración es equivalente a la conductividad hidráulica saturada de la tierra. Entonces la percolación es considerada como el movimiento que recorre el agua por medios permeables de suelo saturados. Ambos fenómenos se encuentran íntimamente enlazados ya que la primera no puede continuar si no da lugar la segunda (C. Aybar, 2016).

2.1.6. Flujo de agua subterránea

El flujo de agua subterránea es considerado como el agua en la zona saturada de materiales terrestres que se encuentra bajo mayor presión a la atmosférica. En el ciclo hidrológico, estos procesos crean un flujo base para los cuerpos de agua superficiales y recarga de aguas subterráneas almacenada primeramente por la infiltración / percolación, como también por filtración por parte de los cuerpos de agua superficial (Neitsch, Arnold, & Kiniry, 2009).

2.2. MODELOS HIDROLÓGICOS

Para estimar el comportamiento de variables que permiten reproducir el ciclo hidrológico de una cuenca, se elaboran los modelos hidrológicos como una representación aproximada del balance hídrico.

Los modelos hidrológicos pueden ser definidos como la representación matemática del ciclo hidrológico sobre una determinada porción del territorio, a fin de realizar transformaciones lluvia – escorrentía (C. Aybar, 2016). Entonces buscan simplificar la complejidad del mundo real por medio de una selección de los aspectos fundamentales que determinan el funcionamiento del sistema hidrológico modelado, de tal forma que generalmente cuantas más simplificaciones suponga el modelo, menos precisos se muestren los resultados. El sistema hidrológico engloba el conjunto de

procesos físicos, químicos y biológicos que actúan sobre variables de entrada transformándolas a variables de salida (Clarke, 1973).

Así también, los modelos hidrológicos sirven para simular diversas situaciones o extender la información existente, después de pasar por un proceso de calibración y validación. Además, son de gran importancia en el manejo de cuencas ya que se puede simular y representar la respuesta de la cuenca ante cambios en el uso de la tierra, cambio climático y prácticas de conservación de suelos dentro de los territorios (Rojas, 2009). Para una mejor gestión de los recursos hídricos y toma de decisiones, es de importancia la modelación hidrológica, la cual es útil para estudiar el comportamiento de los regímenes de caudales ante variaciones en las condiciones predominantes como lluvia o evapotranspiración.

2.2.1. Clasificación de modelos hidrológicos

Respecto al ámbito de la ciencia, la literatura se encuentra repleta de modelos, con diferentes criterios y formas de clasificarlos en función de sus variables y componentes que describan el ciclo hidrológico. Según Fernández et al. (1997), menciona que en primer lugar, el tipo de modelo a desarrollar depende del tipo de proceso que se desea demostrar. Una de las primeras clasificaciones agrupa a los modelos hidrológicos en tres grandes categorías como se detalla en la Figura 2:

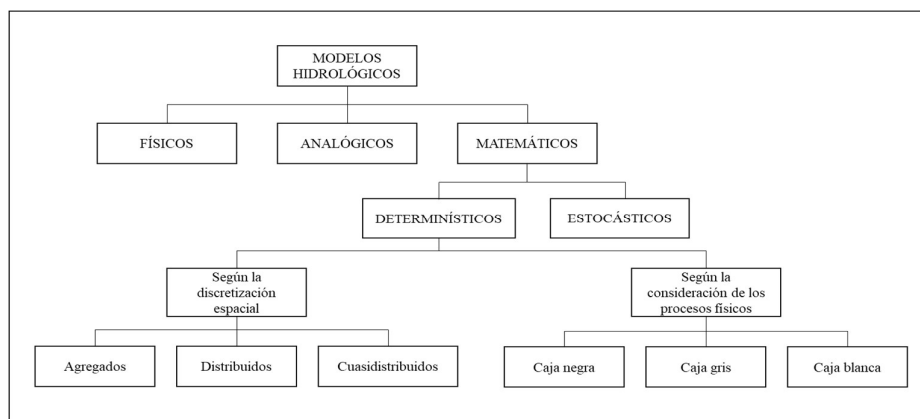


Figura 2. Clasificación de los tipos de modelos en hidrología

Fuente: Fernández (1997)



2.2.1.1. Modelos físicos

Estos modelos representan el sistema sobre una menor escala, con lo que se busca representar el mundo real, tal como los modelos hidráulicos. Entonces la forma más común de aplicación de los modelos físicos, son las llamadas simulaciones de flujos en canales y obras hidráulicas.

2.2.1.2. Modelos analógicos

Los modelos analógicos representan el flujo del agua mediante flujos de electricidad en un circuito. La entrada de estos modelos es controlada ajustando de amperaje y la salida medida con un voltímetro. Entonces, históricamente los modelos análogos son usados para el cálculo de flujo superficial.

2.2.1.3. Modelos matemáticos

Un modelo de sistema hidrológico matemático es la aproximación del sistema real cuyas entradas y salidas son variables hidrológicas medibles, su estructura está compuesta por ecuaciones que conectan las entradas y las salidas (Chow, 1994). Conforme a la estructura del modelo está el concepto de transformación del sistema, donde las entradas y las salidas pueden expresarse en función del tiempo, $I(t)$ y $Q(t)$ respectivamente, donde t pertenece al rango en consideración (Ec. 2.01).

$$Q(t) = \Omega I(t) \quad (2.01)$$

Asimismo, el uso de estos modelos requiere parámetros de sincronización de fase empírica, porque tienen un significado que no se relaciona con cantidades medibles del territorio. Por ello, la ventaja radica en simplicidad de esta estructura y la buena definición de estos parámetros cuyas relaciones se pueden establecerse regularmente entre valores de los parámetros y un descriptor de la cuenca. Así también, entre los modelos empíricos y de base física, hay modelos conceptuales que se estudian como modelos empíricos, desde un enfoque sistémico de base física (Zubieta, 2013).

2.2.2. Modelos agregados y distribuidos

Los modelos hidrológicos determinísticos pueden subdividirse en modelos agregados y modelos distribuidos respecto al nivel de desagregación espacial (Fernández



et al., 1997), donde la diferencia radica en la unidad básica de análisis que divide la zona de estudio.

2.2.2.1. Modelos agregados

Un modelo es agregado cuando considera la cuenca como una unidad simple, no tomando en cuenta características de variación espacial de respuesta hidrológica como las variables climáticas, suelos, pendientes y/o cambios de la cobertura vegetal dentro de la cuenca, que de manera general se resume por no considerar características de variación espacial de respuesta hidrológica (Astorayme, 2017), lo que implica la frenesí de linealidad de la respuesta hidrológica.

2.2.2.2. Modelos distribuidos

En un modelo distribuido, la variabilidad y heterogeneidad de la cuenca, se mantiene dividiendo la cuenca en un número de unidades de respuesta hidrológica relativamente homogéneas. Cada unidad es considerada como un elemento individual; la respuesta integrada de todas las unidades individuales contribuye a la respuesta total del sistema. A cada unidad se le asigna parámetros para que describan características individuales del clima, suelos y vegetación. De esta forma, un modelo distribuido considera la variación espacial sobre las características del territorio estudiado. (Astorayme, 2017).

Dado que los modelos distribuidos intentan explicar de forma minuciosa los procesos que ocurren al interior de la cuenca, estos demandan un conocimiento profundo de los procesos físicos que ocurren al interior de la misma.

2.2.3. Entidades hidrológicas de un modelo distribuido

Los modelos distribuidos dividen la cuenca en subunidades vectoriales o conjunto de píxeles (sistema ráster), con las respectivas características de comportamiento similar, involucrando la variabilidad espacial del territorio. Esta variabilidad espacial es representada mediante zonas equivalentes que controlan la dinámica hidrológica, comúnmente llamadas unidades de respuesta hidrológica HRU (Zubieta, 2013).

2.2.3.1. Unidad de respuesta hidrológica

Las unidades de respuesta hidrológica son áreas estructuradas homogéneamente haciendo una respuesta hidrológica similar y características geo climáticas en un solo componente del ciclo. Están conformadas por áreas dispersas, desconectadas entre sí pero que mantienen propiedades hidrológicas comunes relacionando pendiente, elevación, tipo de suelo, uso de cobertura vegetal (Cabrera, 2017). Entonces, el apuro radica en identificar cartográficamente estas zonas para un territorio, sin embargo, múltiples métodos de referencia son utilizados.

2.3. PERCEPCIÓN REMOTA EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Actualmente, existen dos fuentes de estimaciones para precipitación, estaciones pluviométricas y tecnología de teledetección (Jia, Zhu, Lu, & Yan, 2011), el primero corresponde a la con ubicación puntual y fija de estaciones instaladas sobre la superficie terrestre, que en efecto pueden ser automática o mecánica para el registro o lectura de las precipitaciones y el segundo corresponde a la teledetección de multipropósito para el registro de precipitaciones, vegetaciones, topografía y climatología. Conforme a ello, los diferentes instrumentos convencionales de medida se han sumado recientemente los radares meteorológicos de alta resolución, como complemento eficaz que proporciona información necesaria a nivel de intensidad, naturaleza, distribución, posición y movimiento.

El sistema de teledetección generalmente se encuentra esencialmente compuesto por 2 elementos, la plataforma correspondiente al satélite y el sensor remoto, sin quitar importancia a los demás como la fuente de energía, el sistema de transmisión y la función del usuario, pues el radar transmite pulsos de energía electromagnética en una dirección predeterminada por una antena móvil; la onda irradiada viaja a la velocidad de la luz y es reflejada parcialmente por nubes y partículas de precipitación, regresando al radar, donde es acogida por la misma antena (Cuadrat & Pita, 2016).

La necesidad principal de usar radar para medir la precipitación se basa en la cobertura del radar ya que provee alta resolución espacial y temporal que permiten estimar lluvias para intervalos de tiempo pequeños como 5 minutos y resoluciones espaciales como 1 km², respectivamente (Fattorelli & Fernández, 2011). De manera que estos equipos telemétricos acortan el tiempo de procesamiento de los datos de precipitación,



sin embargo, generalmente los pluviómetros son considerados como instrumentos de mayor precisión y calidad durante la recepción de datos, porque el problema principal radica en que los satélites no pueden medir lluvias directamente y su cuantificación requiere la evaluación de un coeficiente de precipitación en base a la cantidad, el tipo de nubosidad, la probabilidad e intensidad de lluvia asociada con cada tipo de nube (Linsley, Hohler, & Paulus, 1977).

2.3.1. Precipitación PISCOp v2.1

PISCOp v2.1, elaborado por la Dirección General de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, es una base de datos espacial de precipitación a paso de tiempo diario y mensual, con resolución de 0.1° asociado a series que comienzan desde el año 1981 hasta la actualidad. Se utilizaron y combinaron datos que consistieron en base de datos de precipitación de todo el Perú y datos satelitales del producto CHIRPS por medio de técnicas geoestadísticas Kriging con Deriva Externa al ser considerado una técnica robusta. Basada en esta metodología la variable que se regionaliza es la precipitación observada y la covariable como precipitación estimada por el satélite, en la cual se realizan simultáneamente una regresión lineal entre PO y CHIRPS, posteriormente los errores residuales de esta regresión se interpolan mediante técnicas Kriging ordinario usando un variograma experimental de ajuste por cada periodo (Cesar Aybar et al., 2019).

Según Aybar et al. (2017), la metodología para la generación de precipitación diaria PISCOpd y precipitación mensual PISCOpm se dividen en tres procesos, con los que se evidencian mejoras significativas de correlación sobre la costa y sierra, estos procesos son los siguientes:

- Control de calidad de la información pluviométrica.
- Análisis exploratorio de la información satelital.
- Mezcla de datos basados en función a técnicas determinísticas (diario) y geoestadísticas (mensual).

2.4. MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO SWAT

El modelo hidrológico SWAT consiste en la representación de una situación idealizada que tiene propiedades estructurales importantes de un sistema real, a través de



ecuaciones que expresan relaciones entre variables y parámetros (Rivas, 2016). Esta herramienta de dominio público ha sido desarrollada por el Dr. Jeff Arnold del departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas. Este modelo es caracterizado como un modelo de tiempo continuo, es decir es a largo plazo y no está diseñado para simular un solo evento, utiliza datos de entrada con información específica sobre clima y tiempo, propiedades de suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra en las cuencas. Así también, modela procesos físicos relacionados con el movimiento del agua, de sedimentos, desarrollo de cosechas, ciclo de nutrientes, entre otros (Uribe, 2010).

Además, las ventajas del modelo SWAT es que puede trabajar con una interface gráfica en ArcGIS, que hace más fácil su manejo y utilización; la predicción sobre el impacto relativo de los datos de entrada alternativos sobre la calidad del agua y otras variables de interés se puede cuantificar; debido a que su entorno cuenta con un método extrapolación e integración de la información; la disponibilidad de datos de entrada y salida es inmediata; el modelo cuenta con un amplio proceso de iteraciones de procesos físicos; es un modelo gratuito (Uribe, 2010).

En SWAT, una cuenca es dividido en múltiples subcuencas que se encuentran conectadas entre sí y que luego son subdivididas en unidades de respuesta hidrológica que son independientes en base a la combinación de uso de suelo, tipo de suelo y topografía. Entonces, cada HRU representa el balance del agua mediante 4 volúmenes de almacenamiento ya sea nieve, perfil de suelo 0 a 2m, acuífero superficial 2 a 20m y acuíferos profundos mayor a 20m, donde la simulación se hace en dos fases (Fernández, 2017).

- ❖ La fase terrestre del ciclo hidrológico de una cuenca hidrográfica se simula a nivel de HRU y se calcula el balance hídrico para cada subcuenca delimitada. En donde, las vías del movimiento en la fase terrestre están dadas como el almacenamiento dosel, la escorrentía superficial, evapotranspiración, infiltración, flujo lateral subsuperficial, flujo de retorno, percolación al acuífero profundo y pocos profundos.
- ❖ La fase de propagación de la escorrentía o enrutamiento, al cargar datos sobre agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas son determinadas y orientados a través

de corrientes y reservorios dentro del territorio (Cuceloglu, Abbaspour, & Ozturk, 2017). Es decir, caracteriza el movimiento del agua y sedimentos a través de la red de drenaje hasta el desate.

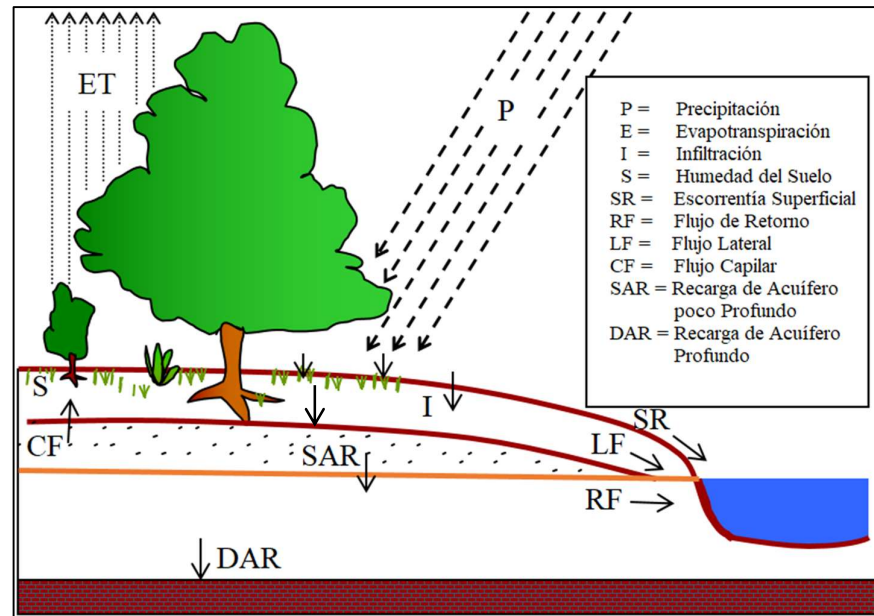


Figura 3. Esquema de elementos del ciclo hidrológico en SWAT.

Fuente: Cuceloglu (2017)

De manera que SWAT se clasifica como un modelo determinístico semidistribuido de análisis diario a tiempo continuo. El ciclo hidrológico es representado y simulado según la Ecuación 2.02, sobre contenido final de agua en el suelo y el rendimiento hídrico expresado en la Ecuación 2.03:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i + Q_i - ET_i + P_i - QR_i) \quad (2.02)$$

Donde:

- ❖ SW_t es el contenido de agua en el suelo en el día t .
- ❖ SW es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15-bar.
- ❖ t es el tiempo en días.
- ❖ R es la precipitación diaria.
- ❖ Q la cantidad de escorrentía diaria.

- ❖ ET la evapotranspiración diaria.
- ❖ P la percolación diaria.
- ❖ QR el flujo de retorno o flujo base.

$$WYLD_t = Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw} + TQ \quad (2.03)$$

Donde:

- ❖ WYLD es el rendimiento hídrico en mm de H₂O y esta dado por la contribución de: escorrentía superficial Q_{surf}, flujo lateral Q_{lat}, flujo de retorno desde los acuíferos ya sea superficial y profundo Q_{gw} y flujo desde sistemas de drenaje TQ.

La cuenca subdividida permite reflejar diferencias en la evapotranspiración para varios suelos. Las escorrentías son predichas individualmente para cada HRU orientadas para obtener las escorrentías totales para la cuenca; aumentando la certeza y dando paso a una mejor descripción física del equilibrio hídrico (Fernández, 2017).

Adiciona a ello, se considera el impacto sobre la contribución media hacia el canal de flujo de escorrentía superficial Q_{surf}, el flujo lateral Q_{lat} desde el perfil de suelo no saturado y el flujo de agua subterránea representada por Q_{gw}=Q_{gws} + Q_{gwd} da lugar a la contribución del flujo desde el acuífero superficial Q_{gws} y el acuífero profundo Q_{gwd}. Según muestra Fernández (2016) el índice de flujo base (IBF_{swat}) es estimada como (Ec. 2.04):

$$IBF_{swat} = \frac{Q_{lat} + Q_{gw}}{Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw}} \quad (2.04)$$

2.4.1. Clima

El clima de una cuenca proporciona las entradas de humedad y energía, las que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. En SWAT estas variables climáticas son necesarias dependiendo de métodos a usar pues entre ellos están la precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación diaria y las temperaturas no están disponibles, el generador climático puede. La radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa son generalmente simuladas debido a por lo general no mostrar registro suficiente. Entonces, un conjunto de variables



climáticas puede ser simuladas para toda la cuenca o alternativamente para cada subcuenca (Neitsch et al., 2009).

2.4.1.1. Precipitación

El modelo de precipitación SWAT desarrollado por Nicks (1974) es un modelo de cadena de primer orden, por lo tanto, las entradas al modelo deben incluir las probabilidades mensuales de recibir precipitación si el día anterior fue seco o húmedo. Partiendo desde la relación húmedo – seco, el modelo determina estocásticamente la ocurrencia de precipitación. De manera que cuando se presenta un evento de precipitación, la lámina es calculada a partir de la generación de una distribución de precipitación diaria. Por lo que la cantidad de precipitación diaria se reparte entre la lluvia y la nieve usando la temperatura diaria promedio (Uribe, 2010).

2.4.1.2. Temperatura del aire y radiación solar

La temperatura del aire máxima y mínima, así como la radiación solar se genera a partir de una distribución normal corregida por las probabilidades húmedo – seco. A partir de ello es usado un factor de corrección para brindar mayor desviación a la temperatura y radiación en caso el clima cambia y considerando también días lluviosos, razón por la cual la desviación es menor en días secos. En tal sentido, los factores de corrección se calculan para asegurar que las desviaciones estándar a lo largo de variables diarias se mantengan (Uribe, 2010).

2.4.1.3. Velocidad del viento y humedad relativa

La velocidad del viento diaria se simula usando una ecuación espacial considerando que la velocidad mensual media del viento es un factor de entrada. Asimismo, el modelo de humedad relativa simula promedios diarios a partir de promedios mensuales, esto utilizando una distribución triangular igual que con la temperatura y radiación, entonces la humedad relativa media diaria se ajusta para tomar en cuenta los efectos de días húmedos y secos (Uribe, 2010).

2.4.2. Hidrología

Cuando la precipitación desciende existen dos alternativas, que sea interceptada por el contenido dosel de la vegetación o bien caer a la superficie del suelo, este último



se infiltrará en el perfil de la tierra o fluirá sobre el terreno como escorrentía, que se moverá relativamente rápido hacia un canal de corriente contribuyendo a la corriente. Si el agua es infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua superficial o subterránea (Fernández, 2017).

2.4.3. Almacenamiento de dosel

El almacenamiento del dosel es el agua interceptada por superficies vegetativas o también llamado dosel, donde se mantiene disponible para la evaporación. En SWAT, cuando se usa el método de curva numérica CN para computar escorrentía de superficie, el almacenamiento de dosel es tomado en cuenta para superficie de escorrentía. Sin embargo, si los métodos como Green-Ampt se usan para modelar infiltración y escorrentías, el almacenamiento de dosel debe ser modelado separadamente. Una de las opciones de SWAT es que permite ingresar la cantidad máxima de agua que puede ser almacenada en el dosel según el índice máximo de área de hoja para cobertura de tierra, ambos valores son utilizados por el modelo para computar el máximo almacenamiento en el ciclo de desarrollo de la cobertura entre tierra y cosecha. Entonces, cuándo la evaporación es computada el agua primero se remueve del almacenamiento de dosel (Fernández, 2017).

2.4.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un término colectivo para todos procesos donde el agua se encuentre en fase líquida, sólida o al estar cerca de la superficie terrestre se convierte en vapor atmosférico. Considerando que la evapotranspiración incluye evaporación de ríos y lagos, suelo descubierto y superficies vegetativas, la transpiración dentro de las hojas y la sublimación de superficies entre hielo y nieve. El modelo SWAT es capaz de computar la evaporación de suelos y plantas separadamente, donde la evaporación en el suelo se estima utilizando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua y la transpiración de la planta es simulada como función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área de hoja (Uribe, 2010).

2.4.4.1. Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial es proporcional a lo que ocurriría en una gran área de cubierta uniforme y completamente con vegetación creciente y acceso a un

suministro ilimitado de agua. Entonces, esta proporción es asumida para evitar efectos micro climáticos de procesos como la advección calor de almacenamiento. (Fernández, 2017). El modelo SWAT ofrece tres modelos para estimar la evapotranspiración potencial, Hargreaves, Priestley Taylor y Penman Monteith, este último es el que requiere valores de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento que generalmente no se encuentran disponibles sin embargo pueden ser generados a partir de valores mensuales (Uribe, 2010) a partir de la siguiente Ecuación 2.05:

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + P_{air} * C_p * \frac{(e_0 - e_z)}{r_a}}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (2.05)$$

Donde λE representa la densidad latente del flujo de calor ($\text{MJ}/\text{M}^{-2}/\text{dia}$), E la evaporación de la tasa de profundidad (mm/d), Δ la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor temperatura, H_{net} es la radiación neta ($\text{MJ}/\text{M}^{-2}/\text{dia}$), G es la densidad de flujo de calor de suelo ($\text{MJ}/\text{M}^{-2}/\text{dia}$), P_{air} es la densidad aérea (kg/M^3), C_p como el calor específico en presión constante ($\text{MJ}/\text{kg}/\text{c}$), e_0 es la saturación de presión de vapor del aire en una altura Z (Kpa), e_z es la presión del vapor de agua del aire en una altura Z (Kpa), γ es la constante Psicométrica ($\text{Kpa}/^\circ\text{C}$), finalmente r_c la resistencia de dosel forestal (s/m) y r_a las resistencias de difusión de la capa aérea (s/m).

2.4.5. Escurrimiento superficial

Haciendo uso de cantidades diarias o sub diarias de lluvia, el modelo SWAT simula volúmenes de superficie de escorrentías y promedios máximos para cada Unidad de Respuesta Hidrológica. Este escurrimiento superficial es computado utilizando una de los dos métodos, la de curva número del USDA o el método de infiltración de Green & Ampt. Para el caso de curva número, esta no linealmente con el contenido de humedad del suelo, pues baja si la tierra se acerca el punto de marchitez y aumenta hasta cerca de 100 al a la saturación. (Fernández, 2017).

Por otro lado, el método de Green Ampt requiere los datos sub diarios de precipitación y calcula la infiltración como función del frente potencial húmedo anterior y conductividad hidráulica efectiva, de manera que el agua infiltrada se convierte en escorrentía de superficie, entonces SWAT incluye una provisión para estimar escorrentías

de suelo congelado donde un suelo se define como congelado si la temperatura en la primera capa es menos de 0°C (Urrutia, 2016).

El modelo mantiene un balance hídrico continuo, que complementado con la subdivisión que realiza de la cuenca en subcuencas y HRUs, es posible y cuantificar las diferencias que se presentan en la evapotranspiración para varios tipos de cultivos, tipos de suelo, etc. De este modo el escurrimiento es determinado separadamente para cada HRU y subcuenca para luego ser conducido y combinado con los calculados para otras subcuencas, obteniéndose el escurrimiento total. Esta metodología permite incrementar la exactitud del modelo proporcionándole al balance hídrico una mejor descripción física (Neitsch et al., 2009).

Los procesos de la superficie terrestre, incluida la interacción agua suelo, generación de escorrentía, evapotranspiración, flujo lateral y contribución de aguas subterráneas son cargados dentro de cada HRU junto con el balance del agua, donde la división entre la precipitación entre infiltración y escorrentía superficial se lleva a cabo usando el método de Curva Numero (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (Uribe, 2010) cuya ecuación de distribución es la siguiente (Ec. 2.06):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2.06)$$

Donde Q_{surf} es la acumulación de escorrentía o el exceso de lluvia (mm), R_{day} es la profundidad de lluvia por día (mm), I_a es la abstracción inicial que incluye almacenaje de la superficie, interceptación e infiltración antes de la escorrentía (mm) y S como parámetro de retención (mm), este varia espacialmente debido a los cambios en el suelo, uso de suelo, manejo e inclinación y temperatura debido a cambios en el contenido del agua del suelo. Se define de la siguiente manera (Ec. 2.07):

$$S = 25.4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (2.07)$$

Donde CN es el número de distribución para el día. Las abstracciones iniciales, I_a es comúnmente aproximado como $0.2S$. Este número de curva es una función de la permeabilidad del suelo, uso de la tierra y condiciones antecedentes de agua del suelo, según el SCS define tres condiciones de antecedente de humedad: I – seco (punto de

marchitez permanente), II – humedad promedio, y III – humedad (capacidad de campo) (Neitsch et al., 2009). Las curvas numéricas para condiciones húmedas I y III se calculan con las ecuaciones (Ecs. 2.08 y 2.09):

$$CN_1 = \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp(2.533 - 0.0636(100 - CN_2))} \quad (2.08)$$

$$CN_3 = CN_2 \exp(0.0673(100 - CN_2)) \quad (2.09)$$

Entonces los valores de CN_1 representan la curva número de la condición húmeda I, CN_2 es la curva número de la condición húmeda II, y CN_3 es la curva número de la condición húmeda III, tomar en cuenta que la condición húmeda II se obtienen a partir de tablas para diferentes cubiertas de la tierra y tipos de suelo.

SWAT varía el parámetro de retención en el perfil del suelo del contenido de agua. Una alternativa adicional en SWAT es variar el parámetro de retención de humedad con la evapotranspiración de las plantas. El cálculo del valor CN diario como función de la evapotranspiración de las plantas fue añadido debido a que el método de humedad pronostica demasiada escorrentía en suelos pocos profundos, pues al calcular CN diario como función de la evapotranspiración de las plantas el valor se vuelve menos dependiente en el almacenaje del suelo y más dependiente en el clima antecedente (Urrutia, 2016).

Para representar con mayor precisión las condiciones iniciales de humedad del suelo en las estimaciones de escorrentía SWAT ajusta el parámetro de retención en función al contenido de agua en el perfil de suelo del día anterior, de la siguiente manera (Ec. 2.10):

$$S = S_{m\acute{a}x} \cdot \left(1 - \frac{SW}{SW + \exp(w_1 - w_2 \cdot SW)} \right) \quad (2.10)$$

Donde, $S_{m\acute{a}x}$ es el parámetro de retención máxima (condición seca), SW es el perfil de suelo húmedo (mm); w_1 y w_2 son factores de forma basados en condiciones de CN_1 y CN_3 y propiedades de suelo. (Neitsch et al., 2009).

2.4.6. Infiltración

La cantidad de agua que ingresa al perfil de tierra es calculada como la diferencia entre la cantidad de lluvia y escorrentía de superficie. El modelo de infiltración Green & Ampt modela directamente la infiltración, pero requiere los datos de precipitación en incrementos más pequeños de tiempo (Fernández, 2016).

2.4.6.1. Flujo lateral subsuperficial

El flujo lateral sub superficial en el perfil de suelo, desde 0 a 2 m se calcula simultáneamente con la percolación. Se usa un modelo cinemático de almacenamiento para poder predecir el flujo lateral en cada capa de suelo (Uribe, 2010).

El modelo considera la variación en la conductividad, la pendiente y el contenido en el suelo, pues si existe un exceso de agua disponible en el suelo entonces el flujo lateral de un HRU es calculado como se muestra (Ec. 2.11):

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly.exccess} \cdot K_{sat.ly} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (2.11)$$

Donde K_{sat} es la conductividad hidráulica saturada (mm/h), slp es lo escarpado de una pendiente (mm), ϕ_d es la porosidad drenable de la capa de suelo (mm/mm) y L_{hill} es la longitud de la pendiente (m).

2.4.6.2. Flujo de agua subterráneo

La contribución de flujo subterráneo al flujo total se simula tomando como referencia un acuífero de almacenamiento poco profundo donde la percolación a partir de la parte baja de la zona de raíces es una recarga para este. Una constante de recesión derivada a partir de datos diarios de flujo es usada para retornar el flujo de acuífero a la corriente de agua. Además, otros componentes son capaces de incluir evaporación, bombeo, filtraciones hacia la profundidad del acuífero (Uribe, 2010).

Una vez que la escorrentía superficial es calculada a partir de la lluvia, la cantidad restante de agua permite infiltrar en las capas del suelo. El agua infiltrada luego se encamina a través de las capas de suelo de acuerdo a la metodología enrutamiento de almacenamiento. (Neitsch et al., 2009). El método de enrutamiento de almacenamiento

primero cumple con el requisito de capacidad de campo de la capa superior del suelo y calcula si existe exceso de agua en el suelo (Ec. 2.12).

$$SW_{ly.excess} = Q_{perc,ly-1} - FC_{ly} \quad (2.12)$$

$SW_{ly.excess}$ es el agua contenido en una capa de suelo por encima de la capacidad de campo (mm), $Q_{perc,ly}$ es la cantidad de agua que se infiltra en capas más bajas del suelo (mm) y FC_{ly} es la profundidad de agua la capa de suelo cuando está en capacidad de campo (mm).

2.4.6.3. Percolación

El componente de percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa de suelo en una zona de raíces, donde el flujo hacia abajo ocurre cuando se excede la capacidad de campo (CC) de una capa de suelo y en caso la capa inferior no está saturada. La tasa de flujo hacia abajo se encuentra gobernada por la conductividad de saturación en la capa del suelo. Por otro lado, el flujo hacia arriba puede ocurrir cuando una capa inferior excede la capacidad de campo, de manera que el movimiento de agua de una capa inferior hacia una capa superior adyacente se regula por el coeficiente de agua del suelo a capacidad de campo de las dos capas por lo que la percolación también es afectada por la temperatura del suelo (Urrutia, 2016).

Además, considerar que la percolación a la capa inferior es determinada una vez que se calculan la capacidad de campo y el flujo lateral desde una capa superior del suelo. La percolación hacia las capas más bajas es calculada de la siguiente manera (Ec. 2.13):

$$Q_{perc,ly} = SW_{ly.excess} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t \cdot K_{sat,y}}{SAT_{ly} - FC_{ly}} \right] \right) \quad (2.13)$$

Donde Δt es el paso del tiempo (h) y SAT_{ly} es la profundidad de agua en capas de suelo cuando se encuentra completamente saturado (mm). Percolación a una capa más baja está restringido cuando la capa más baja ya se encuentra saturado. Cabe señalar que la percolación de la capa más baja ingresa a la zona vadosa y se encuentra con el sistema de acuíferos.



2.4.6.4. Flujo de retorno

El flujo del retorno o también llamado flujo de base, es el volumen de agua subterránea originado en el manto freático, según SWAT el agua subterránea es dividido en dos sistemas de acuíferos, acuífero superficial y libre, estos contribuyen al flujo de regreso a las corrientes dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca (Arnold, Allen, & Bernhart, 1993). De forma que el agua infiltrada más allá del fondo de la zona de raíz se divide en dos fracciones, cada fracción se convierte en recarga para cada uno de los acuíferos. Además de retornar al flujo, el agua almacenada en el acuífero superficial puede abastecer de nuevo humedad en el perfil del suelo en condiciones muy secas o absorbido directamente por la planta. Considerar que una constante de recesión derivada a partir de datos diarios de flujo se usa para retardar el flujo del acuífero a la corriente de agua (Fernández, 2016).

2.4.7. Redistribución

El componente de redistribución hace referencia al movimiento continuo de agua por un perfil después de la entrada del agua, causada por diferencias en el contenido de agua en el perfil. Una vez que el contenido de agua a través del perfil entero es uniforme, la distribución cesara, además este componente dirige la técnica para predecir el flujo por cada capa de tierra en la zona principal. Considerar que el flujo hacia abajo, o la infiltración, ocurre cuando la capacidad de espacio de una capa de tierra es excedida y la capa debajo no está saturada. La tasa de flujo es gobernada por la conductividad saturada de la capa de tierra por lo que la redistribución es afectada por la temperatura del suelo, tomar en cuenta que si este es 0 °C o debajo, ninguna redistribución es permitida en esta etapa (Uribe, 2010).

2.4.8. Pérdidas por transmisión

Las pérdidas por transmisión son perdidas de flujo de superficie a través de la lixiviación por el cauce, que ocurre en corrientes efímeras o intermitentes donde la contribución de agua subterránea es en cierto tiempo del año o del todo en absoluto. Las pérdidas por transmisión reducen los volúmenes de escurrimiento a medida que el agua viaja corriente abajo (Neitsch et al., 2009). El modelo SWAT utiliza el modelo de Lane descrito en la Guía de la Hidrología del Servicio de Conservación de Suelo (USDA-SCS,

1983) para estimar las pérdidas por transmisión en función del ancho del canal, longitud y duración del flujo, tanto del volumen de escurrimiento y la tasa pico se ajusta cuando ocurren pérdidas de transmisión.

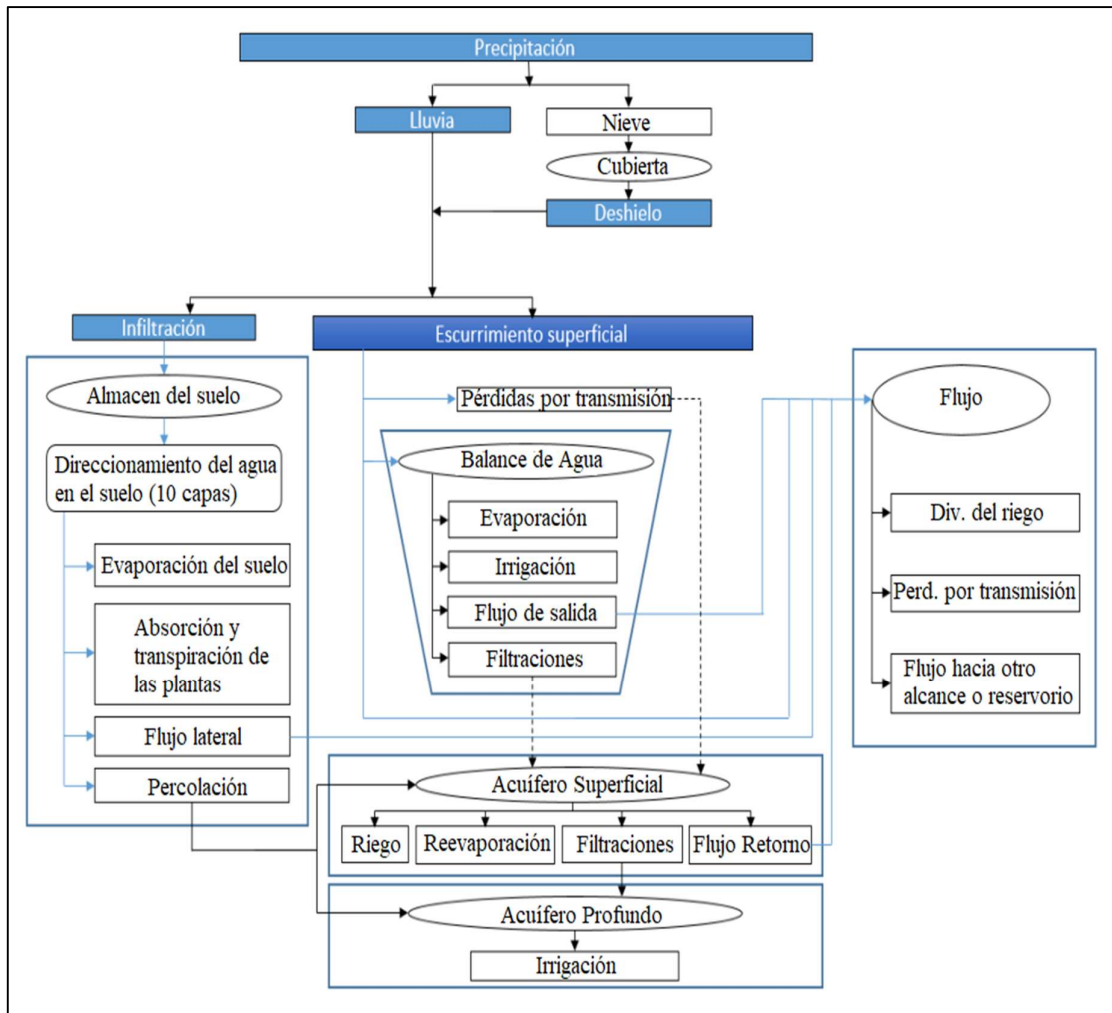


Figura 4. Simulación de movimiento del agua en SWAT

Fuente: (Neitsch et al., 2009)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se identifica como área de estudio la cuenca del río Huancané, comprendida desde sus nacientes hasta la estación hidrométrica puente Huancané, que se encuentra próxima a la desembocadura al lago Titicaca.

3.1.1. Ubicación política

La cuenca del río Huancané, comprende 14 distritos y 4 provincias del departamento de Puno, tal como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Ubicación política de la cuenca Huancané.

Cuenca	Departamento	Provincia	Distritos incluidos
Río Huancané	Puno	Huancané	Huancané, Moho, Huayrapata, Rosaspata, Vilque Chico,
		Putina	Cojata, Inchupalla, Huatasani,
		Moho	Pedro Vilca Apaza,
		Azangáro	Quilcapuncu, Putina, Muñani, Ananea y Potoni

3.1.2. Ubicación geográfica

La cuenca del río Huancané cuenta con una superficie aproximadamente de 3522 km², su cota máxima es de 5162 msnm y su mínima de 3812 msnm, correspondiente al cerro Surupuna y la desembocadura del río en el lago Titicaca, respectivamente. Se encuentra ubicado entre las paralelas 14.3° y 15.6° latitud sur y entre los meridianos 69.2° y 70.4° longitud oeste, como se muestra en la Figura 5.

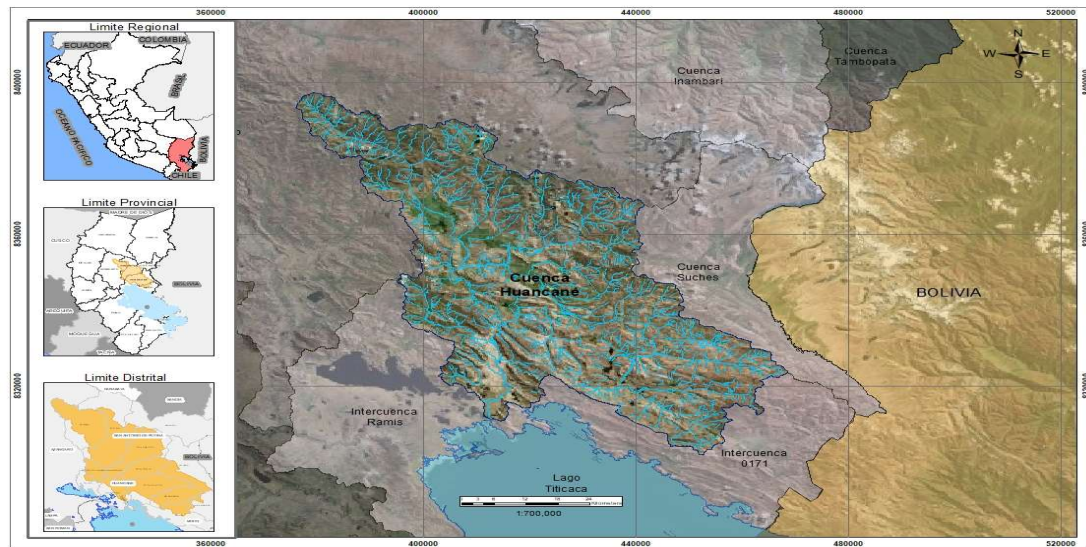


Figura 5. Mapa de ubicación cuenca del río Huancané.

La naciente del río principal es el denominado río Putina, el cual a lo largo de su recorrido confluye con el río Quellocarca – Tuyto, es desde este punto que toma el nombre de río Huancané hasta su desembocadura al lago Titicaca. La longitud de este río principal desde sus nacientes hasta su desembocadura es de aproximadamente 125 km, además antes de su llegada al lago se encuentra ubicado la estación hidrométrica puente Huancané del SENAMHI, donde se registra los caudales que aporta.

El acceso al área de estudio desde la ciudad de Puno es posible mediante la carretera asfaltada Puno – Juliaca – Huancané, con una distancia aproximada de 92 km. La cuenca del río Huancané limita con las siguientes cuencas hidrográficas, por el lado Este: cuencas del río Suches y río Huaycho, Oeste: cuenca del río Azángaro e intercuenca Ramis, Norte: cuenca río Azángaro y por el Sur: el lago Titicaca.

3.2. MATERIALES

3.2.1. Información GIS

Se realizó la clasificación y análisis de la información geográfica recopilada, para su adaptación y uso en el modelo. La Tabla 2 brinda detalles de la información geográfica tomada en consideración.



Tabla 2. Datos de información geográfica

Tipo de Datos	Resolución	Fuente	Sitio Web
DEM	90 m	CGIAR-CSI	http://srtm.csi.cgiar.org/
Cobertura Vegetal	30 m	GlobalLand30	http://www.globallandcover.com/GLC30Download/
Suelo	1:5 000 000	FAO-1995	http://www.waterbase.org/download_data.html

3.2.1.1. Modelo de elevación digital

El Modelo de Elevación Digital (DEM) como insumo base para la ejecución del presente trabajo de investigación es el producto SRTM v4.1 (Shuttle Radar Topography Mission versión 4.1) de 90 m de resolución, elegido por la buena información con la que cuenta y cuyo uso ha sido evaluado anteriormente para modelamiento hidrológico aplicando el modelo SWAT (Tan et al., 2015). Entonces, se determina que cuenta con mejor información de altura respaldados por hallazgos que sugieren evaluación previa y comprensión de escenarios DEM para una precisa aplicación al modelo hidrológico. El producto se encuentra disponible en el sitio web del CGIAR-CSI (Consortium for Spatial Information of the Consultive Group of International Agricultural Research) en formato TIFF, con coordenadas geográficas latitud/longitud y resolución espacial de 90 metros que hace referencia al geoide GCS_WGS_1984.

3.2.1.2. Cobertura vegetal

La clasificación de la cobertura vegetal es obtenida a partir de mapas de suelo digitalizados globales a una resolución espacial de 30 m, tomados y representativos para el año 2010 en el que se ha obtenido su producto Globeland30, cuyos datos fueron descargados libremente en formato ráster GeoTIFF a partir de mosaicos provistos de 5° x 6°. La descarga se realizó siguiendo el proceso que ofrece el sitio web según la Figura 6. Las categorías especificadas en el Mapa de Uso y cobertura de Suelo necesitan ser reclasificadas dentro de los tipos que el SWAT maneja con la base de datos de cubierta terrestre.

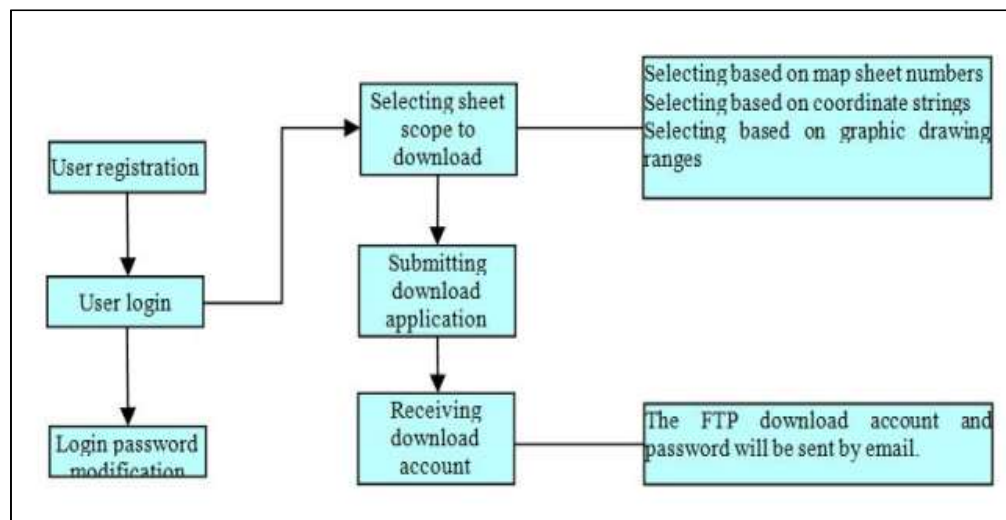


Figura 6. Pasos para la obtención del producto GlobalLand30

Fuente: (Globeland30, 2010)

3.2.1.3. Suelos

Debido a la escasa información de datos de suelos que incluyan propiedades hidráulicas del suelo, para nuestra región de estudio fueron utilizados datos globales del mapa de suelos mundial digitalizado correspondiente a la FAO-1995.

Las categorías especificadas en el mapa de suelos son vinculadas a la base de datos del suelo generado para categorías personalizadas con información obtenida del mapa digitalizado. Los datos de suelo en SWAT2012.mdb personalizado se compilan a partir de la escala 1:5000000 World Soil Map (versión 3.6) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

3.2.2. Información meteorológica

3.2.2.1. Precipitación

Los datos de precipitación fueron obtenidos del SENAMHI a través de registros históricos, de los cuales se seleccionaron 06 estaciones meteorológicas, distribuidas dentro y fuera de la cuenca del río Huancané cuyo manejo está condicionado por su estacionariedad. Dichas estaciones se encuentran referenciadas en la Tabla 3 que presenta su ubicación. Los datos corresponden a precipitación media diaria obtenidos para el periodo 1981 – 2016.

Tabla 3. Ubicación de estaciones meteorológicas

Estación	Ubicación Política			Coordenadas UTM (WGS-84)			Cuenca
	Dpto.	Provincia	Distrito	Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)	
Huaraya	Puno	Moho	Moho	448031	8298670	3890	Titicaca
Huancané	Puno	Huancané	Huancané	419061	8319247	3890	Huancané
Cojata	Puno	Huancané	Cojata	460905	8338831	4380	Suches
Putina	Puno	Putina	Putina	406670	8350936	3878	Huancané
Muñani	Puno	Azángaro	Muñani	397560	8367234	3948	Huancané
Ananea	Puno	Putina	Ananea	442478	8377171	4640	Azángaro

Fuente: SENAMHI.

Asimismo, se utilizaron la base de datos grillados denominado PISCO del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, teniendo en cuenta que se encuentren suficientemente distribuidas para poder representar el ámbito de estudio.

Estos datos grillados de precipitación media a escala temporal diaria corresponden específicamente al producto PISCOp v2.1, con datos desde 1981 a la actualidad, disponibles en el sitio web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú <http://www.senamhi.gob.pe/> en formato (.nc) y que mediante código de programación en R son descargados en formato (.csv) para su uso en el modelamiento.

El mecanismo de distribución fue asignar 11 estaciones sintéticas, según se detalla en la Tabla 4, que representen los territorios con baja densidad de estaciones en la cuenca de estudio y celdas separadas con longitudes de 16 km en ambas direcciones.

Tabla 4. Ubicación de estaciones sintéticas

N°	Estación	Coordenadas UTM (WGS-84)		Altitud (msnm)
		Este (m)	Norte (m)	
1	ES01	392064	8383763	4321
2	ES02	408264	8383763	4729
3	ES03	408064	8367763	4137
4	ES04	424064	8367763	4831

5	ES05	424064	8351763	3956
6	ES06	440064	8351763	4734
7	ES07	408064	8335763	3893
8	ES08	424064	8335763	3899
9	ES09	440064	8335763	4315
10	ES10	440064	8319763	3879
11	ES11	456064	8319763	4373

El mapa de distribución espacial de las estaciones observadas y estaciones sintéticas consideradas para el presente trabajo de investigación se muestra en la Figura 07, en consideración a las coordenadas señaladas en las tablas anteriores.

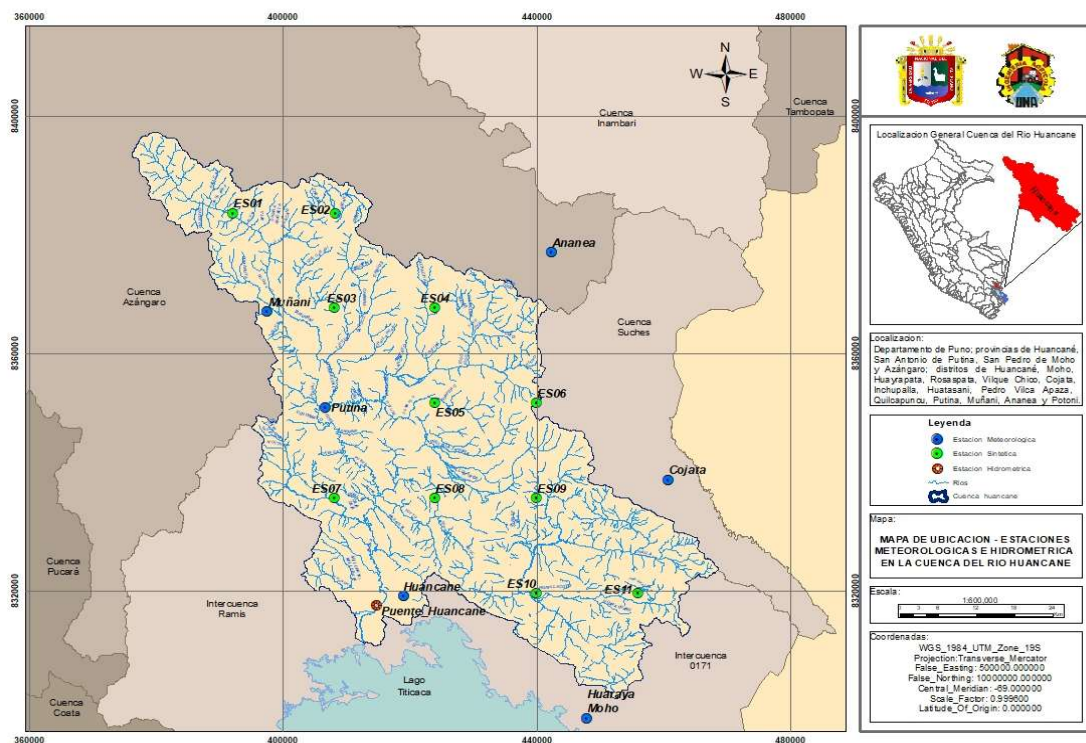


Figura 7. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométricas.

3.2.2.2. Temperatura

Se seleccionaron 03 estaciones que se encuentran dentro y más cercanas a la cuenca del río Huancané, de las que se pudo obtener registro de temperaturas máximas y mínimas diarias históricas para el periodo 1981 hasta el año 2016, y que corresponden a estaciones administradas por SENAMHI. La distribución promedio mensual máximo y

mínimo de cada una de las estaciones consideradas fueron representados gráficamente según como se muestra en la Figura 8 y Figura 9, respectivamente.

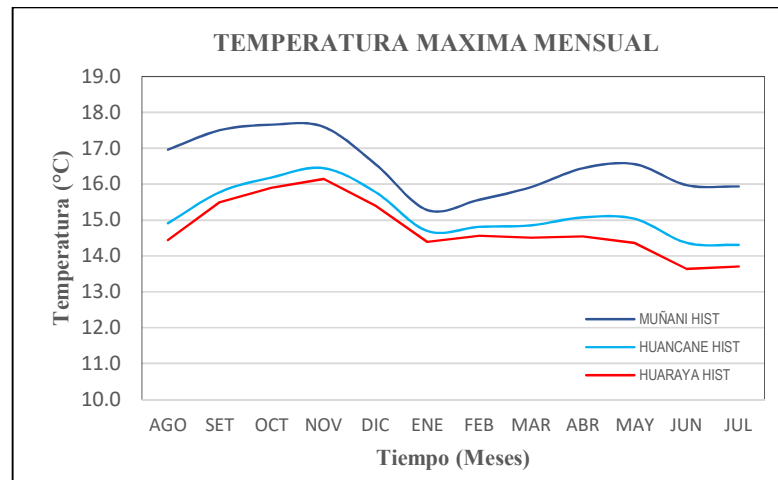


Figura 8. Temperatura máxima promedio mensual histórica.

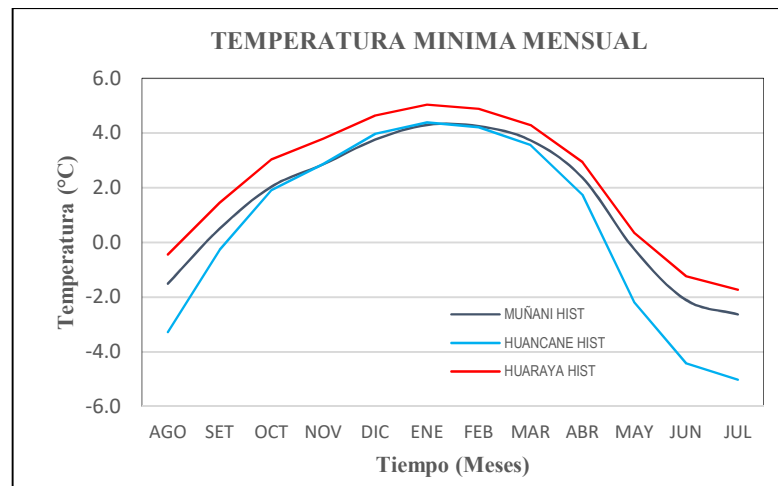


Figura 9. Temperatura mínima promedio mensual histórica.

3.2.2.3. Generador climático

El modelo SWAT además de la precipitación y temperatura, requiere datos de información climática como la humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento a escala diaria en caso se utilice el método de Hargreaves para cálculo de evapotranspiración; en este caso se usó el segundo producto climático CFSR (Climate Forecasting System Reanalysis) que cuenta con resolución espacial latitudinal y longitudinal de 0.25°, de acceso libre promovido por el sitio web de la Universidad de



Texas A&M, que automáticamente crea archivos de entrada con formato reconocibles para el modelo SWAT. Estos datos pueden ser descargados libremente del sitio web <https://globalweather.tamu.edu/>

Según Dile & Srinivasan (2014), indican que si bien no hay sustituto para los datos climáticos observados de alta calidad, puede ser mejor utilizar fuentes de datos globales como los CFSR cuando faltan datos, debido a que no es siempre fácil encontrar estaciones convencionales a una resolución espacial y temporal dada, especialmente para países en desarrollo. Además, que los datos existentes pueden ser poco confiables debido a las brechas y otros problemas. Los datos climáticos CFSR tienen cierta ventaja sobre los convencionales en el sentido que proporciona conjuntos completos de datos climáticos permitiendo flexibilidad para aplicar diferentes funciones pertenecientes a modelos hidrológicos.

La información requerida por SWAT que incluye valores de datos climáticos como la velocidad del viento, la humedad relativa y la radiación solar utilizada en el presente estudio se obtienen del portal de datos meteorológicos globales de SWAT (Fuka et al., 2014). Este conjunto de datos se basa en el pronóstico por hora de los productos de datos del Sistema de Pronósticos del Clima CFSR (Saha et al., 2010).

La sección Weather Simulation Data en ArcSWAT es utilizada para generar clima, calculando radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa; para cuando no existen mediciones o para llenar datos faltantes dentro de registros existentes.

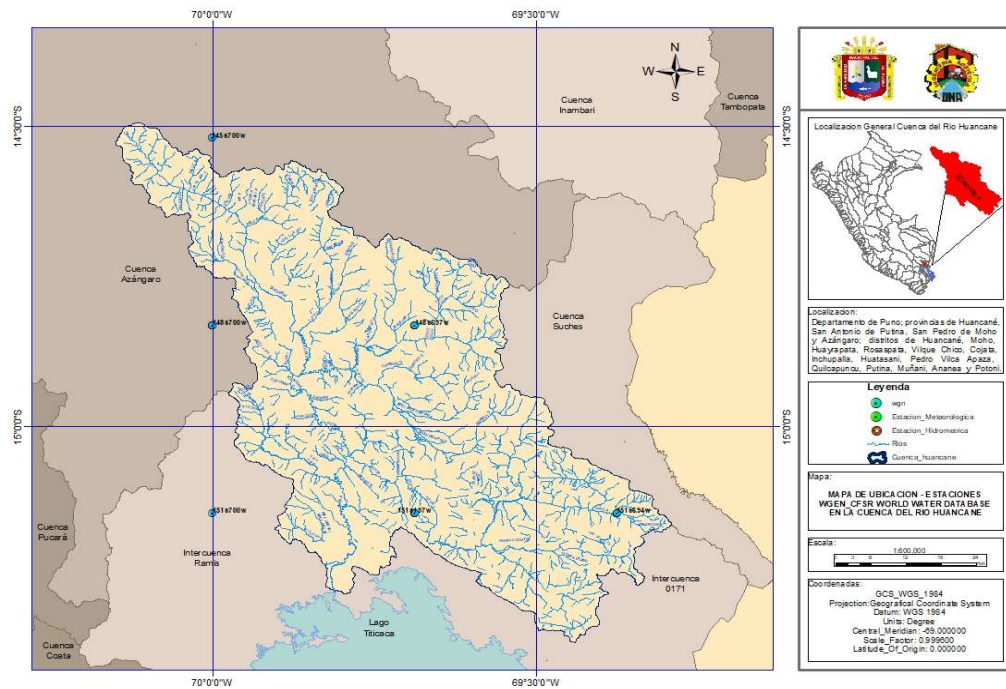


Figura 10. Mapa de ubicación de estaciones climáticas – WGEN CFSR

3.2.3. Información hidrométrica

La información hidrométrica a utilizar en el presente trabajo de investigación es de caudales medios diarios, conforme a ello, se dispone de la serie de registro histórico en la estación hidrométrica puente carretera Huancané para el periodo de 1981 – 2016, disponible en el sitio web de SENAMHI. La Tabla 5 brinda detalles de la ubicación del punto de estación hidrométrica de la cuenca, que es de gran utilidad porque cuenta con registro del aporte hídrico total.

Tabla 5. Ubicación de estación hidrométrica

Nombre	Id Estación	Cuenca	Coordenadas UTM (WGS-84)		
			Este	Norte	Altitud
Puente Carretera Huancané	210201	Huancané	414875	8317577	3860

Fuente: SENAMHI

La Figura 11 muestra el hidrograma de caudales medios diarios históricos que registra la estación hidrométrica puente carretera Huancané.

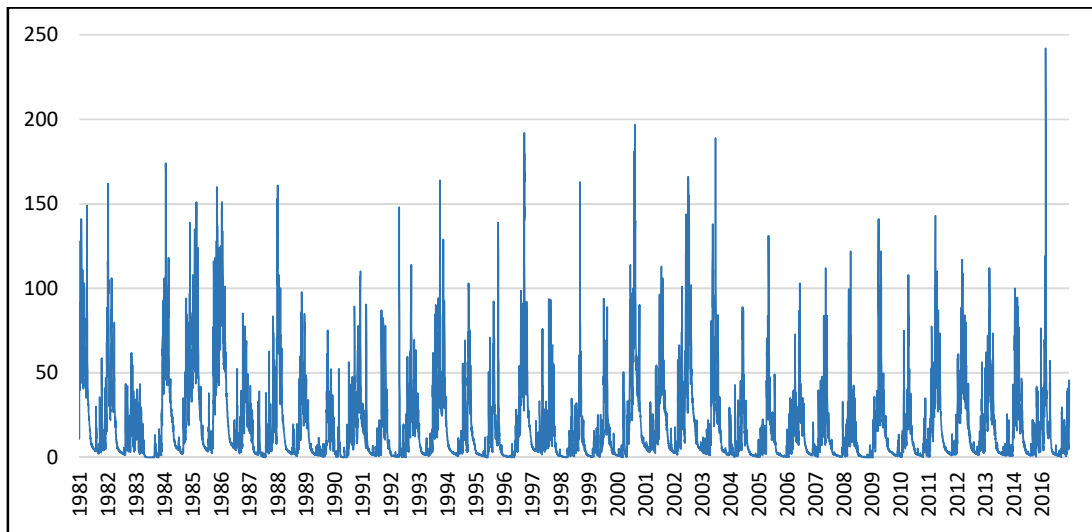


Figura 11. Hidrograma de caudales medios diarios.

3.2.4. Programas de computo

Los cálculos y el manejo de datos se realizaron mediante el uso de los siguientes softwares, ArcGIS desktop versión 10.2.2, la herramienta ArcSWAT versión 10.0.15, R programming, Hydraccess v4.4 y Microsoft Office 2016.

3.2.5. Equipos de computo

Dentro de los materiales utilizados en la ejecución de esta investigación se tiene lo siguiente, computadora portátil Intel Core i7 – 2.50 Ghz, impresora, disco duro externo de capacidad 1 TB, escáner, material y útiles de escritorio.

3.2.6. Software para modelamiento

ArcMap 10.2.2.

ArcMap es la aplicación principal de ArcGIS, utilizada para variadas tareas habituales en Sistemas de Información Geográfica, principalmente para ver, editar, crear y analizar datos geoespaciales a través de sus herramientas y diferentes extensiones disponibles, permitiendo explorar datos, simbolizar características y crear mapas.

ArcSWAT.

Herramientas con conjunto modelos de datos que opera desde ArcGIS, a través del cual se puede obtener características de la cuenca, realizar análisis espacial, editar territorios y cauces además de adecuar datos de entrada para el modelado hidrológico.

Concretamente esta herramienta permite importar datos de la cuenca, definir y analizar resultados.

3.3. METODOLOGÍA

En este acápite se presentan los aspectos metodológicos seguidos para la ejecución del presente trabajo de investigación, orientado a los siguientes procedimientos: (1) Modelamiento hidrológico conforme a la calibración y validación con series precipitación observada (2) planteamiento de escenarios de distribución con series de precipitación grillada (3) análisis comparativo de escenarios en la distribución estacional y espacial de los componentes de balance hídrico, tal como se muestra en la Figura 12.

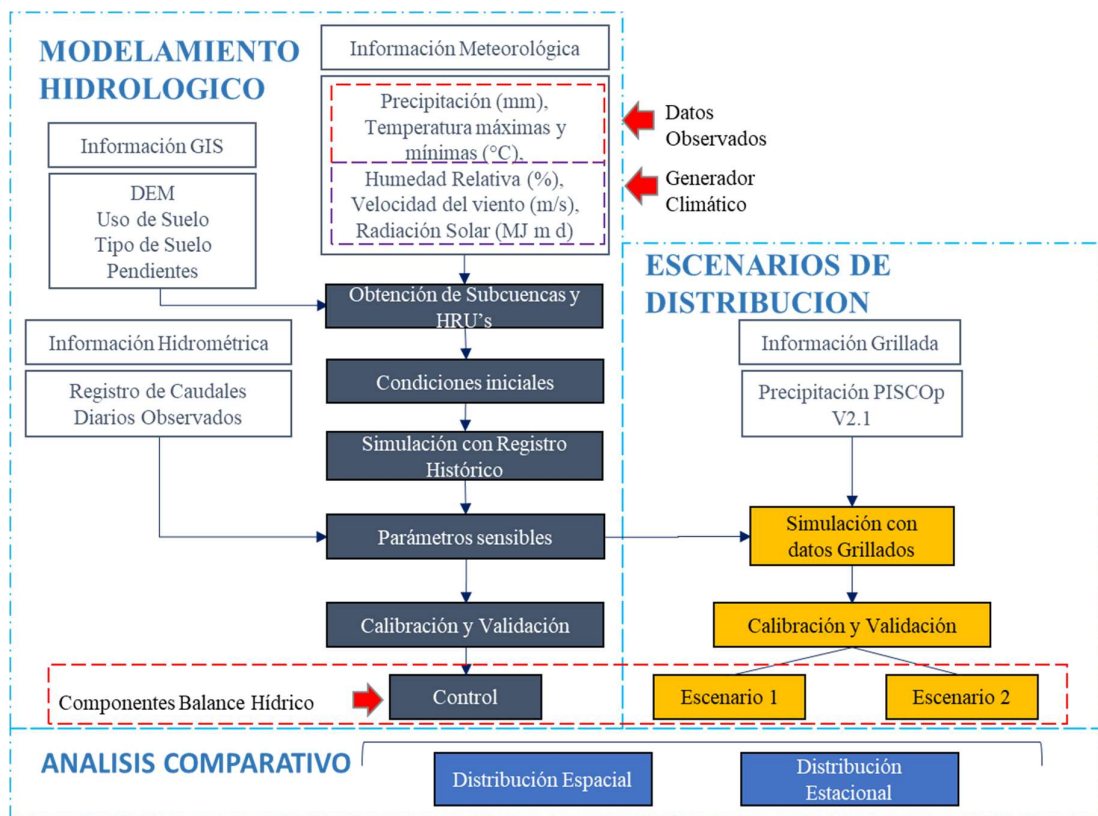


Figura 12. Flujograma de metodología de investigación.

3.3.1. Modelamiento hidrológico

Para analizar la respuesta hidrológica en la cuenca del río Huancané utilizando el modelo hidrológico SWAT es necesario un análisis preliminar de la información



recopilada fijando condiciones de simulación inicial que con la identificación de parámetros sensibles se logre la calibración y validación del modelo.

3.3.1.1. Sistematización de información recopilada.

a) Análisis exploratorio de datos (AED)

En principio, la homogeneidad e inconsistencia en series hidrológicas representa uno de los aspectos más importantes del estudio en la hidrología, particularmente orientado a la conservación, desarrollo y control de los recursos hídricos, debido a que cuando no se identifica, elimina ni ajusta un error significativo puede introducirse resultados altamente sesgados (Mejía, 2012).

El AED consiste en el análisis de datos empleando una variedad de técnicas para incrementar entendimiento sobre ellos y visualizar las relaciones existentes entre las mismas (Asurza, 2017). En la presente investigación se ha realizado un trabajo previo de análisis de la información con la finalidad de conocer el comportamiento estadístico de los datos principalmente de precipitación. Este análisis consistió en la detección de quiebres y anomalías en las series diarias. Por lo tanto, se procedió con el análisis gráfico y estadístico de los datos:

- Análisis de Series diarias: un primer análisis es el visual reflejada en la distribución temporal de toda la precipitación, identificando los periodos donde la información es dudosa reflejada en tendencias, picos muy altos o valores muy bajos. De darse el caso, se debe comprobar si hubo fenómenos naturales que efectivamente han ocurrido o corresponden a errores sistemáticos.
- Análisis de doble masa, es la relación de precipitación acumulada a escala mensual de cierta estación con el correspondiente valor medio de precipitación acumulada del grupo de estaciones vecinas o cercanas. Indicadores como la alteración en pendiente recta, reflejara si ocurrió cambios en la constante de proporcionalidad, interpretándose en analizar la estadística de dicha estación si es o no significativa (Mejía, 2012).
- Test de homogeneidad de la media (T- Student) y desviación estándar (F- Fisher), la pérdida de homogeneidad de la serie es probable cuando exista un abrupto cambio en la media. Pruebas paramétricas como T de Student es especialmente



útil, además pruebas estadísticas F de Fisher sirven para detectar cambios en la desviación estándar, estas pruebas son consideradas poderosa para detectar la inconsistencia, excepto cuando al comparar la longitud de dos períodos seleccionados sus medias no sean iguales, pues entonces la distribución de los datos puede no ser sesgada.

- Método de vector regional, a fin de hacer una última crítica de información histórica y correcta aplicación de datos diarios se aplica el método vector regional (MVR), que es un método de cálculo orientado a las tres anteriormente definidas. Procesos como la crítica de datos, homogenización, extensión y completación de datos son los que aborda este método. La hipótesis se basa en asumir zona climática sometida a un mismo régimen de precipitaciones, considerando que valores totales de precipitación anual son pseudo proporcionales con pequeña variación aleatoria de cada año debido a la distribución de las lluvias en el territorio (Canales, 2015).

b) **Delimitación de cuenca hidrográfica**

A fin de llevar a cabo la delimitación de la cuenca hidrográfica del río Huancané es necesario utilizar el modelo de elevación digital, iniciando el proceso con la descarga de los productos DEM disponibles en el sitio web del CGIAR-CSI (Consortium for Spatial Information of the Consultive Group of International Agricultural Research) en formato TIFF. Las imágenes satelitales de la Misión de la topografía del radar espacial SRTM v4.1 de resolución espacial de 90 m, resolución radiométrica de 16 Bits (dígitos binarios) y alcance máximo de 65535 números digitales, se unen según los cuadrantes SRTM_22_15, SRTM_22_16, SRTM_23_15 y SRTM_23_16, mediante la herramienta Mosaic to New Raster del ArcGIS. A partir del cual se procedió a proyectar el ráster a sistemas de coordenadas WGS 1984 UTM zona 19 Sur mediante el algoritmo de re muestreo cúbico debido a que es el más apropiado para datos continuos. Seguidamente se procedió a generar un buffer a partir de un shape conocido de la cuenca del río Huancané y a través de ello recortar el DEM resultante con el objetivo que evitar procesar áreas fuera de la zona de estudio.

Basado en el DEM obtenido se procede a delimitar la cuenca del río Huancané con la herramienta de delimitación automática de cuencas integrado al ArcSWAT a



través de la opción de Flow direction and accumulation como una etapa de pre procesamiento, rellenando sumideros y calculando grillas de flujo de dirección y flujo de acumulación, bajo el siguiente enfoque:

Relleno (Fill), este paso llenara los sumideros de nuestro DEM, es decir, aumentara nivel de las cotas rodeadas completamente de celdas con mayor cota, asignando a dicha celda la menor cota de la circundante, de modo que el flujo podrá fluir de una celda a otra sin la posibilidad de estancarse.

Dirección de flujo (Flow direction), este paso define la dirección de la mayor pendiente de cada celda evaluando celda por celda las cotas circundantes entre cada una de ellas.

Acumulación de flujo (Flow accumulation), este paso calcula para cada celda en su matriz DEM llena, la cantidad que fluyen hacia ella, entonces se determina el número de celdas que drenan a cada celda. Las áreas de valores más altos son donde el agua se acumula y drena correspondientemente.

Definición de la corriente (Stream network), este paso clasifica todas las celdas con flujo procedente de un número de celdas mayor al límite definido por el usuario como pertenecientes a la red de drenaje. Para nuestro caso este límite se especifica como un área de drenaje de 5000 ha, con el fin de obtener sub cuencas de análisis adecuadas.

Delimitación de la cuenca (Delineate watershed), Este paso define la delimitación de la cuenca en base a los segmentos de las redes de drenaje creadas.

Al seguir los procesos de delimitación de la cuenca hidrográfica se obtuvieron 41 subcuencas, distribuidas por toda la cuenca del río Huancané que se visualiza espacialmente en la Figura 13.

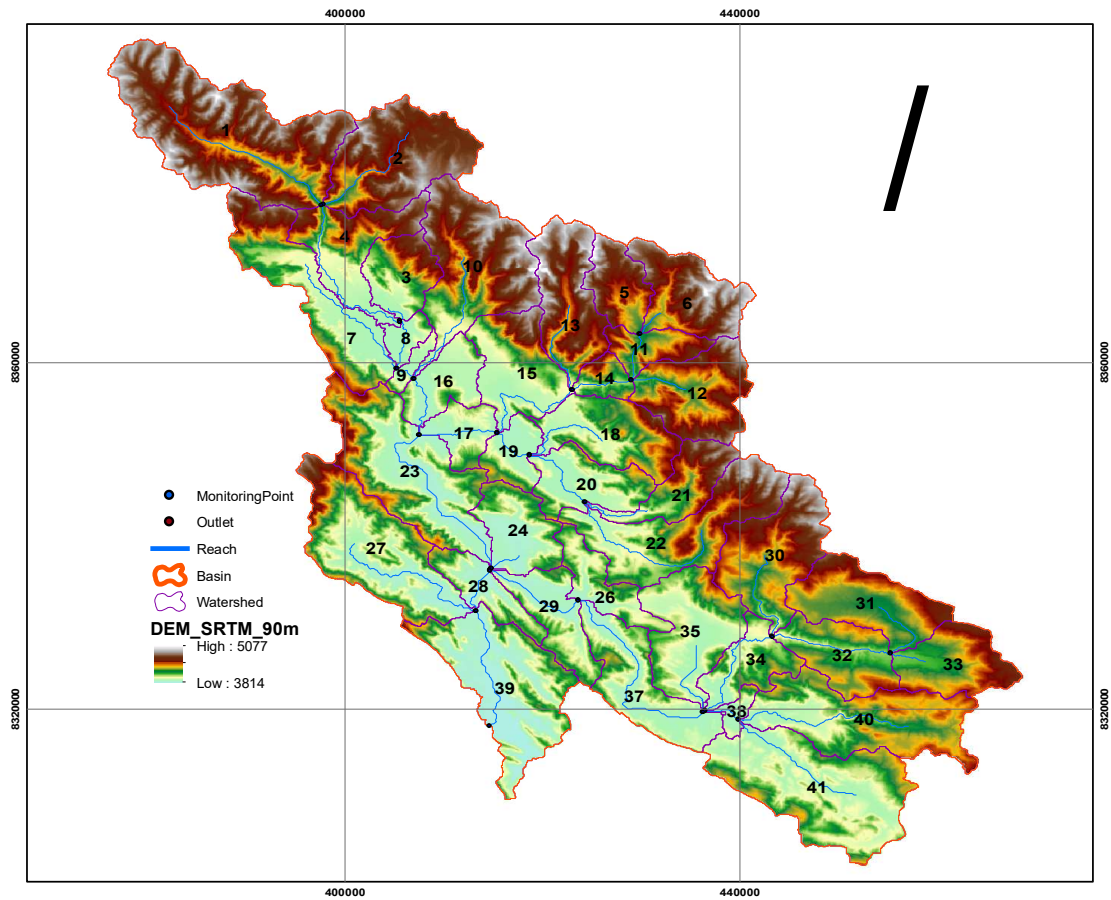


Figura 13. Delimitación hidrográfica cuenca del río Huanacané - SRTM 90m.

e) Clasificación de uso del suelo

La información del mapa de uso de suelo se ve representado en la Tabla 06, donde se muestra las coberturas que predominan en el ámbito de estudio y su distribución respectiva. Se relaciona las clases encontradas conforme a la clasificación de las imágenes de la base de datos GlobalLandCover30 con la base de datos SWAT, esta información es importante ya que influye notoriamente en la evapotranspiración, interceptación y erosión superficial. A cada tipo de uso de suelo se le asignó el código de identificación con la finalidad de poder ser reconocidos e ingresados a la base de datos SWAT y posteriormente ser procesadas. En la Figura 14 se muestra la distribución espacial de uso de suelo en la cuenca del río Huanacané.

Tabla 6. Clasificación de uso del suelo

CODIGO	COBERTURA	COUNT	AREA (%)
AGR	Agricultura Land Generic	13363	3.142
FRST	Forest Mixed	53608	12.606
PAST	Pasture	349734	82.238
WATR	Water	1726	0.406
URML	Residential -med/low Density	292	0.069
BARR	Barren	6545	1.539
TOTAL			100

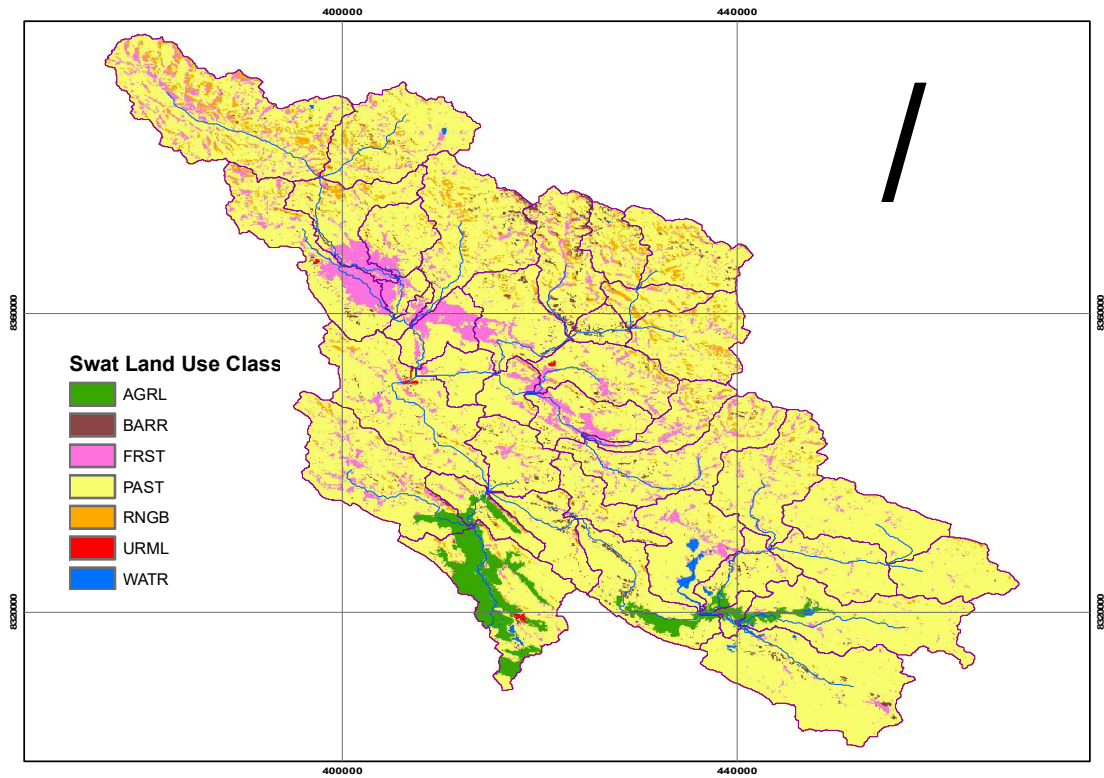


Figura 14. Clasificación de uso de suelo – GlobalLandCover30.

d) Clasificación de suelos

La información de suelos, obtenida a escala 1:5000000 World Soil Map (versión 3.6) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la

Agricultura (FAO), es utilizada dentro del ArcSWAT para realizar las combinaciones únicas de los HRU, y también para análisis de la mayoría de cálculos hidrológicos que dependen de parámetros asociados con el tipo de suelo.

Tabla 7. Clasificación del tipo de suelo

CODIGO	GRUPO	SOIL TYPE	COUNT	AREA (%)
I-Bh-c-5519	C	LOAM	253100	59.345
Th8-a-5672	B	LOAM	173170	40.604
WATER-6997	D	WATER	216	0.051
TOTAL				100

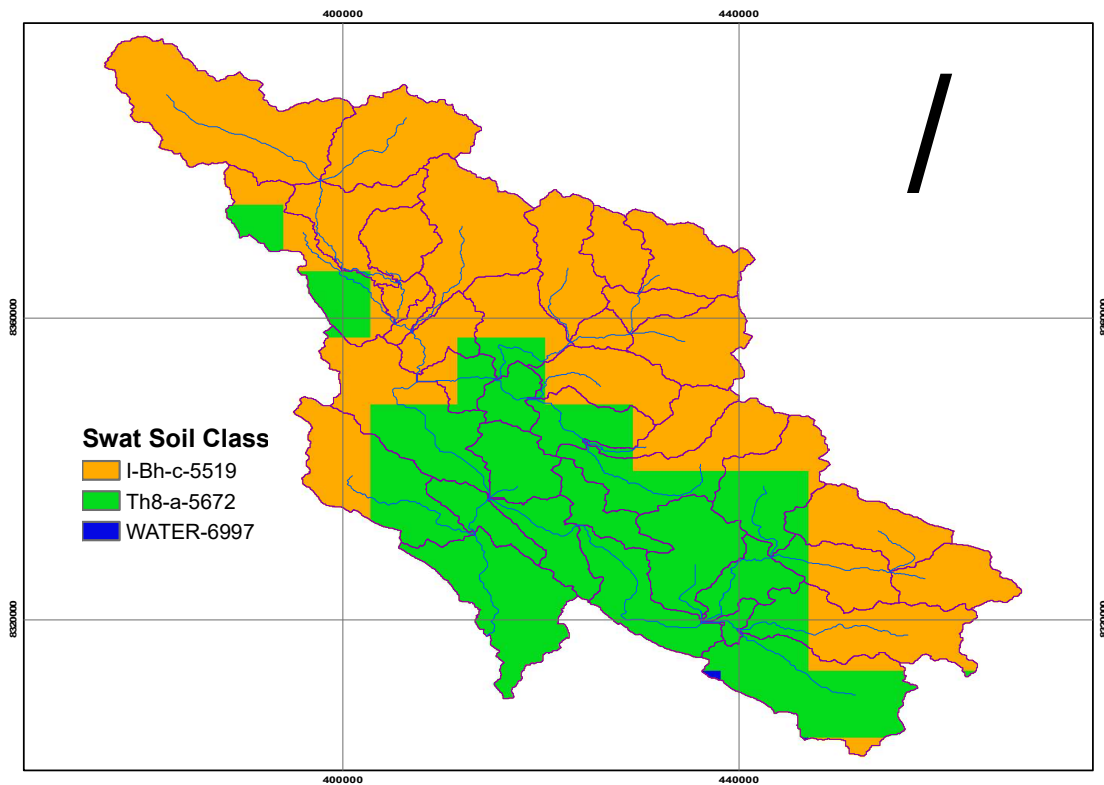


Figura 15. Clasificación de tipo de suelo – Wold Soil Map 3.6

Se utilizó el archivo personalizado SWAT2012.mdb, donde se crea una base de datos de suelo para todo el mundo, importando la base de datos MWSWAT(mwsat2012.mdb), archivo que fue reemplazado al que por defecto crea ArcSWAT. Gungor (2014) refiere que la base de datos para suelos del SWAT está adaptada a distintos tipos que se pueden encontrar dentro y fuera de los Estados



Unidos; de tal manera que al introducir los códigos de suelos que representa el tipo de suelo, estos se relacionen en función a las características fisicoquímicas que posee en cada una de las capas. La información de suelos se ve representado en la Tabla 07 y Figura 15, donde se muestra la distribución espacial a través del ráster de 9000 x 9000 m.

e) Clasificación de pendientes

Gobierno Regional Puno (2014), refiere que la clasificación de pendientes constituye un elemento fundamental del factor topográfico, referido al grado de inclinación que presenta la superficie del suelo con respecto a la horizontal. Esta expresada en porcentaje, es decir la diferencia de altura existente en 100 m horizontales.

La clasificación de pendientes fue obtenida a partir del Modelo de Elevación Digital SRTM v4.1 de resolución espacial de 90 m. El modelo te permite clasificar las pendientes, de acuerdo a la finalidad del estudio. Para ello se optó por sub agrupar en 5 clases, tomando en consideración los rangos recomendados por el Reglamento de Clasificación de Tierras Decreto Supremo 017-2009-AG y según lo considerado en el Estudio de Suelos y Capacidad de Uso Mayor en el departamento de Puno, que se detallan en la Tabla 08 y Figura 16.

Tabla 8. Clasificación porcentual de pendientes

PENDIENTE	DESCRIPCION	COUNT
<10%	Plano a Ligeramente Inclinada	129293
10-20%	Moderadamente Inclinada	132173
20-30%	Fuertemente Inclinada	97357
30-50%	Ligera a Moderadamente Escarpada	61167
>50%	Fuertemente Escarpado	6496

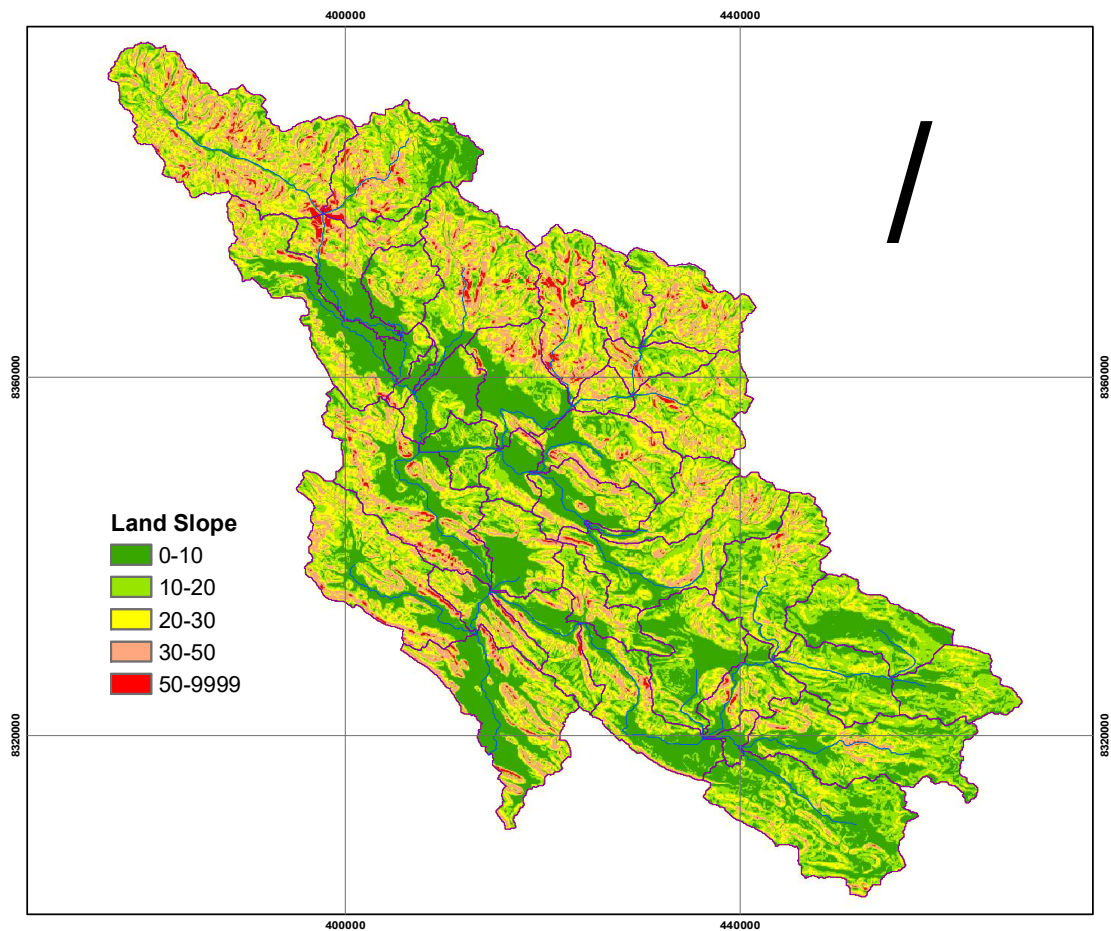


Figura 16. Clasificación porcentual de pendientes

f) Definición de unidades de respuesta hidrológica

La definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica se trabajó en el módulo HRU Analysis mediante el cual se combina información de uso de suelo, tipo de suelo y pendientes previamente incorporados en el Edit SWAT Input. Como resultado se generan 981 HRUs, cuyos porcentajes de uso de suelo sobre sub cuencas, clase de suelo sobre área de uso de suelo y clase de pendiente sobre clase de suelo son definidos como 0, 0, 0, respectivamente, a fin de evitar mayores prioridades. El programa no solo genera un reporte de información, sino que a su vez permite visualizar espacialmente la distribución de las HRUs en la cuenca del río Huancané, tal como se muestra en la Figura 17.

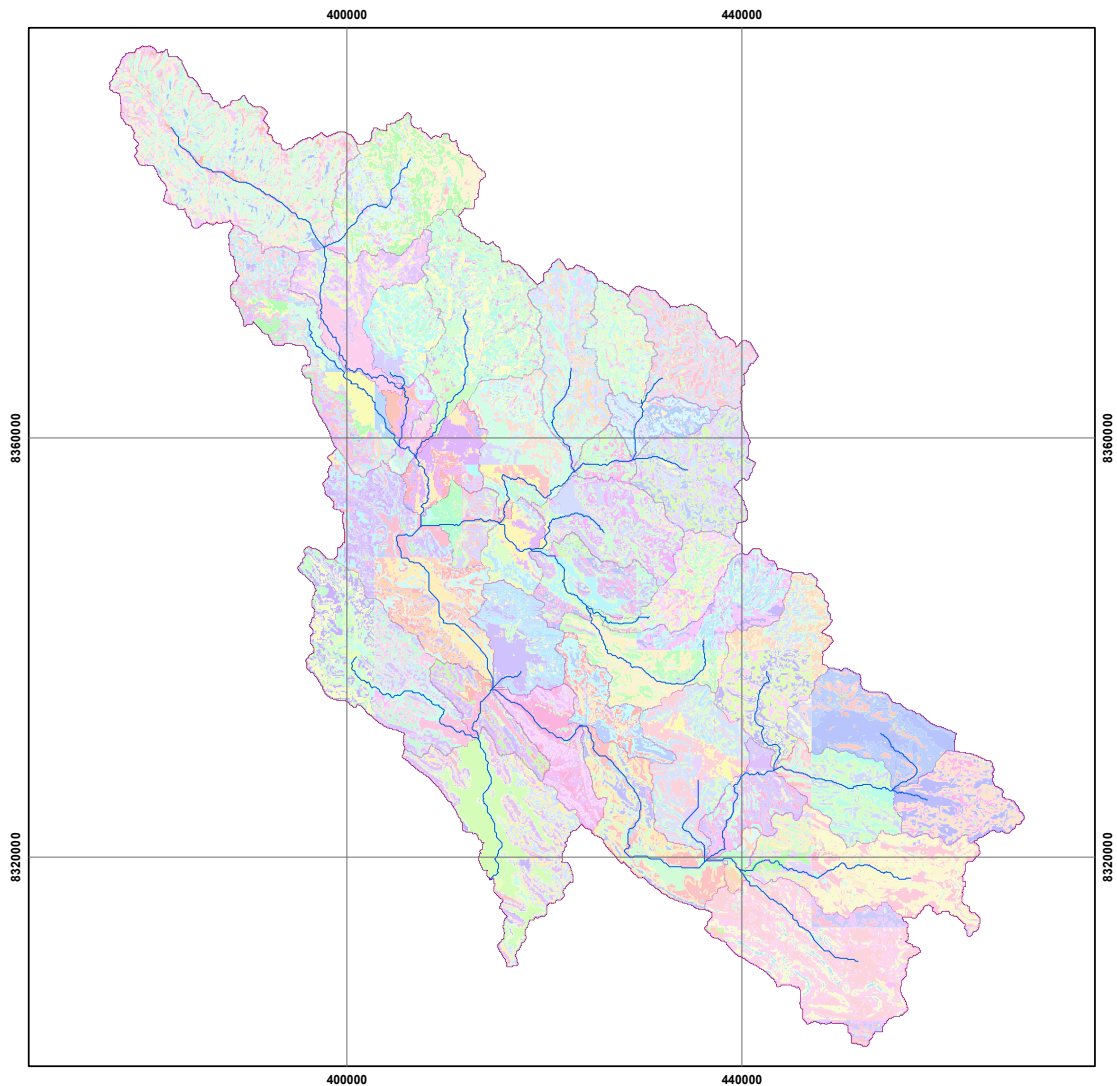


Figura 17. Clasificación de unidades de respuesta hidrológica

3.3.1.2. Condiciones de simulación inicial

La simulación hidrológica se trabajó en la herramienta ArcSWAT como una extensión del ArcGIS, siguiendo los pasos establecidos en los diferentes menús disponibles de la barra de herramientas del modelo. En función de los datos disponibles y de discretización de la cuenca se eligió la siguiente configuración:

El periodo de simulación comprende desde la fecha 01/01/1981 hasta 31/12/2016, cuya frecuencia de resultados de salida se estableció a nivel diario, para así evaluar de forma preliminar el ajuste del modelo con el caudal observado. Asimismo, se considera un periodo de calentamiento (NYSKIP) de 3 años según lo recomendado por Abbaspour

(2015), que hace referencia al equilibrio de parámetros al inicio de la simulación. Entonces, la carpeta de salida de SWAT resulta con datos desde 01/01/1984 hasta 31/12/2016. Las salidas de todos estos parámetros generados por el modelo hidrológico SWAT se reproducen en distintos archivos, en donde la información de caudal se encuentra ubicado en el archivo swatout.dat. Asimismo, los resultados de la simulación fueron exportados con formato Microsoft Data Base (.mdb), que permite extraer la información por sub cuenca de interés y de acuerdo a estudio corresponde a la delimitación automática de la subcuenca 39, donde se encuentra instalado la estación hidrométrica en la cuenca del río Huancané.

3.3.1.3. Análisis de calibración y validación

El modelo hidrológico SWAT contiene numerosos parámetros de calibración que describen procesos debido a que interactúan la hidrología, calidad del agua y el sistema suelo planta, resultando complejo afrontar la tarea de parámetros considerados para obtener que la respuesta del modelo se asemeje a los datos observados, representando así las condiciones reales de la cuenca. Este análisis es útil para identificar y clasificar los parámetros que tienen un impacto significativo en los datos de interés específico simulados por el modelo, a fin de limitar la cantidad de parámetros óptimos para el modelo, y asimismo conseguir que el proceso de calibración sea menos complejo y extenso. La Tabla 9 muestra el conjunto de 22 parámetros que utiliza SWAT para las simulaciones hidrológicas.

Tabla 9. Parámetros pertinentes para la simulación hidrológica

PARAMETROS	CODIGO	EXTENSION
Factor alfa de flujo base [días]	ALPHA_BF	*.gw
Valor “n” de Manning para canal principal [-]	CH_N2	*.rte
Valor SCS CN II inicial [-]	CN2	*.mgt
Conductividad hidráulica saturada [mm/hr]	SOL_K	*.sol
Capacidad de agua disponible [mm H ₂ O/mm suelo]	SOL_AWC	*.rte
Conductividad hidráulica efectiva en el canal de aluvión [mm/hr]	CH_K2	*.rte
Factor de compensación de evaporación de suelo [-]	ESCO	*.hru
Tiempo de retraso en escorrentía superficial [días]	SURLAG	*.bsn
Temperatura de nevada [°C]	SFTMP	*.bsn
Temperatura base del deshielo [°C]	SMTMP	*.bsn
Factor de fusión mínimo para nieve [°C]	SMFMN	*.bsn
Factor de retraso temperatura de capa de nieve [-]	TIMP	*.bsn
Factor de fusión máximo para nieve [°C]	SMFMX	*.bsn



Valor “n” de Manning para flujo terrestre [-]	OV_N	*.hru
Factor de percolación en acuífero profundo [-]	RCHRG_DP	*.gw
Umbral de profundidad acuífero poco profundo para flujo [mm]	GWQMN	*.gw
Coefficiente de “renovación” del agua subterránea [-]	GW_REVAP	*.gw
Tiempo de retraso del agua subterránea [días]	GW_DELAY	*.gw
Albedo de suelo húmedo	SOL_ALB	*.sol
Umbral de profundidad acuífero poco profundo “renovación” [mm]	REVAVMN	*.gw
Factor de compensación de absorción de la planta [-]	EPCO	*.bsn
Almacenamiento máximo del dosel [mm H ₂ O]	CANMX	*.hru

Fuente: Aybar (2016)

El número de curva CN, es una función de la permeabilidad del suelo que proviene de la curva SCS de lluvia para la condición de humedad II basado en el uso de suelo y condiciones antecedentes. Estos valores pueden ser hallados en tablas para tipos de suelo y capas superficiales del suelo en pendientes a partir del 5%. También dependen de los usos como agrícolas, suelos rurales, así como áreas urbanas. La disminución (incremento) de los valores de CN2 (Curva Numero) orienta a la reducción (incremento) del Q_{surf} e incremento (reducción) mayor del Q_{gw} que Q_{lat} , generando reducción (incremento) de CN2 que pueda incrementar (reducir) considerablemente el IBF (índice de flujo base), haciendo importante estimar el nivel de reducción o incremento para los valores de CN2 para así cuantificar correctamente el IBF.

El parámetro SURLAG, llamado coeficiente de retraso de agua de lluvia en la superficie, cuyo valor por defecto es 2.0, controla la fracción de agua de lluvia que ingresa eventualmente a la cuenca. En las cuencas grandes existen tiempos de concentración mayor a 1 día, solo una parte del agua producto de la precipitación alcanzara el caudal principal en el mismo día de precipitación. El coeficiente está presente en la Ecuación 3.01 para calcular el caudal de lluvia que alcanzara la cuenca.

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) * \left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}}\right]\right) \quad (3.01)$$

En base a la ecuación, SURLAG tiene influencia sobre la respuesta de Q_{surf} sin afectar la cuantificación de la contribución de Q_{surf} , donde el retraso de Q_{surf} suaviza el hidrograma, sin embargo, valores muy bajos de SURLAG conlleva a la subestimación de eventos de altas descargas.

El factor ALPHA_BF_D, llamado constante de recesión de flujo base del acuífero profundo, cuyo valor por defecto es 0.01), es un valor directo de la respuesta del caudal subterráneo a la recarga. Para su determinación se analiza periodos de no recarga en la cuenca, donde gobierna la respuesta desde el acuífero profundo al canal y la cuantificación de Q_{gwd} está regulada por el parámetro RCHRG_DP (fracción de recarga hacia el acuífero profundo, 0.05 por defecto), es decir, el total del agua que recarga el acuífero 5% (95%) recarga el acuífero profundo (acuífero superficial). Entonces para mejorar la contribución de Q_{gwd} y descargas simuladas en el periodo de estiaje, se recomienda incrementar el valor de RCHRG_DP entre 0.3 a 0.5. La expresión que define el ALPHA_BF_D es basado en (Ec. 3.02):

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{N} * \ln \left[\frac{Q_{gw,N}}{Q_{gw,0}} \right] = \frac{1}{BFD} * \ln[10] = \frac{2.3}{BFD} \quad (3.02)$$

Donde α_{gw} es la constante de recesión del caudal base y BFD el número de días de caudal base en la cuenca.

Por otro lado, el parámetro vinculado con la evapotranspiración del sistema, ESCO llamado factor de compensación de la evaporación del suelo tiene por finalidad de facilitar al usuario ajustases de la distribución de la profundidad para la demanda evaporativa del suelo por capilaridad, agrietamiento y formación de costras, dicha distribución varia con los valores de ESCO.

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} * ESCO \quad (3.03)$$

Donde E_{soil} es la demanda evaporativa para una capa en específico (ly), para la capa inferior (zl) y la capa superior (zu).

Cuando el valor calibrado de ESCO disminuye de 1 (valor por defecto) a valores más bajos significa que el suelo superior es capaz de extraer más demanda evaporativa, y según (Jimeno, Senent, Pérez, & Pulido, 2018), cuando los valores de ESCO decrecen, la habilidad del modelo para extraer la demanda evaporativa de las capas de suelo más abajo incrementa (Montecelos, 2018),.



a) Calibración del modelo

La fase de calibración consiste en la estimación de los parámetros del modelo, al comparar las predicciones, para un conjunto determinado de condiciones, con los datos observados. En esta sección se debe lograr un ajuste aceptable entre las observaciones y simulaciones de la variable de salida de interés (caudales) al variar reiterativamente los parámetros del modelo. Con esta finalidad a través de un código en R sobre calibración y validación se utiliza el periodo de fecha 01/01/1984 a 31/12/1999 para calibración; es decir, dieciséis años que sirvieron para comparar los resultados obtenidos en la simulación con los valores observados de SENAMHI.

La calibración se realiza luego de la simulación por defecto con el objetivo de mejorar la relación entre los valores tomados en campo y los simulados. Para conseguir calibrar el modelo se modificaron los valores de aquellos parámetros importantes, es decir, aquellos parámetros de mayor sensibilidad.

En este proceso se evalúa estadísticamente ambas informaciones simuladas y observadas a través de coeficientes que demuestren la eficiencia del modelo hasta conseguir su calibración. Fueron seleccionados dos estadísticos basados en el análisis gráfico y los parámetros, el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el sesgo porcentual (Percent bias-PBIAS). Estas estadísticas demuestran el desempeño del modelo SWAT para ambas etapas de calibración y validación basadas en los datos históricos medidos para la cuenca del río Huancané. Los indicadores estadísticos se detallan a continuación:

– Coeficiente Nash Sutcliffe

La eficiencia propuesta por Nash & Sutcliffe (1970) es definido como uno menos la suma de diferencias cuadrada entre los valores observados y simulados normalizados por la varianza de los valores observados durante el periodo investigado expresado en la Ec 3.04.

Para obtener valores comparables de eficiencia Nash Sutcliffe en una cuenca con dinámicas más bajas la predicción debe ser con dinámicas altas. El rango de NSE se encuentra entre 1 (ajuste perfecto) y $-\infty$, siendo el valor óptimo la unidad, dando énfasis a la evaluación de los caudales en periodos de avenida. Una eficiencia más

bajo de cero indica que el valor medio de la serie de tiempo observado hubiera sido mejor predictor que el modelo, en cuanto a la cuantificación de predicción de escorrentía NSE conduce a una sobreestimación del rendimiento del modelo durante caudales picos y una subestimación en condiciones de bajos caudales. El coeficiente de Nash Sutcliffe no es muy sensible al modelo sistemático sobre o sub predicción, especialmente durante periodos de caudales bajos (Krause, Boyle, & Bäse, 2005).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (3.04)$$

Donde NSE es el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe que puede variar desde menos infinito hasta 1; siendo 1 el ajuste perfecto entre los datos simulados y los observados, Q_{obs} es el evento observado, Q_{sim} es el evento simulado y \bar{Q}_{sim} es la media del evento observado del periodo a simular.

– Porcentaje PBIAS

El porcentaje PBIAS considerada como medida de tendencia en los flujos medios simulados por el modelo más altos o más bajos que los observados, indican sobreestimación o subestimación, respectivamente.

Interpretada de otra forma este estadístico PBIAS mide la tendencia media de los datos simulados a ser mayores o menores que los observados (Ec. 3.05). El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación precisa del modelo. Los valores positivos indican un sesgo de sobreestimación, mientras que los valores negativos indican un sesgo de subestimación del modelo (Zambrano, 2017).

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim}) \cdot 100}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs})} \quad (3.05)$$

Los valores simulados (Q_t^{sim}) y observados (Q_t^{obs}) son matrices, el valor devuelto (PBIAS) es un vector, con el porcentaje de sesgo en la pendiente de segmento medio de la curva de duración del flujo, entre cada columna de valores simulados y observados.

Bajo este enfoque, las descargas diarias y mensuales en la cuenca del río Huancané se evaluarán utilizando dos diferentes criterios de eficiencia, descritos anteriormente y mediante clasificación de rendimiento según la Tabla 10.

Tabla 10. Criterios para evaluar el rendimiento del modelo hidrológico.

Clasificación del Rendimiento	NSE	PBIAS
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fuente: Moriasi et al. (2007)

b) Validación del modelo

Por último en la fase de validación se evalúa la capacidad del modelo para realizar las simulaciones con suficiente precisión en base a los parámetros obtenidos durante la fase de calibración. Se comprobará su eficacia al momento de comparar los caudales observados con los caudales simulados con los parámetros finales obtenidos en la calibración para un periodo diferente, consiguiendo validar la capacidad de proyección de datos. Para validar el modelo se ha considerado diecisiete años observados, comprendidos desde el periodo 01/01/2000 al 31/12/2016 según la estación hidrométrica Huancané. Las variables consideradas en la validación fueron los caudales; de esta manera, se evalúa la predictibilidad y eficiencia del modelo.

3.3.2. Planteamiento de escenarios de distribución con precipitación grillada

El objeto de esta sección es generar escenarios de simulación hidrológica y evaluar el desempeño del producto grillado en la estimación de caudales diarios y la respuesta hidrológica. Estos son ingresados al modelo hidrológico considerando la distribución espacial, donde: el escenario 1 considera las mismas ubicaciones de las estaciones de observación y el escenario 2 incluye además estaciones sintéticas en territorios de baja densidad o ausencia de registro, conservando las mismas variables de entrada a excepción de la precipitación. La tabla 11, muestra detalles de las consideraciones que se toman para la generación de escenarios de distribución.

Tabla 11. Análisis de escenarios de distribución.

Escenarios	Periodo	Tiempo	Precipitación	Parámetros
1	Calibración	1984-1999	Escenario 1	Histórico
	Validación	2000-2016		
2	Calibración	1984-1999	Escenario 2	Histórico
	Validación	2000-2016		

3.3.3. Análisis comparativo de distribución estacional y espacial

3.3.3.1. Según distribución estacional

Esta sección tuvo por objeto estimar las diferencias entre los escenarios de distribución planteados respecto a la simulación de control con precipitación histórica mediante análisis comparativo en los componentes de balance hídrico a escala promedio mensual, interpretando la relación de distribución estacional resultantes de las simulaciones.

La distribución estacional del rendimiento hídrico (WYLD) también es analizado a fin de relacionar la relación con los componentes del sistema tomando en consideración que es el resultado de la sumatoria de escurrimiento superficial (Q_{surf}), escurrimiento lateral (Q_{lat}), nivel de agua subterránea (Q_{gw}) menos la pérdida por transmisión (T_{loss}).

3.3.3.2. Según distribución espacial

Para comprender las diferencias y el comportamiento hidrológico espacial de las subcuencas se analizan las unidades de mapeo definidas por el reporte anual de balance hídrico y en base a las Unidades de Respuesta Hidrológica resultantes. Cada una de estas unidades de mapeo se integran a condiciones diferenciadas de los principales factores que determinan el rendimiento hídrico. La evaluación espacial consistió en cuantificar la bondad de ajuste en base a la precipitación de las estaciones utilizadas. Estas, al estar distribuidas en el espacio, mediante un alcance de variación espacial de la lluvia dentro del ámbito de estudio. Finalmente, el análisis de la precipitación grillada respecto a la altura también se lleva a cabo.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta el análisis de resultados obtenidos en base a cada ítem propuesto en la metodología. Se hace énfasis principalmente en la interpretación de los indicadores estadísticos en cuanto al comportamiento de las precipitaciones y caudales simulados durante el periodo del 01/01/1984 hasta el 31/12/2016.

4.1. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO

4.1.1. Análisis exploratorio de datos

Como etapa preliminar, esta sección se enfoca al análisis de la variable de entrada principal para el modelamiento hidrológico, que es dividida dos partes: a) Análisis de precipitación observada total acumulada en 24 horas, recopilados de seis estaciones meteorológicas, cuyos acumulados y/o promedios mensuales, fueron sometidos a una evaluación visual (gráfica) y estadística por 4 métodos; b) Análisis de precipitación grillada, para un total crea 11 sintéticas y 6 que corresponden a la misma ubicación de estaciones observadas, sometidos a un solo método de análisis.

a) Análisis de precipitación observada

Evaluación gráfica. Considerando que la distribución temporal de la precipitación a nivel diario no es constante, ya que puede haber días muy lluviosos y días sin lluvia, es muy difícil analizar una inconsistencia por este método a escala diaria, por lo que se acumula el registro diario a periodo mensual de cada estación tal como se muestra en la Figura 18, el detalle de todas las estaciones consideradas es presentada en los Anexos D y F.

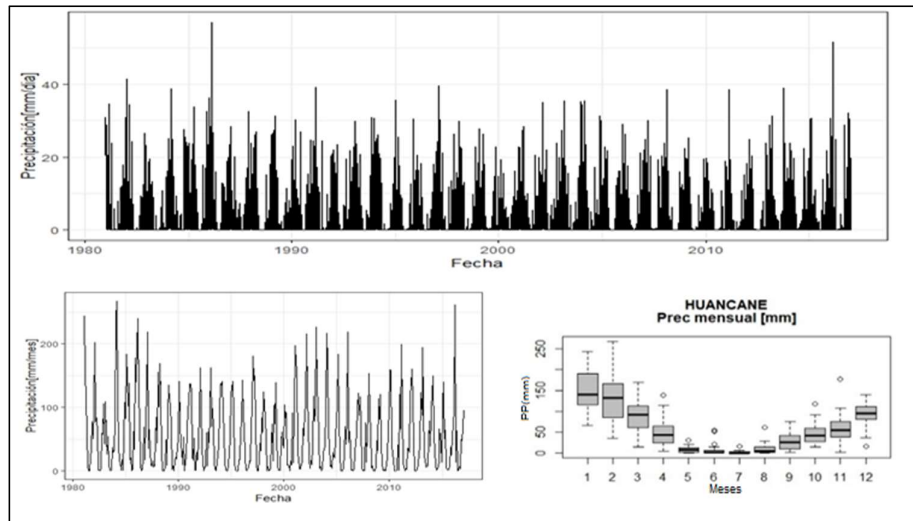


Figura 18. Registro de precipitación observada Estación Huancané.

Análisis de doble masa. Este análisis se utiliza para detectar inconsistencia en los datos hidrológicos múltiples (más de dos series) como se muestra en la Figura 19. El registro diario fue acumulado a nivel anual, donde ninguna estación muestra quiebres de consideración, sin embargo, se considera necesario analizar estadísticamente.

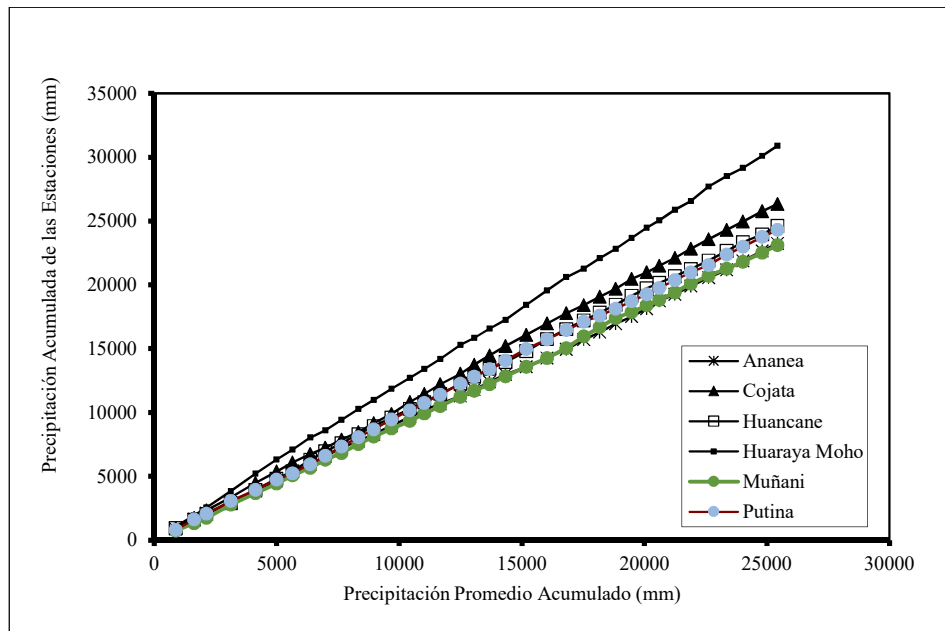


Figura 19. Diagrama de doble Masa de las precipitaciones anuales.

Homogeneidad. Los posibles errores detectados en forma de saltos en el análisis de doble masa, fueron analizados en forma estadística, es decir, se realiza un proceso de inferencia para determinar la consistencia de la media usando la prueba estadística T-Student y la consistencia de la desviación estándar se usa para la prueba estadística F-Fisher. La Tabla 12 muestra los resultados de las pruebas estadísticas, indicando que no existe diferencia significativa en el registro histórico de las 06 estaciones pluviométricas consideradas para el presente estudio.

Tabla 12. Análisis de homogeneidad en precipitaciones históricas

ESTACION	PERIODO	PROM	DESV	T calculada Tc	T tabla (95%) Tt	Comp	Dif.	F calculada Fc	F tabla (95%) Ft	Comp	Dif
ANANEA	1981 -1998	54.59	48.33	0.3371	1.9655	[Tc] < Tt	NO	1.0747	1.2521	Fc < Ft	NO
	1999 - 2016	53.05	46.62								
COJATA	1981 -1998	63.63	56.83	1.0195	1.9655	[Tc] < Tt	NO	1.1691	1.2521	Fc < Ft	NO
	1999 - 2016	58.26	52.56								
HUANCANE	1981 -1998	59.36	59.95	0.8574	1.9655	[Tc] < Tt	NO	1.1120	1.2521	Fc < Ft	NO
	1999 - 2016	54.54	56.85								
HUARAYA MOHO	1981 -1998	73.33	73.97	0.4956	1.9655	[Tc] < Tt	NO	1.0715	1.2521	Fc < Ft	NO
	1999 - 2016	69.74	76.57								
MUÑANI	1981 -1998	54.16	56.00	0.2523	1.9655	[Tc] < Tt	NO	1.0948	1.2521	Fc < Ft	NO
	1999 - 2016	52.83	53.52								
PUTINA	1981 -1998	59.28	58.07	1.1252	1.9655	[Tc] < Tt	NO	1.2087	1.2521	Fc < Ft	NO
	1999 - 2016	53.27	52.82								

Método vector regional. Se observa que la información de las 06 estaciones consideradas para la cuenca del río Huancané en su mayoría se encuentran dentro los límites de confianza del vector regional, que indica confiabilidad en los datos observados.

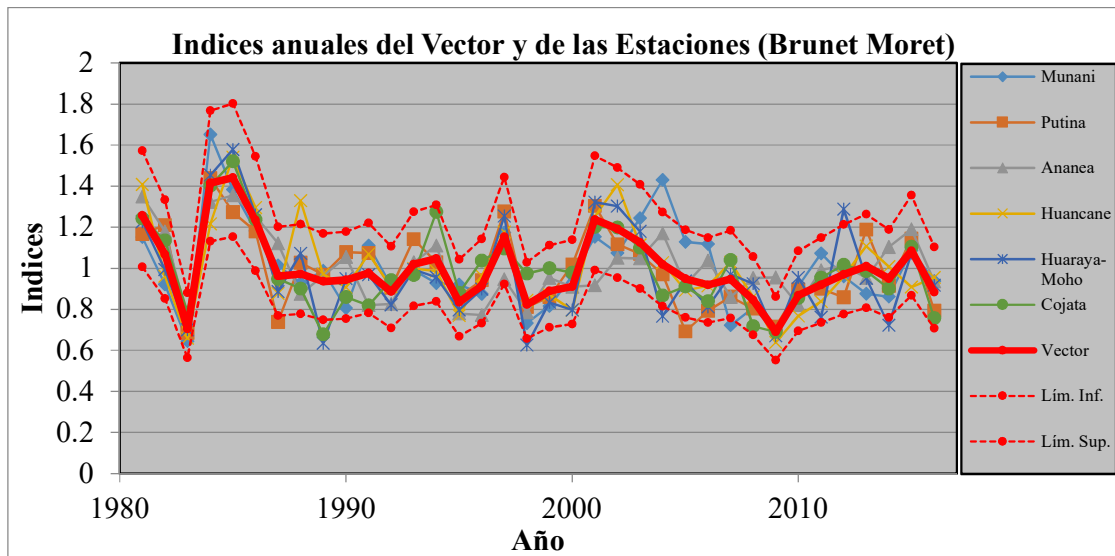


Figura 20. Vector regional de las estaciones meteorológicas series históricas.

b) Análisis de precipitación grillada

Método vector regional. Los datos diarios grillados del producto PISCOp v2.1 que fueron descargadas para las estaciones consideradas del periodo histórico y las series sintéticas distribuidas también son analizadas y juzgadas por el vector regional, observándose que a nivel anual se encuentran dentro de los límites, lo que garantiza la calidad de datos dentro de la misma zona.

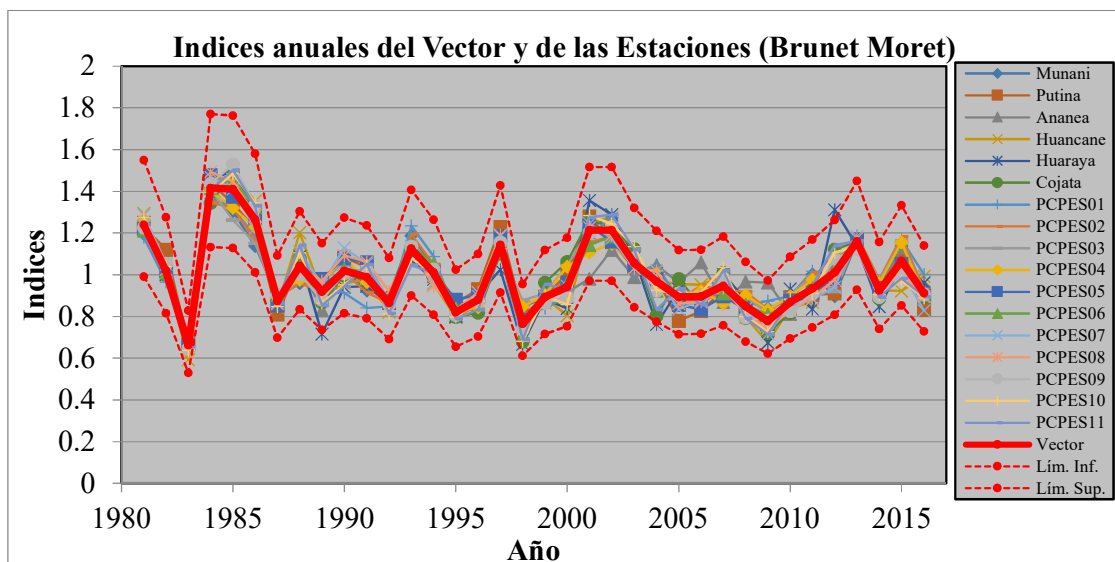


Figura 21. Vector regional de las estaciones series sintéticas.

Los parámetros más interesantes para evaluar la calidad de cada estación son: a) La Desviación Estándar de los Desvíos (D.E.D.) que compara las desviaciones estándar entre los índices de las estaciones y las del Vector Regional, fuertes valores indican probablemente una mala calidad de la estación, de lo contrario podría encontrarse en el margen de una zona climática b) Correlación entre la estación y el Vector Regional, si la zona es homogénea climáticamente los valores serán cercanos entre sí, si un valor es sensiblemente más bajo que el promedio de la zona, entonces, la estación tiene fuerte probabilidad de tener errores o que se encuentre en el margen de la zona. Estos umbrales están fijados a la desviación estándar más baja de 0.4 y coeficiente de correlación mayor a 0.7. El manejo de la base de datos de lluvia y el Método de Vector Regional son llevados a cabo utilizando el software HYDRACCESS (Vauchel, 2005 citado por Canales, 2015).

Las estaciones consideradas pertenecen a una misma zona climática para los datos de registro histórico y PISCOp 2.1, considerándose como aptos para el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané. Los parámetros estadísticos que respaldan tal afirmación es en consideración a Vauchel (2005) y se representan en la Tabla 13, donde las correlaciones entre los índices de Vector Regional (Correl/Vector) y la desviación estándar desvíos (DED), son mayores a 0.70 y menores a 0.4, respectivamente, lo que evidencia la alta proporcionalidad en ambas variables.

Tabla 13. Parámetros de análisis vector regional

Estación	Registro histórico		PISCOp 2.1	
	Correl. /Vector	D.E. Desvíos	Correl. /Vector	D.E. Desvíos
Muñani	0.798	0.126	0.952	0.052
Putina	0.851	0.099	0.956	0.052
Ananea	0.744	0.118	0.908	0.072
Huancané	0.869	0.103	0.962	0.062
Huaraya	0.875	0.119	0.911	0.092
Cojata	0.87	0.094	0.952	0.059
PCPES01			0.925	0.065
PCPES02			0.956	0.053
PCPES03			0.951	0.053
PCPES04			0.96	0.049
PCPES05			0.981	0.034
PCPES06			0.984	0.031
PCPES07			0.975	0.042
PCPES08			0.981	0.039



PCPES09	0.984	0.038
PCPES10	0.97	0.052
PCPES11	0.958	0.061

Adicionalmente el Anexo F muestra el promedio de las series de datos diarios acumulados mensualmente y gráficos de correlación de los datos grillados PISCOp v2.1 con los registros históricos por cada estación considerada, que reflejan valores de correlación mayores a $R^2=0.79$ para la estación Muñani (Belizario, 2015), lo que garantiza la buena representatividad de datos grillado en el área de estudio.

4.1.2. Ejecución del modelo hidrológico SWAT

Delimitada el área de evaluación en consideración a la estación hidrométrica Puente Huancané, se obtuvo como resultado una región de estudio equivalente a 3546 km². En una primera fase la cuenca del río Huancané se divide en 41 subcuencas tal cual se muestra en la Figura 22, y el registro de 981 HRU como resultado de combinar los diferentes mapas.

La subcuenca 39 representa la salida y punto de drenaje de la cuenca del río Huancané que coincide con la ubicación de la estación hidrométrica, presentando la elevación más baja a 3814 msnm. Por otra parte, la subcuenca 06 posee la altitud media más alta que corresponde a 4621 msnm, localizado en el extremo noreste del ámbito de estudio.

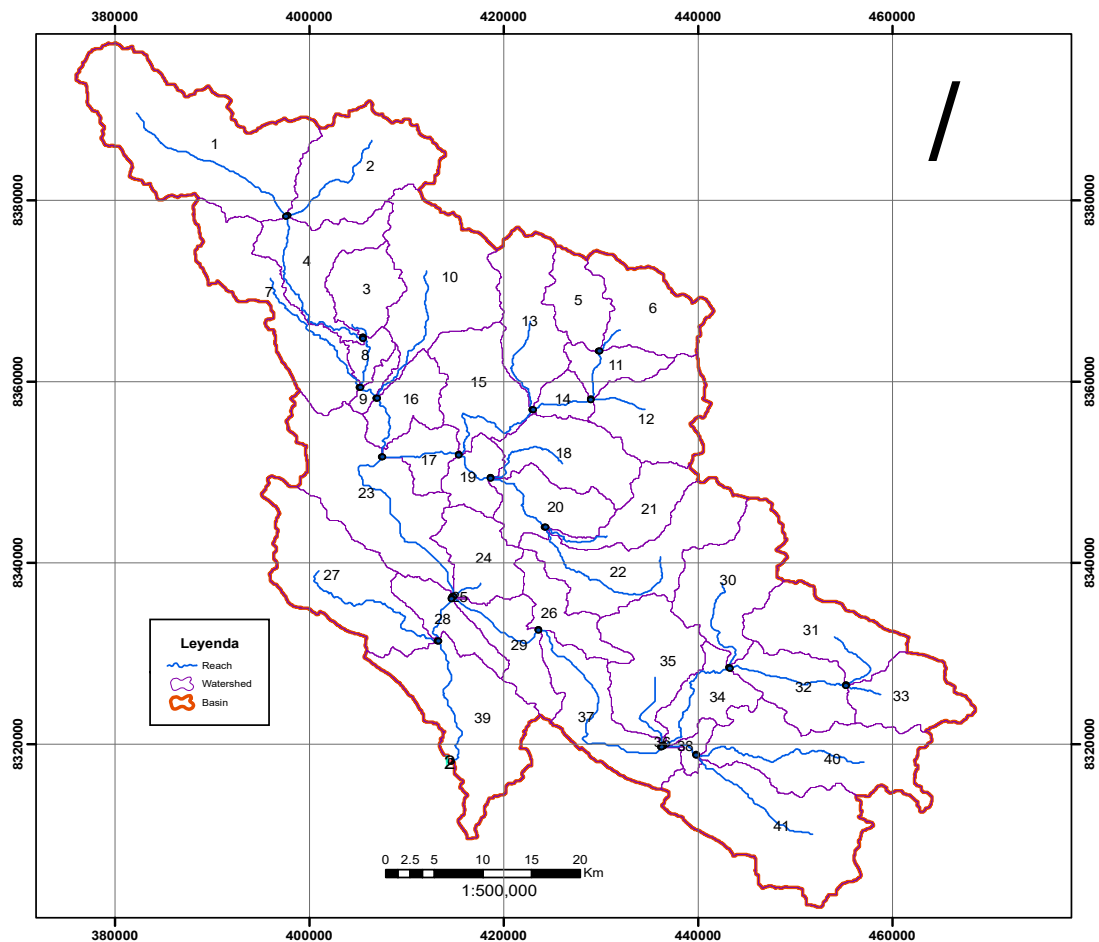


Figura 22. Subcuencas divididas según módulo SWAT

La caracterización del uso de suelo en base al producto CGIAR-CSI comprende pastos (82.24%), bosque mezclado (12.61%), tierras agrícolas genéricas (3.14%), áreas estériles (1.54%), cuerpos de agua (0.41%) y áreas urbanas (0.07%). Los tipos de suelo predominantes según la base de datos de la FAO-1995 corresponden a I-Bh-c-5519, Th8-a-5672 y agua. Además, la clasificación de pendientes muestra que 30.32 % del área de la cuenca presenta pendientes clasificados como planos a ligeramente inclinadas (<10%), 30.99 % moderadamente inclinadas (10-20%), 22.83% fuertemente inclinadas (20-30%), 14.34% pendientes ligeras a moderadamente escarpadas (30-50%) y 1.52% pendientes fuertemente escarpadas (>50%). Las HRUs cumplen un rol importante en la transformación de precipitación a escorrentía permitiendo una simulación detallada de los procesos hidrológicos. La discretización de la cuenca en 41 subcuencas ayudó a obtener una mejor simulación, puesto que si trabajamos con menos de ellas podría generar desfase

entre el caudal observado y el simulado, lo que hubiese hecho más complicado las siguientes etapas del proceso.

4.1.3. Simulación por defecto

En base a la configuración y parametrización por defecto del modelo SWAT la simulación fue llevada a cabo partiendo desde un periodo de calentamiento de 3 años (1981-1984), periodo de calibración de 16 años (1984-1999) y periodo de validación de 17 años (2000-2016).

Los resultados por defecto del modelo SWAT a paso diario presentan un desempeño insatisfactorio con un $NSE = -0.2$ (calibración) y $NSE = 0.09$ (validación), indicando que las descargas altas fueron sobreestimadas y las descargas bajas subestimadas, y que de acuerdo al estadístico $PBIAS = 39.6\%$ (calibración) y $PBIAS = 22.1\%$ (validación) el modelo sobrestima las descargas observadas, tal cual se muestran en la Figura 23 y Figura 24.

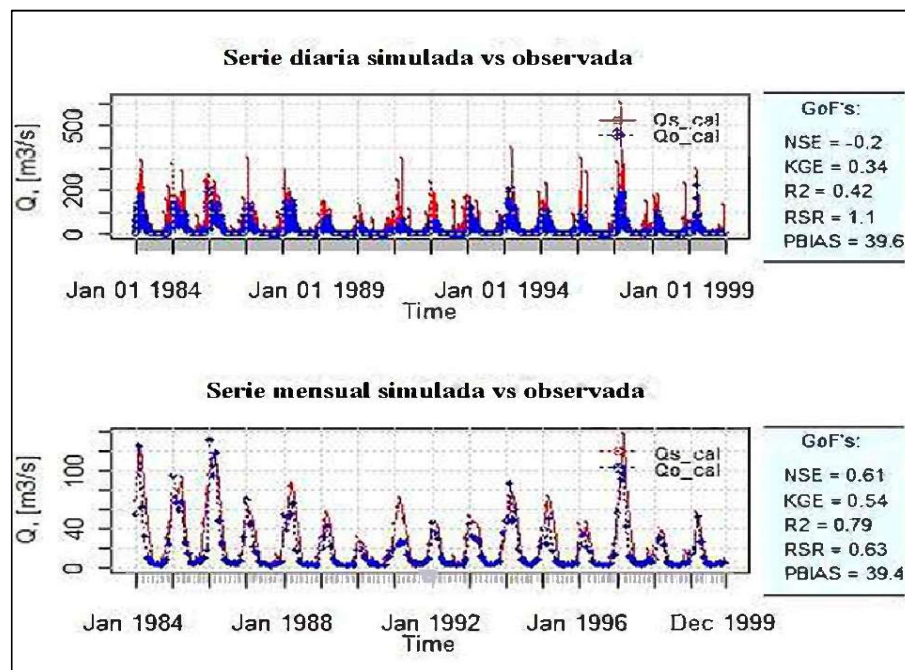


Figura 23. Hidrograma de simulación estación Huancané periodo 1984-1999

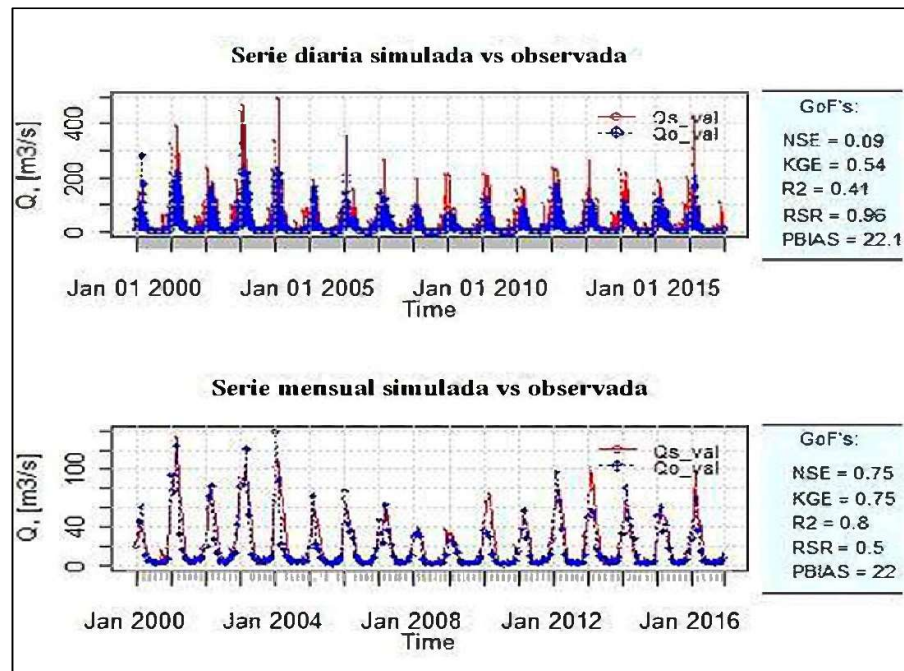


Figura 24. Hidrograma de simulación estación Huancané periodo 2000-2016

4.1.4. Calibración y validación

Debido al pobre desempeño de los resultados iniciales, se realiza el proceso de calibración manual mediante la adaptación de un código en R adjunto en el anexo A, ajustando parámetros relativos a bajos contenidos de agua en el suelo y valores que permiten una alta a moderada evaporación conforme a las condiciones del altiplano.

Los parámetros de calibración se tomaron de acuerdo al análisis de sensibilidad realizado en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota (Fernández, 2016) y los considerados en el modelamiento hidrológico de la región hidrográfica del Titicaca (Fernández, 2017). Siendo más sensibles los parámetros relacionados a componentes de flujo superficial (escorrentía directa), el flujo base (agua en el subsuelo) y la evapotranspiración, según como se detalla en la Tabla 14. Los valores por defecto son reemplazados por los valores ajustados al ser ingresados en el código R, de manera que estos logren alcanzar mejores resultados en la etapa de calibración y validación.

Tabla 14. Parámetros de calibración seleccionados

PARAMETRO	VALORES		DESCRIPCION	PROCESO
	Defecto	Ajustado		
CN2.mgt	74.69	81.76 (12%)	SCS Numero de Curva de Escorrentía Inicial	Cobertura
SURLAG.hru	2.00	0.10	Coefficiente de Retraso de la Escorrentía Superficial	Enrutamiento
ESCO.hru	0.95	0.80	Factor de Compensación de la Evaporación de Suelo	Evaporación
RCHRG_DP.gw	0.05	0.40	Fracción de Recarga hacia el Acuífero Profundo	Acuíferos

De la Figura 25 y Figura 26 se puede observar que las series de caudales observados y simulados a paso diario y mensual respectivamente, muestran una simulación satisfactoria de la estacionalidad de flujos de escorrentía, tanto para periodo de calibración y validación del modelo.

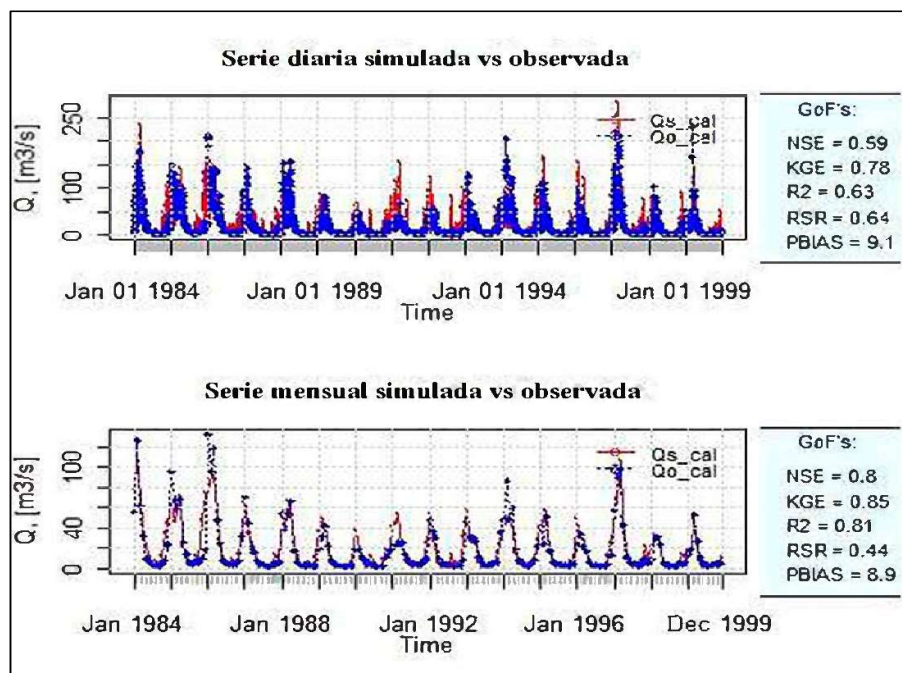


Figura 25. Hidrograma observado vs simulado ajustado periodo 1984-1999

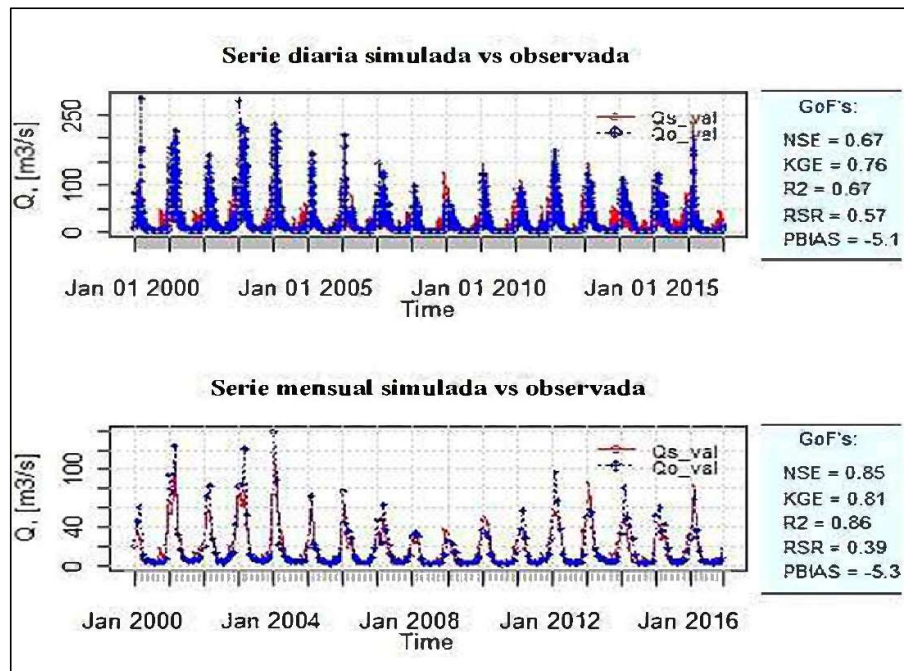


Figura 26. Hidrograma observado vs simulado ajustado periodo 2000-2016

Los estadísticos indican que la descarga media diaria simulada caracteriza bien los patrones de la descarga observada con un desempeño calificado como satisfactorio en la etapa de calibración $NSE=0.59$ y bueno en la etapa de validación $NSE=0.67$. Asimismo, respecto al PBIAS el modelo SWAT nos muestra una ligera sobrestimación de la descarga media diaria observada en la etapa de calibración $PBIAS=9.1\%$ y una ligera subestimación en la etapa de validación $PBIAS=-5.1\%$, indicando que el modelo tiene un desempeño muy bueno según el esquema de clasificación. El cual está asociado parcialmente con las funciones objetivas o índices de rendimiento para calibrar el modelo que dependen de las características de caudales picos y condiciones de caudales bajos.

Las métricas de desempeño mejoran respecto a los obtenidos en la simulación diaria. Así la evaluación de descargas medias mensuales en el periodo de calibración ($NSE=0.8$, $PBIAS=8.9\%$) y validación ($NSE=0.85$, $PBIAS=-5.3\%$), pueden catalogar que el desempeño del modelo fue muy bueno. Esta habilidad se asoció a que SWAT es capaz de caracterizar los caudales picos y ligeras subestimaciones en caudales bajos. Es importante hacer notar que se calibró el modelo utilizando información de escala temporal diaria, que fue acumulada para mostrar resultados mensuales.

En general, por lo mencionado anteriormente se demuestra que el modelo tiene la capacidad de caracterizar bien los patrones de descarga observada. Incluso al representar eventos extremos registrados como la del año 2004 (ANA, 2010), por lo que puede utilizarse para estudiar la respuesta hidrológica de la cuenca del río Huancané.

4.1.5. Componentes del balance hídrico

El modelo SWAT una vez calibrado y validado permite caracterizar los diferentes componentes del balance hídrico teniendo como elementos principales a la precipitación, escorrentía superficial, flujo lateral, flujo base, y evapotranspiración, los cuales se presentan Figura 27.

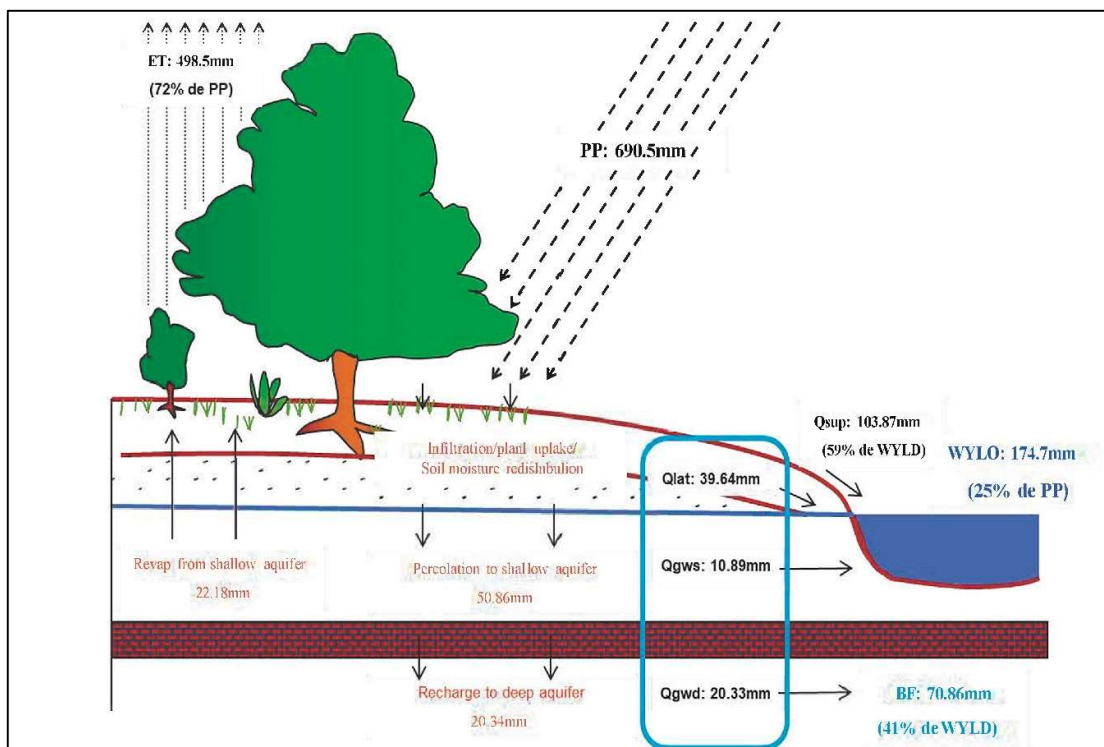


Figura 27. Balance hídrico promedio anual histórico.

El mayor aporte de agua está dado por la precipitación (690.5 mm) de los cuales el 72% se pierde por evapotranspiración real $ET=498.5$ mm, el 25% contribuye al rendimiento hídrico de la cuenca $WYLD = 174.7$ mm. Las mayores aportaciones que se atribuyen al escurrimiento superficial representan el 15% respecto al total de precipitación; mientras que el escurrimiento subsuperficial representa el 6% y la descarga subterránea constituye únicamente el 5%. De acuerdo al BFI ($IBFswat=0.41$) la

contribución de flujo base corresponde al 41% de WYLD (FB=70.86 mm). Mientras tanto la contribución de escorrentía superficial representa el 59% ($Q_{surf}=103.87$ mm). La mayor contribución al flujo base FB=70.86 mm está dado por el flujo lateral ($Q_{lat}=39.64$ mm, 55.9%), el flujo de retorno desde el acuífero superficial ($Q_{gws}=10.89$ mm, 15.4%) y seguido por el flujo de retorno del acuífero profundo ($Q_{gwd} = 20.33$ mm, 28.7%).

4.2. ESCENARIOS DE DISTRIBUCIÓN - PRECIPITACIÓN GRILLADA

4.2.1. Escenario 1

Según la metodología descrita, el escenario 1 se simula con datos de precipitación grillada del producto PISCOp 2.1 fijados para la misma ubicación de las estaciones convencionales. La Figura 28 muestra los resultados de la serie de descarga diaria simulada que, según los estadísticos de eficiencia presenta un desempeño calificado como bueno en la etapa de calibración $NSE=0.62$ y $PBIAS=6.2$. Asimismo, las series de descarga media mensual son mejor aún representados con estadísticos de $NSE=0.8$ y $PBIAS=6$, que se califican como muy buenos.

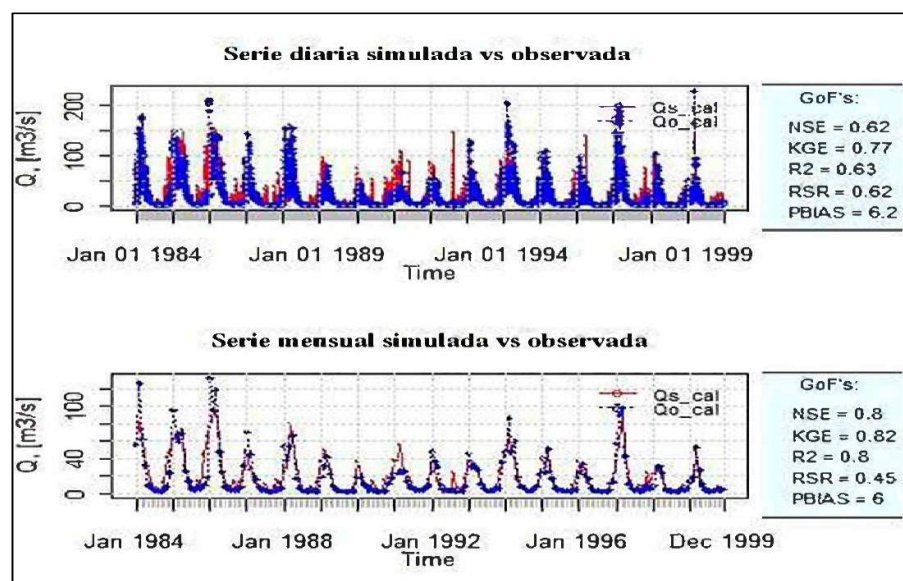


Figura 28. Hidrograma observado vs simulado escenario 1 periodo 1984-1999.

El periodo de validación continúa presentando una buena estimación de los caudales diarios, según se muestra en la Figura 29, con un $NSE= 0.65$ y $PBIAS=-8.5$ mientras que a nivel mensual se obtiene un $NSE=0.81$ y $PBIAS=-8.9$, indicando una

subestimación PBIAS debido principalmente a que no se simula satisfactoriamente los caudales picos del año hidrológico 2003-2004.

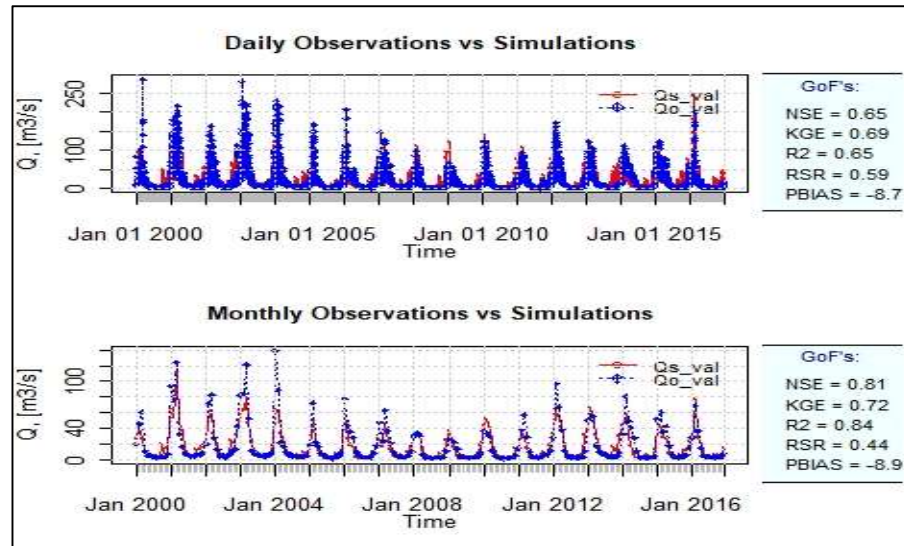


Figura 29. Hidrograma observado vs simulado escenario 1 periodo 2000-2016.

Basándonos en los resultados estadísticos del escenario 1, se procede a generar valores en los componentes del balance hídrico de la cuenca, cuyos resultados son mostrados en la Figura 30, indicando que el aporte de precipitación al sistema es de 663.4 mm anuales de los cuales el 72% se pierde hacia la atmosfera por la cantidad de evapotranspiración real anual de $ET=478.1\text{mm}$ y el 25% al rendimiento hídrico de la cuenca $WYLD = 168.5\text{ mm}$.

Además, se observa que las mayores aportaciones se atribuyen al escurrimiento superficial, que representan el 13% respecto al total de precipitación; mientras que el escurrimiento subsuperficial representa únicamente el 6% y la descarga subterránea el 7%.

De acuerdo al BFI ($IBF_{swat}=0.50$) la contribución de flujo base corresponde a $FB=83.49\text{ mm}$ representando un 50% de WYLD. Mientras tanto la contribución de escorrentía superficial $Q_{surf}=85.04\text{ mm}$ al WYLD es de 50%. La mayor contribución del flujo base $FB=83.49\text{ mm}$ está dado por el flujo lateral ($Q_{lat}=38.94\text{ mm}$, 47%), seguido por el flujo de retorno del acuífero profundo ($Q_{gwd} = 25.36\text{ mm}$, 30%) y el flujo de retorno desde el acuífero superficial ($Q_{gws}=19.19\text{ mm}$, 23%).

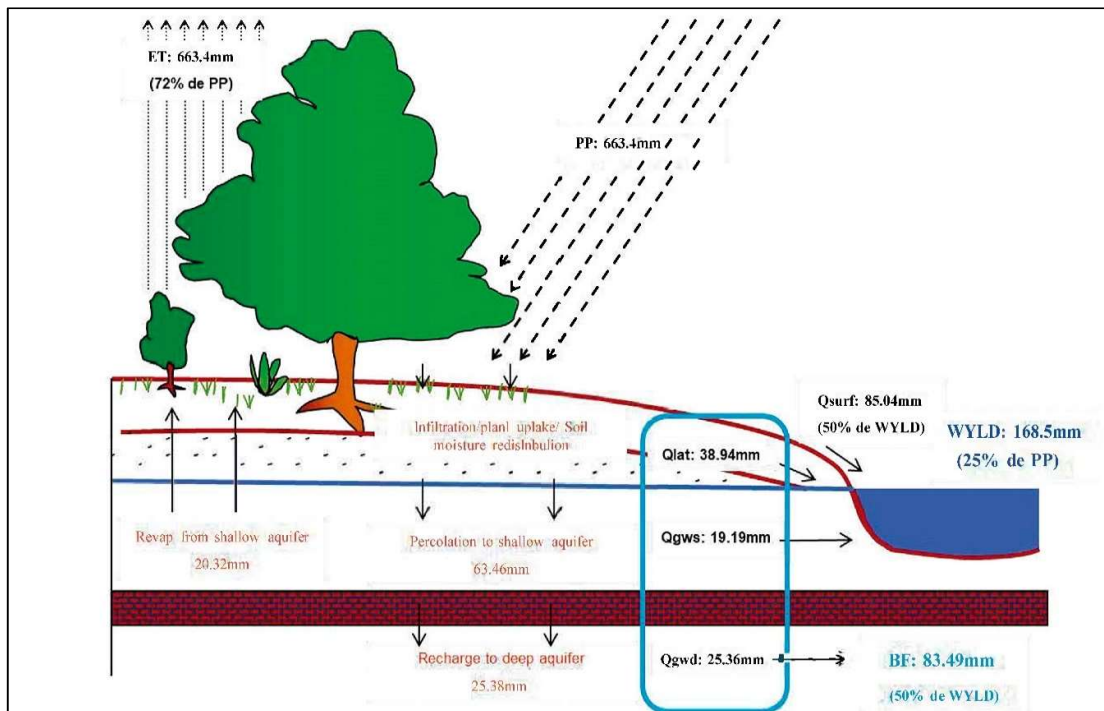


Figura 30. Balance hídrico promedio anual escenario 1.

4.2.2. Escenario 2

Los resultados del escenario 2 con datos de precipitación grillada del producto PISCOp 2.1 considerando estaciones sintéticas se muestran en la Figura 31. Conforme a las estadísticas de calificación sobre la calibración reporta un desempeño calificado como satisfactorio con un $NSE=0.52$ y $PBIAS=19.6$ a escala diaria y $NSE=0.76$ y $PBIAS=19.3$ a escala mensual, indicando sobrestimación en el periodo calibrado.

El periodo de validación según la Figura 32 muestra mejoras respecto a las condiciones descritas anteriormente, de acuerdo a la estimación de caudales diarios $NSE=0.64$ y $PBIAS=2.4$, y estimación de caudales mensuales $NSE=0.82$ y $PBIAS=2.2$ presentando un mayor ajuste a los caudales observados.

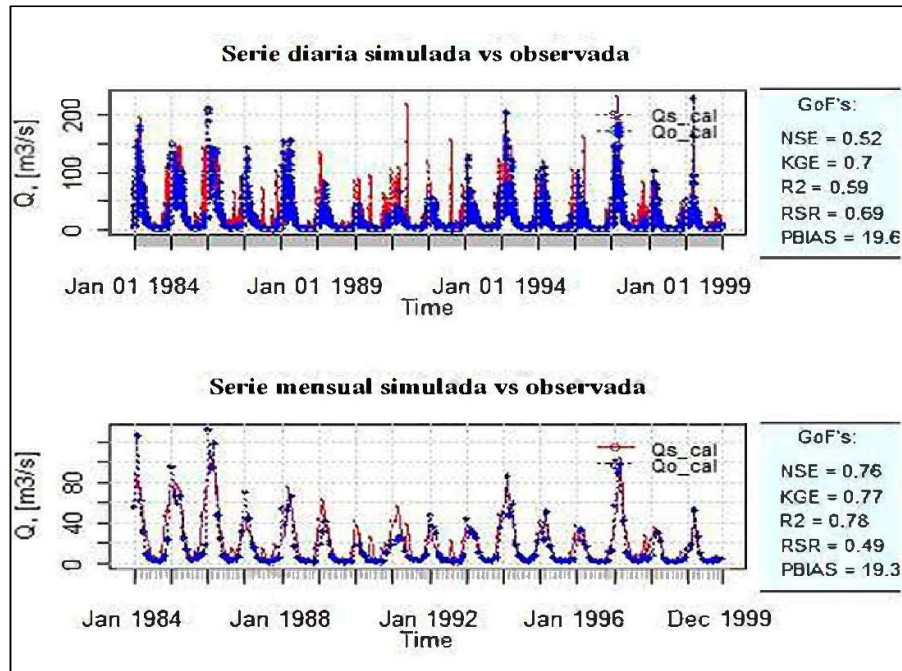


Figura 31. Hidrograma observado vs simulado escenario 2 periodo 1984-1999.

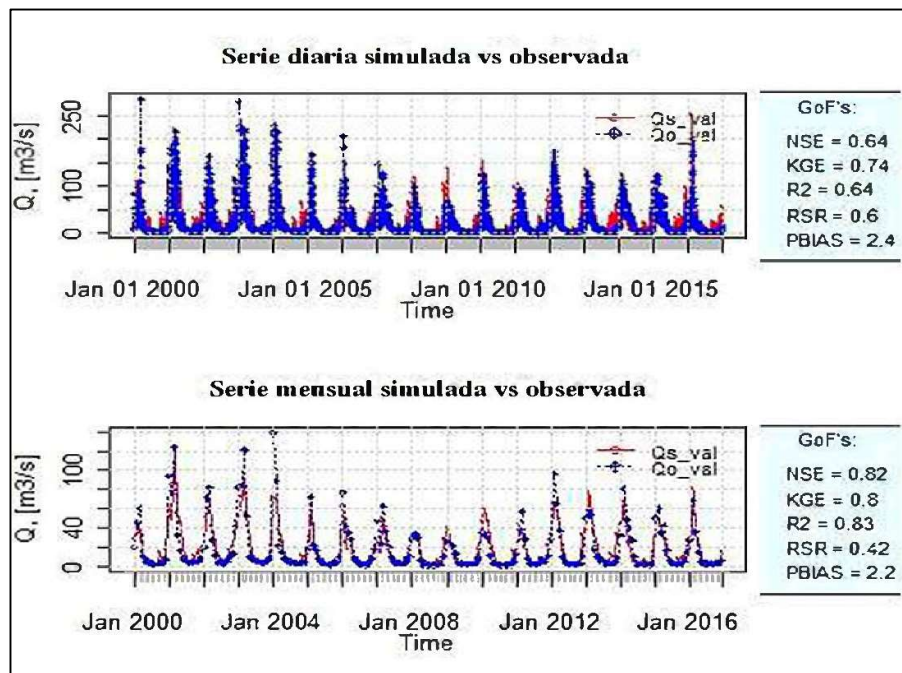


Figura 32. Hidrograma observado vs simulado escenario 2 periodo 2000-2016.

Los resultados del escenario 2 que se muestran en la Figura 33 indican que el aporte de precipitación al sistema es de 679.0 mm anuales, donde el 70% se pierde hacia

la atmosfera por la cantidad de evapotranspiración real anual de $ET=473.6$ mm y un 28% alimenta el rendimiento hídrico de la cuenca $WYLD = 188.46$ mm. Además, se observa que las mayores aportaciones se atribuyen al escurrimiento superficial, que representan el 12% respecto al total de precipitación; mientras que el escurrimiento subsuperficial representa únicamente el 6% y la descarga subterránea el 10%.

De acuerdo al BFI ($IBF_{swat}=0.56$), la contribución de flujo base corresponde a $FB=105.63$ mm representando un 56% de WYLD. Mientras tanto, la contribución de escorrentía superficial $Q_{surf}=82.84$ mm al WYLD es de 44%. La mayor contribución del flujo base $FB=105.63$ mm está dado por el flujo lateral ($Q_{lat}=39.51$ mm, 37%), seguido por el flujo de retorno del acuífero profundo ($Q_{gwd} = 33.90$ mm, 32%) y el flujo de retorno desde el acuífero superficial ($Q_{gws}=32.22$ mm, 31%).

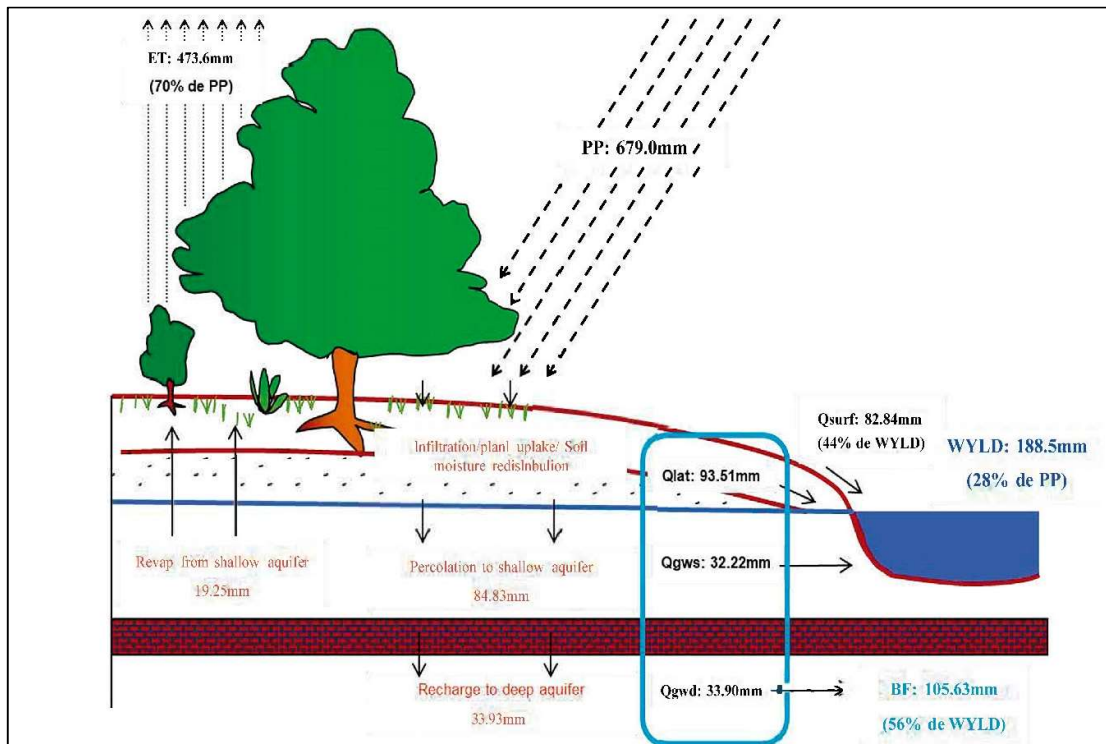


Figura 33. Balance hídrico promedio anual escenario 2.

A manera de resumen se presentan los resultados según estadísticos de eficiencia y los componentes de balance hidrológico resultantes para el periodo de control con registro de precipitación histórica y los dos escenarios de distribución planteados, cuyas

simulaciones fueron establecidas para un periodo común entre los años 1984-2016, manteniendo los parámetros de calibración ajustados al histórico.

Los estadísticos de eficiencia según la Tabla 15 reportan en general que, para los periodos de calibración y validación a escala mensual son mejor representados que a escala diaria con calificaciones de muy buena y buena, respectivamente. Los resultados del escenario 1 se muestran muy similares en comparación con los registros históricos, mientras que, resultados ligeramente menores son obtenidos empleando datos del escenario 2. El periodo de validación para el control histórico y escenario 1 reporta subestimación según el estadístico PBIAS, sin embargo, el escenario 2 reporta mejor ajuste que los anteriores con la particularidad de una ligera sobrestimación.

Tabla 15. Estadísticos de eficiencia resultantes.

Escala	Periodo	Histórico		Escenario 1		Escenario 2	
		NSE	PBIAS	NSE	PBIAS	NSE	PBIAS
Diario	Calibración	0.59	9.1	0.62	6.2	0.52	19.6
	Validación	0.67	-5.1	0.65	-8.7	0.64	2.4
Mensual	Calibración	0.80	8.9	0.80	6	0.76	19.3
	Validación	0.85	-5.3	0.81	-8.9	0.82	2.2

El resumen de los resultados de balance hidrológico en el periodo de control histórico comparados con los escenarios de distribución 1 y 2, se plasman en la Tabla 16. Se observa que los valores referentes a los componentes de precipitación y evapotranspiración son ligeramente subestimados respecto al histórico, mientras que componentes como la escorrentía superficial y contribución de flujo base indican sobrestimación, este último principalmente influenciado por la variación del flujo de retorno desde el acuífero profundo y acuífero superficial. En cuanto al rendimiento hídrico, el escenario 2 reporta la mayor respuesta 679mm que se interpreta por la alta tasa de flujo base que reporta 188.46 mm, seguido por el control histórico 174.70 mm con flujo base 70.86 mm respectivo y finalmente el escenario 1 con respuesta 168.49 mm y flujo base 83.49 mm.

Tabla 16. Componentes de balance hidrológico.

COMPONENTES	Histórico	Escenario 1	Escenario 2
Aporte al sistema			
Precipitación (PP)	690.5	663.4	679.0
Perdida hacia la atmosfera			
Evapotranspiración real (ET)	498.5	478.1	473.6
Rendimiento en la salida de la cuenca			
Rendimiento hídrico (WYLD)	174.7	168.49	188.46
Contribución de Escorrentía superficial (Qsurf)	103.87	85.04	82.84
Flujo Lateral (Qlat)	39.64	38.94	39.51
Flujo de Retorno desde el acuífero superficial (Qgws)	10.89	19.19	32.22
Flujo de Retorno desde el acuífero profundo (Qgwd)	20.33	25.36	33.90
Perdida por transmisión en los canales (Tlosses)	0	0	0
Contribución de Flujo Base (FB)	70.86	83.49	105.63

4.3. ESCENARIOS DE DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL Y ESPACIAL

4.3.1. Distribución estacional

Los resultados a escala promedio mensual presentan mayor consistencia y eficiencia en el manejo de información debido a que distinguen el comportamiento estacional de los componentes resultantes, además que permiten observar con mayor detalle las diferencias entre los escenarios planteados y el control con registro histórico de precipitaciones. Por lo tanto, se analizan los resultados según como se muestra en la Figura 34 donde:

a) La precipitación que es entendida como la variable de entrada con mayor influencia e importancia en el balance hidrológico muestra ligera subestimación de patrones en los escenarios respecto a la estacionalidad de datos históricos que corresponden al mes más lluvioso, b) referente al escurrimiento superficial ambos escenarios subestiman los resultados de control histórico especialmente en el periodo húmedo entre los meses de enero y abril, que se ven reflejados en el desfase que presentan, asimismo, c) el flujo lateral muestra un comportamiento parecido al de precipitación con un buen ajuste estacional, observándose pequeños quiebres en los meses de marzo y octubre. d) Por otro lado, las láminas de agua subterránea son las que muestran mayor diferencia significativa especialmente en los valores picos que se alcanzan entre los meses de marzo y abril, a pesar de seguir un comportamiento proporcional muestran una gran sobrestimación sobre el modelado con registro de precipitación histórica. Este efecto

guarda relación con la subestimación de escorrentía superficial que explicaría altas resultados anuales de rendimiento hídrico e) Finalmente, se observa que los escenarios subestiman la evapotranspiración calculada con registro de precipitación histórica especialmente en temporadas húmedas, que muestran un comportamiento claro de desfase.

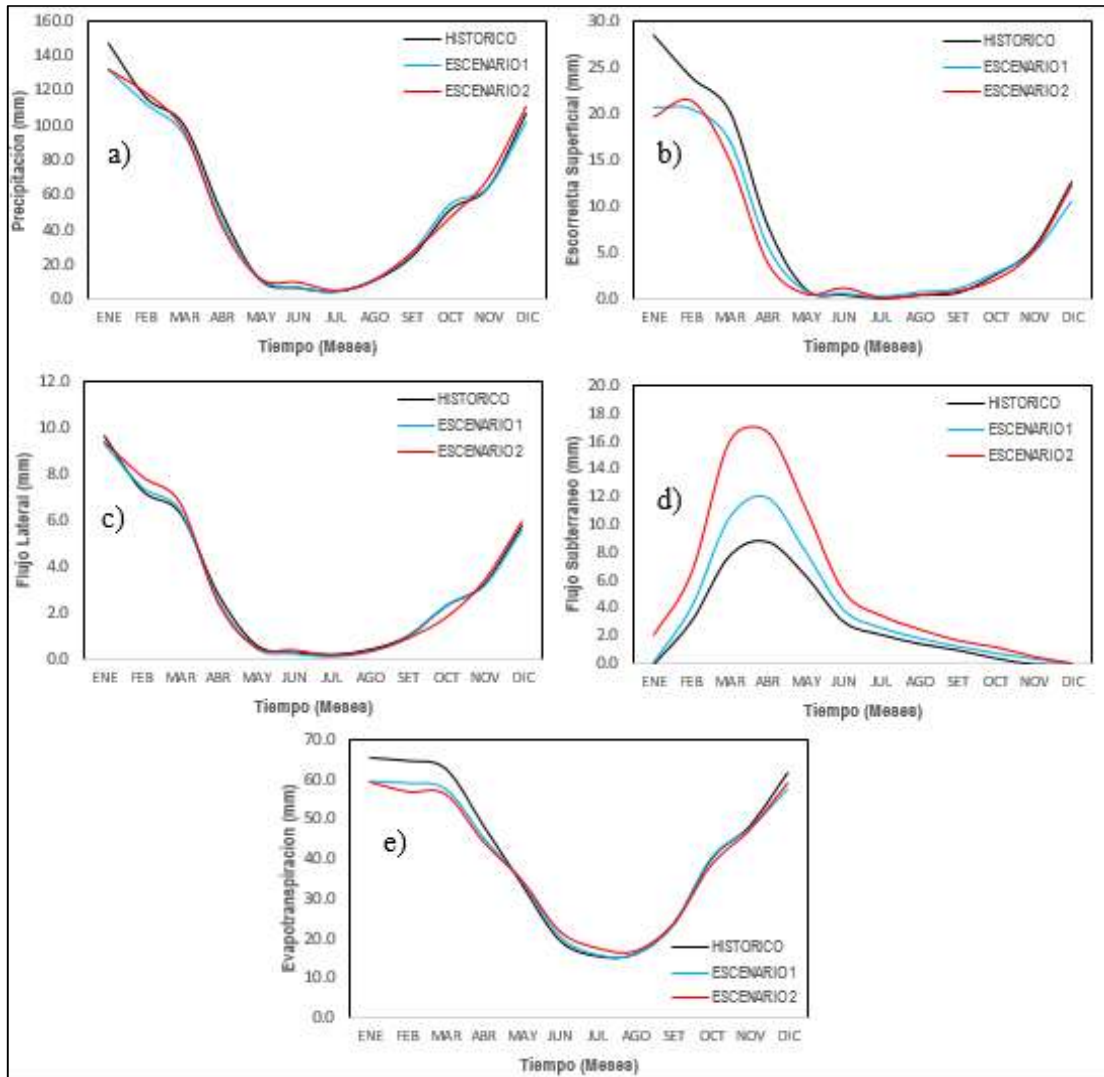


Figura 34. Análisis estacional en componentes de balance hídrico.

Además, la estacionalidad del registro histórico y escenarios resultantes de precipitación grillada según el rendimiento hídrico se ven reflejados en la Figura 35, donde se muestra la variación mensual de rendimiento hídrico y el comportamiento estacional típico, con picos en los meses húmedos (enero a marzo) y escaso en meses secos (junio a octubre). El escenario 1 se ajusta mejor a los resultados del registro

histórico mostrando un comportamiento más atractivo, excepto en los meses húmedos entre enero y marzo que son subestimados, por otro lado, el escenario 2 sobrestima el comportamiento estacional de los resultados entre febrero a setiembre, llama la atención el desfase que existe entre abril y julio debido a que podría explicarse por las altas tasas de flujo base que son reportados de la simulación.

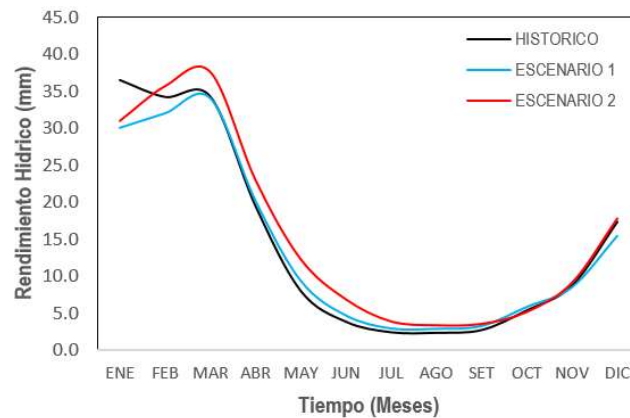


Figura 35. Análisis estacional del rendimiento hídrico.

4.3.2. Distribución espacial

A fin de entender las diferencias y el comportamiento hidrológico de las 41 subcuencas, se analizan las unidades de mapeo que derivaron del reporte anual de balance hídrico generado por SWAT y en base a las 981 unidades de respuesta hidrológica creadas. Cada una de estas unidades de mapeo integran condiciones diferenciadas de los principales factores que determinan el rendimiento hídrico. De acuerdo a ello, podemos considerar que el modelo SWAT permite la visualización del rendimiento promedio anual y con ello distinguir las áreas de mayor aporte hídrico, lo que serviría como soporte para la toma de decisiones y planes de manejo en cuencas.

En los Anexos G.1, G.2 y G.3 de la presente investigación, se muestran los mapas que caracterizan el potencial de rendimiento hídrico para la cuenca Huancané y los componentes en porcentaje de contribución como la escorrentía superficial y flujo base. Todos ellos se encuentran agrupados en 9 clasificaciones cada uno, con rangos de 50 mm/año, y que comprenden valores desde 0-50 mm/año a mayores de 400 mm/año.

a) Anexo G.1. Mapa de rendimiento con registro histórico de precipitaciones

Las subcuencas 40 y 41, ubicadas al sureste de la cuenca Huancané registran los rendimientos más altos entre 300-350 mm/año, debido a que esta parte de la cuenca experimenta altas tasas de precipitación como se observa en la Figura 36 (a). Mientras tanto, rendimientos menores se localizan en la zona central (0-50 mm/año) representando el 24% del total de 981 HRUs, que evidencia las diferencias existentes entre las regiones hidrológicas, así como las características de gradientes altitudinales y climáticas. La mayor contribución al rendimiento hídrico está dada por la escorrentía con 60% de aporte que se complementa con la contribución de flujo base en 40%.

b) Anexo G.2. Mapa de rendimiento hídrico escenario 1

La distribución espacial mostrada en el mapa de rendimiento hídrico es similar al comportamiento del Anexo G.1, donde las altas tasas de precipitación explican los altos rendimientos en las subcuencas 40 y 41 según como se muestra en la Figura 36. (b), con la diferencia que identifica ligeramente mayores tasas de aporte en la zona central (50-100 mm/año) representando el 27% del total de 981 HRUs. Por otro lado, la mayor contribución al rendimiento hídrico está dada por el flujo base con 52% de aporte y se complementa a la contribución de escorrentía en 48%.

c) Anexo G.3. Mapa de rendimiento hídrico escenario 2

El escenario 2 presenta una distribución muy diferente a los dos descritos anteriormente, donde las zonas de mayor rendimiento se desplazan al noreste de la cuenca tal como se ve reflejado en el Anexo G.3; que se atribuyen a las altas tasas de precipitación en las estaciones sintéticas de estas zonas según la Figura 36 (c). Las mayores tasas de aporte 200-250mm/año representan el 21% del total de 981 HRUs. Asimismo, la mayor contribución al rendimiento hídrico está dado por el flujo base con 61% de aporte y se complementa a la contribución de escorrentía en 39%.

Para respaldar la influencia de la precipitación sobre el rendimiento hídrico, en la Figura 36 (a, b, c) se muestran los mapas de distribución espacial de precipitación reportados por SWAT para el periodo de análisis comprendido entre 1981-2016. El

escenario 1 (b) del producto PISCOp v2.1 indica menor variación con respecto a la distribución observado en el mapa (a), con mayores valores en las subcuencas ubicadas al sureste, mientras que el escenario 2 (c) refleja un desplazamiento de las mayores tasas de precipitación al noreste del área de estudio. Además, se logra interpretar la gran influencia que existe entre la distribución de precipitación con el aporte de rendimiento anual, manifestándose en la coincidencia de los resultados de respuesta hidrológica distribuida.

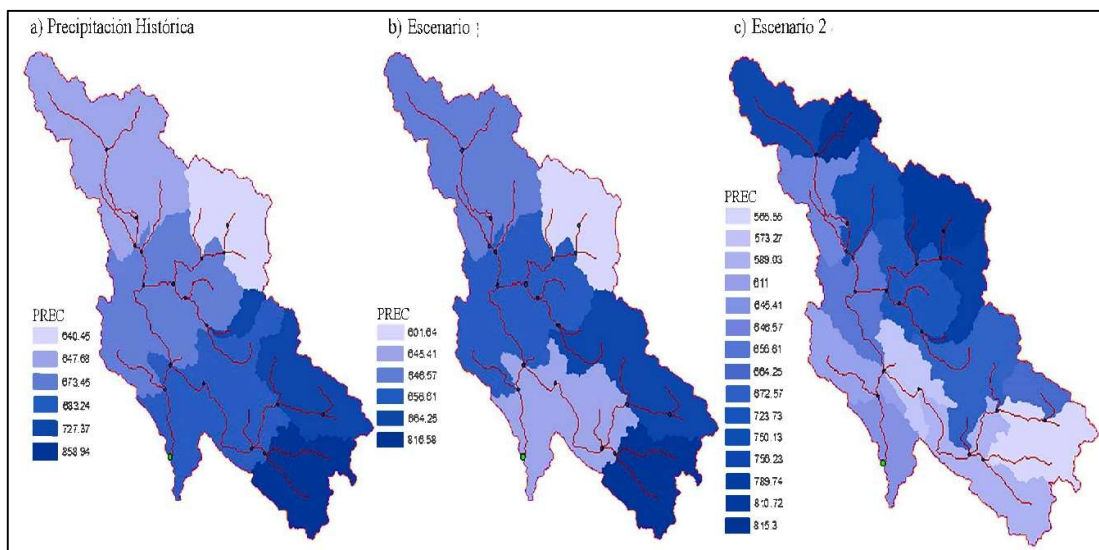


Figura 36. Mapas de distribución espacial de precipitación.

Al comparar los resultados se observa que los aportes de escorrentía en los escenarios de distribución están por debajo respecto al reporte que brinda el análisis con registro histórico de precipitación, y complementariamente con el reporte de flujo base. Estos resultados guardan relación con el análisis de distribución estacional, identificando mayor variación en el flujo base al utilizar datos de precipitación grillada y la forma en que son distribuidos.

La variabilidad del promedio anual en los principales componentes de balance hídrico es similar al obtenido por Fernández (2017), quien reporta un rendimiento hídrico promedio anual de 166.9 mm/año, donde la contribución de flujo base es 111.1 mm/año y escorrentía superficial de 55.7 mm/año, resultados que más se ajustan al escenario 2 planteado en la presente investigación. Además, identificada la zona central de la cuenca



es gobernado por tasas que van entre 100-150 mm/año y 150-200 mm/año que se adecua precisamente al escenario 2.

Actividades como la agricultura por secano continúan siendo el sector económico más amenazado por el cambio climático en cuencas altoandinas, el riego por su parte se ha convertido en una solución alternativa que hace frente a las particulares sequías meteorológicas. Esta información ayuda a comprender la variación espacio temporal de precipitación particularmente para territorios con escasez de datos, que posteriormente pueden utilizarse para el pronóstico de recursos hídricos y estudios de impacto.

Este trabajo constituye un aporte en las consideraciones que deberá tomarse en cuenta para el modelamiento hidrológico distribuido con información grillada. Los resultados son útiles para una mejor comprensión de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Huancané, especialmente para observar el comportamiento en componentes como la escorrentía superficial, el flujo base, por ende, el rendimiento hídrico y la relación que guardan con la precipitación en territorios donde no se encuentran monitoreados. Por lo tanto, proporciona información estratégica necesaria para la planificación del uso adecuado y en general la gestión de los recursos hídricos en el área de estudio. Sin embargo, debe considerarse la subjetividad de usar datos de entrada gruesa como el tipo de suelo y la calidad de información para el cálculo de evapotranspiración debiéndose asociar a la recolección masiva de información para el área de estudio.

V. CONCLUSIONES

Se evaluó la incidencia de precipitación grillada PISCO en la respuesta hidrológica distribuida mediante la aplicación del modelo SWAT bajo condición de dos escenarios de distribución, el primero manteniendo la misma ubicación de las estaciones de observación y segundo considerando estaciones sintéticas, donde se obtiene las siguientes conclusiones:

- El modelo hidrológico SWAT fue capaz de simular adecuadamente las descargas diarias y mensuales de la Estación Hidrométrica Puente Huancané tras el ajuste de 4 parámetros de calibración CN2 (12%), SURLAG (0.10), ESCO (0.80) y RCHRG_DP (0.40), los que se respaldan con estadísticas de eficiencia en la etapa de calibración y validación de NSE (0.59, 0.67), PBIAS (9.1%, -5.1%) a escala diaria y NSE (0.80, 0.85), PBIAS (8.9%, -5.3%) a escala mensual, que deducen la caracterización los diferentes componentes del balance hídrico.
- El desempeño del modelo calibrado y validado con series de precipitación histórica permitió evaluar dos escenarios de distribución con precipitación grillada del producto PISCOp v2.1 para el periodo 1984 – 2016, donde el escenario 1 muestra resultados de NSE (0.62, 0.65), PBIAS (6.2%, -8.7%) a escala diaria y NSE (0.80, 0.81), PBIAS (6%, -8.9%) a escala mensual. Mientras que para el escenario 2 resulta NSE (0.52, 0.64), PBIAS (19.6%, 2.4%) a escala diaria y NSE (0.76, 0.82), PBIAS (19.3%, 2.2%) a escala mensual. Estos resultados indican sobrestimación en ambos escenarios respecto al modelado con registro histórico de precipitación, a excepción del periodo de validación del escenario 1 que muestra ligera subestimación.
- La incidencia del producto PISCOp v2.1 en los resultados de modelamiento hidrológico semidistribuido reflejan una subestimación de la escorrentía en temporadas lluviosas y sobrestimación de la contribución de flujo subterráneo. A nivel espacial, los aportes de escorrentía (60%) gobiernan sobre el aporte de flujo base (40%) según el registro de precipitación histórica entre 1981 – 2016, opuesto al resultado de los escenarios donde la mayor contribución es por parte del flujo base, 52% en el escenario 1 y 61% en el escenario 2. En términos de rendimiento hídrico se presentan aportes proporcionales a la distribución de la precipitación espacial.



VI. RECOMENDACIONES

- Los datos grillados PISCO proporcionan valiosa información de acceso libre, recomendándose la utilización para futuras investigaciones considerando que estos deben ser validados con datos observados por el grado de incertidumbre y para el modelamiento hidrológico considere aspectos más allá de los estadísticos como los componentes de balance.
- Los resultados deben ser interpretados considerando el nivel de incertidumbre propagado durante todo el proceso de modelación, desde el origen y procesamiento de los datos disponibles hasta la construcción del modelo y su calibración.
- La metodología utilizada en la presente tesis para aplicación del modelamiento hidrológico SWAT y simulación descargas diarias y mensuales pueden ser implementadas en otras cuencas, particularmente en aquellas que cuenten con suficiente información para mayor robustez del modelo.
- La información del tipo de suelo fue uno de los puntos débiles dentro del modelamiento hidrológico debido a las grandes subjetividades. Para poder generar una correcta espacialización del tipo de suelo es necesario el recojo de información masiva y la actualización de datos de suelo en cuanto al análisis físico y químico.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*. Eawag. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- ANA. (2010). *Estudio Hidrológico de las Cuencas Huancané y Suches*. Lima-Perú.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., & Bernhart, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142, 47–69. <https://doi.org/10.1055/s-2007-993713>
- Astorayme, M. (2017). *Análisis y evaluación comparativa de modelos hidrológicos agrupados y semidistribuidos aplicados al pronóstico de caudales diarios del río Chillón*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Asurza, F. A. (2017). *Comparación De Los Productos Trmm Y Gpm Para El Modelamiento Hidrológico En La Cuenca Del Río Huancané*. Tesis Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina: Lima - Peru.
- Aybar, C. (2016). *Modelamiento de la escorrentía en cuencas de montaña: caso de estudio río Vilcanota*. Tesis Ingeniería Geográfica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos: Lima - Peru.
- Aybar, C, Lavado-Casimiro, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe-Obando, O. (2017). *Uso del Producto Grillado "PISCO" de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sisitemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota técnica 001 SENAMHI-DHI-2017*. Lima - Peru.
- Aybar, Cesar, Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 0(0), 1. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Balairón, L. (2009). *Gestión de Recursos Hídricos*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Belizario, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú. *Rev. Investig. Altoandin.*, 17(1), 47–52. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2015.77>
- Cabrera, J. (2017). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Lima-Peru: Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil.
- Canales, M. (2015). *Modelación del Proceso Precipitación Escorrentía en la Cuenca del Río Ica* (Tesis Ingeniería Agrícola UNALM: Lima - Peru). <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14011>
- CGIAR-CSI. (2018). SRTM 90m Digital Elevation Database.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada* (13ª Ed.). Bogota: McGraw-Hill. Colombia.
- Clarke, R. T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, 19(1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90089-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90089-9)
- Cuadrat, J., & Pita, F. (2016). *Climatología*. Madrid, España: ediciones CATEDRA (Grupo Anaya, S.A.).



- Cuceloglu, G., Abbaspour, K. C., & Ozturk, I. (2017). Assessing the water-resources potential of Istanbul by using a soil and water assessment tool (SWAT) hydrological model. *Water (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/w9100814>
- Decreto Supremo 017-2009-AG. (n.d.). *Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor*.
- Del Carmen, R. (2001). *Modelación de la Evapotranspiración con Métodos de Balance de Agua*.
- Desta, H., & Lemma, B. (2017). SWAT based hydrological assessment and characterization of Lake Ziway sub-watersheds, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13(August), 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.002>
- Dile, Y. T., & Srinivasan, R. (2014). Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: An application in the blue Nile river basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 50(5), 1226–1241. <https://doi.org/10.1111/jawr.12182>
- FAO. (1995). Waterbase.
- Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico* (Segunda ed). España: Biblioteca virtual WASA-GN.
- Fernández, C. (2016). *Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota*.
- Fernández, C. (2017). *Modelamiento Hidrológico de la Región Hidrográfica del Titicaca*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología. Diciembre, 2017.
- Fernández, M., Vela, A., & Castaño, S. (1997). *La Utilización de Modelos en Hidrología*. España: Revista de la Facultad de Educación de Albacete.
- Fuka, D. R., Walter, M. T., Macalister, C., Degaetano, A. T., Steenhuis, T. S., & Easton, Z. M. (2014). Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 28(22), 5613–5623. <https://doi.org/10.1002/hyp.10073>
- Ghoraba, S. M. (2015). Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 583–594. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.018>
- Globeland30. (2010). GLC30 information service.
- Gobierno Regional Puno. (2014). *Estudio De Suelos Y Capacidad De Uso Mayor (Departamento De Puno)*. Puno - Perú.
- Grusson, Y., Anctil, F., Sauvage, S., & Sánchez, J. M. (2017). Testing the SWAT model with gridded weather data of different spatial resolutions. *Water (Switzerland)*, 9(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w9010054>
- Gungor, K. (2014). *SWAT: Soil Data for non-US Study Areas [Mensaje en un blog]*.
- Jia, S., Zhu, W., Lu, A., & Yan, T. (2011). A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3069–3079. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.009>



- Jimeno, P., Senent, J., Pérez, J., & Pulido, D. (2018). A comparison of SWAT and ANN models for daily runoff simulation in different climatic zones of peninsular Spain. *Water (Switzerland)*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/w10020192>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Linsley, R., Hohler, M., & Paulus, J. (1977). *Hidrologia para ingenieros*. Bogotá Colombia: Editorial McGRAW-Hill Latinoamericana, S.A.
- Mejía, J. A. (2012). *Hidrología Aplicada* (1ª Ed; Fondo Editorial, Ed.). Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Montecelos, Y. (2018). *Modelación del efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas (México y Cuba) bajo un escenario de cambio climático*. Tesis doctoral en Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *Model Evaluation guidelines*. 50(3), 885–900. <https://doi.org/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, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S., Arnold, J., & Kiniry, J. (2009). Soil and water assessment tool. Theoretical documentation version 2009.
- Nicks, A. D. (1974). *Stochastic Generation of the Occurrence, Pattern and Location of Maximum Amount of Daily Rainfall*. In: Statistical Hydrology, US Governmental Print Office, Washington, DC.
- Ortiz, O. (2015). Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica. *Tecnología y Ciencia Del Agua*, VI, 25–44.
- Proaño, M., Gavilanes, C., Valenzuela, P., & Cisneros, C. (2006). *Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato*.
- Rivas, J. (2016). *Implementación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) en la Simulación de Balance Hídrico en la Cuenca del Río Samalá, Diagnóstico y Servicios Prestados, Guatemala, C.A.* <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000238666>
- Rojas, R. (2009). *Hidrología Aplicada al Manejo de Cuencas* (Vol. 111). <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>
- Saha, S., Liu, Q., Meng, J., Liu, H., Chelliah, M., Ek, M., ... Han, Y. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015–1058. <https://doi.org/10.1175/2010bams3001.1>
- Tan, M. L., Ficklin, D. L., Dixon, B., Ibrahim, A. L., Yusop, Z., & Chaplot, V. (2015). Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow (Vol. 63). <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.014>
- Tomy, T., & Sumam, K. S. (2016). Determining the Adequacy of CFSR Data for Rainfall-Runoff Modeling Using SWAT. *Procedia Technology*, 24, 309–316.



<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.041>

- Uribe, N. (2010). Soil and Water Assessment Tool Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005.
- Urrutia, M. (2016). *Aplicación Del Modelo Swat Para La Simulación Del Ciclo Hidrológico De La Cuenca Alta Del Rio San Juan Bajo La Influencia De La Actividad Minera*. Escuela Colombiana de Ingenieria Julio Garavito.
- USDA-SCS. (1983). *National Engineering Handbook*. USDA, Washington, DC.
- Vauchel, P. (2005). *Hydraccess: Software for Management and processing of Hydro - meteorological data software*. Version 2.1.4. Free download www.mpl.ird.fr/hybam/utills/hydracces.htm.
- Villon, M. (2004). *Hidrología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Zambrano, M. (2017). *R Package "hydroGOF", Goodness-of-Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series*.
- Zubieta, R. (2013). *Modelado Hidrologico Distribuido De La Cuenca Amazonica Peruana Utilizando Precipitación Obtenida Por Satelite*.



ANEXOS

Anexo A: Código en “R” para la calibración del modelo hidrológico SWAT

```
#Calibracion del Modelo Hidrologico SWAT
#Este codigo es una adaptacion del creado por Ing.Carlos Fernandez
Palomino
#===== Cargar paquetes
#install.packages("zoo")
library(zoo)
#install.packages("hydroGOF")
library(hydroGOF)
#install.packages("data.table")
library(data.table)

#=====Configurar el directorio de trabajo
setwd("E:/TESIS/ModelTEMP/Scenarios/Default/TxtInOut")

#=====EJECUTAR SWAT
#system("SWAT2012.exe")
system("SWAT_64debug.exe") #aplicar a la segunda corrida

#=====LEER DATOS OBSERVADOS Y SIMULADOS
data <- read.csv("sim_vs_obs_Calibrado1.csv",header = T)#CON DATOS
OBSERVADOS
Qo_cal <- window(x = read.zoo(data[,c(1,3)], drop=FALSE), start =
"1984-01-01",end = "1999-12-31")
#Qo_cal <- as.numeric(Qo)

str(Qo_cal)

#Qs1 <- read.table("output.rch",skip = 9)#esta tabla contiene
descargas simuladas para la etapa de calibracion y validacion
Qs1 <- data.frame(fread("output.rch",skip=9L))

Qs <- Qs1[Qs1$V2==39,7]# selecciona los caudales a la salida de la
cuenca REACH=1, columna 7 que corresponde a los caudales
Qs_cal <- Qs[1:length(Qo_cal)]

#=====CALCULO DE LAS METRICAS DE EFICIENCIA
ggof(sim=Qs_cal, obs=Qo_cal,ftype = "dm", FUN=mean,col = c("red",
"blue"),gofs=c("NSE", "KGE", "R2", "RSR", "PBIAS"))

#=====VALIDACION
Qo_val <- window(x = read.zoo(data[,c(1,3)], drop=FALSE), start =
"2000-01-01",end = "2016-12-31")
Qs_val <- Qs[(length(Qo_cal)+1):(length(Qo_cal)+length(Qo_val))]
ggof(sim=Qs_val, obs=Qo_val,ftype = "dm", FUN=mean,col = c("red",
"blue"),gofs=c("NSE", "KGE", "R2", "RSR", "PBIAS"))

#=====CALIBRACION
# parametros de configuracion general
Num_hrus <- 981 # numero de HRUs
Num_subcuencas <- 41 # numero de HRUs

#=====CALIBRACION DE PARAMETROS DE HRU
file <- dir(pattern="hru")[1:Num_hrus]

for (i in 1:length(file))
```



```
{
  # read in HRU file
  hrufile<-file(file[i],"r+")
  text<-readLines(hrufile)
  close(hrufile)
  text[10] <- c("          0.800    | ESCO : Soil evaporation
compensation factor")
  text[11] <- c("          1.000    | EPCO : Plant uptake
compensation factor")
  text[44] <- c("          0.100    | SURLAG : Surface runoff lag
time in the HRU")

  hrufile<-file(file[i],"w+")
  writeLines(text,hrufile)
  close(hrufile)
}

rm(file,hrufile,text)

#=====CALIBRACION DE PARAMETROS DE PRACTICAS DE MANEJO DE SUELOS
file <- dir(,pattern="mgt")[1:Num_hrus]
porcentaje <- 12 #porcentaje de incremento o decremento poner el valor
5 ejemplo

for (i in 1:length(file))
{
  # read in HRU file
  hrufile<-file(file[i],"r+")
  text<-readLines(hrufile)
  close(hrufile)

  CN_value <- as.numeric(substr(text[11],start = 1 ,stop = 16
))*(1+porcentaje/100)

  text[11] <-
paste(sprintf("%10s", ""), sprintf("%.2f",CN_value), sprintf("%4s", ""), "
| CN2: Initial SCS CN II value",sep="")

  hrufile<-file(file[i],"w+")
  writeLines(text,hrufile)
  close(hrufile)
}
rm(file,hrufile,text,CN_value)

#=====CALIBRACION DE PARAMETROS DE FLUJO EN EL SUBSUELO
file <- dir(,pattern="gw")[1:Num_hrus]
RCHRG_DP <- 0.40 # RCHRG_DP : Deep aquifer percolation fraction"
[0.05] [0.0 - 1.0]
GWQMN <- 1000 #GWQMN : Threshold depth of water in the shallow
aquifer required for return flow to occur [mm] [1000]
GW_REVAP <- 0.02 #GW_REVAP : Groundwater \"revap\" coefficient"
[0.02] [0.02 - 0.20] (calibrara este valor tambirn)
REVAPMN <- 750 #REVAPMN: Threshold depth of water in the shallow
aquifer for \"revap\" to occur [mm] [750]

for (i in 1:length(file))
{
  # read in HRU file
  hrufile<-file(file[i],"r+")
  text<-readLines(hrufile)
```



```
close(hrufile)

text[6] <- paste(sprintf("%16.4f",GWQMN),sprintf("%4s",""),"| GWQMN
: Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return
flow to occur [mm]",sep="")
text[7] <- paste(sprintf("%16.4f",GW_REVAP),sprintf("%4s",""),"|
GW_REVAP : Groundwater \"revap\" coefficient",sep="")
text[8] <- paste(sprintf("%16.4f",REVAPMN),sprintf("%4s",""),"|
REVAPMN: Threshold depth of water in the shallow aquifer for \"revap\"
to occur [mm]",sep="")
text[9] <- paste(sprintf("%16.4f",RCHRG_DP),sprintf("%4s",""),"|
RCHRG_DP : Deep aquifer percolation fraction",sep="")

hrufile<-file(file[i],"w+")
writeLines(text,hrufile)
close(hrufile)
}

rm(file,hrufile,text,RCHRG_DP,GWQMN,GW_REVAP,REVAPMN)

#=====CALIBRACION DE PARAMETROS DE ENRUTAMIENTO
file <- dir(,pattern="rte")[1:Num_subcuencas]

for (i in 1:length(file))
{
  # read in HRU file
  hrufile<-file(file[i],"r+")
  text<-readLines(hrufile)
  close(hrufile)
  #text[6] <- c("          0.14      | CH_N2 : Manning's nvalue for main
channel")
  #text[7] <- c("          10.000    | CH_K2 : Effective hydraulic
conductivity [mm/hr]")
  #text[11] <- c("          0.950    | ALPHA_BNK : Baseflow alpha
factor for bank storage [days]")

  hrufile<-file(file[i],"w+")
  writeLines(text,hrufile)
  close(hrufile)
}

rm(file,hrufile,text)
```



Anexo B: Serie histórica de caudales

SERIE HISTORICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m3/s) ESTACION HIDROLOGICA : PUENTE HUANCANE

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1984	55.2	126.3	61.6	32.0	9.2	5.1	3.5	2.8	2.7	3.7	7.7	23.6	27.8
1985	95.0	67.5	60.2	67.6	25.6	13.8	5.7	3.5	6.6	5.5	9.6	18.2	31.6
1986	132.1	94.8	118.9	47.7	24.6	7.5	4.9	3.2	4.3	4.1	6.7	31.7	40.0
1987	70.5	44.8	20.6	15.7	6.7	4.0	3.7	1.9	1.3	1.3	4.0	5.7	15.0
1988	54.2	39.2	53.2	66.3	17.4	5.7	3.6	2.8	2.4	2.7	1.4	2.7	21.0
1989	19.3	31.6	41.2	21.3	8.1	4.2	3.7	2.1	1.6	1.8	2.6	2.6	11.7
1990	17.9	19.1	10.8	7.4	4.1	3.5	2.6	2.0	1.6	2.3	11.1	17.3	8.3
1991	20.5	22.5	26.1	25.1	13.0	7.3	5.2	4.1	3.9	3.8	5.7	8.8	12.2
1992	47.2	36.0	30.3	9.4	4.5	3.4	2.4	3.7	1.6	1.7	2.5	8.0	12.6
1993	45.2	31.7	30.3	25.8	11.4	5.9	3.8	2.8	3.1	5.0	5.9	35.7	17.2
1994	48.1	86.6	48.0	59.5	19.0	7.9	5.9	3.7	2.8	3.8	7.8	21.9	26.3
1995	40.4	24.0	50.8	17.2	6.5	4.3	3.4	2.9	2.8	2.8	4.0	4.1	13.6
1996	21.6	33.5	20.4	16.7	5.7	3.5	2.4	1.9	1.7	1.9	3.7	12.6	10.5
1997	56.6	90.3	96.9	42.7	11.0	5.9	3.6	3.8	2.6	4.1	8.5	4.8	27.6
1998	8.5	28.7	31.0	22.8	5.2	3.0	2.6	2.2	2.0	3.9	3.6	5.8	9.9
1999	14.0	19.1	52.7	26.4	10.7	4.2	2.4	2.2	3.1	4.3	3.9	4.7	12.3
2000	20.0	44.6	60.6	10.4	5.1	4.9	3.2	2.4	2.1	4.0	3.0	6.8	13.9
2001	94.3	76.2	123.6	32.2	16.5	8.0	5.7	3.4	4.2	5.1	5.2	8.2	31.9
2002	19.7	70.9	81.8	27.6	12.4	4.4	4.8	2.7	5.3	9.4	13.1	41.3	24.4
2003	82.3	83.8	120.7	52.5	10.3	7.3	5.9	5.5	4.1	4.1	6.2	9.6	32.7
2004	139.0	88.9	21.0	15.7	8.7	5.2	4.7	4.0	4.0	3.6	3.8	4.9	25.3
2005	18.2	72.7	21.5	16.4	7.4	3.6	2.5	1.8	1.2	4.1	4.3	9.3	13.6
2006	77.3	42.7	35.3	27.6	9.3	5.1	3.3	2.0	1.5	2.8	8.0	17.6	19.4
2007	47.2	23.1	62.8	36.1	20.4	9.1	4.8	3.5	3.8	3.3	4.9	9.8	19.1
2008	29.4	33.7	30.0	5.8	1.4	1.7	1.6	1.4	1.4	2.0	2.2	10.7	10.1
2009	26.5	23.6	21.7	13.1	4.5	3.4	2.2	1.8	2.4	2.4	3.5	7.9	9.4
2010	35.9	34.4	29.2	11.1	3.6	2.0	1.3	1.1	1.4	1.6	1.4	4.9	10.7
2011	14.0	37.7	56.9	28.4	8.6	3.3	2.8	2.3	2.4	6.4	5.6	10.9	14.9
2012	28.1	96.5	66.1	37.4	10.7	4.6	2.7	2.7	2.6	2.4	2.5	10.5	22.2
2013	50.6	57.3	54.4	18.0	10.0	6.5	6.1	3.3	2.5	2.8	4.1	8.5	18.7
2014	32.2	80.2	48.7	40.4	27.5	10.3	2.1	2.2	2.3	2.5	1.6	3.8	21.1
2015	51.0	60.5	35.2	42.3	17.3	6.0	3.1	2.7	3.1	3.2	5.3	14.8	20.4
2016	27.8	68.8	36.2	14.5	4.7	3.1	3.0	2.7	2.4	2.6	2.8	7.0	14.6

Fuente: Elaboración Propia.

MEDIA	46.67	54.29	50.26	28.28	10.94	5.38	3.62	2.76	2.75	3.49	5.04	11.95	18.29
DESV STD	32.59	28.31	29.69	16.69	6.69	2.52	1.34	0.91	1.24	1.60	2.79	9.49	18.79
MAXIMA	139.0	126.3	123.6	67.6	27.5	13.8	6.1	5.5	6.6	9.4	13.1	41.3	40.0
MINIMA	8.5	19.1	10.8	5.8	1.4	1.7	1.3	1.1	1.2	1.3	1.4	2.6	8.3



Anexo C: Serie generada de caudales modelo SWAT

SERIE GENERADA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m³/s)
ESTACION HIDROLOGICA : PUENTE HUANCANE

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1984	78.4	109.7	72.2	43.4	20.2	10.8	6.2	6.6	3.2	11.6	35.2	43.5	36.8
1985	63.8	45.3	56.1	72.3	21.2	10.6	3.9	2.7	12.5	6.6	46.8	75.4	34.8
1986	73.4	94.4	91.7	55.1	28.4	9.1	6.4	6.1	9.0	4.0	14.3	32.3	35.4
1987	65.2	34.9	25.0	20.1	3.7	1.5	5.0	0.8	0.1	4.3	13.0	11.1	15.4
1988	51.4	43.7	67.0	57.9	25.7	10.3	4.3	2.8	2.0	5.8	1.2	11.2	23.6
1989	36.0	48.5	42.6	19.2	5.7	2.4	1.1	1.5	1.8	1.4	3.3	6.3	14.2
1990	37.8	19.0	15.7	4.6	0.6	11.7	0.3	1.0	0.9	8.3	18.9	18.5	11.5
1991	41.2	44.3	54.4	22.0	7.6	14.5	2.2	0.9	1.8	1.0	6.8	24.7	18.5
1992	54.0	28.1	18.5	5.5	1.0	0.9	0.9	13.4	2.8	5.1	5.5	30.8	13.9
1993	58.1	26.1	25.8	22.7	6.3	1.6	0.7	1.3	1.2	4.5	16.1	23.8	15.7
1994	37.4	50.5	47.8	38.9	15.4	4.5	2.5	1.6	1.8	3.6	9.2	27.5	20.1
1995	40.4	45.2	57.5	17.0	7.4	3.8	2.7	1.7	1.6	1.5	7.4	12.1	16.5
1996	48.9	29.8	29.0	16.5	4.9	0.9	0.6	0.9	0.9	0.9	12.9	24.6	14.2
1997	57.3	67.4	107.2	50.9	16.8	8.3	5.0	5.2	4.9	6.8	22.4	10.3	30.2
1998	19.5	32.7	30.7	20.5	3.8	1.7	0.7	0.3	0.0	3.2	13.7	11.1	11.5
1999	17.5	18.9	49.4	23.0	7.4	1.1	0.6	0.2	3.4	4.8	5.4	9.8	11.8
2000	23.9	35.8	25.8	5.7	1.8	2.7	0.4	1.3	0.7	18.1	2.8	19.1	11.5
2001	79.1	53.1	105.9	37.1	25.9	9.6	6.4	4.6	3.4	12.5	11.1	16.7	30.5
2002	20.6	54.0	57.3	30.8	17.1	5.4	4.8	2.2	4.4	20.0	19.3	31.3	22.3
2003	82.3	62.5	77.1	41.4	16.5	7.9	4.7	4.2	4.1	9.0	10.6	25.8	28.8
2004	117.1	71.5	41.6	26.1	10.3	4.7	3.2	4.3	2.9	3.9	9.6	14.0	25.8
2005	20.5	66.3	24.9	14.5	3.4	1.6	1.0	0.8	1.2	7.8	7.3	15.4	13.7
2006	75.5	31.1	17.5	23.6	5.3	1.5	0.8	0.5	2.0	6.3	8.7	20.2	16.1
2007	35.7	19.5	47.5	22.2	11.0	3.2	1.6	0.9	5.3	1.3	8.2	14.6	14.2
2008	29.8	22.7	27.7	8.0	3.3	0.9	0.5	0.2	0.3	6.0	6.0	36.9	11.9
2009	35.1	20.6	13.4	4.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	1.6	9.2	17.1	8.5
2010	46.6	50.4	41.5	18.1	7.5	3.2	2.2	1.3	0.6	5.1	0.8	18.7	16.3
2011	24.4	38.0	37.7	15.9	4.2	1.6	1.5	0.9	5.3	11.0	4.3	20.4	13.7
2012	44.6	56.3	51.2	41.0	12.4	4.7	2.8	1.7	1.8	2.8	4.3	35.4	21.6
2013	48.8	86.0	37.8	18.0	13.4	5.1	3.6	2.7	1.5	10.6	10.3	20.7	21.5
2014	39.4	51.2	30.5	17.1	4.5	1.8	2.2	1.4	7.2	4.7	1.7	11.0	14.4
2015	45.3	41.1	27.0	30.0	9.7	2.6	3.7	4.4	4.7	5.7	13.1	29.9	18.1
2016	31.8	81.9	27.6	18.4	3.8	1.4	1.4	0.7	1.9	5.3	6.0	16.1	16.4

Fuente: Elaboración Propia.

MEDIA	47.91	47.90	44.94	26.12	9.91	4.60	2.55	2.40	2.89	6.22	11.07	22.30	18.57
DESV STD	22.28	22.58	24.49	16.41	7.82	3.91	1.94	2.66	2.71	4.53	9.46	13.10	19.07
MAXIMA	117.1	109.7	107.2	72.3	28.4	14.5	6.4	13.4	12.5	20.0	46.8	75.4	36.8
MINIMA	17.5	18.9	13.4	4.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.8	6.3	8.5



**SERIE GENERADA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m³/s)
ESTACION HIDROLOGICA : PUENTE HUANCANE - ESCENARIO 1**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1984	58.8	83.6	63.9	43.1	22.5	10.3	5.8	5.9	2.7	12.2	41.1	45.7	33.0
1985	66.6	59.3	69.4	73.9	31.9	16.6	6.9	4.8	13.0	5.9	43.7	65.7	38.2
1986	76.1	93.9	93.9	64.8	31.3	12.6	7.7	7.9	13.0	7.1	11.5	32.5	37.7
1987	48.3	27.3	23.8	12.8	3.6	2.1	11.1	1.8	0.4	6.9	15.3	11.3	13.7
1988	28.5	28.4	80.1	65.6	33.3	13.1	5.1	3.3	2.4	6.6	1.9	11.8	23.3
1989	36.5	48.8	39.5	26.5	9.1	4.0	2.1	2.5	3.1	1.9	2.6	6.2	15.2
1990	36.6	19.8	13.9	6.6	0.8	13.0	0.4	0.8	1.8	14.6	18.9	21.7	12.4
1991	37.7	37.5	55.3	21.4	13.4	18.3	3.6	2.1	2.6	1.8	5.2	15.5	17.9
1992	41.5	24.3	14.5	4.7	1.0	0.7	0.6	23.1	3.5	5.3	5.9	17.3	11.9
1993	46.6	27.0	33.9	24.3	10.4	3.4	2.0	2.6	2.1	6.2	24.4	35.8	18.2
1994	41.9	67.7	44.6	40.8	16.1	5.7	3.5	2.4	1.7	3.1	6.2	20.6	21.2
1995	25.7	32.5	45.7	15.1	7.3	2.6	1.8	1.1	1.2	1.8	9.5	19.0	13.6
1996	36.8	24.4	28.2	12.9	3.0	0.9	0.6	0.3	0.9	0.7	10.1	15.0	11.2
1997	43.8	58.8	90.4	51.7	19.2	8.2	4.7	5.9	8.5	6.7	23.2	12.2	27.8
1998	21.2	30.2	25.5	17.0	2.7	1.4	0.6	0.2	0.0	3.8	8.5	4.1	9.6
1999	11.8	13.6	49.7	18.5	6.7	2.1	1.0	0.5	4.6	6.7	5.2	4.4	10.4
2000	26.6	41.8	27.1	9.7	4.3	3.8	1.3	1.8	1.2	19.4	2.3	14.6	12.8
2001	65.3	53.0	111.3	46.4	36.2	13.6	7.8	5.8	4.3	12.1	12.4	16.6	32.1
2002	20.5	48.5	61.1	32.8	17.8	6.5	6.1	3.1	5.3	24.2	21.9	31.5	23.3
2003	58.2	63.1	79.8	46.8	21.0	10.0	5.8	4.9	4.3	4.4	5.1	18.0	26.8
2004	65.4	59.7	33.5	20.7	6.3	3.4	2.4	4.1	5.4	1.8	8.7	7.3	18.2
2005	15.9	49.9	18.3	11.6	3.5	1.6	1.0	0.8	1.3	8.3	6.7	11.2	10.8
2006	60.3	26.5	17.0	16.8	3.1	1.8	1.0	0.7	1.6	4.2	9.6	17.1	13.3
2007	27.1	15.4	46.3	23.6	13.6	4.6	2.4	1.5	5.8	1.7	8.7	16.2	13.9
2008	28.0	30.0	33.5	10.5	4.5	1.8	1.2	0.6	0.6	7.5	4.2	24.1	12.2
2009	36.1	21.5	15.4	5.0	1.0	0.4	0.2	0.0	0.3	1.1	8.0	17.4	8.9
2010	42.8	50.9	39.9	20.4	9.9	4.2	2.9	1.9	1.0	3.4	0.9	15.2	16.1
2011	14.8	37.2	30.5	13.7	5.1	2.1	1.8	1.0	5.9	9.0	4.0	17.5	11.9
2012	33.7	62.9	55.1	40.9	16.0	7.0	4.0	2.6	2.5	3.6	5.2	31.3	22.1
2013	38.1	67.1	48.3	32.2	15.0	5.3	3.9	2.7	3.9	15.3	10.7	29.2	22.6
2014	43.7	57.8	30.6	17.8	5.6	2.9	2.2	2.5	4.1	6.0	1.8	13.1	15.7
2015	47.6	41.0	27.3	26.6	7.0	2.9	1.9	2.1	6.8	10.3	11.1	23.5	17.3
2016	19.2	77.4	28.7	21.4	5.3	2.1	2.1	1.3	5.6	6.5	4.6	14.9	15.8

Fuente: Elaboración Propia.

MEDIA	39.44	44.87	44.72	27.17	11.75	5.74	3.20	3.11	3.68	6.98	10.89	19.92	17.97
DESV STD	16.48	20.47	24.93	18.25	10.09	4.95	2.61	4.08	3.19	5.38	10.14	12.37	18.46
MAXIMA	76.1	93.9	111.3	73.9	36.2	18.3	11.1	23.1	13.0	24.2	43.7	65.7	38.2
MINIMA	11.8	13.6	13.9	4.7	0.8	0.4	0.2	0.0	0.0	0.7	0.9	4.1	8.9



**SERIE GENERADA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m³/s)
ESTACION HIDROLOGICA : PUENTE HUANCANE - ESCENARIO 2**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
1984	60.1	87.5	69.0	49.3	26.9	12.7	6.8	5.9	3.2	10.3	46.0	51.1	35.7
1985	76.0	69.0	77.4	71.2	35.0	19.3	8.3	5.9	11.2	5.6	45.7	70.3	41.2
1986	81.9	106.8	97.7	72.3	37.9	16.1	9.8	8.1	14.8	7.4	13.2	37.9	42.0
1987	45.2	33.2	27.1	14.4	4.7	3.1	13.6	2.0	0.9	5.7	18.3	16.6	15.4
1988	27.8	27.4	75.2	62.4	36.4	15.3	6.0	4.1	3.0	5.0	1.8	13.9	23.2
1989	43.5	62.6	45.4	33.7	17.1	7.8	4.0	3.7	4.2	2.4	3.3	8.6	19.7
1990	41.0	28.7	14.9	9.2	1.7	24.8	1.2	0.6	2.4	13.7	19.5	22.5	15.0
1991	41.4	41.6	55.7	27.5	17.6	38.4	5.3	2.9	3.0	2.0	6.2	21.5	21.9
1992	41.6	21.8	15.6	6.2	1.8	1.6	1.3	22.1	3.1	4.0	6.9	21.2	12.3
1993	41.5	26.1	35.5	28.4	15.6	6.8	3.4	3.4	2.8	5.3	25.8	47.8	20.2
1994	50.5	84.1	54.6	46.6	22.2	8.6	5.3	3.7	2.8	3.4	7.4	28.1	26.4
1995	27.8	35.8	48.3	18.0	10.8	3.9	2.6	1.7	1.5	1.7	9.3	23.3	15.4
1996	36.9	24.1	31.7	14.6	3.7	1.6	1.1	0.7	1.0	0.7	11.0	15.4	11.9
1997	42.1	59.0	103.1	57.6	25.4	11.1	6.1	6.7	7.9	7.4	27.6	13.3	30.6
1998	22.1	34.5	33.3	22.1	7.2	3.7	1.9	1.1	0.5	4.4	11.6	5.5	12.3
1999	12.4	15.7	50.5	19.9	11.1	4.4	2.2	1.4	5.1	5.5	6.7	5.0	11.6
2000	29.2	46.4	35.2	14.7	7.4	7.4	2.2	2.1	1.3	15.4	1.7	18.0	15.1
2001	62.5	49.2	121.0	55.9	44.9	17.6	9.1	6.6	5.0	10.8	12.5	17.3	34.4
2002	20.5	50.3	67.7	42.4	24.0	9.4	8.2	3.9	5.8	17.9	19.8	34.5	25.4
2003	52.4	71.9	91.6	55.3	28.4	15.8	7.6	5.7	5.5	4.6	5.9	20.8	30.4
2004	71.3	69.8	38.5	24.9	8.3	4.6	3.2	4.6	5.4	1.8	12.1	9.5	21.2
2005	13.6	64.3	23.0	12.6	4.9	2.2	1.5	1.1	1.2	5.4	6.7	11.8	12.4
2006	61.8	24.7	18.4	20.0	6.5	3.1	1.8	1.3	1.7	4.0	10.7	20.3	14.5
2007	29.0	15.3	50.8	28.5	17.6	5.6	3.3	2.2	5.2	1.7	8.3	18.5	15.5
2008	26.5	30.7	32.8	12.9	6.4	2.6	1.8	1.1	0.8	6.6	4.7	29.0	13.0
2009	39.8	28.3	21.0	8.8	2.6	1.4	1.0	0.5	0.6	1.1	8.9	17.5	11.0
2010	46.1	60.6	46.9	27.0	14.0	5.4	3.8	2.5	1.5	3.2	1.2	15.8	19.0
2011	17.3	43.9	33.0	20.1	10.1	3.7	2.9	1.8	8.0	8.2	3.7	22.1	14.6
2012	32.6	64.7	58.0	38.5	19.4	8.5	4.9	3.4	2.8	2.9	5.2	33.9	22.9
2013	37.9	81.3	55.8	35.6	19.8	8.0	5.3	3.8	5.1	12.9	10.0	33.1	25.7
2014	44.3	67.8	40.1	24.6	9.2	4.5	3.5	2.9	4.2	5.8	2.0	15.6	18.7
2015	50.7	48.1	33.3	28.6	11.0	4.6	3.0	2.9	7.6	8.2	10.4	27.4	19.7
2016	16.8	81.0	33.1	22.2	6.8	3.2	3.3	1.8	4.4	5.3	4.5	14.4	16.4

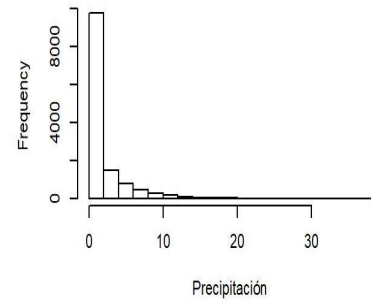
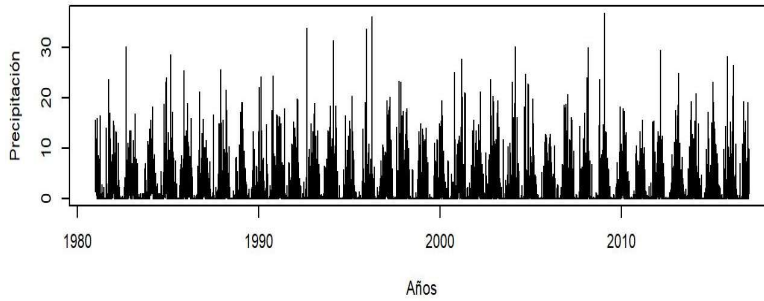
Fuente: Elaboración Propia.

MEDIA	40.73	50.19	49.54	31.08	15.65	8.69	4.40	3.70	4.04	6.07	11.77	23.08	20.20
DESV STD	17.57	23.56	26.25	18.44	11.46	7.91	2.96	3.84	3.16	4.22	10.92	13.73	20.75
MAXIMA	81.9	106.8	121.0	72.3	44.9	38.4	13.6	22.1	14.8	17.9	46.0	70.3	42.0
MINIMA	12.4	15.3	14.9	6.2	1.7	1.4	1.0	0.5	0.5	0.7	1.2	5.0	11.0

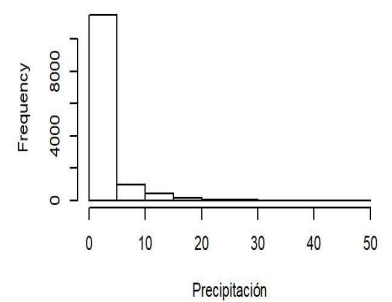
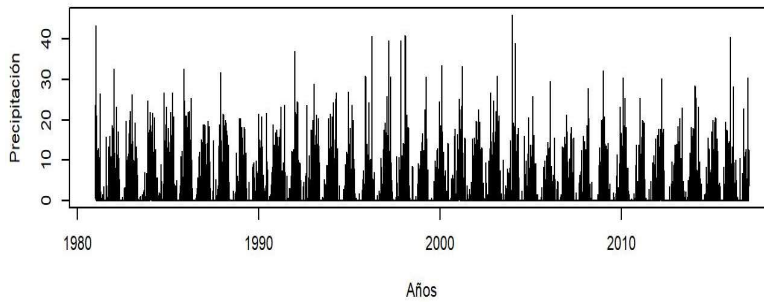


Anexo D: Gráficos a escala diaria precipitación

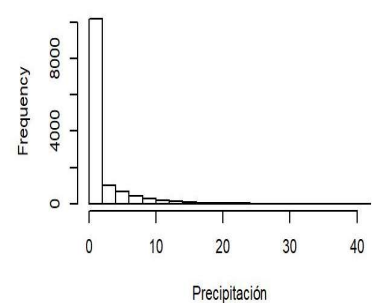
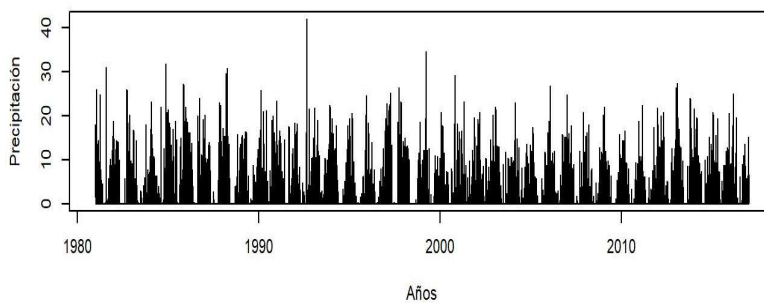
Estación: MUÑANI



Estación: PUTINA

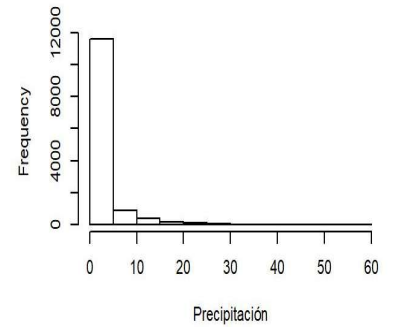
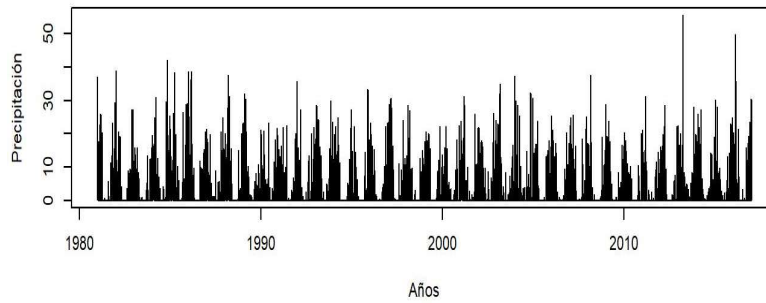


Estación: ANANEA

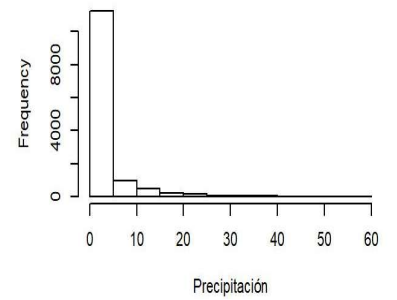
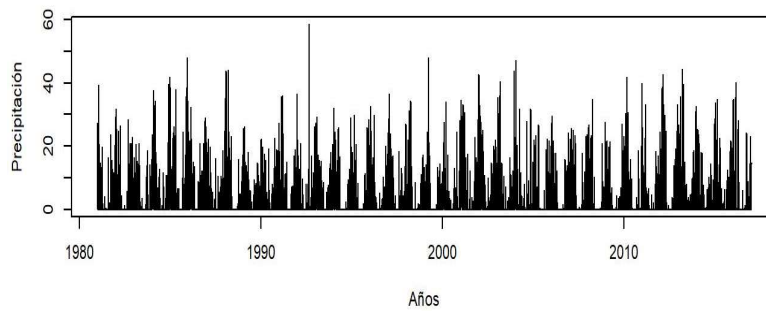




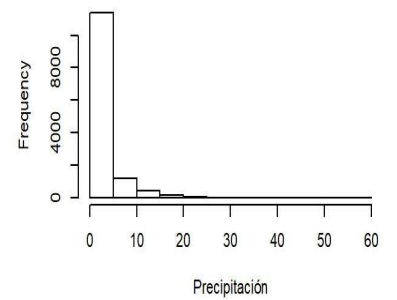
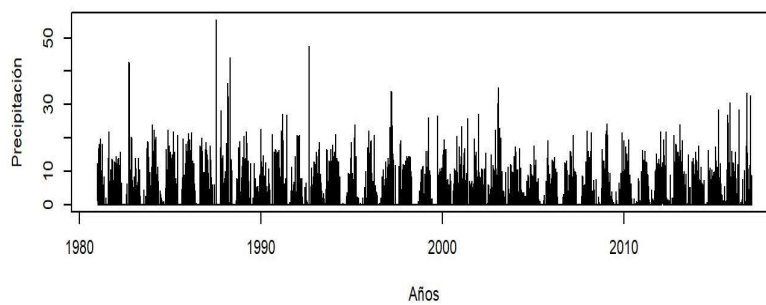
Estación: HUANCANÉ



Estación: HUARAYA MOHO

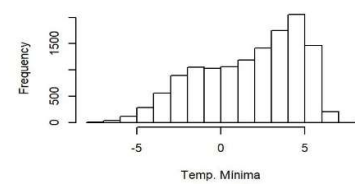
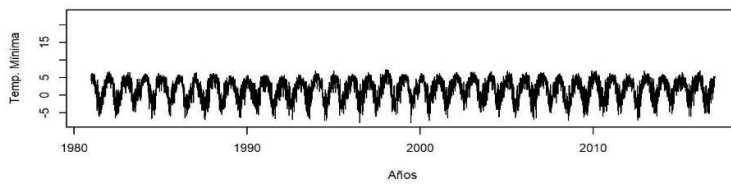
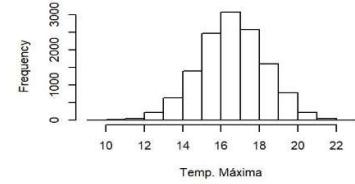
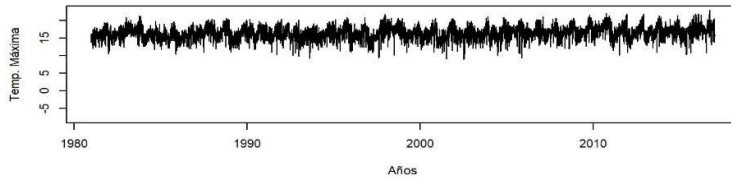


Estación: COJATA

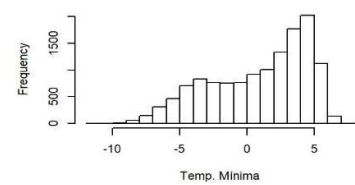
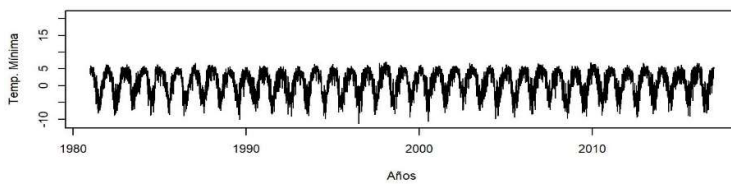
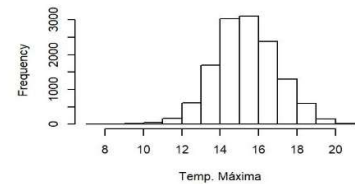
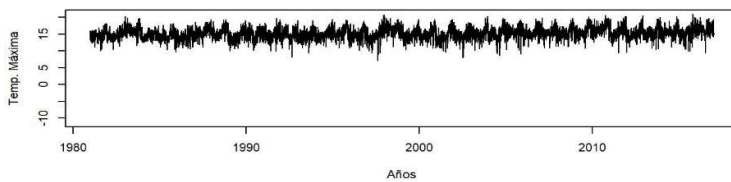


Anexo E: Gráficos a escala diaria temperatura máxima y mínima

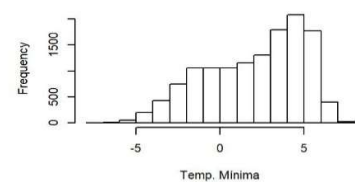
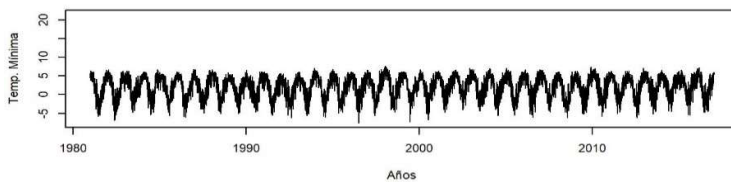
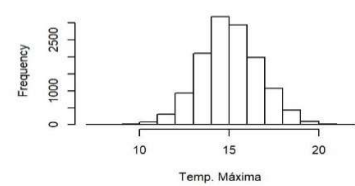
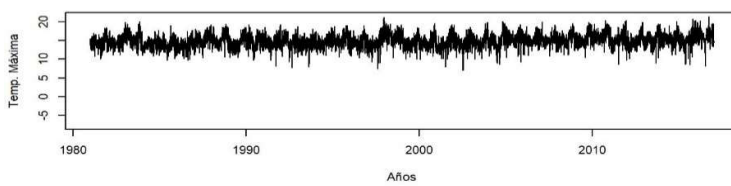
Estación: MUÑANI



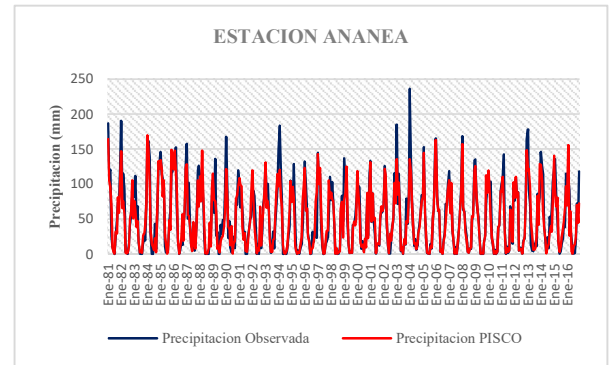
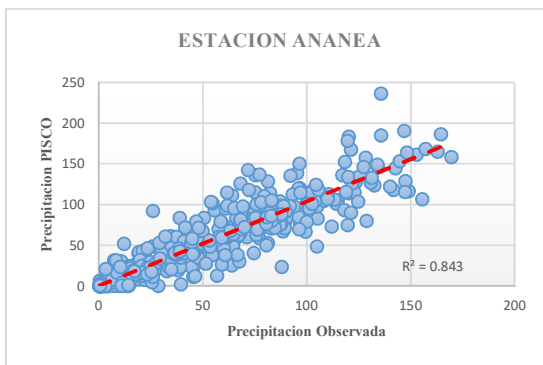
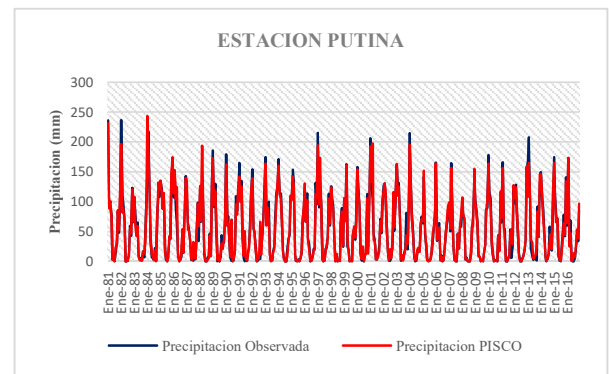
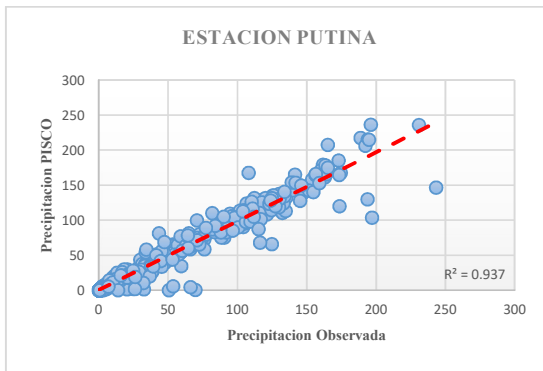
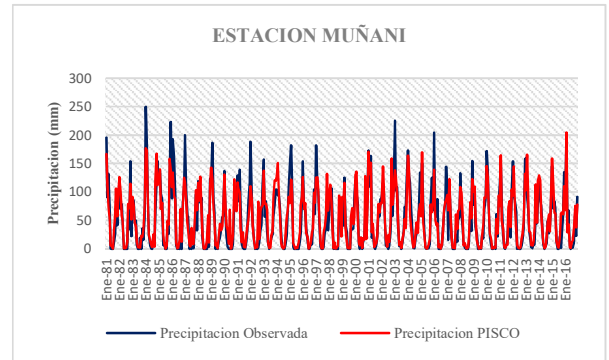
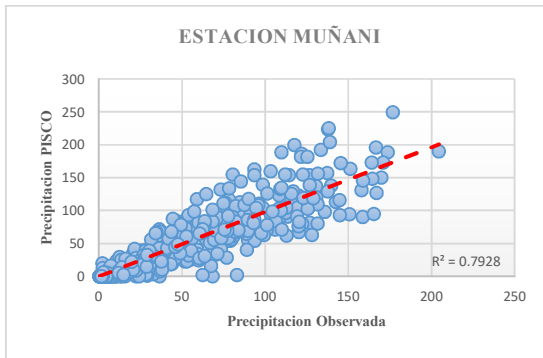
Estación: HUANCANÉ

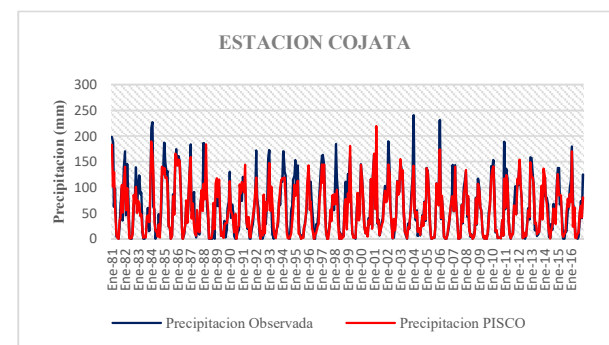
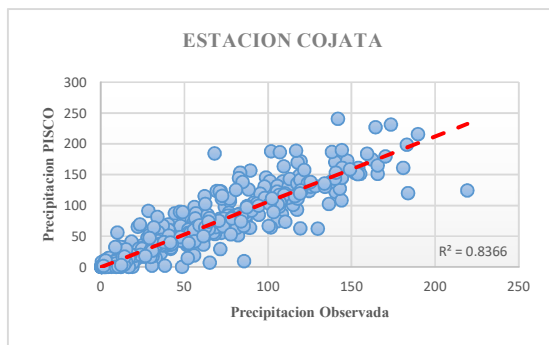
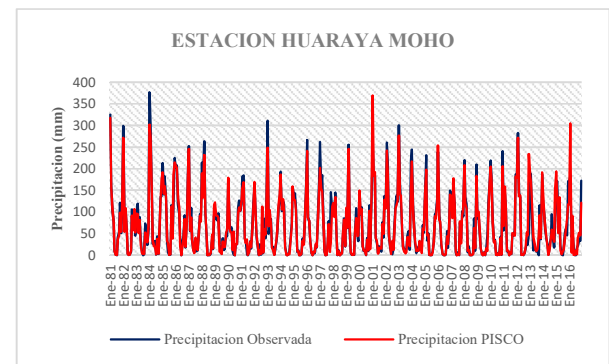
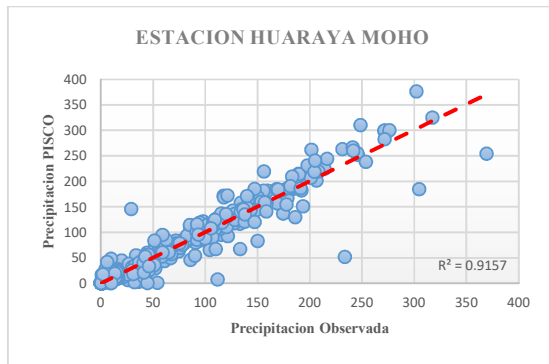
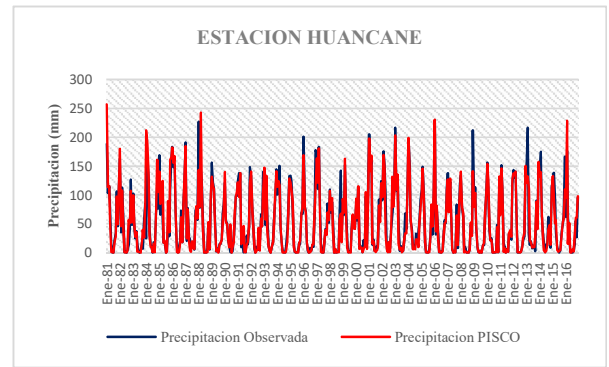
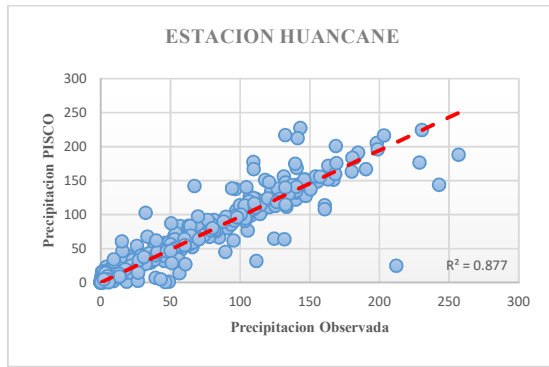


Estación: HUARAYA MOHO

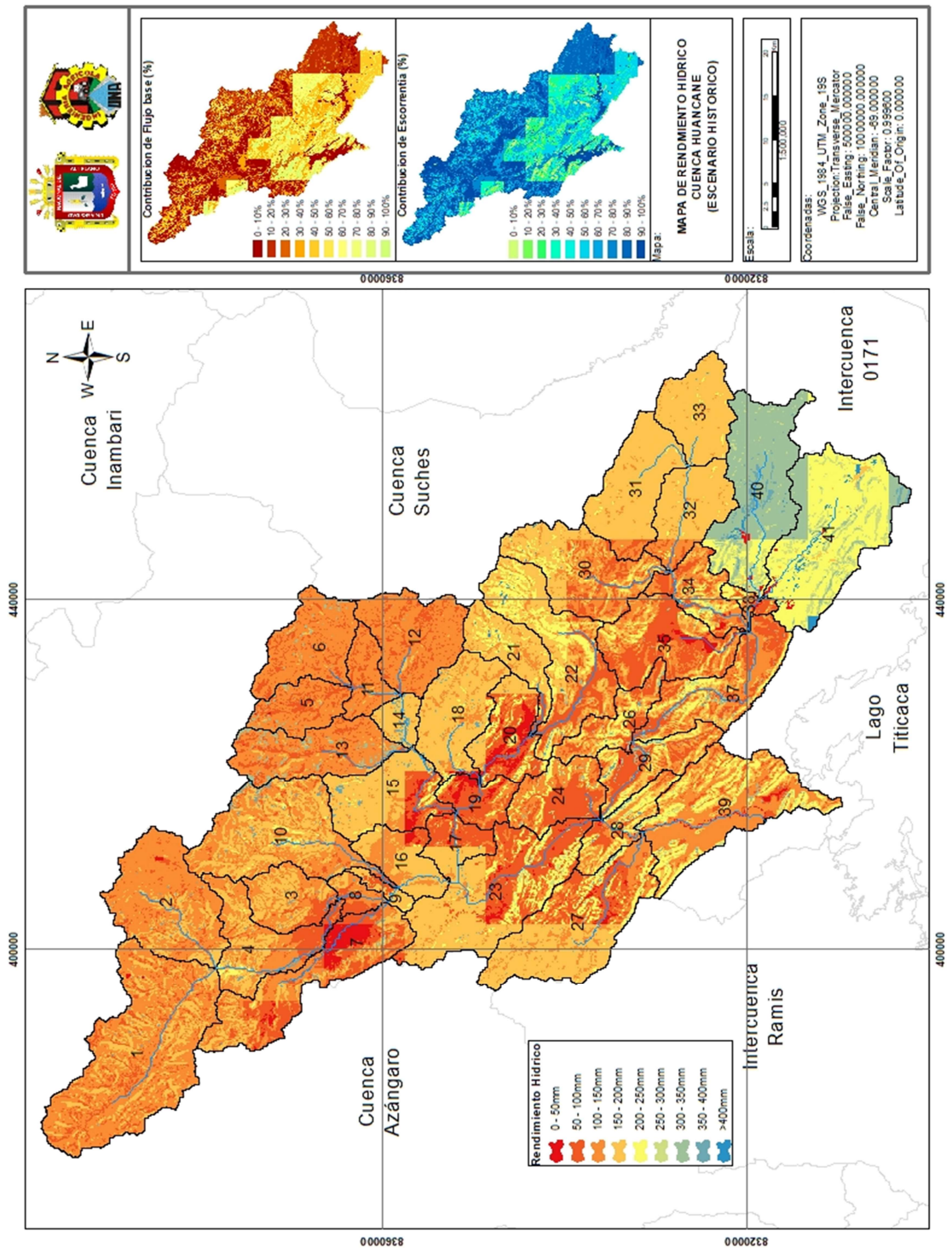


Anexo F: Análisis de precipitación mensual

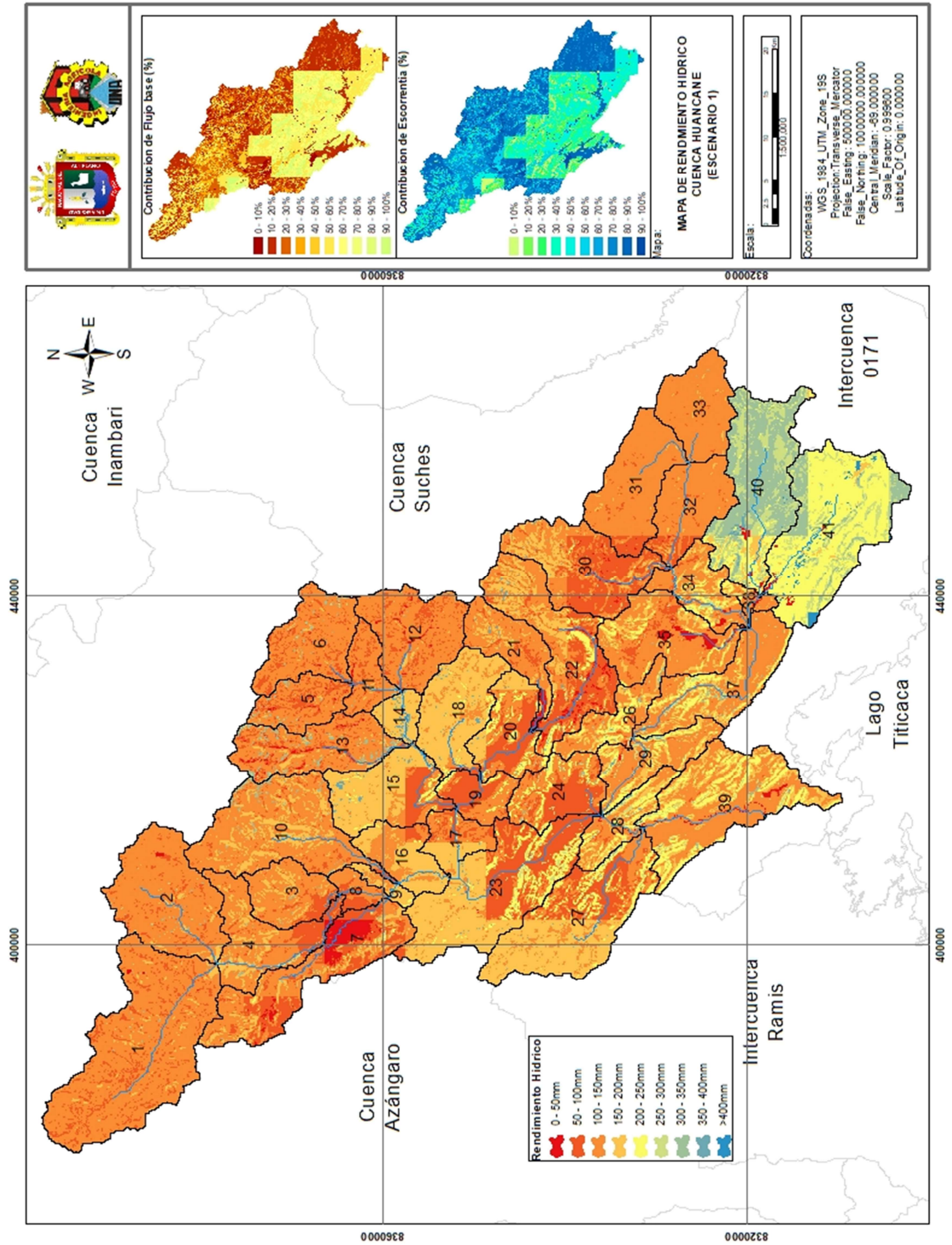




Anexo G.1: Mapa de rendimiento hídrico con registro histórico



Anexo G.2: Mapa de rendimiento hídrico escenario 1



Anexo G.3: Mapa de rendimiento hídrico escenario 2

