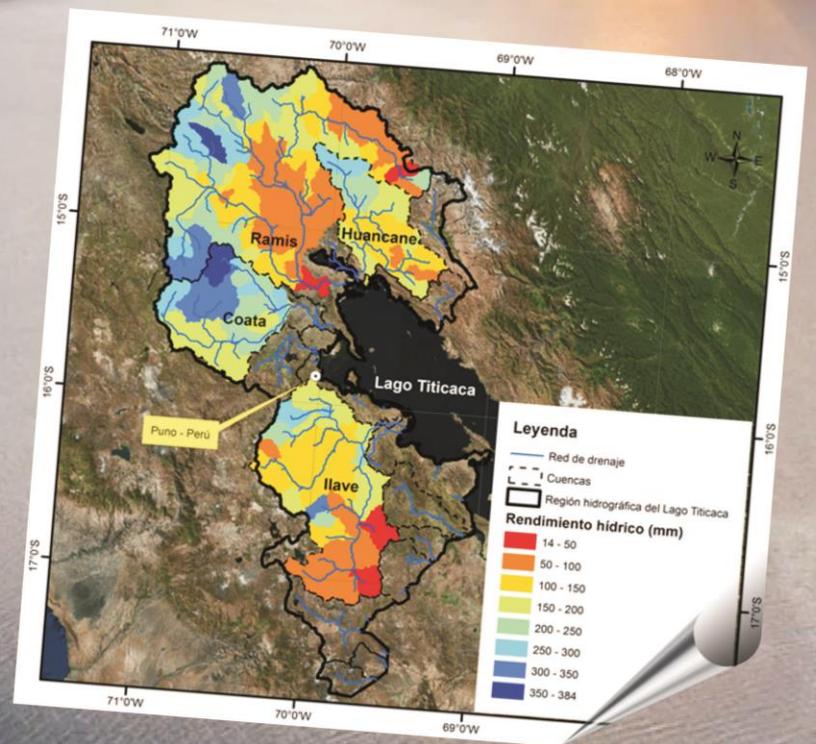


# MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA REGIÓN HIDROGRÁFICA DEL TITICACA



# MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA REGIÓN HIDROGRÁFICA DEL TITICACA





## **DIRECTORIO**

**Dr. Ken Takahashi Guevara**  
Presidente Ejecutivo del SENAMHI

**Ing. Oscar Felipe Obando**  
Director de la Dirección de Hidrología del SENAMHI

**Mg. Sc. Julia Acuña Azarte**  
Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del  
SENAMHI

## **REVISOR DEL ESTUDIO**

**Mg. Sc. Julia Acuña Azarte**  
Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del  
SENAMHI

## **RESPONSABLE DEL ESTUDIO**

**Mg. Sc. Carlos Fernández Palomino**  
Especialista en Hidrología del SENAMHI

## **DISEÑO, DIAGRAMACIÓN Y EDICIÓN**

**Bach. Miriam Casaverde Riveros**  
Especialista en Hidrología VI del SENAMHI

Lima - Perú  
Diciembre - 2017

---

**Citar como:**

Fernández, C. Modelamiento Hidrológico de la Región Hidrográfica del Titicaca. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología. Diciembre, 2017.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 Justificación .....	2
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
2. EL MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Modelamiento hidrológico.....	3
2.1.1 Precipitación.....	4
2.1.2 Evapotranspiración.....	4
2.1.3 Infiltración y percolación .....	4
2.1.4 Escorrentía superficial .....	5
2.1.5 Escorrentía sub-superficial .....	5
2.2 Manejo integral de cuencas .....	5
2.2.1 La cuenca como unidad territorial de manejo .....	6
2.3 Modelo SWAT.....	7
2.3.1 Antecedentes del desarrollo del modelo SWAT.....	7
2.3.2 Componentes del modelo SWAT.....	8
2.3.3 Enfoque del modelo SWAT .....	9
2.3.4 Etapas de implementación de un modelo hidrológico SWAT .....	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1 Área de estudio .....	17
3.1.1 Climatología.....	17
3.2 Datos.....	19
3.3 Metodología .....	20
3.3.1 Configuración y parametrización del modelo SWAT .....	21
3.3.2 Calibración y validación del modelo SWAT .....	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	24
4.1 Calibración y validación del modelo SWAT .....	24
4.1.1 Parámetros calibrados del modelo SWAT .....	24
4.1.2 Desempeño del modelo SWAT en la etapa de calibración y validación .....	24
4.1.3 Hidrogramas simulados versus observados en la etapa de calibración y validación.....	25
4.2 Balance hídrico y verificación del índice de flujo base .....	32
5. CONCLUSIONES .....	39
6. RECOMENDACIONES .....	40
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Ciclo Hidrológico.....	3
Figura 2-2. Tipos de Formación de Escorrentía Superficial.....	5
Figura 2-3. Esquema del desarrollo histórico del SWAT y modelos adoptados.....	8
Figura 2-4. Componentes del modelo SWAT .....	8
Figura 2-5. Representación del ciclo hidrológico en SWAT.....	10
Figura 2-6. Representación de movimientos del agua en SWAT .....	12
Figura 3-1. Ubicación del área de estudio y la red de estaciones hidrométricas.....	18
Figura 4-1. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración (periodo 1985-1999) y validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Huancané en la estación hidrológica de Puente Huancané. ....	26
Figura 4-2. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración (periodo 1985-1999) y validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Ramis en la estación hidrológica de Puente Ramis.....	27
Figura 4-3. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Ramis en la estación hidrológica de Puente Azángaro en la sub-cuenca Azángaro.....	28
Figura 4-4. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración (periodo 1985-1999) y validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Coata en la estación hidrológica de Puente Unocolla. ....	29
Figura 4-5. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Coata en la estación hidrológica de Puente Mocayache de la sub-cuenca Lampa. ....	30
Figura 4-6. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración (periodo 1985-1999) y validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río llave en la estación hidrológica de Puente llave.....	31
Tabla 4-4. Promedio anual del balance hídrico (periodo 1985-2015) de las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave de la región hidrográfica del Titicaca. ....	34
Figura 4-7. Distribución espacial de la precipitación media anual (periodo 1985-2015) para las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave de la Región hidrográfica del Titicaca. ....	35
Figura 4-8. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual (periodo 1985-2015) para las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave de la Región hidrográfica del Titicaca.....	36
Figura 4-9. Distribución espacial del rendimiento hídrico media anual (periodo 1985-2015) para las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave de la Región hidrográfica del Titicaca. ....	37
Figura 4-10. Distribución espacial del índice de flujo base para las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave de la Región hidrográfica del Titicaca.....	38

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1. Tipo de dato, resolución y fuente de datos.....	20
Tabla 3-2. Esquema de clasificación del desempeño del modelo SWAT .....	23
Tabla 4-1. Valores de los parámetros del modelo SWAT calibrado. En la columna que corresponde al código del parámetro “v” (“r”) indica que el parámetro fue sustituido por un cierto valor del rango (multiplicado por 1 + cierto valor de cambio relativo).....	24
Tabla 4-2. Estadísticas de medida de desempeño del modelo SWAT en la etapa de calibración y validación a paso diario.....	25
Tabla 4-3. Estadísticas de medida de desempeño del modelo SWAT en la etapa de calibración y validación a paso mensual .....	25
Tabla 4-4. Promedio anual del balance hídrico (periodo 1985-2015) de las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave de la región hidrográfica del Titicaca. ....	34

## RESUMEN

La cuantificación del potencial hídrico de una cuenca hidrográfica es parte esencial en la gestión de los recursos hídricos en el Perú. Así, este estudio se enfoca en la caracterización del potencial hídrico de las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave de la región hidrográfica del Titicaca. Para tal fin, se realizó el modelamiento hidrológico de las cuencas utilizando el modelo semi-distribuido SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Primero se evaluó el desempeño del modelo hidrológico SWAT en la simulación de descargas diarias y mensuales, en la etapa de calibración y validación. Segundo, se determinó el balance hídrico de los principales componentes del proceso hidrológico en base al modelo hidrológico calibrado.

Los resultados muestran que tanto en la etapa de calibración y validación del modelo, el desempeño de SWAT en la simulación de descargas diarias es bueno en términos del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE entre 0.65 - 0.75) en todas las cuencas de estudio y de acuerdo a la medida estadística del porcentaje de bias (PBIAS) se tiene un desempeño muy bueno (PBIAS < 10%) del modelo en las cuencas del río Huancané, Coata e llave; y un desempeño bueno (PBIAS entre 10-15%) en la cuenca del río Ramis. El desempeño del modelo en la simulación de descargas mensuales aún son mucho mejores siendo estos muy buenos de acuerdo a ambas medidas de eficiencia (NSE > 0.75 y PBIAS < 10%). Además del buen desempeño del modelo en la simulación de descargas, se verificó que el modelo tiene la capacidad de cuantificar la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base en términos del índice de flujo base (IBF) en todas las cuencas de estudio.

El balance hídrico promedio anual de los principales componentes del ciclo hidrológico para el período 1985-2015 en la cuenca del río Ramis experimenta mayor aporte de precipitación (700.1 mm), seguida por Coata (687.6 mm), Huancané (636.6 mm) e llave (574.4 mm). La cuenca del río Ramis experimenta la mayor pérdida del sistema hacia la atmósfera por evapotranspiración real (541.7 mm, 77% de la precipitación), seguida por Huancané (470.0 mm, 74% de la precipitación), llave (449.8 mm, 78% de la precipitación) y Coata (446.7 mm, 65% de la precipitación); en consecuencia, la cuenca con mayor rendimiento hídrico es la cuenca del río Coata (241.8 mm), seguida por Huancané (166.9 mm), Ramis (158.9mm) e llave (125.6 mm).

Finalmente, en este estudio se reporta los mapas de la variabilidad espacial de los principales componentes del balance hídrico (media anual del período 1985-2015) como la precipitación, evapotranspiración real, rendimiento hídrico e índice de flujo base. Estos mapas serán de gran utilidad para el mejor conocimiento de la disponibilidad de los recursos hídricos y de soporte para la planificación adecuada de los recursos hídricos, por los gestores de toma de decisiones.

## 1. INTRODUCCIÓN

A medida que la demanda de agua aumenta en todo el mundo, es probable que disminuya la disponibilidad del recurso hídrico en muchas regiones debido al crecimiento de la población, la industrialización, el uso de la tierra y el cambio climático (Cuceloglu et al. 2017). Por lo que es esencial la cuantificación de los recursos hídricos con la finalidad de proporcionar la información estratégica necesaria para la planificación a largo plazo de la seguridad hídrica. En ese sentido, para un mejor conocimiento de la disponibilidad de los recursos hídricos es imprescindible la modelización del ciclo hidrológico.

Así, este estudio enfoca en el modelamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas de la Región Hidrográfica del Titicaca con el propósito de investigar la variabilidad espacio-temporal del potencial hídrico de los principales ríos. Entre los diversos estudios hidrológicos que han cuantificado la disponibilidad de los recursos hídricos en la Región hidrográfica del Titicaca (RHT); se citan: en la cuenca de Huancané (Ancco 2010), Ramis (Vera-Arévalo and Felipe-Obando 2011; Lujano Laura et al. 2016) , Coata (Lujano 2013; Herrera 2015; Santos-Villar 2016) e Ilave (Lujano 2013; Ticona 2016). Estos estudios fueron realizados utilizando modelos hidrológicos agregados lo cuales permiten caracterizar la hidrología a escala de cuenca y tienen limitaciones para la caracterización espacial del potencial hídrico. Frente a ello, el uso de modelos hidrológicos semi-distribuidos y distribuidos es adecuado.

Por tanto, en el presente estudio, se utiliza el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool). SWAT tiene la capacidad de simular el balance de agua de manera espacial considerando condiciones de tipo de suelo, uso de suelo, topografía y clima (Arnold et al. 1998). SWAT ha ganado la aceptación internacional como una herramienta robusta de modelización interdisciplinaria de cuencas como se evidencia por las conferencias internacionales de SWAT y centenares de artículos científicos revisados por expertos en las revistas de SWAT (Gassman et al. 2007). SWAT ha sido aplicado y evaluado en diversos climas del mundo desde las regiones áridas y semiáridas (Perrin et al. 2012; Emam et al. 2014) hasta en áreas húmedas y tropicales (Zheng-qing et al.; Alansi et al. 2009). Recientemente, también SWAT fue utilizado con éxito en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota (Fernández-Palomino 2016).

### 1.1 Justificación

Los resultados de este estudio proporcionan una línea base de la caracterización espacial del potencial hídrico en las cuencas de la Región Hidrográfica del Titicaca muy útil para los tomadores de decisión con el fin de promover la planificación de los recursos hídricos

### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 Objetivo general

- Realizar el modelamiento hidrológico de las cuencas de la vertiente del Lago Titicaca utilizando el modelo hidrológico SWAT.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Calibración y validación del modelo hidrológico en la simulación de descargas medias diarias y mensuales
- Estimar el balance hídrico en las cuencas;

## 2. EL MARCO TEÓRICO

### 2.1 Modelamiento hidrológico

El ciclo hidrológico no tiene ni principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua (Chow et al. 1988), es descrito como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea entre otros). El ciclo hidrológico es completamente irregular, y es precisamente contra estas irregularidades que lucha el ser humano. Una muestra de ello son los periodos de satisfacción con los requerimientos del agua para las diferentes actividades, otros periodos de sequías y otros de inundaciones (Villón 2004). Los principales componentes del ciclo hidrológico son: la precipitación, evapotranspiración, infiltración y percolación, escorrentía superficial, flujo sub-superficial y el flujo subterráneo y se muestran en la Figura 2-1.

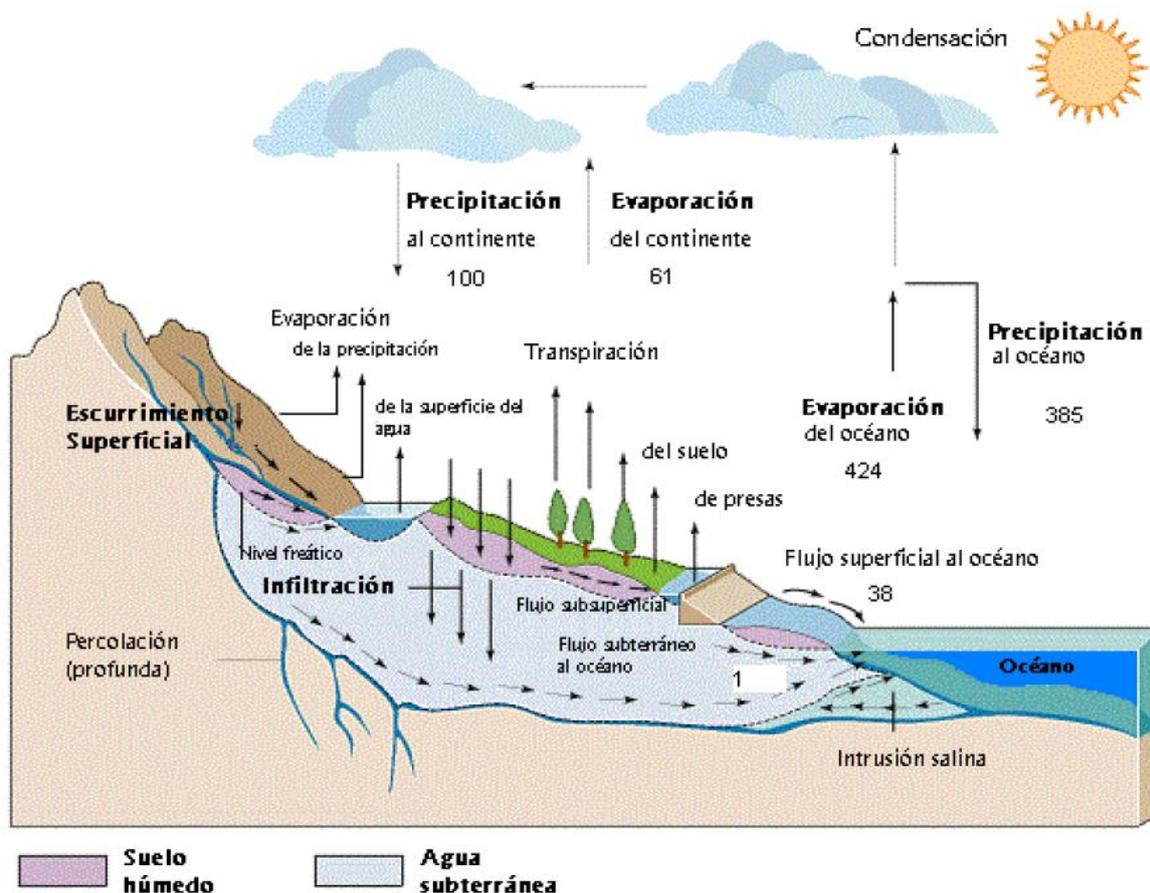


Figura 2-1. Ciclo Hidrológico

Fuente: Modificado de Chow et al., 1988

### 2.1.1 Precipitación

La precipitación es el término general para toda el agua que proviene de las nubes y cae a la tierra en cualquiera de sus estados físicos. Existen varias formas de precipitación dependiendo de las condiciones meteorológicas existentes, en latitudes medias se pueden distinguir las llovizna, lluvia, granizo, nieve, rocío y escarcha (Linsley et al. 1990).

El tipo y la cantidad de precipitación dependen enormemente del tipo y cantidad de enfriamiento y de la humedad existente en el aire, pudiendo encontrar precipitaciones de tipo ciclónica, convectiva, orográfica, por choques de masas de aire y por radiación.

Sin embargo, independientemente de la forma y tipo de precipitación, una vez que el agua de lluvia llega al suelo, la altura de precipitación, ocurrida en un tiempo, se distribuye, dependiendo de la forma de distribución de las condiciones imperantes en el momento y en el sitio en que ocurre la precipitación.

Una parte es interceptada por las plantas, otra se deposita en almacenamientos superficiales, una más se infiltra incrementando las corrientes subterráneas, saturando primero el suelo y la restante escurre superficialmente hacia los cauces naturales de drenaje, formando así las corrientes.

### 2.1.2 Evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración es un fenómeno combinado de pérdida de agua por transpiración y evaporación directa del agua del suelo. Corresponde al fenómeno físico del pasaje de agua del estado líquido al gaseoso en condiciones naturales, dependiendo de la disponibilidad de agua para la vegetación y necesitando una importante cantidad de energía para que el proceso ocurra (Del Carmen 2001).

La infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio Mijares, F. J. y Mijares 1989). La percolación es el movimiento por el cual el agua recorre los medios permeables de suelo saturados de agua. Ambos fenómenos están íntimamente ligados puesto que, la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la segunda.

### 2.1.3 Infiltración y percolación

La infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio Mijares, F. J. y Mijares 1989).

La percolación es el movimiento por el cual el agua recorre los medios permeables de suelo saturados de agua. Ambos fenómenos están íntimamente ligados puesto que, la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la segunda.

#### 2.1.4 Escorrentía superficial

Se entiende por escorrentía a la lámina de agua que circula libremente sobre la superficie terrestre. La literatura menciona la posibilidad de producirse dos tipos de escorrentía.

- **Escorrentía por exceso de infiltración:** Se produce en los suelos que no están saturados. De hecho, el suelo puede estar muy seco, pero debido a las propiedades del suelo o de la cubierta del suelo el proceso de infiltración no puede absorber el agua producida por un aguacero o un deshielo rápido.
- **Escorrentía por exceso de saturación:** Se produce cuando el suelo está saturado y no queda espacio para que se infiltre más agua. Esto puede ocurrir incluso en suelos que normalmente, en condiciones sub-saturadas, permiten la infiltración de grandes cantidades de agua. (www.meted.ucar.edu, Figura 2-2)

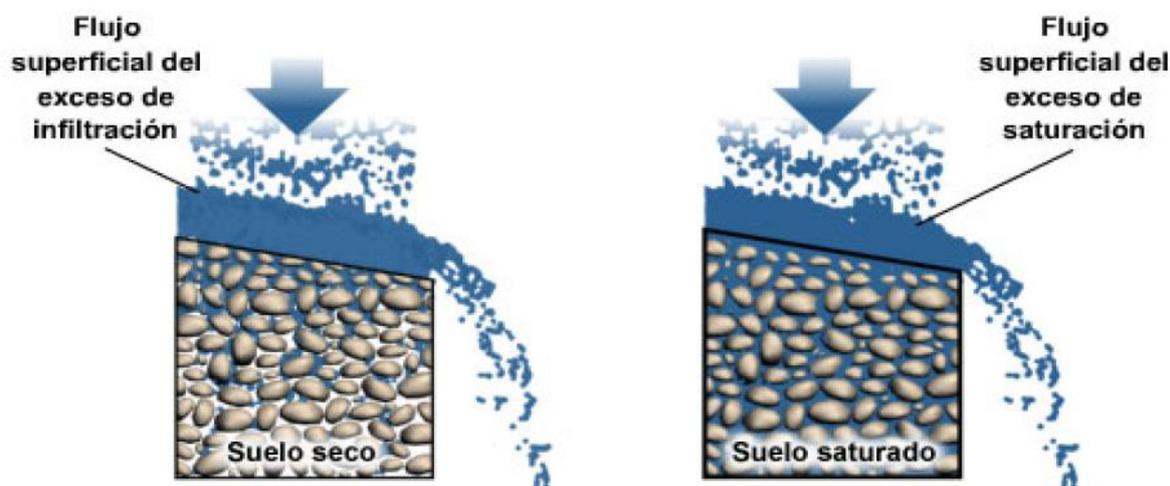


Figura 2-2. Tipos de Formación de Escorrentía Superficial  
Fuente: www.meted.ucar.edu

#### 2.1.5 Escorrentía sub-superficial

También conocido como flujo sub-superficial o interflujo. Dado a la porción de la precipitación que se infiltra en el terreno, una parte de ésta se mueve lateralmente en los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes y otra parte recarga los acuíferos a través del proceso de percolación y cuya descarga producirá el escurrimiento subterráneo.

## 2.2 Manejo integral de cuencas

En la búsqueda de instrumentos de gestión que posibiliten la transversalidad de políticas sectoriales, diversos países han encontrado en el manejo integral de cuencas un instrumento de planeación y de gestión adecuado, que no sólo permite la gestión equilibrada de los recursos naturales, sino también la integración de los actores involucrados en una sola problemática en lugar de atender varios problemas sectoriales dispersos (Cruz 2014). La elaboración de un enfoque integrado, que supere la

fragmentada visión sectorial, es determinante para la optimización del recurso hídrico. Las discusiones realizadas en los distintos foros, a partir de la creación de la Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas (REDLACH) en 1980, constituyen una clara expresión de la evolución de los conceptos, de las técnicas y la identificación de obstáculos para el manejo de cuencas.

Para la Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA-WWF 2003), el Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas (MICH), es el proceso que coordina las acciones de conservación, manejo y desarrollo del agua, territorio, y recursos relacionados presentes en una cuenca, para maximizar de manera equitativa los beneficios económicos y sociales derivados de los recursos hídricos, preservando y, en su caso, restaurando los ecosistemas acuáticos.

El manejo de cuencas es el proceso complejo que le da orden a un conjunto de acciones dentro de la Cuenca Hidrológica Superficial (Hidrográfica) o Cuenca Hidrológica Subterránea, encaminado a lograr un desarrollo social y económico sostenibles en el tiempo, además de la protección del medio ambiente (González 2000).

Para Dourojeanni (1992), citado por Cotler, (2004); el manejo de cuencas “Es el arte y la ciencia de manejar los recursos naturales de una cuenca, con el fin de controlar la descarga de agua de la misma en calidad, cantidad y tiempo de ocurrencia”.

### 2.2.1 La cuenca como unidad territorial de manejo

La cuenca es el espacio del territorio en el cual naturalmente discurren todas las aguas (aguas provenientes de precipitaciones, de deshielos, de acuíferos, etc., que discurren por cursos superficiales o ríos) hacia un único lugar o punto de descarga (que usualmente es un cuerpo de agua importante tal como un río, un lago o un océano). El ámbito de la cuenca hidrográfica es un espacio territorial natural independiente de las fronteras político-administrativas internas de un país o de fronteras internacionales.

La cuenca, sea en forma independiente o interconectada con otras, es la unidad territorial más aceptada para la gestión integrada de los recursos hídricos. Las políticas para utilizar el territorio de una cuenca como base para la gestión del agua han tenido diferentes enfoques y una desigual evolución en los países de América Latina y el Caribe. Desde fines de los años treinta, en muchos de ellos se ha tratado de adoptar los modelos de gestión del agua a nivel de cuencas.

A pesar de los obstáculos existentes, se observa un interés generalizado por crear y operar organismos de cuenca para mejorar la gestión integrada del agua. El tema ha recobrado vigencia en los años recientes, debido a que los países de la región están tratando de lograr metas de gestión integrada de los recursos hídricos y de desarrollo sustentable. A su vez, las autoridades ambientales y los defensores del medio ambiente coinciden en que la cuenca es un posible punto de partida para coordinar acciones tendientes a la gestión ambiental – sobre todo si ya existen organizaciones de gestión del agua a nivel de cuencas–, aun cuando ello es causa de severas controversias, ya que no es adecuado combinar ambas funciones bajo una misma autoridad (Dourojeanni, 2002; citado por Cruz, (2014)).

Cuencas hidrográficas y el manejo holístico e integrado son compatibles debido a que:

- Las fronteras de cuencas son generalmente fáciles de definir topográficamente.
- Los límites de las cuencas tienden a delimitar muchos procesos ecosistémicos importantes.
- La relación entre subcuencas es sistemática y jerárquica y permite trabajar intuitivamente en diferentes escalas.
- A diferencia de otros conceptos ecológicos, las cuencas son entendidas por el público.

La cuenca se considera la unidad territorial adecuada para la gestión integrada del agua porque es la principal forma terrestre dentro del ciclo hidrológico que capta y concentra la oferta del agua proveniente de la precipitación. Además de esta condición física y biológica básica, en la cuenca se genera una interrelación e interdependencia (externalidades) entre los usos y usuarios de agua.

## 2.3 Modelo SWAT

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo desarrollado en Texas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) a través del Servicio de Investigación Agrícola (ARS) (Arnold et al. 1998).

Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas de gran escala, fisiografía compleja, con diferentes suelos, diversos usos del terreno y condiciones de manejo variables en periodos de tiempo mayores de un año, también simula el efecto de la calidad del agua sobre las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes (Neitsch et al., 2001).

### 2.3.1 Antecedentes del desarrollo del modelo SWAT

Arnold et al. (2012), mencionan que desde su creación el modelo ha incluido componentes de los modelos de las USDA-ARS, además de algunos otros sobre transporte de plaguicidas, hidrología y crecimiento de los cultivos. Entre ellos se encuentra el modelo GLEAMS sobre los efectos de las aguas subterráneas a los sistemas de gestión agrícola, el modelo CREAMS sobre químicos, la escorrentía y la erosión de los sistemas de gestión agrícola y, el modelo integrado de Política Ambiental Climático; estos componentes fueron incorporados por primera vez en el Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales (SWRRB).

En la actualidad se ha sumado el enrutamiento ampliado y el transporte de contaminantes incluyendo depósitos, estanques, humedales, fuentes puntuales, y efectos de tanques sépticos, así como las rutinas de enrutamiento de sedimentos y rutinas de transmisión cinéticas del modelo QUAL2E. Las modificaciones adicionales que se han incorporado en SWAT incluyen una mejor rutina del ciclo del carbono basado en el modelo CFARM, las rutinas diarias de hidrología incluyendo el método de infiltración de Green- Ampt, las acciones temporales de las prácticas de gestión y cambio de uso del suelo y, las mejoras en el drenaje en el subsuelo, franjas filtrantes, vías fluviales con césped, riego, y otras representaciones mejoradas de las prácticas de conservación y de gestión; todo ello se aprecia en la Figura 2-3.

Con la agrupación de dichos modelos, el SWAT permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes (Oñate and Aguilar 2003).

### 2.3.2 Componentes del modelo SWAT

Los componente que integran el modelo SWAT son todos aquellos elementos y procesos que se desarrollan dentro de la cuenca de manera natural y a causa de las actividades antropogénicas, entre los cuales se encuentran: el componente hidrológico, el clima, la sedimentación, los nutrientes, el manejo de los cultivos, los componentes del transporte y el tránsito de agua y sedimentos en el almacenamiento. Dichos componentes se pueden apreciar en la Figura 2-4 y posteriormente se analiza solamente el componente hidrológico ya que en este estudio solo nos enfocamos en ello.

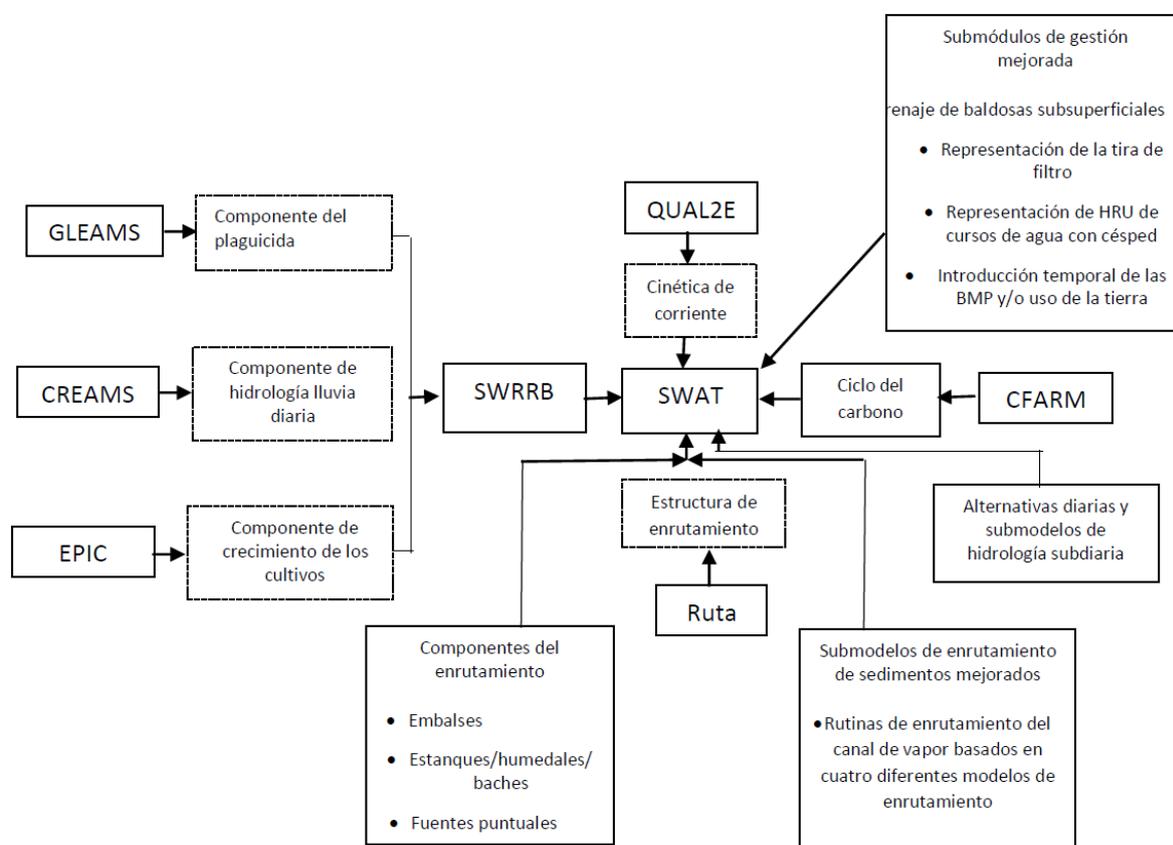


Figura 2-3. Esquema del desarrollo histórico del SWAT y modelos adoptados



Figura 2-4. Componentes del modelo SWAT

### 2.3.3 Enfoque del modelo SWAT

En SWAT, una cuenca se divide en sub-cuencas utilizando el DEM (Modelo de elevación digital), que a su vez se subdividen en HRUs (unidades de respuesta hidrológica y su término en inglés *Hydrological Response Units*) con características homogéneas de tipo de suelo, uso del suelo y pendiente. Los HRUs son la base para el cálculo del balance de agua. El agua en cada HRU se puede almacenar en cuatro niveles: nieve, perfil del suelo (0-2m), acuífero superficial (2-20m) y el acuífero profundo.

Es recomendable utilizar múltiples HRUs para el análisis de sub-cuencas debido que un solo HRU no podría mostrar las características de una sub-cuenca (Vilaysane et al. 2015).

En SWAT, el cálculo del balance de agua es simulada en dos componentes separados del ciclo hidrológico: la fase terrestre y la fase de enrutamiento. La fase terrestre controla las cargas de cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal en cada sub-cuenca, mientras que la fase de enrutamiento define el movimiento del agua, sedimentos y nutrientes desde la red de canales hacia la salida de la cuenca (Arnold et al. 1998; Neitsch et al. 2011).

Las rutinas hidrológicas dentro de SWAT permiten simular los procesos de flujo superficial y del subsuelo, la infiltración, la evaporación y evapotranspiración de las plantas, el flujo lateral, percolación y producción de sedimentos. Estas rutinas se aplican a todas las subcuencas generadas por el modelo, permitiendo que las diferencias en sus características hidrológicas sean consideradas de forma independiente (Minoti 2006).

#### a. Fase terrestre del ciclo hidrológico

Uno de los componentes del modelo SWAT corresponde a la simulación de todos los procesos que constituyen el ciclo hidrológico, lo cual permite realizar un balance hídrico en toda la cuenca; este ciclo controla la cantidad de agua y sedimentos que fluyen a través de las microcuencas hacia las redes de drenaje, dicho proceso se observa en la Figura 2-5.

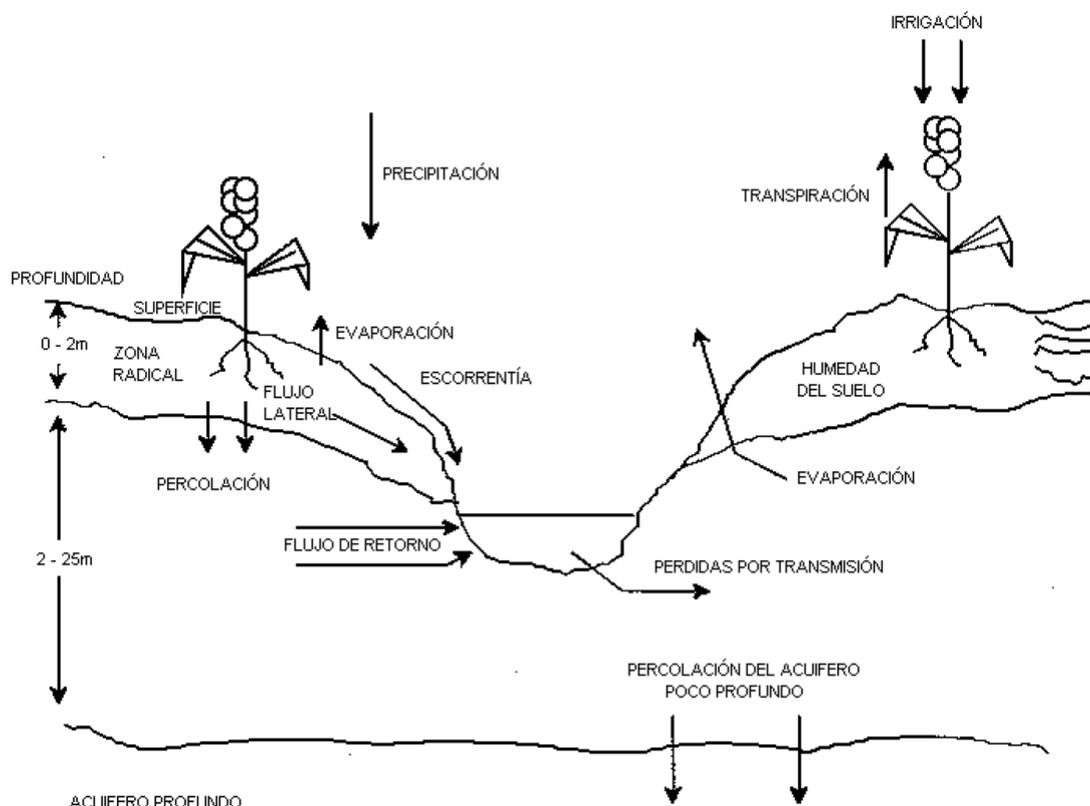


Figura 2-5. Representación del ciclo hidrológico en SWAT

El balance hídrico de la cuenca en la fase terrestre está dado por la ecuación de balance de agua en el suelo para cada día de simulación (ecuación 1) (Neitsch et al. 2011):

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

Donde:

- $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo en mm de H<sub>2</sub>O,
- $SW_0$  es el contenido inicial de agua del suelo,
- $R_{day}$  es la cantidad de precipitación,
- $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía de la superficie,
- $ET_a$  es la cantidad de evapotranspiración real,
- $W_{seep}$  es la cantidad de agua que se infiltra en el perfil del suelo y
- $Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno.

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las escorrentías son predichas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener las escorrentías totales para la cuenca. Esto aumenta la certeza y da una mejor descripción física del equilibrio del agua. Las diferentes entradas y procesos implicados en esta fase del ciclo hidrológico, son resumidos en las secciones siguientes:

**Clima**

El clima de una cuenca proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables climáticas necesarias por SWAT consisten en precipitación

diaria, temperatura aérea máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa.

### **Hidrología**

Cuando la precipitación desciende, puede ser interceptada y puede ser contenida en el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo. El agua en la superficie del suelo se infiltrará en el perfil de la tierra o fluirá sobre el terreno como escorrentía. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia un canal de corriente y contribuye en un corto plazo en la corriente. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua-superficie a través de pasos subterráneos. Las conductos potenciales de movimiento de agua simulados por SWAT en las HRU son ilustradas en la Figura 2-6.

### **Almacenamiento de dosel**

El almacenamiento del dosel es el agua interceptada por superficies vegetativas (el dosel) donde se mantiene y se hace disponible para la evaporación. Cuando se usa el método de curva numérica CN para computar escorrentía de superficie, el almacenamiento de dosel se toma en cuenta en los cálculos de 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. SWAT permite al usuario a ingresar la cantidad máxima de agua que puede ser almacenada en el dosel en el índice máximo de área de hoja para la cobertura de tierra. Este valor y el índice del área de la hoja son utilizados por el modelo para computar el almacenamiento máximo en tiempo en el ciclo de desarrollo de la cobertura de tierra/cosecha. Cuando la evaporación es computada, el agua primero se remueve del almacenamiento de dosel.

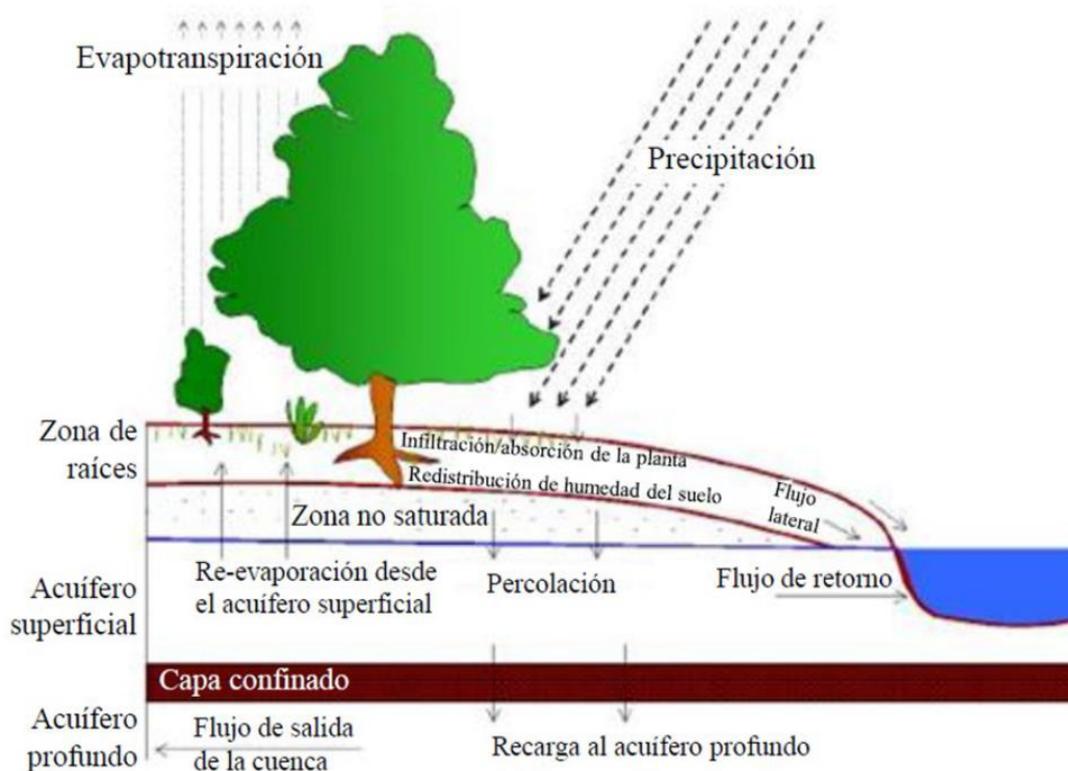


Figura 2-6. Representación de movimientos del agua en SWAT

### Evapotranspiración

La evapotranspiración es un término colectivo para todos procesos en el que agua en fase líquida o sólida o cerca de la superficie terrestre se convierte en vapor atmosférico. La evapotranspiración incluye evaporación de ríos y lagos, suelo descubierto, y superficies vegetativas; evaporación de dentro de las hojas de plantas (transpiración); y la sublimación de superficies de hielo y nieve. El modelo computa la evaporación de suelos y plantas separadamente. La evaporación verdadera del agua en el suelo se estima utilizando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua. La transpiración de la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área de hoja.

### Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial es la proporción en la cual la evapotranspiración ocurriría en una gran área cubierta uniformemente y completamente con vegetación creciente que tiene acceso a un suministro ilimitado de agua terrestre. Esta proporción se asume para ser no afectada por efectos micro-climáticos de procesos como advección o calor de almacenamiento. El modelo SWAT ofrece tres opciones para estimar la evapotranspiración potencial: Hargreaves (Hargreaves and Samani 1985), Priestley-Taylor (Priestley and Taylor 1972), y Penman-Monteith (Monteith 1965).

### Escurrimiento superficial

Las escorrentías en la superficie, o flujo terrestre, es el flujo que ocurre a lo largo de una superficie inclinada. Utilizando las cantidades diarias o sub-diarias de lluvia, el SWAT simula volúmenes de superficie de escorrentías y promedios máximos de escorrentías para cada HRU.

Este es computado utilizando una modificación del método de curva numérica del USDA (USDA Soil Conservation Service 1972) o el método de infiltración de Green & Ampt (Heber Green and Ampt 1911). En el método de curva numérica, la curva varía no-linealmente con el contenido de humedad del suelo. La curva numérica baja si la tierra se acerca el punto de marchitez y aumenta hasta cerca de 100 al acercarse el suelo a la saturación.

El método de Gree & Ampt requiere los datos sub-diarios de precipitación y calcula la infiltración como una función del frente potencial mátrico húmedo anterior y conductividad hidráulica efectiva. El agua que no se infiltra se convierte en escorrentía de superficie. El 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.

El escurrimiento superficial en base al método de número de curva propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo (USDA-SCS, 1972) se representa en la ecuación 2, 3 y 4.

$$Q_{surf} = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + (0.8S)} \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_{surf} > 0 \quad Si \quad 0.2S \leq P \dots\dots\dots(3)$$

Dónde:

Q = Escurrimiento medio (mm),

P = Precipitación por evento (mm) y

S = Retención máxima potencial (mm)

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

S = Potencial máximo de retención (mm) y

CN = Curvas numéricas (adimensional)

El uso de datos de precipitación diarios es particularmente importante para la técnica de las curvas numéricas debido a que en muchas localidades, los datos de precipitación con incremento en tiempo de menos de un día no existen. También, el manejo de los datos de precipitación y los cálculos de escurrimiento superficial son más eficientes para datos diarios que en intervalos más cortos.

### Infiltración

La infiltración se refiere a la entrada de agua en un perfil de suelo de la superficie terrestre. Cuando la infiltración continúa, la tierra llega a ser cada vez más húmeda, causando que el promedio de infiltración disminuya con el tiempo hasta que alcance un valor constante. La tasa inicial de infiltración depende del contenido de humedad de la tierra antes de la introducción de agua en la superficie terrestre. La tasa final de infiltración equivale a la conductividad hidráulica saturada de la tierra. La cantidad de agua que entra el perfil de tierra se calcula como la diferencia entre la cantidad de lluvia y la cantidad de escorrentía de superficie. El método de infiltración Green & Ampt modela directamente la infiltración, pero requiere los datos de precipitación en incrementos más pequeños de tiempo.

### **Redistribución**

La redistribución se refiere al movimiento continuo de agua por un perfil de tierra después de la entrada del agua (a través de precipitación o irrigación). La redistribución es 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 redistribución cesará. El componente de la redistribución de SWAT usa un almacenamiento que dirige la técnica para predecir el flujo por cada capa de tierra en la zona principal. El flujo hacia abajo, o la filtración, ocurre cuando la capacidad de espacio de una capa de tierra es excedida y la capa debajo no está saturada. La tasa del flujo es gobernada por la conductividad saturada de la capa de tierra. La redistribución es afectada por la temperatura del suelo. Si la temperatura en una capa particular es de 0°C o debajo, ninguna redistribución es permitida en esta capa.

### **Percolación**

El componente de percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa de suelo en la zona de raíces. El flujo hacia abajo se presenta cuando se excede la capacidad de campo (CC) de una capa de suelo y si la capa inferior no está saturada. La tasa de flujo hacia abajo está gobernada por la conductividad a saturación en la capa del suelo. El flujo hacia arriba puede ocurrir cuando una capa inferior excede la CC. El movimiento de agua de una capa inferior hacia una capa inferior adyacente es regulado por el coeficiente de agua del suelo CC de las dos capas.

### **Flujo lateral subsuperficial**

El flujo, o inter-flujo subterráneo lateral, es una contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie pero por encima de la zona donde las piedras están saturadas con agua. El flujo subterráneo lateral en el perfil de suelo (0-2m) se calcula simultáneamente con redistribución. Un modelo cinemático del almacenamiento se utiliza para predecir el flujo lateral en cada capa de tierra.

### **Flujo de retorno**

El flujo del retorno, o flujo de base, es el volumen de agua subterránea originado en el manto freático. El SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: un acuífero superficial y libre, que contribuye al flujo de regreso a las corrientes dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo y limitado que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca (Arnold et al. 1993). El agua que filtra 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 es absorbido directamente por la planta.

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.

### **Pérdidas por transmisión**

Las pérdidas de transmisión son pérdidas de flujo de superficie a través de la lixiviación por el cauce. Este tipo de pérdida ocurre en corrientes efímeras o intermitentes donde la contribución del agua subterránea ocurre sólo en cierto tiempo del año, o del todo en

absoluto. El SWAT utiliza el método de Lane descrito en el Capítulo 19 de la Guía de la Hidrología del Servicio de Conservación de Suelo del USDA (USDA-SCS 1983) para estimar la transmisión de pérdidas. Las pérdidas de agua del canal son una función del ancho del canal y la duración de longitud y flujo. Tanto la proporción de volumen como la proporción máxima se ajustan cuándo las pérdidas de transmisión ocurren en canales tributarios.

### **Deshielo de nieve**

El componente de derretimiento de hielo del modelo SWAT es similar al del modelo CREAMS, si hay nieve esta se derrite en días cuando la temperatura máxima excede los 0°C usando una función lineal de la temperatura, la nieve derretida es transferida en la misma forma que la lluvia para estimar el escurrimiento y la precipitación. Sin embargo, la energía de la lluvia es considerada como cero y la tasa del escurrimiento pico se estima asumiendo una distribución uniforme de la lluvia para una duración de 24 horas.

### **Estanques y/o Reservorios**

Los estanques son estructuras de almacenamiento de agua situados dentro de una sub-cuenca que intercepta escorrentías de superficie. El almacenamiento del agua del estanque es una función de la capacidad del estanque, afluencias y desagües diarios, la infiltración y la evaporación. Se asume que en los almacenamientos se tienen solamente vertedores de emergencia. Las entradas necesarias son la capacidad de almacenaje y el área del estanque cuando se llena a su capacidad. El área debajo de la capacidad se estima como una función no lineal de almacenamiento.

#### **b. Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico**

Una vez que SWAT determina las cargas de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenca usando una estructura de orden semejante a la HYMO (Williams and Hann 1972). Adicionalmente al seguimiento del flujo masivo en el canal, SWAT modela la transformación de sustancias químicas en la corriente y cauce. La Figura 2-7 ilustra los diferentes procesos en-corriente modelados por SWAT.

El enrutamiento en el canal principal puede ser dividido en cuatro componentes: agua, sedimento, nutrientes y sustancias químicas orgánicas. En este estudio solo se describe el enrutamiento de flujo de agua.

##### **b.1. Enrutamiento de Flujo**

Cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión por la capa del canal. Otra pérdida potencial es la eliminación de agua del canal para el uso agrícola o humano. El flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el canal y/o adicionado de agua de descargas del punto de la fuente. El flujo es dirigido por el canal que utiliza un método variable de coeficiente de almacenamiento desarrollado por Williams (1969b) o el método de enrutamiento de Muskingum.

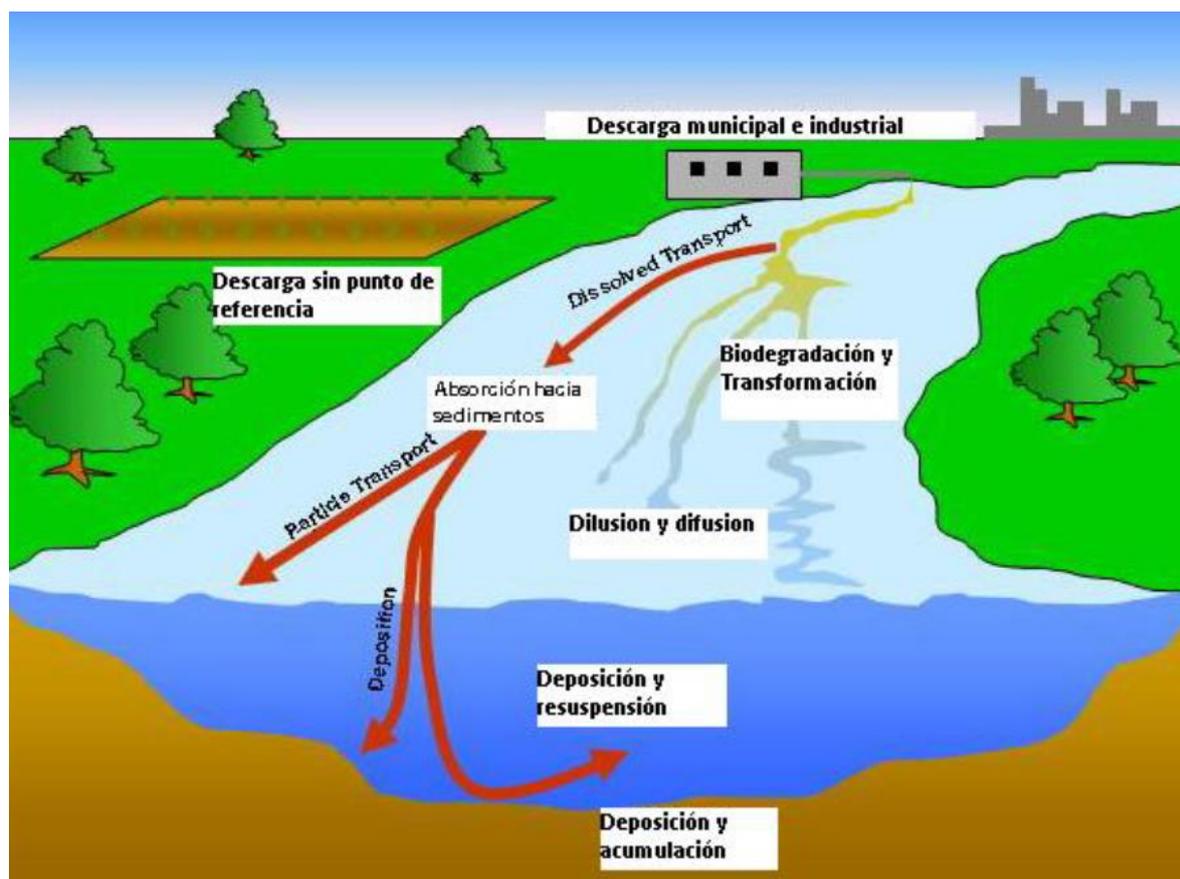


Figura 2-7. Procesos de corriente modelados por SWAT

#### 2.3.4 Etapas de implementación de un modelo hidrológico SWAT

La implementación del modelo hidrológico SWAT requiere de las siguientes etapas bien definidas y se describen detalladamente en la sección de metodología:

- Recopilación de información.
- Construcción del modelo
- Calibración
- Validación
- Y análisis de las salidas del modelo

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a las cuencas hidrográficas del río Huancané, Ramis, Coata e llave situadas en la parte peruana de la región hidrográfica del Titicaca (Figura 3-1), que forma parte del Altiplano del Sur de América y está ubicado al sur del Perú, entre la latitud (13°S - 17°S) y longitud (69°W – 71W). La región hidrográfica del Titicaca limita por el norte con la región hidrográfica del Amazonas, por el este y sur con la región hidrográfica del Pacífico y por el oeste con la república de Bolivia. Política y administrativamente la zona de estudio se encuentra en el departamento de Puno.

La Vertiente del Lago Titicaca es uno de los sistemas hidrológicos activos y separados que se distinguen en la cuenca endorreica del Altiplano: el Lago Titicaca (3809.5 m.s.n.m.) vierte al Lago Poopó (3686 m.s.n.m.) por intermedio del río Desaguadero. El río Desaguadero que comienza en el Lago Titicaca (parte Boliviana), después de un recorrido de 398 km desemboca en el lago Poopó.

La superficie total de la hondonada del lago Titicaca, hasta el comienzo del Desaguadero, es de 56300 km<sup>2</sup> (incluidas las aguas superficiales); de esta superficie de la cuenca, las tres cuartas partes están en el Perú (subregión de Puno) y el resto en Bolivia (departamento de La Paz). La superficie de la cuenca de drenaje del lago Titicaca es de 47900 km<sup>2</sup>, o sea, el 85% de la cuenca total, 1/5 de la cual situada en Bolivia y 4/5 en el Perú.

En la Figura 3-1 se muestra la región hidrográfica del Titicaca, parte peruana; y los principales ríos aportantes al Lago Titicaca (Huancané, Ramis, Coata e llave).

##### 3.1.1 Climatología

Sanabria et al., (2009) describe la climatología en el Altiplano (Vertiente del Lago Titicaca) y menciona que la precipitación está restringida a los meses de noviembre a marzo acumulando valores entre 500 a 900 mm/año (véase Figura 3-2a), así mismo menciona que las condiciones térmicas están caracterizadas por temperaturas máximas absolutas que oscilan entre 14 a 18 °C y mínimas entre -7 a 3 °C y las temperaturas medias que oscilan entre 4 a 9 °C (véase Figura 3-2b).

La mayor parte de la precipitación (>70%) se produce durante el verano austral [diciembre a febrero (DEF)]; cuando los vientos del este de nivel medio (600 hPa) y superior (200 hPa), trae aire húmedo y alimentan las tormentas convectivas sobre la meseta del altiplano (Garreaud 1999; Falvey and Garreaud 2005). La precipitación de verano exhibe variabilidad sinóptica significativa, explicado en gran medida por la humedad de la capa límite local y el viento zonal en alto nivel de 200 hPa (cerca de 12000 m.s.n.m.) (Garreaud and Aceituno 2001b). El resto del año el Altiplano está influenciado por el flujo de viento del oeste de nivel medio (600 hPa) y alto (200 hPa), que trae el aire muy seco desde el Pacífico y las precipitaciones son casi inexistentes (Vuille and Ammann 1997).

En escalas de tiempo interanuales, hay una tendencia a una mayor (menor) precipitación en toda la cuenca durante los años de La Niña (El Niño) que también se explica en gran medida

por la intensidad de la circulación zonal en alto nivel (Garreaud and Aceituno 2001a; Vuille and Keimig 2004).

En cuanto a las tendencias hidrológicas a escala interanual en la Vertiente del Titicaca, Lavado Casimiro et al., (2012) encuentran que no hay cambios y tendencias significativas en cuanto a la precipitación, escorrentía media, escorrentía máxima, pero si en la escorrentía mínima en la cuenca del río Ramis; donde el incremento de esta puede ser asociado con el derretimiento acelerado de los glaciares debido al cambio climático.

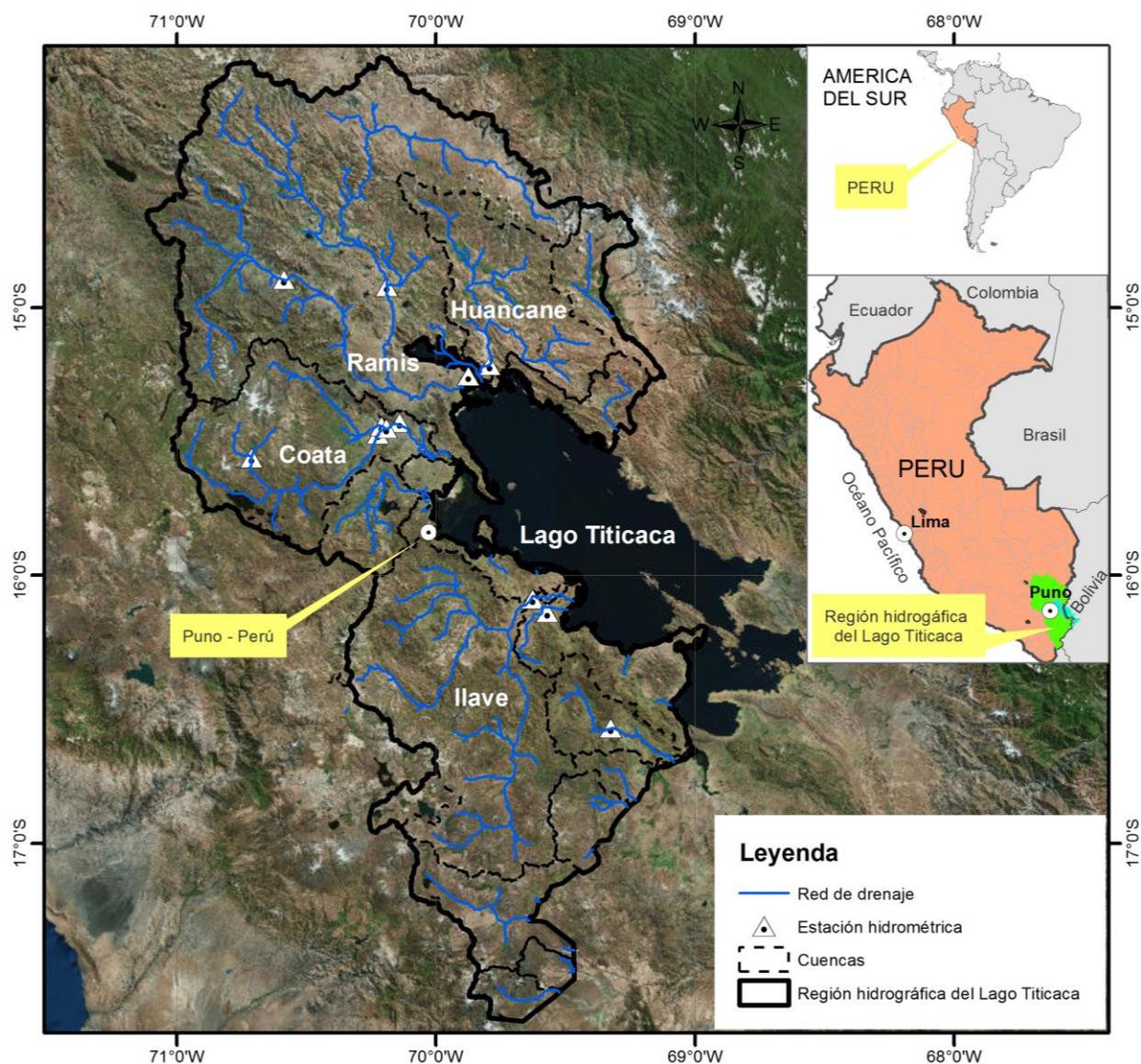


Figura 3-1. Ubicación del área de estudio y la red de estaciones hidrométricas

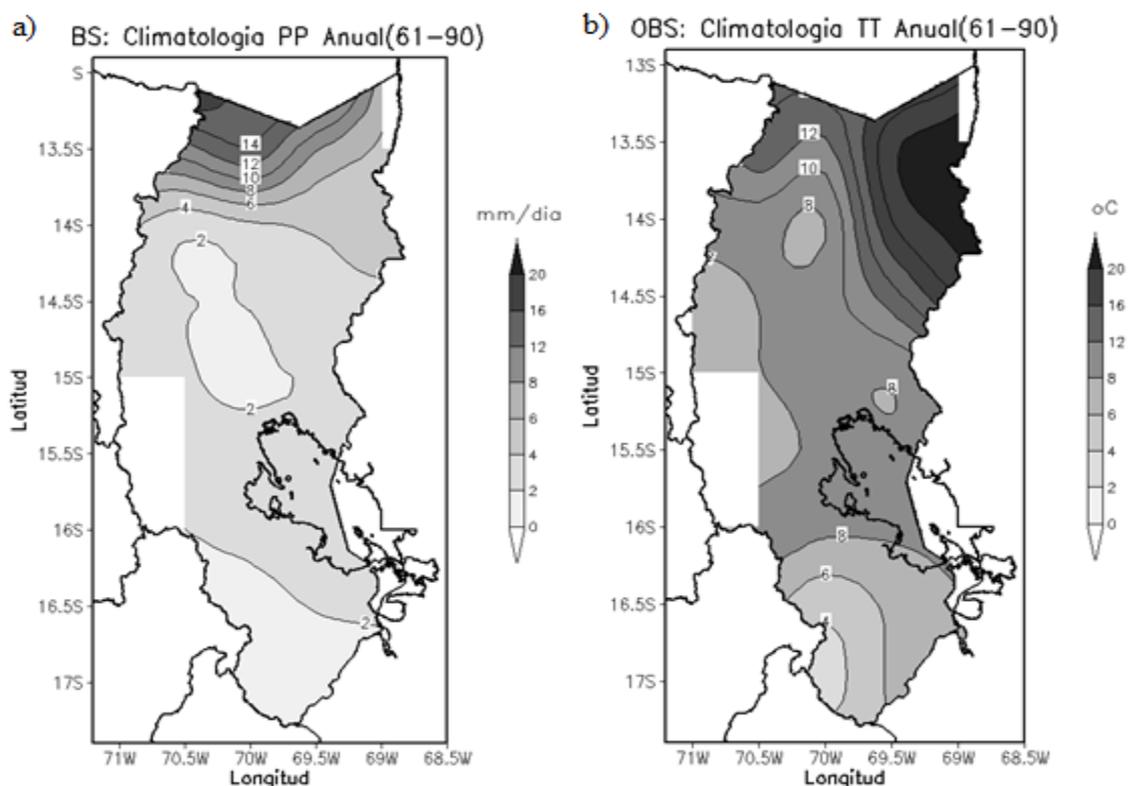


Figura 3-2. Climatología del Altiplano Peruano (periodo 1961-1990). a) Climatología de la precipitación observada y b) Climatología de la temperatura observada.

Fuente: Sanabria *et al.*, (2009)

### 3.2 Datos

La Tabla 3-1, resume el tipo, la resolución y la fuente de datos empleados para el modelamiento hidrológico de las cuencas del río Huancane, Ramis, Coata e Ilave; situadas en la Región hidrográfica del Titicaca. Así, los datos de descarga media diaria disponibles desde 1981 hasta la fecha corresponden a las estaciones hidrológicas administradas por SENAMHI (Tabla 3-2) y la ubicación de estas estaciones se muestra en la Figura 3-1. Entre los datos grillados que fueron utilizados en este estudio se tiene los datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y mínima) del producto PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) versión 2.0 del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (Aybar *et al.* 2017).

- **Modelo digital de elevación**

El modelo digital de elevación (DEM) del producto SRTM v4.1 de 90 m de resolución (Shuttle Radar Topography Mission: SRTM v4.1) debido que tiene buena información y ha sido evaluado su uso en el modelamiento hidrológico utilizando el modelo SWAT (Tan *et al.* 2015); este producto está disponible en el sitio web del CGIAR-CSI (Consortium for Spatial Information of the Consultative Group of International Agricultural Research).

- **Suelo**

Debido a la escasa información de datos de suelo y uso de suelo en la región, datos globales fueron utilizados. Así, el mapa de suelos digitalizada del mundo que incluye las propiedades hidráulicas del suelo corresponden a FAO-1995, (2003) y el mapa de cobertura vegetal (global) a una resolución espacial de 300 m y representativo para el periodo 2008-2012 se ha obtenido del proyecto ESA CCI-LC (European Space Agency and Climate Change Initiative-Land Cover).

Tabla 3-1. Tipo de dato, resolución y fuente de datos

Tipo de dato	Resolución	Fuente	Enlace
Datos hidrométricos	Diaria (1981-2015)	SENAMHI	<a href="http://www.senamhi.gob.pe/">http://www.senamhi.gob.pe/</a>
Lluvia, temperatura máxima y mínima	Diaria. 0.05° (1981-2015)	PISCO-SENAMHI	<a href="http://www.senamhi.gob.pe/">http://www.senamhi.gob.pe/</a>
DEM	90 m	CGIAR-CSI	<a href="http://srtm.csi.cgiar.org/">http://srtm.csi.cgiar.org/</a>
Cobertura vegetal	300 m	ESA CCI-LC	<a href="http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/">http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/</a>
Mapa de suelo	1:5 000 000	FAO-1995, 2003	<a href="http://www.waterbase.org/download_data.html">http://www.waterbase.org/download_data.html</a>

Tabla 3-2. Estaciones hidrológicas utilizadas

N	Id estación	Nombre	Río	Latitud	Longitud	Altitud	Estado
1	210201	Puente Huancané	Huancané	-15,216	-69,793	3830	Funcionando
2	210101	Puente Ramis	Ramis	-15,256	-69,874	3821	Funcionando
3	210102	Puente Azángaro	Azángaro	-14,920	-70,189	3860	Funcionando
4	210407	Puente Unocolla	Coata	-15,451	-70,191	3835	Funcionando
5	210405	Puente Mocayache	Lampa	-15,444	-70,209	3838	Funcionando
6	210301	Puente llave	llave	-16,088	-69,626	3850	Funcionando

### 3.3 Metodología

El enfoque metodológico utilizado en este estudio se muestra en la Figura 3-3 y a continuación se detalla cada una de las dos etapas: a) configuración y parametrización del modelo y b) Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT.

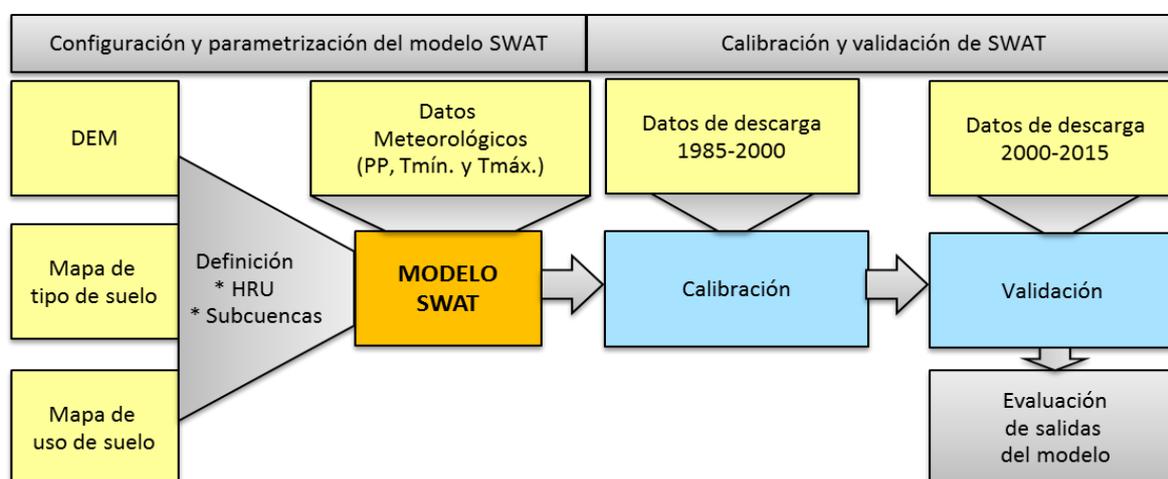


Figura 3-3. Diagrama de flujo de la metodología

### 3.3.1 Configuración y parametrización del modelo SWAT

El modelo hidrológico para las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave fue desarrollado usando el SWAT 2012. Así la delimitación de la cuenca de estudio y la red de la corriente se llevó a cabo utilizando la herramienta de la delimitación automática de cuencas del Arc-SWAT en base al DEM (modelo digital de elevación) y de acuerdo a los procedimientos utilizados por Neitsch *et al.*, (2002). En todas las cuencas de estudio, se ha definido la red de drenaje y la cantidad de sub-cuencas en base a un umbral del área mínima de drenaje de 10 000 Has. Asimismo debido a la heterogeneidad espacial de la pendiente en las cuencas; esta se ha disgregado en cinco clases (<10%, 10 - 20%, 20 – 30% y > 30%). Luego se realizó la definición de HRU (Unidad hidrológica de respuesta) mediante un análisis de superposición y una combinación única de un particular tipo de suelo, uso de suelo y pendiente. Donde los tipos de suelo, usos de suelo o pendientes que cubran menor al 10% del área de la sub-cuenca fueron eliminados para evitar el exceso de parametrización del modelo.

La configuración de los componentes del modelo SWAT relacionados con la simulación de descargas se describe brevemente en este estudio, para mayor información ver Neitsch *et al.*, (2011). En este estudio la evapotranspiración potencial (ETP) fue estimada por el método de Hargreaves (Hargreaves and Samani 1985) debido a la limitada y escasa disponibilidad de variables meteorológicas como la humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar. El uso de este método es suportada también por Aouissi *et al.*, (2016), quienes en una cuenca semiárida en Tunisia han evaluado la influencia del método de estimación de ETP (Penman-Monteith [PM], Hargreaves [HA] y Priestly-Taylor [PT]) en la predicción de descargas utilizando SWAT y han reportado que PM es el mejor para el cálculo de ETP; sin embargo utilizando HA para la estimación de ETP han obtenido excelente desempeño (NSE=0.90) del modelo SWAT en la predicción de descargas mensuales.

La escorrentía superficial fue estimada utilizando el método del número de curva del SCS (USDA Soil Conservation Service 1972). El flujo lateral desde el perfil de suelo no saturado fue estimado mediante el modelo de almacenamiento cinemático (Sloan and Moore 1984) mientras tanto el flujo de retorno desde el acuífero superficial y profundo fue simulado de acuerdo a Arnold *et al.* (1998). En SWAT el flujo lateral y el flujo de retorno conforman el flujo base. El método de Lane se utilizó para calcular las pérdidas de transmisión (USDA-SCS 1983). El método de almacenamiento variable (Williams 1969b) fue utilizado para el enrutamiento de agua a través de la red de canales. El balance hídrico de la cuenca en la fase terrestre está dado por la ecuación de balance de agua en el suelo para cada día de simulación (ecuación 5) (Neitsch *et al.* 2011). Mientras tanto la cantidad de agua que sale cada día del HRU y entra al canal para ser enrutado a través del sistema de canales hacia la salida de la cuenca está dado por la ecuación 6 (Luo *et al.* 2012; Arnold *et al.* 2013). De acuerdo a la ecuación 6 en este estudio el flujo de sistemas de drenaje (TQ) no fue considerado debido a la limitada información de sistemas de drenaje.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - ET_a - W_{seep} - Q_{gw}) \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

$SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo en mm de  $H_2O$ ,  $SW_0$  es el contenido inicial de agua del suelo,

$R_{day}$  es la cantidad de precipitación,

$Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía de la superficie,

$ET_a$  es la cantidad de evapotranspiración real,

$W_{seep}$  es la cantidad de agua que se infiltra en el perfil del suelo y

$Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno.

$$WYLD_t = Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw} + TQ \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

WYLD es el rendimiento hídrico en mm de  $H_2O$  y está dado por la contribución de: escorrentía superficial ( $Q_{surf}$ ), flujo Lateral ( $Q_{lat}$ ), flujo de retorno desde los acuíferos (superficial y profundo) ( $Q_{gw}$ ) y el flujo desde sistemas de drenaje ( $TQ$ ).

### 3.3.2 Calibración y validación del modelo SWAT

Considerando que la disponibilidad de los datos meteorológicos es a partir del año 1981. Se estableció el periodo de simulación del modelo SWAT para el periodo 1981-2015 donde los primeros cuatro años (1981-1984) fueron utilizados como periodo de calentamiento del modelo para mitigar las condiciones iniciales no conocidas. Por otro lado los registros de las descargas medias diarias de las estaciones hidrológicas (Tabla 3-2) fueron utilizados como referencia para el proceso de calibración (1985-2000) y validación (2000-2015) del modelo en las cuencas de estudio.

En este estudio, la calibración de los parámetros del modelo hidrológico SWAT fue realizado de manera manual en base a los criterios de calibración realizado en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota (Fernández-Palomino 2016)XXXXLINK

Para evaluar el desempeño del modelo en la etapa de calibración y validación utilizamos tres índices estadísticos: la medida de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, ecuación 7), el porcentaje de bias (PBIAS, ecuación 8) y el error medio absoluto (MAE, ecuación 9) para conocer el error de estimación promedio en  $m^3/s$ . El porcentaje de bias (PBIAS) se utiliza para medir la tendencia media (positivo o negativo) de los valores de descarga simulada con respecto a los valores de descarga observada. Donde, PBIAS positivo (negativo) indica sobrestimación (subestimación).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_p)^2} \dots\dots\dots(7)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \dots\dots\dots(8)$$

$$MAE = 1/n \times \sum |(S_i - O_i)| \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

$O_i$  es la variable observada,

$S_i$  es la variable simulada,  
 $O_p$  es el promedio de la variable observada,  
 $n$  es el número de observaciones bajo consideración

La Tabla 3-2 muestra los criterios utilizados para la valoración del desempeño del modelo SWAT el cual se basa en el esquema de Moriasi et al., (2007), quienes han derivado estos criterios en base a una extensa revisión de literatura de los reportes de valoración de desempeño utilizados en el modelamiento hidrológico. También utilizada por estudios recientes (Ficklin and Barnhart 2014; Khoi and Thom 2015; Me et al. 2015; Yesuf et al. 2016)

Tabla 3-2. Esquema de clasificación del desempeño del modelo SWAT

Performance del indicador	Insatisfactorio	Satisfactorio	Bueno	Muy bueno
NSE	< 0,50	0,50 – 0,65	0,65 – 0,75	> 0,75
$\pm$ PBIAS (%)	> 25	15 – 25	10 – 15	< 10

Finalmente, en este estudio verificamos si el modelo SWAT tiene la capacidad de cuantificar los flujos contribuidos por la escorrentía superficial y el flujo base después de la etapa de calibración y validación. Para tal propósito el flujo base estimado por SWAT comparamos con el flujo base de referencia donde esta última fue estimado utilizando la técnica automatizada de separación de flujo base de Arnold et al. (1995a) en base a los datos de descarga diaria observado en las estaciones hidrológicas.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Calibración y validación del modelo SWAT

#### 4.1.1 Parámetros calibrados del modelo SWAT

Los valores óptimos de los parámetros de SWAT se obtuvieron en el proceso de calibración manual y se muestran en la Tabla 4-1, esta tabla nos muestra que a pesar de la complejidad del modelo SWAT; solamente 4 (5) parámetros fueron calibrados en la cuenca del río Huancané y Coata (Ramis e Ilave). Así, los parámetros relacionados a la cuantificación (CN2) y respuesta (SURLAG) de la escorrentía superficial fueron calibrados en todas las cuencas. Asimismo, fueron calibrados los parámetros vinculados con la evapotranspiración del sistema como el ESCO (ESCO y SOL\_\_AWC) en la cuencas del río Huancané y Coata (Ramis e Ilave). Finalmente, la calibración del parámetro RCHRG\_DP fue importante para que el modelo tenga la capacidad de simular bien las descargas en la temporada de estiaje en todas las cuencas de estudio. De los valores óptimos encontrados respecto a RCHRG\_DP se puede afirmar que en promedio en todas las cuencas el 40% de agua que recarga el acuífero superficial pasa a recargar el acuífero profundo.

Tabla 4-1. Valores de los parámetros del modelo SWAT calibrado. En la columna que corresponde al código del parámetro “v” (“r”) indica que el parámetro fue sustituido por un cierto valor del rango (multiplicado por 1 + cierto valor de cambio relativo).

Orden	Código del parámetro	Descripción	Valor ajustado			
			Huancané	Ramis	Coata	Ilave
1	r__CN2.mgt	Número de curva	0,12	0,08	0,08	0,01
2	v__SURLAG.hru	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial	0,10	0,11	0,1	0,1
3	v__ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0,80	0,5	0,4	0,4
4	r__SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible en el suelo		0,7		0,7
5	v__RCHRG_DP.gw	Fracción de recarga hacia el acuífero profundo	0,40	0,4	0,2	0,4

#### 4.1.2 Desempeño del modelo SWAT en la etapa de calibración y validación

En la Tabla 4-2 se muestra las medidas de desempeño del modelo SWAT en la caracterización de las descargas medias diarias observadas para la etapa de calibración y validación del modelo. Donde, se aprecia buen desempeño del modelo con respecto al coeficiente de eficiencia de NASH (NSE entre 0,65-0,75) tanto en la etapa de calibración y validación en todas las cuencas de estudio. Mientras tanto, respecto al porcentaje de bias (PBIAS) se tiene un desempeño muy bueno (PBIAS < 10%) en las cuencas del río Huancané, Coata e Ilave y un desempeño bueno (PBIAS entre 10-15%) en la cuenca del río Ramis tanto en la etapa de calibración y validación. Los errores absolutos son mayores en la cuenca del río Ramis el cual esta relacionado a las mayores descargas que experimenta esta cuenca con respecto a los demás cuencas del altiplano (Huancané, Coata e Ilave).

El desempeño del modelo SWAT en la caracterización de las descargas medias mensuales son muy buenas con respecto a NSE ( $>0.75$ ) y PBIAS ( $< 10\%$ ) en ambas etapas (calibración y validación). El buen desempeño del modelo en la caracterización de la dinámica de las descargas observados sugiere que el modelo es adecuado para el modelamiento hidrológico de las cuencas de la Región hidrográfica del Titicaca.

Tabla 4-2. Estadísticas de medida de desempeño del modelo SWAT en la etapa de calibración y validación a paso diario

Cuenca	Estación	Calibración (1985 - 1999)			Validación (2001 - 2015)		
		NSE	PBIAS	MAE	NSE	PBIAS	MAE
Huancané	Puente Huancané	0,65	2,4	6,17	0,72	-3,2	7,92
Ramis	Puente Ramis	0,70	-13,6	24,71	0,66	5	33,06
	Puente Azángaro				0,64	15,8	18,52
Coata	Puente Unocolla	0,69	-4	13,25	0,75	3,1	15,7
	Puente Mocayache				0,69	-2,1	8,53
Ilave	Puente Ilave	0,69	-7,9	12,68	0,68	0,7	16,36

Tabla 4-3. Estadísticas de medida de desempeño del modelo SWAT en la etapa de calibración y validación a paso mensual

Cuenca	Estación	Calibración (1985 - 1999)			Validación (2001 - 2015)		
		NSE	PBIAS	MAE	NSE	PBIAS	MAE
Huancané	Puente Huancané	0,79	3,5	4,39	0,83	-2	5,89
Ramis	Puente Ramis	0,86	-12,4	15,82	0,79	5,3	25,93
	Puente Azángaro				0,71	17,7	15,34
Coata	Puente Unocolla	0,79	-3	10,01	0,83	2,7	11,18
	Puente Mocayache				0,8	-0,2	6,09
Ilave	Puente Ilave	0,86	-3,3	8,59	0,76	8,2	10,91

#### 4.1.3 Hidrogramas simulados versus observados en la etapa de calibración y validación

Los hidrogramas simulados versus los hidrogramas observados tanto a paso de tiempo diario y mensual así como para la etapa de calibración y validación del modelo para la cuenca del río Huancané se muestra en la Figura 4-1, Ramis (Figura 4-2 y Figura 4-3), Coata (Figura 4-4 y Figura 4-5) e Ilave (Figura 4-6). En general las descargas y/o caudales simulados tanto a paso diario y mensual por el modelo SWAT describen bien los patrones de la dinámica de las descargas observadas en todas las cuencas tanto en la etapa de calibración y validación del modelo.

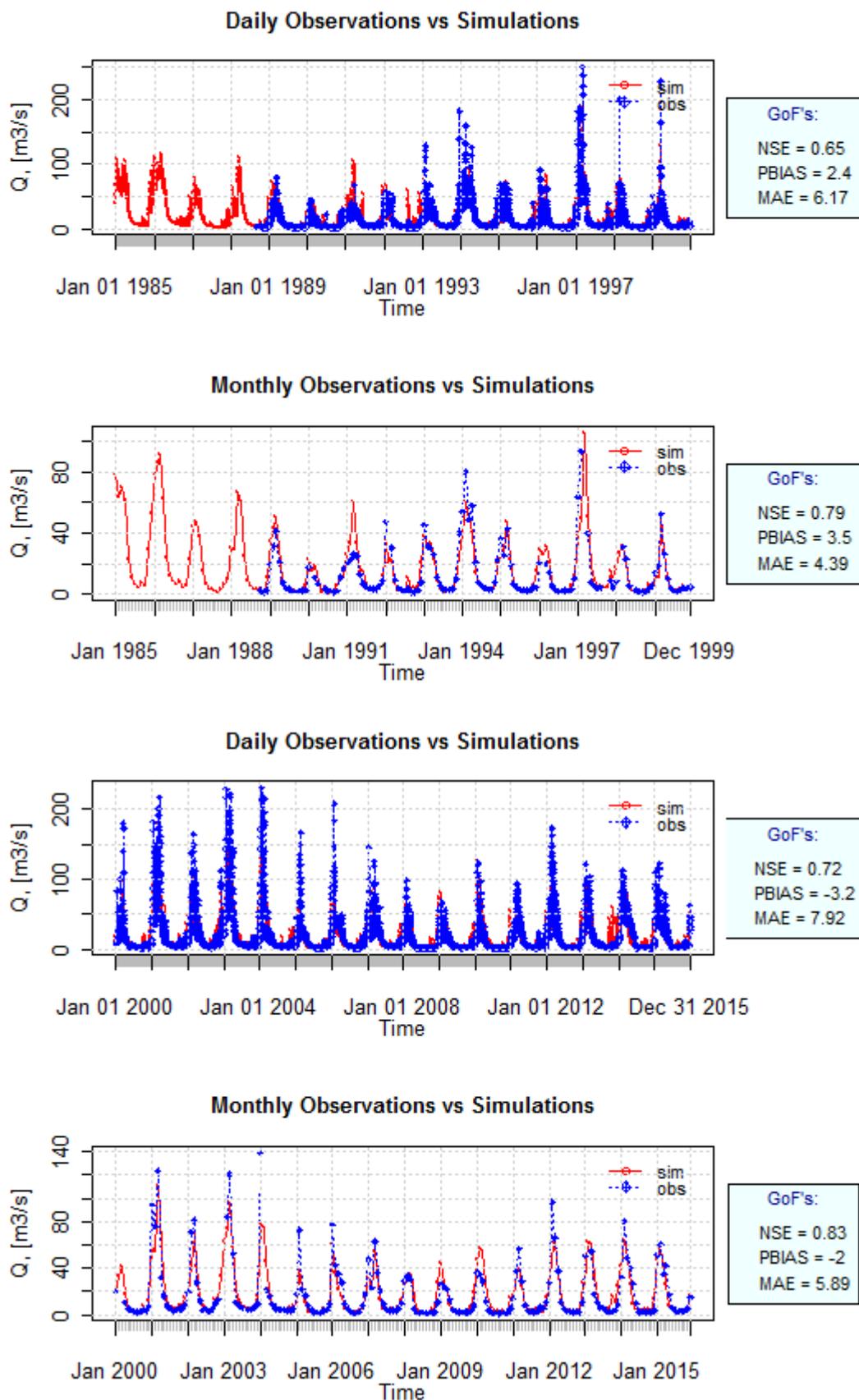


Figura 4-1. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración (periodo 1985-1999) y validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Huancané en la estación hidrológica de Puente Huancané.

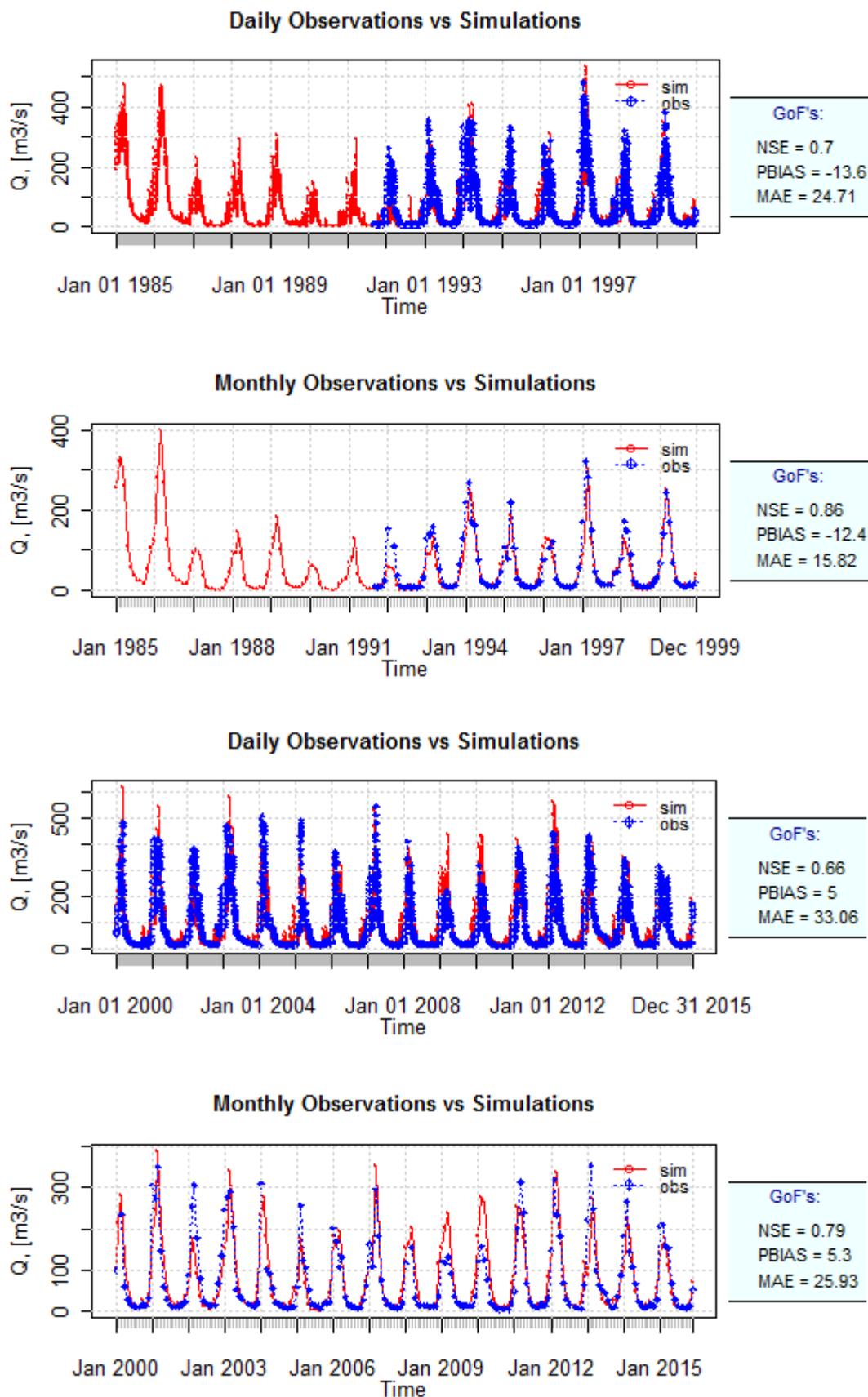


Figura 4-2. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración (periodo 1985-1999) y validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Ramis en la estación hidrológica de Puente Ramis.

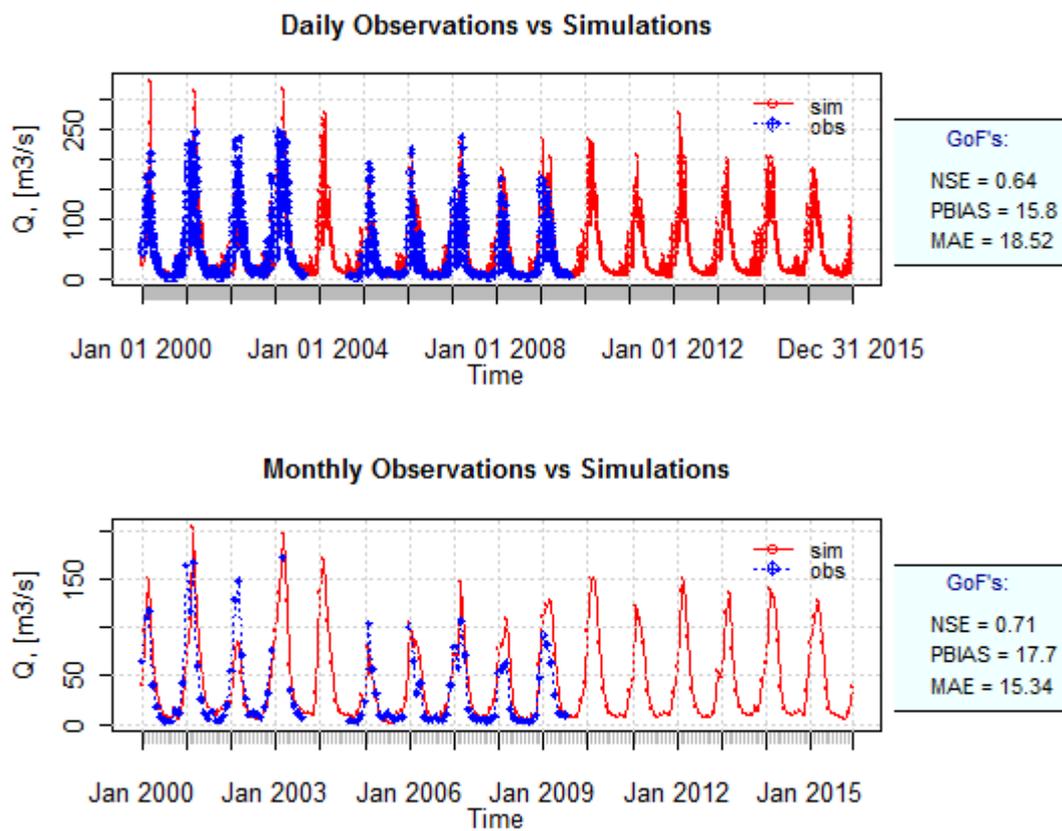


Figura 4-3. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Ramis en la estación hidrológica de Puente Azángaro en la sub-cuenca Azángaro.

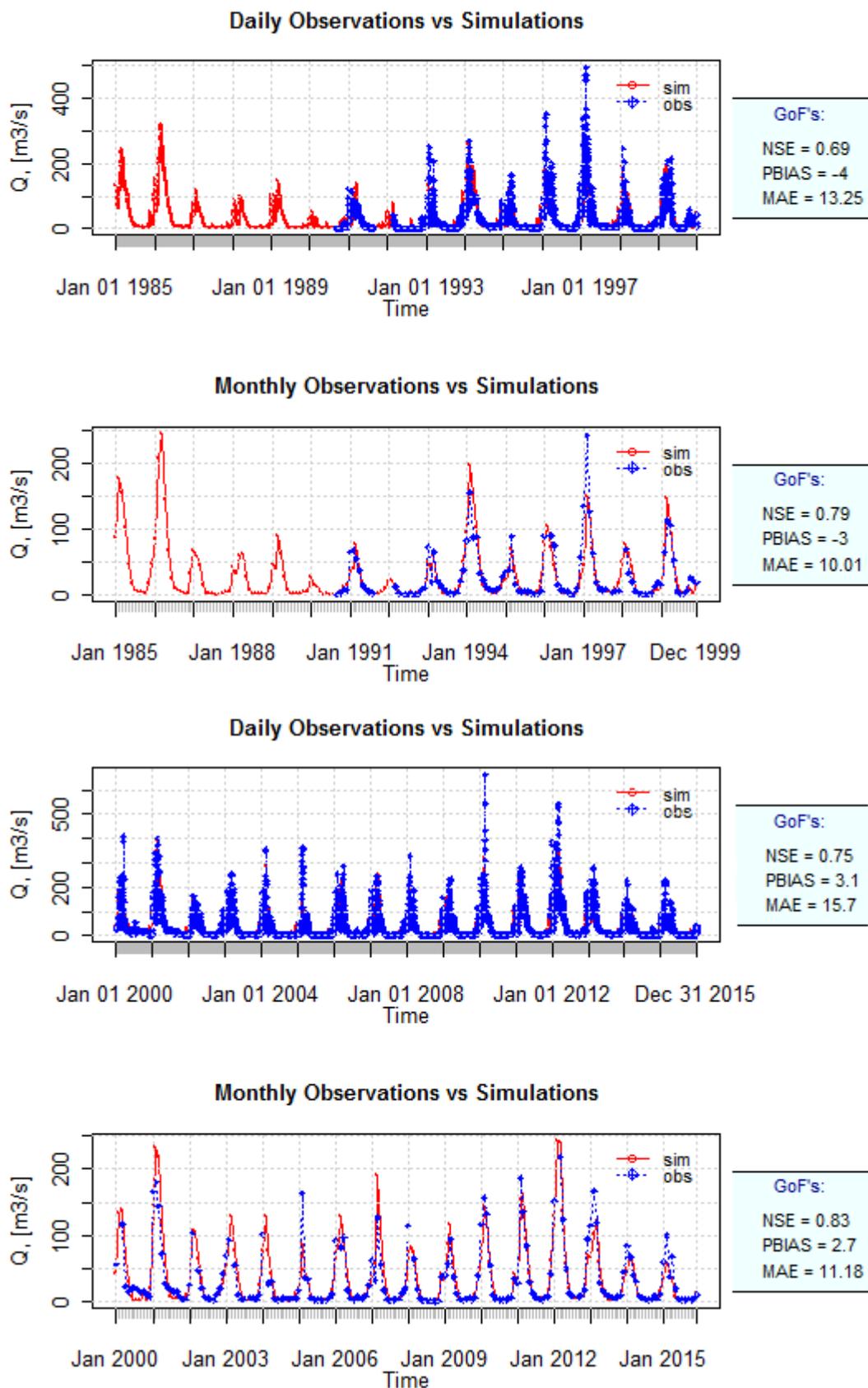


Figura 4-4. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración (periodo 1985-1999) y validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Coata en la estación hidrológica de Puente Unocolla.

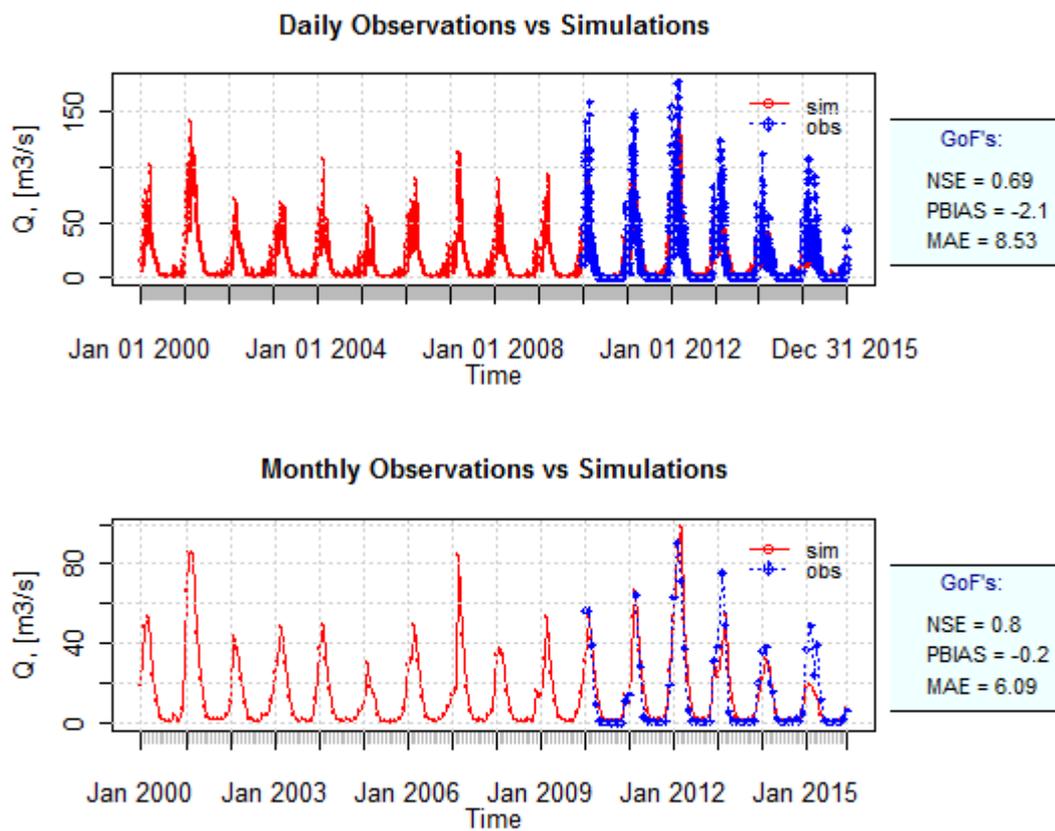


Figura 4-5. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Coata en la estación hidrológica de Puente Mocayache de la sub-cuenca Lampa.

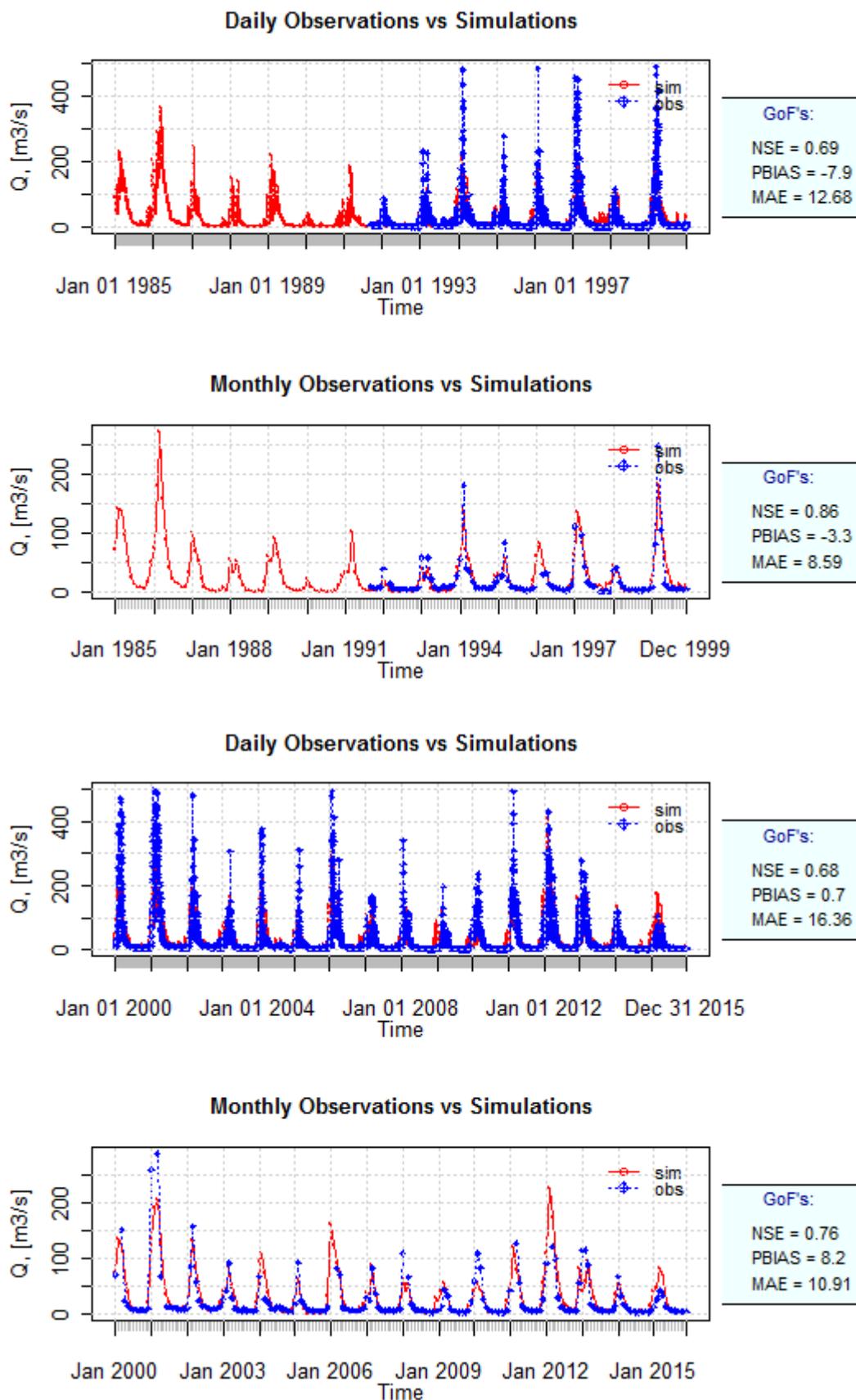


Figura 4-6. Hidrogramas simulados versus observados para la etapa de calibración (periodo 1985-1999) y validación (periodo 2000-2015) para la cuenca del río Ilave en la estación hidrológica de Puente Ilave.

## 4.2 Balance hídrico y verificación del índice de flujo base

### Balance hídrico

Con el fin de hacer frente a los problemas de gestión del agua, es muy importante el análisis y la cuantificación de los diferentes elementos de los procesos hidrológicos que ocurren dentro de la cuenca. El modelo SWAT caracteriza los diferentes procesos; siendo la precipitación, la escorrentía superficial, el flujo base (el flujo lateral más el flujo de retorno desde los acuíferos) y la evapotranspiración los elementos más importantes del balance hídrico. Así, en este estudio para comprender mejor los diferentes procesos que ocurren en el área de estudio; se ha caracterizado los diferentes componentes del balance hídrico en base al modelo SWAT calibrado.

Los valores del promedio anual de los componentes del balance hídrico (periodo 1985-2015) se muestran en la Tabla 4-4 y a continuación se detalla el balance hídrico para cada cuenca.

### Cuenca del río Huancané

El mayor aporte de agua al sistema está dado por la precipitación (636,6 mm). El 74% de la precipitación se pierde del sistema hacia la atmósfera por la evapotranspiración real (ET = 470 mm) y por otro lado el 26% del aporte total al sistema (TAS) es el rendimiento hídrico de la cuenca (WYLD = 166,9 mm). De acuerdo a IBFswat (0,67), el rendimiento hídrico de la cuenca (WYLD) se caracteriza por presentar mayor contribución de flujo base (FB = 111,1 mm, 67%) que la escorrentía superficial (55,7 mm, 33%).

### Cuenca del río Ramis

El mayor aporte de agua al sistema está dado por la precipitación (700,1 mm). El 77% de la precipitación se pierde del sistema hacia la atmósfera por la evapotranspiración real (ET = 541,7 mm) y por otro lado el 23% del aporte total al sistema (TAS) es el rendimiento hídrico de la cuenca (WYLD = 158,9 mm). De acuerdo a IBFswat (0,73), el rendimiento hídrico de la cuenca (WYLD) se caracteriza por presentar mayor contribución de flujo base (FB=116,8 mm, 73%) que la escorrentía superficial (42,1 mm, 27%).

### Cuenca del río Coata

El Aporte promedio anual de la precipitación es de 687,6 mm, del cual 65% de la precipitación se pierde del sistema hacia la atmósfera por la evapotranspiración real (ET = 446,7 mm) y por otro lado el 35% del aporte total al sistema (TAS) es el rendimiento hídrico de la cuenca (WYLD = 241,8 mm). De acuerdo a IBFswat (0,65), el rendimiento hídrico de la cuenca (WYLD) se caracteriza por presentar mayor contribución de flujo base (FB = 156,7 mm, 65%) que la escorrentía superficial (85,2 mm, 35%).

### Cuenca del río Ilave

El Aporte promedio anual de la precipitación es de 574,4 mm, del cual 78% de la precipitación se pierde del sistema hacia la atmósfera por la evapotranspiración real (ET = 449,8 mm) y por otro lado el 22% del aporte total al sistema (TAS) es el rendimiento hídrico de la cuenca (WYLD = 125,6 mm). De acuerdo a IBFswat (0,67), el rendimiento hídrico de la cuenca (WYLD) se caracteriza por presentar mayor contribución de flujo base (FB = 84,7 mm, 67%) que la escorrentía superficial (40,9 mm, 33%).

### Verificación del índice de flujo base

La verificación de la capacidad del modelo en la caracterización de la contribución de la escorrentía superficial (Qsur) y el flujo base (FB) en las cuencas de estudio se ha evaluado comparando el índice de flujo base estimado por SWAT (IBFswat) en referencia al índice de flujo base de la cuenca (IBF). Donde IBF fue estimado utilizando la técnica automatizada de separación de flujo base de Arnold et al. (1995a) en base a los datos de descarga diaria observado en las estaciones hidrológicas ubicadas a la salida de la cuenca.

En la Tabla 4-4 se muestra los valores de IBFswat e IBF para cada una de las cuencas de estudio, donde se aprecia que el porcentaje de bias de IBFswat respecto a IBF de referencia para la cuenca del río Huancané es 1%, Ramis (0%), Coata (-1%) e llave (1%). Estos porcentajes de bias por ser próximos a cero indican que el modelo SWAT caracteriza muy bien la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base en todas las cuencas de estudio.

### Análisis regional de los componentes del balance hídrico

A continuación se realiza la inter-comparación de los principales componentes del balance hídrico anual a escala de cuenca hidrográfica en base a la Tabla 4-4 y se tiene que:

- La cuenca del río Ramis experimenta mayor aporte de precipitación (700,1 mm), seguida por Coata (687,6 mm), Huancané (636,6 mm) e llave (574,4 mm).
- La cuenca del río Ramis experimenta mayor pérdida del sistema hacia la atmósfera por evapotranspiración real (541,7 mm, 77% de la precipitación), seguida por Huancané (470,0 mm, 74% de la precipitación), llave (449,8 mm, 78% de la precipitación) y Coata (446,7 mm, 65% de la precipitación). De aquí, la relación de la evapotranspiración real entre la precipitación fluctúa entre 74 a 78% en la mayoría de las cuencas con excepción de Coata (65%).
- Considerando la diferencia entre el aporte de la precipitación y la salida del sistema principalmente por la evapotranspiración es la cuenca del río Coata con mayor rendimiento hídrico (241,8 mm), seguida por Huancané (166,9 mm), Ramis (158,9mm) e llave (125,6 mm). Donde es muy apreciable el bajo rendimiento hídrico de la cuenca del río llave ubicado al sur de la región hidrográfica del Lago Titicaca.
- El índice de flujo base (IBF) de las cuencas de estudio varía en el rango de 0,66 (Huancané, Coata e llave) a 0,73 (Ramis) con una media de 0,68 el cual nos indica que en la región hidrográfica del Lago Titicaca, el rendimiento hídrico de las cuencas en promedio son contribuidas en 68% (32%) por el flujo base (escorrentía superficial).

Por otro lado, la variabilidad espacial del promedio anual (período 1985-2015) de los principales componentes del balance hídrico como la precipitación se muestra en la Figura 4-7, evapotranspiración real (Figura 4-8), rendimiento hídrico (Figura 4-9), índice de flujo base (Figura 4-10). Estos mapas son útiles para el mejor conocimiento de la disponibilidad de los recursos hídricos a lo largo de la región hidrográfica del Lago Titicaca. Por lo tanto, proporciona la información estratégica necesaria para la planificación del uso adecuado del recurso hídrico.

Tabla 4-4. Promedio anual del balance hídrico (periodo 1985-2015) de las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave de la región hidrográfica del Titicaca.

<b>Componentes del balance hídrico anual (Periodo 1985-2015)</b>	<b>Huancané</b>	<b>Ramis</b>	<b>Coata</b>	<b>llave</b>
<b>Área de la cuenca (A) [km<sup>2</sup>]</b>	3540	14590	4435	7764
<b>Aporte al sistema</b>				
Total aporte al sistema (TAS) [mm]	636,9	700,6	688,5	575,4
Precipitación (R) [mm]	636,6	700,1	687,6	574,4
Nieve [mm]	0,3	0,5	1,0	1,0
Derretimiento de la nieve [mm]	0,3	0,5	1,0	1,0
<b>Pérdida del sistema hacia la atmósfera</b>				
Pérdida total hacia la atmósfera (ET_total) [mm]	470,0	541,7	446,7	449,8
Sublimación	0,0	0,0	0,0	0,0
Evapotranspiración real (ET) [mm]	470,0	541,7	446,7	449,8
<b>Rendimiento en la salida de la cuenca</b>				
Rendimiento hídrico (WYLD=Qsurf+Qlat+Qgws+Qgwd-Tlosses) [mm]	166,9	158,9	241,8	125,6
Pérdida por transmisión en los canales (Tlosses) [mm]	0,0	0,0	0,0	0,0
Contribución de escorrentía superficial (Qsurf) [mm]	55,7	42,1	85,2	40,9
Contribución de flujo base (FB=Qlat+Qgws+Qgwd) [mm]	111,1	116,8	156,7	84,7
Flujo Lateral (Qlat) [mm]	35,0	47,9	47,2	33,3
Flujo de retorno desde el acuífero superficial (Qgws) [mm]	37,9	34,4	83,7	24,5
Flujo de retorno desde el acuífero profundo (Qgwd) [mm]	38,2	34,5	25,8	26,9
<b>Verificaciones</b>				
IBF de referencia	0,66	0,73	0,66	0,66
IBFswat = [Qlat + Qgws y Qgwd ]/[Qsurf + Qlat + Qgws + Qgwd ]	0,67	0,73	0,65	0,67
Porcentaje de bias de IBFswat respecto a IBF de referencia [%]	1,00	0,00	-1,00	1,00
ET/R	0,74	0,77	0,65	0,78
WYLD/TAS	0,26	0,23	0,35	0,22

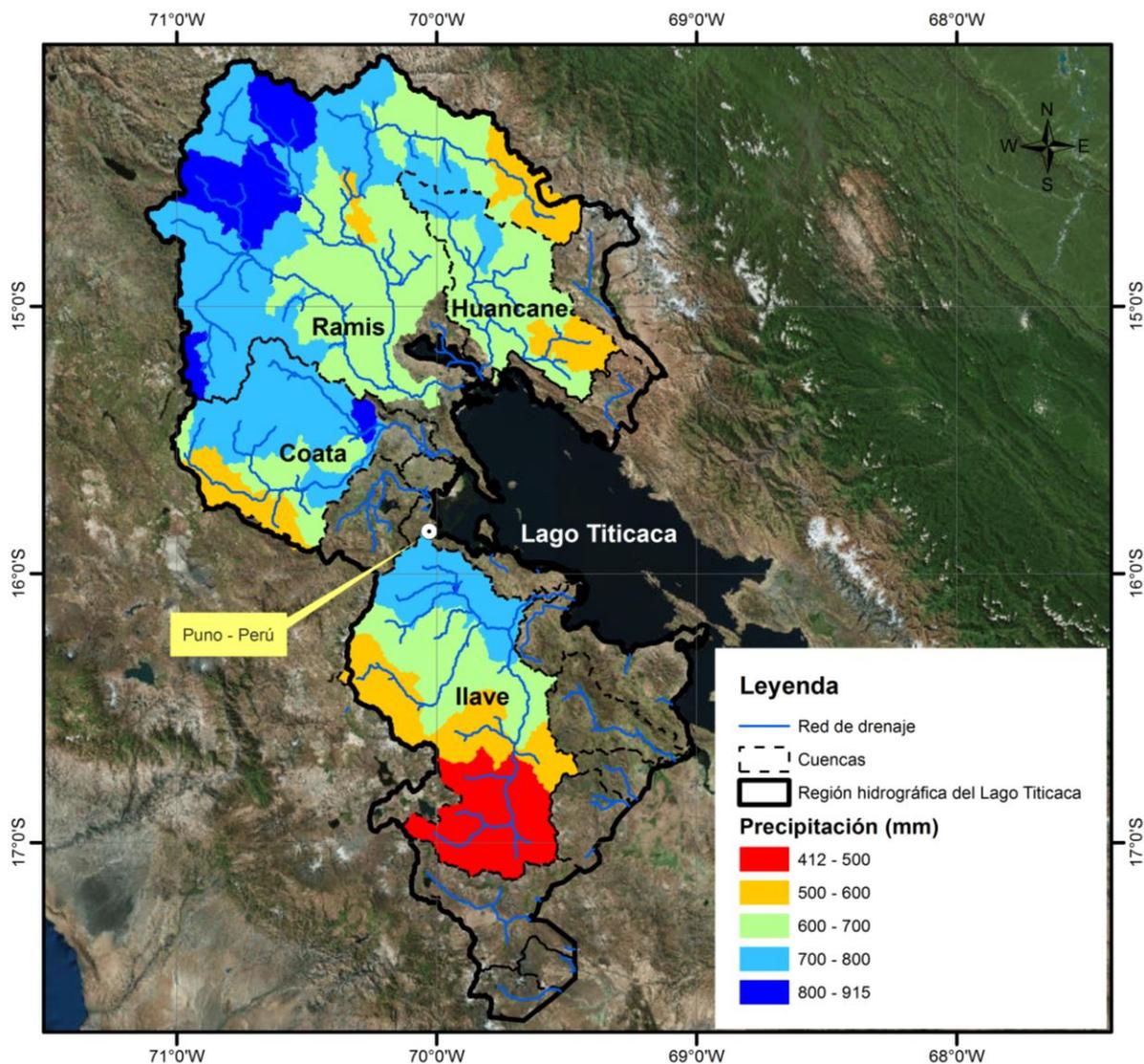


Figura 4-7. Distribución espacial de la precipitación media anual (periodo 1985-2015) para las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e Ilave de la Región hidrográfica del Titicaca.

Fuente:

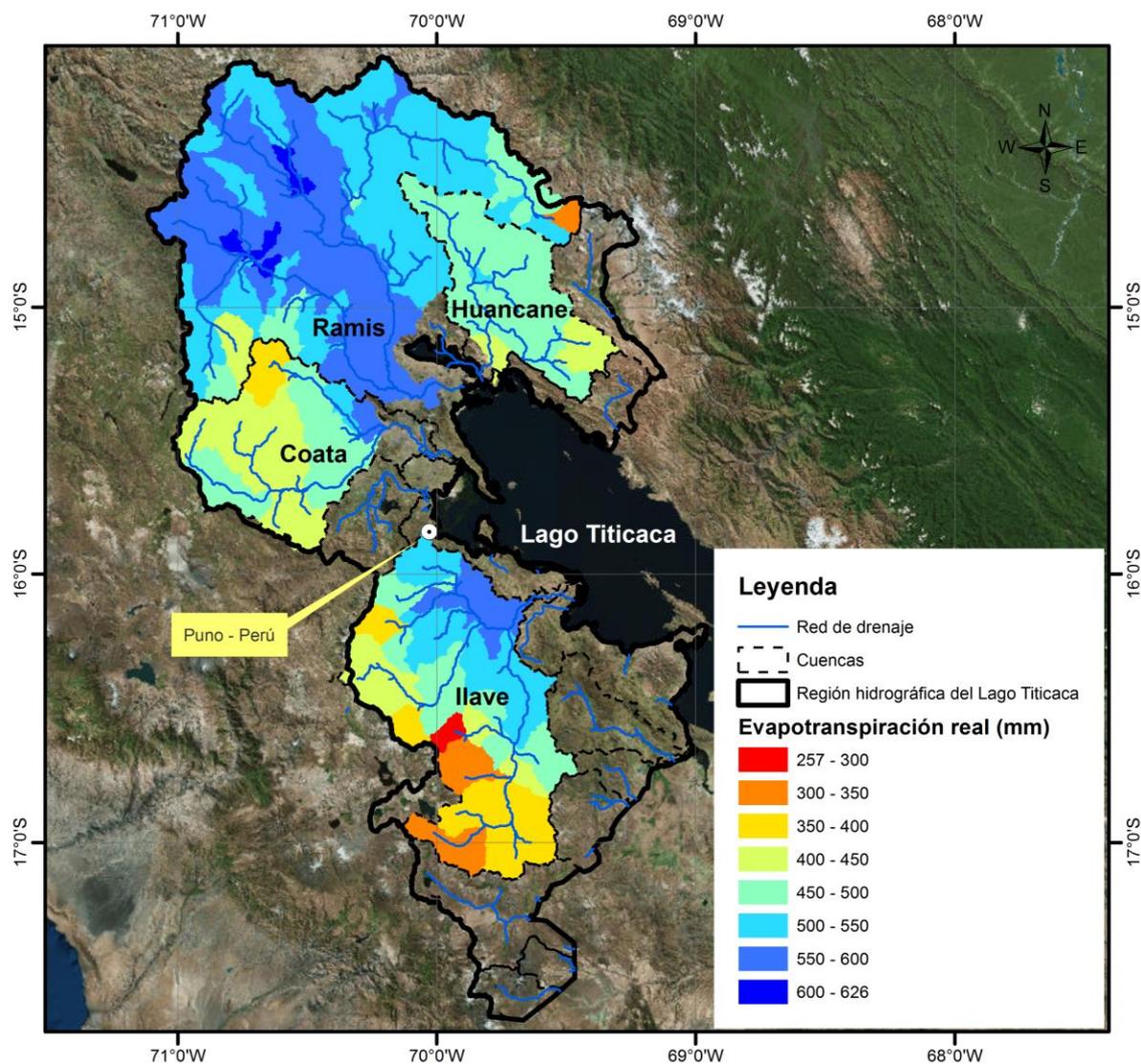


Figura 4-8. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual (periodo 1985-2015) para las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e Ilave de la Región hidrográfica del Titicaca.

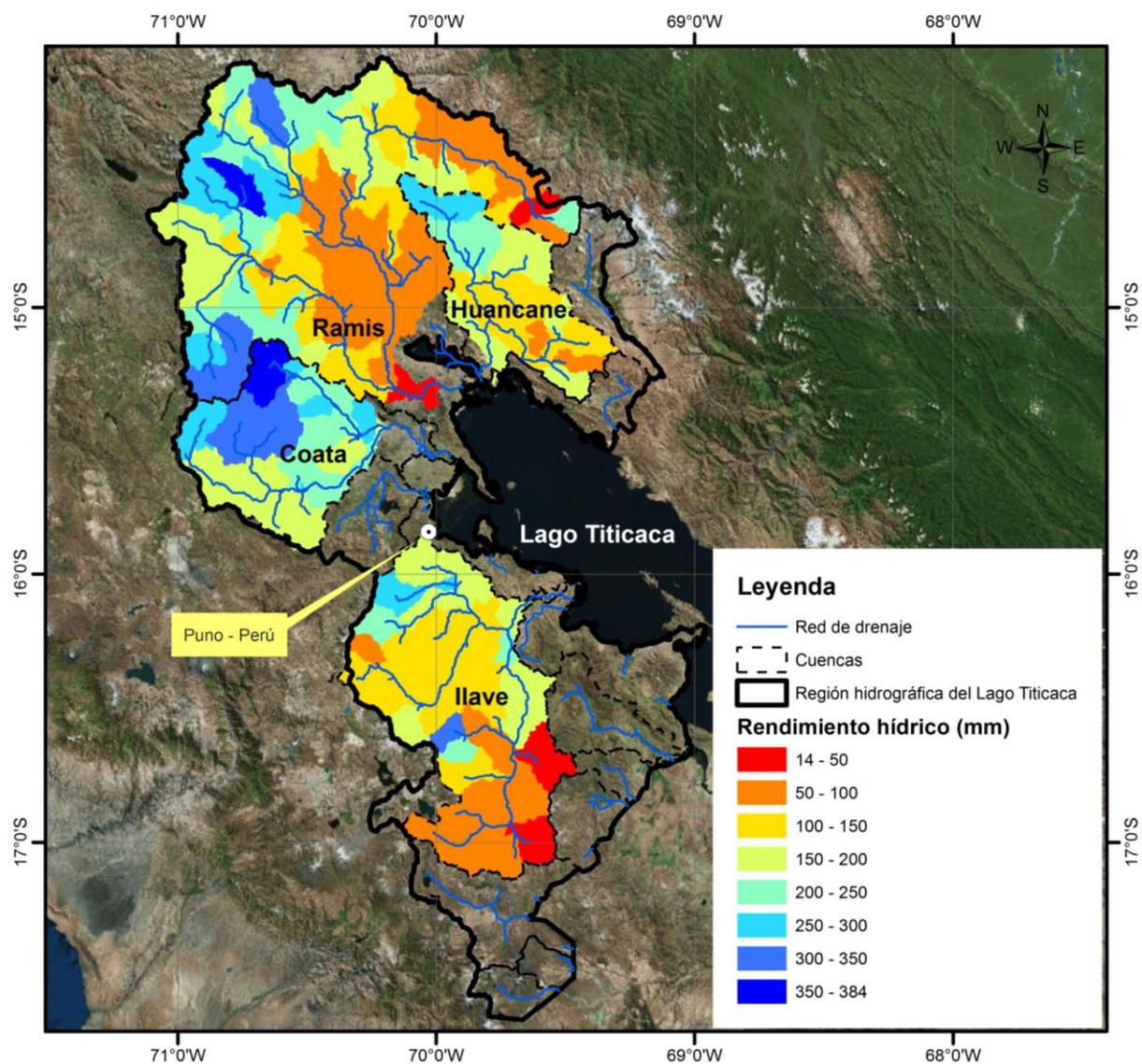


Figura 4-9. Distribución espacial del rendimiento hídrico media anual (periodo 1985-2015) para las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e Ilave de la Región hidrográfica del Titicaca.

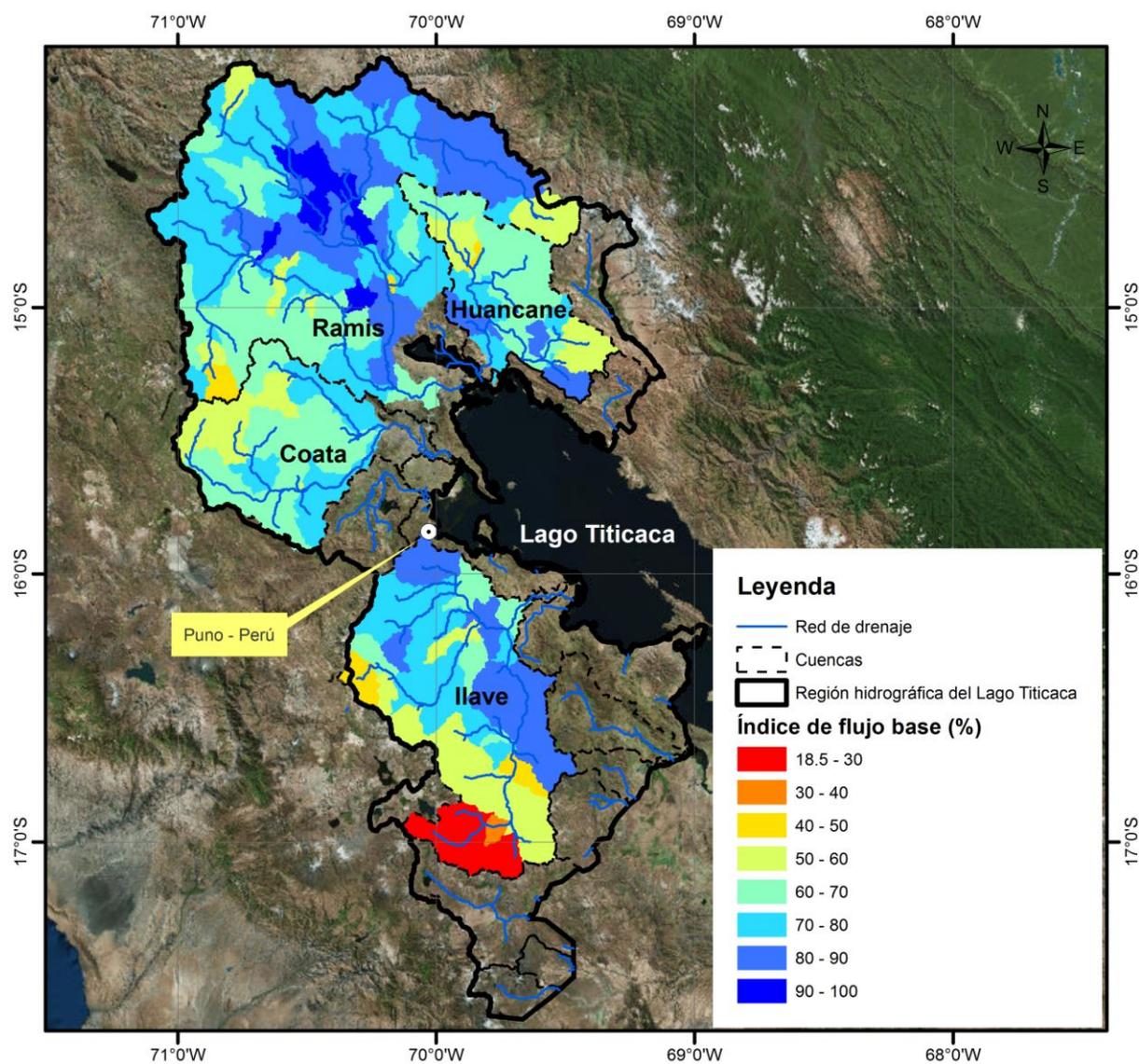


Figura 4-10. Distribución espacial del índice de flujo base para las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e Ilave de la Región hidrográfica del Titicaca.

## 5. CONCLUSIONES

En este estudio se realizó el modelamiento hidrológico de las cuencas del río Huancané, Ramis, Coata e llave utilizando el modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) con la finalidad de conocer el potencial hídrico de las cuencas de la región hidrográfica del Titicaca lo cual es útil para los tomadores de decisiones con el fin de promover la planificación de los recursos hídricos. Para tal fin, se ha construido el modelo hidrológico SWAT para cada cuenca en estudio y evaluamos el desempeño del modelo en la simulación de descargas diarias y mensuales tanto en la etapa de calibración y validación del modelo. Finalmente, en base al modelo hidrológico calibrado se ha caracterizado el potencial hídrico de las cuencas.

Las principales conclusiones se resumen a continuación.

- A pesar de la complejidad del modelo SWAT; 5 parámetros (CN2, SURLAG, ESCO, SOL\_\_AWC y RCHRG\_DP) del modelo fueron calibrados. De estos parámetros, 4 (5) parámetros fueron calibrados en la cuenca del río Huancané y Coata (Ramis e llave). Es muy importante enfatizar la calibración del parámetro RCHRG\_DP, ya que su calibración permitió que el modelo tenga la capacidad de simular bien las descargas en la temporada de estiaje en todas las cuencas de estudio. Además, se encontró similares valores óptimos de este parámetro (RCHRG\_DP = 0.4) en la mayoría de las cuencas; el cual nos indica que se tiene una característica común todas las cuencas, donde en promedio el 40% de agua que recarga el acuífero superficial pasa a recargar el acuífero profundo.
- El desempeño del modelo hidrológico SWAT en la simulación de descargas medias diarias tanto en la etapa de calibración y validación es bueno en términos del coeficiente de eficiencia de NASH (NSE entre 0,65-0,75). Mientras tanto, respecto al porcentaje de bias (PBIAS) se tiene un desempeño muy bueno (PBIAS < 10%) en las cuencas del río Huancané, Coata e llave y un desempeño bueno (PBIAS entre 10-15%) en la cuenca del río Ramis tanto en la etapa de calibración y validación.
- El desempeño del modelo SWAT en la simulación de descargas medias mensuales son muy buenas con respecto a NSE (>0,75) y PBIAS (< 10%) tanto en la etapa de calibración y validación del modelo.
- Se ha verificado que además del buen desempeño del modelo SWAT en la simulación de descarga media diaria y mensual; el modelo fue capaz de cuantificar la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base en términos del índice de flujo base en cada cuenca de estudio. Donde, en cada cuenca de estudio el índice de flujo base estimado por SWAT (IBF<sub>swat</sub>) fueron muy similares al índice flujo base (IBF) de referencia estimado en base a los datos de descarga diaria observado utilizando la técnica automatizada de separación de flujo base de Arnold et al. (1995a). Aquí, es muy importante resaltar que los valores del IBF (0.68 en promedio) resultaron ser similares en la mayoría de las cuencas por lo que se podría inferir que el rendimiento hídrico de las cuencas de la región hidrográfica del Lago Titicaca en promedio son contribuidas en 68% (32%) por el flujo base (escorrentía superficial). Sin embargo, es necesario estudios experimentales posteriores para tener mejor estimación del IBF.

- El balance hídrico promedio anual de los principales componentes del ciclo hidrológico para el período 1985-2015 y a escala de cuenca hidrográfica nos indica que: La cuenca del río Ramis experimenta mayor aporte de precipitación (700,1 mm), seguida por Coata (687,6 mm), Huancané (636,6 mm) e Ilave (574,4 mm). La cuenca del río Ramis experimenta mayor pérdida del sistema hacia la atmósfera por evapotranspiración real (541,7 mm, 77% de la precipitación), seguida por Huancané (470,0 mm, 74% de la precipitación), Ilave (449,8 mm, 78% de la precipitación) y Coata (446,7 mm, 65% de la precipitación). En consecuencia, la cuenca con mayor rendimiento hídrico es la cuenca del río Coata (241,8 mm), seguida por Huancané (166,9 mm), Ramis (158,9 mm) e Ilave (125,6 mm). Siendo muy apreciable el bajo rendimiento hídrico de la cuenca del río Ilave ubicado al sur de la región hidrográfica del Lago Titicaca.

## 6. RECOMENDACIONES

- Los mapas de la variabilidad espacial de los principales componentes del balance hídrico (media anual del período 1985-2015) como la precipitación, evapotranspiración real, rendimiento hídrico y índice de flujo base, serán de gran utilidad para el mejor conocimiento de la disponibilidad de los recursos hídricos a lo largo de la región hidrográfica del Titicaca y para la planificación adecuada de los recursos hídricos por los gestores de toma de decisiones.
- Los parámetros calibrados del modelo SWAT se sustentan en el Estudio asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota, se recomienda su revisión previa, disponible en: <http://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/hidro2016-0006.pdf>

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alansi AW, Amin MSM, Abdul Halim G, et al (2009) Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 6:7581–7609. doi: 10.5194/hessd-6-7581-2009
- Ancco C (2010) Estudio Hidrológico de las Cuencas Huancané y Suches. Lima, Perú
- Aouissi J, Benabdallah S, Lili Chabaâne Z, Cudennec C (2016) Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT—Application in data-scarce rural Tunisia. *Agric Water Manag.* doi: 10.1016/j.agwat.2016.03.004
- Aparicio Mijares, F. J. y Mijares FA (1989) Fundamentos de hidrología de superficie.
- Arnold JG, Allen PM, Bernhardt G (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. *J Hydrol* 142:47–69. doi: 10.1016/0022-1694(93)90004-S
- Arnold JG, Kiniry JR, Srinivasan R, et al (2013) Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation. version 2012. Texas Water Resour Institute, TR-439 650.
- Arnold JG, Moriasi DN, Gassman PW, et al (2012) SWAT: Model use, calibration, and validation.
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34:73–89.
- Aybar C, Lavado-Casimiro, W Huerta A, Fernández C, et al (2017) Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Lima-Perú
- Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1988) Applied hydrology. McGraw-Hill, Inc., New York, NY.
- Cotler H (2004) El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. México, D. F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. 264 p.
- Cruz HR (2014) Aplicación del modelo SWAT para cuenca, análisis del flujo base en una sur, mexicana del pacífico. Colegio de Postgraduados - postgrado de hidrocencias
- Cuceloglu G, Abbaspour K, Ozturk I (2017) Assessing the Water-Resources Potential of Istanbul by Using a Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrological Model. *Water* 9:814. doi: 10.3390/w9100814
- Del Carmen R (2001) Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua.
- Emam AR, Kappas M, Abbaspour KC (2014) Simulation of Water Balance Components in a Watershed Located in Central Drainage Basin of Iran. In: *Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle.* John Wiley & Sons, Inc, pp 463–477
- Falvey M, Garreaud RD (2005) Moisture variability over the South American Altiplano during the South American low level jet experiment (SALLJEX) observing season.
- FAO-1995 (2003) The Digitized Soil Map of the World Including Derived Soil Properties (version 3.5). FAO Land and Water Digital Media Series # 1. FAO, Rome.
- Fernández-Palomino CA (2016) Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota.
- FGRA-WWF (2003) Manejo del Agua en Cuencas Hidrográficas: Desarrollo de Nuevos Modelos en México.
- Ficklin DL, Barnhart BL (2014) SWAT hydrologic model parameter uncertainty and its implications for hydroclimatic projections in snowmelt-dependent watersheds. *J Hydrol* 519:2081–2090. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.082
- Garreaud R (1999) Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. *Mon Weather Rev* 127:901–921.
- Garreaud R, Aceituno P (2001a) Interannual rainfall variability over the South American Altiplano. *J Clim* 14:2779–2789.
- Garreaud RD, Aceituno P (2001b) Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. *J Clim* 14:2779–2789. doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<2779:IRVOTS>2.0.CO;2
- Gassman PW, Reyes MR, Green CH, Arnold JG (2007) The Soil and Water Assessment Tool : historical

- development, applications, and future research directions. *Trans ASAE* 50:1211–1250. doi: 10.1.1.88.6554
- González JI (2000) Guía metodológica para el estudio de cuencas hidrológicas superficiales con proyección de manejo. Universidad de La Habana, Cuba.
- Hargreaves GH, Samani Z a. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl Eng Agric* 1:96–99. doi: 10.13031/2013.26773
- Heber Green W, Ampt GA (1911) Studies on Soil Physics. *J Agric Sci* 4:1. doi: 10.1017/S0021859600001441
- Herrera J (2015) Generación y calibración de caudales medios mensuales mediante el modelo GR2M, en la cuenca del río Coata. Universidad Nacional del Altiplano - Puno
- Khoi DN, Thom VT (2015) Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam. *Glob Ecol Conserv* 4:538–548. doi: 10.1016/j.gecco.2015.10.007
- Lavado Casimiro WS, Ronchail J, Labat D, et al (2012) Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrol Sci J* 57:625–642. doi: 10.1080/02626667.2012.672985
- Linsley K, Kohler A, Paulhus LH (1990) Hidrología para ingenieros. México: Editorial McGraw-Hill.
- Lujano E (2013) Caracterización hidroclimática, modelización hidrológica y eventos extremos en las cuencas de los ríos Coata e Ilave. Puno
- Lujano Laura E, Sosa Sarmiento JD, Lujano Laura A, Lujano Laura R (2016) Modelación hidrológica semidistribuida en la región hidrográfica del Titicaca: caso de estudio cuenca del río Ramis, Perú. *Rev Investig Altoandinas - J High Andean Res* 18:431. doi: 10.18271/ria.2016.235
- Luo Y, Arnold J, Allen P, Chen X (2012) Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. *Hydrol Earth Syst Sci* 16:1259–1267. doi: 10.5194/hess-16-1259-2012
- Me W, Abell JM, Hamilton DP (2015) Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. *Hydrol Earth Syst Sci* 19:4127–4147. doi: 10.5194/hess-19-4127-2015
- Minoti RT (2006) Abordagens qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do Médio Mogi-Superior/SP 231f., Brasil: Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São.
- Monteith JL (1965) Evaporation and environment. *Symp Soc Exp Biol* 19:205–34.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, et al (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50:885–900. doi: 10.13031/2013.23153
- Neitsch S., Arnold J., Kiniry J., Williams J. (2011) Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resour Institute, TR-406 1–647.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, et al (2002) Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000.
- Oñate F, Aguilar G (2003) Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del Río Catamayo.
- Perrin J, Ferrant S, Massuel S, et al (2012) Assessing water availability in a semi-arid watershed of southern India using a semi-distributed model. *J Hydrol* 460–461:143–155. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.07.002
- Priestley CHB, Taylor RJ (1972) On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Mon Weather Rev* 100:81–92. doi: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2
- Sanabria J, Marengo J, Valverde M (2009) Climate change scenarios using regional models for the Peruvian Altiplano (Departament of Puno). *Rev Peru Geo-Atmosférica* 1:133–148.
- Santos-Villar D (2016) Oferta hídrica superficial del río Coata-Puno bajo escenarios de cambio climático.
- Tan ML, Ficklin DL, Dixon B, et al (2015) Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow. *Appl Geogr* 63:357–368. doi: 10.1016/j.apgeog.2015.07.014

- Ticona A (2016) Modelación hidrológica de escenarios futuros de caudales medios con la aplicación del modelo hidrológico WEAP en la cuenca del río llave - Puno. Universidad Nacional del Altiplano - Puno
- USDA-SCS (1983) National Engineering Handbook. USDA, Washington, DC.
- USDA Soil Conservation Service (1972) National Engineering Handbook; Section 4, Hydrology. U.S. Department of Agriculture: Washington, DC, USA.
- Vera-Arévalo H, Felipe-Obando O (2011) Modelización de los caudales medios mensuales en la cuenca del río Ramis. Rev Peru GEO-ATMOSFÉRICA RPGA 3:116–124.
- Vilaysane B, Takara K, Luo P, et al (2015) Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR. Procedia Environ Sci 28:380–390. doi: 10.1016/j.proenv.2015.07.047
- Villón M (2004) Hidrología. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Vuille M, Ammann C (1997) Regional snowfall patterns in the high, arid Andes. In: Climatic Change at High Elevation Sites. Springer, pp 181–191
- Vuille M, Keimig F (2004) Interannual variability of summertime convective cloudiness and precipitation in the central Andes derived from ISCCP-B3 data. J Clim 17:3334–3348.
- Williams JR (1969a) Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Trans ASAE 12:100–103.
- Williams JR (1969b) Flood Routing with Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients. Trans ASAE 12:100–103. doi: 10.13031/2013.38772
- Williams JR, Hann RW (1972) HYMO, a problem-oriented computer language for building hydrologic models. Water Resour Res 8:79–85.
- Yesuf HM, Melesse AM, Zeleke G, Alamirew T (2016) Streamflow prediction uncertainty analysis and verification of SWAT model in a tropical watershed. Environ Earth Sci 75:806. doi: 10.1007/s12665-016-5636-z
- Zheng-qing L, Cheng-gang L, Zhuo-tong N, et al Improvement and Applications of SWAT Model in the Upper-middle Heihe River Basin. J. Nat. Resour. 28:1404–1413.