

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

EVALUACIÓN DE LOS CAUDALES LÍQUIDOS Y DE PRODUCCIÓN DE  
SEDIMENTOS ESTIMADOS CON EL MODELO SOIL WATER  
ASSESSMENT TOOL (SWAT) Y SU RELACIÓN CON LOS CAUDALES  
LÍQUIDOS Y SÓLIDOS OBSERVADOS

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAESTRÍA EN  
INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS

GUIDO GERARDO TAMAYO GARCÍA  
guidogerardo10@gmail.com

Director: CARLOS SEBASTIÁN PÁEZ BIMOS  
carlos.paezb@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2017

## DECLARACIÓN

Yo, Guido Gerardo Tamayo García, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Guido Gerardo Tamayo García

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Guido Gerardo Tamayo García, bajo mi supervisión.

---

Carlos Sebastián Páez Bimos  
Director del Proyecto

## AGRADECIMIENTOS

El conocimiento y la disciplina obtenidos durante la realización de este trabajo no hubieran sido posible sin la confianza y el apoyo brindado por la Dra. Carolina Bernal y la Ing. María Cristina Torres Msc., quienes me han permitido ser parte dos proyectos multidisciplinarios realizados en la Escuela Politécnica Nacional.

Agradezco al Ing. Sebastián Páez MSc. y al Ing. Manuel Narváez por acompañarme y guiarme en todo el proceso de aprendizaje, configuración y evaluación del modelo hidrológico SWAT.

Agradezco a la Ing. Natalia Horna, por facilitarme toda la información recopilada en su investigación y al Dr. Armando Molina por sus comentarios y ayuda respecto a la producción de sedimentos.

Al equipo del PIMI-14-09 y TEEB, por estar prestos a trabajar en conjunto, siempre en un ambiente respetuoso y lleno de compañerismo.

A mi familia por el ejemplo y por hacer que cada gesto, palabra de cariño o momento compartido, hayan generado en mí esa idea de certitud, de que siempre podemos contar con alguien

A mis amigos de la infancia y juventud, lejos o cerca, siempre están presentes.

Y, William Sutter, por la madurez de sus consejos y el infinito de sus conocimientos, compartidos en este hermoso viaje.

## DEDICATORIA

A mis abuelos: Anita, Carmen y Gerardo, por los domingos llenos de amor y cariño.

A mi querida hija Macarena, la continuación de la fiesta de la vida (Conciencia, Voluntad, Disciplina y Amor).

**Guido**

## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	<b>xii</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xv</b>
<b>PRESENTACIÓN</b>	<b>xvi</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES . . . . .	1
1.2 JUSTIFICACIÓN . . . . .	1
1.3 OBJETIVOS . . . . .	2
1.3.1 OBJETIVO GENERAL . . . . .	2
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	2
1.4 MARCO DE TRABAJO . . . . .	2
1.5 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN . . . . .	2
1.5.1 ESTUDIOS PREVIOS . . . . .	3
1.5.2 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA BASE Y TEMÁTICA . . . . .	3
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>4</b>
2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS DE CUENCA . . . . .	4
2.2 APLICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS DE CUENCA . . . . .	4
2.3 CLASIFICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS . . . . .	5
2.3.1 MODELOS EMPÍRICOS, CONCEPTUALES O EN BASE FÍSICA . . . . .	5
2.3.2 MODELOS GLOBALES, SEMIDISTRIBUIDOS Y DISTRIBUIDOS . . . . .	6
2.3.3 MODELOS DETERMINÍSTICOS Y ESTOCÁSTICOS . . . . .	6
2.3.4 MODELOS DE EVENTO Y CONTINUOS . . . . .	6
2.4 MODELO SWAT . . . . .	6
2.4.1 FASE TERRESTRE DEL CICLO HIDROLÓGICO . . . . .	8
2.4.2 FASE DE TRANSPORTE . . . . .	12

<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA</b>	<b>14</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDIO . . . . .	14
3.1.1	CLIMA . . . . .	15
3.1.2	HIDROLOGÍA . . . . .	15
3.1.3	GEOLOGÍA . . . . .	16
3.1.4	SUELOS . . . . .	16
3.1.5	COBERTURA VEGETAL . . . . .	16
3.2	METODOLOGÍA . . . . .	17
3.2.1	CAUDAL LÍQUIDO . . . . .	17
3.2.2	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS . . . . .	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>44</b>
4.1	CAUDALES LÍQUIDOS . . . . .	44
4.1.1	SIMULACIÓN INICIAL DE CAUDALES . . . . .	44
4.1.2	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD . . . . .	46
4.1.3	PARÁMETROS ÓPTIMOS DE MODELO . . . . .	48
4.1.4	EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL MODELO . . . . .	50
4.1.5	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEI MODELO AGUAS ARRIBA DEL PUNTO DE CIERRE . . . . .	53
4.2	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS . . . . .	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>60</b>
5.1	CONCLUSIONES . . . . .	60
5.2	RECOMENDACIONES . . . . .	61
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>68</b>
<b>1</b>	<b>Información de precipitación, temperatura y de caudales líquidos disponibles para la simulación hidrológica a nivel diario</b>	<b>68</b>
<b>2</b>	<b>Componentes del Generador de clima</b>	<b>70</b>
<b>3</b>	<b>Puntos de visita y Observaciones realizadas en Cuenca del Río Coca, 29 y 30 de Octubre de 2015</b>	<b>72</b>
<b>4</b>	<b>Tablas elaboradas para Generador de Clima</b>	<b>74</b>
<b>5</b>	<b>Base de datos de suelo en SWAT</b>	<b>79</b>
<b>6</b>	<b>Parámetros de Calibración</b>	<b>81</b>

**7 Resultados, estación H0714 Coca en San Rafael**



## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Fase Terrestre y de Transporte del Agua en SWAT . . . . .	8
2.2	Representación del ciclo hidrológico en su fase terrestre . . . . .	9
3.1	Área de Estudio . . . . .	15
3.2	Metodología para la estimación de caudal líquido ( $Q_l$ ) . . . . .	17
3.3	Estaciones metereológicas utilizadas . . . . .	18
3.4	Metodología relleno de vacíos en MDE . . . . .	23
3.5	MDE de la cuenca del río Coca . . . . .	24
3.6	Mapa de cobertura vegetal 1990 . . . . .	25
3.7	Mapa de tipos de suelo 1990 . . . . .	27
3.8	Puntos de visita de campo 29 y 30 de octubre de 2015 . . . . .	28
3.9	Mapa de drenajes . . . . .	29
3.10	Estaciones hidrológicas en área de estudio . . . . .	31
3.11	Subcuencas . . . . .	33
3.12	Estaciones metereológicas configuradas en SWAT . . . . .	35
3.13	Metodología para estimar la producción de sedimentos . . . . .	41
4.1	Simulación inicial con SWAT, estación Coca en San Rafael (H0714), periodo 1976-1995 . . . . .	44
4.2	Caudal medio anual, estación Coca en San Rafael (H0714) . . . . .	45
4.3	Periodo de evaluación de modelo en estación H0714, periodo 1976-1986 . . . . .	46
4.4	Hidrograma observado vs. simulado durante etapa de calibración en estación H0714 . . . . .	51
4.5	Hidrograma observado vs. simulado durante etapa de validación en estación H0714 . . . . .	52
4.6	Hidrograma observado vs. simulado durante etapa de calibración en estación H0715 . . . . .	54
4.7	Hidrograma observado vs. simulado durante etapa de validación en estación H0715 . . . . .	55
4.8	Evapotranspiración por subcuenca . . . . .	56
4.9	Producción de agua por subcuenca . . . . .	57
4.10	Escorrentía superficial por subcuenca . . . . .	57
4.11	Flujo base por subcuenca . . . . .	58

## ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Marco de Trabajo . . . . .	2
1.2	Estudios e informes del área de estudio . . . . .	3
1.3	Cartografía utilizada en el estudio . . . . .	3
3.1	Estaciones metereológicas dentro del área de estudio . . . . .	18
3.2	Estaciones de precipitación . . . . .	19
3.3	Estaciones de temperatura máxima y mínima . . . . .	19
3.4	Estaciones para generador de clima . . . . .	20
3.5	Ecuaciones utilizadas para generar valores de temperatura media, máxima y mínima para estaciones M0701 y M0714 . . . . .	21
3.6	Asignación de códigos SWAT para coberturas del suelo . . . . .	26
3.7	Análisis granulométrico y de densidad aparente de pedones en parte alta (Papallacta) y media (Quijos) de la cuenca del río Coca . . . . .	29
3.8	Estaciones hidrológicas con $Q_l$ . . . . .	30
3.9	Criterios utilizados para evaluar el desempeño de modelo hidrológico . . . . .	37
3.10	Estaciones hidrológicas con curvas de descargas ( $Q_l$ vs. $Q_s$ ) . . . . .	42
3.11	Factores $C_{usle}$ utilizados en el modelo . . . . .	42
4.1	Ranking de los parámetros sensibles . . . . .	47
4.2	Lista de parámetros calibrados y sus valores . . . . .	49
4.3	Estimación de la producción anual de agua durante el periodo de calibración y validación en estación H0714 . . . . .	50
4.4	Porcentaje de aporte de los caudales que conforman el caudal total en estación H0714 . . . . .	50
4.5	Índices estadísticos para evaluar el desempeño de modelo en estación H0714 . . . . .	52
4.6	Estimación de la producción anual de agua durante el periodo de calibración y validación en estación H0715 . . . . .	53
4.7	Porcentaje de aporte de los caudales que conforman el caudal total en estación H0715 . . . . .	53
4.8	Índices estadísticos para evaluar el desempeño de modelo en estación H0715 . . . . .	55
4.9	Caudales sólidos observados y estimados en estación H0714 . . . . .	58
4.10	Caudales sólidos observados y estimados en estación H0715 . . . . .	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_{tc}$	Fracción de la precipitación diaria que ocurre en el tiempo de concentración
$\bar{O}$	Promedio de los datos observados
<i>Area</i>	Superficie subcuenca
<i>C</i>	Factor de manejo del cultivo
$E_a$	Evapotranspiración
<i>i</i>	Series de tiempo de los pares de valores observados y simulado
<i>K</i>	Factor de erodabilidad del suelo de USLE
<i>LS</i>	Factor topográfico
<i>n</i>	Pares de los valores observados y simulados
$O_i$	valor observado
<i>PE</i>	Factor de control por manejo de la erosión
$q_p$	Caudal pico
$Q_{gw}$	Flujo subterráneo
$Q_{surf}$	Escorrentía superficial
$R_{day}$	Precipitación en un día
$S_i$	Valor simulado
$SW_o$	Contenido inicial de agua del suelo
$SW_t$	Contenido final de agua en el suelo
<i>t</i>	Temperatura media de estación metereológica
$t_d$	Temperatura del punto de rocío
$t_{conc}$	Tiempo de concentración de la subcuenca
<i>V</i>	Volumen de escurrimiento por evento de precipitacion
<i>Y</i>	Producción de sedimentos

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ARSET</b>	Applied Remote Sensing Training
<b>CONELEC</b>	Consejo Nacional de Electricidad
<b>EPN</b>	Escuela Politécnica Nacional
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization of the United Nations
<b>EPN-PIMI-14-09</b>	Proyecto de Investigación Multi e Interdisciplinario “Análisis Hidrosedimentológico y Morfodinámico en el Río Coca. Caso de Estudio – Impactos Fluviales del Proyecto Coca Codo Sinclair (PHCCS)”
<b>IEE</b>	Instituto Espacial Ecuatoriano
<b>ETP</b>	Evapotranspiración Potencial
<b>IGM</b>	Instituto Geográfico Militar
<b>INAMHI</b>	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
<b>INECEL</b>	Instituto Ecuatoriano de Electrificación
<b>MAE</b>	Ministerio del Ambiente
<b>MDE</b>	Modelo Digital de Elevaciones
<b>MAGAP</b>	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca
<b>MUSLE</b>	Ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>NSE</b>	Nash Sutcliffe Efficiency
<b>PHCCS</b>	Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica
<b>SINOHYDRO</b>	Empresa China Estatal de ingeniería y construcción
<b>SNI</b>	Sistema Nacional de Información
<b>SPAW</b>	Programa Soil – Plant – Air – Water

<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission
<b>SWAT</b>	Soil Water Assessment Tool
<b>URH</b>	Unidad de Respuesta Hidrológica
<b>USDA</b>	United States Department of Agriculture
<b>USLE</b>	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

## RESUMEN

En este trabajo se presenta la aplicabilidad del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en la estimación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos en la cuenca del río Coca, aportante del mayor proyecto hidroeléctrico del Ecuador Coca Codo Sinclair (1500 MW).

El modelo fue implementado con información hidrometeorológica e información física cartográfica. El modelo hidrológico fue calibrado para el periodo 1976-1983 y validado para el periodo 1984-1986 en la estación H0714 (Coca en San Rafael). El análisis de sensibilidad mostró que la precipitación y la radiación solar son los parámetros más sensibles; no obstante, los parámetros: CH\_K2, MSK\_CO2, MSK\_CO1, MSK\_X, GW\_REVAP, GWQMN, ALPHA\_BF, GW\_DELAY, SOL\_AWC y CN2, también influenciaron en la respuesta del caudal.

La evaluación del modelo mostró resultados satisfactorios con  $NSE=0.74$  para el periodo de calibración y  $NSE=0.62$  para el periodo de validación. Igualmente se evaluó el desempeño del modelo aguas arriba en la estación H0715 (Quijos Aj Bombón), obteniéndose resultados satisfactorios:  $NSE = 0.84$  para el periodo de calibración y;  $NSE= 0.67$  para el periodo de validación.

Respecto a la producción de sedimentos, los resultados indican que los valores de la producción simulados por el SWAT son aproximadamente 3 órdenes de magnitud inferiores a los valores de la producción de sedimento total estimados por INECEL (1992), demostrando que el modelo subestima la producción de sedimentos en esta cuenca debido a que ecuación de MUSLE no considera la influencia de los movimientos de masa en la generación de sedimentos.

El estudio concluyó que el modelo SWAT tiene un potencial en aplicaciones hidrológicas y podría emplearse para estudios comparativos de cambio de uso de suelo o escenarios de cambio climático.

## ABSTRACT

This work presents the applicability of the hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in the estimation of streamflow and sediment yield in the Coca basin, contributing to the largest hydroelectric project in Ecuador Coca Codo Sinclair (1500 MW).

The model was implemented with hydrometeorological and physical information of the basin. The model was calibrated for the period 1976-1983 and validated for the period 1984-1986 at station H0714 (Coca in San Rafael). The sensitivity analysis showed that precipitation and solar radiation are the most sensitive parameters; However, the parameters: CH K2, MSK CO2, MSK CO1, MSK X, GW REVAP, GWQMN, ALPHA BF, GW DELAY, SOL AWC and CN2, also influenced in streamflow.

The evaluation of the model for streamflow, showed satisfactory results with  $NSE = 0.74$  for the calibration period and  $NSE = 0.62$  for the validation period. The performance of the upstream model at station H0715 (Quijos Aj Bombon) was also evaluated, obtaining satisfactory results:  $NSE = 0.84$ , for the calibration period and;  $NSE = 0.67$ , for the validation period.

Regarding sediment yield, the results indicate that SWAT, simulated production values are approximately 3 orders of magnitude lower than the values of total sediment yield, estimated by INECEL (1992); showing that model underestimates sediment yield in this basin because MUSLE equation does not consider the influence of mass movement on sediment generation

This study concluded that SWAT has potential in hydrological applications. The results could be used as basis for land use and climate change comparative analysis.

## PRESENTACIÓN

La cuenca amazónica ecuatoriana o región oriental, tiene un área de 133 296  $km^2$  (Seyler, 2009). Esta área representa aproximadamente la mitad del territorio del país y constituye sólo el 2% de la superficie total de la cuenca amazónica. Está limitada al oeste por la vertiente oriental de la cordillera de los Andes y al este por la planicie amazónica.

En esta región por sus condiciones naturales se están implementando importantes proyectos hidroeléctricos: uno de ellos, el Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (PHCCS), ubicado en la cuenca hidrográfica del mismo nombre y que forma parte de la cuenca alta del río Napo. Esta central hidroeléctrica generará una energía media de 8734 GWh/año (MEER, 2014) y su construcción tendrá efectos en las variables que controlan la morfología del río y la hidrología de la cuenca (EPN, 2015), por lo que su presencia plantea retos importantes en la gestión de la cuenca a fin de preservar la infraestructura y su eficiencia.

Razón por la cual, la Escuela Politécnica Nacional mediante el Departamento de Geología y el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental han planteado la ejecución del proyecto de investigación denominado "ANÁLISIS HIDROSEDIMENTOLÓGICO Y MORFODINÓAMICO EN EL RÍO COCA. CASO DE ESTUDIO: IMPACTOS FLUVIALES DEL PROYECTO COCA CODO SINCLAIR – PHCCS"; el cual tiene por objetivo general el evaluar la influencia de la presencia de grandes obras hidráulicas en la hidrosedimentología y geomorfología de grandes ríos donde estas se localizan.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Avances mundiales en las economías y niveles de vida han dado lugar a una creciente dependencia de los recursos hídricos (Daniel et al., 2011). Estos juegan un papel estratégico en el desarrollo socioeconómico de los países y se estima que 1400 millones de puestos de trabajo, 47 % de la población activa mundial, dependen en gran medida del agua (WWDR, 2016) .

En el Ecuador, el agua es el recurso natural de mayor incidencia en la vida económica y social del país; de su disponibilidad o déficit depende el desarrollo de las actividades de la población, así como su supervivencia (CEPAL, 2005). El agua es fuente de producción y de energía. Actualmente el Estado Ecuatoriano se encuentra impulsando la ejecución de 8 proyectos hidroeléctricos, cuyo aporte de potencia hasta el año de 2016 será de aproximadamente 2.822 MW (MEER, 2014); de estos, el Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (PHCCS) es el más grande con una potencia nominal de 1500 MW, cubriendo el 36 % del consumo de energía del país (Telégrafo, 2012). Este se constituye en un proyecto emblemático del estado ecuatoriano ya que aportará una energía media de 8.734 GWh/año (MEER, 2016).

En este contexto es donde nace la importancia de conocer el comportamiento y la distribución de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas, debido a que estas constituyen la unidad territorial natural para cuantificar la oferta de agua que producen estas durante el ciclo hidrológico. De aquí el objetivo de este trabajo: evaluar la aplicabilidad del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) en la estimación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos de la cuenca aportante al proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair.

### 1.2 JUSTIFICACIÓN

La construcción de un dique o una presa introduce cambios en el régimen hidrológico por la diferencia de caudal entre la entrada y salida de flujo por esas estructuras. El caudal de entrada, constituido por un caudal líquido y un caudal sólido, interactúa con los límites del río aguas abajo. La relación entre la capacidad de transporte del flujo y la carga de sedimentos lanzados desde la presa, así como la relación entre la erosividad del flujo y la erosionabilidad de las orillas de los río, determinarán los cambios que, a la larga, producen nuevas condiciones estables (Brandt, 2000)

El proyecto de investigación multidisciplinario denominado: "ANÁLISIS HIDROSEDIMENTOLÓGICO Y MORFODINÁMICO EN EL RÍO COCA, CASO DE ESTUDIO: IMPACTOS FLUVIALES DEL PROYECTO COCA CODO SINCLAIR PHCCS (EPN-PIMI-14-09)", busca determinar los cambios que producirá la construcción de tan importante proyecto, y es en este sentido, la generación de un modelo hidrológico de cuenca, que estime los caudales

líquidos y sólidos, constituye un insumo para estimar los cambios que se producirían por el emplazamiento de dicho proyecto.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar los caudales líquidos y la producción de sedimentos de la cuenca aportante al proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados utilizando el modelo hidrológico SWAT.

#### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar el modelo SWAT utilizando los datos meteorológicos y físicos disponibles de la cuenca del Río Coca.
- Estimar los caudales líquidos y sólidos generados por el modelo implementado.
- Evaluar el desempeño del modelo hidrológico y de predicción de sedimentos con relación a los datos históricos disponibles de caudal líquido y sólido en las estaciones hidrológicas Coca en San Rafael (H0714) y Quijos AJ Bombón (H0715).

### 1.4 MARCO DE TRABAJO

Este documento contiene 5 secciones. Una visión general de lo que se puede encontrar en cada capítulo se indica en la Tabla 1.1.

**TABLA 1.1:** Marco de Trabajo

Capítulo	Descripción
Introducción	Esta sección presenta el marco general en el que se desarrolla la investigación, los objetivos y su relación con el proyecto multidisciplinario llevado a cabo en la EPN
Marco Teórico	En este título se presenta la revisión bibliográfica requerida para el desarrollo del presente trabajo.
Área de Estudio y Metodología	Este componente describe el área de estudio, el proceso de construcción y evaluación del modelo hidrológico.
Resultados y Análisis	En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en las simulaciones, el análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo.
Conclusiones y Recomendaciones	Esta sección establece las principales conclusiones de esta investigación y propone recomendaciones para futuros estudios.

ELABORADO POR: Autor

### 1.5 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En este estudio se ha recopilado información cartográfica y documental de los estudios e informes generados dentro de la cuenca del río Coca. Esta información ha permitido

caracterizar el área de estudio y evaluar la aplicabilidad del modelo en la estimación de los caudales líquidos y sólidos.

### 1.5.1 ESTUDIOS PREVIOS

En la Tabla 1.2 se muestra la recopilación de los estudios e informes que se han tomado en cuenta en la realización de este estudio.

**TABLA 1.2:** Estudios e informes del área de estudio

Título	Fuente	Año	Contenido
Evaluación Hidrometeorológica y de Sedimentos en la Cuenca del Río Coca en la Zona de Influencia del Proyecto Coca Codo Sinclair.	EPN (Horna,2016)	2016	Tesis que recopila y evalúa la climatología e hidrología de la cuenca del río Coca dentro de la zona de influencia del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (PHCCS).
Design Report, Volume II (Hydrologic and Sediment Analysis)	SINOHYDRO	2012	Documento que analiza la información meteorológica e hidrológica requerida para el diseño del PHCCS
Informe Final,del Estudio de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, Anexo B y C (Hidrología y Sedimentología) - COD: 0209-B-152; COD: 0209-B-153	INECEL	1992	Estudios que analizan la información hidrológica y de producción de sedimentos de la cuenca del río Coca. En estos se presentan los métodos de estimación y sus respectivos resultados para el diseño preliminar del PHCCS

ELABORADO POR: Autor

### 1.5.2 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA BASE Y TEMÁTICA

En la Tabla 1.3 se presenta la información cartográfica utilizada en la configuración del modelo hidrológico.

**TABLA 1.3:** Cartografía utilizada en el estudio

Descripción	Fuente	Escala	Formato	Año
Modelo Digital de Elevaciones	SRTM	30*30m	GRID	2000
Modelo Digital de Elevaciones	IEE	3*3m	GRID	2010-2014
Cobertura de Suelo	MAGAP	1:250000	Vector (Polígono)	1990
Taxonomía de Suelos	MAGAP	1:250000	Vector (polígono)	2002
Drenajes	IGM	1:50000	Vector (línea)	2013
Estaciones Meteorológicas	INAMHI	1:50000	Vector (punto)	2014
Estaciones Hidrológicas	INAMHI	1:50000	Vector (punto)	2014

ELABORADO POR: Autor

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS DE CUENCA

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema complejo (Venneker, 2002). Es una esquematización en general matemática de toda o una parte del sistema hidrológico, capaz de simular los estados sucesivos del sistema a partir de su estado inicial y del conocimiento de las variables de entrada (Roche et al., 2012). El desempeño o performance del modelo depende de qué tan bien se están incorporando los procesos, sus interacciones y la cantidad de datos disponibles (Hingray et al., 2009).

El hidrosistema que frecuentemente es considerado para la modelización es la cuenca hidrológica (Hingray et al., 2009). Los modelos de cuenca "lluvia-escorrentía" nos permiten simular los procesos naturales del flujo del agua, y permiten representar a su vez otros procesos que ocurren en la cuenca como: generación de sedimentos, transporte de químicos, ciclo de nutrientes y microorganismos; pudiendo también ser útiles en cuantificar el impacto de las actividades humanas en estos procesos (Singh and Frevert, 2005; Pedraza and Ockerman, 2012).

Todos los procesos que se dan en la naturaleza son el resultado de una compleja interacción de variables y parámetros a diferentes escalas y temporalidad.

Los modelos hidrológicos son paramétricos. Los valores de los parámetros no son ni directamente ni, a menudo, indirectamente accesibles a su medición, ni igualmente extrapolables (Beven, 2011) (Roche et al., 2012). Los valores de los parámetros no pueden ser determinados más que a priori y de manera aproximada; y deben ser ajustados con datos ya medidos. Los modelos hidrológicos explican raramente más del 80 % de la varianza de los caudales diarios observados (Roche et al., 2012).

El apareamiento de la computadora y el crecimiento de su poder de procesamiento, desencadenaron otras dos revoluciones: la simulación numérica y la simulación estadística. Como resultado, avances en modelos hidrológicos de cuenca han ocurrido a un ritmo sin precedentes; es así como han aparecido un sinnúmero de modelos hidrológicos desde el desarrollo innovador del modelo Stanford Watershed Model (SWM) (Singh and Frevert, 2005).

### 2.2 APLICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS DE CUENCA

Los modelos hidrológicos de cuenca se han convertido en una herramienta importante para hacer frente a un espectro amplio de problemas de recursos hídricos y ambientales, por ejemplo: inundaciones; sequías; erosión de tierras altas; sedimentación; contaminación difusa; deterioro de lagos, etc (Singh and Frevert, 2005). Su utilidad depende de la estructura del modelo y del conocimiento de los procesos y fenómenos. Son aplicados para la interpolación o restitución de datos, predeterminación de eventos (evaluación de riegos), prevención de eventos futuros (ayuda a la gestión de los recursos hídricos en una cuenca) y simulación

de procesos y análisis de escenarios posibles (Roche et al., 2012).

## 2.3 CLASIFICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Hay muchas maneras de clasificar los modelos hidrológicos. El establecimiento de una topología es difícil y ambigua por la variedad de criterios de clasificación posible. Se propone a continuación los referidos por Roche et al. (2012) que los clasifica según el punto de vista adoptado:

- Según la naturaleza de las relaciones utilizadas para la representación de los procesos, los modelos son: empíricos, conceptuales o en base física.
- Según la representación espacial, los modelos son: globales, distribuidos o semidistribuidos.
- Según la manera de considerar las variables hidrológicas y sus relaciones entre esas variables, los modelos son determinísticos o estocásticos y,
- Según la representación de tiempo, los modelos son continuos o de evento.

### 2.3.1 MODELOS EMPÍRICOS, CONCEPTUALES O EN BASE FÍSICA

Los modelos empíricos son aquellos que el funcionamiento físico de la cuenca no es reproducido en su detalle, mas es reemplazado por las relaciones funcionales establecidas a partir del análisis de las variables de entrada y salida observadas. A estos modelos se los refiere como de "Caja Negra". Los modelos más relevantes de esta categoría son los modelos lineares, de redes neuronales y modelos caóticos.

Los modelos conceptuales fueron el primer intento para reproducir los diferentes procesos hidrológicos dentro de una cuenca en forma numérica (Davie, 2008) . Clarke (1973) los define como los modelos que no tienen en cuenta la distribución espacial de las variables de entrada o parámetros (Niu et al., 2014). El modelo NRCS, de Horton, de Green et Amp, de Muskingum o de Hayami son clasificados en esta categoría.

Los modelos en base física representan las operaciones hidrológicas del hidrosistema mediante el acoplamiento de diferente submodelos, cada uno a cierto proceso hidrológico (Musy et al., 2014). La ecuación de Saint-Venant o el de infiltración en un medio poroso homogéneo fundado sobre la ecuación de Richards son generalmente clasificados en esta categoría. Es importante mencionar que muchas de las ecuaciones utilizadas en estos modelos emplean factores empíricos.

Los tres tipos de modelo son útiles, y su uso depende de las preguntas a responderse en el estudio. Cada modelo tiene su propia eficiencia y grado de complejidad. No hay conflicto entre los modelos; ya que estos representan diferentes niveles de aproximación de la realidad (Xu, 2002).

### **2.3.2 MODELOS GLOBALES, SEMIDISTRIBUIDOS Y DISTRIBUIDOS**

Los modelos hidrológicos según su representación espacial representan el medio físico y, en particular, la unidad espacial en el cual las ecuaciones describen el proceso a resolverse (Musy et al., 2014).

Los modelos hidrológicos globales describen la cuenca de drenaje como una unidad hidrológica sola, ya que no necesita una descripción fina de ella (Bouanani et al., 2013; Musy et al., 2014). Las variables de salidas integradas a la cuenca son limitadas a la serie de variables de entrada no espacializadas como lluvia y evapotranspiración potencial (ETP).

Los modelos semi-distribuidos intentan representar el medio físico y en particular de la superficie de la cuenca de drenaje utilizando una discretización más o menos fina del espacio (Musy, 2014). Estos modelos simulan la evolución del sistema en cada área y describen los intercambios con los puntos adyacentes (Roche et al., 2012) .

Los modelos distribuidos son aquellos que tienen en cuenta la espacialización de fenómenos, esto quiere decir cuando sus funciones de producción y de transferencia (parámetros) no son homogéneas en el espacio (Beven, 2011).

### **2.3.3 MODELOS DETERMINÍSTICOS Y ESTOCÁSTICOS**

Los modelos determinísticos son llamados así porque todas las variables del modelo, cualesquiera que sean (de entrada, de salida, de estado o parámetros), toman, a cada instante un solo valor, de manera que un conjunto de valores de datos de entrada corresponden un conjunto único de valores de salida.

Los modelos estocásticos incorporan las incertidumbres al modelado. Se fundan sobre el hecho que ciertas variables estudiadas son aleatorias y tienen una estructura espacio-temporal. Las variables de salida del modelo son también variables aleatorias caracterizadas por su función de densidad de probabilidad (Roche et al., 2012).

### **2.3.4 MODELOS DE EVENTO Y CONTINUOS**

Los modelos de evento revelan como la cuenca responde a tormentas individuales, por ejemplo: picos de escurrimiento y tiempo de recesión. En contraste, los modelos hidrológicos continuos sintetizan los procesos y fenómenos hidrológicos; es decir, las respuestas de la cuenca a una serie de eventos de lluvia y sus efectos acumulativos durante un periodo de tiempo más largo que incluye tanto condiciones húmedas y secas (Chu and Steinman, 2009).

## **2.4 MODELO SWAT**

Soil Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1998; Srinivasan et al., 1998) es un modelo lluvia - escorrentía de cuenca, en base física, semidistribuido en función de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), determinístico y continuo, que opera en una base de información climática diaria, que es eficiente computacionalmente, y capaz de simular largos periodos de tiempo (Gassman et al., 2007). Está diseñado para predecir el impacto

del manejo o gestión: en el agua, sedimento y producción de químicos de la agricultura en cuencas no aforadas (Neitsch et al., 2011). Es un modelo que incluye varios submodelos/componentes como: clima, hidrología, propiedades del suelo, crecimiento de plantas, nutrientes y pesticidas, patógenos y bacterias y prácticas de manejo del suelo (Gassman et al., 2007); y donde el balance hídrico constituye la fuerza impulsora detrás de todo lo que pasa dentro de la cuenca (Neitsch et al., 2011).

En el modelo, la cuenca hidrográfica es considerada como la unidad de análisis, la cual puede subdividirse en subcuencas que se trazan tomando en cuenta la red de drenaje. Cada subcuenca, nuevamente puede ser dividida en un número de URH, que consiste en áreas con propiedades homogéneas de tipo de suelo, uso/cobertura de suelo y pendiente; y es en donde se realizan los procesos hidrológicos, de erosión, crecimiento de plantas, ciclo de nutrientes, dinámica de pesticidas y manejo de la agricultura, etc. El modelo SWAT ha sido probado alrededor del mundo y ha demostrado ser una herramienta efectiva para evaluar problemas relacionados con los recursos hídricos y contaminación no puntual en una amplia gama de escalas y condiciones ambientales (Gassman et al., 2007). La mayor cantidad de estudios realizados simulan y evalúan la hidrología, donde la estimación del ciclo hidrológico, a partir de la ecuación del balance hídrico a nivel del suelo (ecuación 2.1), constituye la base en la cual se simulan procesos de sedimentos, nutrientes y pesticidas (Neitsch et al., 2011).

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (2.1)$$

Donde:

$SW_t$ : Contenido final de agua en el suelo ( $mmH_2O$ )

$SW_o$ : Contenido inicial de agua del suelo en un día  $i$  ( $mmH_2O$ )

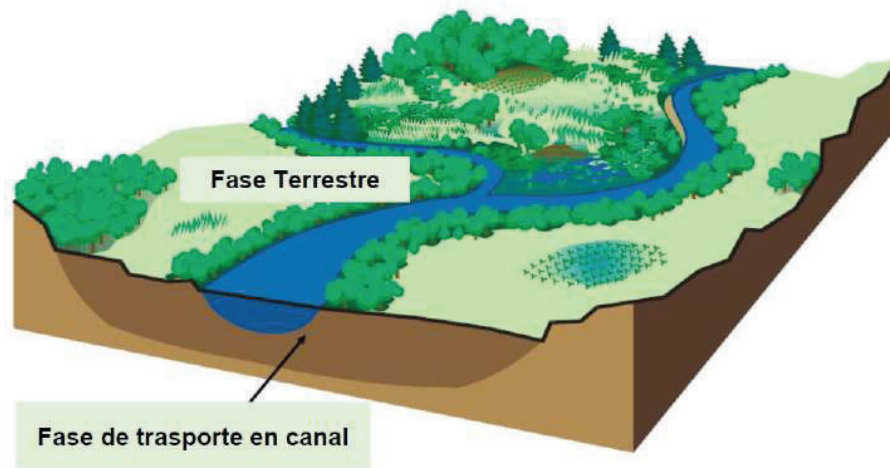
$R_{day}$ : Cantidad de precipitación en un día  $i$  ( $mmH_2O$ )

$Q_{surf}$ : Cantidad de escorrentía de la superficie en un día  $i$  ( $mmH_2O$ )

$E_a$ : Cantidad de evapotranspiración en día  $i$  ( $mmH_2O$ )

$Q_{gw}$ : Cantidad de flujo subterráneo en día  $i$  ( $mmH_2O$ )

La estimación del ciclo hidrológico se realiza tanto en una fase terrestre, como en una fase de transporte del agua a través de la red de drenajes (Figura 2.1). La fase terrestre del ciclo hidrológico controla la cantidad de agua, sedimentos, transporte de pesticidas, etc.; mientras que la fase de transporte define el movimiento del agua y sedimentos en la red de drenaje (Neitsch et al., 2011). Arnold et al. (2012) describen a detalle cada uno los métodos de cálculo que utilizan los distintos submodelos para simular los procesos que se llevan a cabo en la cuenca. No obstante, y tomando en cuenta el objetivo general de esta investigación, se presenta un breve resumen de los submodelos: clima, hidrología, erosión de la fase terrestre del ciclo hidrológico; y propagación de caudales en la fase de transporte.



**FIGURA 2.1:** Fase Terrestre y de Transporte del Agua en SWAT  
FUENTE: Van Griensven et al. (2008)

## 2.4.1 FASE TERRESTRE DEL CICLO HIDROLÓGICO

### Clima

El clima provee las entradas de humedad y energía que controla el balance hídrico de la cuenca y determina la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Para ejecutar el modelo SWAT se requiere el ingreso de datos de precipitación, temperatura y radiación solar y, dependiendo el método de cálculo de evapotranspiración utilizado, de velocidad del viento y la humedad relativa .

### Precipitación

La precipitación es el mecanismo con el cual el agua ingresa a la fase terrestre del ciclo hidrológico. La reproducción de caudales depende de esta información y es por tal razón que su inexistencia no permitiría reproducirlos de manera adecuada. El modelo SWAT requiere de información diaria para esta variable.

### Temperatura

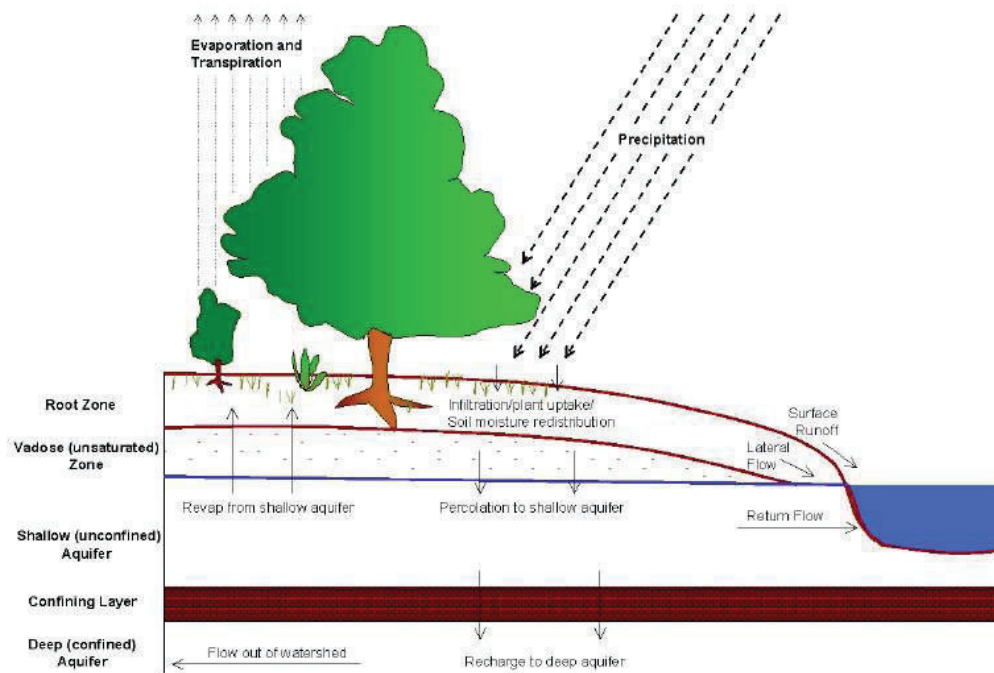
La temperatura influencia procesos físicos, químicos y biológicos, como la evaporación, descomposición de la materia orgánica, la mineralización y el crecimiento de los cultivos. El modelo requiere los valores máximos y mínimos diarios para su ejecución.

### Velocidad del viento y humedad relativa

La velocidad del viento y la humedad relativa se consideran en el proceso de estimación de la ETP si se utiliza el método de Penman-Monteith. Dado que el modelo SWAT necesita de información climática diaria para simular los procesos, y dado que muchas veces no se dispone de información de este tipo, el modelo dispone de un generador de clima el cual genera información a nivel diario de las variables a partir de valores mensuales promedio.



## Hidrología



**FIGURA 2.2:** Representación del ciclo hidrológico en su fase terrestre  
FUENTE: Neitsch et al. (2011)

La representación de este submodelo en la fase terrestre se observa en la (Figura 2.2), donde una vez ocurrida la precipitación, el agua puede ser inicialmente interceptada y almacenada en el dosel de la vegetación o caer al suelo. En la superficie del suelo, el agua puede infiltrarse, almacenarse en depresiones o descender en forma de flujo superficial. Si esta se infiltra, el agua puede transpirarse, evaporarse, almacenarse, distribuirse, percolarse o generar un flujo base (flujo lateral + flujo de retorno). Todos estos procesos son simulados por el SWAT y su cálculo es tomado en cuenta en el balance hídrico que realiza el modelo.

### Intercepción

Este proceso se da en suelos que están cubiertos por vegetación, en el que la precipitación que descende es interceptada y almacenada por el dosel, que es función de la densidad de la vegetación y afecta otros procesos como la infiltración y el escurrimiento superficial.

### Estancamiento en depresiones y flujo superficial (escorrentía)

A nivel de suelo, el estancamiento o la escorrentía (caudal superficial) suceden cuando la precipitación, directa o indirecta (proveniente de la vegetación o la irrigación), excede la capacidad de infiltración. En suelos saturados el agua puede estancarse en depresiones o iniciar su descenso en pendientes en forma de flujo superficial o escorrentía (Beven, 2011). El estancamiento de agua se produce en áreas de bajo relieve donde la red de drenaje es poco desarrollada; el modelo para su cómputo toma en cuenta el relieve.

Para el cálculo de la escorrentía el SWAT proporciona dos métodos: el método de Green-Ampt y el método Natural Resources Conservation Service (NRCS) - Número de Curva (CN). El método de Green-Ampt se utiliza cuando se dispone de información sub-diaria de la precipitación, y es una función de capilaridad y de la conductividad hidráulica en el suelo; en cambio el método NRCS utiliza el parámetro empírico Número de Curva, que varía entre valores de 0 a 100 para estimar la escorrentía y el agua que se infiltra al suelo, a partir de la altura de precipitación y las propiedades de uso y de la textura del suelo.

### **Infiltración**

Este proceso se refiere a la entrada de agua al perfil del suelo desde su superficie. Conforme la infiltración se sigue produciendo, el suelo incrementa su humedad haciendo que la tasa de infiltración disminuya. Su cálculo se realiza de manera indirecta si se utiliza el modelo NRCS - Número de Curva (CN), en cambio, si se utiliza el método de Green-Ampt este proceso si se modela pero necesita de información de precipitación a nivel sub-diario.

### **Distribución en el suelo y percolación**

El agua infiltrada puede redistribuirse en los perfiles del suelo, percolarse o evaporarse. La redistribución en el suelo es causada por la diferencia de contenido de agua en el perfil, el modelo utiliza la técnica de enrutamiento del almacenamiento para su cómputo (Gassman et al., 2007). La percolación se produce cuando en la capa superior excede el contenido de agua en capacidad de campo y la capa inferior no está saturada. La evaporación del suelo es parte del proceso de evapotranspiración que ocurre en la cuenca.

### **Evapotranspiración**

La evapotranspiración es un término que engloba al agua evaporada por la vegetación, el suelo, cauces, lagos, y la sublimación del hielo y nieve (Uribe, 2010). En la fase terrestre, el SWAT primero evapora el agua interceptada por la vegetación a partir de la evapotranspiración potencial (ETP), este proceso se calcula de manera explícita si se utiliza el método Green-Ampt, y de manera implícita si se utiliza el método NRCS -Numero de Curva (CN) (Gassman et al., 2007). Luego, el modelo computa el agua que es transpirada por las plantas utilizando una función lineal que relaciona la ETP y el índice de área foliar y, finalmente el agua evaporada por el suelo, que es función de su profundidad y contenido de agua.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, el modelo dispone de los métodos de Hargreaves Hargreaves and Samani (1985), Priestley-Taylor Priestley (1972), y Penman-Monteith Monteith (1964). La utilización de cualquiera de los métodos depende de los datos disponibles y el uso que se le va a dar al modelo.

### **Flujo lateral**

El flujo lateral se origina en el perfil de suelo, por encima de la zona saturada. Se calcula simultáneamente con la redistribución del agua, que se refiere al movimiento continuo de esta por un perfil de tierra después de su entrada, a través de precipitación o irrigación. Un modelo cinemático del almacenamiento es utilizado para predecir el flujo lateral en cada

perfil del suelo (Uribe, 2010). La conductividad hidráulica saturada, la pendiente y el contenido de agua en el suelo son variables tomadas en cuenta para su cálculo.

### Flujo de retorno

El flujo de retorno es el volumen de agua que se origina desde un acuífero libre. El modelo SWAT simula dos acuíferos. Un acuífero libre, el cual contribuye al flujo de retorno, y un acuífero confinado que contribuye con un flujo regional fuera de la cuenca (Arnold et al., 1993). El flujo de retorno se refiere al acuífero libre, se calcula en función de la conductividad hidráulica, la distancia de la divisoria de la subcuenca al canal principal y el nivel freático. El flujo de retorno en conjunto con flujo lateral forma el flujo base (Neitsch et al., 2011).

Es importante mencionar que entre el suelo y las aguas subterráneas en el modelo se considera la existencia de una zona de transición no saturada denominada zona vadosa, donde el agua transita desde el límite inferior del suelo hasta el acuífero libre. El desfase del tránsito dependerá de la profundidad de la capa freática y las propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas en la zona vadosa y el agua subterránea.

### Producción de Sedimentos

El modelo SWAT para estimar la producción de sedimentos, en la fase terrestre y en el de transporte, utiliza la ecuación Universal Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE) y degradación de canal bajo distintos modelos, respectivamente. La primera es empleada para estimar la pérdida de suelo en la fase terrestre del ciclo hidrológico, mientras que la segunda, calcula la degradación del canal en la fase de transporte. La degradación del canal es calculada siempre y cuando la producción de sedimentos de la fase terrestre que llega al canal es inferior a la capacidad de transporte del río. Los modelos utilizan la definición de la potencia del cauce para determinar su valor.

La ecuación de MUSLE estima la producción de sedimentos que llegan a la salida de las subcuenca para eventos de precipitación únicos (Yang, 2006). Esta no considera la energía erosiva de la precipitación como lo hace USLE, sino utiliza la energía erosiva de la escorrentía a partir de los volúmenes y caudales máximos generados por el submodelo hidrológico. La ecuación utilizada por el modelo es:

$$Y = 11,8(V \cdot q_p)^{0,56}(K)(C)(PE)(LS) \quad (2.2)$$

Donde:

$Y$ : producción de sedimento en un día ( $Tm$ )

$V$ : volumen de escurrimiento por evento de precipitación ( $m^3$ )

$q_p$ : caudal pico ( $m^3/s$ )

$K$ : factor de erodabilidad del suelo de USLE

$C$ : factor de manejo del cultivo

$PE$ : factor de control por manejo de la erosión

$LS$ : factor topográfico

En el submodelo de hidrología, se describe el volumen de escorrentía superficial o por evento. A continuación se describen el resto de factores.

### Caudal Pico ( $q_p$ )

El caudal pico se resuelve utilizando el método racional modificado utilizando la ecuación 2.3

$$q_p = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3,6 \cdot t_{conc}} \quad (2.3)$$

Donde:

$q_p$ : caudal pico ( $m^3$ )

$\alpha_{tc}$ : fracción de la precipitación diaria que ocurre en el tiempo de concentración

$Q_{surf}$ : escorrentía superficial ( $mmH_2O$ )

$Area$ : superficie la subcuenca ( $km^2$ )

$t_{conc}$ : tiempo de concentración para la subcuenca ( $hr$ )

### Factor de erodabilidad del suelo ( $K_{usle}$ )

Descrito como el factor de erodabilidad del suelo o el factor susceptibilidad de erosión del suelo por la FAO. Está definido como el promedio de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión en una parcela unitaria de 22.1-m con una pendiente en sentido longitudinal uniforme de 9 % en barbecho continuo, labrada arriba y hacia abajo de la pendiente (Wildner and Veiga, 1992). El SWAT requiere el ingreso de esta información, o lo calcula de acuerdo a lo sugerido por Wischmeier et al. (1978); considerando la textura, estructura, permeabilidad del suelo y el contenido de materia orgánica, para su deducción.

### Factor de manejo de cultivo ( $C_{usle}$ )

Es el factor de manejo de cultivo, es definido como la proporción de pérdida de suelo de suelos cosechados bajo condiciones especificadas a la correspondiente pérdida del barbecho continuo y limpieza de arado (Wischmeier et al., 1978). El SWAT calcula este factor a nivel diario porque la cobertura varía durante el ciclo de crecimiento de la planta Uribe (2010).

### Factor por manejo de la erosión ( $C_{usle}$ )

Factor de control por manejo de la erosión o factor de prácticas de apoyo a la conservación, es definido como la proporción de pérdida de suelo con una práctica de apoyo como cultivo de contorno, líneas de cosecha y sistemas de terraza Uribe (2010).

### Control topográfico ( $LS$ )

El factor topográfico, es la proporción esperada de pérdida de suelo en función de la longitud e inclinación de la pendiente.

## 2.4.2 FASE DE TRANSPORTE

Para el transporte de agua, el SWAT considera el flujo en canal abierto. Emplea la ecuación de Manning para definir la tasa y la velocidad del flujo en la red de drenajes y utiliza el

método de Muskingum o el método de Coeficiente Variable de Almacenamiento para determinar el volumen almacenado de agua en el cauce en un determinado intervalo de tiempo. En el recorrido una fracción del agua puede perderse debido a la evaporación, la transmisión a través del lecho del canal o por aprovechamiento humano Neitsch et al. (2011).

El transporte de sedimentos, se calcula tanto a nivel de paisaje como a nivel del canal. En el primero, el SWAT calcula la cantidad de sedimentos que llega a la red de drenajes considerando la producción de sedimentos determinados por el MUSLE, menos la cantidad de sedimentos que son retenidos en su recorrido por la vegetación o depresiones.

En el canal, el programa calcula el transporte de sedimentos considerando el potencial que tiene la corriente para movilizar los sedimentos, ocurriendo simultáneamente también la degradación o deposición. Si la cantidad de sedimentos es menor a la cantidad de sedimentos llegados desde el paisaje, el SWAT utiliza la capacidad que tiene el cuerpo de agua para generar sedimentos del canal y transportarlos, para lo cual incorpora un modelo sencillo del equilibrio de masa para simular el transporte de sedimentos y permitiendo la degradación del canal (fondo y orillas) (Neitsch et al., 2011).

Para el transporte y la degradación del canal el SWAT tiene la posibilidad de calcularlo bajo distintos modelos: simplificado de Bagnold, Kodatie, Molinas and Wu, Yang sand and gravel model (Neitsch et al., 2011).

## CAPÍTULO 3

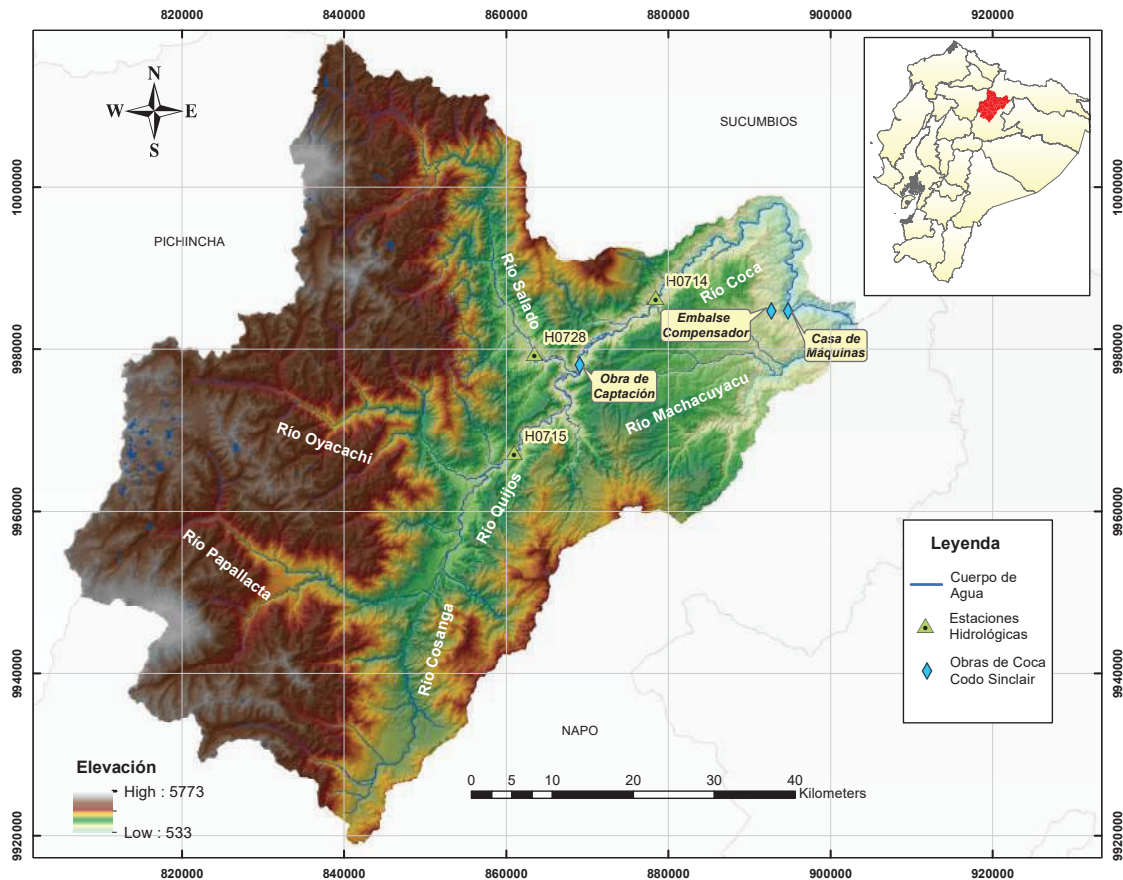
### ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

En este capítulo se sintetizan las principales características de la cuenca del río Coca, expuesto en el proyecto de titulación "Evaluación Hidrometeorológica y de Sedimentos en la Cuenca del Río Coca en la zona de Influencia del Proyecto Coca Codo Sinclair" realizado por Horna Kuonqui (2016); así como también se presenta la metodología seguida en el proceso de modelización, la información requerida y los componentes o métodos que se definieron previo al proceso de simulación.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra al suroriente del Ecuador en la provincia de Napo y corresponde a la cuenca del río Coca, Figura 3.1. Está delimitada en el punto de cierre por las coordenadas 903328 E y 9983166 N (WGS84 / UTM 17S), aguas abajo de la confluencia de este río con el río Machacuyacu. Sus aguas se originan en las faldas de los volcanes Antisana y Cayambe; del primero se forman los ríos Papallacta, Cosanga y Quijos; y del segundo, el río Salado. Todos estos ríos forman a su vez parte de la red hídrica del río Napo y la vertiente del Amazonas. Esta cuenca es muy relevante para el país ya que se encuentra el proyecto hidroeléctrico más grande del Ecuador denominado Coca Codo Sinclair con una potencia de 1500 MW.

La cuenca de análisis se encuentra entre los 5790 y 533 metros sobre el nivel del mar (msnm), cuenta con un área de drenaje de 4597 km<sup>2</sup> y longitud del cauce principal de 125.13 km (López Fabara, 2016). La pendiente media de la cuenca es de 47.9 %.



**FIGURA 3.1:** Área de Estudio  
FUENTE: INAMHI, PHCCS, SRTM, IGM

### 3.1.1 CLIMA

La cuenca del río Coca está ubicada en el área de transición entre los Andes y la Amazonía. La zona alta de la cuenca presenta un clima de páramo, mientras que la zona media presenta un régimen climático cálido húmedo. La precipitación media anual es de 2950  $mm$  y varía en rangos mensuales de 47 a 451  $mm$  por mes en la zona alta y 82 a 625  $mm$  por mes en la zona media. Las precipitaciones se distribuyen de manera bastante heterogénea, varía desde los 950  $mm \cdot año^{-1}$  (Papallacta M0188) a 6000  $mm \cdot año^{-1}$  (Reventador M0203); siendo el periodo mayo-julio donde se presenta la mayor cantidad de precipitación.

En lo que concierne a la temperatura, esta varía en función de la altura, siendo las zonas altas las que registran los menores valores con una temperatura media anual de 7.12 °C y las zonas media con temperatura media anual de 15.35 °C. La humedad relativa se encuentra en un rango entre 84.21 % a 93.96 %.

### 3.1.2 HIDROLOGÍA

El río Coca se origina de los deshielos de los glaciares que cubren el volcán Cayambe (5790 m.s.n.m.) y Antisana (5758 m.s.n.m.). En el punto de la estación H0714 (Coca en San Rafael) coordenadas 903328 E y 9983166 N, el río Coca drena una superficie de 3853  $km^2$

con una descarga media anual de  $307.91 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  que significa una producción de agua de  $79.91 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ). Es un río de aguas blancas (Andrade Villafuerte, 2016) que regularmente transportan una alta cantidad de sedimentos suspendidos, debido a la erosión mecánica de la cadena andina.

El transporte sólido medio anual de sedimentos del río Coca, obtenidos de la curva de duración anual, en la estación de aforo Coca en San Rafael (H0714) tiene un valor de  $2833 \text{ tn} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$  (Smits, 1992) estimándose un transporte de  $10.74 \times 10^3 \text{ tn}$ . La subcuenca del río Salado tiene el índice de erosión más alto:  $4070 \text{ tn} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ ; debiéndose principalmente a las altas pendientes de las laderas y a las altas precipitaciones y escorrentía que se presenta en las inmediaciones del Volcán Reventador.

### 3.1.3 GEOLOGÍA

La cuenca del Río Coca está localizada en la parte norte de la zona Subandina, en una zona de transición entre la Cordillera Real y la planicie Amazónica. Dentro de esta, predominan las rocas metamórficas (esquistos pelíticos y gráficas, gneis) (Andrade Villafuerte, 2016), correspondientes a las formaciones pertenecientes a la Cordillera Real, de modo que son resistentes a la erosión. Sin embargo la producción de sedimentos se produce por otros factores concernientes a la geodinámica activa, relacionados con: actividad sísmica, tectónica y actividad volcánica (Andrade Villafuerte, 2016; Sinohydro, 2012).

En marzo de 1987 se tuvo registros de dos sismos de 6.1 y 6.9, epicentros localizados en la provincia de Napo aproximadamente 100Km al ENE de Quito y 25 km al N del volcán Reventador; que provocaron grandes derrumbes en masa e inundaciones en el área cercana al mencionado volcán. El volumen total de los deslizamientos se estima entre 75 y 110 millones  $\text{m}^3$  (Hall, 2000).

### 3.1.4 SUELOS

La formación y desarrollo del suelo depende de las condiciones climáticas, topográficas, litológicas y el tipo de vegetación. En el área de estudio están presentes principalmente los Andisoles (81 %) e Inceptisoles (8.21 %); los cuales están desarrollados sobre depósitos de ceniza volcánica, teniendo una alta capacidad de retención de agua e impactando sobre el almacenamiento y transporte de agua subsuperficial.

### 3.1.5 COBERTURA VEGETAL

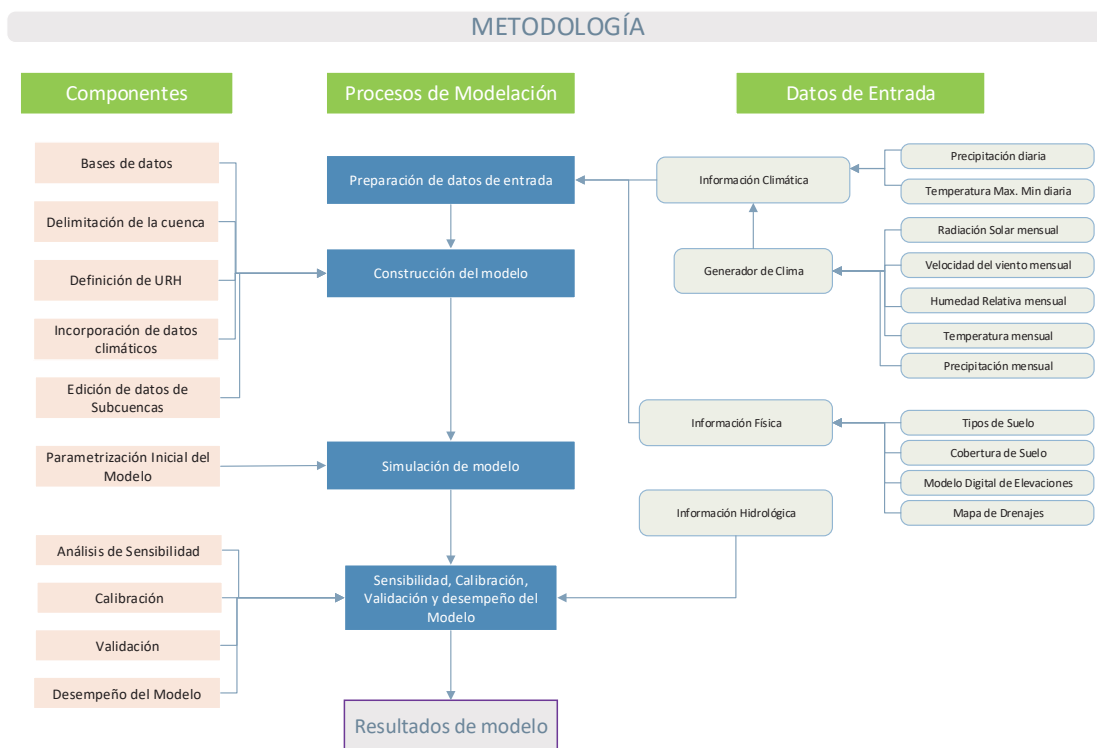
El área de estudio está ocupada principalmente por tres coberturas que representan el 97.66 % de los  $4597 \text{ km}^2$  total. De este porcentaje, el bosque nativo cubre el 62.46 %, el páramo 26.51 % y los pastizales el 8.91 %. Las dos primeras coberturas son naturales, mientras que la otra, corresponde a cambios de uso de suelo infringidos por la actividad humana.



## 3.2 METODOLOGÍA

### 3.2.1 CAUDAL LÍQUIDO

La Figura (3.2) presenta de manera esquemática el proceso de estimación del caudal líquido ( $Q_l$ ), la información requerida y los componentes o métodos que deben definirse previo a la simulación, así como se presenta una fase de análisis de desempeño del modelo.



**FIGURA 3.2:** Metodología para la estimación de caudal líquido ( $Q_l$ )  
ELABORADO POR: Autor

## DATOS DE ENTRADA

### Información climática

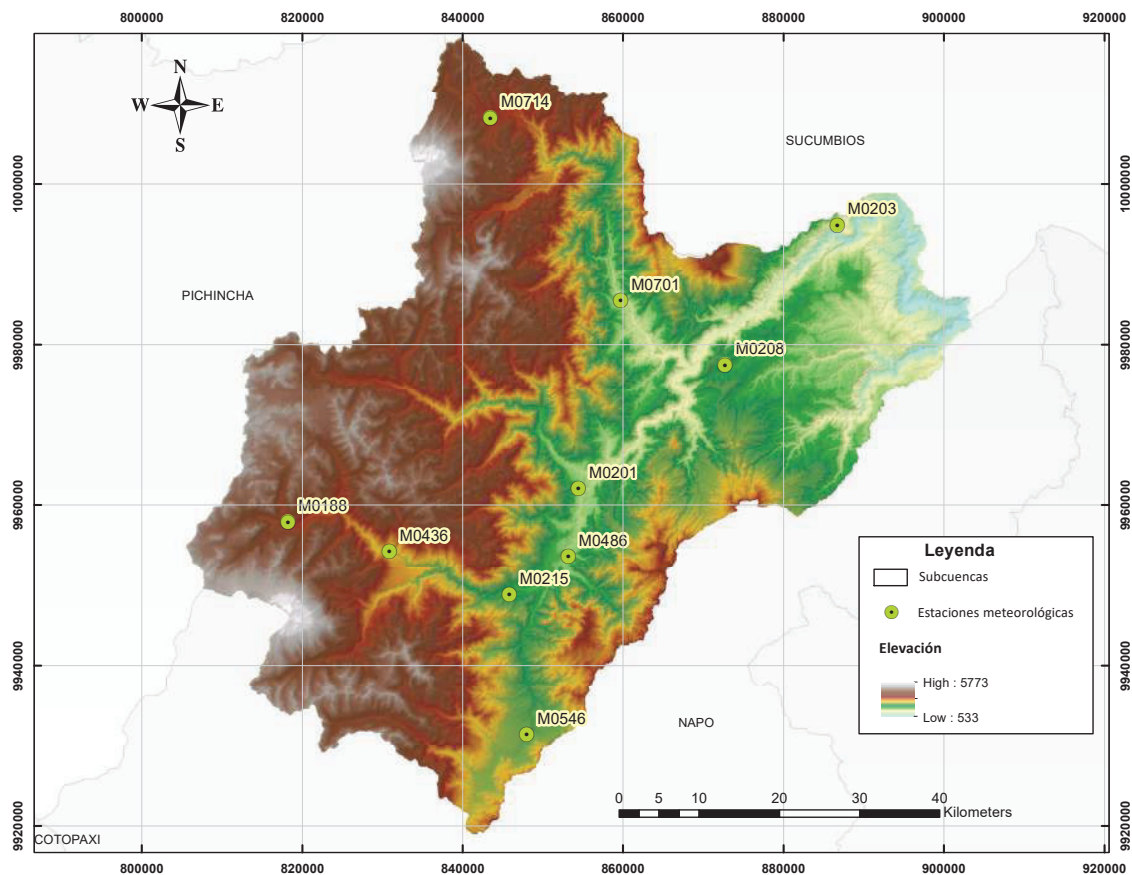
Esta información fue recopilada y generada dentro del proyecto de titulación denominado: "Evaluación Hidrometeorológica y de Sedimentos en la Cuenca del Río Coca en la zona de Influencia del Proyecto Coca Codo Sinclair" realizado por la Ing. Natalia Horna, dentro del proyecto EPN-PIMI-14-09, quién organizó y analizó la información sobre: precipitación, temperatura, humedad relativa, caudales líquidos y sólidos. No obstante, para este trabajo también se ha requerido de otro tipo de información como: punto de rocío, velocidad del viento y heliofanía; por lo cual se utilizó información suministrada por el INAMHI, el PHCCS y del Atlas Solar generado por el CONELEC.

En la Tabla 3.1 y Figura 3.3 se presenta las estaciones meteorológicas que se consideraron en este estudio para el análisis e ingreso de la información meteorológica requerida.

**TABLA 3.1:** Estaciones meteorológicas dentro del área de estudio

Código	Estación	WGS84 / UTM 17S		H(m.s.n.m.)
		N	E	
M0188	Papallacta	9957879	818211	3150
M0201	El Chaco INECEL	9962059	854443	1570
M0203	Reventador	9994944	886728	1145
M0208	Rio Salado-INECEL	9977488	872747	1310
M0215	Baeza	9948858	845820	1960
M0436	Cuyuja	9954166	830859	2380
M0486	Borja-Misión Josefina	9953599	853173	1500
M0546	Cosanga	9931370	847992	1930
M0701	Salado Aj Cascabel	9990408	840737	1540
M0714	Planada Virgen	10001478	848601	3095

FUENTE: INAMHI, INECEL, PHCCS

**FIGURA 3.3:** Estaciones meteorológicas utilizadas

FUENTE: INAMHI, INECEL, PHCCS

ELABORADO POR: Autor

## Precipitación

En el área de estudio se dispone de datos a nivel diario desde el año de 1963 de 27 estaciones (Horna Kuonqui, 2016), no obstante solo se utilizaron 7 estaciones ya que cuentan con un periodo de registro similar. Las estaciones a considerarse se presentan en la Tabla 3.2.

**TABLA 3.2:** Estaciones de precipitación

Estación Precipitación	Periodo Registro	% Vacíos	Precipitación mm/año
M0188	1963-2014	12.8	1492
M0203	1973-2014	43.7	6067
M0208	1977-1993	24	3140
M0215	1973-2014	20.82	2338
M0436	1982-2014	43.1	1613
M0486	1966-2001	11.64	2699
M0546	1972-1992	32.07	2890

FUENTE: Horna Kuonqui (2016)

## Temperatura máxima y mínima

En relación a estas variables, en el análisis realizado por Horna (2016) se encontró que los valores de temperatura media se relacionan inversamente con la altitud a una tasa de  $-0.53^{\circ}\text{C}$  por cada 100m.

Los registros de las temperaturas máximas y mínimas a nivel diario se presentan en la Tabla 3.3 y son aquellos que se utilizaron en este documento.

**TABLA 3.3:** Estaciones de temperatura máxima y mínima

Estación Temperatura	Periodo Registro	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
M0188	1963-2014	9.94
M0201	1982-1993	18.39
M0208	1982-1993	19.91

FUENTE: Horna Kuonqui (2016)

En el Anexo 1 se presenta los periodos de información que se disponen de estas dos variables.

## Generador de clima

El generador de clima es una plataforma incorporada al SWAT que reproduce series de tiempo de datos meteorológicos para cada una de las subcuencas definidas en función de las características estadísticas de tiempo observadas. Para su construcción, el SWAT requiere de valores de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento, punto del rocío y humedad relativa a nivel de medias mensuales (Neitsch et al., 2011).

La rutina consiste primero en generar la precipitación, luego la temperatura máxima y mínima, radiación solar y humedad relativa (Neitsch et al., 2011). En el Anexo 2 se presenta las variables que componen el modelo y el análisis estadístico que se debe realizar para obtener los valores promedios de las distintas variables.

En la Tabla 3.4 se presenta la información disponible de las distintas estaciones que se utilizaron para la construcción del generador de clima.

**TABLA 3.4:** Estaciones para generador de clima

Est. de precipitación	Periodo de Registro			
	Precipitación	Temperatura	Velocidad del Viento	Punto de Rocío y Humedad Relativa
M0188	1963-2014	1963-2014	1963-2012	1963-2014
M0201	1976-1993	1982-1993	1982-1993	1982-1993
M0203	1973-2014	1982-1993	1982-1993	1982-1993
M0208	1977-1993	1982-1993	1986-1993	1982-1993
M0215	1973-2014	1982-1993	1982-1993	1982-1993
M0701	1980-1994	-	-	-
M0714	1982-1993	-	-	-

FUENTE: Horna Kuonqui (2016)

A continuación se presenta el detalle de los datos disponible de cada variable en cada estación y los métodos de cálculos utilizados para rellenar los vacíos de información.

### Precipitación

La construcción del generador de clima toma en cuenta los datos de precipitación de siete estaciones, de las cuales cinco poseen datos diarios y dos datos mensuales. Estas estaciones disponen de un periodo de registro superior a 10 años y su descripción se presenta en la Tabla 3.4.

Las dos estaciones que disponen solamente de valores mensuales de precipitación (M0701 y M0714). Se las consideró necesario incluirlas por cuanto no hay información diaria para la cuenca alta y media del río Salado.

### Temperatura

La Tabla 3.4 expone los periodos de registro de las estaciones que disponen de valores de temperatura máxima y mínimo y que se utilizará para el análisis estadístico. Sin embargo, las estaciones M0701 y M0714 no disponen de esta información, razón por la cual se generaron estos valores considerando que en la cuenca hidrográfica existe un coeficiente de determinación entre altura y temperatura superiores a 0.98. Por lo cual se generaron dos ecuaciones para estimar los valores de temperatura máxima y mínima de acuerdo a la altura (Tabla 3.5). Los valores estimados con cada una de las estaciones se los multiplicó a su vez

con un coeficiente que representa la variación mensual de las estaciones M0201 y M0188, respectivamente.

**TABLA 3.5:** Ecuaciones utilizadas para generar valores de temperatura media, máxima y mínima para estaciones M0701 y M0714

Estación	Ecuación	R <sup>2</sup>
Temperatura Media	$Y = -0.0053x + 26.541$	0.982
Temperatura Máxima	$Y = -0.0054x + 31.76$	0.988
Temperatura Mínima	$Y = -0.0052x + 22.497$	0.988

FUENTE: Horna Kuonqui (2016)

Donde:

$Y$ : valor de la temperatura en una altura dada (°C)

$X$ : altitud de estación meteorológica ( $m$ )

### Velocidad del Viento

La información de velocidad de viento a nivel diario se detalla en la Tabla 3.4. Estos se obtuvieron de INECEL (1992).

Puesto que no existe información de velocidad de viento para las estaciones M0701 y M0714, se utilizaron los valores de las estaciones M0201 y M0188, respectivamente.

### Radiación Solar

Respecto a este variable, se utilizó el Atlas Solar del Ecuador, elaborado por el CONELEC en el año de 2007, al cual se lo digitalizó y se obtuvieron los valores mensuales de radiación solar global para las estaciones referidas en la Tabla 3.4.

### Punto de rocío y humedad relativa

Estas variables son importantes si se utiliza el método de Penman-Monteith para calcular la ETP. En la Tabla 3.4 se exponen los periodos de registro de las estaciones que disponen de valores de humedad relativa y que se utilizará para el cálculo de punto de rocío. En todas las estaciones consideradas, la humedad relativa es superior a 80 % (Horna Kuonqui, 2016). Para la cuenca se dispone de información a nivel mensual de cinco estaciones. Respecto a las estaciones faltantes, M0701 y M0714, se utilizó la ecuación empírica propuesta por Sargent (1980), ecuación (3.1); en la cual se toma en cuenta la temperatura media de la estación, calculada con la ecuación mostrada en la Tabla 3.5; y la humedad relativa de las estaciones M0201 y M0188, ya que se encuentran en alturas similares.

$$t_d = t - K_o + K_1 RH \quad (3.1)$$

Donde:

$t_d$ : temperatura del punto de rocío (°C)

$t$ : temperatura media de estación metereológica ( $^{\circ}\text{C}$ )

$K_o$  y  $K_1RH$ : Factores propuestos por Sargent (1980) para lugares donde la humedad relativa (RH) es entre 65 % y 100 %,  $K_o = 17,9$  y  $K_1 = 0,18$ .

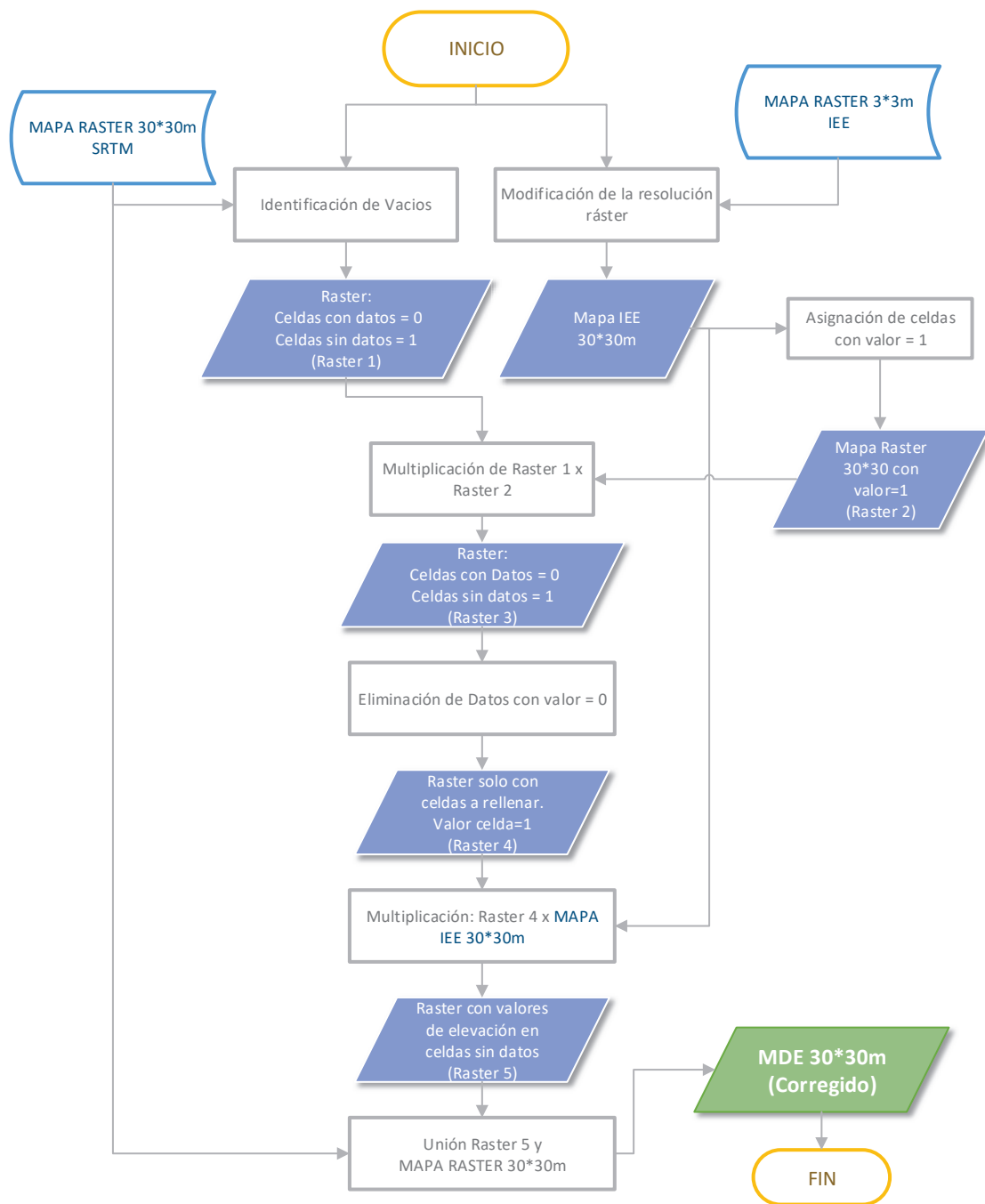
### **Información Física**

Aplicar el SWAT en la modelación hidrológica requiere de: modelo digital de elevación (MDE), mapa de suelos, mapa cobertura del suelo y mapa de drenaje (Reddy and Reddy, 2015).

### **Modelo Digital de Elevaciones (MDE)**

La modelación hidrológica utilizó los datos de elevación en formato raster del área de estudio, generada por la misión Shuttle Radar Topographt Mission (SRTM) con una resolución de  $30 \times 30m$ , disponible en el sitio web <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>. La imagen presentaba vacíos por los que estos fueron rellenados con información provista por el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) con resolución  $3 \times 3m$ , siguiendo el proceso que se presenta en la Figura 3.4 .

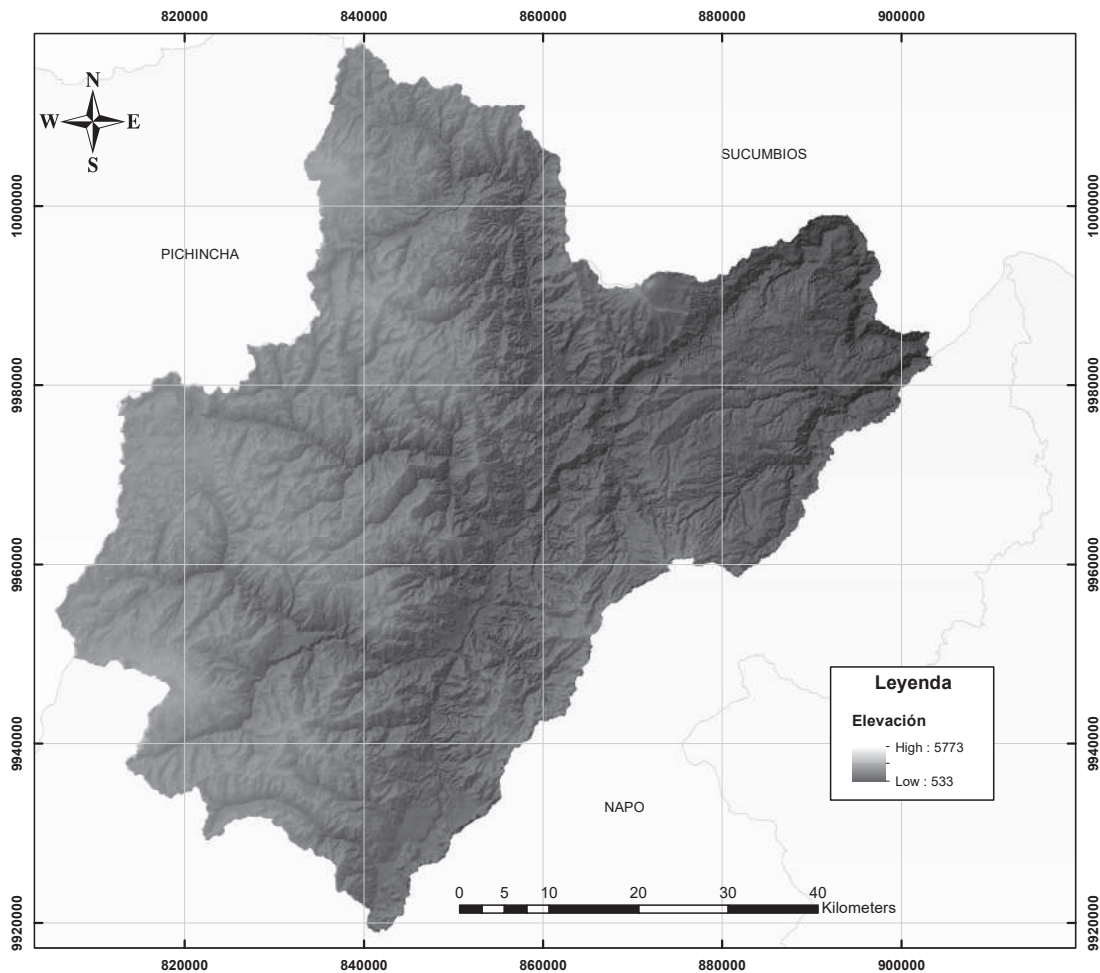
El MDE es clave en la delimitación de la cuenca y en la representación de los procesos hidrológicos. La resolución espacial es importante porque incide en la precisión de la estimación de la esorrentía y la producción de sedimentos; no obstante, una resolución menor a 30m no implica una mejora substancial en la estimación de los caudales (Reddy and Reddy, 2015).



**FIGURA 3.4:** Metodología relleno de vacíos en MDE  
ELABORADO POR: Autor

El proceso mostrado se ejecutó con la asistencia de un sistema de información geográfica (SIG); en donde, en primer lugar se identifica las celdas vacías del MDE  $30 \times 30m$  del SRTM, asignando un valor de uno a las celdas que no disponen de información y cero a las celdas con valores de elevación (Raster 1). Paralelamente, se modifica la resolución del MDE  $3 \cdot 3m$  a una de  $30 \cdot 30m$ , asignando un valor de uno a todas las celdas

(Raster 2). Luego, estos dos raster se los multiplica para identificar las celdas a rellenarse con un valor de uno (Raster 3). Después, del Raster 3 se eliminan las celdas con valor 0 (Raster 4). Seguidamente, y con el objetivo de añadir la información de elevación a las celdas con valor de uno del Raster 4, se multiplicó este por el Mapa IEE  $3 \times 3m$  (Raster 5). Finalmente se unió este último raster con el MDE  $30 \times 30m$  del SRTM, generando el MDE de la cuenca del río Coca, Figura 3.5.

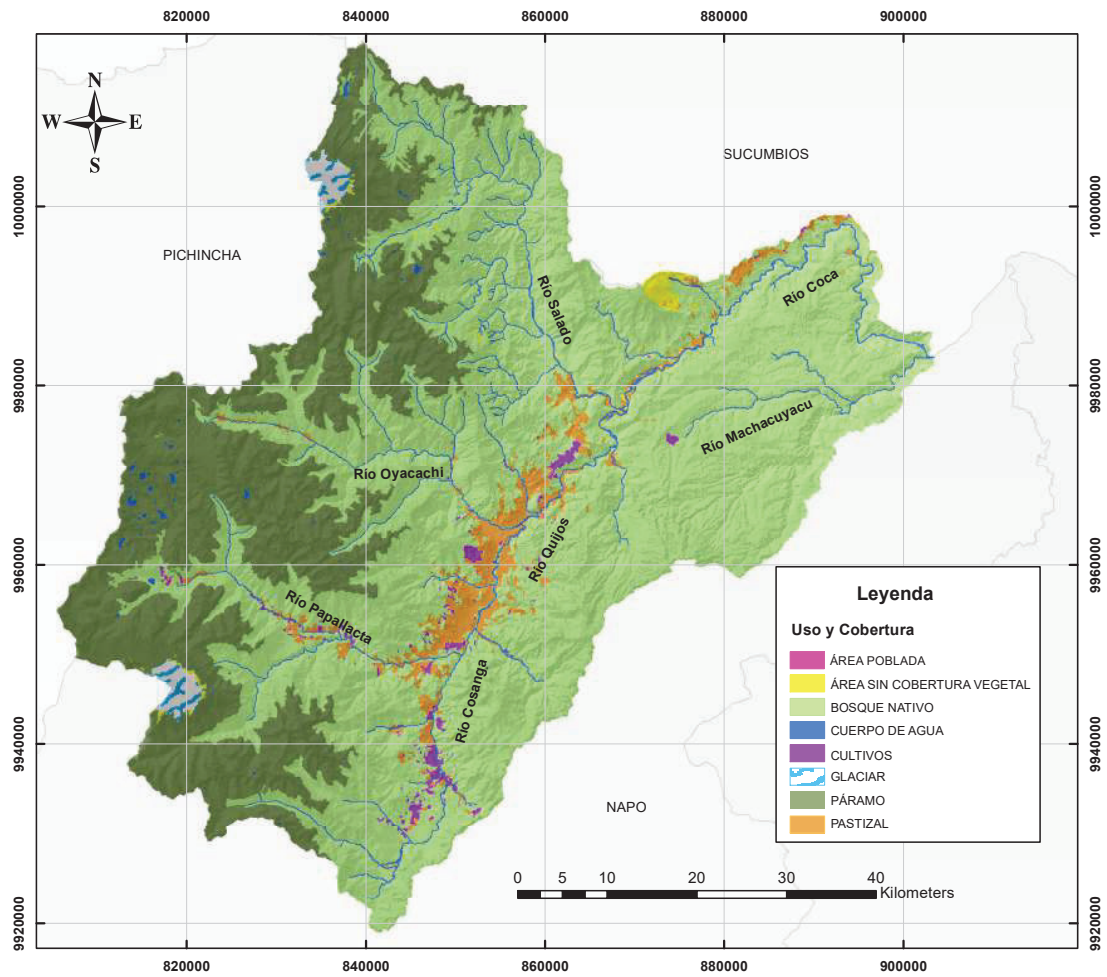


**FIGURA 3.5:** MDE de la cuenca del río Coca  
FUENTE: SRTM, IEE, IGM  
ELABORADO POR: Autor

### Cobertura del suelo

El mapa utilizado fue generado por el MAGAP en 1990 denominado "Cobertura Vegetal 1990", disponible en el sitio web <http://sni.gob.ec/coberturas>. Este mapa fue recategorizado por el proyecto TEEB - Cuenca del río Coca en siete clases, para lo cual hizo uso de imágenes satelitales de la época para reinterpretarlo; y donde se identificó que el Bosque (66%), el páramo (27%) y los pastizales (4%) son las 3 categorías que mayor cantidad de área ocupan en la cuenca (97%). En cambio, los eriales o zonas desprovistas de vegetación, que dominan las faldas de los volcanes, ocupan el 0.6% de la cuenca y los cultivos apenas un 1% (Figura 3.6).





**FIGURA 3.6:** Mapa de cobertura vegetal 1990

FUENTE: MAGAP, IGM, SRTM

ELABORADO POR: Autor

Cada una de las coberturas identificadas se las relacionó con la base de datos incluida en el SWAT. Se hizo uso de esta información por cuanto no se encontró datos de campo para describir las coberturas. En la Tabla 3.6 se detallan los códigos con los cuales se enlazó las coberturas identificadas con la base de datos que dispone el modelo.

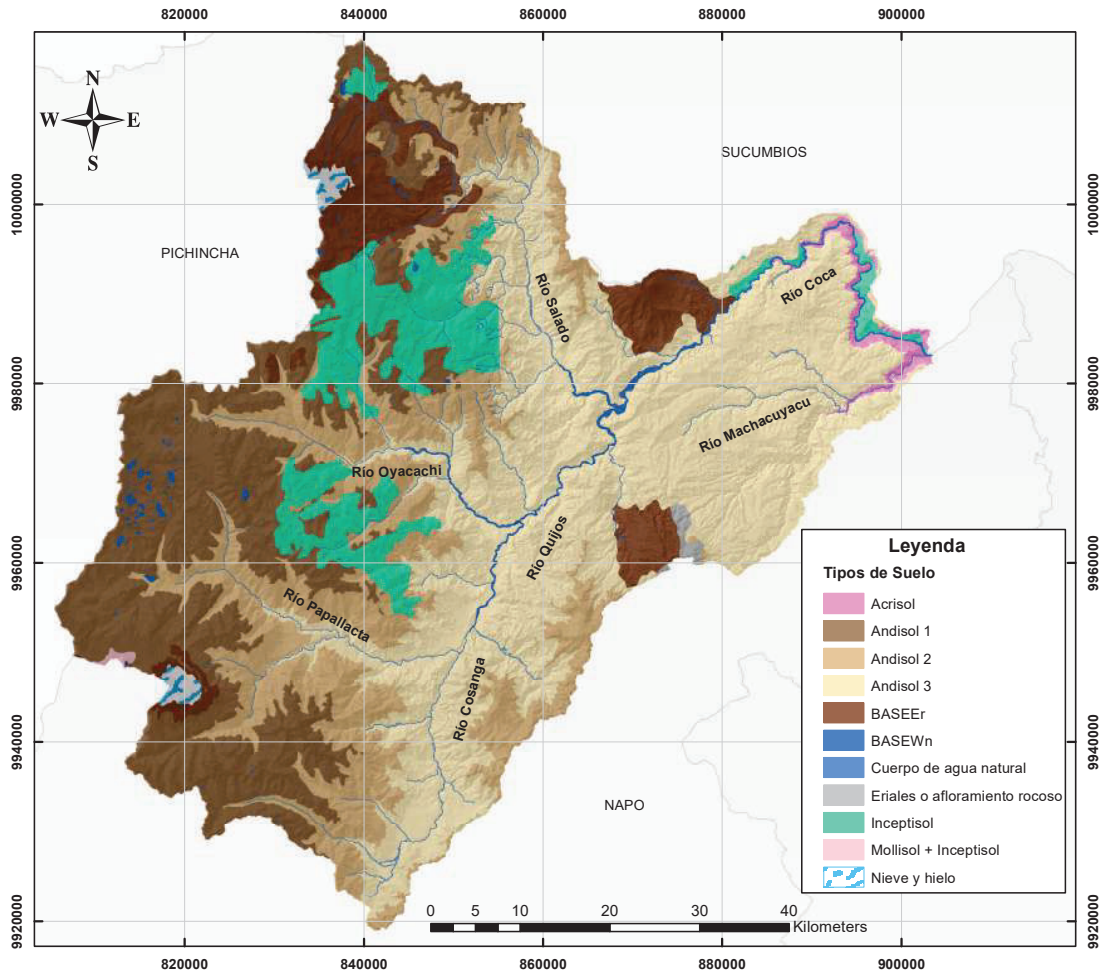
**TABLA 3.6:** Asignación de códigos SWAT para coberturas del suelo

Uso / Cobertura	Código SWAT	Aignación
Uso Urbano - Mediana Densidad	URML	Asentamientos humanos.
Afloramientos Rocosas	BARR	Bases de volcanes
Bosque	FRSE	Zona ocupada por los bosques
Ríos y Glaciares	WATR	Zonas ribereñas y glaciares
Pastizales	PAST	Zonas cubiertas por pastos
Páramos	BROM	"Zonas cubiertas por vegetación alto andina (Uribe, 2010)
Cultivo (naranjilla)	MESQ	"Zonas en las que se cultiva naranjilla (Uribe, 2010)

ELABORADO POR: Autor

### Tipos de Suelo

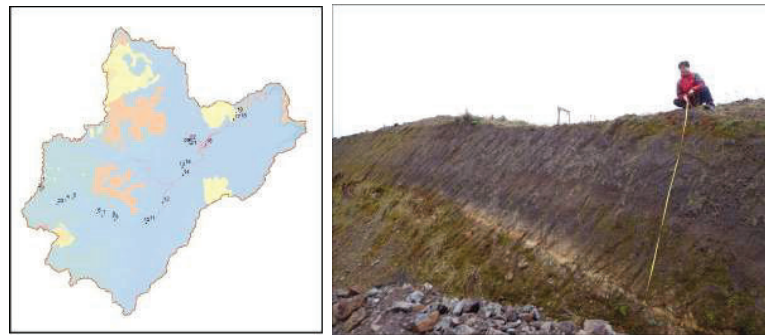
La información cartográfica utilizada fue generada por el MAGAP en el año 2002, denominado "Descripción taxonómica de suelos" y disponible en el sitio web <http://sni.gob.ec/coberturas>. De acuerdo a la clasificación propuesta por la USDA en el área de estudio se identifica 9 tipos de suelo (Figura 3.7).



**FIGURA 3.7:** Mapa de tipos de suelo 1990  
 FUENTE: EPN-PIMI-14-09, MAGAP, IGM, SRTM  
 ELABORADO POR: Autor

La capa original fue recategorizada en lo referente al tipo de suelo "Inceptisol" modificándolo por "Andisol", teniendo en cuenta que en esta zona predomina este último tipo de suelos, en función de la visita de campo llevada a cabo el 29 y 30 de octubre de 2015 por el Ing. Sebastián Páez MSc. y Dr. Armando Molina, investigador PROMETEO. En la visita se evidenció que, debido a características geológicas de la zona, la cobertura vegetal, bibliografía y observaciones realizadas, la categoría Inceptisol, planteada originalmente por el MAGAP, corresponde realmente al tipo de suelo Andisol. La Figura 3.8 hace un misceláneo de los puntos visitados por los investigadores y las fotografías tomadas en el recorrido; y en el Anexo 3 se presenta las características observadas de cada uno de los puntos de visita.

Consecuencia de este análisis se determinó que los andisoles dominan el área de estudio con un 82 % del área total, después los inceptisoles y afloración rocosa con un 8 % cada una.



(a) Puntos Visita, 29 y 30 Octubre de 2015  
 (b) Andisol profundidad 3.00 m Fotografía de Ing. Sebastián Páez. (Cuenca alta del río Coca. 2015) (812082E, 9962593N 17M)



(c) Andisol profundidad 1.50 - 2.00 m Fotografía de Ing. Sebastián Páez. (Cuenca media del Río Coca. 2015) (833304E, 9953103N 17M)  
 (d) Andisol profundidad 1.20 - 1.50 m Fotografía de Ing. Sebastián Páez. (Cuenca Rio Salado. 2015) (195542E, 9978047N 18M)

**FIGURA 3.8:** Puntos de visita de campo 29 y 30 de octubre de 2015

FUENTE: Páez Sebastián, Molina Armando

ELABORADO POR: Autor

Además, y con el objetivo de generar la base de datos que incluyan la información de las características y propiedades del tipo de suelo predominante, se realizó entre el 25 y 27 de noviembre de 2015 una toma de muestras de suelo (pedones de  $30 \times 30 \times 30\text{cm}$ ) en la parte alta y media de la cuenca, donde se obtuvo información de la granulometría y la densidad aparente (Tabla 3.7) de los Andisols. A partir de esta información, se derivaron el resto de parámetros de suelo requeridos por el SWAT, utilizando el programa Soil-Plant-Air-Water (SPAW), disponible en el sitio web <http://hrsl.arsusda.gov/SPAW/SPAWDownload.html>, el cual genera información para análisis hidrológico (Saxton and Rawls, 2006).

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de Materiales de la EPN.

**TABLA 3.7:** Análisis granulométrico y de densidad aparente de pedones en parte alta (Papallacta) y media (Quijos) de la cuenca del río Coca

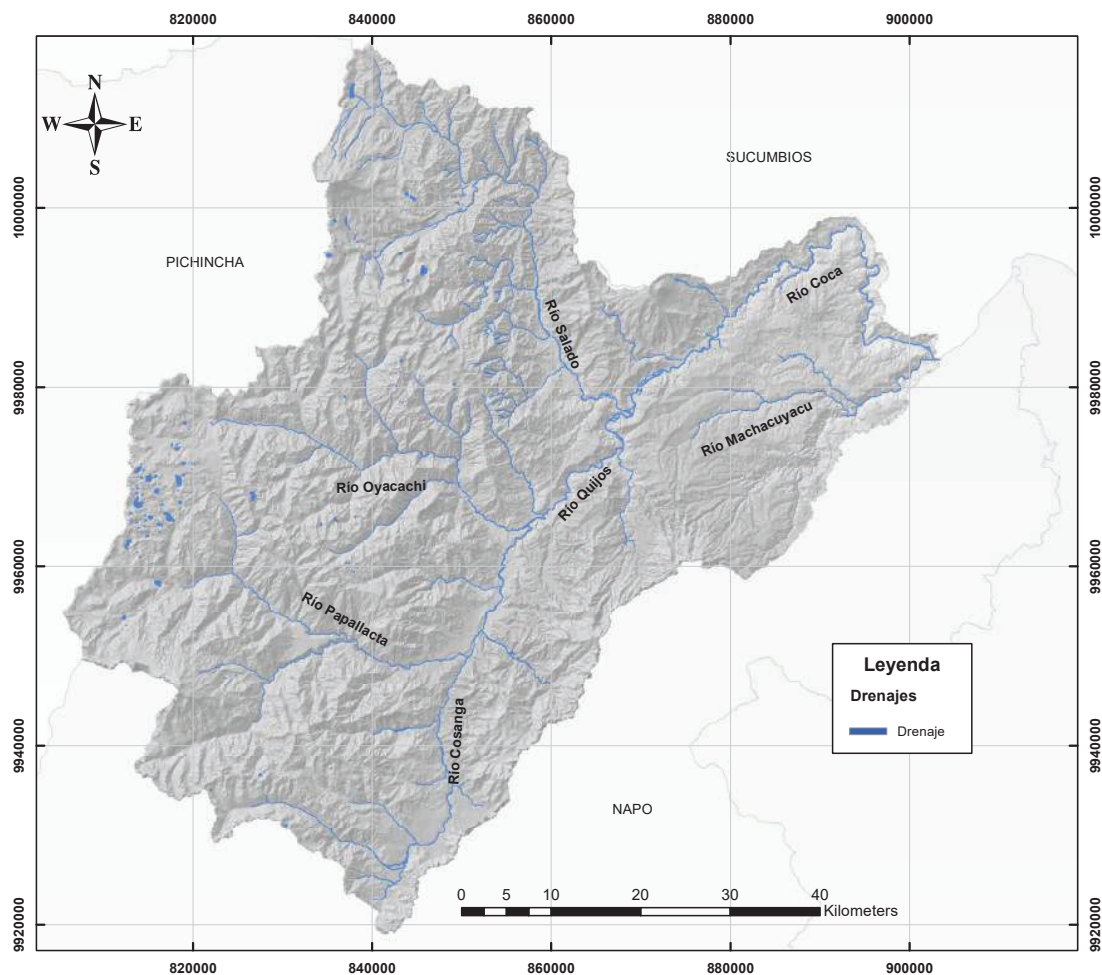
NOMBRE	COORDENADAS WGS84 / UTM 17S		ALTITUD m.s.n.m	DENSIDAD APARENTE $\gamma_d$	TEXTURA			
	N	E			% Grava (>2mm)	% Arena (0.05-2 mm)	% Limo (0.002-0.05 mm)	% Arcilla (<0.002 mm)
Papallacta	9960102	812334	3746	0.905	-	23	51	26
Quijos	9959780	815802	2724	0.929	18.1	28	54.2	

FUENTE: Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayos de Materiales (EPN)

ELABORADO POR: Autor

## Drenajes

Una opción, utilizada en este estudio, para que el SWAT delimite de mejor manera los red hídrica, es utilizando el mapa de ríos del Ecuador. Este se obtuvo del Geoportal del IGM ([www.geoportaligm.gob.ec](http://www.geoportaligm.gob.ec)), y al cual se lo cortó de acuerdo al área de interés (Figura 3.9).



**FIGURA 3.9:** Mapa de drenajes

FUENTE: IGM, SRTM

ELABORADO POR: Autor

### Información Hidrológica

La información hidrológica constituye la variable independiente con la cual se evalúa el performance del modelo. En la cuenca de estudio históricamente se han emplazado ocho estaciones para monitorear el caudal líquido ( $Q_l$ ) y sólido ( $Q_s$ ) de las subcuencas aportantes del PHCCS. Estas han funcionado de manera intermitente y se han aforado especialmente caudales líquidos. En la Tabla 3.8 se hace un detalle de ellas, presentándose su ubicación, periodo de registro y el porcentaje de vacíos que estas poseen, respecto a caudal líquido ( $Q_l$ )

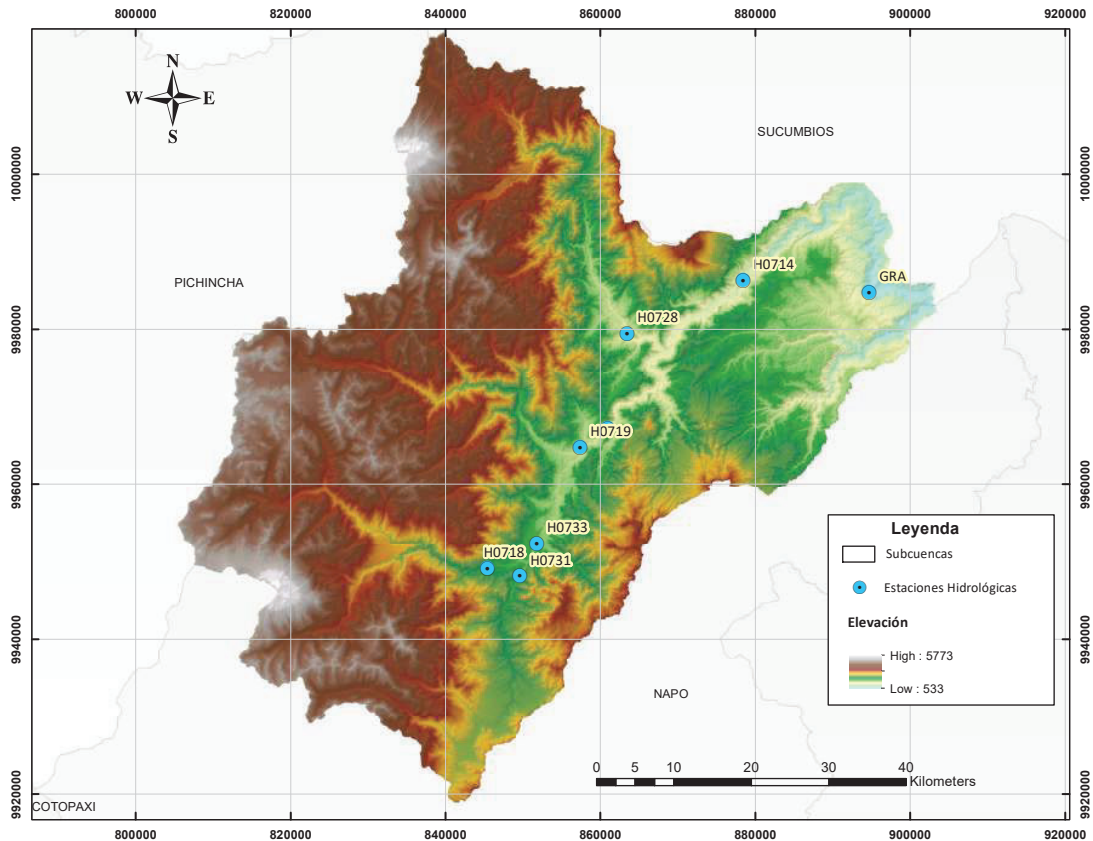
**TABLA 3.8:** Estaciones hidrológicas con  $Q_l$

Código	Estación	WGS84 / UTM 17S			Período	%Vacíos
		N	E	H m.s.n.m		
H0714	Coca en San Rafael	9986361	878443	1208	1972-1995 2008-2014	63.37
H0715	Quijos AJ Bombón	9967224	860992	1408	1965-1995 2000-2005 2008-2014	40.8
H0718	Quijos en Baeza	9949181	845433	1810	1964-2006	30.47
H0719	Quijos DJ Oyacachi	9964766	857402	1446	1965-1995 2000-2005 2008-2013	37.36
H0728	Salado AJ Coca	9979426	863458	1366	1965-1995 2000-2005 2008-2013	23.55
H0731	Cosanga AJ Quijos	9948147	849633	1717	1970-2013	20.21
H0733	Quijos AJ Borja	9952353	851810	1635	1978-1992	4.85
GRA	Coca DJ Granadillas	9984797	894719	643	2014-2015	N/A

FUENTE: Horna Kuonqui (2016), INAMHI, PHCCS

ELABORADO POR: Autor

La información presentada en la Tabla 3.8 ha sido generada históricamente por el INAMHI, INECEL y PHCCS, esta se presenta de manera gráfica en la Figura 3.10 e incluye la información que fue rellenada por Horna Kuonqui (2016) constituyendo la base para la evaluación del modelo.



**FIGURA 3.10:** Estaciones hidrológicas en área de estudio  
 FUENTE: INAMHI, INECEL, PHCCS  
 ELABORADO POR: Autor

En este estudio se utiliza la información de caudal líquido de las estaciones hidrológicas Coca en San Rafael (H0714) y Quijos Aj Bombón (H0715), aguas abajo y aguas arriba del proyecto hidroeléctrico, respectivamente. En la primera se realiza la calibración y validación del modelo, y en la segunda, se evalúa el desempeño del modelo.

## CONSTRUCCIÓN DEL MODELO SWAT

Esta etapa consiste en agrupar mediante una sucesión de pasos toda la información física y meteorológica presentada en los capítulos precedentes.

En primer lugar se prepara y construye la base de datos de información climática, suelos y cobertura vegetal descritos en el área de estudio; luego, se delimita el área de estudio, se la caracteriza y se la divide en subcuencas; después, se generan las URH en las cuales se realizan los cálculos hidrológicos, se incorpora los datos climáticos, se edita la información ingresada y finalmente se escogen los métodos de cálculo para la simulación.

### Preparación de base de datos

Considerando que el SWAT originalmente fue desarrollado para los Estados Unidos, este paso de pre procesamiento tiene como propósito crear o revisar las bases de datos del modelo en función de la información disponible del área de estudio respecto a clima, cobertura

de suelo o tipos de suelo.

En este proyecto, en lo que se refiere a clima, se elaboró el Generador de clima, el cual se construyó en función de las estaciones meteorológicas presentadas en el Capítulo 3.2.1, y donde los valores para cada estación considerada se presentan en el Anexo 4.

Respecto a la cobertura de suelo, no se elaboró ninguna base de datos. No obstante a cada cobertura identificada se le asignó un código para que se las relacionen con la base de datos del SWAT de acuerdo a lo descrito en la Tabla 3.6.

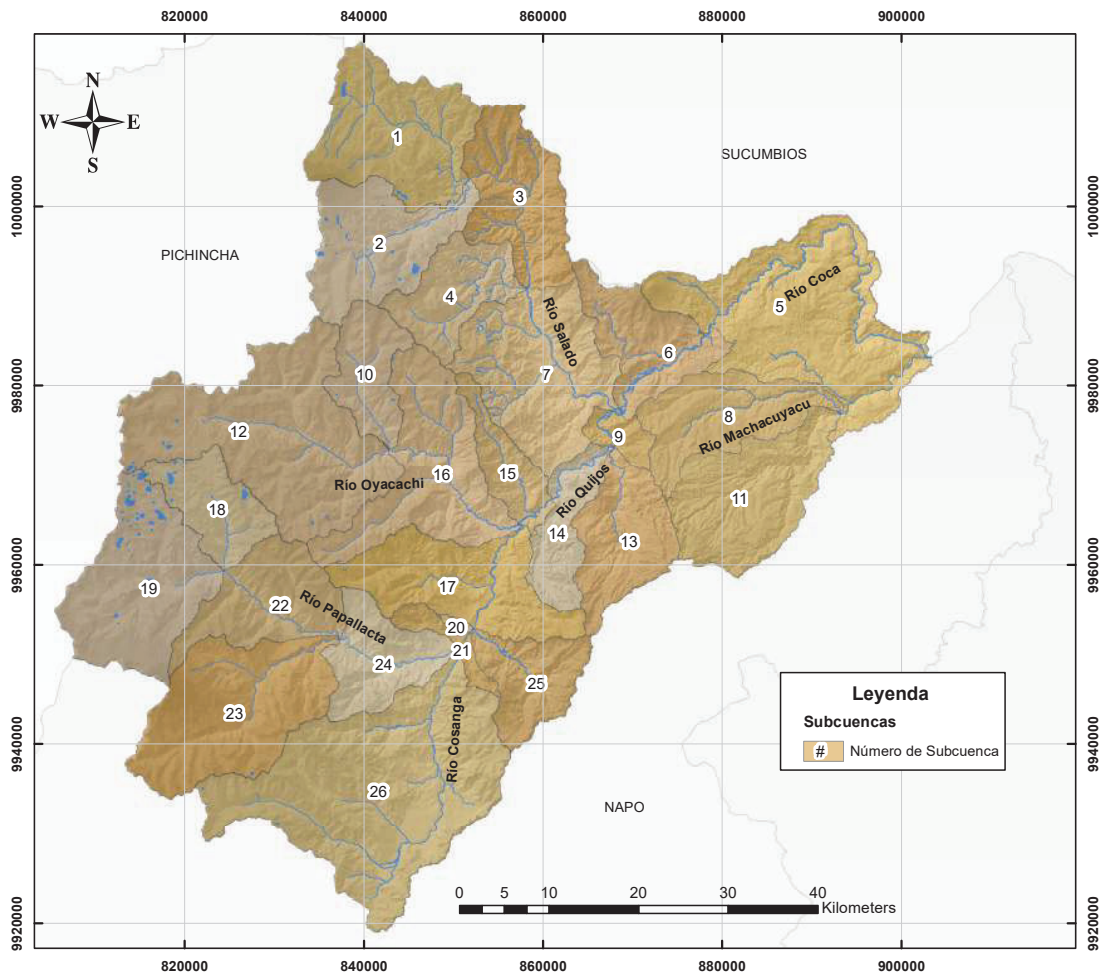
En lo concerniente a suelo, se generó una nueva base de datos en función de las características de los tipos de suelo presentes y de los parámetros generados por el programa SPAW; como se presenta en el Anexo 5. Es importante mencionar que al tipo de suelo andisol se lo reclasificó en 3 categorías en función de las características encontradas en el muestreo realizado entre el 29 - 30 de Octubre y 25 - 27 de noviembre de 2015.

### **Delimitación de la cuenca**

Este paso se lo realizó utilizando la siguiente metodología:

- Cargar MDE, el cual es necesario para delinear la subcuenca y calcular los parámetros hidrológicos.
- Cargar mapa de drenajes, a fin de precisar de mejor manera las rutas donde se transporta el agua.
- Definición del área mínima para la generación de red de drenaje
- Definición de los puntos de control y subcuencas. En este caso se los realizó tomando en cuenta la disposición de las estaciones meteorológicas, hidrológicas y la distribución de la precipitación en la cuenca. En este estudio 26 subcuencas fueron generadas (Figura 3.11).
- Selección de punto de cierre del modelo, el cual delimita el área de estudio. Este punto corresponde a las coordenadas 903328 E y 9983166 N (WGS84 / UTM 17S), inmediatamente después de la confluencia del río Coca con el río Machacuyacu.





**FIGURA 3.11:** Subcuencas  
 FUENTE: IGM, SRTM  
 ELABORADO POR: Autor

### Definición de URH

Una vez delimitada la cuenca, el siguiente paso busca generar las URH a partir de una discretización de las características físicas del área de estudio. Esto se lo realiza en dos etapas: La primera, en la cual se carga y reclasifica la información y, la segunda, en la que se define las URH en función del tipo de suelo, cobertura y pendiente en cada subcuenca.

Para la primera etapa se hace uso de los mapas de cobertura de suelo, tipo de suelo y el MDE. A los dos primeros, se los carga y reclasifica mediante tablas que relacionan su categoría con la base de datos construida o incluida en el SWAT. El MDE, cargado en la delimitación de la cuenca, corresponde en esta etapa reclasificarlo de acuerdo al porcentaje de pendientes. En este estudio se ha clasificado las pendientes considerando 3 intervalos (0 - 50, 50 - 100 y 100 - 9999).

Una vez cargados los mapas, se definen las URH. En este estudio se consideran todas las URH generadas para la modelación hidrológica. Finalmente se obtuvieron 1064 URH.

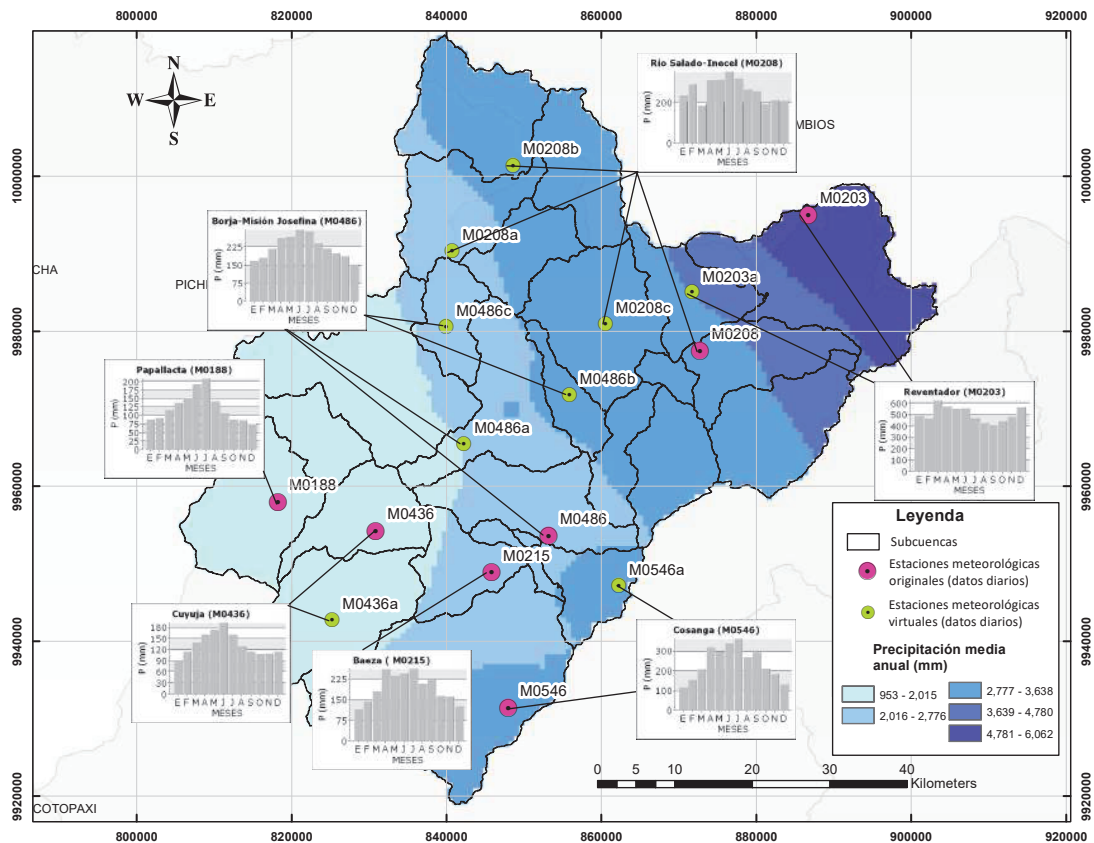
### **Incorporación de datos para la modelación**

Primeramente se conecta las bases de datos preparadas anteriormente, correspondientes a uso y tipo de suelo, la discretización espacial del modelo, generador de clima, red de drenaje, etc. Posteriormente, se incorpora los datos de precipitación, temperatura máxima y mínima a nivel diario, mencionadas en el Capítulo 3.2.1.

### **Edición de datos de entrada de las subcuencas**

Una vez construido el modelo existe la opción de redefinir parámetros de las subcuencas de acuerdo con el objetivo buscado o de las particularidades propias del área de estudio. En este caso se considera realizar el ajuste a la temperatura en cada subcuenca en función de la altura, ya que la cuenca del río Coca es una cuenca de alta montaña y existe una variación considerable de esta variable respecto a la altura. Por esta razón se ha ajustado el valor de la temperatura mediante el parámetro TLAPS (tasa de cambio de temperatura) asignándole un valor de  $-5,35^{\circ}C \cdot km^{-1}$ , como se presenta en la Tabla 3.5

En lo referente a la precipitación, no se pudo configurar el ajuste de la precipitación respecto a la altura puesto que el SWAT no permite cambios en la precipitación superior a 500 *mm* por kilómetro. En las subcuencas se han identificado gradientes de precipitación mayores a 3000 *mm* · *km*<sup>-1</sup>. En este estudio se optó por ubicar estaciones virtuales de precipitación en subcuencas que no disponen de esta información, tomando en cuenta las isoyetas y el régimen de precipitación presentado en el trabajo de Horna Kuonqui (2016), Figura 3.12. Esta información fue procesada e reingresada en la incorporación de datos climáticos.



**FIGURA 3.12:** Estaciones meteorológicas configuradas en SWAT

FUENTE: Horna Kuonqui (2016) IGM, SRTM, INAMHI

ELABORADO POR: Autor

### Métodos de cálculo a utilizarse

Los métodos de cálculos escogidos para el cálculo de los distintos componentes del ciclo hidrológicos fueron los siguientes:

- Método de Evapotranspiración Potencial (ETP): El método de Penman-Monteith fue elegido en comparación con los otros métodos, puesto que el modelo reprodujo valores de evapotranspiración cercanos a los propuestos por la bibliografía consultada.
- Método de Infiltración - Escorrentía: Se escogió el método "lluvia diaria / CN / Ruta Diario" por cuanto no se dispone de información subdiaria. El modelo NRCS - Número de Curva (CN), permite determinar la escorrentía aproximada basada en el uso del suelo de la cuenca y el grupo hidrológico del suelo.
- Método de Traslado de Caudales en los canales: Se selecciona el método de Muskingum, por cuanto permite modificar el tiempo de propagación para simulaciones adecuadas en áreas tropicales (Neitsch et al., 2011).

### Periodo de análisis

En base a los registros de precipitación y caudal observados, se escogió un intervalo de tiempo de simulación a nivel mensual, y un periodo de simulación de 11 años, desde 1976

a 1986, de acuerdo al siguiente detalle:

- Periodo de Calentamiento: 1/1/1976 - 31/12/1978
- Periodo de Calibración: 1/1/1979 - 31/12/1983
- Periodo de Validación: 1/1/1984 - 31/12/1986

Una vez que se ha incorporado toda la información, que se han elegido los métodos de cálculo y se han determinado los periodos de simulación; se procede a realizar la corrida o simulación del modelo establecido. El SWAT realiza la rutina y genera las bases de datos que permiten extraer y visualizar los resultados de los procesos hidrológicos calculados, lo cual posibilita evaluar la aplicabilidad del modelo.

## **VALIDACIÓN Y DESEMPEÑO DEL MODELO**

El objetivo de los modelos hidrológicos es a menudo la simulación de las series temporales de alguno de los términos del balance hídrico, ya sea para cualquiera de los propósitos para los cuales son útiles: reconstitución de datos, reproducción de procesos, predeterminación o previsión de eventos o para estudiar los efectos de la modificación de las características de la cuenca. En todos los casos, los modelos son objeto de calibración y validación (Roche et al., 2012).

El proceso de calibración consiste en ajustar los parámetros iniciales del modelo mediante la optimización de criterios de desempeño (Roche et al., 2012); y la validación, poner a prueba el modelo (mide la robustez) bajo una nueva serie de datos independientes. Para ambos procesos se requiere de información cuantitativa de una variable independiente (Golmohammadi et al., 2014). En este estudio, se utilizó los valores de caudal líquido medio mensual, medidos en la estación hidrológica H0714 (Coca en San Rafael), para calibrar el submodelo hidrológico.

En este acápite se presenta la metodología utilizada en el proceso de calibración y validación, así como los criterios para evaluar el desempeño del modelo hidrológico implementado.

### **Criterios de desempeño**

Con la finalidad de que los resultados de los modelos puedan ser utilizados, estos deben ser sólidos, robustos, carente de sesgo y precisos (Roche et al., 2012; Moriasi et al., 2007). Estas cualidades indican la manera en como los resultados de la simulación se corresponden a aquellos observados, reflejan la capacidad del modelo para representar los distintos componentes del ciclo hidrológico y el potencial para generalizarlo bajo cambios de las variables de entrada.

Moriasi et al. (2007) recomiendan evaluar el desempeño de modelos de cuenca de manera gráfica y estadística. Analizar de manera gráfica permite visualizar la forma en cómo se despliegan los datos simulados y observados, mediante el uso de hidrogramas, diagramas de barras o diagramas de caja. En cambio, para realizar el análisis estadístico se hace uso de criterios o índices que permiten conocer la precisión o error del modelo. El coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (ecuación 3.2), porcentaje de sesgo (PBIAS) (ecuación 3.3) y la razón

que relaciona la raíz cuadrada del error medio y la desviación estándar de las observaciones (RSR) (ecuación 3.4), son tres criterios sugeridos por este autor y que se utilizan en la evaluación estadística de los modelos hidrológicos. En la Tabla 3.9 se presenta los criterios estadísticos y los rangos de clasificación sugeridos por Moriasi et al. (2007) para evaluar el performance del modelo.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (3.3)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3.4)$$

Donde:

$i$ : series de tiempo de los pares de valores observados y simulados

$n$ : pares de los valores observados y simulados

$O_i$ : valor observado

$S_i$ : valor simulado

$\bar{O}$ : Promedio de los datos observados

**TABLA 3.9:** Criterios utilizados para evaluar el desempeño de modelo hidrológico

Criterio	Valor	Clasificación
NSE	$0.75 < NSE \leq 1.00$	Muy Bueno
	$0.65 < NSE \leq 0.75$	Bueno
	$0.50 < NSE \leq 0.65$	Satisfactorio
	$NSE \leq 0.5$	Insatisfactorio
PBIAS	$PBIAS < \pm 10$	Muy Bueno
	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	Bueno
	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	Satisfactorio
	$PBIAS > \pm 25$	Insatisfactorio
RSR	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	Muy Bueno
	$0.50 < RSR \leq 0.60$	Bueno
	$0.60 < RSR \leq 0.70$	Satisfactorio
	$RSR > 0.70$	Insatisfactorio

FUENTE: Moriasi et al. (2007)

ELABORADO POR: Autor

NSE es un criterio que determina la precisión del modelo simulado (Roche et al., 2012). Es una magnitud relativa de la varianza residual (ruido) en comparación con la varianza de los datos observados; es considerada como la función objetivo que refleja de mejor manera el ajuste global del hidrograma (Moriasi et al., 2007). Los valores van desde  $-\infty$  a 1, siendo 1 el valor perfecto y  $-\infty$  un valor que indica que no existe ajuste alguno.

El PBIAS mide la tendencia media de la simulación de datos a ser más grandes o más pequeños que sus homólogos observados. El valor óptimo de PBIAS es de 0.0; valores negativos

indican que el modelo sobreestima los valores observados, y valores positivos los subestiman.

RSR es un criterio que relaciona la raíz cuadrada del error medio (RMSE) y la desviación estándar de las observaciones. RSR varía desde el valor óptimo de 0.0, valor que indica la variación RMSE o residual cero y por lo tanto perfecta simulación del modelo. Un RSR menor, significa un menor RMSE, e indica un mejor rendimiento del modelo.

En este estudio se utiliza los hidrogramas como método gráfico de evaluación y los criterios estadísticos de NSE, PBIAS y RSR; para evaluar el desempeño del modelo, tanto en el proceso de calibración como de validación.

### **Calibración**

Todos los modelos hidrológicos son paramétricos (Roche et al., 2012), en consecuencia, una vez que ha efectuado su rutina de simulación es necesario ajustar los parámetros y variables que han sido considerados en su construcción.

El SWAT, por ser un modelo en base física que reproduce varios procesos del ciclo hidrológico requiere de un gran número de datos de entrada (Arnold et al., 2012) y la determinación de sus parámetros no es posible realizarla por medición previa (Beven, 2011), pero deben ser estimados por calibración (Rosbjerg and Madsen, 2005).

El primer paso para la calibración consiste en la determinación de los parámetros más sensibles del modelo (Arnold, et al., 2012), donde el modelador o usuario determina cuales variables deben ser ajustadas, basadas en el juicio de expertos o por un análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad estudia el efecto producido por las variaciones de parámetros sobre el comportamiento del sistema y determina la tasa de cambio en la variable independiente con relación a los cambios en los datos de entrada (Ma et al., 2000).

Tanto el análisis de sensibilidad y la calibración pueden ser llevados a cabo de manera manual, automática o semiautomática. Realizarlo de manera manual es difícil y casi inviable en muchas aplicaciones a gran escala ya que implica entender mejor el modelo, los procesos importantes y la sensibilidad del parámetro; en cambio, realizarlo de manera automática reduce al mínimo la diferencia entre los valores simulados y observados sin tomar en cuenta los procesos que se desarrollan dentro de la cuenca (Arnold et al., 2012). Razón por la cual el enfoque semiautomático constituye una opción entre los dos métodos, puesto que permite realizar la rutina de optimización en numerosas simulaciones una vez que los parámetros han sido definidos por parte del usuario.

Para el análisis de sensibilidad se ha seleccionado el modelo semiautomático Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) el cual es efectuado mediante la herramienta SWAT-CUP, disponible gratuitamente en el sitio web: <http://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>, el cual es un modelo que se utiliza para: análisis de sensibilidad, calibración, validación y análisis de la incertidumbre de los modelos SWAT (Abbaspour, 2007).

Este modelo permite definir los parámetros y los rangos de las variables que el modelador considera necesarias evaluar su sensibilidad a través de los coeficientes t-Stat y P-Valor, los cuales están íntimamente relacionados. El primero, calcula la diferencia en unidades

de error estándar; y el segundo determina la significancia de un parámetro a partir del análisis de probabilidad de que la variables escogida tiene algún efecto en el criterio de desempeño. Un P-Valor menor a 0.05 se considera como el criterio para incluir la variable en el análisis de sensibilidad, ya que se rechaza la hipótesis nula. La hipótesis nula indica que no hay significancia estadística entre 2 variables; es la hipótesis que en el análisis se trata de rechazar (Gonzalez, 2016). Un valor de 0.05 indica que hay una probabilidad del 95 % de que este parámetro está teniendo algún efecto en el modelo (Abbaspour, 2007).

La metodología utilizada en el análisis de sensibilidad y la calibración, se presenta a continuación. Esta se siguió tomando en cuenta lo sugerido en el documento SWAT: Model use, calibration, and validation (Arnold et al., 2012) y el documento "User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs" (Abbaspour, 2007).

1. Correr el modelo con los valores de los parámetros iniciales y graficar los valores simulados y observados para cada estación de aforo para el periodo entero de registro.
2. Basado en el paso anterior, dividir el periodo en un periodo de calibración y otro de validación, procurando que ambos periodos tengan un similar número de años húmedos o secos y un balance hídrico similar. En este estudio se determinó el periodo comprendido entre los años 1979 - 1983 como periodo de calibración y como periodo de validación desde 1984 a 1986.
3. Determinar los parámetros que se evaluarán en función de los componentes del balance hídrico escogidos para realizar el control. Esta información puede usualmente ser deducida de la literatura. En el caso de este estudio se tomaron como guía los parámetros sugeridos en Van Griensven et al. (2006) y Arnold et al. (2012).
4. Asignar un rango de incertidumbre a cada parámetro.
5. Correr el SWAT-CUP-SUFI2 1000 veces (Abbaspour et al., 2015) y evaluar la sensibilidad de los parámetros que más afectan el criterio de desempeño; en este paso se escogió como criterio de desempeño el NSE.
6. Aislar los parámetros más sensibles de acuerdo al P-Valor y t-Stat y evaluar la sensibilidad del resto de parámetros
7. Escoger los nuevos parámetros sensibles en función del análisis de P-Valor y t-Stat y de los procesos que se quiere representar. Se deben aislar estos parámetros ya que afectan el criterio de evaluación y se debe establecer nuevos pares de datos, con el objeto de iniciar el proceso de calibración del modelo.
8. Correr el SWAT-CUP-SUFI2, junto con los nuevos rangos de calibración sugeridos por el software, para encontrar los valores óptimos del modelo en función del criterio objetivo.
9. Se repite el paso 7 hasta que los parámetros escogidos con los rangos se estabilicen.
10. Fijar los valores óptimos encontrados e incluirlos en el modelo hidrológico simulado.

En este estudio, se tomaron en cuenta los parámetros que determinan los procesos de evapotranspiración, escurrimiento, caudal base, caudal lateral y transporte; ya que la interacción de estos afecta directamente el caudal simulado.

Como referencia se conoce que los valores de evaporación anual de la cuenca oscilan entre 410 *mm* to 614 *mm* (Sinohydro, 2012; Duque and Vázquez, 2015). El caudal observado promedio anual del periodo 1973-1986 y 2010-2014 en la estación hidrológica H0714 es 307.91  $m^3 \cdot s^{-1}$  y de la estación H0715 de 168  $m^3 \cdot s^{-1}$ , de acuerdo al análisis realizado a los datos generados por INECEL y PHCCS en el mismo periodo.

### **Validación**

Una vez se ha calibrado el modelo, se procede con la validación en el periodo de observación 1984-1986. Para este proceso también se evaluó el desempeño del modelo con los mismos criterios estadísticos discutidos en el Capítulo 3.2.1.

### **3.2.2 PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS**

En este estudio se utilizó el modelo SWAT para predecir y estimar la producción de sedimento a escala de cuenca hidrográfica. El modelo SWAT fue originalmente desarrollado por el departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA) para evaluar el impacto de las prácticas agrícolas del manejo de la tierra. El modelo asume que la erosión laminar por el flujo superficial y la erosión inter-surcos son los principales tipos de erosión.

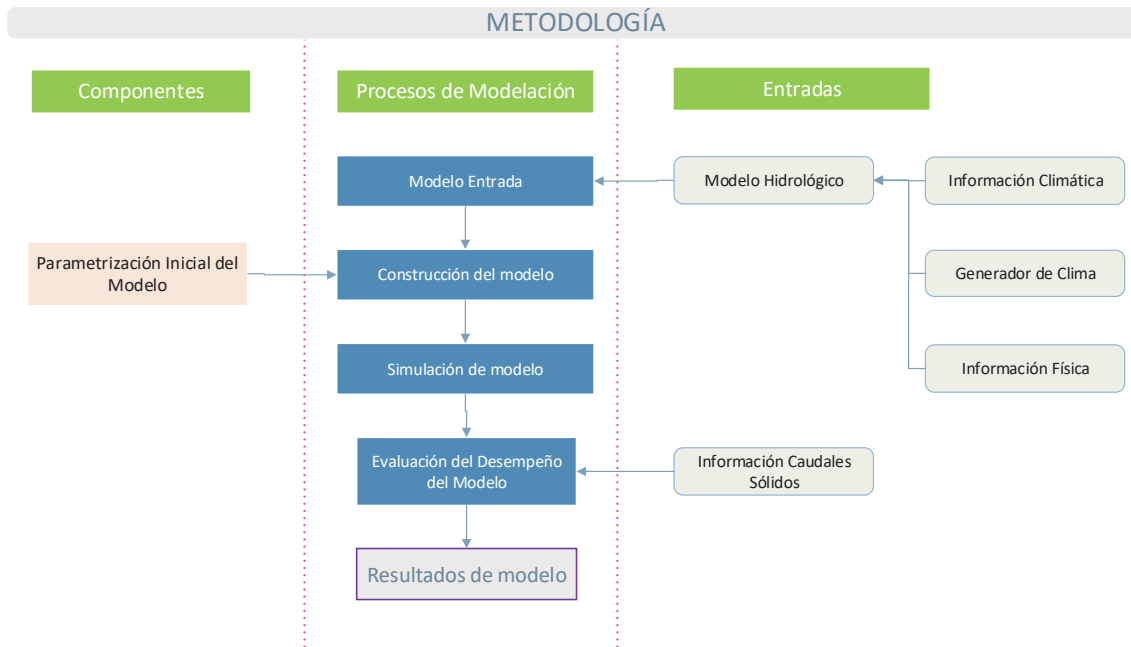
El modelo divide una cuenca hidrográfica en sub-cuencas. Cada una de las subcuencas se conecta por medio de un canal de río, el cual continúa la división hasta obtener unidades de respuesta hidrológica (HRU). La producción de sedimento se estima para cada uno de los HRU utilizando la Ecuación Modificada de Pérdida de Suelo Universal (MUSLE)(Neitsch et al., 2011).

Además, el modelo SWAT utiliza la ecuación simplificada por Williams (1980) de la energía del río desarrollada por Bagnold (1977) para enrutar los sedimentos en el canal. El transporte de sedimento en la red fluvial depende de dos procesos, degradación y agradación (deposición) que operan simultáneamente en el río (Neitsch et al., 2005).

La degradación del canal en las orillas se calcula considerando la profundidad del agua, la pendiente del cauce y el coeficiente de erosión del caudal; mientras que la erosión del lecho se estima a partir de la capacidad de transporte del canal, utilizando el la ecuación simplificada de Bagnold por Williams (1980).

La Figura 3.13 presenta de manera esquemática el proceso de estimación de la producción de sedimentos, la información requerida y los componentes o métodos que deben definirse previo a la simulación, así como el análisis de desempeño del modelo.





**FIGURA 3.13:** Metodología para estimar la producción de sedimentos  
ELABORADO POR: Autor

## DATOS DE ENTRADA

### Modelo Hidrológico

El modelo hidrológico implementado para la estimación de los caudales líquidos es la base con la cual se estima la producción de sedimentos en la cuenca. Este simula el volumen de la escorrentía y el caudal pico. Estos dos elementos, conjugados con el área de la subcuenca, se utilizan para calcular la energía erosiva de la escorrentía (Neitsch et al., 2011).

### Caudal Sólido $Q_s$

El cálculo del caudal sólido en la cuenca se ha realizado desde el año de 1974. Sin embargo se han tomado pocos datos y de manera muy irregular en el tiempo.

En este estudio y con el objeto de evaluar el modelo respecto a la producción de sedimentos se comparará los valores estimados por el SWAT en las estaciones H0714 y H0715 a nivel anual, comparándolos con los descritos por Smits (1992); el cual hace uso de las curvas de duración general a nivel diario y las relaciona con las ecuaciones que deducen el caudal sólido a partir de caudal líquido. En la Tabla 3.10 se presentan las ecuaciones mencionadas en dicho estudio que relacionan el caudal líquido ( $Q_l$ ) y el caudal sólido ( $Q_s$ ), el periodo de registro y caudal sólido total estimado.

**TABLA 3.10:** Estaciones hidrológicas con curvas de descargas ( $Q_l$  vs.  $Q_s$ )

Estación	Periodo	Número Registros	Ecuación ( $Q_s$ )	Caudal Sólido Total (t/año)
H0714	1974-1987 2008-2015	133	$Q_s = 3,8001 \cdot 10^{-7} \cdot Q_l^{3,3489}$	10738000
H0715	1978-1998 2008-2015	121	$Q_s = 9,491 \cdot 10^{-12} \cdot Q_l^{5,423}$	4772000

FUENTE: Smits (1992), PHCCS

ELABORADO POR: Autor

El caudal sólido total presentado se compone de la suma de sedimentos suspendidos totales, sedimentos de fondo y de sedimentos en suspensión no medidos (Smits, 1992). Se considera que entre un 20 - 30 % de la carga total corresponde al transporte de fondo y aporte por deslizamientos (Sinohydro, 2012; Smits, 1992).

## CONSTRUCCIÓN MODELO

Esta etapa consiste en fijar el valor de los valores de los parámetros que inciden en la producción de sedimentos en la cuenca tanto en su fase terrestre como de transporte.

Respecto a la fase terrestre, se fijan los valores de erodabilidad del suelo ( $K_{usle}$ ), pérdida por cobertura de suelo ( $C_{usle}$ ) y el factor de control por manejo de la erosión ( $P_{usle}$ ). Respecto al factor topográfico, la escorrentía el caudal pico son calculados en el proceso de simulación del componente hidrológico.

El  $K_{usle}$ , fue deducido para cada tipo de suelo identificado en la cuenca, utilizando el nomograma generado por Wischmeier et al. (1978), en función de su textura y contenido de materia orgánica. Este valor se incluyó en la base de datos que se presenta en el Anexo 5. Respecto al  $C_{usle}$  se utilizó los valores de la base de datos propuesta por el SWAT de cada una de las coberturas identificadas por este estudio. Estos factores se presentan en la Tabla 3.11.

**TABLA 3.11:** Factores  $C_{usle}$  utilizados en el modelo

USO / COBERTURA	CÓDIGO SWAT	$C_{usle}$
Afloramientos Rocosas	BARR	0.2
Bosque	FRSE	0.001
Pastizales	PAST	0.003
Páramos	BROM	0.003
Cultivo (naranjilla)	MESQ	0.2

FUENTE: Base de datos SWAT

ELABORADO POR: Autor

El  $P_{usle}$  se definió con un valor igual a uno, que significa que no se aplican prácticas de control de la erosión.

Respecto a la fase de transporte, se fijan el coeficiente de potencia de cauce ( $sp_{exp}$ ) de Bagnold (1980) y el coeficiente  $sp_{con}$ , el cual lo define el usuario. Para este estudio los

valores utilizados son  $sp_{exp}= 1$  y  $sp_{con}=0.001$ ; y representa los valores propuestos por el programa por defecto.

Una vez que se ha configurado el modelo se procede a simularlo en el mismo periodo considerado en el Capítulo 3.2.1.

### **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO**

Respecto a la producción de sedimentos no se puede realizar ni la calibración ni la validación del modelo, por cuanto no existen series de tiempo de esta variable. Sin embargo, se realiza la comparación de los sedimentos estimados por el modelo con los datos de producción anual media presentados en la Tabla 3.10.

## CAPÍTULO 4

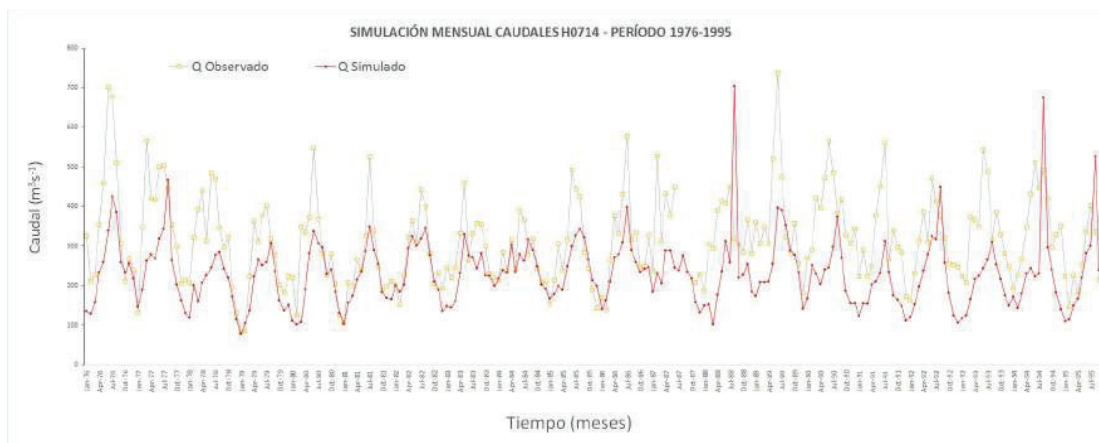
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados generados por el modelo para estimar los caudales líquidos y la producción de sedimentos de la cuenca del Río Coca. Se describen los resultados del análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo; así como los resultados de la evaluación del modelo aguas arriba del punto de cierre H0714.

#### 4.1 CAUDALES LÍQUIDOS

##### 4.1.1 SIMULACIÓN INICIAL DE CAUDALES

Los primeros resultados generados por el modelo en la estación H0714 se presentan de manera gráfica en la Figura 4.1.



**FIGURA 4.1:** Simulación inicial con SWAT, estación Coca en San Rafael (H0714), periodo 1976-1995  
ELABORADO POR: Autor

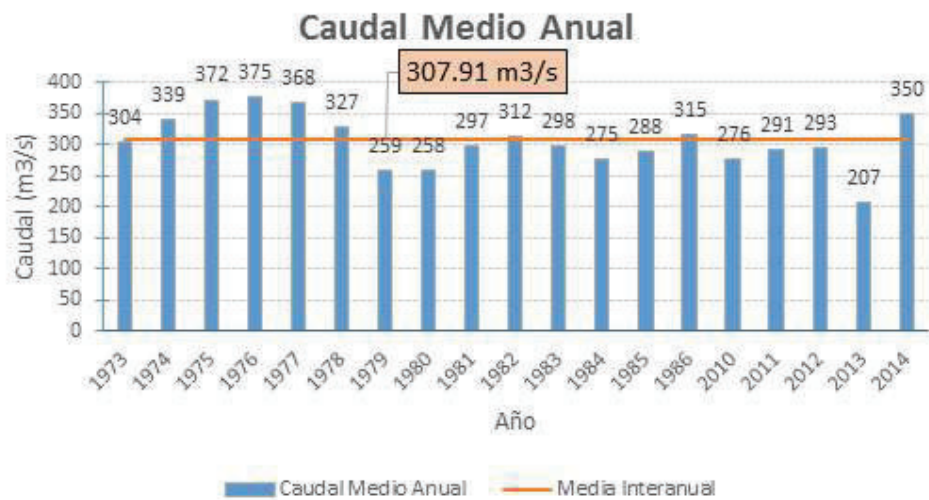
Del gráfico y de la comparación de los resultados se concluye a manera general que existe una tendencia de los valores simulados con los valores observados. Se observa que los picos estimados por el modelo tienden a representarse de manera semejante, siguiendo la tendencia temporal de los datos observados; sin embargo, no llegan a alcanzar los valores máximos mensuales en la mayor parte de la serie. Lo mismo sucede con los caudales mínimos obtenidos, ya que estos fueron inferiores a los observados en gran parte de la serie.

Se observa que los hidrogramas se ajustan de mejor manera en el periodo 1976 - 1986, puesto que existe una mayor cantidad de información en este periodo; de modo que este periodo fue seleccionado para realizar el proceso de calibración y validación. Ambos procesos se los analiza en lapsos de tiempo distinto y se procura que ambos tengan años secos y húmedos.

### Años secos y húmedos

Con el objeto de definir los periodos de calibración y validación, se identificó en este estudio los años a los cuales se los considera como húmedos y secos, efectuando el análisis de los caudales medios anuales completos disponibles de la estación H0714, asumiendo que los caudales expresan la relación directa lluvia-escorrentía.

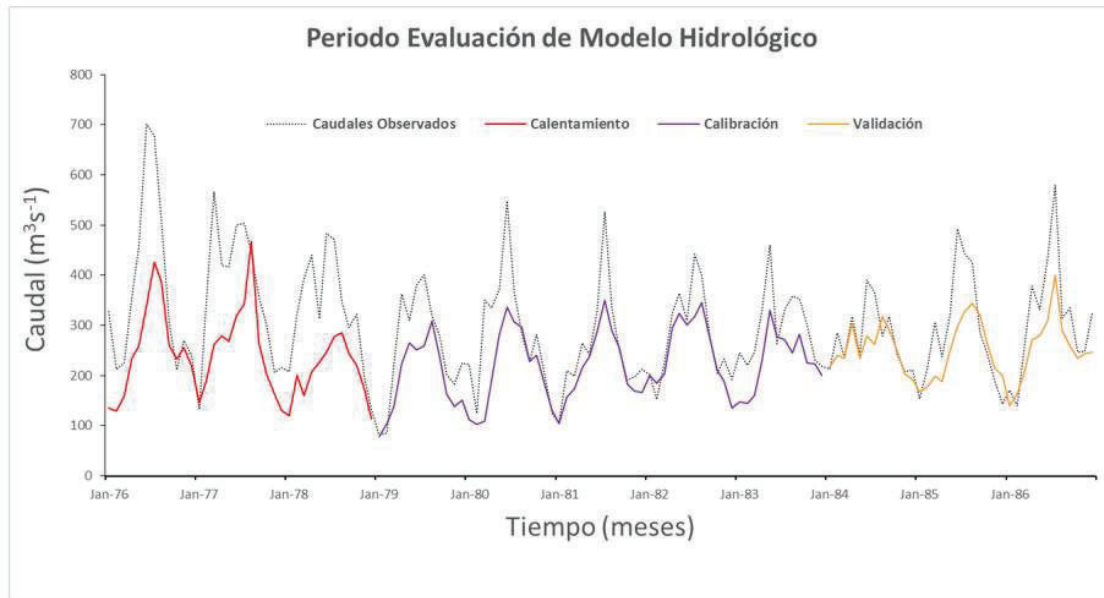
Para este fin, el método gráfico se utilizó para visualizar los años en los cuales los caudales son superiores o inferiores al promedio interanual, catalogándolos como húmedos y secos, respectivamente (Bogavelli et al., 2016). Para obtener los valores promedio anual e interanual se utilizó los valores de caudal diarios observados en la estación H0714, el periodo 1973-1986 y 2010-2014 como se observa en la Figura 4.2.



**FIGURA 4.2:** Caudal medio anual, estación Coca en San Rafael (H0714)  
ELABORADO POR: Autor

El promedio interanual del periodo de estudio es de 307.91 m<sup>3</sup>/s. Los caudales registrados superiores a este valor se los catalogará como húmedos y dentro del periodo de simulación 1979-1986, corresponde a los años 1982 y 1986. Por otra parte, los valores inferiores se los catalogará como secos, correspondiendo a los años 1979, 1980 y 1984. El resto de valores por estar cercanos a la media, se les considerará años promedio.

Por consiguiente, y considerando lo analizado, el proceso de calibración se realizó en el periodo 1979-1983, seleccionando los años comprendidos entre 1976-1978 como periodo de calentamiento; y la validación para el periodo 1984-1986. En la Figura 4.3 se presenta de manera gráfica cada uno de los periodos escogidos para la evaluación del modelo.



**FIGURA 4.3:** Periodo de evaluación de modelo en estación H0714, periodo 1976-1986  
ELABORADO POR: Autor

#### 4.1.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó el análisis de sensibilidad para identificar los parámetros que son más influyentes en la reproducción del caudal. Estos parámetros afectan la salida del modelo e influyen en los volúmenes de aguas estimados en los subprocesos que se llevan a cabo en las distintas fases del ciclo hidrológico.

El análisis se realizó utilizando los datos observados de la estación hidrológica Coca en San Rafael H0714 e incluyó inicialmente el análisis de 20 parámetros que fueron seleccionados en función de literatura científica referente a este tema, como se muestra en el Anexo 6.

El resultado de este análisis se presenta en la Tabla 4.1, y muestra todos los parámetros sensibles de acuerdo a los valores calculados de P-Valor y t-Stat.

TABLA 4.1: Ranking de los parámetros sensibles

No.	Parámetro	Descripción	P-Valor	t-Stat	Proceso
1	PCP	Precipitación	0	18.38	Clima/Datos entrada
2	SOLARAV	Radiación Solar	0	-3.91	Clima/Datos entrada
3	CH_K2	Conductividad Hidráulica de Canal Principal	0	-31.22	Transporte de Agua
4	MSK_CO2	Factor de ponderación que influye en el tiempo de almacenamiento del agua en un segmento del canal.	0	29.85	Transporte de Agua
5	MSK_CO1	Factor de ponderación de Muskingum, que controla la importancia relativa de flujo de entrada y flujo de salida en la determinación del almacenamiento en un alcance.	0	-23.27	Transporte de Agua
6	MSK_X	Factor de ponderación de Muskingum que controla la importancia relativa de flujo de entrada y flujo de salida en la determinación del almacenamiento en un alcance.	0	-12.4	Transporte de Agua
7	GW_REVAP	Coefficiente de Revapotranspiración	0	-3.35	Caudal Base
8	GWQMN	Nivel del umbral freático en el acuífero poco profundo para que pase agua subterránea al cauce principal (mm H <sub>2</sub> O).	0.02	-2.38	Caudal Base
9	ALPHA_BF	Factor de recesión del flujo base	0.03	2.2	Caudal Base
10	GW_DELAY	Tiempo de retraso de aguas subterráneas	0.04	-2.04	Caudal Base
11	SOL_AWC	Capacidad de campo	0.09	-1.71	Suelo
12	SOL_K	Conductividad hidráulica en condiciones saturadas	0.26	1.14	Suelo
13	CH_N2	Coefficiente de rugosidad de Manning en canal principal	0.37	-0.89	Transporte de Agua
14	SURLAG	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial	0.48	0.71	Escorrentía Superficial
15	REVAPMN	Límite de agua en el acuífero libre antes que ocurra percolación o revap al acuífero subterráneo	0.55	-0.59	Caudal Base
16	EPCO	Factor de compensación de la absorción de la planta	0.76	0.3	ET
17	SOL_ALB	Albedo del Suelo	0.85	-0.18	ET
18	CN2	Numero de Curva (CN2)	0.9	-0.13	Escorrentía Superficial
19	SOL_CBN	Contenido de carbono del suelo	0.95	-0.06	Suelo
20	ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0.99	-0.01	ETP

ELABORADO POR: Autor

Al mirar los primeros diez parámetros se puede determinar que el caudal de la cuenca está influenciada principalmente por el clima, el transporte de agua y procesos sub superficiales relacionados con el caudal base.

La precipitación (PCP) es el parámetro más sensible, lo cual es lógico teniendo en cuenta que este es el principal input para el ciclo hidrológico (Neitsch et al., 2011), y en este caso se le prestó particular atención por cuanto los caudales generados inicialmente en el modelo son inferiores a los observados, pudiendo deberse a que los datos de precipitación medidos no toman en cuenta la precipitación horizontal, principalmente en las áreas cubiertas de bosque, ya que en la temporada de mayor lluvia, la neblina y vientos fuertes son más fre-

cuentas y esta cobertura puede estar interceptando aportes considerables de agua (Duque and Vázquez, 2015).

La radiación solar es otro de los parámetros identificados como sensibles, este parámetro afecta considerablemente la evaporación (Neitsch et al., 2011), y debe ser tomado en cuenta por cuanto los valores de evaporación simulados inicialmente son superiores a los estimados en la cuenca.

Los coeficientes utilizados en el método de cálculo de Muskingum (CH\_K2, MSK\_CO2, MSK\_CO1, MSK\_X), influyeron de manera notable en la precisión del modelo, convirtiéndose en los siguientes parámetros más sensibles respecto a la respuesta hidrológica de la cuenca.

Los parámetros relacionados con caudal base (GW\_REVAP, GWQMN, ALPHA\_BF, GW\_DELAY) también son sensibles al criterio que indica precisión (NSE) (Roche et al., 2012), mas no se los relaciona al aporte de agua de algún acuífero superficial ya que en la parte oeste de la cuenca la litología que predomina es la roca metamórfica (Andrade Villafuerte, 2016); y más bien se los debería relacionar con el flujo lateral, dado que los suelos que cubren la mayor área de estudio son suelos que tienen alta conductividad hidráulica.

#### **4.1.3 PARÁMETROS ÓPTIMOS DE MODELO**

De todos los parámetros sensibles clasificados se seleccionaron los 11 primeros utilizando el coeficiente P-Valor. Asimismo, se tomó en cuenta el parámetro CN2 por cuanto este gobierna la escorrentía superficial (Arnold et al., 2012), y el cual mostró ser sensible en el proceso de optimización.

En la Tabla 4.2 se presentan los parámetros optimizados con sus valores ajustados en función del rango establecido inicialmente.



**TABLA 4.2:** Lista de parámetros calibrados y sus valores

Parámetro	Unidad	Método de Reemplazo	Valor Inicial	Rango		Valor Óptimo
PCP	<i>mm</i>	Multiplicar al valor inicial	Depende de Subcuenca	0	0.2	1.17
SOLARAV	$MJ \cdot m^2 \cdot dia$	Multiplicar al valor inicial	Depende de Subcuenca	-0.2	0	-0.06
CH_K2	$mm \cdot hr^{-1}$	Añadir al valor inicial	0	6	25	8.83
MSK_CO2	-	Reemplazar con nuevo valor	0.25	0.01	10	7.05
MSK_CO1	-	Reemplazar con nuevo valor	0.75	0.01	10	0.16
MSK_X	-	Reemplazar con nuevo valor	0.2	0	0.5	0.08
GW_REVAP	-	Reemplazar con nuevo valor	0.02	0.02	0.2	0.11
GW_QMN	<i>mm</i>	Reemplazar con nuevo valor	1000	0	3000	613
ALPHA_BF	<i>dias</i>	Reemplazar con nuevo valor	0.048	0	1	0.54
GW_DELAY	<i>dias</i>	Reemplazar con nuevo valor	31	0	50	0.5
SOL_AWC	$mm \cdot mm^{-1}$ suelo	Multiplicar al valor inicial	En Función de tipo de suelo	-0.5	0.5	-0.5
CN2	-	Multiplicar al valor inicial	42.7	0	1	1.73

ELABORADO POR: Autor

La PRECIPITACIÓN, con un valor superior al 17 % calculado inicialmente por el modelo, permitió que se estimen mayores caudales. Según Duque and Vázquez (2015) se comprueba la gran influencia de la precipitación horizontal en las cuencas amazónicas de montaña. Bruijnzeel (2004) menciona que la contribución de agua por intercepción en localidades tropicales está en un rango del 5 al 20 %.

La disminución de la radiación solar (SOLARAV) influye en la ETP y en el proceso de evaporación (Neitsch et al., 2011), ya que se utilizó como método de ETP la ecuación de Penman-Monteith. Al final del proceso de calibración, la evaporación calculada se correspondió con la mencionada en el estudio realizado por Sinohydro (2012).

El CH\_K2 es un parámetro importante que controla conductividad hidráulica efectiva, en este caso un valor de 8.82 indica que el lecho del río tiene tasas de pérdida moderadas del agua que se transporta y considera que el lecho está constituido por una mezcla de arenas y gravas con contenido de arena y arcilla. Los valores de los coeficientes de MSK\_CO2= 7.046735 y, MSK\_CO1= 0.75 permiten recalculer la pendiente ponderada del almacenamiento de la descarga (K), aumentando su valor; y que en conjunto con valor de MSK\_X de 0.08, indican un cambio de cómo se expresan los caudales de entrada y salida en un tramo (Carter and Godfrey, 1960).

La disminución del GW\_REVAP y del GW\_QMN, incidió en el incremento de la caudal base e influyó en que el SOL\_AWC disminuya su valor en 50 %. El ALPHA\_BF y GW\_DELAY

permitieron que el hidrograma inicialmente simulado pueda retroceder y se ajuste mejor al hidrograma observado (Arnold et al., 2012).

El CN2 aumentó a nivel de cuenca a 74.11, el cual es próximo al valor de 75 estimado en el estudio ANEXO B del Informe Final del Estudio de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair de 1992 (INECEL, 1992).

#### 4.1.4 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL MODELO

##### Resultados de la calibración y validación

El modelo fue calibrado para el período de 5 años (1979-1983) y validado para el período de 3 años (1984 - 1986) en base a la disponibilidad de los datos para la estación de observación H-0714 Coca en San Rafael. Los resultados se presentan en el Anexo 7.

##### Producción anual de agua

La producción de agua estimada por el modelo y comparado con los valores observados se presenta en la Tabla 4.3. Mientras que el análisis de los caudales simulados que conforman el caudal total se presentan en la Tabla 4.4.

**TABLA 4.3:** Estimación de la producción anual de agua durante el periodo de calibración y validación en estación H0714

		Producción de Agua (mm)
Periodo Calibración 1979-1983	Observado	2395
	Estimado	2363
	% Discrepancia	-1.30 %
Periodo Validación 1984-1986	Observado	2399
	Estimado	2631
	% Discrepancia	9.70 %

ELABORADO POR: Autor

**TABLA 4.4:** Porcentaje de aporte de los caudales que conforman el caudal total en estación H0714

Periodo	$Q_{surf}$	%	$Q_{Lat}$	%	$Q_{gw}$	%	$Q_{total}$	% $Q_{base}$ ( $Q_{lat} + Q_{gw}$ )
Calibración	528	22	631	27	1204	51	2363	78
Validación	680	26	660	25	1290	49	2631	74

ELABORADO POR: Autor

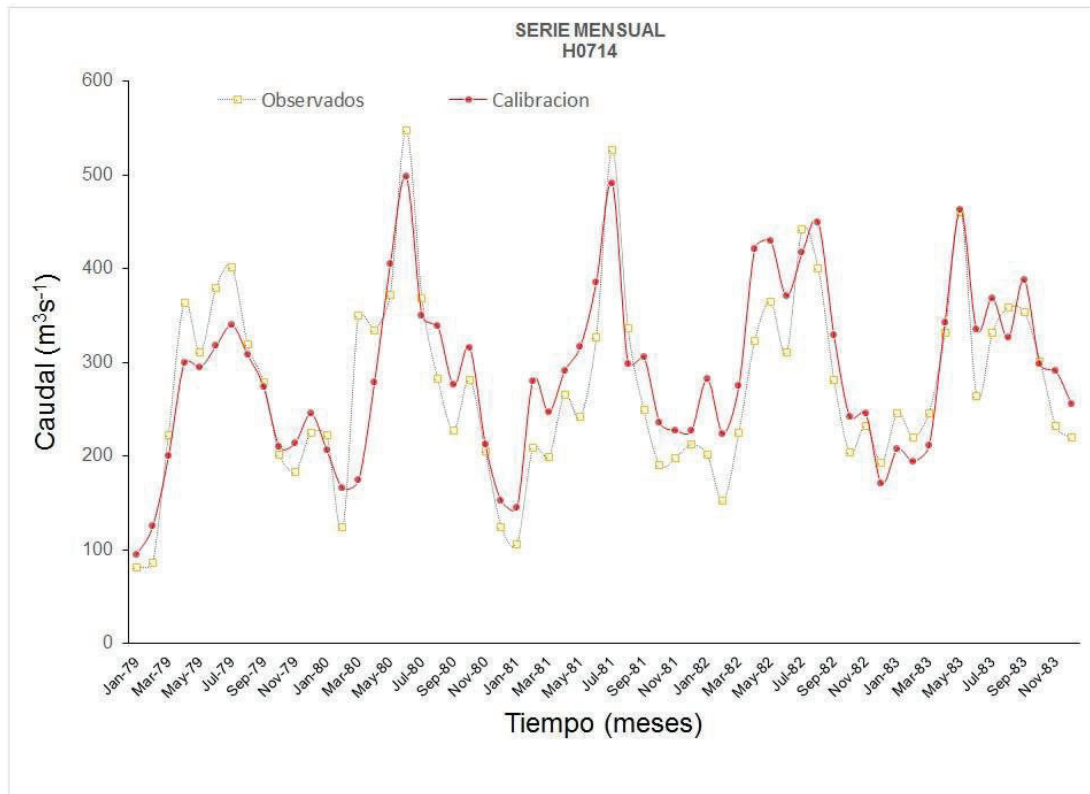
De los resultados obtenidos, se observa que el modelo a nivel anual, en el periodo de calibración, apenas subestima la producción de agua en 1.3%. En cambio, en el periodo de validación, el modelo sobrestima la producción de agua en 9.7% lo que significa un incremento de 232mm de agua.

El caudal total estimado por el modelo está conformado en su mayor parte por  $Q_{base}$ , el que a su vez compuesto mayoritariamente por  $Q_{gw}$ . Lo que significaría que existe un gran aporte de aguas proveniente de un acuífero libre, lo cual no sería razonable por cuanto la

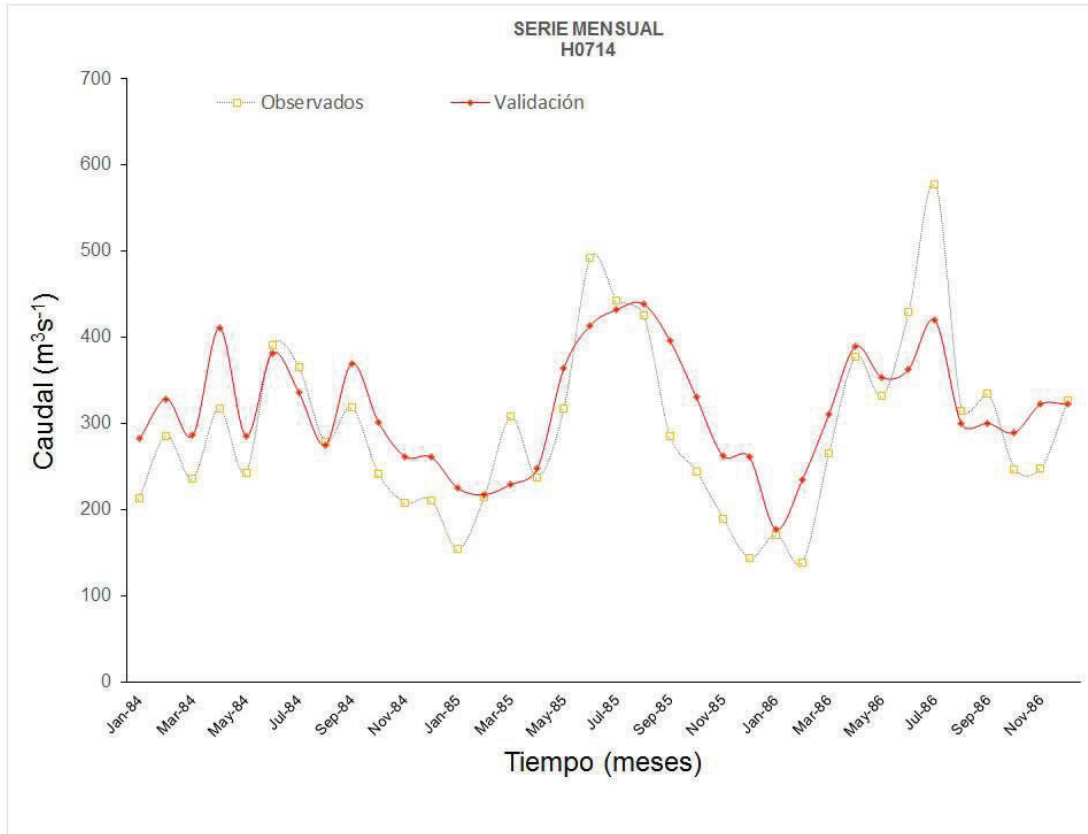
litología del área de estudio está conformado por rocas metamórficas.

### Evaluación gráfica

La evaluación gráfica proporciona un mejor entendimiento de los patrones de caudal (Oregon, 2016). Permite la visualización de la capacidad de los modelos para estimar los picos y los caudales bajos, así como la variabilidad estacional (Kundu, 2012). En la Figuras 4.4 y 4.5 se presenta los hidrogramas con los valores calibrados y observados.



**FIGURA 4.4:** Hidrograma observado vs. simulado durante etapa de calibración en estación H0714  
ELABORADO POR: Autor



**FIGURA 4.5:** Hidrograma observado vs. simulado durante etapa de validación en estación H0714  
ELABORADO POR: Autor

En las figuras 4.4 y 4.5 se observa que durante la calibración y validación, el modelo reconoce los valores máximos y mínimos de manera bastante aproximada. Estos valores apenas son subestimados, existiendo en toda la serie una correspondencia entre lo simulados y lo observado.

### Criterios estadísticos de desempeño

Con el fin de hacer la evaluación estadística del modelo, se aplicaron los criterios y rangos de calificación recomendados por Moriasi et al. (2007). Los resultados se presentan en la Tabla 4.5.

**TABLA 4.5:** Índices estadísticos para evaluar el desempeño de modelo en estación H0714

H0714 - COCA EN SAN RAFAEL			
	NSE	PBIAS	RSR
Calibración	0.74	-5.11	0.51
Validación	0.62	-9.71	0.28

ELABORADO POR: Autor

A nivel global el desempeño del modelo en la calibración en la estación H0714 es bueno por cuanto los valores estadísticos de las funciones objetivos: NSE, PBIAS y RSR se ubi-

can en los rangos catalogados como muy buenos y buenos de acuerdo a Moriasi et al. (2007).

Respecto a los resultados de la validación, se deduce que el modelo es satisfactorio, por cuanto los criterios de simulación califican los resultados como buenos y muy buenos, a pesar que disminuye su precisión y aumenta su sesgo, de acuerdo al mismo autor.

#### 4.1.5 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEI MODELO AGUAS ARRIBA DEL PUNTO DE CIERRE

La evaluación del performance del modelo aguas arriba se realizó en la estación H0715. Toda la información fue obtenida de la base de datos generado por el modelo de la subcuenca donde se ubica la mencionada estación, y a la cual se le efectuó el mismo análisis realizado para la estación H0714, presentado en el Capítulo 4.1.4.

##### Producción anual de agua

La producción de agua para el período de estudio en la estación H0715 se tabula en la Tabla 4.6. Mientras que el análisis de los caudales simulados que conforman el caudal total se presentan en la Tabla 4.7

**TABLA 4.6:** Estimación de la producción anual de agua durante el periodo de calibración y validación en estación H0715

		Producción de Agua (mm)
Periodo Calibración 1979-1983	Observado	2007
	Estimado	1970
	% Discrepancia	-1.8 %
Periodo Validación 1984-1986	Observado	2265
	Estimado	2071
	% Discrepancia	-8.6 %

ELABORADO POR: Autor

**TABLA 4.7:** Porcentaje de aporte de los caudales que conforman el caudal total en estación H0715

Periodo	$Q_{surf}$	%	$Q_{Lat}$	%	$Q_{gw}$	%	$Q_{total}$	$\% Q_{base}$ ( $Q_{lat} + Q_{gw}$ )
Calibración	279	14	582	30	1091	56	1970	86
Validación	299	15	610	29	1162	56	2071	85

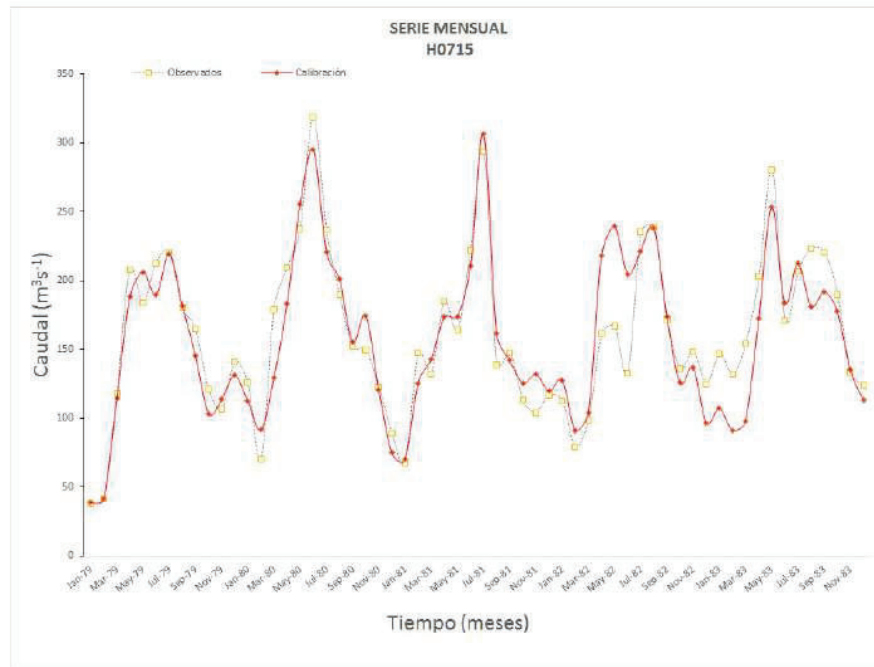
ELABORADO POR: Autor

De los resultados obtenidos, se observa que el modelo estima la producción anual de agua de manera adecuada, especialmente en el periodo de calibración donde apenas subestima la producción de agua en 1.8 %, mientras que en el periodo de validación tiende a subestimarla en menos un 8.6 %.

Igual que en la estación H0714, el caudal total estimado por el modelo está constituido en su mayor parte por  $Q_{base}$ , el que está conformado mayoritariamente por  $Q_{gw}$ .

## Evaluación gráfica

En la Figuras 4.6 y 4.7 se presentan los hidrogramas generados los periodos de calibración y validación de la estación estudiada.



**FIGURA 4.6:** Hidrograma observado vs. simulado durante etapa de calibración en estación H0715  
ELABORADO POR: Autor



**FIGURA 4.7:** Hidrograma observado vs. simulado durante etapa de validación en estación H0715  
ELABORADO POR: Autor

En la estación H0715 en el periodo de calibración, los hidrogramas son semejantes y se aproximan entre sí los valores máximos y mínimos de caudales; mientras que en la validación, los valores simulados son inferiores a los observados en la mayor parte de la serie de tiempo.

De los valores estimados, el  $Q_{base}$  ( $Q_{lat} + Q_{gw}$ ) representa el 82% del caudal total y donde el caudal subterráneo representa el 67% de este valor. Este valor es discutible por cuanto la geología de la zona no permitiría la existencia de acuíferos subterráneos.

### Criterios estadísticos de desempeño

Con el fin de hacer la evaluación estadística del modelo en la estación H0715, se aplicaron los mismos criterios y rangos de calificación realizados para la estación H0714. Obteniendo los siguientes resultados:

**TABLA 4.8:** Índices estadísticos para evaluar el desempeño de modelo en estación H0715

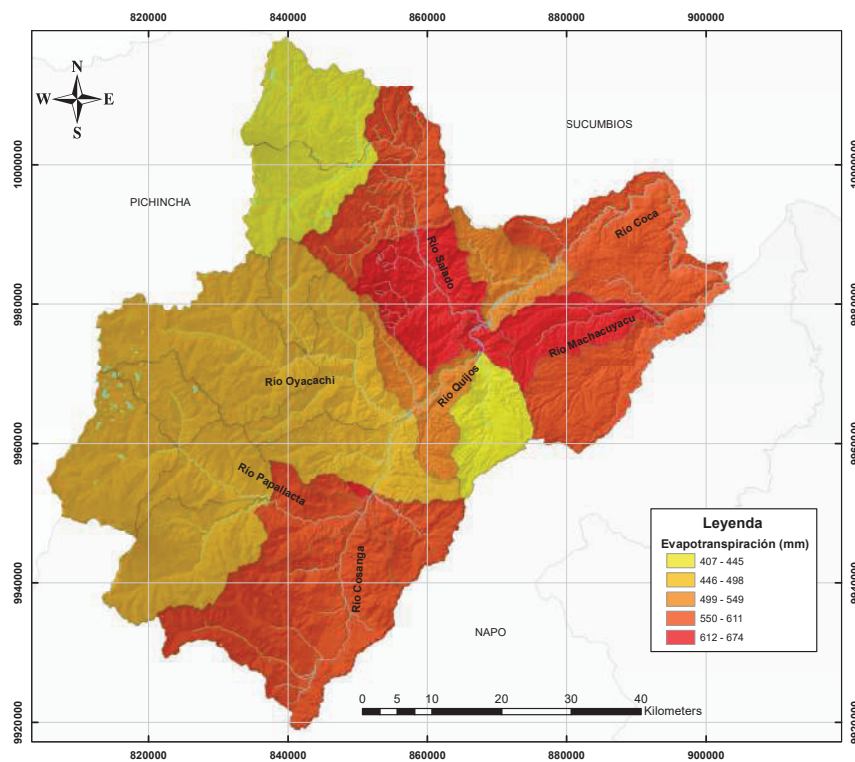
H0715 - QUIJOS AJ. BOMBÓN			
	NSE	PBIAS	RSR
Calibración	0.81	1.83	0.43
Validación	0.67	8.57	0.37

ELABORADO POR: Autor

A nivel global el desempeño del modelo en la estación H0715 en el periodo de calibración es muy bueno (NSE, PBIAS y RSR), por cuanto los valores estadísticos de las funciones objetivas se ubican dentro de los rangos catalogados así por Moriasi et al. (2007). Por otro lado, en el periodo de validación, si bien disminuye la precisión del modelo, el modelo se lo califica como bueno ya que todos sus términos cumplen con las características para así calificarlo.

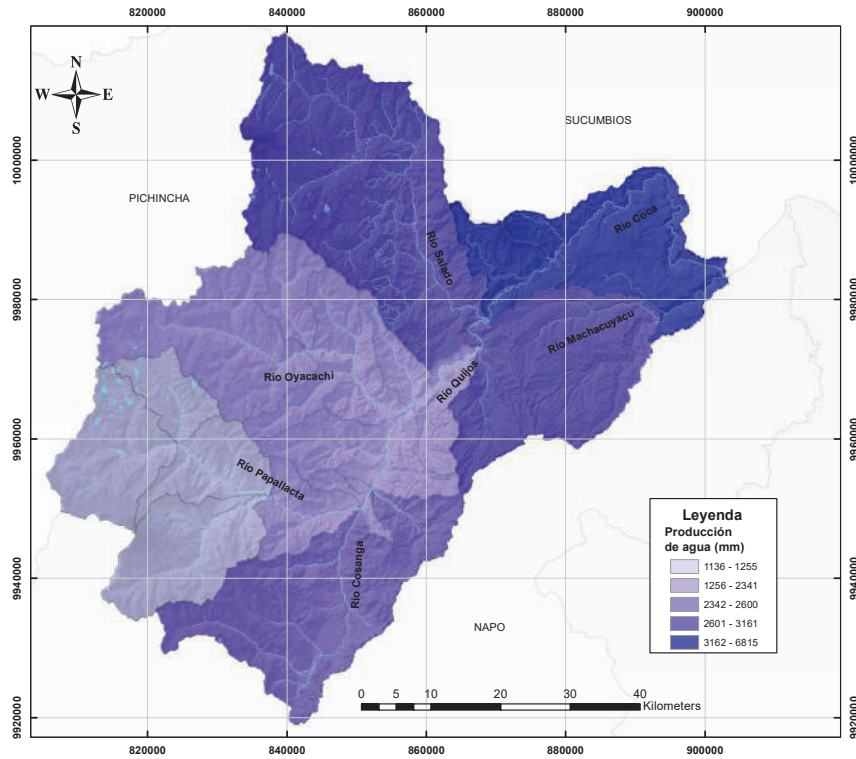
### Visualización de Resultados a nivel de subcuencas

Finalmente, con el objeto de visualizar la distribución de los componentes del ciclo hidrológico, se presentan a continuación los resultados obtenidos por el modelo a nivel de subcuenca de las variables: evapotranspiración (Figura 4.8), producción de agua (Figura 4.9), escorrentía superficial (Figura 4.10) y flujo base (Figura 4.11).

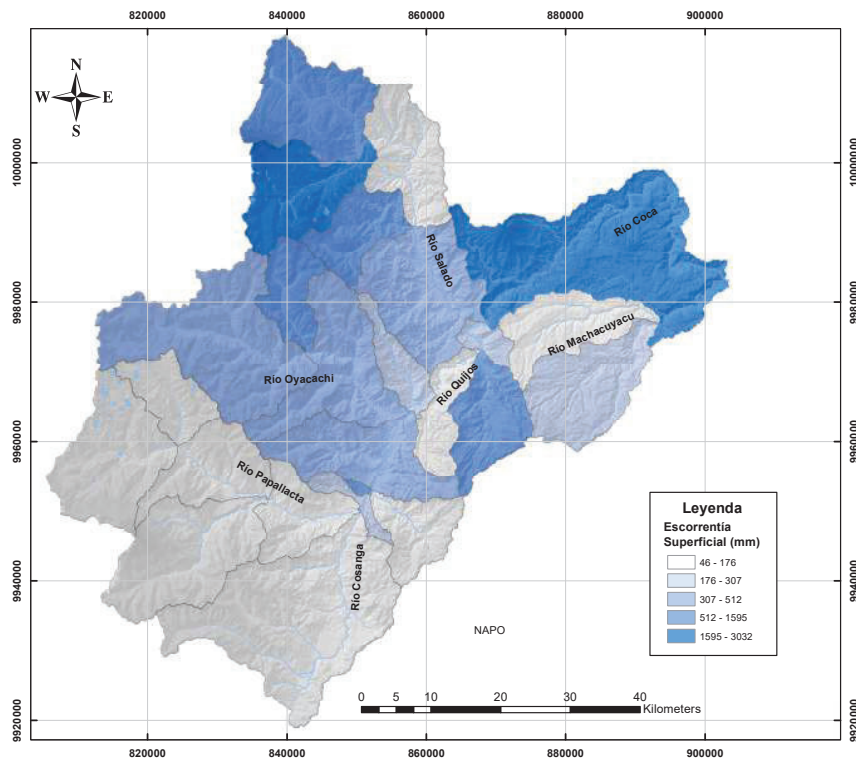


**FIGURA 4.8:** Evapotranspiración por subcuenca  
ELABORADO POR: Autor

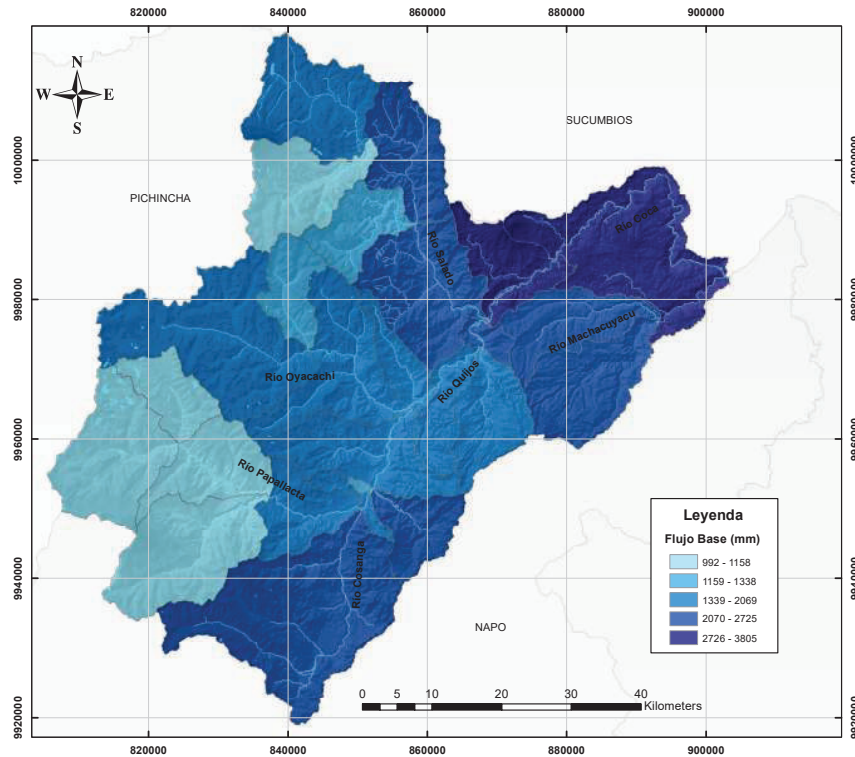




**FIGURA 4.9:** Producción de agua por subcuena  
ELABORADO POR: Autor



**FIGURA 4.10:** Escorrentía superficial por subcuena  
ELABORADO POR: Autor



**FIGURA 4.11:** Flujo base por subcuenca  
ELABORADO POR: Autor

## 4.2 PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

En la Tabla 4.9 y Tabla 4.10 se presenta una comparación de la producción de sedimento estimada por el modelo SWAT y la producción de sedimento estimada aplicando la ecuación de la curva de descarga desarrollado para el Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair Fase: B (Anexo C, Sedimentología) - las ecuación se presentan en la Tabla 3.10, para las estaciones hidrológicas H0714 y H0715.

**TABLA 4.9:** Caudales sólidos observados y estimados en estación H0714

	MUSLE Sin degradación $\left(\frac{t}{\text{año}}\right)$	Producción de Sedimentos $\left(\frac{t}{\text{km}^2 * \text{año}}\right)$	Degradación de Canal $\left(\frac{t}{\text{año}}\right)$	Producción de Sedimentos $\left(\frac{t}{\text{km}^2 * \text{año}}\right)$	MUSLE + Degradación $\left(\frac{t}{\text{año}}\right)$	Producción de Sedimentos $\left(\frac{t}{\text{km}^2 * \text{año}}\right)$
Estudios CCS					$10,74 \cdot 10^6$	2833
Estimados SWAT	$716 \cdot 10^3$	186	$2427 \cdot 10^3$	630	$3,14 \cdot 10^6$	816

**TABLA 4.10:** Caudales sólidos observados y estimados en estación H0715

	Sin Degradación de Canal $(\frac{t}{año})$	Producción de Sedimento $(\frac{t}{km^2 * año})$	Con Degradación de Canal $(\frac{t}{año})$	Producción de Sedimento $(\frac{t}{km^2 * año})$	Estimados Totales $(\frac{t}{año})$	Producción de Sedimento $(\frac{t}{km^2 * año})$
Estudios CCS					$4772 \cdot 10^3$	1949
Estimados SWAT	$515 \cdot 10^3$	204	$1192 \cdot 10^3$	472	$1707 \cdot 10^3$	676

Los resultados indican que los valores de la producción de sedimento total (MUSLE + degradación) simulados por el SWAT son aproximadamente 3 órdenes de magnitud inferiores a los valores de la producción de sedimento total estimados con las curvas de descarga de sedimento. Se observa que los valores simulados por el SWAT (sin degradación del canal) representan aproximadamente el 7 % del sedimento que sale de la cuenca estimada con las curvas de descarga. Este resultado refleja que el modelo de simulación basado en la erosión hídrica producida por el flujo superficial ha fracasado en las predicciones de la producción de sedimento. Esto no es una sorpresa en la cuenca alta del río Coca donde el flujo superficial es limitado. La cuenca está mayoritariamente cubierta por bosque nativo, páramo y pastos, por lo tanto la buena cobertura del suelo da como resultado que los suelos estén protegidos a los impactos de las gotas de lluvia de modo que los procesos de erosión hídrica son escasos. Otro factor importante de la vegetación son los suelos, principalmente los Andisoles los cuales presentan propiedades hidrofísicas muy buenas con altas tasas de infiltración y contenidos altos de materia orgánica. Todos estos procesos dan como resultado que el flujo subsuperficial es el que predomina mientras que el flujo superficial podría ser importante solamente después de períodos largos de lluvia cuando los suelos están saturados.

Los valores de la producción de sedimento predichos por el SWAT aumentan cuando se incorpora los procesos de degradación del canal llegando a un aporte promedio de un 24 %. Este valor es cercano a los estimados por transporte de fondo y de deslizamientos de 30 % (Smits, 1992). El aumento en la predicción podría ser parcialmente explicada por la eficiencia de los canales en transportar el sedimento que ha sido depositado provenientes de los movimientos de masa (e.g. derrumbes, flujos de escombros, entre otros). Esto se refleja en el modelo ya que la capacidad de transporte de sedimento depende de la velocidad del flujo que es una función de la pendiente del río. En la zona de estudio las pendientes de los ríos son altas (en promedio 3.89 %) por lo tanto en una constante evolución donde el levantamiento tectónico de la montañas provocan que los ríos se ajusten socavando los taludes de las laderas.

Los resultados obtenidos hacen concluir que el modelo SWAT no es aplicable para estimar la producción de sedimento en áreas montañosas como la del presente estudio. Esto se debe principalmente porque los procesos de erosión están controlados por la geodinámica (tectonismo, volcanismo y movimientos sísmicos) de la región que a su vez desencadenan movimientos de masa como derrumbes, avalanchas, flujos de lodo, los cuales representan las principales fuentes de sedimento en los ríos.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- Los resultados de la simulación de caudales líquidos indican que el modelo SWAT es capaz de estimar el ciclo hidrológico dentro del río Coca a un paso de tiempo mensual. La relación entre caudales líquidos estimados por el modelo y observados en la cuenca a nivel mensual es satisfactoria, considerando que los criterios estadísticos (NSE, PBIAS y RSR) están en un rango catalogado como bueno y muy bueno de acuerdo a los criterios de Moriasi et al. (2007).
- La información hidrometeorológica es escasa en la cuenca, especialmente en la cuenca del río Salado. Por esta razón, se ha considerado la utilización de estaciones virtuales para reproducir precipitación y temperatura. Se considera que este enfoque resultó en un modelo con buenos resultados.
- Las observaciones y visitas de campo realizadas en el transcurso de la investigación permitieron definir de mejor manera las características hidrofísicas de los suelos utilizando como información básica la textura y densidad aparente de los suelos.
- El modelo SUFI-2 incorporado al software SWAT-CUP fue utilizado en el análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo, en donde el uso de los coeficientes P-Valor y t-stat, permitieron identificar los parámetros más influyentes y redujo la sobre-parametrización del modelo.
- En cuanto a la metodología utilizada para análisis de sensibilidad se observó que los parámetros: precipitación y radiación solar, son extremadamente sensibles respecto a los otros escogidos inicialmente, ocasionando que la respuesta del modelo hacia el resto de parámetros sea imperceptible; por lo cual se aisló estos dos parámetros. Al hacer una nueva corrida y realizar un nuevo análisis de sensibilidad; se identificaron que los parámetros CH\_K2, MSK\_CO2, MSK\_CO1, MSK\_X, GW\_REVAP, GWQMN, ALPHA\_BF, GW\_DELAY, SOL\_AWC y CN2 también influenciaron en la respuesta de la variable de caudal líquido.
- Se observó que la fórmula de Muskingum, escogido como método de cálculo para el tránsito del agua en el canal, incide en la variabilidad de caudales líquidos, simulando caudales picos y mínimos, que se ajustaron de mejor manera al hidrograma observado.
- El modelo desarrollado representó las pérdidas evapotranspirativas estimadas en la literatura disponible. El valor simulado por el modelo fue en promedio  $530 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ , cual está dentro del rango estimado en el estudio de Sinohydro (2012) y Duque and Vázquez (2015) de entre  $410\text{-}614 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ .
- La evaluación del desempeño del modelo, efectuada en la estación H0715, ayuda a concluir que el modelo es robusto gracias a que la configuración establecida permite reproducir los caudales satisfactoriamente en dos distintas escalas, en los puntos de cierre H0714 y H0715.

- La mayor parte del caudal simulado corresponde al flujo base (flujo lateral + flujo de retorno) y representa del 80 % mismo. Para la estación H0714 muestra el 75.48 % y para la H0715 un 82 %.
- Respecto a caudal líquido, el SWAT demostró simular de manera satisfactoria los componentes del ciclo hidrológico. Este modelo podría ser utilizado en futuros estudios para evaluar el comportamiento hidrológico en escenarios comparativos de cambio de uso de suelo o escenarios de cambio climático.
- El método simplificado de Bagnold dio resultados importantes respecto a la producción de sedimentos por la erosión del canal, generando resultados tres veces superiores. Esto se relacionaría al poder erosivo de los ríos ubicados en esta zona, por ubicarse en el Levantamiento Napo Andrade Villafuerte (2016).
- Podemos concluir que la aplicación del modelo SWAT para predecir la producción de sedimento a escala de cuenca no es el adecuado. La razón principal se debe a que el modelo utiliza la ecuación modificada de la pérdida de suelos (MUSLE), que estima la producción de sedimentos a partir únicamente de la erosión hídrica producida por la escorrentía superficial (Erosión Laminar), que en nuestro estudio solo representa el 10 % de la producción de sedimento estimada con la mediciones de las cargas sólidas en el río. Otros procesos son los que controlan la erosión y producción de sedimento que se relacionan a factores naturales como el tectonismo, volcanismo y terremotos. Estos factores serían los que desencadenan los grandes movimientos de masa que son las fuentes principales de los sedimentos que llegan a los ríos.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- A pesar de que el modelo pudo ser aplicado satisfactoriamente en la cuenca del Río Coca para estimar los caudales líquidos, la disponibilidad de datos hidrometeorológicos y físicos del área son limitados; evidenciándose especialmente en la cuenca del río Salado, lo que afectó el performance del modelo. Razón por la cual se sugiere que las instituciones públicas y privadas interesadas en el uso y manejo de la cuenca aúnen esfuerzos en el establecimiento de estaciones que permitan generar información como insumo para crear conocimiento y posteriormente planes que permita beneficiarse de los distintos servicios que el sistema hidrográfico brinda.
- Los modelos en base física como el SWAT utilizan numerosos parámetros y esto puede traducirse que con diferentes juegos de parámetros se pueden obtener resultados satisfactorios, incluso introduciendo valores de los parámetros imposibles de darse en un sistema real. Es conveniente revisar la bibliografía y hacer un análisis de los componentes del ciclo hidrológico. Esto es importante si el modelo tiene fines de simular distintos escenarios en el que las condiciones meteorológicas y físicas cambian, logrando generar resultados inexactos.
- Respecto al modelo SWAT, se recomienda que el rango de aplicación del gradiente de precipitación PLAPS, dentro del código, sea modificado por cuanto no acepta gradientes de precipitación mayores a  $500\text{mm} \cdot \text{km}^{-1}$ . En esta cuenca no se lo pudo aplicar por cuanto existen gradientes superiores a dicho valor y podría ser el caso de otras cuencas amazónicas.

- Se recomienda que se haga un análisis más profundo sobre la representación que tiene el modelo respecto al flujo de retorno  $Q_{gw}$  y al flujo lateral  $Q_{lat}$ , ya que en esta cuenca se presentan pendientes fuertes y, preliminarmente, no se evidencia la existencia de acuíferos puesto que predomina la roca metamórfica (Andrade Villafuerte, 2016). Estos componentes del ciclo podrían adaptarse a sistemas tropicales de montaña.
- Sobre la precipitación horizontal, es necesario que se evalúe su aporte en este tipo de cuencas por cuanto la orografía y la cobertura vegetal incidirían en la generación e intercepción de lluvia.
- Se recomiendan se revisen los valores correspondientes a evapotranspiración con base a productos de teledetección como el MODIS (Scheel et al., 2011) puesto que se han observado una diferencia en la distribución espacial de esta variable.
- Se recomienda se analicen las curvas de descargas generadas por INECEL 1992 - CITE, ya que se han realizado esfuerzos a partir de 2008 en obtener mayor cantidad de información por parte del PHCCS.
- De igual manera se recomienda se realicen estudios o se desarrollen nuevos métodos para estimar la erosión en los cauces para que se evalúe de manera más precisa la aplicabilidad del modelo en estimar el aporte de sedimentos por esta fuente.

## REFERENCIAS

- Abbaspour, K. (2007). User manual for swat-cup, swat calibration and uncertainty analysis programs. *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland*.
- Abbaspour, K., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., and Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale swat model. *Journal of Hydrology*, 524:733–752.
- Andrade Villafuerte, A. L. (2016). *Análisis de la influencia de la geodinámica y los impactos antrópicos en la geomorfología fluvial del río coca. Caso de estudio: impactos fluviales del proyecto Coca Codo SINCLAIR-PHCCS*.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., and Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of hydrology*, 142(1):47–69.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., Van Griensven, A., Van Liew, M. W., et al. (2012). Swat: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4):1491–1508.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part i: Model development1.
- Bagnold, R. (1977). Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, 13(2):303–312.
- Bagnold, R. (1980). An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 372, pages 453–473. The Royal Society.
- Beven, K. J. (2011). *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons.
- Bogavelli, V., Coles, D., and Peter, K. (2016). Analysis techniques: Annual analysis. recuperado de: <http://streamflow.engr.oregonstate.edu/analysis/annual/index.htm>.
- Bouanani, R., Baba-Hamed, K., and Bouanani, A. (2013). Utilisation de un modèle global pour la modélisation pluie-débit: cas du bassin d'oued sikkak (nw algérien). *Nature & Technology*, (9):61.
- Brandt, S. A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40(4):375–401.
- Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, ecosystems & environment*, 104(1):185–228.
- Carter, R. W. and Godfrey, R. G. (1960). Storage and flood routing.
- CEPAL (2005). Diagnóstico de las estadísticas del agua en ecuador.

- Chu, X. and Steinman, A. (2009). Event and continuous hydrologic modeling with hec-hms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1):119–124.
- Clarke, R. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of hydrology*, 19(1):1–20.
- Daniel, E. B., Camp, J. V., LeBoeuf, E. J., Penrod, J. R., Dobbins, J. P., and Abkowitz, M. D. (2011). Watershed modeling and its applications: A state-of-the-art review. *The Open Hydrology Journal*, 5(1).
- Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology*. Taylor & Francis.
- Duque, L. and Vázquez, R. (2015). Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo. *Water Availability Modelling for a Tropical Mountain Catchment as a Function of its Soil Cover. Aqua-LAC*, 7(1):63–76.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., and Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4):1211–1250.
- Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., and Rudra, R. (2014). Evaluating three hydrological distributed watershed models: Mike-she, apex, swat. *Hydrology*, 1(1):20–39.
- Gonzalez, K. (2016). What is a null hypothesis? - definition & examples. recuperado de: <http://study.com/academy/lesson/what-is-a-null-hypothesis-definition-examples.html>.
- Guyot, J. L., Bazan, H., Fraizy, P., Ordonez, J. J., Armijos, E., and Laraque, A. (2007). Suspended sediment yields in the amazon basin of peru: a first estimation. *IAHS PUBLICATION*, 314:3.
- Hall, M. (2000). Los terremotos del ecuador del 5 de marzo de 1987. *Estudios de geografía*, pages 5–6.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2):96–99.
- Hingray, B., Picouet, C., and Musy, A. (2009). *Hydrologie: Une science pour l'ingénieur*, volume 2. PPUR presses polytechniques.
- Horna Kuonqui, L. N. (2016). *Evaluación hidrometeorológica y de sedimentos en la cuenca del río coca en la zona de influencia del proyecto coca codo sinclair*.
- INECEL (1992). Informe final del estudio de selección de alternativas del proyecto hidroeléctrico coca codo sinclair Anexo b hidrología - parte i. Technical report, INECEL.
- Kundu, D. (2012). *Simulating the Interaction of Irrigation on Hydroelectricity in the Rio-Jubones Catchment in Ecuador Using SWAT*.
- López Fabara, C. E. (2016). *Evaluación hidrológica de la cuenca del río coca en función del cambio de uso de suelo por medio del modelo swat*.



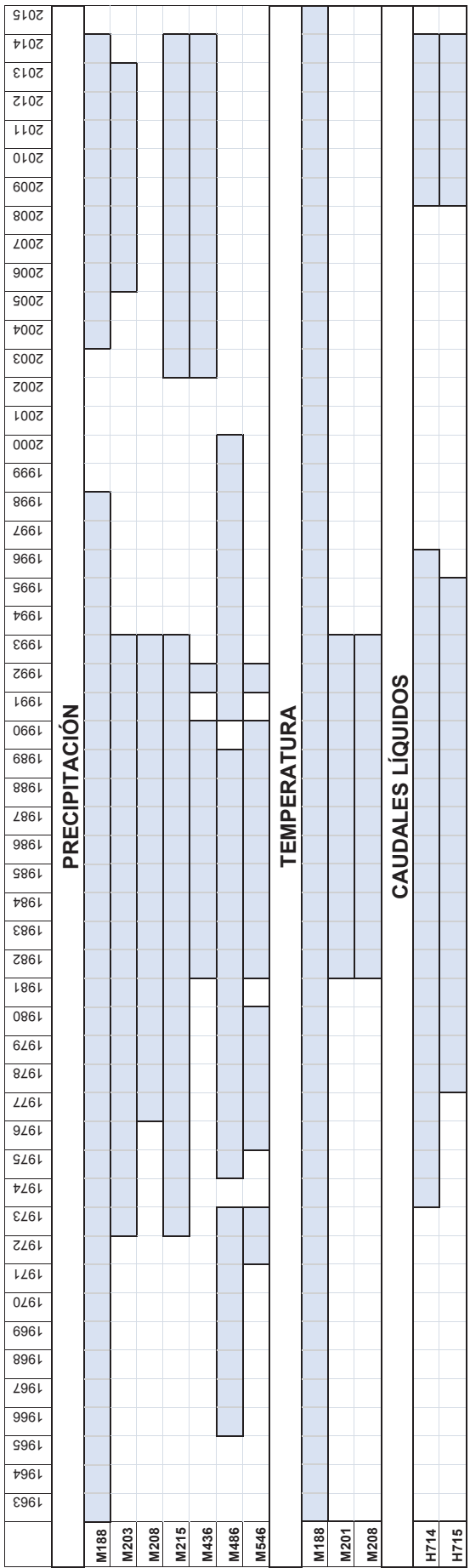
- Ma, L., Ascough II, J., Ahuja, L., Shaffer, M., Hanson, J., and Rojas, K. (2000). Root zone water quality model sensitivity analysis using monte carlo simulation. *Transactions of the ASAE*, 43(4):883.
- MEER (2014). Informe rendición de cuentas.
- MEER (2016). Coca Codo Sinclair Proyectos de Generación.
- Monteith, J. (1964). Evaporation and environment. In *Symposia of the society for experimental biology*, volume 19, pages 205–234.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3):885–900.
- Musy, A., Hingray, B., and Picouet, C. (2014). *Hydrology: a science for engineers*. CRC Press.
- Neitsch, S. L., Williams, J., Arnold, J., and Kiniry, J. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Technical report, Texas Water Resources Institute.
- Niu, G.-Y., Paniconi, C., Troch, P. A., Scott, R. L., Durcik, M., Zeng, X., Huxman, T., and Goodrich, D. C. (2014). An integrated modelling framework of catchment-scale ecohydrological processes: 1. model description and tests over an energy-limited watershed. *Ecohydrology*, 7(2):427–439.
- Oregon, S. U. (2016). Streamflow evaluations for watershed restoration planning and design. recuperado de: <http://streamflow.engr.oregonstate.edu/index.htm>.
- Pedraza, D. E. and Ockerman, D. J. (2012). *Watershed Modeling Applications in South Texas*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Priestley, C. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. In *Mon. Weather Rev.* Citeseer.
- Reddy, A. S. and Reddy, M. J. (2015). Evaluating the influence of spatial resolutions of dem on watershed runoff and sediment yield using swat. *Journal of Earth System Science*, 124(7):1517–1529.
- Roche, P.-A., Miquel, J., and Gaume, E. (2012). *Hydrologie quantitative: Processus, modèles et aide à la décision*. Springer Science & Business Media.
- Rosbjerg, D. and Madsen, H. (2005). Concepts of hydrologic modeling. *Encyclopedia of hydrological sciences*.
- Sargent, G. (1980). Computation of vapor-pressure, dew-point and relative-humidity from dry-bulb and wet-bulb temperatures. *Meteorological Magazine*, 109(1297):238–246.
- Saxton, K. and Rawls, W. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5):1569–1578.

- Scheel, M., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E., and Huffman, G. (2011). Evaluation of trmm multi-satellite precipitation analysis (tmpa) performance in the central andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8):2649–2663.
- Singh, V. P. and Frevert, D. K. (2005). *Watershed models*. CRC Press.
- Sinohydro (2012). Design report, volume ii (hydrologic and sediment analysis). Technical report, Sinohydro.
- Smits, J. (1992). Informe final del estudio de selección de alternativas del proyecto hidroeléctrico coca codo sinclair Anexo c sedimentología. Technical report, INECEL.
- Srinivasan, R., Ramanarayanan, T. S., Arnold, J. G., and Bednarz, S. T. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part ii: Model application1.
- Telégrafo (2012). Coca Codo aporta al ecosistema.
- Uribe, N. (2010). *Soil and Water Assesment Tool: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT 2005*. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) y CGIAR Challenge Program on wáter and food. Consultado 3 abr 2013.
- Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., and Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of hydrology*, 324(1):10–23.
- Van Griensven, A., Xuan, Y., Haguma, D., and Niyonzima, W. (2008). *Understanding riverine wetland-catchment processes using remote sensing data and modelling*. PhD thesis, International Environmental Modelling and Software Society.
- Venneker, R. (2002). *Hydrological System and Processes*. UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- Wildner, L. d. P. and Veiga, M. d. (1992). Relación entre erosión y pérdida de fertilidad del suelo. *Taller sobre la Utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la Evaluación de la Erosión Actual de Suelos y la Predicción del Riesgo de Erosión Potencial, Santiago (Chile) 27 Jul-1 Ago 1992*.
- Williams, J. (1980). Spnm, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basins1.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D., et al. (1978). Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. *Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning*.
- WWDR (2016). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016. *UNESCO*.
- Xu, C.-y. (2002). *Hydrologic Model*. Uoosala University, 2002 edition.
- Yang, C. T. (2006). Erosion and sedimentation manual. *US Dep. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO*.

# **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

**Información de precipitación, temperatura y de caudales líquidos disponibles para la simulación hidrológica a nivel diario**



## **ANEXO 2**

### **Componentes del Generador de clima**

## WATER GENERATOR (.WGN)

NOMBRE DE LA VARIABLE	DEFINICIÓN	ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN
TITLE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN		
WLATITUDE	LATITUD EN GRADOS DE LA ESTACIÓN		
WLONGITUDE	LONGITUD EN GRADOS DE LA ESTACIÓN		
WELEV	ELEVACIÓN EN METROS DE LA ESTACIÓN		
RAIN_YRS	NÚMERO DE AÑOS DE LLUVIAS MÁXIMAS DE 30 MIN.		
TMPMX(mon)	TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO DIARIA DEL MES °C	$\mu mx_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mx,mon}}{N}$	umx: TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO DIARIA DEL MES Tmx: TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA DEL MES N: NÚMERO TOTAL DE DÍAS CON TEMPERATURA MÁXIMA AL MES
TMPMN(mon)	TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO DIARIA DEL MES °C	$\mu mn_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mn,mon}}{N}$	umn: TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO DIARIA DEL MES Tmn: TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA DEL MES N: NÚMERO TOTAL DE DÍAS CON TEMPERATURA MÍNIMA AL MES
TMPSTDMX(mon)	DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA AL MES °C	$\sigma mx_{mon} = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mx,mon} - \mu mx_{mon})^2}{N - 1}}$	omx: DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA AL MES Tmx: TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA DEL MES umx: TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO DIARIA DEL MES N: NÚMERO TOTAL DE DÍAS CON TEMPERATURA MÁXIMA AL MES
TMPSTDMN(mon)	DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA AL MES °C	$\sigma mn_{mon} = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mn,mon} - \mu mn_{mon})^2}{N - 1}}$	omn: DESVIACIÓN ESTANDAR DE LA TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA AL MES Tmn: TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA DEL MES umn: TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO DIARIA DEL MES N: NÚMERO TOTAL DE DÍAS CON TEMPERATURA MÍNIMA AL MES
PCPMM(mon)	PRECIPITACIÓN MENSUAL PROMEDIO (mm)	$\bar{R}_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N R_{day,mon}}{yrs}$	Rmon= PRECIPITACIÓN MENSUAL PROMEDIO Rday,mon= PRECIPITACIÓN DIARIA MENSUAL yrs= NÚMERO DE AÑOS DE PRECIPITACIONES DIARIAS N= NÚMERO TOTAL DE DATOS EN UN MES
PCPSTD(mon)	DESVIACIÓN ESTANDAR DE PRECIPITACIONES DIARIAS AL MES (mm/day)	$\sigma_{mon} = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - \bar{R}_{mon})^2}{N - 1}}$	omon= DESVIACIÓN ESTANDAR DE PRECIPITACIONES DIARIAS AL MES Rday,mon= PRECIPITACIÓN DIARIA MENSUAL Rmon= PRECIPITACIÓN MENSUAL PROMEDIO N= NÚMERO TOTAL DE DATOS EN UN MES
PCPSKW(mon)	COEFICIENTE DE ASIMETRÍA DE LLUVIAS DIARIAS DEL MES	$g_{mon} = \frac{N \sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - \bar{R}_{mon})^3}{(N - 1)(N - 2)(\sigma_{mon})^3}$	omon= DESVIACIÓN ESTANDAR DE PRECIPITACIONES DIARIAS AL MES Rday,mon= PRECIPITACIÓN DIARIA MENSUAL Rmon= PRECIPITACIÓN MENSUAL PROMEDIO N= NÚMERO TOTAL DE DATOS EN UN MES Gmon= COEFICIENTE DE ASIMETRÍA.
PR_W(1,mon)	PROBABILIDAD QUE EXISTA UN DÍA HÚMEDO DESPUÉS DE UN DÍA SECO	$P_i(W/D) = \frac{days_{W/D,i}}{days_{dry,i}}$	Pi(W/D)=PROBABILIDAD QUE EXISTA UN DÍA HÚMEDO DESPUÉS DE UN SECO days W/D= NÚMERO TOTAL DE DÍAS HÚMEDOS DESPUÉS DE UN SECO AL MES days dry= NÚMERO TOTAL DE DÍAS SECOS AL MES
PR_W(2,mon)	PROBABILIDAD QUE EXISTA UN DÍA HÚMEDO DESPUÉS DE UN DÍA HÚMEDO	$P_i(W/W) = \frac{days_{W/W,i}}{days_{wet,i}}$	Pi(W/W)=PROBABILIDAD QUE EXISTA UN DÍA HÚMEDO DESPUÉS DE UN HÚMEDO days W/D= NÚMERO TOTAL DE DÍAS HÚMEDOS DESPUÉS DE UN HÚMEDO AL MES days dry0 NÚMERO TOTAL DE DÍAS HÚMEDOS AL MES
PCPD(mon)	PROMEDIO DE DÍAS CON PRECIPITACIÓN DEL MES	$\bar{d}_{wet,i} = \frac{days_{wet,i}}{yrs}$	d wet,i= PROMEDIO DE DÍAS CON PRECIPITACIÓN AL MES days wet,i= NÚMERO TOTAL DE DÍAS HÚMEDOS AL MES yrs= NÚMERO TOTAL DE AÑOS
RAINHHMX(mon)	LLUVIAS MÁXIMAS DE 30 min EN EL MES (mm)		
SOLARAV(mon)	RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO DIARIA DEL MES (MJ/m <sup>2</sup> /day)	$urad_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N H_{day,mon}}{N}$	urad= RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO DIARIA AL MES Hday= RADIACIÓN SOLAR TOTAL POR DÍA EN UN MES N= NÚMERO TOTAL DE DÍAS CON RADIACIÓN SOLAR EN EL MES
DEWPT(mon)	PUNTO DE ROCÍO PROMEDIO DIARIO EN EL MES (°C o fracción)	$udew_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{dew,mon}}{N}$	udew= PUNTO DE ROCÍO PROMEDIO DIARIO AL MES Hday= PUNTO DE ROCÍO TOTAL POR DÍA EN UN MES N= NÚMERO TOTAL DE DÍAS CON PUNTO DE ROCÍO EN EL MES
WNDV(mon)	VELOCIDAD DEL VIENTO PROMEDIO EN EL MES (m/s)	$uwnd_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N u_{wnd,mon}}{N}$	uwnd= VELOCIDAD DEL VIENTO PROMEDIO DIARIO AL MES Twnd= VELOCIDAD DEL VIENTO TOTAL POR DÍA EN UN MES N= NÚMERO TOTAL DE DÍAS CON VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL MES

### **ANEXO 3**

**Puntos de visita y Observaciones realizadas en Cuenca del Río  
Coca, 29 y 30 de Octubre de 2015**



<b>VISITA CUENCA RÍO COCA</b>					
29 al 30 Octubre 2015					
Integrantes: Ing. Sebastián Páez Msc., PhD. Armando Molina					
Punto	Fecha	WGS84 / 17S		H (msnm)	Observaciones
		E	N		
1	10/29/2015	812483	9964727	3853	Andisol profundidad 1.50 - 2.00 m
2	10/29/2015	812082	9962593	3701	Andisol profundidad 3.00 m
3	10/29/2015	812169	9961779	3654	Andisol profundidad 1.50 m
4	10/29/2015	820811	9958654	2777	Derrumbes lado derecho margen río
5	10/29/2015	823084	9959131	2824	Derrumbes lado derecho margen río
6	10/29/2015	831553	9954112	2395	Andisol profundidad 1.50 m, debajo material meteorizado, zona cóncava. Corte derrumbe
7	10/29/2015	833304	9953103	2421	Andisol profundidad 1.50 - 2.00 m
8	10/29/2015	837038	9952795	2228	Andisol profundidad 1.50 - 2.00 m
9	10/29/2015	837646	9951797	2189	Derrumbes lado derecho margen río
10	10/29/2015	848412	9950719	1893	Tierras agrícolas
11	10/29/2015	849286	9951448	1859	Pastos en el valle
12	10/29/2015	854099	9957848	1632	Andisol profundidad 0.50 - 1.00 m Perfil suelo en el valle
13	10/29/2015	860837	9969954	1906	Andisol profundidad 1.50 - 2.00 m Corte en la carretera
14	10/29/2015	861047	9967245	1454	H0715 Quijos AJ Bombón
15	10/29/2015	861484	9970831	1874	Bosque
16	10/29/2015	868817	9977825	1353	Captación
17	10/29/2015	878439	9986365	1211	H0714 Coca en San Rafael
18	10/29/2015	880643	9988988	1232	Cascada San Rafael
19	10/30/2015	879360	9988772	1461	Corte terreno cuenca Salado
20	10/30/2015	863502	9978036	1528	Andisol profundidad 1.20 - 1.50 m, Cuenca Salado
21	10/30/2015	863472	9979419	1376	Salado AJ Coca (H0728)
22	10/30/2015	863160	9979270	1446	Entrada H0728
23	10/30/2015	817805	9957220	3221	Limite Páramo-Bosque *Corrección: cota mayor 3200 m, no es páramo sino pasto, donde antes era bosque.

## **ANEXO 4**

**Tablas elaboradas para Generador de Clima**

	M0188											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TMPMX	14.90	14.80	13.90	14.30	14.50	13.40	13.30	12.30	13.90	14.60	14.50	14.30
TMPMN	5.40	5.50	5.70	5.90	5.90	5.40	4.90	4.90	5.30	5.70	5.80	5.70
TMPSTDMX	1.09	1.18	1.11	0.58	0.82	1.14	1.23	1.27	1.26	1.65	0.77	0.75
TMPSTDMN	1.05	1.09	1.21	1.23	1.15	1.12	1.00	0.81	0.91	1.24	1.19	1.21
PCPMM	88.6	92.7	115.8	139.7	151.8	196.2	209.6	144.1	110.40	90.60	88.20	75.10
PCPSTD	4.89	6.17	10.05	8.22	8.95	9.65	10.89	6.63	6.10	5.38	5.48	4.89
PCPSKW	4.18	4.59	2.71	2.46	3.09	3.59	3.34	2.94	3.05	4.19	4.03	5.22
PR_W1	0.24	0.32	0.33	0.38	0.29	0.31	0.32	0.36	0.33	0.31	0.27	0.26
PR_W2	0.67	0.69	0.73	0.78	0.82	0.82	0.82	0.76	0.74	0.65	0.66	0.65
PCPD	22.00	22.00	23.00	23.00	24.00	24.00	25.00	24.00	23.00	23.00	22.00	22.00
RAINHHMX	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66
SOLARAV	15.02	15.34	15.02	14.08	14.55	14.55	14.55	15.96	15.96	15.96	15.96	15.96
DEWPT	8.10	9.30	9.10	9.70	9.40	8.50	8.10	7.40	7.70	8.00	8.00	8.20
WNDAV	4.90	4.40	4.30	4.10	3.90	4.20	4.70	4.60	4.50	4.20	4.30	4.60

	M0201											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TMPMX	24.20	23.86	23.82	24.35	24.27	23.00	22.18	22.33	23.35	24.56	25.09	24.76
TMPMN	13.58	13.84	14.05	14.32	13.80	13.32	12.64	12.71	13.04	13.30	13.61	13.71
TMPSTDMX	2.35	2.69	2.79	2.59	2.24	2.21	2.53	2.53	2.28	2.37	2.42	2.57
TMPSTDMN	1.85	1.63	1.74	1.46	2.04	1.92	1.74	1.66	1.74	1.94	1.90	1.96
PCPMM	141.7	160.6	198.76	236	242.2	257.15	230.51	194	202.16	177.2	140.3	122.96
PCPSTD	12.97	9.42	9.40	10.96	10.40	10.79	10.25	7.80	9.41	9.10	7.82	7.08
PCPSKW	2.27	2.17	1.80	1.83	2.37	1.99	2.75	2.19	2.37	2.61	2.95	3.25
PR_W1	0.08	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.03	0.07	0.07	0.08
PR_W2	0.74	0.84	0.83	0.89	0.89	0.91	0.89	0.91	0.92	0.80	0.77	0.74
PCPD	29.00	28.00	27.00	29.00	29.00	27.00	28.00	29.00	28.00	27.00	28.00	29.00
RAINHHMX	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94
SOLARAV	15.49	15.34	15.42	14.55	14.40	14.40	15.02	14.62	15.65	15.96	15.65	15.65
DEWPT	15.80	15.61	14.40	16.27	15.60	15.66	15.01	14.95	15.36	14.70	14.84	14.92
WNDAV	0.39	0.52	0.43	0.42	0.43	0.42	0.46	0.47	0.43	0.39	0.37	0.41

	M0203											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TMPMX	23.20	23.00	22.90	23.10	22.80	22.10	21.10	22.00	23.60	23.20	23.10	23.20
TMPMN	15.60	15.20	15.20	15.50	15.40	15.40	14.70	14.70	15.00	15.00	15.90	15.40
TMPSTDMX	0.93	0.80	0.74	1.04	1.05	0.83	0.61	0.71	0.58	0.57	0.18	0.58
TMPSTDMN	0.47	0.71	0.52	0.58	0.55	0.43	0.38	0.34	0.70	0.67	0.23	0.73
PCPMM	510.3	467.1	628.2	551.4	568.4	565.4	501.9	432.2	405.4	443.5	502.4	574.5
PCPSTD	27.56	26.75	29.50	25.99	25.65	26.34	23.86	22.29	22.62	22.73	24.72	27.97
PCPSKW	2.94	2.52	1.80	2.09	2.40	3.12	2.89	3.15	2.70	2.58	2.40	2.71
PR_W1	0.12	0.13	0.13	0.12	0.15	0.11	0.13	0.16	0.15	0.16	0.14	0.14
PR_W2	0.79	0.78	0.83	0.86	0.85	0.88	0.85	0.80	0.80	0.79	0.82	0.82
PCPD	29.00	28.00	27.00	29.00	29.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	29.00	28.00
RAINHHMX	86.97	86.97	86.97	86.97	86.97	86.97	86.97	86.97	86.97	86.97	86.97	86.97
SOLARAV	14.08	14.40	15.02	13.61	13.14	13.14	12.68	14.08	15.18	15.18	15.02	15.02
DEWPT	16.80	16.40	17.10	16.90	17.20	16.90	16.00	15.00	16.00	15.70	16.90	16.90
WNDVAV	1.90	2.30	2.80	2.00	2.40	2.10	2.20	2.90	2.70	2.60	2.40	2.50

	M0215											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TMPMX	18.15	20.90	21.33	21.90	21.80	20.54	19.78	19.98	21.20	22.21	22.40	21.97
TMPMN	9.89	12.33	11.90	12.68	12.64	12.17	11.44	11.35	11.47	11.77	12.00	12.27
TMPSTDMX	8.81	2.61	3.23	2.28	2.73	2.25	2.91	3.26	2.15	2.91	2.62	2.88
TMPSTDMN	4.72	1.30	1.88	1.37	1.61	1.38	1.52	1.73	1.46	1.85	1.65	1.83
PCPMM	117.80	144.3	180.7	261	237.1	247.4	263.1	209.7	224.1	165.4	160.9	126.5
PCPSTD	6.16	8.92	8.13	11.40	9.38	10.29	12.36	11.87	13.27	8.50	8.64	7.18
PCPSKW	2.61	2.54	2.54	2.56	2.54	3.98	3.97	4.00	3.98	3.99	4.14	3.95
PR_W1	0.29	0.22	0.26	0.27	0.28	0.31	0.34	0.29	0.28	0.20	0.21	0.25
PR_W2	0.75	0.84	0.86	0.90	0.89	0.90	0.90	0.90	0.89	0.85	0.81	0.83
PCPD	20.12	24.76	25.69	27.48	26.10	28.29	27.51	27.75	27.02	24.48	23.55	24.02
RAINHHMX	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94
SOLARAV	15.49	15.34	15.02	14.30	14.14	14.08	14.08	14.71	15.65	15.65	15.65	15.96
DEWPT	14.58	14.46	14.82	15.02	14.99	14.29	13.62	13.60	14.24	14.80	14.81	14.77
WNDVAV	3.40	3.40	3.60	3.60	3.10	3.10	3.30	3.60	3.30	3.60	3.30	3.90

	M0208											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TMPMX	19.85	24.63	25.13	25.08	24.70	23.79	22.59	23.66	24.95	25.80	26.42	25.18
TMPMN	12.73	15.89	15.65	16.03	15.67	15.34	13.94	14.84	14.95	15.29	15.34	15.35
TMPSTDMX	10.67	2.59	3.69	2.51	4.17	2.46	4.36	3.48	2.52	4.00	2.63	3.62
TMPSTDMN	6.42	1.08	1.86	1.25	1.45	1.12	2.06	1.18	1.11	1.48	1.15	1.87
PCPMM	234	289.2	183.2	312.1	313.0	351.4	317.6	265.6	256.4	195.2	211.9	210.6
PCPSTD	10.73	14.00	10.85	12.16	13.10	11.52	10.33	10.22	12.19	9.23	10.49	10.63
PCPSKW	2.08	2.07	2.07	2.06	2.02	2.00	2.03	2.03	2.04	2.05	2.06	2.06
PR_W1	0.22	0.19	0.17	0.13	0.20	0.21	0.30	0.25	0.34	0.30	0.36	0.30
PR_W2	0.80	0.83	0.76	0.88	0.88	0.88	0.88	0.91	0.89	0.80	0.75	0.77
PCPD	20.05	25.74	21.76	27.95	26.04	27.20	26.88	27.65	27.45	24.02	22.74	22.77
RAINHHMX	50.56	50.56	50.56	50.56	50.56	50.56	50.56	50.56	50.56	50.56	50.56	50.56
SOLARAV	15.02	15.02	15.05	14.08	14.15	14.08	13.77	14.55	15.65	15.96	15.65	15.65
DEWPT	17.37	17.57	17.58	17.53	17.84	17.78	16.85	17.03	16.90	17.48	17.39	17.31
WNDVAV	1.40	1.40	1.40	1.30	1.30	1.40	1.30	1.40	1.40	1.50	1.50	1.50

	M0701											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TMPMX	25.13	24.50	24.71	25.23	25.13	23.88	23.05	23.47	24.50	25.33	25.85	25.44
TMPMN	15.95	16.07	16.18	16.65	16.07	15.48	14.78	14.78	15.01	15.48	15.83	15.95
TMPSTDMX	2.35	2.69	2.79	2.59	2.24	2.21	2.53	2.53	2.28	2.37	2.42	2.57
TMPSTDMN	1.85	1.63	1.74	1.46	2.04	1.92	1.74	1.66	1.74	1.94	1.90	1.96
PCPMM	214.3	256.1	267.7	265.3	280.7	257.9	255.1	231.5	242.3	219.8	219	187.4
PCPSTD	12.97	9.42	9.40	10.96	10.4	10.79	10.25	7.8	9.41	9.1	7.82	7.08
PCPSKW	2.08	2.07	2.07	2.06	2.02	2.0	2.03	2.03	2.04	2.05	2.06	2.06
PR_W1	0.22	0.19	0.17	0.13	0.20	0.21	0.30	0.25	0.34	0.30	0.36	0.30
PR_W2	0.80	0.85	0.85	0.96	0.96	0.85	0.85	0.80	0.80	0.80	0.70	0.80
PCPD	20.05	25.74	21.76	27.95	26.04	27.20	26.88	27.65	27.45	24.02	22.74	22.77
RAINHHMX	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63
SOLARAV	15.05	15.49	15.18	14.24	13.61	13.77	14.08	15.02	15.65	15.96	15.65	15.65
DEWPT	16.62	16.65	16.61	16.91	16.73	16.28	15.35	15.50	16.04	16.39	16.63	16.58
WNDVAV	0.39	0.52	0.43	0.42	0.43	0.42	0.46	0.47	0.43	0.39	0.37	0.41

	M0714											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TMPMX	15.32	14.94	15.06	15.38	15.32	14.56	14.05	14.30	14.94	15.44	15.76	15.51
TMPMN	6.51	6.56	6.61	6.80	6.56	6.32	6.03	6.03	6.13	6.32	6.46	6.51
TMPSTDMX	1.09	1.18	1.11	0.58	1.05	1.14	1.23	1.27	1.26	1.65	0.77	0.58
TMPSTDMN	1.05	1.09	1.21	1.23	1.15	1.12	1.00	0.81	0.91	1.24	1.19	1.21
PCPMM	219.1	150.0	158.3	273.2	246.9	265.5	322.0	275.1	259.8	276.5	250.7	151.1
PCPSTD	4.89	6.17	10.05	8.22	8.95	9.65	10.89	6.63	6.10	5.38	5.48	4.89
PCPSKW	2.27	2.17	1.80	1.83	2.37	1.99	2.75	2.19	2.37	2.61	2.95	3.25
PR_W1	0.22	0.19	0.17	0.13	0.20	0.21	0.30	0.25	0.34	0.30	0.36	0.30
PR_W2	0.80	0.85	0.85	0.96	0.96	0.85	0.85	0.80	0.80	0.80	0.70	0.80
PCPD	20.05	25.74	21.76	27.95	26.04	27.20	26.88	27.65	27.45	24.01	22.74	22.77
RAINHHMX	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63	50.63
SOLARAV	15.05	15.49	15.18	14.24	13.61	13.77	14.08	15.02	15.65	15.96	15.65	15.65
DEWPT	8.90	8.83	8.95	9.02	9.04	8.39	7.91	7.94	8.09	8.82	8.98	8.91
WNDVAV	4.90	4.40	4.30	4.10	3.90	4.20	4.70	4.60	4.50	4.20	4.30	4.60

	M0201a											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TMPMX	24.20	23.86	23.82	24.35	24.27	23.00	22.18	22.33	23.35	24.56	25.09	24.76
TMPMN	13.58	13.84	14.05	14.32	13.80	13.32	12.64	12.71	13.04	13.30	13.61	13.71
TMPSTDMX	2.35	2.69	2.79	2.59	2.24	2.21	2.53	2.53	2.28	2.37	2.42	2.57
TMPSTDMN	1.85	1.63	1.74	1.46	2.04	1.92	1.74	1.66	1.74	1.94	1.90	1.96
PCPMM	141.7	160.6	198.7	236	242.2	257.2	230.5	194	202.2	177.2	140.3	122.9
PCPSTD	12.97	9.42	9.40	10.96	10.40	10.79	10.25	7.80	9.41	9.10	7.82	7.08
PCPSKW	2.27	2.17	1.80	1.83	2.37	1.99	2.75	2.19	2.37	2.61	2.95	3.25
PR_W1	0.08	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.03	0.07	0.07	0.08
PR_W2	0.74	0.84	0.83	0.89	0.89	0.91	0.89	0.91	0.92	0.80	0.77	0.74
PCPD	29.00	28.00	27.00	29.00	29.00	27.00	28.00	29.00	28.00	27.00	28.00	29.00
RAINHHMX	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94	55.94
SOLARAV	15.49	15.34	15.42	14.55	14.40	14.40	15.02	14.62	15.65	15.96	15.65	15.65
DEWPT	15.80	15.61	14.40	16.27	15.60	15.66	15.01	14.95	15.36	14.70	14.84	14.92
WNDVAV	0.39	0.52	0.43	0.42	0.43	0.42	0.46	0.47	0.43	0.39	0.37	0.41

## **ANEXO 5**

### **Base de datos de suelo en SWAT**

MUID	SEQN	SNAM	NLAYER	HYDGR	SOL_ZMX	AMION_EXC	SOL_CR	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	CLAY	SILT1	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
			S	P		L	K	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
EC001	1	ACRISOL	2	D	500	0.5	0.5	1500	1.1	0.16	5.11	2.5	37	45	18	0	0.07	0.52
EC002	2	ANDISOL1	2	A	750	0.5	0.5	1500	0.9	0.19	15	6.2	26	51	23	0	0.06	0.14
EC003	3	ANDISOL2	2	A	750	0.5	0.5	1000	0.91	0.19	15	7.4	20	33.9	28	18.1	0.06	0.14
EC004	4	ANDISOL3	2	A	750	0.5	0.5	750	0.9	0.22	15	6.3	24	28	48	0	0.06	0.14
EC005	5	BARREN	1	D	100	0.5	0.5	1524	2.5	0.01	400	0	5	25	70	98	0.23	0.01
EC006	6	GELLISOL	1	D	25.4	0.5	0.5	25.4	1.72	0	260	0	0	0	0	0	0.23	0
EC007	7	WATERBODY	1	D	25.4	0.5	0.5	25.4	1.72	0	260	0	0	0	0	0	0.23	0
EC008	8	MOLINCOSOL	2	B	127	0.5	0.5	101.6	1.35	0.24	8.5	1.74	19	42	39	0	0.01	0.38
EC010	10	INCEPTISOL	2	B	127	0.5	0.5	300	0.62	0.223	10.84	11.1	22	28	50	0	0.01	0.16
EC011	11	MOLLISOL	2	B	127	0.5	0.5	101.6	1.35	0.24	8.5	1.74	19	42	39	0	0.01	0.38
EC012	12	HISTOSOL	2	B	127	0.5	0.5	400	0.86	0.206	0.11	4.3	32	34	34	0	0.01	0.13
EC013	13	URBAN_AREA	1	D	25.4	0.5	0.5	25.4	1.72	0	500	0	15	30	55	0	0.23	0.28



**ANEXO 6**  
**Parámetros de Calibración**

Proceso	Nombre	Código	Valor Inicial	Rango		Método	Fuente/Ob servación
Caudal base	Coefficiente de Revapotranspiración	GW_REVAP.gw	0.02	0.02	0.2	reemplazo	Griensven (2006)
Evaporación	Radiación Solar	SOLARAV().wgn	Cada Subcuenca tiene su propio valor.	-0.15	0	multiplicar por	Valor de evaporación fuera de rango. Rango Referencia: 410 - 614 mm(SINOHYDR O, 2012)
Transporte de agua en el canal	Conductividad Hidráulica de Canal	CH_K2.rte	0	6	25	reemplazo	Swat Theory (2009)
Escorrentía Superficial	Numero de Curva (CN2)	CN2.mgt	Cada HRU calcula su propio valor.	0	1	multiplicar por	Arnold (2012)
Caudal base	Nivel del umbral freático en el acuífero poco profundo pára que pase agua subterránea al cauce principal (mm H2O).	GWQMN.gw	1000	0	3000	reemplazo	Griensven (2006)
Transporte de agua en el canal	Factor de ponderación de Muskingum, que controla la importancia relativa de flujo de entrada y flujo de salida en la determinación del almacenamiento en un estanque.	MSK_X.bsn	0.2	0	0.5	reemplazo	SWAT IO (2009)
Transporte de agua en el canal	Factor de ponderación que influye en el tiempo de almacenamiento del agua en un segmento del canal.	MSK_CO2.bsn	0.25	0.01	10	reemplazo	Wang, X., et al. (2006)
Escorrentía Superficial	Precipitación	Precipitation(){1976001-1983361}.pcp	Cada Subcuenca tiene su propio valor.	0	0.2	multiplicar por	Bruijnzeel, L. A. (2004)
Transporte de agua en el canal	Factor de ponderación de Muskingum, que controla la importancia relativa de flujo de entrada y flujo de salida en la determinación del almacenamiento en un estanque	MSK_CO1.bsn	0.75	0.01	10	reemplazo	Wang, X., et al. (2006)
Transporte de agua en el canal	Coefficiente de rugosidad de Manning	CH_N2.rte	0.014	0.03	0.05	reemplazo	SWAT IO (2009)
Evaporación	Albedo del Suelo	SOL_ALB().sol	En función de tipo de suelo.	-0.5	0.5	multiplicar por	Griensven (2006)
Caudal base	Límite de agua en el acuífero libre ántes que ocurra percolación o revap al acuífero subterráneo	REVAPMN.gw	750	0	500	reemplazo	Griensven (2006)
Evaporación	Factor de compensación de la absorción de la planta	EPCO.bsn	1	0	1	reemplazo	Griensven (2006)
Evaporación	Factor de compensación de la evaporación del suelo	ESCO.bsn	0.95	0	1	reemplazo	Griensven (2006)
Suelo	Contenido de carbono del suelo	SOL_CBN().sol	En función de tipo de suelo.	-0.6	0.6	multiplicar por	Autor
Suelo	Conductividad hidráulica en condiciones saturadas	SOL_K().sol	En función de tipo de suelo.	-0.5	0.5	multiplicar por	Buytaert et al. (2006)
Caudal base	Factor de recesión del flujo base	ALPHA_BF.gw	0.048	0	1	reemplazo	Griensven (2006)
Caudal base	Tiempo de retraso de aguas subterráneas	GW_DELAY.gw	31	0	50	reemplazo	Griensven (2006)
Suelo	Capacidad de campo	SOL_AWC().sol	En función de tipo de suelo.	-0.5	0.5	multiplicar por	Autor
Escorrentía Superficial	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial	SURLAG.bsn	4	0	10	reemplazo	Griensven (2006)

## **ANEXO 7**

**Resultados, estación H0714 Coca en San Rafael**

Periodo Calibración 79-83		
Fecha	Observado	Simulación
Jan-79	38.3	38.74
Feb-79	41.31	41.02
Mar-79	117.62	114.2
Apr-79	207.95	188.6
May-79	183.59	206
Jun-79	212.62	189.6
Jul-79	220.78	219.2
Aug-79	180.29	181.8
Sep-79	164.82	145.5
Oct-79	121.37	103.3
Nov-79	106.38	113.7
Dec-79	140.82	131
Jan-80	125.6	112.2
Feb-80	69.99	91.5
Mar-80	178.97	129.6
Apr-80	208.87	183.2
May-80	237.6	255.3
Jun-80	318.87	295.1
Jul-80	236.79	220.6
Aug-80	189.77	200.8
Sep-80	151.84	155.3
Oct-80	149.75	174.2
Nov-80	122.6	120.5
Dec-80	89.29	74.83
Jan-81	67.4	70.08
Feb-81	147.12	125.5
Mar-81	132.11	142.5
Apr-81	184.8	173.4
May-81	164.02	173.9
Jun-81	222.06	210.4
Jul-81	293.79	306.5
Aug-81	138.41	161.5
Sep-81	147.62	141.9
Oct-81	112.84	125.3
Nov-81	104.06	131.9
Dec-81	116.76	119.6
Jan-82	112.45	127.5
Feb-82	78.67	90.72
Mar-82	98.41	103.8
Apr-82	161.38	217.6
May-82	166.73	239.7
Jun-82	132.49	204.4
Jul-82	235.21	221.5
Aug-82	238.8	238.1
Sep-82	171.58	173.3
Oct-82	136.09	125.6
Nov-82	148.11	136.7
Dec-82	124.9	96.38
Jan-83	146.86	107.2
Feb-83	131.8	90.74
Mar-83	154	97.9
Apr-83	202.92	172
May-83	280.31	253.3
Jun-83	171.18	183.6
Jul-83	206.44	212.3
Aug-83	223.03	180.9
Sep-83	220.5	191.7

Oct-83	189.96	177.8
Nov-83	132.99	135
Dec-83	124.01	112.9

Periodo Validación 84-86		
Fecha	Observado	Simulación
Jan-84	116.27	118.6
Feb-84	170.86	158.6
Mar-84	137.21	136.6
Apr-84	201.31	222.6
May-84	140.95	153.9
Jun-84	239.57	194.8
Jul-84	231.05	170.9
Aug-84	169.26	154.6
Sep-84	204.94	215.4
Oct-84	150.01	169.5
Nov-84	110.68	139.3
Dec-84	115.23	123.7
Jan-85	66.8	88.18
Feb-85	103.7	91.01
Mar-85	163.55	126.7
Apr-85	128.92	138.7
May-85	195.68	197.9
Jun-85	294.88	225
Jul-85	284.03	245.9
Aug-85	251.67	231.1
Sep-85	161.13	192.8
Oct-85	135.74	169.4
Nov-85	95.14	123.5
Dec-85	58.5	104.5
Jan-86	123.46	72.45
Feb-86	104.16	90.71
Mar-86	199.95	151.8
Apr-86	277.92	221.6
May-86	252.37	206.4
Jun-86	300.75	208.8
Jul-86	378.31	262.4
Aug-86	211.25	184.2
Sep-86	226.525667	187.1
Oct-86	163.27	166.2
Nov-86	163.9	175.5
Dec-86	196.55	146.2