



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**EVALUACIÓN HIDROLÓGICA EN  
LA CUENCA DEL RÍO TEAPA  
TABASCO A PARTIR DE  
MODELOS DE SIMULACIÓN**

MARCO ANTONIO TORRES MORENO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS


MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO


2016


La presente tesis titulada: "Evaluación hidrológica en la cuenca del Río Teapa Tabasco a partir de modelos de simulación", realizada por el alumno: Marco Antonio Torres Moreno. Bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:   
\_\_\_\_\_  
Dr. Iouri Nikolskii Gavrilov

ASESOR:   
\_\_\_\_\_  
Dra. María Eugenia Miranda Martínez

ASESOR:   
\_\_\_\_\_  
M.C. José Donaldo Ríos Berber

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo del 2016

# EVALUACIÓN HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO TEAPA TABASCO A PARTIR DE MODELOS DE SIMULACIÓN

Torres Moreno Marco Antonio, MC.  
Colegio de Postgraduados, 2016

## Resumen

La cuenca hidrológica del Río Teapa del estado Tabasco presenta la problemática de inundaciones relacionadas con lluvias con altas intensidades y en condiciones de altas pendientes. Esta cuenca tiene información detallada sobre su clima, topografía, vegetación y suelos, así como los datos del régimen hidrológico del Río Teapa obtenidos en las estaciones hidrométricas Teapa y El Refugio. Además esta cuenca se encuentra relativamente poco alterada por asentamientos humanos lo que permitiría con mayor seguridad simular el proceso de formación del flujo superficial natural del agua. En el presente trabajo para simular procesos de escorrentía de la cuenca hidrográfica del Río Teapa se ha aplicado el modelo MIKE SHE. Este modelo ha sido elegido principalmente por su gran capacidad de procesamiento de las características de la cuenca hidrográfica. A través de este modelo se han calculado los gastos diarios del Río Teapa desde 1998 hasta 2005. Se han comparado con los datos observados los gastos diarios, medios mensuales y los gastos máximos mensuales. El proceso de simulación del régimen hidrológico del Río Teapa consideró dos etapas de cálculo:

- Calibración del modelo MIKE SHE en el período de 1998 a 2000 mediante la variación de parámetros para obtener mejor ajuste entre los gastos calculados y observados.
- Validación del modelo MIKE SHE en el período de 2002 a 2005 mediante comparación con los gastos del Río Teapa calculados y observados principalmente en la estación hidrométrica Teapa.

Los resultados de esta simulación señalan que en proceso de validación del modelo MIKE SHE se logró un buen ajuste entre los gastos medios mensuales y máximos mensuales calculados y observados con el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.81$ . Sin embargo, no se ha logrado buen ajuste en los gastos diarios calculados y observados con el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.62$ .

**Palabras clave:** modelación hidrológica, modelos distribuidos, MIKE SHE, escurrimiento superficial

# HYDROLOGICAL ASSESSMENT OF RIVER BASIN TEAPA, BY MEANS OF SIMULATION MODELS

Torres Moreno Marco Antonio, MC.  
Colegio de Postgraduados, 2016

## **Abstract**

Teapa basin has enough detailed information about its climate, topography, vegetation, soil, etc. as well as the data of Teapa river hydrological regime obtained in Teapa and El Refugio hydrometric stations. Furthermore this basin is relatively few altered by human settlements allowing more secure simulate the formation process of natural surface water runoff. In the present work in order to simulate surface and groundwater runoff from Teapa river basin it was applied the MIKE SHE hydrological mathematical model developed by three European institutions: Danish Hydraulic Institute, British Institute of Hydrology and a French company. The MIKE SHE model has a preference due to high processing capacity of the detailed characteristics of the river basin. With this model we calculated daily discharges of Teapa River during period from 1998 to 2005. The daily, mean monthly and maximum monthly discharges were compared with the observed data.

The process of simulation of Teapa river hydrological regime considered two calculation stages:

- Calibration of the MIKE SHE model in the period from 1998 to 2000 by varying its parameters for better adjustment between calculated and observed river discharges.
- Validation of the MIKE SHE model in the period from 2002 to 2005 by comparison between Teapa river discharges calculated and observed in El Refugio and Teapa hydrometric stations.

The results of this simulation show that in the MIKE SHE model validation process is achieved rather good adjustment between calculated and observed mean and maximum monthly Teapa river discharges with the determination coefficient  $R^2 = 0.81$ . However, no good adjustment has achieved in the calculated and observed daily discharges with the determination coefficient  $R^2 = 0.62$ .

**Key words:** hydrologic modelling, Distributed models, MIKE SHE.

Dedicado a mi amada hija Sofía  
y a mi amada esposa Jaquelina

## Agradecimientos

Al CONACYT, al Colegio de Postgraduados y al Postgrado de Hidrociencias, por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación personal y académica.

Al Dr. Iourii Nikolskii Gavrilov, por todo el apoyo brindado en la realización del presente trabajo.

A los Doctores Mario Martínez Menez, Ma. Eugenia Miranda Martínez y al Maestro Donaldo Ríos Berber por su amable guía y su incansable ánimo para concluir este trabajo.

Al Dr. José Luis Oropeza por la inspiración para culminar esta etapa de un camino que iniciamos juntos.

## Contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	5
2	OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	6
2.1	Objetivo general .....	6
2.2	Objetivos específicos.....	6
2.3	Hipótesis.....	7
3	REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
3.1	Ciclo hidrológico .....	7
3.1.1	Precipitación e intercepción .....	8
3.1.2	Evapotranspiración y almacenamiento en el suelo.....	9
3.1.3	Infiltración, escurrimiento y flujo en cauces .....	10
3.1.4	Agua subterránea .....	12
3.2	Cuenca hidrológica.....	13
3.3	Modelos hidrológicos.....	13
3.3.1	Modelos de capa y modelos distribuidos .....	14
3.3.2	Modelos determinísticos y modelos estocásticos .....	15
3.3.3	Modelos de caja negra.....	16
3.3.4	Modelos de proceso.....	16
3.3.5	Modelos conceptuales .....	17
3.3.6	Recomendaciones en el uso de los modelos.....	18
3.3.7	El modelo MIKE SHE.....	19
4	MATERIALES Y MÉTODOS .....	32
4.1	Localización del área de estudio .....	32
4.2	Caracterización morfométrica de la cuenca. ....	34

4.2.1	Área de la cuenca .....	35
4.2.2	Red de drenaje .....	35
4.2.3	Forma de la cuenca .....	38
4.2.4	Relieve de la cuenca.....	41
4.3	Caracterización biofísica de la cuenca .....	43
4.3.1	Clima.....	43
4.3.2	Uso de suelo y vegetación .....	44
4.3.3	Unidades de suelo. ....	46
4.4	Información hidrométrica y meteorológica.....	48
4.4.1	Precipitación .....	48
4.4.2	Hidrometría .....	51
4.5	Integración de la información dentro del modelo MIKE SHE.....	58
4.5.1	Topografía .....	58
4.5.2	Propiedades del suelo .....	61
4.5.3	Propiedades de la vegetación.....	63
4.5.4	Variables climáticas .....	64
4.5.5	Información hidrométrica .....	67
4.6	Pruebas estadísticas .....	73
4.6.1	Pendiente y ordenada al origen .....	73
4.6.2	Coeficientes de correlación de Pearson (r) y de determinación (R <sup>2</sup> ) .....	74
4.6.3	Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe .....	74
4.6.4	Índices de error .....	75
4.7	Calibración y validación del modelo .....	75
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	76
5.1	Calibración del modelo .....	76



5.1.1	Gastos diarios .....	77
5.1.2	Gastos medios mensuales.....	81
5.1.3	Gastos máximos mensuales y anuales.....	82
5.2	Validación del modelo .....	83
5.2.1	Gastos medios mensuales.....	86
5.2.2	Gastos máximos mensuales y anuales.....	87
6	CONCLUSIONES.....	90
8.	LITERATURA CITADA.....	92
	ANEXOS.....	97

## Lista de figuras

Figura 3-1. Representación esquemática de la estructura del modelo MIKE SHE (Abbot et al., 1986b).....	20
Figura 3-2.- Representación esquemática de los procesos de intercepción y evapotranspiración (Abbot et al., 1986b).....	22
Figura 4-1. Ubicación geopolítica de la cuenca del Río Teapa.....	33
Figura 4-2. Localización hidrológica de la cuenca del Río Teapa.....	34
Figura 4-3. Red hidrográfica de la cuenca del Río Teapa .....	35
Figura 4-4. Curva hipsométrica de la cuenca del Río Teapa.....	42
Figura 4-5.- Perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del Río Teapa.....	43
Figura 4-6. Clima en la cuenca del Río Teapa (INEGI 1980) .....	44
Figura 4-7. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del Río Teapa (INEGI 2014).....	45
Figura 4-8. Edafología de la cuenca del Río Teapa (INEGI 2014) .....	47
Figura 4-9. Localización de las estaciones meteorológicas convencionales en la cuenca del Río Teapa .....	49
Figura 4-10. Estación meteorología automatizada Tapilula.....	51
Figura 4-11. Estación hidrométrica automatizada El Refugio .....	52
Figura 4-12. Características y forma de montaje del sensor RLS. ....	55
Figura 4-13. Instalación del sensor RLS en el puente El Refugio de la cuenca del Río Teapa .....	55
Figura 4-14. Montaje del sensor de radar Kalesto en el puente El Refugio.....	56
Figura 4-15. Vista aguas arriba de la ubicación de la estación hidrométrica El Refugio	57
Figura 4-16. Sección transversal de la estación hidrométrica automatizada El Refugio	57
Figura 4-17. Esquema general para la integración de la información en el modelo MIKE SHE .....	58
Figura 4-18. Esquema de integración de la red hidrográfica de la cuenca del Río Teapa para el modelo de simulación de la escorrentía superficial MIKE SHE .....	59
Figura 4-19 Red hidrográfica del Río Teapa para su integración en el modelo MIKE SHE .....	60
Figura 4-20. Integración de las secciones transversales en el modelo MIKE SHE .....	61

Figura 4-21.- Esquema de obtención de información sobre propiedades de suelo de la cuenca del Río Teapa para su integración posterior al modelo MIKE SHE.....	62
Figura 4-22.- Esquema de obtención de información sobre propiedades de vegetación de la cuenca del Río Teapa para su integración posterior al modelo MIKE SHE .....	63
Figura 4-23.- Esquema de obtención de información meteorológica de la cuenca del Río Teapa para su integración posterior al modelo MIKE SHE .....	64
Figura 4-24. Correlación entre la lámina de lluvia y duración del evento de lluvia en la cuenca del Río Teapa .....	66
Figura 4-25.- Distribución temporal de los eventos de lluvia para la estación meteorológica automatizada Tapilula. ....	66
Figura 4-26. Histograma de las lecturas de escala en la estación hidrométrica automatizada El Refugio .....	69
Figura 4-27. Curva escala – área hidráulica en la estación hidrométrica automatizada El Refugio .....	70
Figura 4-28. Relación escala velocidad en la estación hidrométrica automatizada El Refugio .....	71
Figura 4-29. Variación del coeficiente de Manning en la estación hidrométrica automatizada El Refugio .....	71
Figura 4-30. Relación escala - gasto en la estación hidrométrica automatizada El Refugio .....	72
Figura 5-1 Comparación de los gastos diarios calculados y los gastos observados durante el año 1999.....	78
Figura 5-2.- Comparación de los gastos diarios calculados y los gastos observados durante el año 2000.....	78
Figura 5-3.- Comparación de gastos diarios calculados y gastos observados durante período de calibración del 1998 al 2000 en la estación hidrométrica Teapa .....	80
Figura 5-4.- Comparación de los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica convencional Teapa durante el período de calibración del 1998 al 2000.....	81
Figura 5-5.- Correlación entre los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de calibración del 1998 al 2000 .....	82

Figura 5-6.- Correlación entre los gastos máximos mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de calibración del 1998 al 2000 ....	83
Figura 5-7.- Comparación de los gastos diarios calculados y los gastos observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de validación de 2003-2005 .....	84
Figura 5-8.- Comparación de gastos diarios calculados y gastos observados durante período de validación del 2003 al 2005 en la estación hidrométrica Teapa .....	85
Figura 5-9.- Comparación de los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica convencional Teapa durante el período de validación del 2003 al 2005 .....	86
Figura 5-10.- Correlación entre los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de validación del 2003 al 2005 .....	87
Figura 5-11.- Comparación de hidrográmas de los gastos máximos mensuales calculados y observados durante período de validación del 2003 al 2005.....	88
Figura 5-12.- Correlación entre los gastos máximos calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de validación del 2003 al 2005.....	88

### **Lista de cuadros**

Cuadro 4-1. Municipios de la cuenca del Río Teapa. ....	33
Cuadro 4-2. Comparación de las diferentes unidades hidrológicas.....	34
Cuadro 4-3. Longitud de los tributarios de la cuenca del Río Teapa.....	37
Cuadro 4-4. Relación de bifurcación de las corrientes de la cuenca del Río Teapa.....	38
Cuadro 4-5. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del Río Teapa. ....	45
Cuadro 4-6. Estadísticos descriptivos de la serie temporal de lecturas de escala .....	68
Cuadro 5-1.- Resultados de la estimación estadística de calidad de calibración del modelo MIKE SHE en proceso de cálculo de los gastos diarios del Río Teapa, Tabasco.....	79
Cuadro 5-2.- Resultados de la estimación estadística de calidad de validación del modelo MIKE SHE en proceso de cálculo de los gastos diarios del Río Teapa, Tabasco.....	84

## **Lista de anexos**

Anexo 1. Características hidrológicas de los suelos utilizadas para calibrar el modelo.	98
Anexo 2. Valores de rugosidad hidráulica de los diferentes usos de suelos presentes en la cuenca del Río Teapa Tabasco. ....	101
Anexo 3. Gastos medios mensuales reportados por la estación hidrométrica Teapa y promedio mensual del gasto simulado para el período de calibración del modelo.....	102
Anexo 4.- Datos generales de las estaciones meteorológicas utilizadas. ....	103

## 1 INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrológica del Río Teapa del estado Tabasco, la cual de acuerdo con la clasificación del INEGI tiene como clave RH30Di, presenta la problemática de inundaciones repentinas debidas principalmente a las lluvias con altas intensidades, un relieve con fuertes pendientes y un intenso cambio de uso de suelo de selvas altas y medianas hacia pastizales cultivados. La incidencia de inundaciones en esta región se aprecia en las diferentes declaratorias de desastre natural por lluvias severas publicadas en el diario oficial de la federación.

La planeación de actividades encaminadas a la protección de los núcleos de población frente a eventos de inundación repentina, requiere de una estimación correcta del flujo de agua en los cauces. Tales estimaciones pueden realizarse mediante análisis estadísticos de las series de observaciones de los gastos en los cauces o mediante una simulación matemática del proceso de formación de los flujos superficiales de agua. La modelación matemática, puede aplicarse en caso de ausencia o deficiencia de los datos de observación de los gastos de las corrientes superficiales. Existen diferentes modelos de simulación de estos procesos basados en diferentes principios. Cada tipo de modelo tiene sus ventajas y desventajas (ver el capítulo 3.3 Modelos hidrológicos). Una de las características más importante a considerar en la utilización de modelos hidrológicos es el nivel de confiabilidad de los resultados del cálculo de los gastos y niveles de agua en los cauces naturales. Para verificar el nivel de confiabilidad de los resultados de cálculo del análisis hidrológico de un cauce es necesario tener los datos de observación de su comportamiento en forma continua los cuales pueden obtenerse de estaciones hidrométricas. Además es necesario tener la información objetiva y representativa sobre las condiciones de formación del flujo superficial en la cuenca hidrológica: su topografía, clima, suelos, vegetación, uso del terreno, red hidrográfica, etc. El proceso de formación del flujo superficial es bastante complicado y depende de varios factores: de la topografía de la superficie de terreno y la presencia de corrientes superficiales naturales, de las condiciones climáticas, de propiedades hídricas de suelo, del tipo de uso de suelo y las características hídricas de la vegetación natural o cultivada, de la presencia o ausencia de estructuras de control y aprovechamiento, las cuales modifican el régimen hidrológico de la cuenca. Por lo tanto, para simular los procesos hidrológicos en una cuenca

hidrográfica es necesario tener la información mencionada objetiva y representativa para esta cuenca. Lamentablemente en nuestro país no existen muchas cuencas donde se cuente con la información detallada sobre las características hidrológicas y un registro hidrométrico confiable y continuo.

La cuenca del Río Teapa afortunadamente tiene la información necesaria para simular el proceso de escorrentía superficial. Además esta cuenca presenta escasos núcleos urbanos lo que permitiría con mayor seguridad simular los diferentes procesos hidrológicos y principalmente el proceso de formación del flujo de agua en los cauces naturales.

El modelo distribuido de base física MIKE SHE ha sido ampliamente utilizado en estudios hidrológicos debido a la gran capacidad de procesamiento de las características específicas de cada cuenca hidrográfica considerando una gran cantidad de los datos disponibles meteorológicos, topográficos, hidrológicos, etc. y estimar el efecto del cambio de uso de suelo de las cuencas sobre su régimen hidrológico.

## **2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **2.1 Objetivo general**

Calibrar y validar el modelo hidrológico MIKE SHE para la cuenca del Río Teapa en el estado Tabasco, México.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Recopilar y analizar información necesaria para realizar evaluación hidrológica en la cuenca del Río Teapa, Tabasco a partir del modelo de simulación MIKE SHE.
- Analizar el comportamiento de la precipitación en la cuenca del Río Teapa.
- Realizar la integración, calibración y validación del modelo hidrológico distribuido de base física MIKE SHE.

## **2.3 Hipótesis**

- La información meteorológica, hidrométrica y biofísica existente sobre la cuenca del Río Teapa, es suficiente para integrar, calibrar y validar el modelo hidrológico distribuido de base física MIKE SHE.
- Los resultados de simulación del régimen hidrológico de la cuenca del Río Teapa por el modelo MIKE SHE permitirán especificar las condiciones bajo las cuales y con que fines se puede utilizar este modelo en otras cuencas hidrográficas del país.

## **3 REVISIÓN DE LITERATURA**

### **3.1 Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico, término que describe la circulación y almacenamiento de agua en la tierra (Maidment, 1993a), depende las condiciones naturales climáticas, topográficas, edáficas, de vegetación, etc. y es afectado por la influencia humana a diferentes escalas, desde la local hasta la planetaria (Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences, 1991).

El efecto del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo asociado con la expansión de la agricultura y ganadería ha tenido una profunda influencia en los procesos hidrológicos en pequeñas cuencas y a nivel regional (Sahagian, 2000).

Los diferentes procesos físicos que componen al ciclo hidrológico y que interactúan en el mundo son bien conocidos y han sido ampliamente estudiados (Schwab et al., 1993).

El enfriamiento de una masa de aire saturada con humedad produce el fenómeno de la precipitación que cae a la superficie de la tierra en forma de lluvia, nieve, aguanieve o granizo, antes de caer sobre la superficie del suelo una fracción de la precipitación es interceptada por la vegetación y se evapora de nuevo a la atmosfera. La precipitación que llega a la superficie del suelo puede infiltrarse, evaporarse después de un periodo de almacenamiento en la superficie o puede fluir sobre la superficie en forma de escorrentía. La humedad almacenada en el suelo puede perderse por evaporación y también por la extracción de las raíces de las plantas que luego transpiran la humedad a través de las estomas, este fenómeno conjunto se denomina evapotranspiración. Una pequeña



porción de agua logra llegar a las zonas saturadas del perfil del suelo y fluir como aguas subterráneas en arroyos, ríos o por medio del flujo base, hasta llegar al océano (Dingman, 2002).

El ciclo hidrológico representa los procesos y los caminos que envuelven la circulación del agua desde la tierra y los cuerpos de agua hacia la atmósfera y de regreso, el ciclo es complejo y dinámico, sin embargo con fines de modelación hidrológica puede ser simplificado considerando todos los procesos como estradas, salidas y almacenamiento, siempre siguiendo el principio de conservación de masa (Brooks, 1991).

Las diferentes interacciones del suelo y las plantas con los procesos hidrológicos son de especial interés para el manejo de cuencas hidrográficas ya que el flujo de agua dentro, a través y en la salida de la cuenca son modificados de acuerdo con las actividades de uso y manejo del territorio. La comprensión de los efectos del cambio de uso de suelo y de la vegetación es un punto crítico para la correcta evaluación hidrológica de la cuenca.

### **3.1.1 Precipitación e interceptación**

La precipitación y la interceptación son dos procesos hidrológicos que se llevan a cabo simultáneamente y en la misma distribución espacial dentro de la cuenca, hidrológicamente la precipitación es la principal entrada de agua en una cuenca y representa la clave para entender el carácter general de la región, desde el punto de vista ecológico es evidente la influencia de la precipitación en el desarrollo de los suelos y la vegetación de las cuencas. (Brooks, 1991).

La precipitación es el resultado de diferentes condiciones meteorológicas y se encuentra completamente fuera del control humano, el como el cambio de uso de suelo y el manejo puede tener efectos diversos en el comportamiento hidrológico en una cuenca es la cuestión más importante de análisis en diversos estudios.

Existen diferentes tipos de precipitación de acuerdo a las condiciones necesarias para su desarrollo (masas de aire, temperatura, relieve), de esta forma se distinguen tres tipos de precipitación de acuerdo a su origen;

- Precipitación frontal, originada por el choque de dos masas de aire con diferentes temperaturas y diferentes contenidos de humedad,

- Precipitación orográfica, este tipo de precipitación tiene su origen en un cambio de temperatura debido a la elevación de masas de aire en las cadenas montañosas.
- Precipitación convectiva, este tipo de precipitación también conocida como tormentas de verano, tiene su origen en el calentamiento de la superficie terrestre que arrastra humedad hacia capas de aire más altas lo que provoca condensación y eventos de lluvia de corta duración y altas intensidades.

La estimación de la cantidad de precipitación se basa en la medición de la cantidad de lluvia que cae sobre una superficie determinada en un intervalo de tiempo definido, habitualmente se reporta en cantidades diarias, mensuales y anuales.

Los métodos de estimación de la precipitación media en una cuenca se basan en estimaciones numéricas como el promedio, la determinación de la zona de influencia de cada estación de medición tales como los polígonos de Thiessen.

Una vez que se ha llevado a cabo un evento de precipitación sobre la cuenca, el tipo, la extensión y la condición de la vegetación presente empiezan a jugar un papel importante en el ciclo hidrológico ya que se ha estimado que algunos tipos de vegetación son capaces de retener hasta un 35% de la precipitación en el dosel y por tanto permitir su evaporación lo que representa una pérdida importante de agua para la cuenca. La cantidad de lluvia interceptada por la vegetación depende principalmente de la cantidad de hojas, la ramificación de la vegetación y la altura de la vegetación.

### **3.1.2 Evapotranspiración y almacenamiento en el suelo**

La evaporación del agua desde el suelo, la superficie de las plantas, los cuerpos de agua junto con la pérdida de agua a través de las hojas de las plantas son considerados colectivamente como evapotranspiración. (Brooks, 1991).

Desde el punto de vista físico, la evapotranspiración se puede considerar como la tasa de cambio de agua líquida a vapor desde una superficie hacia la atmósfera, este proceso requiere de un flujo de energía que en el caso del ciclo hidrológico la fuente principal es la radiación solar, es por ello que una gran variedad de modelos de predicción de la evaporación se basan en la medición de la radiación y la temperatura de la región.

Uno de los procesos más complejos en el proceso de la evapotranspiración es el flujo de agua a través del suelo y la planta hasta llegar a la atmósfera, con fines de comprensión

se puede explicar este proceso como un sistema eléctrico donde el suelo juega el papel de un resistor el cual a menor contenido de humedad en el suelo representa mayor resistencia para la extracción del agua, esta resistencia del suelo depende de una gran cantidad de factores como son; la textura, el espacio poroso, el origen del suelo y los materiales predominantes.

El flujo del agua en el suelo es relativamente pasivo comparada con el flujo del agua a través de las plantas, una vez que el agua ha sido interceptada por las raíces en el suelo, diversas fuerzas actúan sobre el flujo del agua a través de las estructuras de las plantas, siendo el potencial osmótico y el potencial de presión los principales factores que actúan en el flujo del agua a nivel celular.

El tipo de cobertura vegetal, las especies y la densidad son factores que afectan espacial y temporalmente la evapotranspiración en una cuenca. La evapotranspiración anual de una cuenca es afectada por el comportamiento de las estomas de las plantas, la interacción de las raíces y las temporadas de crecimiento.

La evapotranspiración en una cuenca es imposible de ser medida por algún método de campo, por lo que es necesario utilizar valores determinados mediante métodos indirectos o mediante relaciones obtenidas en laboratorios, la mejor metodología de evaluación en campo es aquella que se refiere a un análisis de cuencas pareadas utilizando diferentes tratamientos de vegetación y midiendo el efecto en la salida de la cuenca.

### **3.1.3 Infiltración, escurrimiento y flujo en cauces**

Una vez que la precipitación neta alcanza el terreno se inicia el movimiento del agua en diversas formas, una fracción de la lluvia se almacena en pequeñas depresiones en forma de charcos, el agua que se infiltra en el suelo presenta dos movimientos, el primero de ellos en forma vertical y que posteriormente puede alcanzar los mantos freáticos y el segundo como un movimiento lateral que se presenta después como flujo base en los cauces naturales, otro de los movimientos importantes del agua es en forma de escurrimiento sobre la superficie del suelo tal que puede formar canalillos y arroyos hasta integrarse a los ríos de la región. Cada uno de estos procesos es descrito a continuación

## **Infiltración**

El proceso mediante el cual el agua de lluvia entra en el suelo es denominado infiltración, este proceso es la resultante de dos fuerzas combinadas; la capilaridad y la gravedad. Si una cantidad de agua es agregada a un suelo seco con una buena condición de porosidad, la velocidad de infiltración inicial será muy alta debido principalmente a la acción de atracción de las partículas del suelo, posteriormente la velocidad de infiltración disminuirá hasta ser constante, esta velocidad indica la velocidad con que se mueve el agua en el suelo a través de los macro poros y principalmente debido a la gravedad.

La velocidad de infiltración de cada suelo dependerá de las diferentes características físicas y biológicas del suelo, principalmente a la textura y al desarrollo estructural del perfil del suelo, es precisamente la modificación de este desarrollo estructural por actividades agrícolas o por la compactación lo que puede modificar de manera significativa la velocidad de infiltración en una cuenca.

La medición de la infiltración puede llevarse a cabo mediante diversos métodos, para mediciones en campo el método más común es el infiltrómetro, este método consiste en un par de cilindros coaxiales de unos 30cm de altura que mediante la adición de agua estando enterrados en el suelo permiten la estimación de la velocidad de infiltración hasta alcanzar una constante.

## **Esguerrimiento y flujo en cauces.**

Varios procesos determinan como el exceso de agua de lluvia llega a convertirse en flujo en cauces, el exceso de agua representa la porción de la precipitación total que corre sobre la superficie y drena del suelo sin haberse evaporado o infiltrado a los mantos freáticos, una fracción de la lluvia fluye directamente hacia los cauces y rápidamente se convierte en parte de los flujos de los cauces, otras vías del agua pueden tardar varias semanas o meses en forma de almacenamientos antes de poder llegar a un cauce en forma de flujo. Es así como los cauces perenes (aquellos que presentan flujo base durante todo el año) son alimentados principalmente por el flujo subterráneo del agua y que debido a la dificultad y la velocidad del movimiento en este medio propicia que el flujo base no responda rápidamente a la precipitación o un cambio en el balance de agua de la cuenca.

La producción inmediata de un flujo en el cauce debida principalmente a un evento de precipitación se denomina flujo directo y se encuentra compuesto por dos diferentes procesos, el primero de ellos es el escurrimiento superficial que se forma cuando la tasa de precipitación supera a la tasa de infiltración del suelo, el segundo proceso es el flujo subsuperficial que representa la fracción de la precipitación que se infiltra en el suelo y que fluye a través de las primeras capas del suelo hasta formar parte del flujo en cauces. El flujo directo en las cuencas es un factor importante de análisis por ser el responsable de los flujos picos durante lluvias de alta intensidad.

La medición de los flujos y descargas en los cauces representa la información más importante para realizar un análisis hidrológico y para el manejo de los recursos hídricos, los picos máximos de flujo son necesarios para la planeación de obras hidráulicas y para la protección de las comunidades frente a inundaciones. Los métodos de medición son diversos desde simples escalas hasta sensores de medición continua donde la constante de medición se refiere a las escalas y las velocidades de los flujos en diversas secciones del cauce.

#### **3.1.4 Agua subterránea**

El agua que se encuentra en las zonas saturadas por debajo de la superficie del suelo es la fuente de agua dulce más abundante en el contexto global, la comprensión de la relación entre el manejo de la cuenca y el agua subterránea es imprescindible para la correcta interpretación de un análisis hidrológico en las cuencas.

Habitualmente el agua subterránea es concebida como grandes lagos y ríos subterráneos pero la mayor parte del agua subterránea se encuentra contenida en el espacio poroso en la zona de saturación, para comprender como se forma la zona de saturación, es necesario entender las fuerzas que gobiernan el movimiento del agua a través de los diferentes estratos del suelo y la roca.

El proceso de infiltración y el subsecuente movimiento del agua a través del suelo son el resultado de la capilaridad y la fuerza de gravedad, la capilaridad representa la fuerza de atracción del agua por las partículas del suelo y que propicia el movimiento del agua desde las partículas con mayor humedad hacia partículas más secas, sin embargo este movimiento es despreciable en comparación con el movimiento vertical producto de la

fuerza de gravedad. Una vez que la capacidad de campo del suelo es superada, se inicia un rápido movimiento descendente del agua hasta alcanzar zonas de roca con poros más pequeños y por tanto limitantes del movimiento del agua, cuando el agua ha alcanzado la profundidad suficiente se encuentra libre de los efectos de la evaporación y de la transpiración iniciándose la formación de la zona de saturación.

### **3.2 Cuenca hidrológica**

Todos los procesos hidrológicos mencionados anteriormente se producen en todas las cuencas y en todas las escalas por lo que es posible evaluar el balance hidrológico en cuencas de cualquier tamaño siempre y cuando se tomen en cuenta todas las entradas y salidas, la principal diferencia en la evaluación es el cambio de almacenamiento de la cuenca. Una cuenca hidrográfica se define como el área de territorio que contribuye a la escorrentía superficial y drenaje subterráneo a cualquier corriente o punto de interés (Chow et al., 1988), por lo tanto dependiendo de la escala, una cuenca puede consistir en varias subcuencas o puede ser un punto de inflexión más pequeña dentro de una cuenca mayor.

El balance hídrico de la cuenca puede ser teóricamente representado por las leyes que rigen el cambio de almacenamiento, en estas leyes se incluye de forma importante la ley de la conservación de la masa y las leyes de Newton referentes a la conservación de la energía y el movimiento (Newton, 1729), estas fuerzas cobran importancia cuando se realizan modelaciones del flujo de agua en el paisaje y el flujo del agua en los cauces naturales (Fetter, 2001).

### **3.3 Modelos hidrológicos**

Existen diversas formas de clasificar los modelos hidrológicos, una clasificación muy básica agrupa a los modelos como modelos de capa y modelos distribuidos, así como modelos estocásticos y modelos determinísticos. (Beven, 2001)

### 3.3.1 Modelos de capa y modelos distribuidos

Los modelos agrupados o modelos de capa son aquellos que consideran a la cuenca como una unidad, donde cada una de las variables representa los valores promedio de la zona de captación. Los modelos distribuidos realizan los cálculos valiéndose de la división de la superficie de la cuenca en una rejilla compuesta por un gran número de celdas individuales, cada celda puede contener valores diferentes de las características evaluadas y a su vez las ecuaciones del modelo se encuentran asociadas a cada celda.

Las principales características de los modelos de capa son las siguientes.

- La dinámica del sistema se encuentra representada de forma integrada por lo que consideran el comportamiento general de una cuenca o subcuenca.
- Se asume homogeneidad en la influencia, es decir que la variación espacial y la respuesta hidrológica de las características como el suelo, clima, pendientes y cobertura vegetal dentro de la cuenca son ignoradas.

Las principales características de los modelos distribuidos son las siguientes:

- El carácter variable y heterogéneo de la cuenca se conserva dado el número de unidades de respuesta hidrológica con características homogéneas.
- La respuesta hidrológica de la cuenca corresponde a la integración de la respuesta hidrológica de las celdas individuales.
- Las celdas individuales contienen parámetros y variables particulares que describen las características hidrológicas, de topografía, del suelo, clima, vegetación y topografía.
- Es posible obtener simulaciones hidrológicas con altas correlaciones dado que se evita incluir relaciones lineales dentro del proceso.

Las principales desventajas de los modelos distribuidos son las siguientes:

- Son más complejos en comparación con los modelos agrupados o de capa, sin embargo no necesariamente los modelos complejos son mejores que los modelos más simples.

- La división de una cuenca en unidades teóricamente homogéneas es complicada debido a las características físicas de cada unidad, así mismo las interacciones entre las unidades varían de acuerdo al tamaño y la información no puede ser escalada.

Una de las principales desventajas de los modelos distribuidos es la gran cantidad de datos de entrada que requiere, la cual habitualmente no se encuentra disponible con la resolución espacial necesaria, esta complejidad en un gran número de casos conlleva a la utilización de diferentes escalas de información con lo cual se sacrifica el mayor detalle para obtener un modelaje comprensible (Ncube, 2006).

### **3.3.2 Modelos determinísticos y modelos estocásticos**

De forma general los modelos deterministas permiten únicamente un resultado del proceso de simulación a partir de un conjunto de valores de entrada, los modelos estocásticos permiten cierta aleatoriedad de los resultados como respuesta a la incertidumbre de las variables de entrada.

El principal objetivo de los modelos estocásticos es poder predecir con cierta exactitud los eventos futuros, a partir de patrones secuenciales en el flujo de la corriente (Klemes, 1988).

Una consideración importante sobre los modelos estocásticos es que asumen la estacionalidad de la lluvia y el escurrimiento, esto significa que las series de lluvia y escurrimientos futuras tendrán la misma distribución estadística que las del pasado. Para que esta similitud estadística sea probable es necesario tener series de datos de largo plazo. Sin embargo los cambios de uso de suelo, la degradación de los territorios y los posibles cambios en la distribución de la lluvia son factores contrarios a estas afirmaciones.

Es posible diferenciar a los modelos hidrológicos de acuerdo a sus características estructurales, es mediante esta forma que se reconocen tres clases.



### **3.3.3 Modelos de caja negra**

Este tipo de modelo utiliza ecuaciones empíricas para estimar la relación lluvia – escurrimiento, sin embargo únicamente los datos de entrada y de salida tienen una dimensión física. Las ecuaciones matemáticas simples y los métodos basados en series de tiempo se encuentran dentro de esta categoría (Chiew, Stewardson and McMahon, 1993).

### **3.3.4 Modelos de proceso**

Este tipo de modelos realizan la simulación de los procesos hidrológicos en una cuenca a partir del modelaje de todos los procesos a través de ecuaciones diferenciales o algebraicas que regulan los procesos físicos, los modelos deterministas de base física se encuentran ubicados en esta categoría.

Los modelos de proceso requieren del uso de muchos parámetros y presentan la problemática de la limitación de datos en conjunto con la dificultad de relacionar los procesos de ecuaciones teóricas desarrolladas en laboratorios y extrapoladas a sistemas variables y complejos que dominan en el territorio de una cuenca (Prutchá, 2004).

Una de las principales limitantes de los modelos de proceso es que es muy difícil estimar los valores de los parámetros de manera eficaz y con la resolución espacial necesaria, incluso utilizando técnicas modernas de medición no es posible medir todos los parámetros requeridos sin tener que destruir el centro de nuestro interés. De forma general los modelos de proceso se encuentran basados en sólidos conceptos hidrológicos, sin embargo los estrictos requerimientos no se pueden resolver con un grado aceptable de precisión (Hughes y Sami, 1994).

A pesar de las dificultades y las diferentes críticas a los modelos de proceso, existen diversos estudios que sugieren que la aplicación de estos modelos basados en procesos físicos ha tenido éxito. En principio este tipo de modelos puede ser aplicable casi a cualquier problema hidrológico, las aplicaciones más comunes son las siguientes (Refsgaard, 1996).

- Predicción de los efectos de los cambios en el ciclo hidrológico originados por las actividades humanas tales como, el cambio de uso de suelo, urbanización y extracción de agua subterránea.
- Predicción de los escurrimientos en cuencas no aforadas y en cuencas con registros hidrométricos cortos, dada la capacidad de los modelos hidrológicos para adaptarse en investigaciones de campo intensivas y de corto plazo.
- Evaluación y modelaje de la calidad del agua y de la erosión de los suelos para lo cual es de suma importancia una simulación más detallada y físicamente correcta de los flujos de agua en laderas y cauces.

### **3.3.5 Modelos conceptuales**

Este tipo de modelos buscan encontrar una solución a la problemática planteada en las dos categorías anteriores utilizando una mezcla de parámetros físicos y parámetros estimados dentro de sus algoritmos, estos modelos resultan en esquemas más prácticos en su aplicación priorizando la utilización de parámetros efectivos por encima de aquellos con bases físicas (Hughes y Sami, 1994; Palacios-Vélez y Cuevas-Renaud, 1992; Pérez Nieto, 2013).

Las principales ventajas de los modelos conceptuales son las siguientes (Schulze, 1998): Se pueden desarrollar sin una alta comprensión de los fenómenos modelados, pueden agruparse espacial y temporalmente y simplifican las cadenas de cálculo complejo.

Pueden ser orientados a una cuenca completa o a un componente individual.

Se prioriza la demanda de datos eficaces y fáciles de usar, computacionalmente son más rápidos por lo que desde el punto de vista de la ingeniería son modelos de gran utilidad que pueden dar respuestas razonables a problemas prácticos.

Las principales desventajas de los modelos conceptuales derivan principalmente de un desarrollo que no incluye una base física en el que los procesos se presentan de forma simplificada artificialmente, algunas otras desventajas mencionadas por algunos autores incluyen (Schulze, 1998):

- La interpretación física de los resultados a partir de los parámetros de entrada es rara vez posible y puede resultar confusa.

- La relación causa – efecto en algunos casos es falsa y los modelos pueden ser demasiado generales para su aplicación práctica o demasiado específicos para un sitio.
- Se encuentran limitados a una asociación empírica por lo que los resultados pueden tener una calidad variable y no ser útiles para la predicción, esto implica que los modelos conceptuales no deben ser utilizados más allá de los límites de los cuales se obtuvieron los parámetros de entrada (Klemes, 1982).

### **3.3.6 Recomendaciones en el uso de los modelos.**

Los modelos son una representación de un sistema real, su utilidad como ayuda en la administración y la comprensión de los procesos físicos no debe ser subestimada. Es por estas limitaciones estructurales de los modelos y de los datos disponibles, que en cualquier modelo seleccionado con sus condiciones iniciales y de contorno seleccionadas será necesario algún tipo de calibración. (Beven, 2001).

Todas las calibraciones de los modelos y sus predicciones estarán sujetas a la incertidumbre y que ningún modelo es un fiel reflejo de los procesos naturales, como ejemplo, en los modelos de simulación de escorrentías, es imposible especificar con precisión las condiciones iniciales y de contorno requeridas, así mismo los datos observados disponibles utilizados en la calibración con muy poca frecuencia se encuentran libres de errores.

Es importante comprender que ningún modelo es capaz de capturar la variabilidad de los patrones naturales, principalmente a aquellos que se refieren a los cambios climáticos que resultan impredecibles. La variabilidad natural de los sistemas hidrológicos en el espacio y el tiempo, aunado a periodos de monitoreo muy cortos, hacen que sea muy difícil estudiar, comprender y predecir los efectos de un cambio en el entorno natural, incluso cuando se usen modelos distribuidos y de base física (Beven, 2001). Como tal es importante que los modeladores comprendan los riesgos involucrados en la adopción de los resultados de un modelo para la toma de decisiones y el planteamiento de políticas de gestión.

### **3.3.7 El modelo MIKE SHE**

El Sistema Hidrológico Europeo (SHE) es un sistema general de modelación completamente distribuida y de base física, capaz de simular la totalidad del ciclo hidrológico como alguna de sus fases terrestres de forma independiente (Abbot et al., 1986a).

El sistema hidrológico europeo fue desarrollado inicialmente por tres organizaciones europeas, el Instituto Hidráulico de Dinamarca (DHI), el Instituto Británico de Hidrología y una empresa francesa de consultoría (SOGREAH) en 1977 (DHI, 2004).

El sistema hidrológico europeo se encuentra compuesto por una serie de modelos, dentro de los cuales figura el modelo MIKE SHE que permite caracterizar el comportamiento de las cuencas hidrográficas (DHI, 2004)

El sentido físico del modelo MIKE SHE, se refiere a que los procesos hidrológicos se basan en las leyes de la conservación de la masa y la energía o por ecuaciones derivadas de la investigación experimental independiente. La distribución espacial del modelo se logra a partir de la representación horizontal de la zona por una rejilla ortogonal y verticalmente por una columna de capas de información en cada celda que compone la rejilla (Abbot et al., 1986b).

La naturaleza de la base física del modelo permite la inclusión de las características de topografía, vegetación, la edafología y el clima. La naturaleza distribuida del modelo permite la variación espacial y temporal de cada uno de los parámetros del conjunto de información tales como perfiles de suelo, uso de suelo, prácticas de drenaje, evapotranspiración y flujo superficial (Abbot et al., 1986a).

#### **Estructura del modelo**

Con la finalidad de adaptarse a las distintas necesidades de modelación de los usuarios, el sistema SHE tiene la posibilidad de adecuarse al tipo de problema hidrológico y sus alcances, por lo cual el nivel de complejidad de la modelación es variable, esto se logra a partir de una estructura modular del modelo (DHI, 2004), dichos módulos son los siguientes.

- Módulo de deshielo
- Módulo de interceptación
- Módulo de evapotranspiración
- Módulo de flujo superficial
- Módulo de flujo en cauces
- Módulo de flujo subsuperficial en las zonas satura e insaturada.

Cada proceso hidrológico se encuentra ligado a un componente del modelo por lo que es posible simular el ciclo hidrológico de forma completa o solo en una fracción de interés, la funcionalidad simultanea del modelo se encuentra ligada a un Centro de Control denominado (FRAME). Cada uno de los componentes puede ser modificado u omitido en cualquier momento dependiendo de las condiciones hidrológicas y la disponibilidad de datos, asimismo cada componente puede tener pasos de tiempo y escalas diferentes a los demás.

En la Figura 3-1 se muestra la estructura general del modelo MIKE SHE.

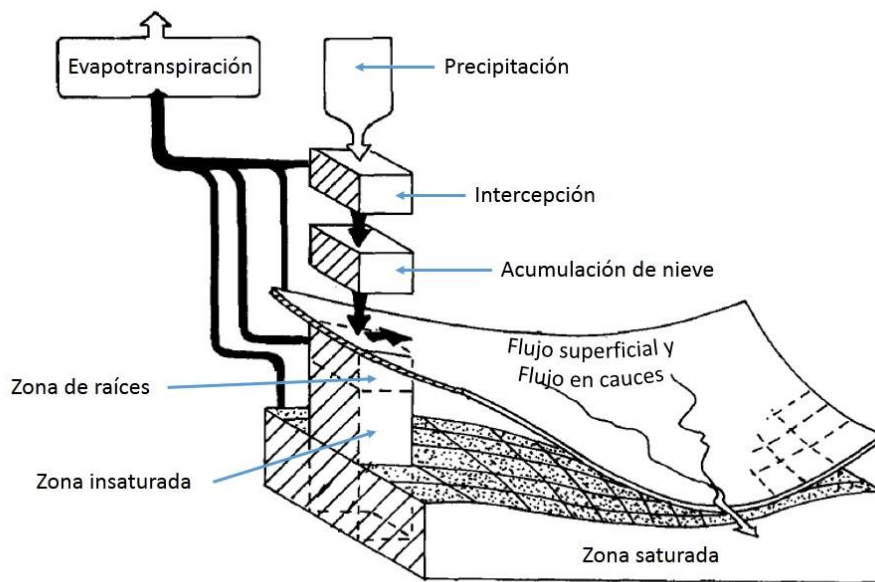


Figura 3-1. Representación esquemática de la estructura del modelo MIKE SHE (Abbot et al., 1986b).

El Centro de Control del Modelo (FRAME) coordina el funcionamiento paralelo de cada componente del modelo:

- Componente de intercepción y evaporación
- Componente de flujo superficial y flujo en cauces
- Componente de la zona insaturada
- Componente de la zona saturada

Las principales funciones del centro de control son las siguientes:

- Controla la lectura del juego de parámetros e inicializa todas las variables computacionales, el centro de control coordina la organización de los datos requeridos en cada celda de la red, estos datos incluyen niveles topográficos, tipo de suelo y vegetación, lluvia y códigos de las estaciones meteorológicas de influencia. Los valores específicos de los parámetros como, propiedades hidrofísicas del suelo y resistencia de flujo en los cauces (rugosidad hidráulica de la superficie) son llamadas de forma independiente durante el proceso de modelado.
- Controla la secuencia en la que cada componente es llamado al diseño computacional ya que cada componente puede tener pasos de tiempo diferentes así como cambios de este valor a lo largo de la simulación dependiendo de la tasa de respuesta hidrológica, esto es de suma importancia ya que los valores calculados acumulados tienen que ser transferidos de un componente a otro durante la simulación.
- Controla el intercambio de datos entre cada componente, el resultado de cada componente en muchos casos tendrá que ser transformado para introducirse en otro componente, esta transformación es manejada de tal manera que minimice el error en el balance de masa de agua total de la simulación.
- Controla el balance de masa entre todos los componentes y dentro de cada uno, este balance es llevado a la malla como un valor general y no como un valor para cada celda, los errores del balance de masa son evaluados por el monitoreo del cambio del almacenamiento de agua de un paso de tiempo al siguiente.

### Componente de interceptación y evapotranspiración

Este componente utiliza como datos de entrada, información meteorológica y parámetros de la vegetación para simular el total de la evapotranspiración y la lluvia neta resultante del proceso. Los principales elementos de este componente son:

- Interceptación de la lluvia por el dosel de la vegetación
- Drenaje del dosel
- Evaporación de la superficie del dosel
- Evaporación de la superficie del suelo
- Transpiración del agua extraída por la raíces de las plantas

En la Figura 3-2 Esquemáticamente se presentan los procesos de interceptación y evapotranspiración en un dosel de vegetación.

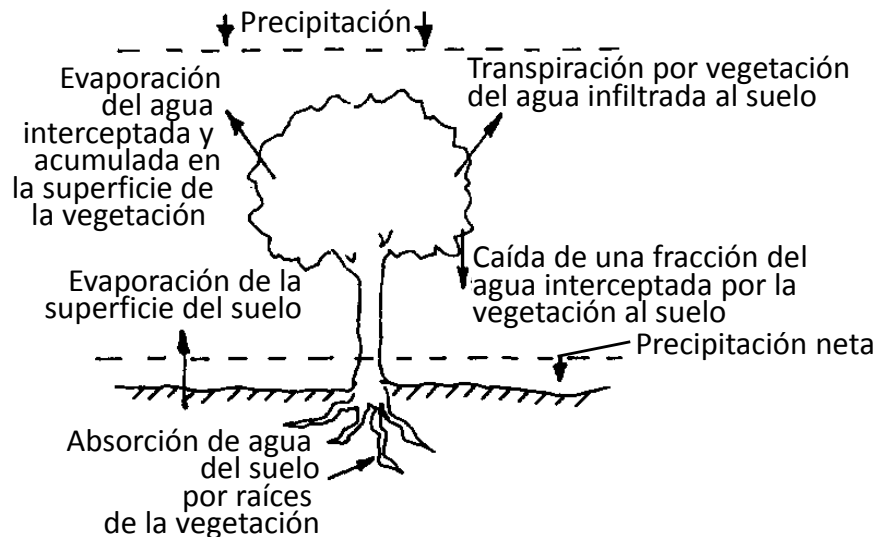


Figura 3-2.- Representación esquemática de los procesos de interceptación y evapotranspiración (Abbot et al., 1986b).

La lluvia neta, la transpiración y la evaporación del suelo, son complementadas con el componente de la zona insaturada, el cual proporciona información sobre las condiciones de humedad en la zona radicular. Dado que la interceptación puede afectar significativamente los valores de evapotranspiración, los dos procesos son modelados en conjunto dentro del componente.

### Intercepción.

El componente de intercepción calcula la precipitación neta o, hablando más exacto, la fracción de la precipitación caída directamente a la superficie del suelo a través del dosel, la cantidad de agua almacenada en el dosel y la evaporación desde el dosel. El cálculo de la intercepción se deriva del modelo de Rutter (Rutter et al., 1972). Este método es esencialmente un método numérico donde se considera que la superficie del dosel presenta una determinada capacidad de almacenamiento que es llenada por la lluvia y se vacía por efecto de la evaporación y el drenaje. Esta capacidad de almacenamiento del dosel puede ser interpretada como la lámina requerida para humedecer completamente el dosel. Cuando la lámina de agua  $C$  (en mm) precipitada sobre el dosel durante un período con duración de  $t$  (días) supera la capacidad de su almacenamiento  $S$  (en mm), se asume que la evaporación de agua de la superficie del dosel ocurre a una tasa potencial  $E_p$  (en mm/día) la cual corresponde a la evaporación en un tanque de agua. Por el contrario cuando  $C$  es menor que  $S$ , la tasa de evaporación de agua de la superficie del dosel es igual a  $E_p C/S$ . Es necesario aclarar que el valor de  $C$  puede ser igual o menor de la lámina diaria de precipitación  $Pr$ .  $C < Pr$  cuando la vegetación no cubre toda la superficie del suelo y  $C = Pr$  cuando la vegetación cubre completamente la superficie del suelo. La intensidad de cambio diario de almacenamiento de agua en el dosel se calcula así:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q - k e^{b(C-S)} \quad (3-1)$$

$$Q = p_1 p_2 (P - E_p C/S) \quad \text{Cuando } C < S \quad (3-2)$$

$$Q = p_1 p_2 (P - E_p) \quad \text{Cuando } C \geq S \quad (3-3)$$

En nuestro caso los cálculos se han realizado por cada día. Por lo tanto, los símbolos de las ecuaciones (3-1) a (3-3) se interpretan así:

$C = Pr$  - lamina diaria de lluvia (mm) sobre el dosel considerando que la vegetación completamente cubre toda la superficie del suelo. El termino dosel corresponde a



conjunto de la vegetación superficial en una celda con tamaño en nuestros cálculos igual a 4 ha;

$P$  – intensidad de precipitación (mm/día) la cual está igual a  $\partial Pr/\partial t$ ,

$p_1$  - fracción de la superficie del terreno en cada celda cubierta con la vegetación (adim);

$p_2$  - índice del área foliar dentro del terreno cubierto con la vegetación (adim);

$k$  y  $b$  - parámetros de drenaje del dosel los cuales caracterizan intensidad de descarga de agua del dosel a la superficie del terreno (adim).

Entonces, la lámina de la precipitación neta  $Pr_{nt}$  por varios días en cada celda calculada del terreno, si la celda no se cubre completamente con vegetación, está igual a  $Pr_{nt} = (Pr - E_p C/S) p_1 + Pr (1 - p_1)$  cuando  $C < S$  y  $Pr_{nt} = (Pr - E_p) p_1 + Pr (1 - p_1)$ . En las celdas completamente cubiertas con vegetación, donde  $p_1 = 1$ , tenemos  $Pr_{nt} = (Pr - E_p C/S)$  cuando  $C < S$  y  $Pr_{nt} = (Pr - E_p)$ . En las celdas sin vegetación  $Pr_{nt} = Pr$ . En nuestros cálculos diarios  $Pr = P$ .

Se espera que la ecuación (3-1) funcione de mejor manera en condiciones de un dosel completamente húmedo. Sin embargo la introducción de la relación  $C/S$  permite estimar la respuesta del dosel parcialmente húmedo o completamente seco. En general el almacenamiento del dosel  $C$  y los parámetros  $S$ ,  $k$ ,  $b$ ,  $p_1$  y  $p_2$  no pueden ser medidos directamente en campo, por lo que deben ser estimados indirectamente a partir de mediciones de la lluvia neta, la lluvia por debajo del dosel y la evapotranspiración. La modelación continua de este parámetro en el modelo MIKE SHE se realiza variando la capacidad de almacenamiento, el porcentaje de cobertura vegetal y el área foliar. Aunque el modelo de Rutter (Rutter et al., 1972) se desarrolló para vegetaciones arbóreas, es posible aplicarlo a distintos tipos de vegetación ya que las leyes físicas que definen el fenómeno de intercepción son las mismas. En el modelo MIKE SHE es posible modelar un solo tipo de vegetación por celda, debido a esta situación cuando se modela una vegetación arbórea, el efecto de la vegetación herbácea o arbustiva será ignorado.

## Evapotranspiración

Este componente calcula la evapotranspiración real y la traduce como un valor de pérdida en el sistema, el cual describe la absorción de agua por las raíces de las plantas y su transpiración es considerada como un valor continuo. Esta pérdida por extracción de las raíces y transpiración de las plantas es utilizada entonces para calcular los cambios de humedad del suelo en el componente de la zona insaturada donde tanto la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real son calculadas.

La evapotranspiración potencial es aquella que ocurre en un sistema suelo/planta cuando el suministro de agua es ilimitado, entonces la evapotranspiración real del sistema alcanza tasas potenciales que necesariamente tienen un límite superior, que de otra forma pudiera ser educido por factores fisiológicos como la apertura y cierre de estomas de las plantas. Aun considerando un suministro ilimitado de agua, existen diversos factores que afectan las tasas de evapotranspiración que siguen siendo estudiados, es por ello que con fines de modelación se ha recurrido a simplificaciones del sistema, en el caso del modelo MIKE SHE se han tomado en cuenta tres enfoques de modelación los cuales le confieren flexibilidad al sistema de acuerdo a las condiciones y adaptándose a la información disponible en cada zona de estudio. En los dos primeros enfoques del modelo la evapotranspiración real funciona a tasas por debajo de la potencial, principalmente debido al efecto de la vegetación, en el tercer enfoque, la limitación de la tasa de evapotranspiración se debe principalmente a la resistencia del suelo no saturado al movimiento del agua. La ecuación utilizada para el cálculo de la evapotranspiración actual es la fórmula propuesta por Penman-Monteith (Monteith 1965).

$$E_a = \frac{R_n \Delta + \frac{\rho C_p \delta_e}{r_a}}{\lambda \left[ \Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]} \quad (3-4)$$

Donde:

$E_a$  - evapotranspiración actual (mm/d);

$R_n$  - radiación neta (MJ/(m<sup>2</sup> d));

$\Delta$  - tasa de incremento de la presión de vapor a saturación del agua a la temperatura del aire (mb/K);

$\rho$  - densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>);

$C_p$  - calor específico del aire a presión constante (J/(K kg));

$\delta_e$  - déficit de presión de vapor del aire (mb);

$r_a$  - resistencia aerodinámica del transporte de vapor del agua (s/m);

$\gamma$  - constante psicrométrica (mb/K);

$\lambda$  - calor latente de vaporización del agua (J/kg);

$r_c$  - resistencia del dosel al transporte del agua (s/m).

El parámetro de resistencia del dosel al transporte del agua ( $r_c$ ) es igual a la resistencia de apertura de las estomas en un clima seco y muy cercano a cero en condiciones de humedad, donde la transpiración ocurre a tasas potenciales:

- $r_c$  es constante para cada tipo de vegetación;
- $r_c$  es variable dependiendo de la tensión de humedad del suelo;
- $r_c$  es cero por lo que la evapotranspiración se efectúa a una tasa potencial.

El modelo MIKE SHE considera además la dependencia de la evapotranspiración actual en función de humedad de suelo (Feddes et al., 1976).

La evapotranspiración actual se calcula para cada celda del modelo y depende de la humedad del dosel y el grado de cobertura del dosel, así mismo la extracción de la humedad por efecto de la transpiración desde la zona de raíces es distribuida en cada una de las celdas del modelo (Beven, 1979).

### **Componente de flujo superficial y flujo en cauces**

Este componente utiliza la información topográfica, la red hidrográfica y parámetros de resistencia de flujo en cauces para trazar el viaje del agua que cae sobre la cuenca hacia el escurrimiento superficial y el flujo en los cauces. La lámina de agua superficial disponible para el escurrimiento es determinada por la lluvia neta, la evaporación, la interceptación, la evapotranspiración y la infiltración, así mismo existe un intercambio entre el flujo de canales y el acuífero que permite un flujo hacia la zona insaturada.

### Escorrimento superficial

Para el cálculo del escurrimiento superficial el modelo MIKE SHE utiliza una solución bidimensional de la ecuación de St. Venant simplificada con el método de la onda difusa e ignorando inercia. El sistema de las ecuaciones utilizado para calcular escorrentía superficial de agua es el siguiente:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = q \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = S_{ox} - S_{fx} \quad \text{direccion } X \quad (3-6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = S_{oy} - S_{fy} \quad \text{direccion } Y \quad (3-7)$$

Donde:

$h(x, y)$  – espesor de agua superficial (en m) en un punto con coordenadas cartesianas horizontales  $x$  y  $y$  (en m);

$t$  – tiempo (s);

$u(x, y)$ ,  $v(x, y)$  - velocidades de flujo (en m/s) en las direcciones respectivamente  $x$  y  $y$ ;

$q(x, y, t)$  - intensidad de precipitación neta menos la infiltración y evaporación posible de algunos charcos o cuerpos temporales del agua superficial (en m/s);

$S_{ox}(x, y)$  y  $S_{oy}(x, y)$  - pendientes del terreno (adimens) n las direcciones respectivamente  $x$  y  $y$ ;

$S_{fx}(x, y)$  y  $S_{fy}(x, y)$  - coeficientes de fricción en las direcciones  $x$  y  $y$ .

Utilizando la fórmula de rugosidad propuesta por Strickler – Manning para cada una de las pendientes de fricción, ecuaciones (3-6) y (3-7), la relación entre las velocidades y el flujo superficial se describe con las siguientes ecuaciones:

$$vh = k_x I_x^{1/2} h^{5/3} \quad (3-8)$$

$$vh = k_x l_x^{1/2} h^{5/3} \quad (3-9)$$

Donde:

$k_x$  y  $k_y$  – coeficientes de Manning para las direcciones x y y respectivamente;

$l_x$  y  $l_y$  – pendientes superficiales para las direcciones x y y respectivamente;

$h$  - espesor de agua superficial (en m).

Las ecuaciones de flujo superficial (3-5) – (3-7) en combinaciones con las ecuaciones de velocidad de flujo superficial (3-8) y (3-9) se resuelven mediante un método de diferencias finitas propuesto por Preissmann and Zaoui (1979).

Flujo en cauces.

El cálculo del flujo en cauces se realiza a partir de las ecuaciones:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(Au)}{\partial x} = q_L \quad (3-10)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = S_{ox} - S_{fx} \quad (3-11)$$

Donde:

$A$  - área transversal del cuerpo de agua en el cauce ( $m^2$ );

$t$  – tiempo (s);

$x$  – distancia a lo largo de cauce (m);

$u$  - velocidades del flujo de agua en cauce (m/s);

$S_{ox}$  - pendiente del fondo del cauce (adim);

$q_L(x)$  – fuente o sumidero correspondiente a la intensidad de la precipitación neta, ingreso o salida posible de un flujo lateral, evaporación de la superficie de agua, percolación al suelo o intercambio posible de agua entre el cauce y acuífero ( $m^2/s$ ).

$h$  - espesor de agua superficial (en m).

La fórmula de Manning y el método de Preissmann and Zaoui (1979) son utilizados para la resolución de las ecuaciones (3-10) y (3-11). Los cálculos del flujo superficial se realicen en cada celda de la cuenca del Río Teapa. Finalmente se obtiene la cantidad de agua superficial de esta cuenca descargada con intervalo de 1 día al río.

### **Componente de la zona insaturada**

Este componente determina la cantidad de agua que se infiltra al suelo a lo largo de la escorrentía superficial, almacena agua en perfil del suelo y causa intercambio entre el agua superficial y agua acuífero.

La zona insaturada del suelo es completamente heterogénea en todas sus propiedades tanto físicas, químicas y biológicas. Por lo tanto distribución de la humedad del suelo y intensidad de infiltración presentan fluctuaciones considerables. El límite de la zona insaturada también varía con respecto al tiempo debido a los cambios en la elevación del manto freático.

El componente de la zona insaturada juega un papel crucial en el modelo MIKE SHE ya que todos los demás componentes se basan en los datos de condiciones de frontera que suministra. El modelo se basa en la suposición de que en esta zona solo existe movimiento vertical del agua, por lo que el cálculo del flujo en la zona insaturada se realiza mediante la ecuación de Richards:

$$c \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k}{\partial z} - s \quad (3-12)$$

Donde:

$\psi(\theta)$  – potencial matricial de agua (en m) del suelo relacionado con su humedad volumétrica  $\theta$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$t$  - tiempo (d);

$z$  - coordenada vertical dirigida arriba (m);

$c = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$  - capacidad de almacenamiento del suelo, máximo valor de la porosidad drenable;

$k(\theta, z)$  = conductividad hidráulica del suelo insaturado (m/d);

$s(z)$  – Término de sumidero de agua correspondiente a los procesos de la evaporación y extracción por las raíces de la vegetación.

Para resolver esta ecuación es necesario determinar dos relaciones, la primera de ellas es entre la conductividad  $k$  y el contenido de humedad volumétrico  $\theta$ , la segunda es entre el potencial matricial  $\psi$  y el contenido de humedad volumétrico  $\theta$ .

Se utilicen las relaciones  $k(\theta, z) = k_s f_1(\theta)$  y  $\psi(\theta) = f_2(\theta)$ , donde  $k_s$  es la conductividad hidráulica del suelo saturado,  $\theta = \theta(z)$  y  $f_1$  y  $f_2$  son las funciones analíticas conocidas los parámetros de las cuales dependen de textura del suelo (Abott *et al.*, 1982; Jensen, 1981 y 1983). A través de relación conocida  $\psi(\theta)$  se obtiene relación  $c(\psi)$  o  $c(\theta)$ .

La ecuación (3-12) se resuelve mediante método implícito de diferencias finitas. A esta ecuación se aplican las condiciones de frontera superior (superficie del suelo) y la frontera inferior (superficie de manto freático), así como la condición inicial de humedad del suelo que influye sobre el proceso de formación de escorrentía superficial. En la frontera superior se simula proceso o evapotranspiración o infiltración de agua de lluvia. En el caso de la lluvia se considera su intensidad de la cual depende la tasa de infiltración al suelo. También se toma en consideración la posibilidad de formación de lámina de agua sobre la superficie del suelo. En la frontera inferior se simula intercambio de agua entre la zona insaturada y la zona saturada (cuerpo de agua freática).

Para utilizar la ecuación (3-12) es necesario conocer la conductividad hidráulica del suelo saturado y la textura del suelo, Los cálculos de evapotranspiración e infiltración de agua superficial al suelo se realizan en cada celda del modelo de la cuenca hidrológica del Río Teapa.

Uno de los problemas particularmente complicados es la variación en el nivel de la superficie freática, dado que para ello es necesario vincular el flujo unidimensional de la zona insaturada con el flujo bidimensional de la zona saturada. En el modelo MIKE SHE se utiliza un enfoque de análisis similar al de Belmans *et al.* (1983) basado en el balance hídrico de la columna total del perfil del suelo incluyendo la zona saturada.

### Componente de la zona saturada

Este componente calcula el nivel freático y el flujo de agua freática hacia cauces. El modelo MIKE SHE describe movimiento de agua en la zona saturada a la cual corresponde el cuerpo de agua freática. El componente recibe las tasas de percolación de agua de la zona insaturada que es considerada como su límite superior, por el contrario el límite inferior de esta capa se considera que puede ser un lecho impermeable o considerar un estrato que permita el intercambio de agua entre el manto freático y el acuífero.

Para calcular la profundidad y el flujo de agua freática se utilice la ecuación bidimensional de Boussinesq para caso de un acuífero heterogéneo (Abbott et al., 1986b):

$$\delta \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y T \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \varepsilon \quad (3-13)$$

Donde

$\delta(x,y)$  – porosidad drenable (adim);

$H(x,y,t)$  – profundidad del nivel freático (m);

$k_x$  y  $k_y$  - conductividad hidráulica a saturación (m/d) en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente;

$T$  - espesor de la zona saturada (m);

$t$  = tiempo (d);

$\varepsilon$  - intensidad de recarga o descarga del cuerpo freático (m/d) como resultado de percolación profunda de agua a través de perfil del suelo o flujo ascendente de agua del manto freático a la zona insaturada o en proceso de intercambio de agua con el acuífero inferior o en proceso de intercambio horizontal de agua subterránea con las celdas colaterales.

La ecuación (3-13) se resuelve mediante una aproximación de diferencias finitas, mediante un esquema iterativo. Se toma en cuenta la posibilidad de desaparición de la zona saturada o desaparición de la zona insaturada en caso de elevación de la superficie freática hasta la superficie del suelo. Las interacciones entre la zona saturada y los acuíferos consideran las siguientes situaciones.



- Superficie freática en contacto directo con el escurrimiento superficial
- Superficie freática en contacto directo con el lecho seco de un cauce
- Superficie freática se encuentra por debajo del escurrimiento superficial o debajo de un arroyo seco.

#### **4 MATERIALES Y MÉTODOS**

El esquema metodológico general para la realización del presente trabajo se dividió en tres grandes partes:

- Recopilación, sistematización y análisis de la información existente.
- Integración de la información dentro del modelo MIKE SHE y cálculo del gasto del Río Teapa como resultado de los diferentes procesos hidrológicos.
- Análisis de los resultados del cálculo de gasto del Río Teapa mediante su calibración y validación comparándolos con los datos similares observados en las estaciones hidrométricas “Teapa” y “El Refugio”.

##### **4.1 Localización del área de estudio**

La cuenca del Río Teapa tiene su origen en las montañas del norte de Chiapas, en el municipio de Rayón Chiapas, el cauce principal confluye con el río La Sierra en el municipio de Teapa, Tabasco del cual toma su nombre. Las coordenadas extremas de la cuenca son  $17^{\circ}34'5.24''$  y  $17^{\circ}10'58.03''$  de latitud Norte y entre  $92^{\circ}54'19.9''$  y  $93^{\circ}64'54.83''$  de longitud Oeste.

La cuenca se encuentra localizada dentro de once municipios del estado de Chiapas y uno del estado de Tabasco, los municipios de Solosuchiapa, Ixhuatán e Ixtapangajoya son los que ocupan mayor superficie del área de estudio.

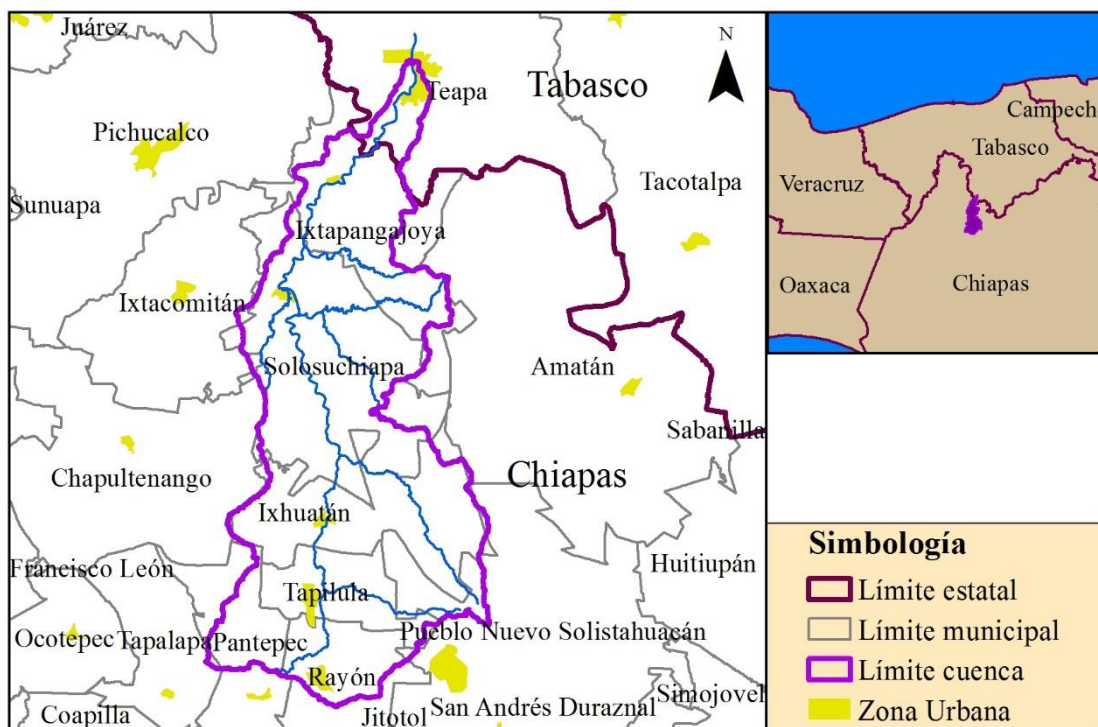


Figura 4-1. Ubicación geopolítica de la cuenca del Río Teapa

Cuadro 4-1. Municipios de la cuenca del Río Teapa.

Municipio	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
Amatán	0.494	0.115
Chapultenango	0.465	0.108
Ixhuatán	88.776	20.609
Ixtacomitán	1.786	0.415
Ixtapangajoya	68.757	15.962
Pantepec	23.361	5.423
Pueblo Nuevo Solistahuacán	21.566	5.007
Rayón	33.880	7.865
Solosuchiapa	133.937	31.093
Tapalapa	0.515	0.120
Tapilula	41.709	9.683
Teapa	15.516	3.602
total	430.762	100.000

La cuenca del Río Teapa se encuentra en la región hidrológica número 30 (RH 30) “Ríos Grijalva – Usumacinta”, corresponde a la cuenca del río Grijalva – Villahermosa (RH30 D) y a la subcuenca del río de la Sierra (RH30Di). Para el caso de este trabajo se delimito la cuenca del Río Teapa considerando como punto de salida a la estación hidrométrica Teapa con clave 30032,

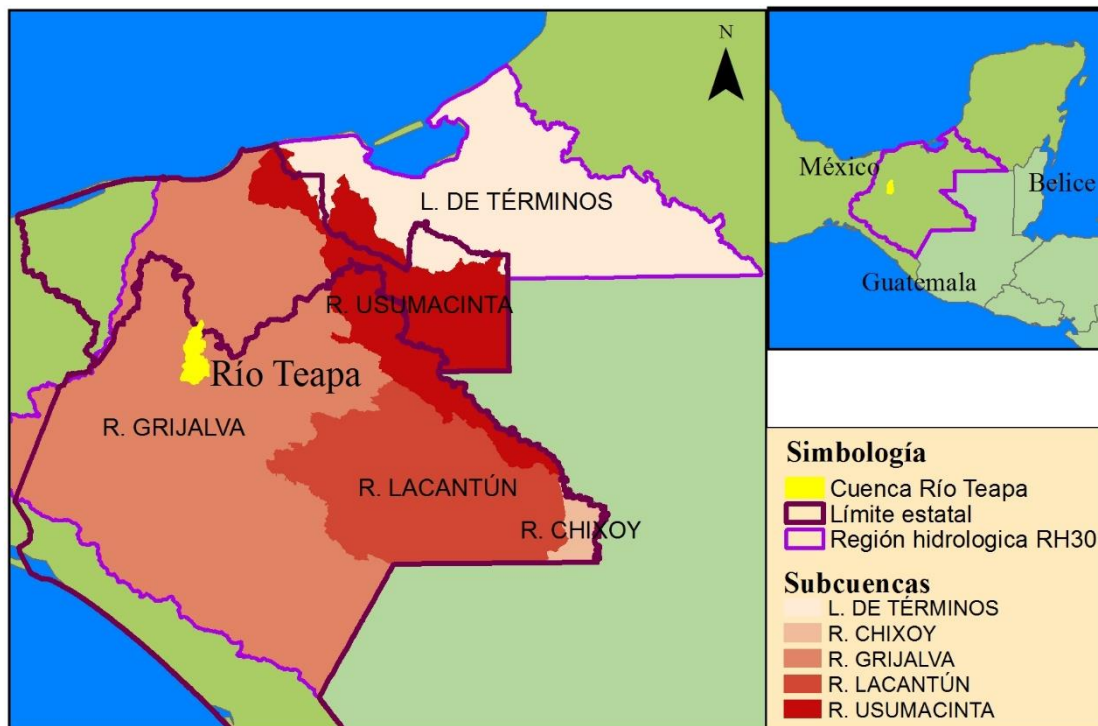


Figura 4-2. Localización hidrológica de la cuenca del **Río Teapa**.

Cuadro 4-2. Comparación de las diferentes unidades hidrológicas.

Unidad hidrológica	Nombre	Clave	superficie (Km2)
Región Hidrológica	ríos Grijalva - Usumacinta	RH30	103879.06
Cuenca	río Grijalva	RH30D	52584.86
Subcuenca	río de la Sierra	RH30Di	1073.57
Cuenca de estudio	Río Teapa	-	430.7

#### 4.2 Caracterización morfométrica de la cuenca.

Dentro del análisis hidrológico se han propuesto muchas formas numéricas para describir las diferentes características de una cuenca, dentro de las cuales a continuación se mencionan aquellas que parecen tener una relevancia especial en hidrología. Esta

información se ha utilizado en proceso de cálculo del régimen hidrológico del Río Teapa utilizando el modelo MIKE SHE.

#### 4.2.1 Área de la cuenca

- El área de la cuenca es una característica importante desde varios puntos de vista:
- Es un valor importante que sirve de base para el cálculo de otras características
- El aumento del área de la cuenca actúa como un factor de compensación, de manera que es más fácil que se registren avenidas repentinas en cuencas pequeñas que en cuencas grandes.

La cuenca del Río Teapa comprende 430.7 Km<sup>2</sup> aproximadamente.

#### 4.2.2 Red de drenaje

La red de drenaje natural de una cuenca, indica el grado de eficiencia de la cuenca para desalojar los escurrimientos superficiales. Por lo tanto, conocer las características de la red de drenaje es importante debido a que relaciona la magnitud de los escurrimientos, su trayectoria y el tiempo de concentración. Esta red se presenta en la Figura 4-3. Como se ve, la red de drenaje de la cuenca del Río Teapa muestra un alto grado de complejidad lo que corresponde con la complejidad del relieve.

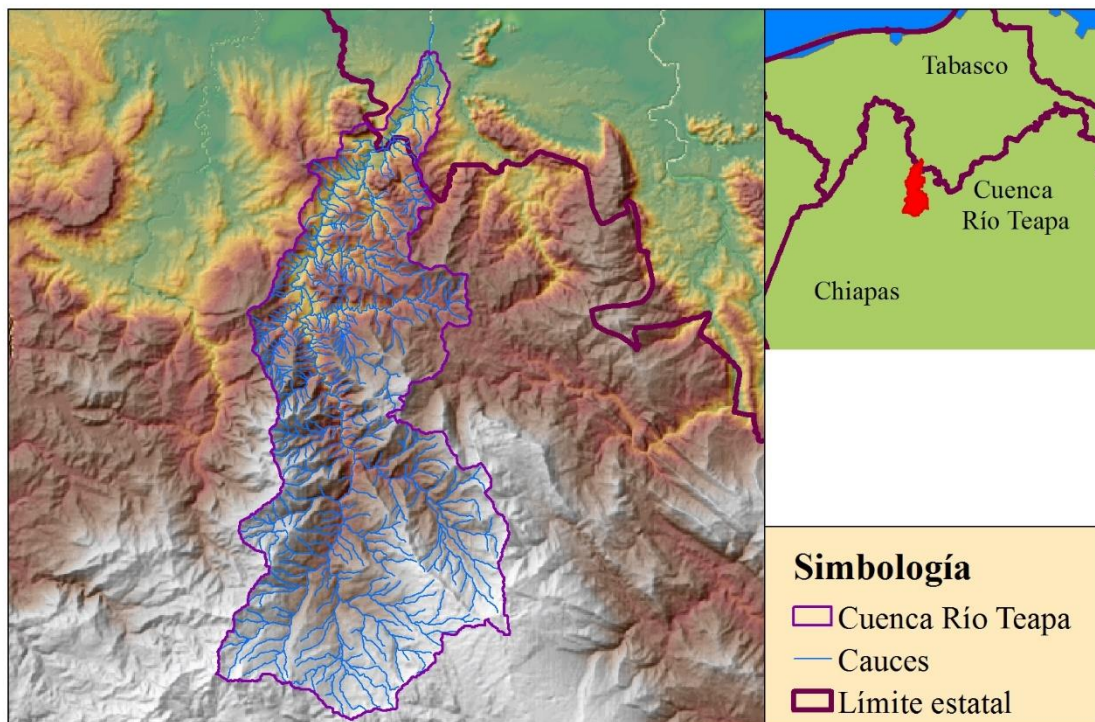


Figura 4-3. Red hidrográfica de la cuenca del Río Teapa

### **Clasificación de corrientes**

Las corrientes se pueden clasificar en tres clases dependiendo del tipo de escurrimiento, el cual involucra las características físicas y condiciones climáticas de la cuenca, así las corrientes pueden ser: efímera, intermitente y perenne. De acuerdo a la red hidrográfica escala 1:50 000, edición 2.0 de INEGI (2010). En la cuenca del Río Teapa se identificaron 449 corrientes de las cuales 25 son perennes y el resto son intermitentes.

### **Orden de cauces**

La red de drenaje de una cuenca está compuesta de un cauce principal y de una serie de corrientes tributarias que se extienden hacia las partes más altas de las cuencas.

De acuerdo con el criterio de ordenación de cauces de STRAHLER, (1957) una corriente tributaria que no recibe ninguna aportación de otra corriente se denomina de orden 1. Las corrientes tributarias cuyos aportes son exclusivamente de orden 1 y confluyen a otra corriente se denomina de orden 2 y sucesivamente. De esta manera el orden máximo de los cursos de la cuenca es de orden "n" que será finalmente la corriente principal.

La clasificación del orden de las corrientes del Río Teapa indica que el cauce principal corresponde al orden VI, el tributario Río Negro corresponde al orden V y los tributarios río San José, río la Sierra, río Moquimba y río Jucubia corresponden al orden IV.

### **Longitud de tributarios**

La topografía de una cuenca define en sí la longitud de los tributarios, ya que estos son indicadores de la pendiente. Generalmente las áreas escarpadas y con buen drenaje tienen numerosas corrientes pequeñas y efímeras, por el contrario, las áreas planas con suelos profundos y permeables tienen corrientes largas y perennes. Como se ve en el Cuadro 4-3 el 73% de los cauces la cuenca del Río Teapa son de primer orden con una longitud promedio de 1.09 km, lo que corresponde a una cuenca con un buen drenaje debido a las zonas escarpadas y las fuertes pendientes de la parte alta.

Cuadro 4-3. Longitud de los tributarios de la cuenca del Río Teapa

Orden de las corrientes	No. De corrientes	Longitud acumulada (km)	Longitud promedio (km)
1	327	358.52	1.09
2	94	196.21	2.08
3	20	89.55	4.47
4	6	55.03	9.17
5	1	16.41	16.41
6	1	62.06	62.06
Total	449	777.8	1.73

### Densidad de corrientes

Esta característica es un indicador de la eficiencia de drenaje de una cuenca, es decir, la rapidez con la que el escurrimiento es desalojado de la cuenca. Este elemento debe manejarse con criterio, debido a que puede ocurrir que se tengan dos cuencas diferentes con la misma densidad de corrientes y estar drenadas en diferente forma, dependiendo de la longitud y disposición de sus corrientes.

La densidad de corrientes o frecuencia de corrientes se determina por la relación de la cantidad de corrientes que existen en la cuenca entre la superficie total de ésta, en el caso de la cuenca del Río Teapa tenemos:

$$D_c = \frac{N_c}{A} = \frac{449}{430.76} = 1.042 \quad (4-1)$$

Donde:

$D_c$  - densidad de corrientes ( $N_c/km^2$ )

$N_c$  - número de corrientes

$A$  - área de la cuenca (en  $km^2$ )

### Densidad de drenaje

Esta característica expresa la longitud de las corrientes por unidad de área. Resulta de dividir la longitud total de las corrientes de agua entre la superficie total de la cuenca. En el caso de la cuenca del Río Teapa tenemos:

$$Dd = \frac{L}{A} = \frac{777.8}{430.76} = 1.805 \quad (4-2)$$

Donde:

Dd - densidad de drenaje (en km/km<sup>2</sup>)

L - longitud total de los canales de agua (en km)

A - área total de la cuenca (en km<sup>2</sup>)

### Relación de bifurcación

Esta característica se usa para expresar la proporción del número de corrientes de un orden determinado entre el número de corrientes de orden inmediato superior. Como se puede observar en el

Cuadro 4-4, la relación de bifurcación de las corrientes existentes en la cuenca del Río Teapa indica una gran cantidad de tributarios de orden uno y dos que aportan escurrimientos a los de orden tres y cuatro y una menor cantidad de tributarios hacia los órdenes cinco y seis lo que indica una alta densidad de corrientes en la cuenca.

Cuadro 4-4. Relación de bifurcación de las corrientes de la cuenca del Río Teapa

Orden de las corrientes	No. de corrientes	Relación de bifurcación (adim.)
1	327	3.48
2	94	4.70
3	20	3.33
4	6	6.00
5	1	1.00
6	1	0.00
Total	449	

### 4.2.3 Forma de la cuenca

La forma de la cuenca tiene influencia sobre los escurrimientos y sobre el tipo de hidrograma resultante en una precipitación dada, presenta además gran interés en el tiempo que tarda en llegar el agua de los límites de la cuenca a la salida de la misma. Los escurrimientos de una cuenca de forma circular serán diferentes que los de otra

cuenca estrecha y alargada de la misma superficie. En las cuencas de forma alargada el agua escurre generalmente por un sólo cauce principal, en las cuencas de forma circular los escurrimientos recorren cauces secundarios hasta llegar a uno principal, por lo que su tiempo de concentración será superior. Como se ve en la Figura 4-3 la forma de la cuenca del Río Teapa corresponde a una cuenca alargada con un cauce principal bien definido que presenta una gran cantidad de tributarios.

### **Coeficiente de compacidad**

El coeficiente de compacidad  $K_c$ , es la relación que existe entre el perímetro  $P$  de la cuenca y el perímetro de un círculo que tenga la misma superficie. En el caso de la cuenca del Río Teapa tenemos que el coeficiente de compacidad es mayor de 2 lo que indica la forma alargada de la cuenca

$$K_c = \frac{P}{p} = \frac{173.98}{73.573} = 2.364 \quad (4-3)$$

Donde:

$K_c$  - coeficiente de compacidad (adimensional)

$P$  - perímetro de la cuenca (km)

$p$  - perímetro de un círculo con igual superficie  $A$  de la cuenca (km)

### **Coeficiente de forma**

Este coeficiente es la relación entre el ancho promedio de la cuenca y la longitud de la corriente principal. En el caso de la cuenca del Río Teapa tenemos que el ancho de la cuenca es apenas de un sexto en comparación con la longitud total de la cuenca:

$$K_f = \frac{b_m}{L_a} = \frac{10.546}{62.056} = 0.169 \quad (4-4)$$

Donde:

$K_f$  - coeficiente de forma (adimensional)



$b_m$  - ancho promedio de la cuenca (km)

$L_a$  - longitud axial del cauce principal (km)

### Relación de forma

Esta relación es también conocida como relación de circularidad. Se define como la relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo que tiene el mismo perímetro de la cuenca. Para el caso de la cuenca del Río Teapa tenemos:

$$R_c = \frac{A}{A_c} = \frac{430.762}{2408.843} = 0.179 \quad (4-5)$$

Donde:

$R_c$  - relación de forma, (adimensional)

$A$  - área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$A_c$  - área de un círculo con el mismo perímetro de la cuenca (km<sup>2</sup>).

### Índice de forma

El índice de forma se define como la relación que existe entre el área de la cuenca y la longitud de la cuenca, medida esta última, desde la salida hasta el límite de la misma, por medio de una línea recta. Para el caso de la cuenca del Río Teapa tenemos:

$$R_f = \frac{A}{L_c} = \frac{430.762}{42.850} = 10.053 \quad (4-6)$$

Donde:

$R_f$  - índice de forma (adimensional)

$A$  - área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$L_c$  - longitud de la cuenca (km<sup>2</sup>)

### **Relación de elongación**

Es la relación entre el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca y la máxima longitud de la cuenca. Para el caso de la cuenca del Río Teapa tenemos que la relación de elongación confirma el carácter alargado de la cuenca:

$$R_e = \frac{D_c}{L_c} = \frac{23.419}{42.850} = 0.547 \quad (4-7)$$

Donde:

$R_e$  - relación de elongación (adimensional)

$D_c$  - diámetro de un círculo de igual área que la cuenca (km)

$L_c$  - longitud máxima de la cuenca (km)

#### **4.2.4 Relieve de la cuenca**

La influencia del relieve sobre el hidrograma es aún más evidente que las características basadas en la red de drenaje y la forma de la cuenca. A mayor pendiente corresponderá un menor tiempo de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal. El relieve de la cuenca se puede inferir en función de la curva hipsométrica, el rectángulo equivalente, la pendiente media de la cuenca y el perfil longitudinal del cauce principal.

##### **Curva hipsométrica**

La curva hipsométrica de la cuenca representa gráficamente la distribución de altitudes en función de la superficie acumulada. Esta información se presenta en la Figura 4-4, Como se ve en la cuenca del Río Teapa más del 50 % de su superficie se encuentra por encima de los 600 msnm, así mismo existe una diferencia de altitud de 2400 m lo que corresponde al carácter montañoso de la parte alta pero que se equilibra con la presencia de planicies en la zona baja de la cuenca.

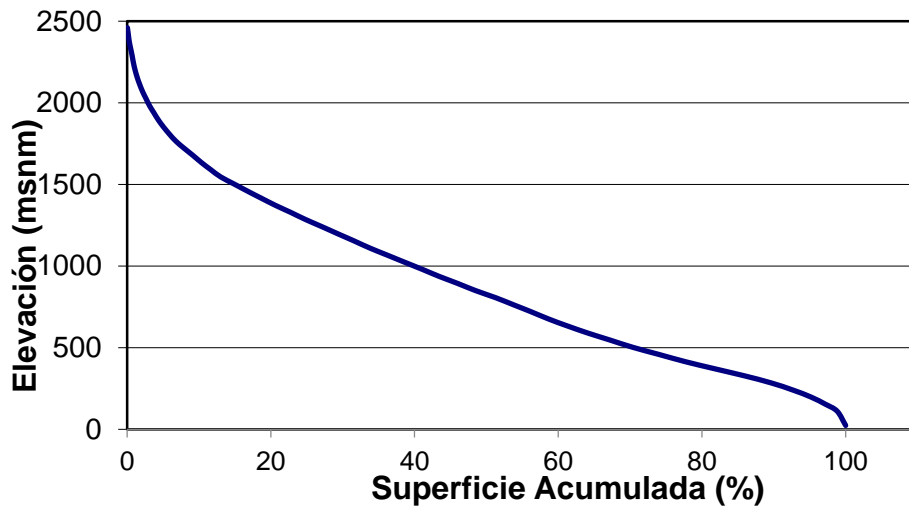


Figura 4-4. Curva hipsométrica de la cuenca del Río Teapa

### Perfil longitudinal del cauce

El perfil longitudinal del cauce principal de una cuenca es una gráfica que representa las diferentes elevaciones desde el punto más alejado de la cuenca hasta su punto de control o su desembocadura. Como se observa en la Figura 4-5, en el caso de la cuenca del Río Teapa el perfil del cauce principal presenta una pendiente media de 22% y una diferencia de nivel de 2320 m.

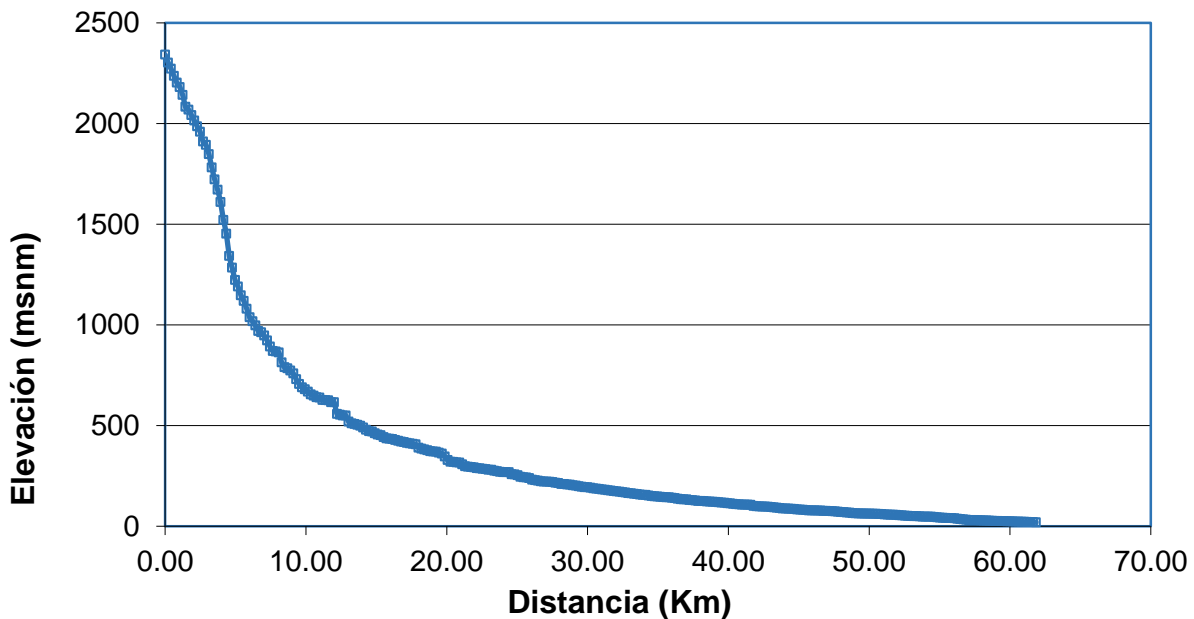


Figura 4-5.- Perfil longitudinal del cauce principal de la cuenca del Río Teapa

### 4.3 Caracterización biofísica de la cuenca

La caracterización biofísica de una cuenca comprende la descripción detallada de los elementos naturales que conforman una cuenca y aquellos que tienen una influencia directa sobre el comportamiento hidrológico de la misma.

#### 4.3.1 Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García. El clima predominante en la cuenca del Río Teapa corresponde a un clima cálido húmedo con lluvias en verano y parte del otoño, estas lluvias se encuentran fuertemente influenciadas por la presencia de ciclones tropicales, asimismo es posible identificar una época de seca bien marcada debido a la distribución de las lluvias sobre la sierra madre de Chiapas, las principales diferencias climáticas en la zona corresponden al incremento de las lluvias invernales, producido principalmente por la influencia de los “nortes” y que originan precipitaciones orográficas en las laderas de la sierra y parte de las llanuras. Las zonas climáticas de la cuenca del Río Teapa se muestran en la Figura 4-6

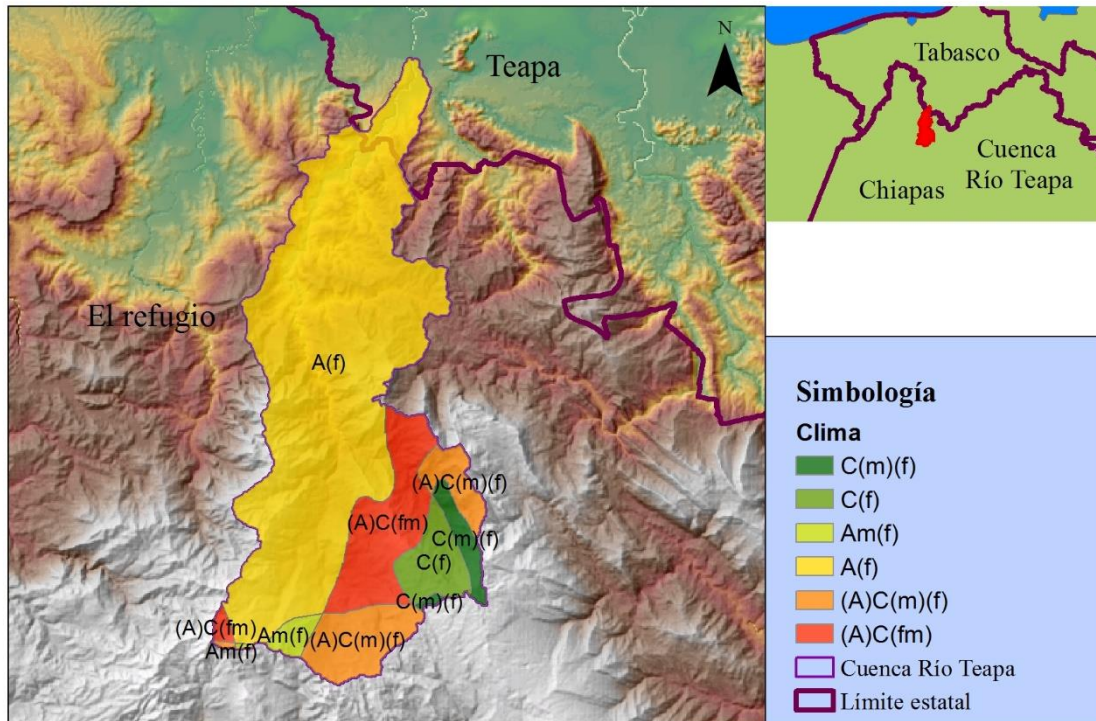


Figura 4-6. Clima en la cuenca del Río Teapa (INEGI 1980)

Como se puede apreciar el clima A (f), cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C es el clima predominante en la cuenca del Río Teapa. Este clima caracteriza alrededor del 63% de la superficie de la cuenca en la parte baja y media, mientras que la parte alta de la cuenca presenta climas semicálidos húmedos y templados húmedos.

#### 4.3.2 Uso de suelo y vegetación

De acuerdo con la carta de uso de suelo y vegetación del INEGI serie V (INEGI 2014), el uso de suelo y vegetación existentes en la cuenca del Río Teapa, se encuentra dominada por la presencia de pastizales cultivados que con una superficie de 207 Km<sup>2</sup> representa el 48 % de la ocupación del territorio, el segundo uso de suelo más importante en cuanto a superficie se refiere es la agricultura de temporal permanente que representa el 18 % con cerca de 81Km<sup>2</sup>. El resto de la superficie de la cuenca se encuentra dividida en diversos tipos de uso de suelo y vegetación en su mayoría vegetación secundaria y arbustiva de selvas altas perennifolias y bosques mesófilo de montaña. En la Figura 4-7

se presenta la información sobre la distribución de los tipos de uso de suelo en la cuenca del Río Teapa.

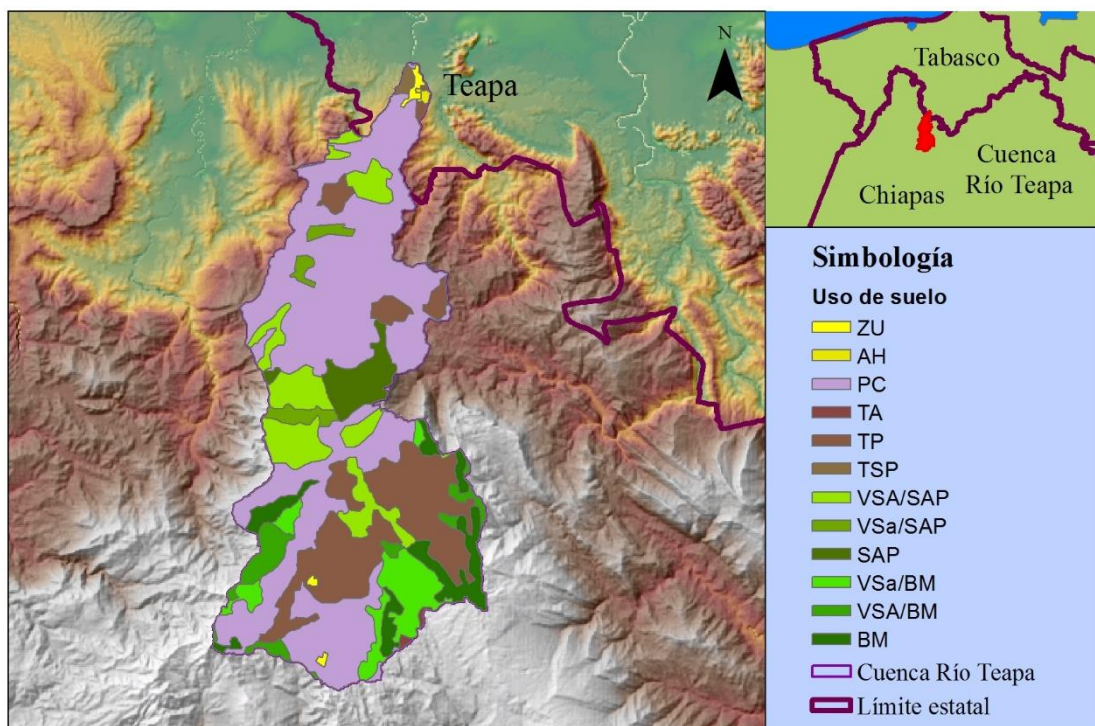


Figura 4-7. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del Río Teapa (INEGI 2014)

Como se puede observar la mayor parte de la superficie de la cuenca presenta una vegetación alterada por las actividades humanas, principalmente por el cambio de uso de suelo de selvas hacia pastizales cultivados y agricultura de temporal.

Cuadro 4-5. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del Río Teapa.

Uso de suelo y vegetación	Clave	Superficie (km <sup>2</sup> )	Superficie (%)
Agricultura de temporal anual	Ta	1.03	0.23
Agricultura de temporal permanente	Tp	81.61	18.94
Agricultura de temporal semipermanente y permanente	Tsp	1.51	0.35
Asentamientos humanos	Ah	0.59	0.13
Bosque mesófilo de montaña	Bm	25.27	5.86
Pastizal cultivado	Pc	207.02	48.06
Selva alta perennifolia	Sap	16.15	3.74
Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña	Vsa/bm	14.50	3.36

Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia	Vsa/sap	45.84	10.64
Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña	Vsa/bm	26.22	6.08
Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia	Vsa/sap	8.67	2.01
Zona urbana	Zu	2.29	0.53
Total	-	430.76	100

De acuerdo con el Cuadro 4-5 se puede observar que casi el 99% de la cuenca presenta cobertura vegetal, el 32% corresponde a vegetación natural y alrededor de 67% se presenta como vegetación agrícola y pastizales cultivados. Esto muestra que la actividad humana en forma de asentamientos y otras infraestructuras no tiene gran importancia para el régimen hidrológico de esta cuenca.

#### **4.3.3 Unidades de suelo.**

Típicamente dentro de la cartografía edafológica existente en nuestro país se pueden identificar dos clases de información, la primera de ella es referente a las series de suelos y se encuentra representada por los perfiles de suelos que contienen características específicas y únicas de cada sitio donde fueron realizados, la segunda clase se refiere a las unidades de suelos de un territorio, en este caso se agrupan suelos con características físicas y químicas similares lo que permite un análisis regional.

La información edafológica utilizada para este trabajo fue la publicada en (INEGI 2014) correspondiente a la Serie II de INEGI generada en el periodo 2002-2006 utilizando para la clasificación de los suelos el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (por sus siglas en inglés World Reference Base for Soil Resources WRB). La distribución de los suelos en la cuenca del Río Teapa se muestra en la Figura 4-8.

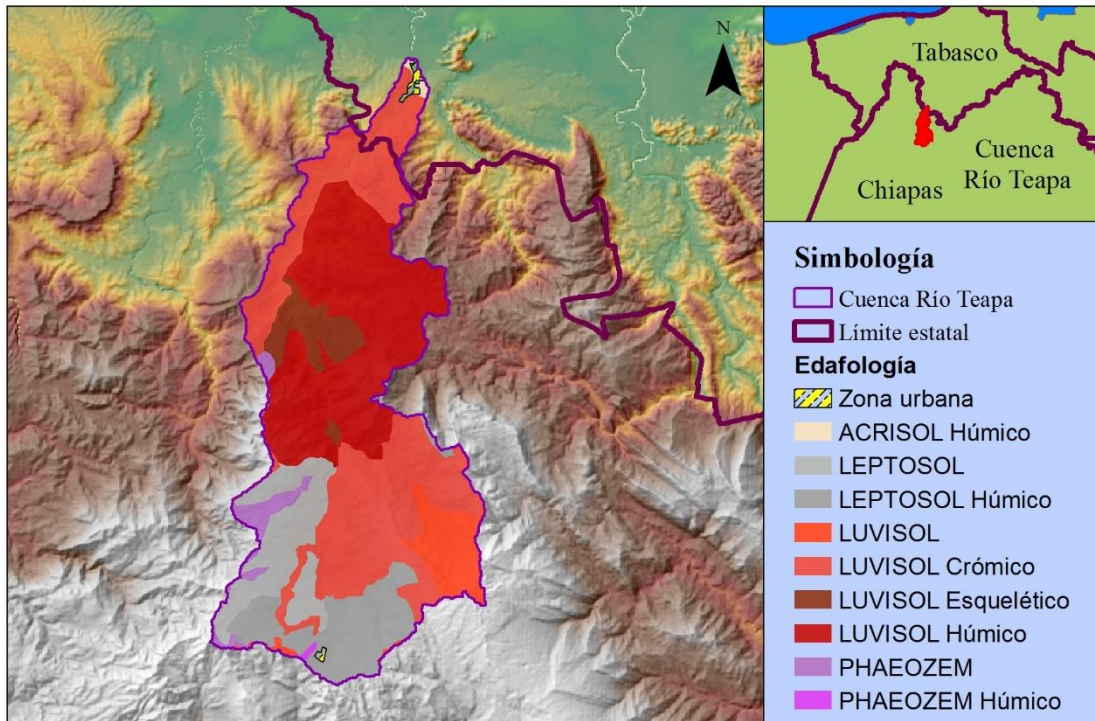


Figura 4-8. Edafología de la cuenca del Río Teapa (INEGI 2014)

Como se puede observar los luvisoles son el grupo de suelos más abundantes en la cuenca, con menor presencia de acrisoles, leptosoles y phaeozem, las características principales de estos suelos se describen a continuación.

### **Acrisoles**

Este grupo de suelos es característico de las zonas con altas precipitaciones que ocasionan la migración de arcillas hacia los horizontes subsuperficiales, en el caso de la cuenca del Río Teapa se encuentran ubicados en las zonas aledañas a la comunidad de Teapa Tabasco, su uso principal en esta región es de pastizales cultivados, dado el alto contenido de arcilla y su baja conductividad hidráulica son suelos con drenaje deficiente y difíciles de utilizar para la agricultura.

### **Leptosoles**

Los leptosoles son el segundo grupo predominante en la cuenca del Río Teapa después de los luvisoles, estos suelos se encuentran presentes en las regiones más altas de la cuenca, principalmente en la zona suroeste, la característica principal de estos suelos es



la presencia de un horizonte lítico muy cercano a la superficie lo que los convierte en suelos muy someros y susceptibles a la erosión si se les descubre de su cubierta vegetal, en el caso de la cuenca de Río Teapa estos suelos se encuentran cubiertos por pastizales cultivados y vegetación secundaria. En muy escasa superficie aún conservan relictos de bosque mesófilo de montaña.

### **Phaeozems**

Este grupo de suelos se encuentra presente en las zonas altas de cuenca del Río Teapa, son suelos ricos en bases en el horizonte subsuperficial, por lo que son capaces de soportar vegetaciones abundantes, este grupo de suelos se ubica principalmente en la zona de lomeríos del suroeste de la cuenca en algunas mesetas formadas entre zonas más escarpadas presentan vegetación secundaria y zonas de bosque mesófilo de montaña, son suelos muy susceptibles a degradarse por erosión si son despojados de la vegetación que los cubre.

### **Luisoles**

Los luisoles son el grupo de suelos predominante en la cuenca del Río Teapa, la principal característica de estos suelos es su alto grado de lavado del horizonte superficial debido principalmente a la gran cantidad de precipitación de la zona, dada la variabilidad fisiográfica de la zona es posible encontrar diferentes subgrupos de luisoles sin embargo los luisoles endolepticos son más comunes debido a la presencia de fases líticas en la región. La mayor superficie de luisoles en la cuenca sostiene pastizales cultivados y en menor proporción agricultura de temporal.

## **4.4 Información hidrométrica y meteorológica**

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó información hidrométrica y meteorológica proporcionada por el Organismo de cuenca frontera sur (OCFS) localizado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, el cual se encuentra a cargo de la Comisión Nacional del Agua (SMN, 2013; CONAGUA, 2013).

### **4.4.1 Precipitación**

De acuerdo al análisis de la información existente en la región, se utilizaron datos meteorológicos provenientes de tres estaciones meteorológicas convencionales y una

estación meteorológica automatizada. Considerando como factor importante de evaluación las diferentes escalas de tiempo y los tiempos de operación de cada una de las estaciones.

### Estaciones meteorológicas convencionales

Considerando la distribución espacial de las estaciones meteorológicas y su zona de influencia se seleccionaron las estaciones meteorológicas convencionales Teapa (27044), Solosuchiapa (7217) y Tapilula (7167) para su utilización en el análisis hidrológico de la cuenca.

La distribución de las tres estaciones seleccionadas corresponde con la regionalización climática de la cuenca analizada anteriormente. La estación con mayor influencia en el comportamiento climático de la zona de estudios es la estación Solosuchiapa (7217) ubicada en el municipio del mismo nombre. En la Figura 4-9 se puede observar la ubicación de las tres estaciones dentro de la cuenca del Río Teapa.

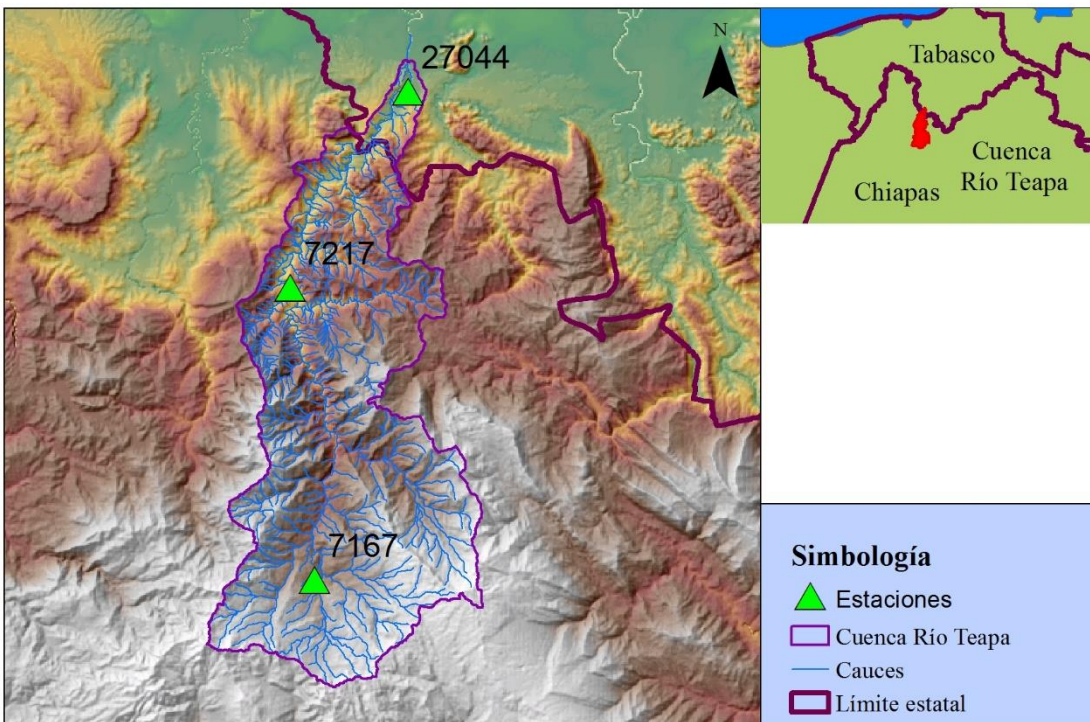


Figura 4-9. Localización de las estaciones meteorológicas convencionales en la cuenca del Río Teapa

Las variables utilizadas para la realización de este trabajo corresponden a los registros de:

- Precipitación acumulada diaria
- Temperatura máxima y mínima diarias
- Evaporación potencial diaria

Los datos descriptivos oficiales de las estaciones utilizadas se pueden consultar en el Anexo 4.

### **Estaciones automatizadas**

La única estación meteorológica automatizada Tapilula, se localiza en el municipio de Tapilula Chiapas, dentro de las instalaciones de la Escuela Secundaria Técnica No. 45. Sus coordenadas geográficas son: 17° 14' 58.56" Lat N, 93° 00' 46.44" Long O, a una altitud de 750 m.s.n.m.

La estación meteorológica automatizada Tapilula cuenta con el siguiente instrumental

- Sensor de temperatura y de humedad relativa OTT-Thies
- Sensor de velocidad y dirección del viento ultrasónico digital OTT-Thies modelo 2D.
- Sensor de precipitación OTT modelo Pluvio 2.
- Sensor de presión atmosférica OTT Setra 278.
- Sensor de radiación solar OTT Splite 2.

Las variables utilizadas para la realización de este trabajo corresponden a los registros de:

- Precipitación eventual (intervalo 10 minutos)
- Precipitación acumulada diaria
- Temperatura del aire registrada cada 10 minutos
- Radiación solar global registrada cada 10 minutos



Figura 4-10. Estación meteorología automatizada Tapilula.

#### **4.4.2 Hidrometría**

De acuerdo con el análisis de la información existente se utilizaron los datos hidrométricos provenientes de la estación hidrométrica convencional (EH) “Teapa” y la estación hidrométrica automatizada (EHA) “El Refugio”

##### **Estación hidrométrica convencional**

La estación hidrométrica convencional utilizada durante este trabajo fue la estación Teapa (30032) ubicada en el municipio del mismo nombre, las coordenadas de localización son 17° 33′ 56.31” Lat N, 92° 57′ 12.84” Long O. La estación hidrométrica Teapa cuenta con un periodo de funcionamiento a partir de 01 de mayo de 1950 hasta el 31 de diciembre de 2011. La sección hidráulica de la estación se encuentra en un tramo recto del río, con un claro de 80m, los taludes son poco inclinados y se encuentran cubiertos de vegetación, el fondo de la sección está cubierto de gravas y arenas, los aforos se realizan mediante un molinete utilizando el sistema de cable y cayuco para cruzar el cauce.

Los valores utilizados para la realización de este trabajo corresponden a los registros de:

- Gastos diarios
- Gastos máximos mensuales
- Lectura de escala del gasto máximo mensual
- Fecha y hora de ocurrencia del gasto máximo mensual

### **Estación automatizada**

La estación hidrométrica automatizada “El Refugio” se localiza en el municipio de Solosuchiapa, Tabasco, Los instrumentos de suministro de energía, de registro de datos y la telemetría satelital se encuentran ubicados en el rancho El Refugio, Sus coordenadas geográficas son: 17° 24´50.04 Lat. N, 17° 24´50.04 Long. O y altitud de 179 m.s.n.m. Los sensores de medición de velocidad y nivel del agua se ubican por debajo de la estructura del puente vehicular que conduce a la comunidad de Álvaro Obregón municipio de Solosuchiapa.



Figura 4-11. Estación hidrométrica automatizada El Refugio

La estación hidrométrica automatizada El Refugio cuenta con un periodo de funcionamiento a partir del 8 de junio de 2011 a las 23:20 a la fecha. El periodo utilizado para la realización de este trabajo comprende hasta el día 2 de junio de 2013 a las 16:40. Los valores utilizados para la realización de este trabajo corresponden a los registros de:

- Nivel promedio de la superficie de agua registrado cada 10 minutos
- Velocidad del flujo de agua en el río registrado promedio cada 10 minutos

### **Sensores**

De acuerdo a las necesidades de modernización de las estaciones y de ampliación de la cobertura de las redes hidrométricas es cada vez más común la utilización de sensores de radar en el monitoreo y aforo de escurrimientos naturales. (Stephan, 2000)

Tradicionalmente el aforo de los ríos se lleva a cabo mediante diferentes técnicas, los sensores comunes deducen elevación de la superficie libre del agua a partir de la medición de alguno de los siguientes factores.

- La presión de la columna de agua por encima del sensor (calibrador de presión)
- El desplazamiento de un flotador con respecto a un nivel base (limnímetros y limnógrafos)
- La resistencia eléctrica de la columna de agua entre dos electrodos metálicos (indicador de nivel eléctrico)
- El tiempo de desplazamiento del impulso de ondas de radio desde el sensor hasta la superficie del agua y de retorno al sensor (radar de impulsos indicador de nivel)
- El desplazamiento de fase entre dos señales continuas de ondas de radio, uno emitido desde el sensor a la superficie y el otro reflejado desde la superficie hasta el sensor (radar de onda continua indicador de nivel)

En comparación con los sensores tradicionales los indicadores de nivel de radar, al contar con un sistema de medición a distancia, presentan ventajas comparativas ya que no hay contacto directo con el agua por lo que no hay problemas de corrosión de los instrumentos y se disminuye la posibilidad de sufrir un golpe sobre el cuerpo del sensor. Sin embargo, hay algunos problemas con la utilización de estos sensores para el aforo de corrientes naturales;

- Requiere del montaje del sensor en una estructura firme y segura ubicada sobre el sitio donde se llevaran a cabo las mediciones.
- El transporte de sedimentos del agua, así como los posibles residuos que flotan sobre la superficie pueden alterar las mediciones del sensor.
- El sensor de radar obtiene una medición de nivel a partir del promedio de una superficie de lectura, dicha superficie depende de la altura a la que se realice la medición.
- El reflejo de las ondas de radio presenta modificaciones dependiendo de la pendiente de la superficie del agua.

### **Sensor de radar OTT RLS**

Este sensor (Figura 4-12 y Figura 4-13) sirve para medir, sin contacto físico directo, niveles de agua superficiales. El OTT RLS se basa en la tecnología de radar por impulsos. La antena emite para ello, breves impulsos de radar de la banda ISM 24 GHz. La antena receptora separada, recibe estos impulsos reflejados en la superficie del agua y calcula la distancia entre el sensor y la superficie del agua; el tiempo que tardan los impulsos de radar desde que se envían hasta que se reciben es proporcional a la distancia entre el sensor y la superficie del agua.

El sensor está diseñado para resistir las inundaciones (principio de la campana de inmersión) siempre y cuando se encuentre montado correctamente. La distancia mínima para una correcta medición es de 0.8m y el tiempo promedio de la toma de lecturas es de 20 segundos, lo cual debe considerarse si se trata de una sección con cambios rápidos en la escala de medición. El área de medición sobre la superficie del agua es variable de acuerdo a la distancia a la cual se realiza ya que el sensor tiene una apertura angular de 12° por lo que a una distancia de 5m el área de medición es de 1.06m<sup>2</sup> y a una distancia de 30m el área es de 6.38m<sup>2</sup>, dada esta situación, es de gran importancia mantener limpia el área de medición para garantizar la calidad de los datos obtenidos.

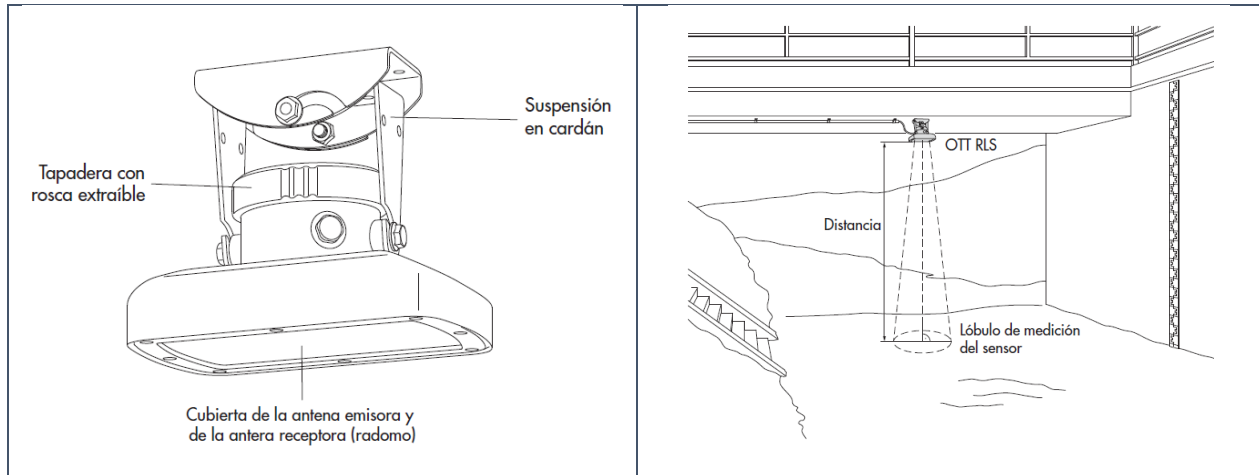


Figura 4-12. Características y forma de montaje del sensor RLS.

En el caso de la Cuenca del Río Teapa, el sensor RLS se instaló debajo del puente El Refugio a una altura de 7.36m sobre el punto más bajo de la sección del cauce.



Figura 4-13. Instalación del sensor RLS en el puente El Refugio de la cuenca del Río Teapa

### Sensor de radar Kalesto

El sensor de radar Kalesto fabricado por la empresa OTT Hidromet Es un sensor de medición de la velocidad superficial del flujo en una corriente sin contacto directo con el



agua, Su sistema de medición se encuentra basado en el principio de ondas continuas de frecuencia modulada (FMCW).

Montado de forma inclinada ( $\pm 5^\circ$ ) en un soporte adecuado, el sensor presenta mediciones más precisas en flujos con velocidades superiores a 0.5m/s, la resolución de medición es de  $\pm 1$ mm/s, el ciclo de medición es de 17s obteniendo 40 mediciones y calculando un valor medio.

Este radar con base en el principio de ondas continuas permite estimar la velocidad de un flujo, calculando la diferencia entre la frecuencia emitida y la frecuencia recibida, este principio permite la estabilidad de las mediciones ya que considera el tiempo de retraso de la emisión y retorno de la señal, así como la modificación de la frecuencia en la señal emitida y recibida dando como resultado un proceso que no depende de la intensidad de la señal ni de la carga de la batería del sensor (Figura 4-14).

En el caso de la Cuenca del Río Teapa, el sensor de radar Kalesto se instaló debajo del puente El Refugio a una altura de 7.36m sobre el punto más bajo de la sección del cauce.



Figura 4-14. Montaje del sensor de radar Kalesto en el puente El Refugio

### **Sección hidráulica**

La sección hidráulica de la estación hidrométrica automatizada El Refugio (Figura 4-15 y Figura 4-16) fue caracterizada mediante un levantamiento topográfico, el sensor de velocidad y nivel de la estación se encuentran instalados sobre un puente vehicular, la

profundidad máxima de esta sección es de 7.36m, la longitud de la sección es de 94.95m se encuentra dividida por tres columnas de concreto que sostienen el puente, los márgenes de la sección se encuentran limitados por los estribos de mampostería de la estructura.



Figura 4-15. Vista aguas arriba de la ubicación de la estación hidrométrica El Refugio  
A partir de los datos obtenidos en el levantamiento topográfico se obtuvieron las áreas correspondientes a la lectura de escala considerando a su vez la reducción del área provocada por las columnas que sostienen el puente vehicular.

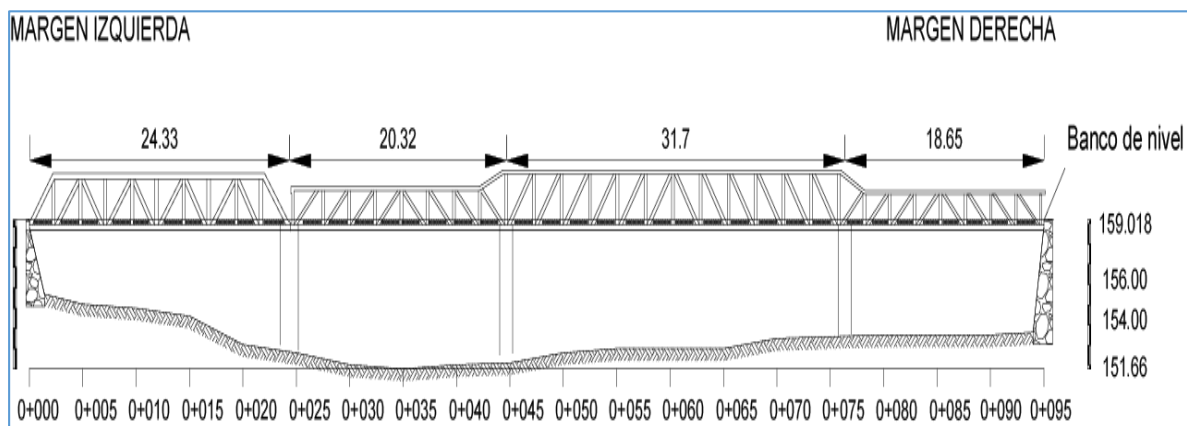


Figura 4-16. Sección transversal de la estación hidrométrica automatizada El Refugio

#### 4.5 Integración de la información dentro del modelo MIKE SHE

Como un modelo de base física el modelo MIKE SHE se basa en las leyes físicas de la naturaleza y a su vez en cada uno de los datos representativos de la cuenca, la información utilizada en el desarrollo de este trabajo, se encuentra representada dentro de un esquema general que tienen como objetivo el procesamiento de la información para su integración dentro del modelo (Figura 4-17).

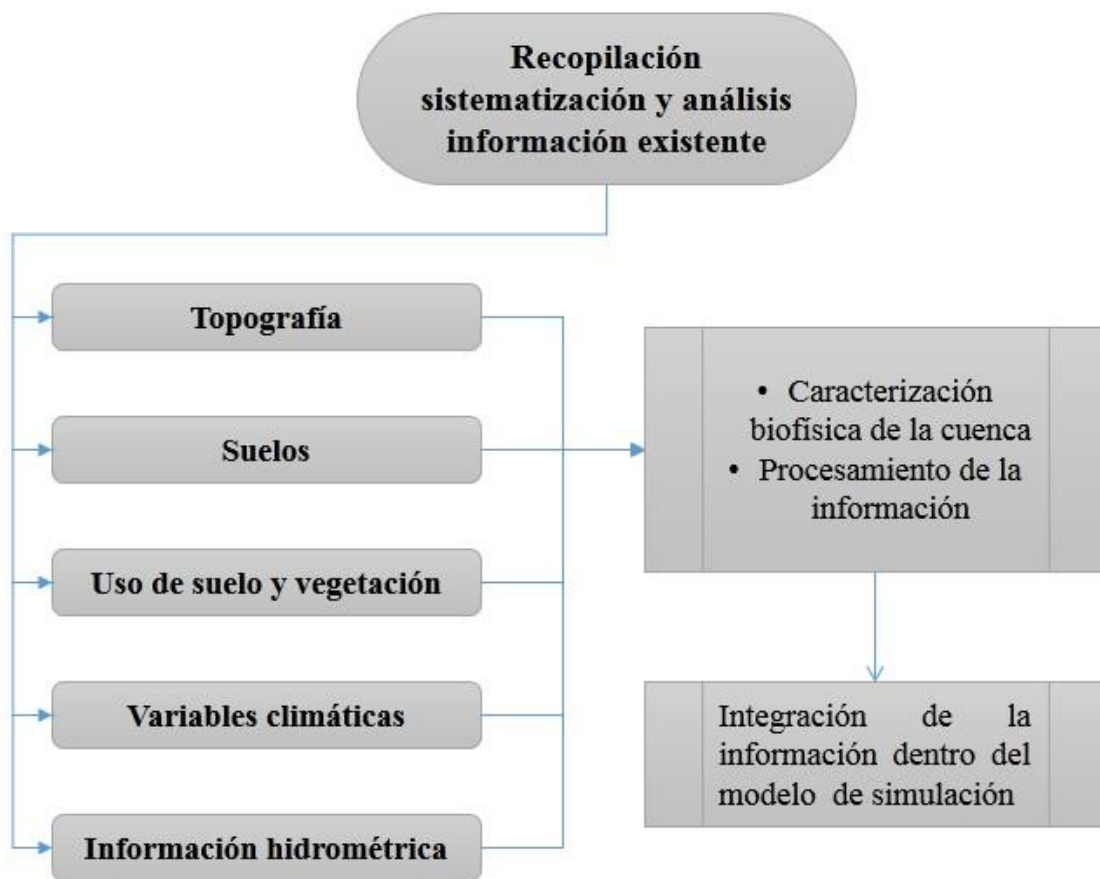


Figura 4-17. Esquema general para la integración de la información en el modelo MIKE SHE

##### 4.5.1 Topografía

La información topográfica utilizada para la realización del presente trabajo, se basó en dos fuentes principales que corresponden al modelo digital de terreno LIDAR y el

Continuo de Elevaciones Mexicano CEM 3 en ambos casos generados por el INEGI (INEGI, 2010). En la Figura 4-18 se muestra esquemáticamente el proceso de integración de la red hidrográfica de la cuenca del Río Teapa utilizada en el modelo de simulación de la escorrentía superficial MIKE SHE.

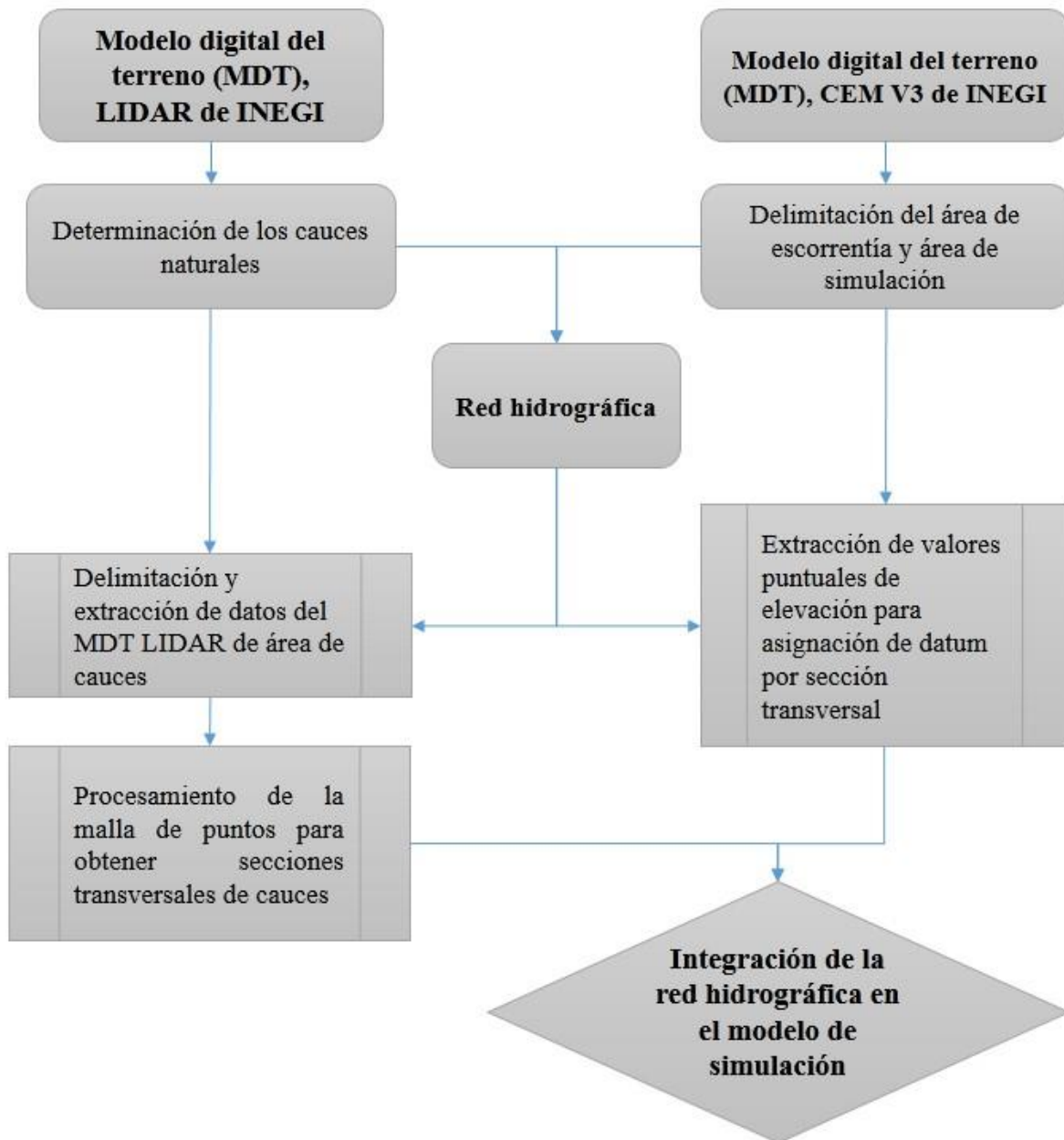


Figura 4-18. Esquema de integración de la red hidrográfica de la cuenca del Río Teapa para el modelo de simulación de la escorrentía superficial MIKE SHE

### Obtención de la red hidrográfica.

La determinación del área de escorrentía de la cuenca se llevó a cabo utilizando el continuo de elevaciones mexicano CEM 3 de INEGI mediante el cual se obtuvo la localización del parteaguas de la cuenca y considerando como punto de salida la ubicación de la estación hidrométrica convencional con número de identificación 30032 “Río Teapa”.

La determinación de los cauces naturales de la cuenca del Río Teapa se realizó mediante el procesamiento del modelo digital del terreno LIDAR con una resolución de cinco metros por pixel y considerando una área de aporte mínima de 20 has para los cauces de primer orden (Figura 4-19). Se obtuvo un total de 51 cauces con una longitud acumulada de 725.3 Km.

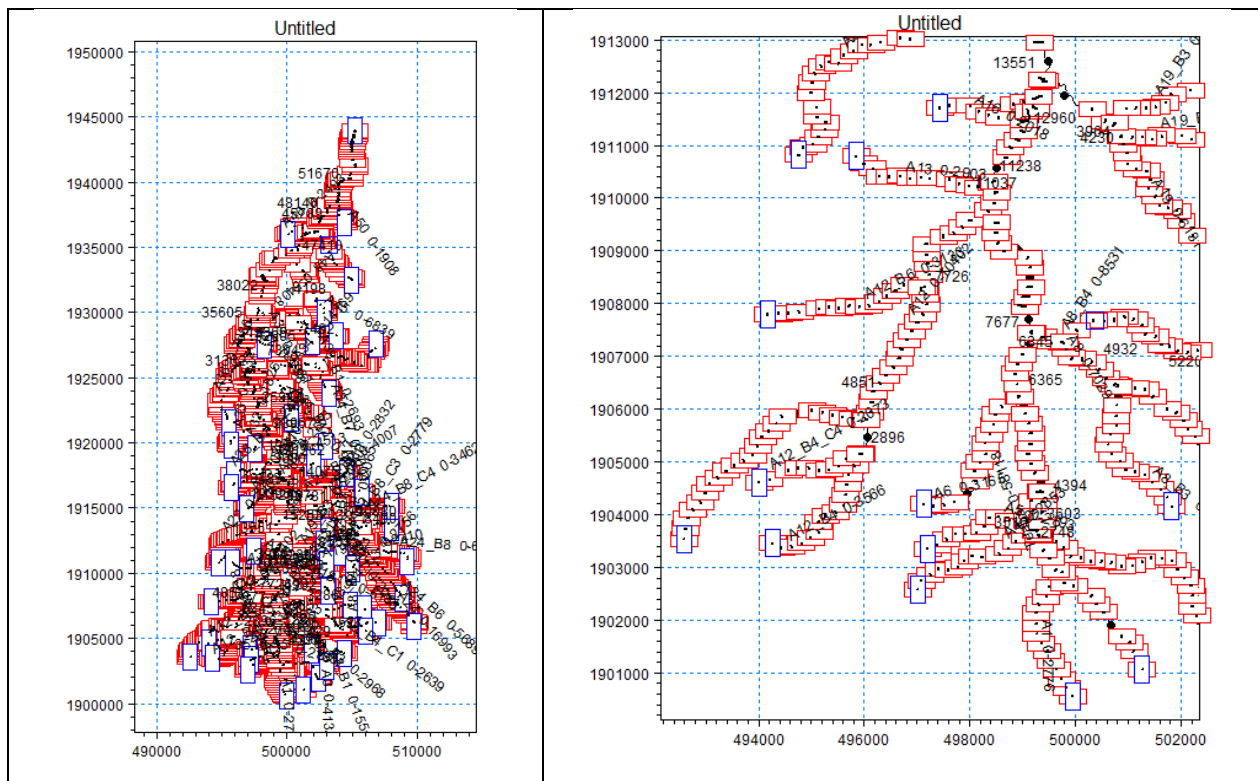


Figura 4-19 Red hidrográfica del Río Teapa para su integración en el modelo MIKE SHE

## Obtención de secciones transversales

El procesamiento de las secciones transversales se realizó a partir del procesamiento de la malla de puntos del modelo digital del terreno LIDAR ajustando las elevaciones a partir del datum obtenido del modelo de elevación CEM3 (Figura 4-20). Se utilizó una distancia entre secciones de 200m incluyendo una sección de apertura para cada cauce y una sección de cierre en las confluencias de los diferentes cauces naturales. En total se procesaron 1161 secciones trasversales dentro de la red hidrográfica.

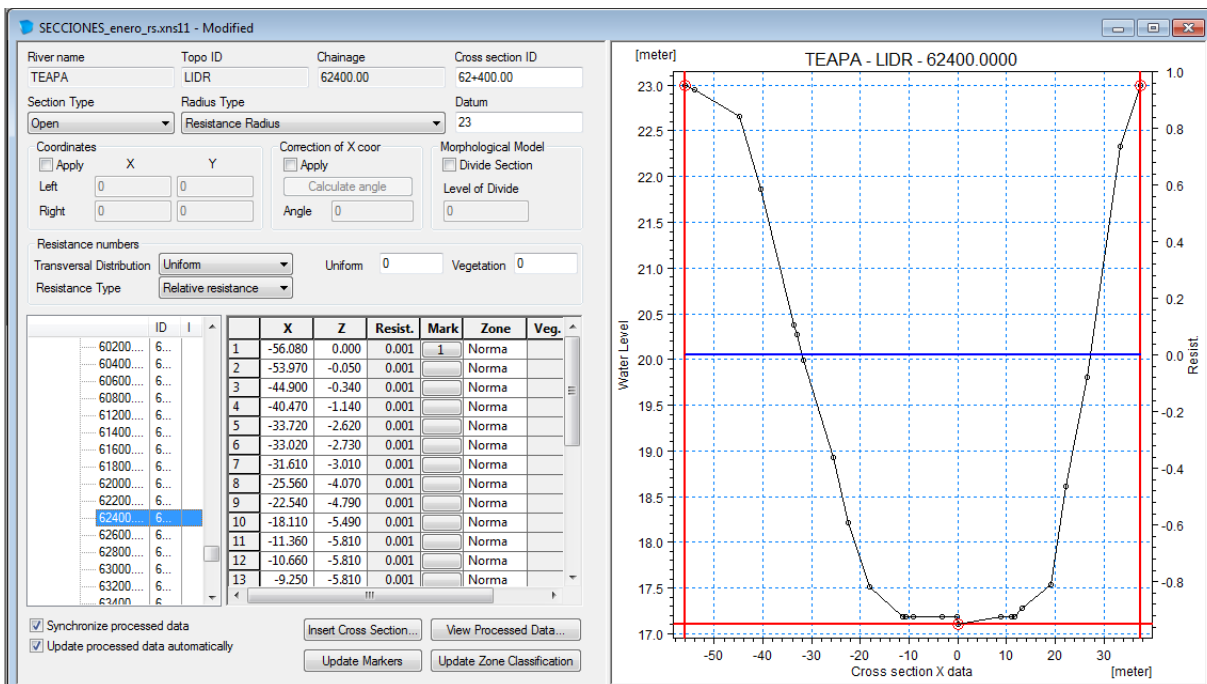


Figura 4-20. Integración de las secciones transversales en el modelo MIKE SHE

### 4.5.2 Propiedades del suelo

Con la finalidad de uniformizar la información disponible de las unidades de suelos existentes en la cuenca del Río Teapa se realizó la integración de las características hidrológicas de los suelos dentro del modelo mediante dos fuentes principales de información que corresponden a las cartas edafológicas con escala 1:50000 de INEGI y la serie I y II de las bases de datos de perfiles de suelos de INEGI (INEGI 2014). Se utilizaron los polígonos de grupo y subgrupo de suelos como estructura general. Para el ingreso de la información al modelo, los polígonos resultantes fueron relacionados con

las características físicas y químicas reportadas en la descripción de perfiles. El procedimiento de obtención de la información sobre las propiedades hidrológicas del suelo se muestra en la Figura 4-21

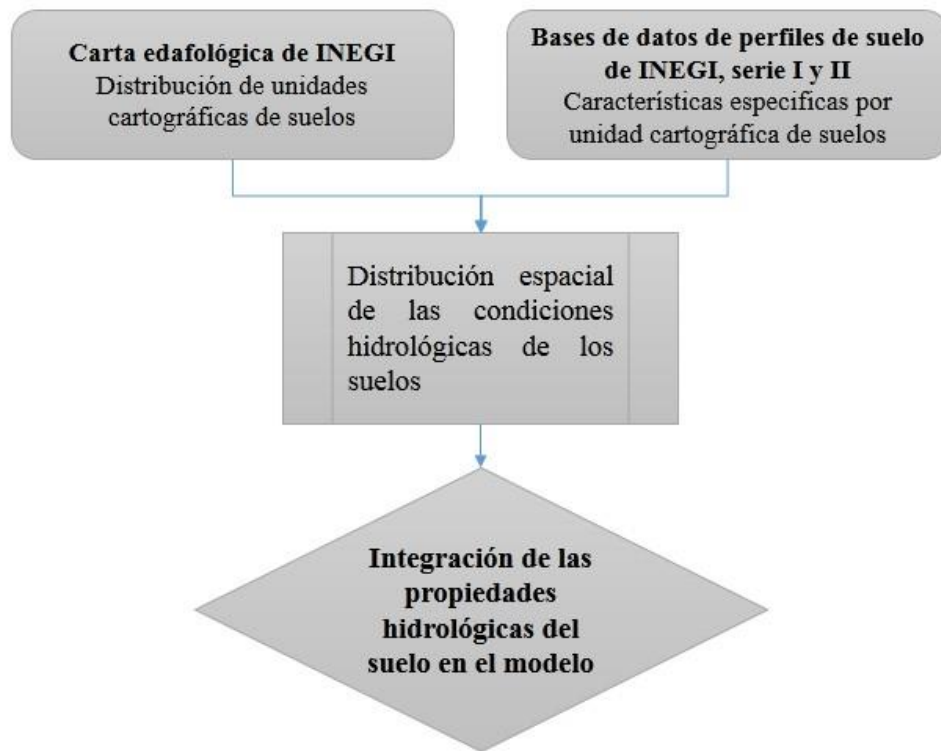


Figura 4-21.- Esquema de obtención de información sobre propiedades de suelo de la cuenca del Río Teapa para su integración posterior al modelo MIKE SHE

Las características hidrológicas de contenido de humedad a saturación, contenido de humedad a capacidad de campo, contenido de humedad a punto de marchitez permanente y conductividad hidráulica, fueron calculados mediante el método de estimación de propiedades hidráulicas del suelo para soluciones hidrológicas (Xaston 2006), utilizando los valores de materia orgánica, fracciones texturales y grado de compactación. Las características obtenidas para cada unidad de suelos se muestran en el Anexo 1.

### 4.5.3 Propiedades de la vegetación

La identificación de los tipos de vegetación existentes en la cuenca del Río Teapa se llevó a cabo mediante la clasificación visual de la imagen de satélite LANDSAT de los periodos estudiados, y haciendo una comparación con los tipos de vegetación reportados por INEGI en la carta de uso de suelo y vegetación, en sus series IV y V. El esquema de obtención de información sobre propiedades de vegetación de la cuenca del Río Teapa para su integración posterior al modelo MIKE SHE se muestra en la Figura 4-22

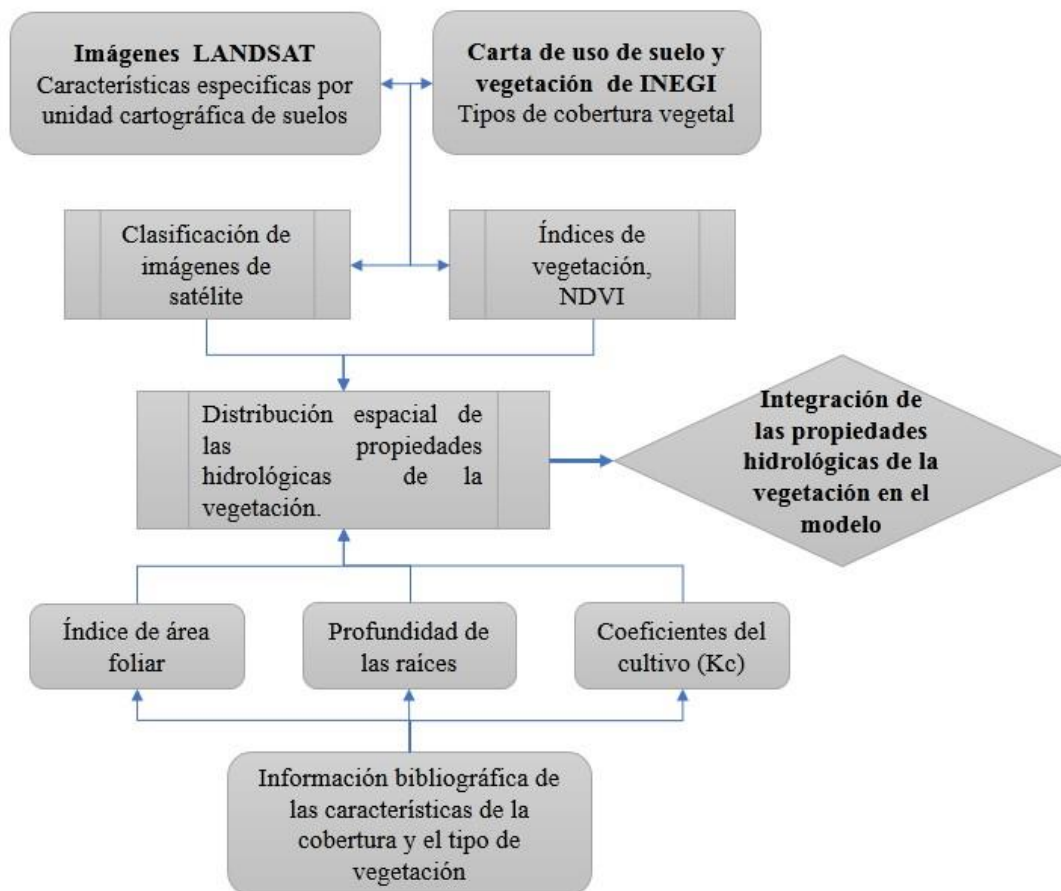


Figura 4-22.- Esquema de obtención de información sobre propiedades de vegetación de la cuenca del Río Teapa para su integración posterior al modelo MIKE SHE



#### 4.5.4 Variables climáticas

La integración de las diferentes variables climáticas dentro del modelo MIKE SHE se lleva a cabo mediante la introducción de diversas series de tiempo que fueron procesadas de forma individual a partir de la información disponible de las estaciones meteorológicas convencionales y la estación meteorológica automatizada existentes en la cuenca tomando en cuenta el esquema metodológico mostrado en la Figura 4-23. La información meteorológica detallada se presenta en el Anexo digital 1 de este documento.

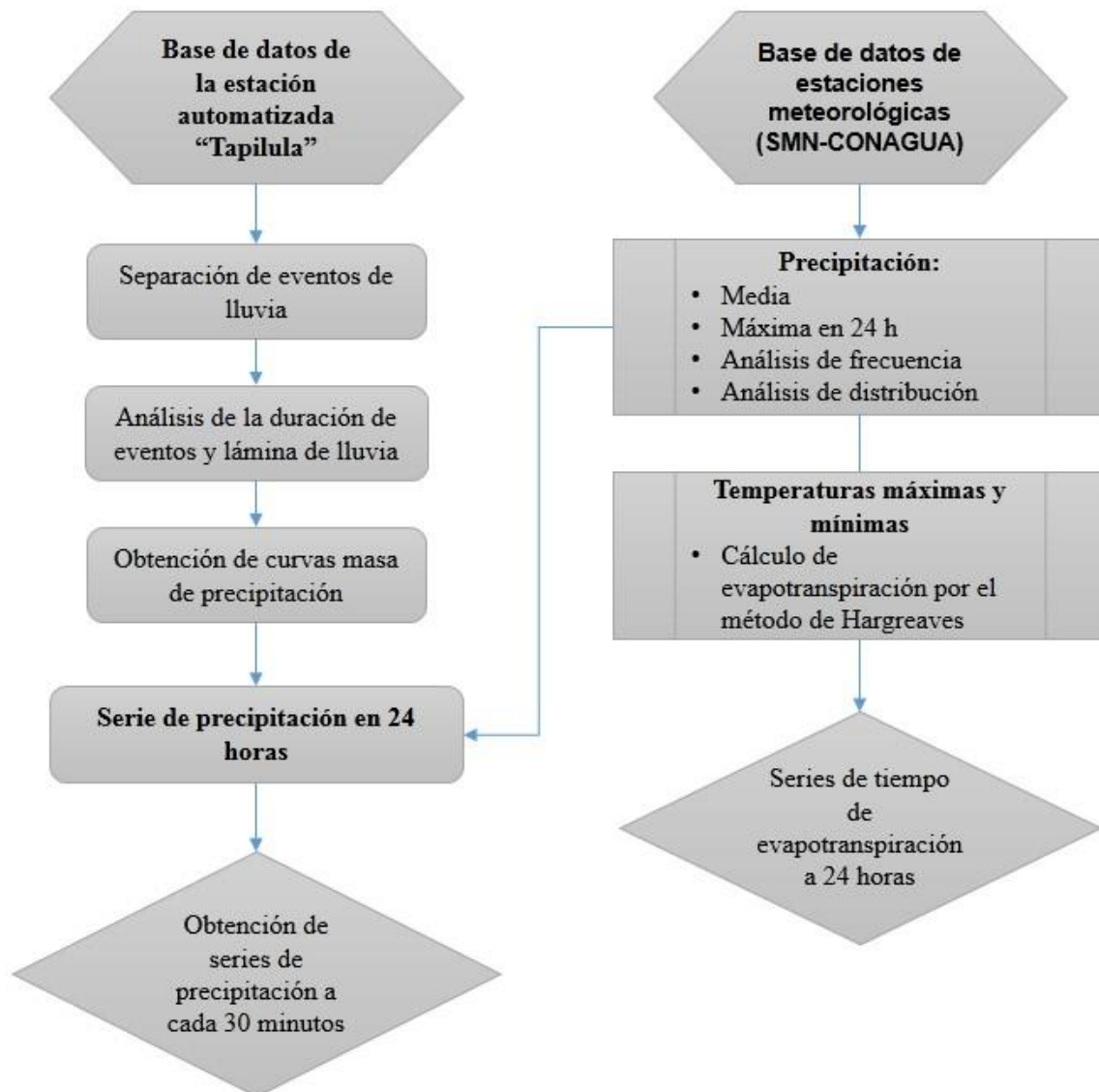


Figura 4-23.- Esquema de obtención de información meteorológica de la cuenca del Río Teapa para su integración posterior al modelo MIKE SHE

## **Intensidad de la lluvia**

La intensidad de la lluvia es un parámetro altamente variable en el espacio y el tiempo, por lo que su análisis se realiza necesariamente a partir de generalizaciones espaciales y temporales. Habitualmente la información disponible sobre la precipitación se limita al valor total diario, sin embargo en el campo de la simulación hidrológica este intervalo temporal resulta insuficiente para un correcto análisis del comportamiento hidrológico de una cuenca.

La caracterización de los eventos de lluvia a partir de su distribución temporal es una técnica de análisis que permite identificar el comportamiento generalizado de los eventos de precipitación relacionando el tiempo de duración del evento con la lluvia acumulada. En el caso del presente trabajo se realizó el análisis de los datos de precipitación eventual, obtenidos de la estación meteorológica automatizada con un intervalo de medición de 10 minutos. En total se identificaron 752 eventos durante un periodo comprendido entre enero del 2011 a marzo de 2014. La gráfica de correlación entre la lámina de lluvia y duración del evento de lluvia en la cuenca del Río Teapa se muestra en la Figura 4-24. En esta figura se puede observar la correlación lineal existente entre la duración de los eventos de lluvia y la lluvia acumulada para todos los eventos con duraciones menores de seis horas. Esta información fue utilizada en el proceso de alimentación del modelo MIKE SHE.

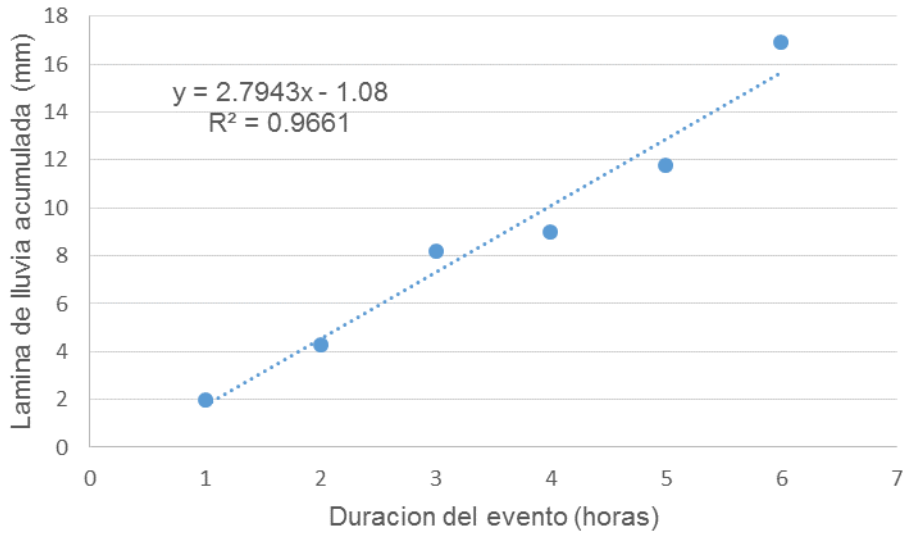


Figura 4-24. Correlación entre la lámina de lluvia y duración del evento de lluvia en la cuenca del Río Teapa

A partir del análisis de los eventos monitoreados se obtuvo una curva característica de la distribución temporal de la lluvia en la cuenca del Río Teapa, dicha gráfica se muestra en la Figura 4-25

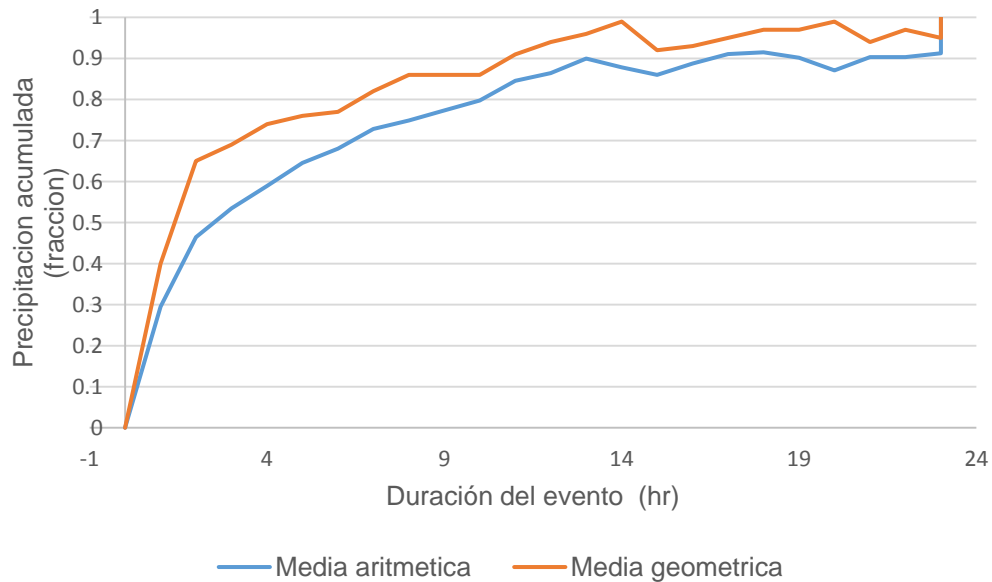


Figura 4-25.- Distribución temporal de los eventos de lluvia para la estación meteorológica automatizada Tapilula.

La curva masa obtenida de este análisis, permite evaluar y ajustar los registros de precipitación diaria reportados por las estaciones meteorológicas convencionales, obteniendo una serie de tiempo adecuada para ser utilizada en el proceso de simulación mediante el modelo MIKE SHE.

### **Evapotranspiración**

Las series de tiempo de evapotranspiración diaria fueron obtenidas a partir de la fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), mediante la cual es posible evaluar la evapotranspiración potencial a partir de los datos de temperaturas extremas y radiación solar.

La expresión general para obtener evapotranspiración potencial es la siguiente:

$$ET_0 = 0,0135 (t_{med} + 17,78) R_s \quad (4-8)$$

Donde:

$ET_0$  - evapotranspiración potencial diaria (mm/día)

$t_{med}$  - temperatura media (°C)

$R_s$  - radiación solar incidente (MJ/(m<sup>2</sup> d)).

Los valores de temperatura media fueron obtenidos a partir de los registros diarios de temperaturas mínima y máxima de las estaciones meteorológicas convencionales, mientras que la radiación solar incidente se calculó a partir de la radiación extraterrestre y modificada de acuerdo al mes del año y a la latitud de la zona.

#### **4.5.5 Información hidrométrica**

La integración de la información hidrométrica dentro del modelo permite realizar la calibración y validación del modelo sirviendo de comparativo entre los resultados obtenidos a partir del modelo y los valores medidos en campo para el mismo periodo de tiempo. En la cuenca del Río Teapa se cuenta con dos sitios que permiten la medición de series hidrométricas en la cuenca, el primer sitio corresponde a la estación

hidrométrica convencional que constituye el punto de salida de la cuenca y la estación hidrométrica automatizada que sirve de sitio comparativo de la evaluación hidrológica. El gasto diario y los gastos picos máximos mensuales registrados por la estación hidrométrica convencional representan los valores principales de comparación para la calibración y validación del modelo, así mismo los valores de escala y velocidad instantánea reportados por la estación hidrométrica automatizada permiten estimar el gasto en la sección donde se encuentran ubicados, estos valores de gasto son considerados valores comparativos ya que no representan una medición directa del flujo en el cauce y requieren de un proceso de estimación que se menciona detalladamente a continuación.

### **Serie temporal de lecturas de escala**

La lectura de la elevación del agua sobre la sección hidráulica es un valor obtenido a partir del sensor de elevación OTT RLS ubicado en la estación hidrométrica automatizada, esta información presenta un intervalo entre mediciones de 10 minutos, el periodo de evaluación considerado fue de 08/06/2011 23:20 al 02/06/2013 16:40, obteniéndose una serie hidrométrica de escala que presenta los siguientes parámetros estadísticos. Los estadísticos descriptivos de la serie temporal de lecturas de escala se presentan en el cuadro 4-6.

Cuadro 4-6. Estadísticos descriptivos de la serie temporal de lecturas de escala

<b>Parámetro</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>
<b>Numero</b>	Estadístico	91778
<b>Rango</b>	Estadístico	2.790
<b>Mínimo</b>	Estadístico	0.270
<b>Máximo</b>	Estadístico	3.060
<b>Media</b>	Estadístico	0.647
	Error típico	0.001
<b>Desviación típica.</b>	Estadístico	0.287
<b>Varianza</b>	Estadístico	0.082
<b>Asimetría</b>	Estadístico	1.972
	Error típico	0.008

Como se puede observar en el Cuadro 4-6, los registros de escala corresponden a una distribución asimétrica con mayor concentración de datos por debajo de la media aritmética, este tipo de distribución corresponde a un comportamiento continuamente observado en cuencas hidrográficas.

En la figura 4-21 se puede notar que más del 50 % de los escurrimientos observados se encuentran por debajo de un metro de lectura en la escala.

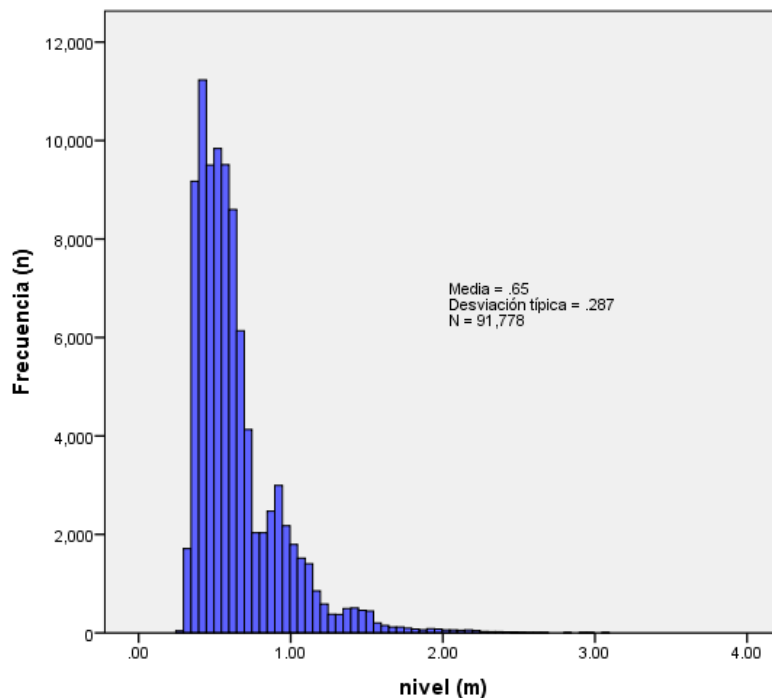


Figura 4-26. Histograma de las lecturas de escala en la estación hidrométrica automatizada El Refugio

### Curva escala – área hidráulica

La determinación de la relación escala - área hidráulica de la sección transversal de la estación hidrométrica automatizada El Refugio se realizó con un intervalo vertical de cinco centímetros, a partir de estos datos se construyó un modelo de regresión potencial. En la Figura 4-27 se muestra gráfica de la relación escala - área hidráulica en esta estación hidrométrica.

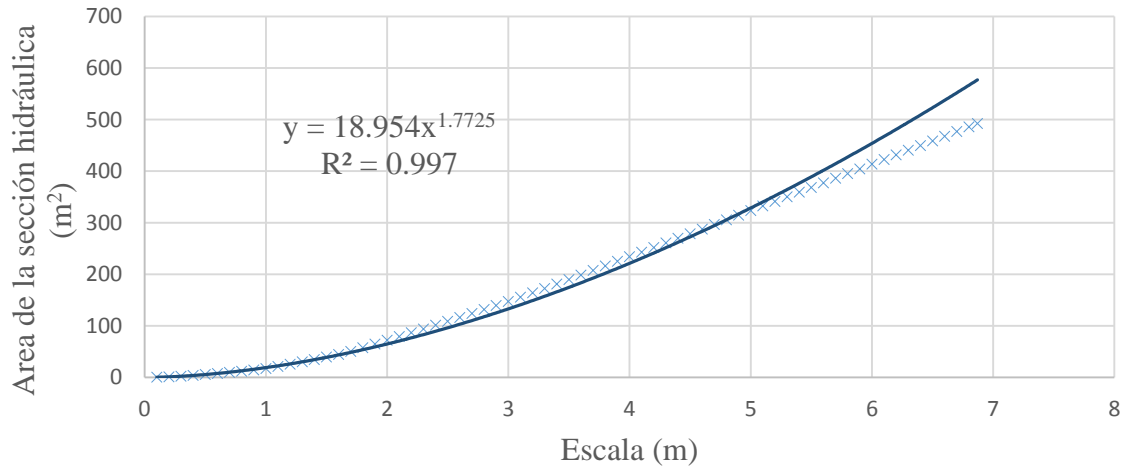


Figura 4-27. Curva escala – área hidráulica en la estación hidrométrica automatizada El Refugio

El modelo de regresión obtenido muestra un coeficiente de correlación de 0.997 y como se puede observar, la gráfica presenta un mejor ajuste en lecturas de escala menores de cinco metros.

### Relación escala - velocidad

La serie de tiempo de velocidad superficial del flujo en la sección hidrométrica se obtuvo a partir del sensor de velocidad Kalesto, con un periodo de evaluación del 08/06/2011 23:20 al 02/06/2013 16:40. De acuerdo con los datos observados en la estación hidrométrica automatizada se obtuvo la relación escala – velocidad (Figura 4-28), los datos presentan una inflexión notable cuando la escala es mayor a un metro, esta inflexión puede relacionarse con las condiciones de rugosidad del cauce las cuales inciden directamente sobre la velocidad que presenta el flujo.

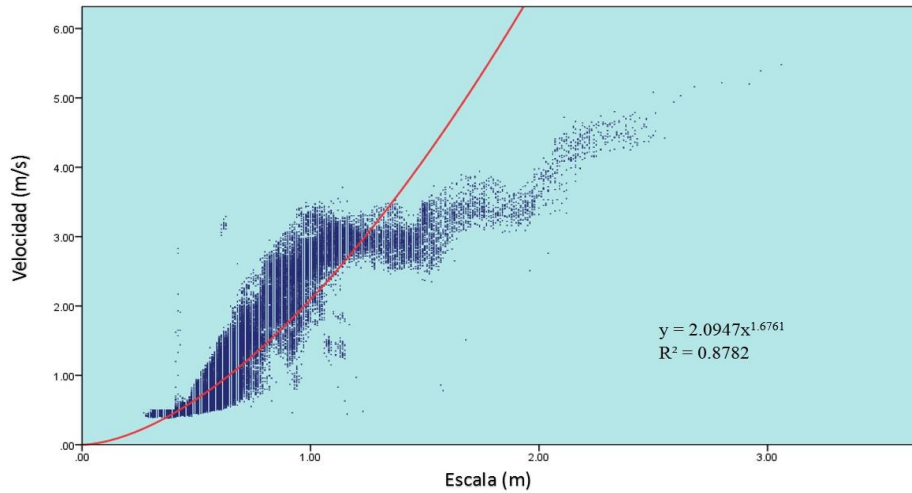


Figura 4-28. Relación escala velocidad en la estación hidrométrica automatizada El Refugio

### Coeficiente de Manning

Para tener una idea más clara del comportamiento del flujo de agua en la sección de control de la estación hidrométrica automatizada se realizó un análisis de la variación del coeficiente de Manning de las ecuaciones (3-8) y (3-9). Los valores de este coeficiente reflejan el efecto de la rugosidad hidráulica del cauce sobre la velocidad del flujo de agua en la sección de control. En la Figura 4-29 se presenta la gráfica de relación Coeficiente de Manning – Lectura de escala en la estación hidrométrica automatizada El Refugio.

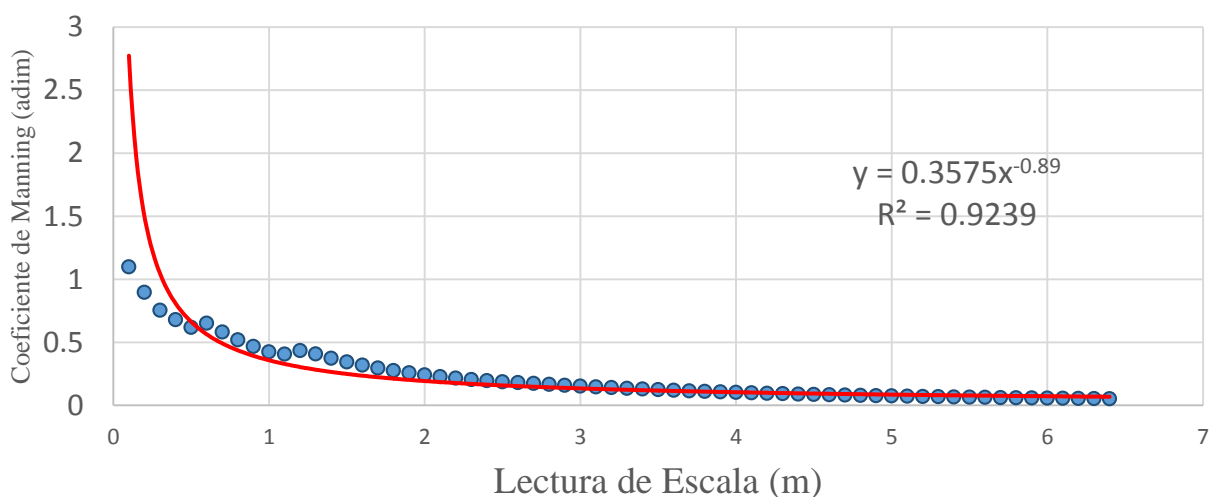


Figura 4-29. Variación del coeficiente de Manning en la estación hidrométrica automatizada El Refugio



Como se ve en esta figura la estimación de la variación del coeficiente de Manning con respecto a la escala muestra un mayor efecto de la rugosidad en escalas menores de un metro, la curva también muestra una disminución del efecto de la rugosidad a escalas mayores hasta hacerse asintótica.

### Relación escala - gasto

A partir de los datos obtenidos de escala, área hidráulica, radio hidráulico, velocidad y coeficientes de rugosidad de la sección, se obtuvo la relación existente entre la escala y el gasto en la sección hidráulica de la estación hidrométrica automatizada El Refugio. La serie de tiempo del gasto obtenido servirá como comparativo de los valores obtenidos de la simulación mediante el modelo MIKE SHE. En la Figura 4-30 se presenta la gráfica de relación Gasto del flujo de agua – Escala en la estación hidrométrica automatizada El Refugio.

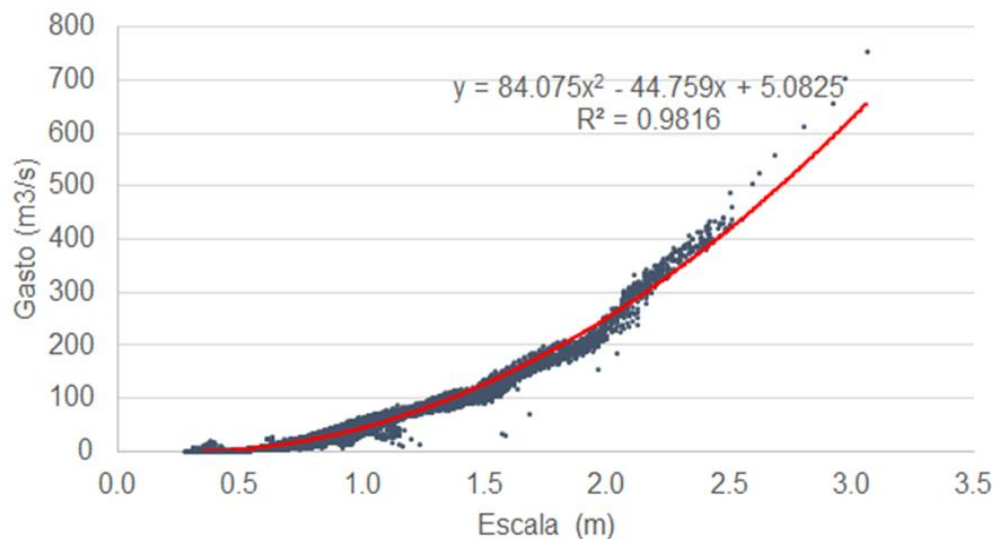


Figura 4-30. Relación escala - gasto en la estación hidrométrica automatizada El Refugio

## **4.6 Pruebas estadísticas**

Con la finalidad de que los resultados de un modelo puedan ser utilizados en diferentes actividades que pueden ir desde la toma de decisiones en el manejo de los recursos hídricos, hasta tareas de investigación, es necesario que los modelos sean científicamente sólidos, robustos y defendible (EPA, 2002).

Los procesos utilizados para calificar los resultados del modelo deben ser establecidos y documentados antes de iniciar la evaluación del modelo, ya que es necesario definir claramente los criterios de evaluación ASCE (1993), de forma general los criterios estadísticos han sido ampliamente utilizados desarrollándose algunos estadísticos específicos así como índices de rendimiento para la evaluación de los modelos (Donigian et al, 1983).

Estos índices de rendimiento de los modelos permiten establecer un sistema para evaluar el desempeño y comparación con otros modelos (ASCE, 1993), una vez establecidas estas directrices servirán de apoyo a los modeladores para garantizar la calidad del modelado, aumentando la responsabilidad y aceptación pública de los modelos para apoyar la investigación científica y apoyar la orientación de la política pública (EPA, 2002).

La evaluación del modelo MIKE SHE en para el presente trabajo se realizó mediante las consideraciones de Moriasi et al. (2007), quien recomienda utilizar los criterios de pendiente y ordenada al origen, coeficientes de determinación y correlación, índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y algunos índices de error como son el error medio absoluto (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

### **4.6.1 Pendiente y ordenada al origen**

La pendiente y la ordenada al origen de una regresión lineal pueden indicar que tan bien se relacionan los datos simulados con los datos observados. La pendiente la relación relativa entre ambos conjuntos de datos, mientras que la ordenada al origen indica la presencia de un desfase entre los datos. Una pendiente con valor uno y una ordenada al origen igual a cero indican que el modelo reproduce perfectamente las magnitudes de los datos observados (Willmott, 1981). La pendiente y la ordenada al origen son comúnmente evaluadas asumiendo que los datos medidos y los datos simulados presentan una

relación lineal, esto implica que todo el error se encuentra contenido en los datos simulados y que los datos observados se encuentran libres de error, aunque esto raramente es cierto (Harmel et al. 2006)

#### 4.6.2 Coeficientes de correlación de Pearson (r) y de determinación (R<sup>2</sup>)

Describen el grado de colinealidad entre los datos simulados y los datos observados, el coeficiente de correlación toma valores que pueden ir desde -1 a 1, si el valor es igual a cero, no existe relación lineal entre los datos, mientras que los valores de 1 y -1 muestran una relación lineal perfecta, sea positiva o negativa. Similarmente el coeficiente de determinación describe la proporción de la varianza en los datos medidos y explicada por el modelo. Los valores de R<sup>2</sup> pueden ir desde 0 hasta 1, los valores más altos indican una menor varianza del error, típicamente los valores mayores a 0.5 son considerados aceptables (Santhi et al., 2001, Van Liew et al., 2003). A pesar de que los valores de r y R<sup>2</sup> han sido ampliamente utilizados para la evaluación de modelos, estos estadísticos son altamente sensitivos a los valores extremos en un conjunto de datos y por el contrario son poco sensitivos a las diferencias proporcionales entre las predicciones del modelo y los datos medidos (Legates and McCabe, 1999).

#### 4.6.3 Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe

El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es un estadístico normalizado que indica la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos observados (Nash and Sutcliffe, 1970). El NSE indica que tan bien se ajusta la gráfica de datos observados vs datos simulados con una línea de pendiente uno y ordenada al origen cero. La ecuación que define a este índice es la siguiente.

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{media})^2} \right] \quad (4-9)$$

$y_i^{obs}$  = La observación i-esima del componente evaluado

$y_i^{sim}$  = El valor simulado de la i-esima observación del componente evaluado

$y_i^{media}$  = La media de los datos observados

$n$  = número total de observaciones

Los valores del NSE pueden variar de  $-\infty$  hasta 1, el valor de 1 indica el valor óptimo, los valores comprendidos entre 0 y 1 son generalmente vistos como niveles aceptables de rendimiento del modelo, mientras que los valores menores a 0 indican que la media de los valores observados es un mejor predictor que el valor simulado, lo que indica un rendimiento inaceptable.

#### **4.6.4 Índices de error**

Diversos índices de error son utilizados para la evaluación de los modelos hidrológicos, estos índices incluyen al error medio absoluto (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), estos índices de error indican la diferencia entre los datos observados y los datos simulados, el valor de cero en estos índices indica un ajuste perfecto, mientras que un valor menor que la media de la desviación estándar de los datos observados, se considera bajo y por lo tanto inapropiado para la evaluación del modelo (Singh et al. 2004).

### **4.7 Calibración y validación del modelo**

El proceso de calibración y validación del modelo

El análisis de sensibilidad es el proceso de determinación de la tasa de cambio en la salida del modelo en forma de los valores de gasto de flujo en el Río Teapa con respecto a los cambios en las entradas del modelo (parámetros). Es un proceso necesario para identificar los parámetros clave y la precisión de los parámetros requeridos para la calibración (Ma et al., 2000).

La calibración del modelo es el proceso de estimar los parámetros del modelo mediante la comparación de los gastos del Río Teapa calculados con el modelo MIKE SHE y los gastos observados en las estaciones hidrométricas Teapa y El Refugio, la principal variable considerada en el periodo de calibración fue los gastos picos del hidrograma de salida de la cuenca, los factores modificados en el periodo de calibración fueron; el

coeficiente de rugosidad de Manning en laderas y cauces y la conductividad hidráulica del suelo, el método consistió en un proceso de ensayo y error de cada factor dentro de los límites permisibles hasta obtener una simulación satisfactoria.

Los parámetros mencionados se han cambiado dentro del rango de  $\pm 5\%$  de los valores obtenidos inicialmente según recomendación existente (Moriassi et al., 2007)). La etapa de calibración se ha realizado durante los años del 1997 al 2001 para los cuales se han calculado los gastos diarios, medios mensuales y máximos mensuales (lo que significa que y máximos anuales).

La validación del modelo implica la ejecución del modelo usando parámetros de entrada determinados y posiblemente modificados para lograr mejor ajuste entre los gastos del Río Teapa calculados y observados durante la etapa de calibración. De acuerdo con Refsgaard (1997), la validación del modelo es el proceso de demostrar que un modelo de sitio específico dado es capaz de hacer simulaciones "suficientemente precisos". En el trabajo presente el proceso de validación del modelo MIKE SHE cubrió el período del 2002 al 2005 durante el cual se han calculado también los gastos diarios, medios mensuales y máximos mensuales y comparado con los mismos datos observados.

## **5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.1 Calibración del modelo**

El periodo seleccionado para la calibración del modelo fue de 1998 a 2000, se realizaron comparaciones para gastos diarios, gastos medios mensuales y gastos máximos mensuales reportados por la estación hidrométrica 30032 Río Teapa y los gastos simulados

La calibración del modelo a partir de la modificación del componente de flujo en la zona insaturada comprende principalmente la modificación de los valores de las características hidrológicas de las unidades de suelo existentes en la cuenca del Río Teapa. Las características hidrológicas modificadas corresponden al contenido de humedad a saturación, contenido de humedad a capacidad de campo, contenido de humedad a punto de marchitez permanente y conductividad hidráulica a saturación.

Los suelos predominantes de la cuenca del Río Teapa son los Luvisoles los cuales presentan valores de típicos de contenido de humedad a saturación de 0.48, contenido de humedad a capacidad campo de 0.32, contenido de humedad a punto de marchitez permanente de 0.18 y conductividad hidráulica de  $2.35e^{-6}$ . El rango de modificación de los valores iniciales de las características hidrológicas de los suelos fue de  $\pm 5\%$  lo cual corresponde a las recomendaciones realizadas por Moriasi et al. (2007), para la calibración del modelo. Los valores iniciales y los valores finales de la conductividad hidráulica a saturación del suelo, humedad a saturación (o porosidad), humedad de capacidad de campo, humedad del punto de marchitamiento permanente de cada unidad del suelo existente en la cuenca del Río Teapa en el proceso de calibración se muestran en el Anexo 1 de este documento.

La calibración del modelo a partir del componente de flujo superficial comprende principalmente la modificación de los valores correspondientes a la rugosidad hidráulica de los diferentes usos de suelo presentes en la cuenca del Río Teapa. El principal uso de suelo en la cuenca corresponde al pastizal cultivado el cual presenta valores de coeficientes de rugosidad de Manning (M) de 4 como valor de inicio y 3.7 como valor final de la calibración.

### **5.1.1 Gastos diarios**

En las figuras 5-1 a 5-2 como ejemplo se presentan gráficas de comparación de hidrogramas de los gastos diarios del Río Teapa calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante los años 1999 y 2000. Estos gastos reflejan toda escorrentía superficial y subterránea de la cuenca del Río Teapa.

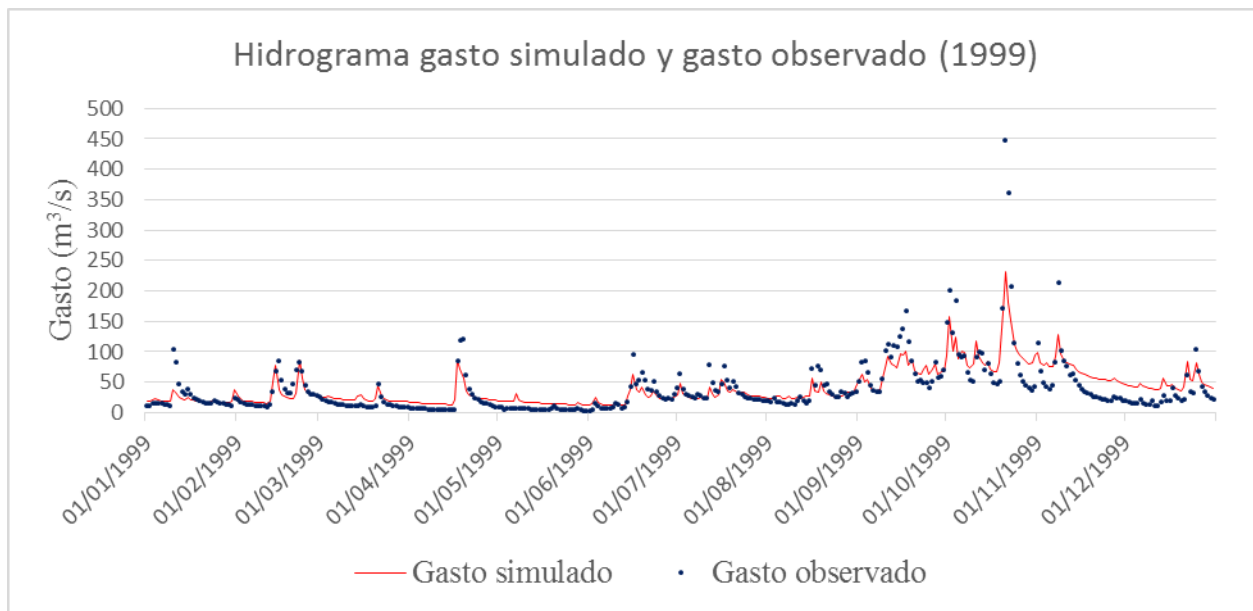


Figura 5-1 Comparación de los gastos diarios calculados y los gastos observados durante el año 1999

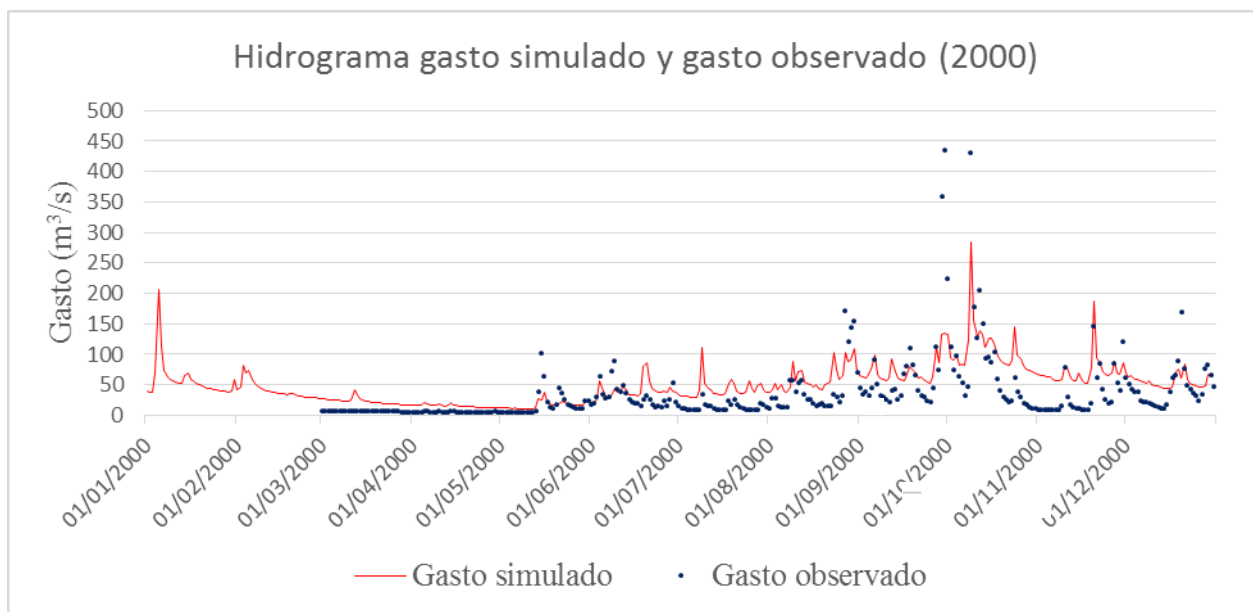


Figura 5-2.- Comparación de los gastos diarios calculados y los gastos observados durante el año 2000

Como puede observarse, por lo general existe un cierto ajuste entre la dinámica de cambio en tiempo de los gastos diarios calculados y observados. Se observa también que periódicamente durante los períodos de las corrientes moderadas o débiles los

valores calculados de los gastos diarios superan dos veces o más los gastos observados. También se observa que durante los períodos de los flujos máximos el nivel de ajuste entre los gastos calculados y observados por lo general es mejor aunque no es completamente exacta. Esto posiblemente se puede explicar por límite establecido en variación de cinco parámetros del modelo MIKE SHE dentro de  $\pm 5\%$  de su valor determinado inicialmente antes del cálculo. Estos cinco parámetros son: cuatro propiedades hidrofísicas de suelos responsables por infiltración del agua superficial y el parámetro de la rugosidad hidráulica de la superficie de la cuenca responsable por escorrentía superficial del agua durante el proceso de calibración del modelo MIKE SHE. Supuestamente, en caso de mayor variación de estos parámetros podría posible lograr mejor ajuste entre los gastos diarios calculados y observados.

La estimación más precisa de calidad de ajuste de los gastos diarios calculados comparados con los gastos diarios observados en el periodo de calibración se llevó a cabo mediante análisis de los siguientes indicadores estadísticos: Error medio absoluto (en inglés MAE), Raíz del error cuadrático medio (en inglés RMSE), desviación estándar del error (en inglés STDres), coeficiente de determinación  $R^2$  y coeficiente de determinación de Nash Sutcliffe. Los resultados de este análisis se presentan en el Cuadro 5-1

Cuadro 5-1. Resultados de la estimación estadística de calidad de calibración del modelo MIKE SHE en proceso de cálculo de los gastos diarios del Río Teapa, Tabasco

<b>Período</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>	<b>STDres</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> Nash Sutcliffe</b>
<b>01/01/1998 a 31/12/2000</b>	15.987	30.043	29.8588	0.72568	0.51662
<b>01/01/1998 a 31/12/1998</b>	11.049	22.539	22.5294	0.69343	0.46111
<b>01/01/1999 a 31/12/1999</b>	13.703	26.823	26.8137	0.81253	0.63732
<b>01/01/2000 a 31/12/2000</b>	24.648	39.962	38.3707	0.67158	0.40144

Nota: MAE = mean absolute error; RMSE = root mean square error; STDres = Standard deviation residuals;  $R^2$  = determination coefficient;  $R^2$  Nash Sutcliffe = Nash Sutcliffe determination coefficient.

Los datos del Cuadro 5-1 señalan que el proceso de calibración del modelo MIKE SHE por lo general fue satisfactorio. Sin embargo, los valores de los criterios de ajuste entre los gastos calculados y observados no son muy altos, lo que posiblemente se puede



explicar por relativamente pequeño rango de modificación de los parámetros del modelo. Como se ve, no hay gran cambio de cada criterio estadístico del cuadro 5-1 en función de los años dentro del período de calibración. Esto significa que el nivel de ajuste entre los gastos diarios calculados con el modelo MIKE SHE en su comparación con los datos observados es bastante estable en el tiempo (en los años). El coeficiente  $R^2$  indica un ajuste regular para algunos años y bueno para el año 1999, en el caso del coeficiente de Nash, podemos observar que presenta valores válidos para la simulación ( $>0$ ) aunque también de carácter regular.

En la figura 5-3 se presenta la gráfica integral de correlación entre los gastos diarios calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante el período de calibración del 1997 al 2001.

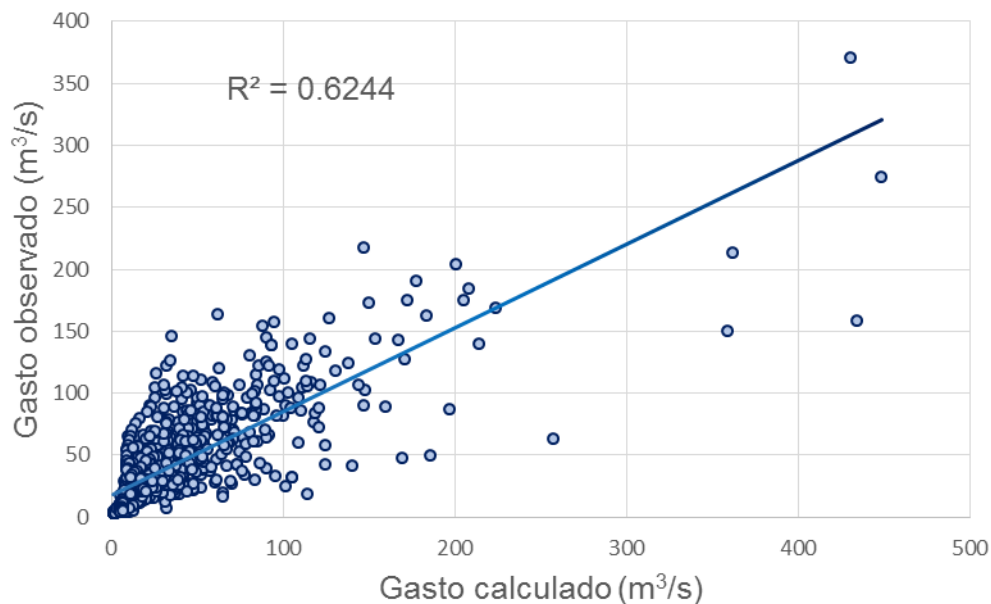


Figura 5-3.- Comparación de gastos diarios calculados y gastos observados durante período de calibración del 1998 al 2000 en la estación hidrométrica Teapa

Como se puede observar el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.62$  lo que significa que la calidad de ajuste fue moderada. Esto se debe principalmente a la gran cantidad de datos evaluados que presentan un gasto menor de  $100\text{m}^3/\text{s}$  por lo que es importante considerar la evaluación de gastos máximos y medio por separado.

### 5.1.2 Gastos medios mensuales

En la figura 5-4 se presentan las gráficas de comparación de los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante el período de calibración del modelo MIKE SHE del 1998 al 2000. Estos gastos son medios aritméticos entre los gastos diarios registrados o calculados en esta estación. Considerando que los intervalos de tiempo entre registración de los gastos diarios son iguales, los gastos medios mensuales son realmente representativos como medios para cada mes.

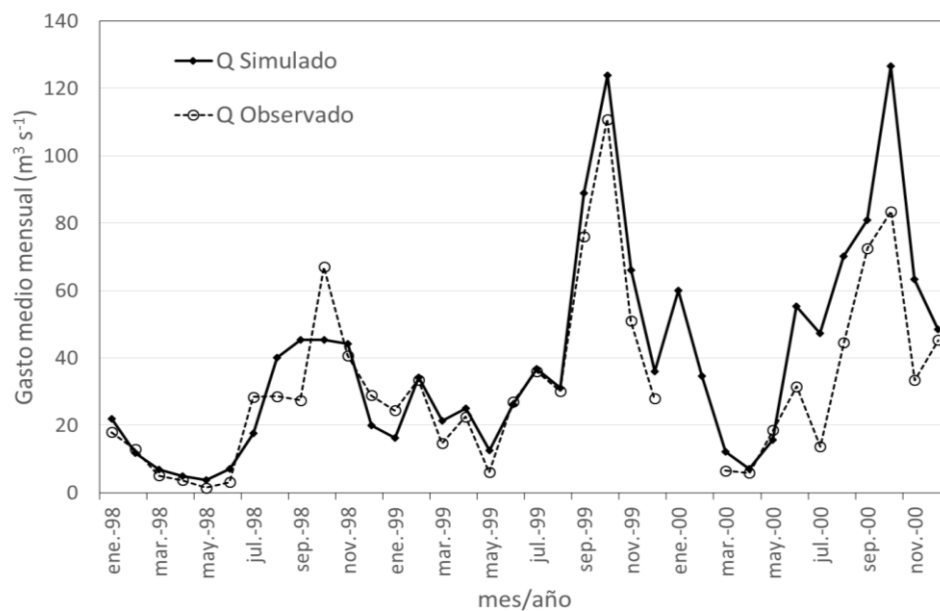


Figura 5-4.- Comparación de los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica convencional Teapa durante el período de calibración del 1998 al 2000

Como se ve, se nota mejor ajuste entre los gastos medios mensuales observados y calculados en comparación con los gastos diarios. Para mayor exactitud esta comparación se presenta en la figura 5-5 en forma de la gráfica integral de correlación entre los valores de los gastos medios mensuales observados y calculados.

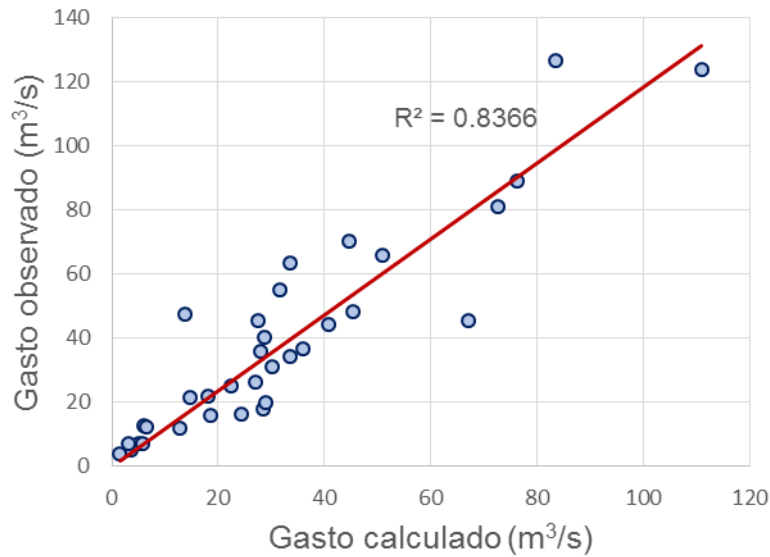


Figura 5-5.- Correlación entre los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de calibración del 1998 al 2000

El coeficiente de determinación  $R^2$  de relación entre los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de calibración del 1998 al 2000 es igual a 0.84 lo que significa buen ajuste entre los valores calculados y observados y lo que es más que 0.62 correspondientes a la relación entre los gastos diarios.

### 5.1.3 Gastos máximos mensuales y anuales

Para los objetivos prácticos la mayor importancia tienen los gastos máximos mensuales y anuales ya que con estos gastos están relacionado las situaciones críticas en las corrientes naturales: desbordamientos e inundaciones e impactos negativos relacionados con esto. Considerando esto, en la figura 5-6 se presenta gráfica de correlación entre los gastos máximos mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de calibración del 1998 al 2000.

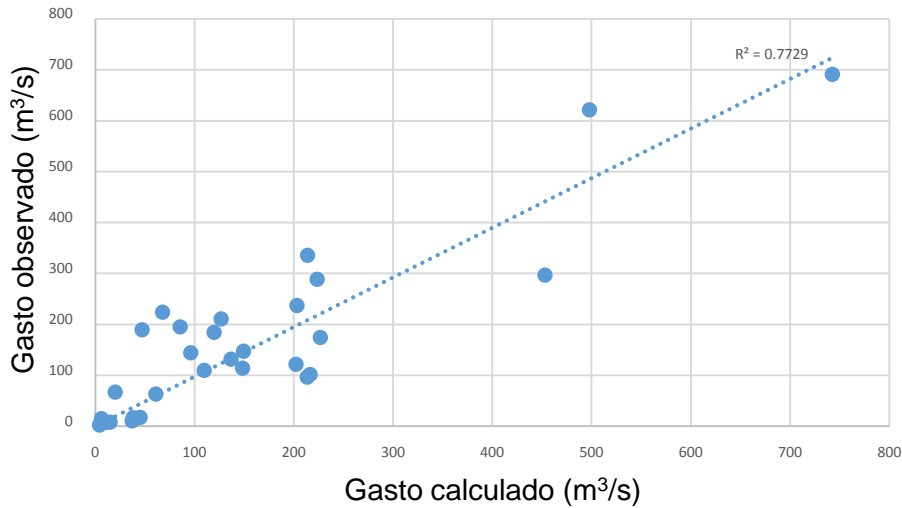


Figura 5-6.- Correlación entre los gastos máximos mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de calibración del 1998 al 2000

Como se ve, el coeficiente de determinación en esta relación es 0.77, lo que significa que existe bastante buen ajuste entre los gastos máximos mensuales calculados y observados en la etapa de calibración del modelo MIKE SHE. La capacidad del modelo para simular los gastos máximos durante un periodo de calibración resulta una herramienta importante para la planeación y manejo de la cuenca desde el punto de vista de prevención de desastres.

## 5.2 Validación del modelo

La muestra la comparación de los gastos diarios calculados con los observados en la estación hidrométrica Teapa durante el período de validación de 2003 a 2005.

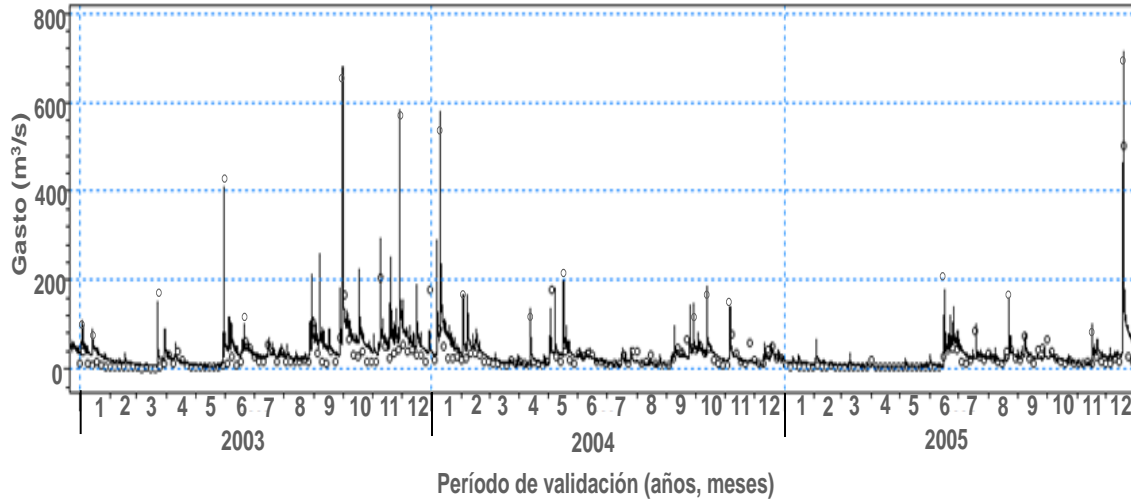


Figura 5-7.- Comparación de los gastos diarios calculados y los gastos observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de validación de 2003-2005

Como se ve, por lo general se observa relativamente buena conformidad e los gastos calculados con los gastos observados. Supuestamente con mejor ajuste del modelo MIKE SHE en período de su calibración podría posible lograr mejor ajuste entre los gastos calculados y observados durante período de validación.

La estimación más precisa de calidad de ajuste de los gastos diarios calculados comparados con los gastos diarios observados en el periodo de validación se realizó en la misma manera como para el período de calibración con los criterios MAE, RMSE, STDres,  $R^2$  y  $R^2$  de Nash Sutcliffe. Los resultados de este análisis se presentan en el cuadro 5-2.

Cuadro 5-2.- Resultados de la estimación estadística de calidad de validación del modelo MIKE SHE en proceso de cálculo de los gastos diarios del Río Teapa, Tabasco

Período	MAE	RMSE	STDres	$R^2$	$R^2$ Nash Sutcliffe
01/01/2003 a 31/12/2005	14.589	27.805	27.6196	0.66440	0.42777
01/01/2003 a 31/12/2003	20.032	32.613	31.8116	0.69775	0.43874
01/01/2004 a 31/12/2004	12.016	22.580	22.5796	0.67943	0.45729
01/01/2005 a 31/12/2005	11.772	27.396	27.2922	0.60199	0.35446

Nota: MAE = mean absolute error; RMSE = root mean square error; STDres = Standard deviation residuals;  $R^2$  = determination coefficient;  $R^2$  Nash Sutcliffe = Nash Sutcliffe determination coefficient.

Los datos del Cuadro 5-2 señalan que el proceso de validación del modelo MIKE SHE fue satisfactorio. Sin embargo, los valores de los criterios de ajuste entre los gastos calculados y observados no son muy altos, lo que posiblemente se puede explicar por el relativamente pequeño rango de modificación de los parámetros del modelo. Como se observa no existe un gran cambio de cada criterio estadístico del cuadro 5-2 en función de los años dentro del período de validación. Esto significa que el nivel de ajuste entre los gastos diarios calculados con el modelo MIKE SHE en su comparación con los datos observados es bastante estable en tiempo. Así mismo podemos observar que los indicadores estadísticos reflejan que el modelo es adecuado para la evaluación de los gastos diarios de salida de la cuenca.

En la Figura 5-8 se presenta la gráfica integral de correlación entre los gastos diarios calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante el período de validación del 2003 al 2005.

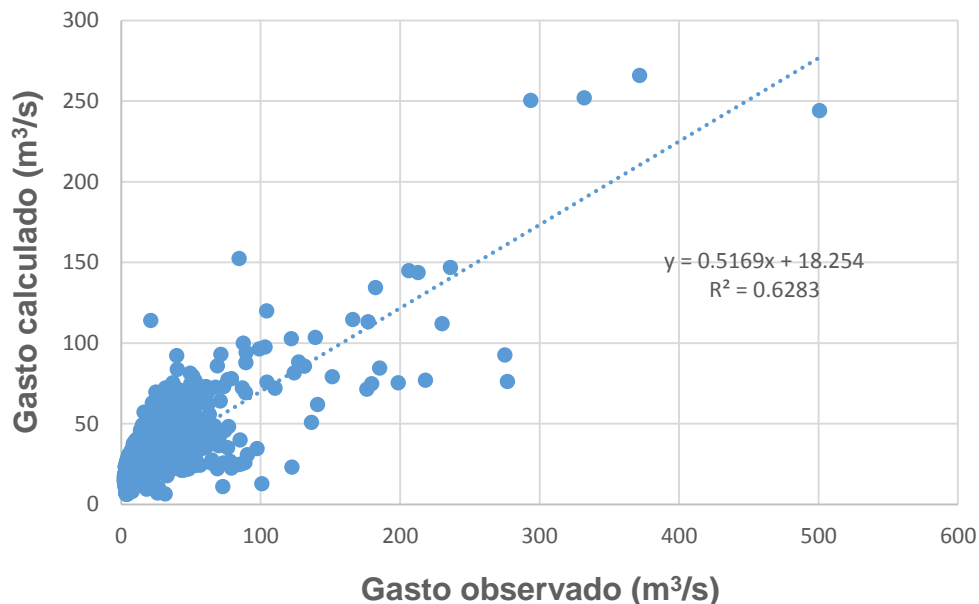


Figura 5-8.- Comparación de gastos diarios calculados y gastos observados durante período de validación del 2003 al 2005 en la estación hidrométrica Teapa

El coeficiente de determinación  $R^2 = 0.63$  en el período de validación es similar al valor de este coeficiente en el período de validación (0.62) y esto también significa que la calidad de ajuste fue moderada.

### 5.2.1 Gastos medios mensuales

En la Figura 5-9 se presentan las gráficas de comparación de los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante el período de validación del modelo MIKE SHE del 2003 al 2005. Estos gastos son medios aritméticos entre los gastos diarios registrados o calculados en esta estación. Considerando que los intervalos de tiempo de las series hidrométricas son iguales, los gastos medios mensuales son realmente representativos como medios para cada mes.

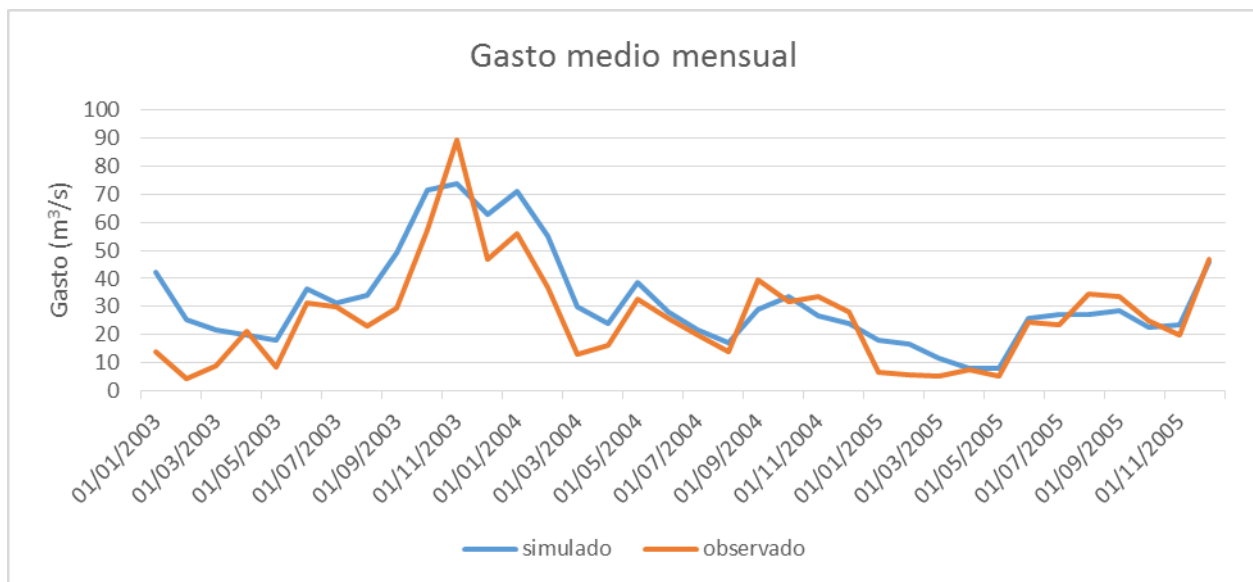


Figura 5-9.- Comparación de los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica convencional Teapa durante el período de validación del 2003 al 2005

Como puede observarse, existe un mejor ajuste entre los gastos medios mensuales observados y calculados en el período de validación en comparación con los mismos gastos durante período de calibración. Para mayor exactitud esta comparación se presenta en la Figura 5-10 en forma de la gráfica integral de correlación entre los valores de los gastos medios mensuales observados y calculados.

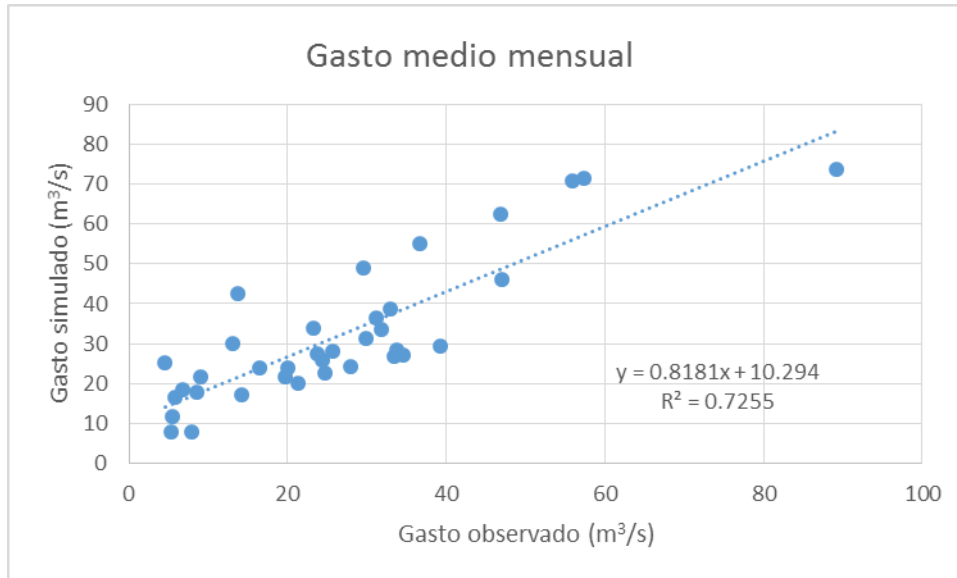


Figura 5-10.- Correlación entre los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de validación del 2003 al 2005

El coeficiente de determinación  $R^2$  de relación entre los gastos medios mensuales calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de validación del 2003 al 2005 es igual a 0.73 lo que es mayor que en relación a los gastos diarios (0.63), un poco menor que en el período de calibración (0.84) pero lo que también significa un buen ajuste entre los valores calculados y observados de los gastos medios mensuales.

### 5.2.2 Gastos máximos mensuales y anuales

Como fue mencionado anteriormente, los gastos máximos mensuales y anuales tienen gran importancia ya que con estos gastos están relacionados las situaciones críticas como desbordamientos e inundaciones así como sus impactos negativos, considerando esto, en la Figura 5-11 se presenta la gráfica de comparación de hidrográficas de los gastos máximos calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de validación del 2003 al 2005.



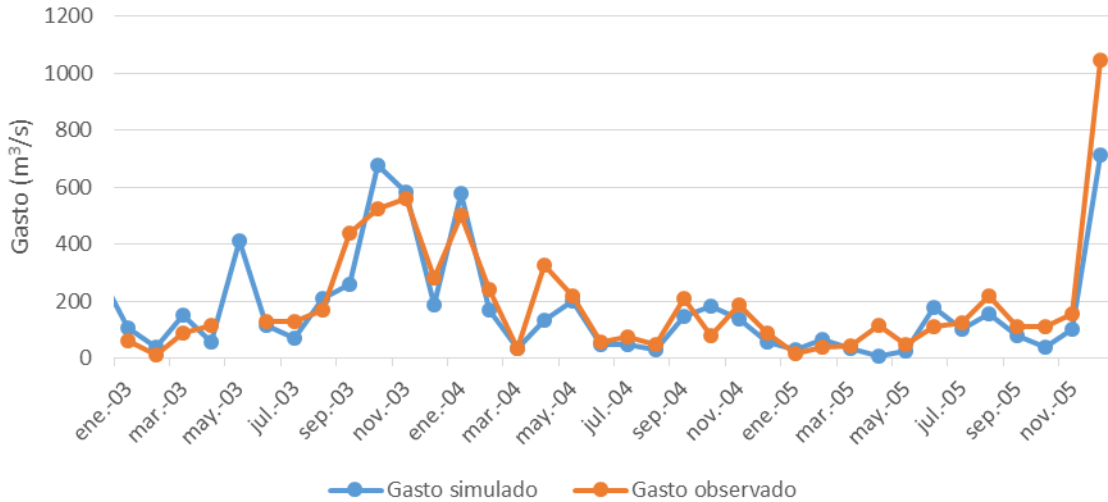


Figura 5-11.- Comparación de hidrográmas de los gastos máximos mensuales calculados y observados durante período de validación del 2003 al 2005

Como se puede observar, existe un buen ajuste entre dinámica de cambio en tiempo de los gastos máximos mensuales calculados y observados. Para mayor claridad en la Figura 5-12 se presenta la gráfica de correlación entre los gastos máximos calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de validación.

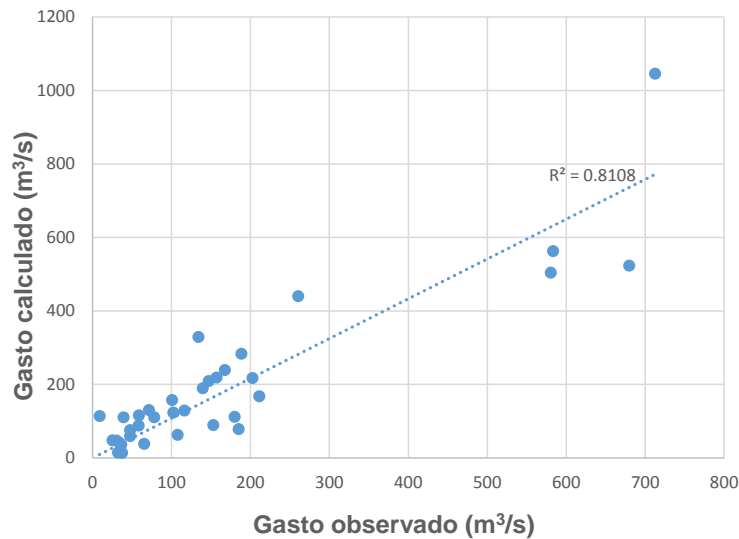


Figura 5-12.- Correlación entre los gastos máximos calculados y observados en la estación hidrométrica Teapa durante período de validación del 2003 al 2005

Como se ve, el coeficiente de determinación en esta relación es 0.81, lo que es mayor que en período de calibración (0.77) y lo que significa que existe un buen ajuste entre los gastos máximos mensuales calculados y observados en la etapa de validación del modelo MIKE SHE. Se puede suponer que en caso de mayor variación de los parámetros de este modelo sería posible lograr mejor ajuste entre los gastos máximos mensuales calculados y observados.

## 6 CONCLUSIONES

- 1) La información meteorológica, hidrométrica y biofísica existente en el área de influencia de la cuenca del Río Teapa, es suficiente para integrar, calibrar y validar el modelo hidrológico distribuido de base física MIKE SHE

Existe un buen ajuste entre los valores calculados y observados de los gastos medios y máximos mensuales y anuales del Río Teapa con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.81$  en el proceso de validación del modelo MIKE SHE lo que significa que este modelo puede ser utilizado en las condiciones similares a la cuenca del Río Teapa para estimar el riesgo de desbordamiento, inundaciones u otros tipos de desastres naturales relacionados con los gastos y niveles máximos de los ríos.

- 3) Existe un ajuste moderado entre los gastos diarios calculados y observados en proceso de validación del modelo MIKE SHE posiblemente se puede explicar por gran número de parámetros del modelo, para calibrar el modelo MIKE SHE fue considerada una posibilidad de variación de los parámetros del modelo solamente dentro de  $\pm 5\%$  de su valor inicialmente determinado y asignado a cada celda de superficie de la cuenca para calcular su régimen hídrico. Tales modificaciones se han hecho principalmente con respecto a las propiedades físicas de suelos (tales como: su conductividad hidráulica a saturación, humedad a saturación, humedad a capacidad de campo, humedad a punto de marchitez permanente) y a la rugosidad hidráulica de la superficie de la cuenca. En el caso de variación más amplia y de mayor número de los parámetros podría ser posible lograr mejor ajuste aún entre los gastos diarios.
- 4) Debido a existencia del problema nacional de sobreexplotación de acuíferos y considerando que los cálculos de movimiento de agua y de su balance se realizan por relativamente pequeñas fracciones del área de una cuenca, el modelo MIKE SHE se puede utilizar para definir las zonas con mayor efecto en el régimen hidrológico de las cuencas.
- 5) Considerando que la mayoría de las cuencas hidrográficas de México no tiene la información suficientemente detallada, se puede suponer que el modelo MIKE SHE no puede ser aplicado ampliamente en nuestro país.

## **7. RECOMENDACIONES**

- 1) Se recomienda ampliar experiencia de uso del modelo MIKE SHE aplicándolo en otras cuencas hidrográficas de nuestro país ubicadas en diferentes zonas climáticas.
- 2) Es necesario ampliar los registros de monitoreo hidrométrico y meteorológico para poder realizar comparaciones de resultados con un periodo de tiempo más amplio.
- 3) se recomienda robustecer las bases de datos existentes sobre las propiedades físicas de los suelos y las propiedades hidrológicas de la vegetación con la finalidad realizar análisis de sensibilidad más precisos de los modelos hidrológicos de base física.
- 4) se recomienda robustecer las bases de datos existentes sobre las propiedades físicas de los suelos y las propiedades hidrológicas de la vegetación con la finalidad realizar análisis de sensibilidad más precisos de los modelos hidrológicos de base física.

## 8. LITERATURA CITADA

- Abbott, M.B., Andersen, J.K., Havno, K., Jensen, K.H., Kroszynski, U.I. and Warren, I.R., 1982. Research and development for the unsaturated zone component of the European Hydrologic System -- Systeme Hydrologique Europeen (SHE). In: M.B. Abbott and J.A. Cunge (Editors), Engineering Applications of Computational Hydraulics. Pitman, London, Vol. 1, pp. 40-70.
- Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell, and J. Rasmussen. 1986a. An introduction to the European hydrological system - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. Journal of Hydrology, 87: 45-59.
- Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell, and J. Rasmussen. 1986b. An introduction to the European hydrological system - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. Journal of Hydrology, 87: 61-77.
- ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. J. Irrigation Drainage Eng. 119(3): 429-442.
- Belmans, C., Wesseling, J.G. and Feddes, R.A., 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. J. Hydrol., 63: 271-286.
- Beven, K.J. 2001. Rainfall-runoff modelling. Publ. John Wiley and Sons Ltd, England.
- Beven, K., 1979. A sensitivity analysis of the Penman Monteith actual evapotranspiration estimates. J. Hydrol., 44: 169-190.
- Brooks, N.K. 1991. Hydrology and the management of watersheds, Iowa state university press, 1<sup>st</sup> ed.
- Chiew, F.H.S., M.J. Stewardson, and T.A. McMahon. 1993. Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches. Journal of Hydrology, 147: 1-36.
- Chow, V.T, D.R. Maidment, and L.W. Mays. 1988. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill.
- CONAGUA. 2013. Banco nacional de datos de aguas superficiales. Publ. CONAGUA.
- DHI. 2004. MIKE SHE user manual. Publ. Danish hydraulic institute. Horsholm, Denmark.

- Diario Oficial de la Federación. 2011. Declaratoria de emergencia de lluvia severa e inundación fluvial en los municipios de Teapa y Cunduacán del estado de Tabasco. DOF: 28/10/2011.
- Dingman, S.L. 2002. Physical Hydrology. 2<sup>nd</sup> ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Donigian, A. S., J. C. Imhoff, and B. R. Bicknell. 1983. Predicting water quality resulting from agricultural nonpoint-source pollution via simulation – HSPF. In Agricultural Management and Water Quality, 200-249. Ames, Iowa: Iowa State University Press.
- EPA. 2002. Guidance for quality assurance project plans for modeling. EPA QA/G-5M. Report EPA/240/R-02/007. Washington, D.C.: U.S. EPA, Office of Environmental Information.
- Feddes, R.A., Kowalik, P., Neuman, S.P. and Bresler, E., 1976. Finite difference and finite element simulation of field water uptake by plants. Hydrol. Sci. Bull., 21: 81-98.
- Fetter, C. W., 2001. Applied Hydrology. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Publ. Offset Larios S.A., México, D.F., p.46-52.
- Hargreaves, G.H., and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99.
- Harmel, R. D., R. J. Cooper, R. M. Slade, R. L. Haney, and J. G. Arnold. 2006. Cumulative uncertainty in measured streamflow and water quality data for small watersheds. Trans. ASAE 49(3): 689-701.
- Hughes, D.A., and K. Sami. 1994. A semi-distributed, variable time interval model of catchment hydrology structure and parameter estimation procedures. Journal of Hydrology, 155: 265-291.
- INEGI. 2010. Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica escala 1:50 000. Edición: 2.0.
- INEGI. 2014. Conjunto de datos vectoriales edafológicos. Escala 1:250 000, serie ii. ([http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reconat/edafologia/vectorial\\_serieii.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reconat/edafologia/vectorial_serieii.aspx) consulta pública: julio 2014).

- Jensen, K.H., 1981. Application of soil water flow theory in field simulation. *Nord. Hydrol.*, 12: 16~184.
- Jensen, K.H., 1983. Simulation of water flow in the unsaturated zone including the root zone. Ser. Pap. No. 33, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark.
- Klemes, V. 1982. Scientific basis of water-resource management. *In: Empirical and Causal Models of Hydrology*. Publ. National Hydrology Research Inst., Canada: 95-104.
- Klemes, V. 1988. A hydrological perspective. *Journal of hydrology*, 100(1): 3 –28.
- Legates, D. R., and G. J. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1): 233-241.
- Ma L., Ascough II J.C., Ahuja L.R., Shaffer M.J., Hanson J.D., and Rojas K.W. 2000. Root zone water quality model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation. *Trans. ASAE* 43(4): 883-895.
- Martínez-Austria P.F. y C. Patiño-Gómez (eds). 2010. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. (<http://www.atl.org.mx/atlas-vulnerabilidad-hidrica-cc/> Consulta pública: junio 2011)
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *In: The State and Movement of Water in Living Organisms*, Proc. 15th Symposium Society for Experimental Biology, Swansea. Cambridge University Press, London, pp. 205-234.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Vieth T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification accuracy in watershed simulations. *Transactions of ASABE*, 50(3): 885-900.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3): 282-290.
- Ncube, M. 2006. The impact of land cover and land use on the hydrologic response in the olifants. Publ. Univ. of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.
- Newton, Isaac. 1726. *Mathematical principles of natural philosophy*. ~~English translation based on 3rd Latin edition. (1729).~~
- Palacios-Vélez O.L., and B. Cuevas-Renaud. 1992. SHIFT: a distributed runoff model using irregular triangular facets. *Journal of Hydrology*, 134(1-4): 35-55.

- Pérez Nieto S. 2013. Erosión hídrica en cuencas costeras de Chiapas y estrategias para su restauración hidrológico-ambiental. Tesis doctoral. Publ. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. México, México, 271 p.
- Preissmann, A. and Zaoui, J., 1979. Le module "écoulement de surface" du Système Hydrologique Européen (SHE). Proc. 18th Congress International Association for Hydraulic Research, Cagliari, 5: 193-199.
- Prutcha, R.H. 2004. MIKE SHE software review. Southwest hydrology, 37.
- Refsgaard, J.C. 1996. Terminology, modelling protocol and classification on hydrological mode codes. *In: Distributed Hydrological Modelling* (Edits. Abott M.B. and J.C. Refsgaard). Klower Academic Publ., Denmark, 17-39.
- Rutter, A.J., K.A. Kershaw, P.C. Robins, and A.J. Morton. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.*, 9: 367-384.
- Saxton, K. E. and Rawls, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions, Soil Science Society of America. *J. Soil & Water Management & Conservation, Soil Physics.* 70:1569–1578 (2006)
- Schwab, G.O, D.D. Fangmeier, W.J. Elliot, and R.K. Frevert. 1993. *Soil and Water Conservation Engineering*. 4th ed. New York: Wiley.
- Schulze, R.E. 1998. *Hydrological Modelling: Concepts and Practice*. Publ. International Institute of Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, Delft, Netherlands.
- Santhi, C, J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188.
- Singh, J., H. V. Knapp, and M. Demissie. 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey.
- SMN. 2013. Información meteorológica diaria del Servicio Meteorológico Nacional. Publ. SMC.
- Stephan, M.A.I. 2000. Applicability of radar level gauges in wave monitoring. Proc. of the 2nd Int. Conf. Port development & coastal environment, Varna, Bulgaria.



- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 36 (6): 913-920.
- Van Liew, M. W., T. L. Veith, D. D. Bosch, and J. G. Arnold. 2007. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS experimental watersheds. *J. Hydrologic Eng.* 12(2): 173-189.
- Willmott, C. J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2: 184-194.

# **ANEXOS**

Anexo 1. Características hidrológicas de los suelos utilizadas para calibrar el modelo.

Unidad de suelos	Parámetro	Valor inicial	Valor final
Acrisoles + Regosoles	Humedad a saturación (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.48	0.48
	Humedad CC (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.35	0.35
	Contenido de humedad a PMP (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.22	0.22
	Conductividad hidráulica (m/s)	1.64e-5	1e-5
Cambisoles	Contenido de humedad a saturación	0.5	0.5
	Contenido de humedad a CC	0.42	0.42
	Contenido de humedad a PMP	0.27	0.27
	Conductividad hidráulica	1.32e-5	1e-5
Gleysoles + Fluvisoles	Contenido de humedad a saturación	0.49	0.49
	Contenido de humedad a CC	0.41	0.41
	Contenido de humedad a PMP	0.26	0.26
	Conductividad hidráulica	2.87e-8	2.5e-8
Gleysoles + Cambisoles	Contenido de humedad a saturación	0.44	0.44
	Contenido de humedad a CC	0.22	0.22
	Contenido de humedad a PMP	0.12	0.12
	Conductividad hidráulica	1.65e-5	1.5e-5
Gleysoles + Luvisoles	Contenido de humedad a saturación	0.49	0.49
	Contenido de humedad a CC	0.39	0.39
	Contenido de humedad a PMP	0.22	0.22
	Conductividad hidráulica	2.3e-5	1.95e-5
Gleysoles	Contenido de humedad a saturación	0.47	0.47
	Contenido de humedad a CC	0.35	0.35
	Contenido de humedad a PMP	0.2	0.2
	Conductividad hidráulica	3.05e-5	2.8e-5
Gleysoles + Vertisoles	Contenido de humedad a saturación	0.56	0.56
	Contenido de humedad a CC	0.25	0.25
	Contenido de humedad a PMP	0.1	0.1
	Conductividad hidráulica	1.43e-5	1e-5
Leptosoles + Regosoles	Contenido de humedad a saturación	0.5	0.5
	Contenido de humedad a CC	0.4	0.4
	Contenido de humedad a PMP	0.2	0.2
	Conductividad hidráulica	4.50e-6	4.25e-6
Leptosoles + Luvisoles	Contenido de humedad a saturación	0.47	0.47
	Contenido de humedad a CC	0.38	0.38

		Contenido de humedad a PMP	0.22	0.22
		Conductividad hidráulica	9.8e-6	9.5e-6
Leptosoles		Contenido de humedad a saturación	0.5	0.5
		Contenido de humedad a CC	0.35	0.35
		Contenido de humedad a PMP	0.2	0.2
		Conductividad hidráulica	1.40e-5	1.18e-5
Leptosoles + Phaeozem	+	Contenido de humedad a saturación	0.51	0.51
		Contenido de humedad a CC	0.4	0.4
		Contenido de humedad a PMP	0.27	0.27
		Conductividad hidráulica	4.32e-6	4.1e-6
Luvisoles + Acrisoles		Contenido de humedad a saturación	0.48	0.48
		Contenido de humedad a CC	0.39	0.39
		Contenido de humedad a PMP	0.22	0.22
		Conductividad hidráulica	2.343e-5	2.242e-5
Luvisoles + Gleysoles		Contenido de humedad a saturación	0.38	0.38
		Contenido de humedad a CC	0.25	0.25
		Contenido de humedad a PMP	0.1	0.1
		Conductividad hidráulica	3.56e-6	3.4e-6
Luvisoles + Leptosoles	+	Contenido de humedad a saturación	0.4	0.4
		Contenido de humedad a CC	0.3	0.3
		Contenido de humedad a PMP	0.2	0.2
		Conductividad hidráulica	2.15e-6	2e-6
Luvisoles + Lixisoles		Contenido de humedad a saturación	0.55	0.55
		Contenido de humedad a CC	0.23	0.23
		Contenido de humedad a PMP	0.11	0.11
		Conductividad hidráulica	4.62e-6	4.557e-6
Luvisoles (fase gravosa)		Contenido de humedad a saturación	0.45	0.45
		Contenido de humedad a CC	0.33	0.33
		Contenido de humedad a PMP	0.23	0.23
		Conductividad hidráulica	1.32e-5	1.1792e-5
Luvisoles		Contenido de humedad a saturación	0.48	0.48
		Contenido de humedad a CC	0.32	0.32
		Contenido de humedad a PMP	0.18	0.18
		Conductividad hidráulica	2.35e-6	2.1e-6
Luvisoles + Phaeozem	+	Contenido de humedad a saturación	0.49	0.49
		Contenido de humedad a CC	0.34	0.34
		Contenido de humedad a PMP	0.21	0.21
		Conductividad hidráulica	1.86e-5	1.55e-5

Luvisoles Plintosoles	+	Contenido de humedad a saturación Contenido de humedad a CC Contenido de humedad a PMP Conductividad hidráulica	0.5 0.3 0.15 0.000112	0.5 0.3 0.15 0.000112
Luvisoles Phaeozem	+	Contenido de humedad a saturación Contenido de humedad a CC Contenido de humedad a PMP Conductividad hidráulica	0.3 0.1 0.05 0.00025	0.3 0.1 0.05 0.00025
Phaeozem Luvisoles	+	Contenido de humedad a saturación Contenido de humedad a CC Contenido de humedad a PMP Conductividad hidráulica	0.45 0.35 0.23 3.95e-7	0.45 0.35 0.23 3.9e-7
Plintosoles Luvisoles	+	Contenido de humedad a saturación Contenido de humedad a CC Contenido de humedad a PMP Conductividad hidráulica	0.5 0.32 0.15 1e-5	0.5 0.32 0.15 1e-5
Asentamiento humano		Contenido de humedad a saturación Contenido de humedad a CC Contenido de humedad a PMP Conductividad hidráulica	0.1 0.08 0.01 1e-9	0.1 0.08 0.01 1e-9

Nota: CC – capacidad de campo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); PMP – punto de marchitez permanente ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); conductividad hidráulica corresponde a la condición de saturación.

Anexo 2. Valores de rugosidad hidráulica de los diferentes usos de suelos presentes en la cuenca del Río Teapa Tabasco.

Uso de suelo	Coeficiente de rugosidad de Manning	
	Valor inicial	Valor final
Asentamiento humano	20	20
Área sin vegetación aparente	20	20
Agrícola	6	5.5
Pastizal	4	3.7
Selva mediana subcaducifolia	3	2.8
Selva mediana subperennifolia	2	1.8
Bosque de pino (incluido pino-encino)	3	2.8
Bosque mesófilo de montaña	2	1.8

Anexo 3. Gastos medios mensuales reportados por la estación hidrométrica Teapa y promedio mensual del gasto simulado para el período de calibración del modelo.

Mes/año	Gasto medio mensual (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )		Mes/año	Gasto medio mensual (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	
	Simulado	Observado		Simulado	Observado
ene-98	21.835	17.973	jul-99	36.752	36.017
feb-98	11.855	12.880	ago-99	31.122	30.141
mar-98	6.870	5.054	sep-99	89.010	76.098
abr-98	4.876	3.677	oct-99	123.851	110.852
may-98	3.805	1.502	nov-99	66.028	50.988
jun-98	7.013	3.122	dic-99	35.956	27.939
jul-98	17.716	28.457	ene-00	59.931	---
ago-98	40.154	28.595	feb-00	34.709	---
sep-98	45.423	27.412	mar-00	12.173	6.569
oct-98	45.432	66.985	abr-00	7.013	5.891
nov-98	44.266	40.687	may-00	15.716	18.540
dic-98	20.053	28.890	jun-00	55.283	31.538
ene-99	16.298	24.378	jul-00	47.409	13.727
feb-99	34.332	33.527	ago-00	70.190	44.518
mar-99	21.277	14.628	sep-00	80.928	72.519
abr-99	25.074	22.536	oct-00	126.554	83.499
may-99	12.565	6.074	nov-00	63.429	33.413
jun-99	26.263	26.929	dic-00	48.479	45.276

Anexo 4.- Datos generales de las estaciones meteorológicas utilizadas.

<b>Clave</b>	<b>27044</b>	<b>7217</b>	<b>7167</b>
Nombre	Teapa (DGE)	Solosuchiapa	Tapilula
Estado	Tabasco	Chiapas	Chiapas
Municipio	Teapa	Solosuchiapa	Tapilula
Situación	Operando	Operando	Operando
Organismo	CONAGUA DGE	CONAGUA DGE	CONAGUA DGE
Latitud	17.5489 n	17.4283	17.2486
Longitud	-92.9533 o	-93.0286	-93.0133
Altitud	51 msnm	165 msnm	780 msnm
Periodo de funcionamiento	23/07/1960 - 30/04/2013	01/06/1973 - 31/12/2006	04/04/1965 - 30/06/2013