



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA

RELACIONES LLUVIA-ESCURRIMIENTO EN LA
CUENCA DEL RÍO COATÁN, CHIAPAS, MÉXICO

TESIS



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y
USO INTEGRAL DEL AGUA

P R E S E N T A:

HOMERO ALONSO SÁNCHEZ

Chapingo, México, octubre de 2013



**RELACIONES LLUVIA-ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA DEL RÍO
COATÁN, CHIAPAS, MÉXICO.**

Tesis realizada por Homero Alonso Sánchez bajo la dirección del Comité asesor indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR



DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO

ASESOR



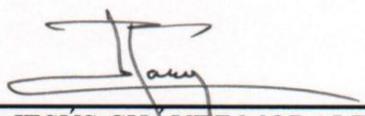
DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

LECTOR EXTERNO



DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

Homero Alonso Sánchez nació el 19 de agosto de 1985 en Santa María Michimaltongo, Tula de Allende, Hidalgo, donde curso el preescolar y la primaria en la escuela ‘‘Cuitlahuac’’, en 1996 ingreso a la escuela Telesecundaria No 188 en Michimaloya, posteriormente en 1999 ingresó a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y terminó en 2002. Estudió Ingeniería en Irrigación del Departamento de Irrigación y terminó en 2006, en ese año se tituló con la tesis: INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA OPERACIÓN DE UN MODULO DE RIEGO EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. En el periodo de Enero a Junio de 2006 trabajó en la elaboración del Sistema de Información Geográfica (SIG) del Distrito de Riego (DR) 030 Valsequillo, Puebla. En el periodo de Julio a Diciembre de 2006 trabajó en la elaboración del SIG y actualización del Padrón de Usuarios de la Unidad de Riego ‘‘Los Insurgentes’’ en Zumpango, Estado de México, para la conformación del DR ‘‘Los Insurgentes’’. En el periodo de Enero a Diciembre de 2007 trabajó en la elaboración del SIG y actualización del Padrón de Usuarios del DR 044 Jilotepec, Estado de México, también participó en la elaboración del Plan Director para la modernización del mismo DR y en la elaboración de un SIG para un estudio en las cuencas de los Ríos Coatán, Huhehuetán y Huixtla en Chiapas. En Agosto de 2007 ingresó a la maestría de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, donde con la dirección del Dr. Lamine Diakite Diakite desarrolló estudios de cambio climático en glaciares tropicales usando SIG y Percepción Remota. En 2009 obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua con la investigación: ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EROSIÓN CON UN MODELO HIDROLÓGICO: CASO NEVADO DE TOLUCA. En Agosto de 2009 ingresó al programa de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico durante los estudios de posgrado. A la contribución de la sociedad, que suplementa toda institución.

A mi alma mater, Universidad Autónoma Chapingo, por la oportunidad de estudiar el posgrado.

Al programa de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por permitirme estudiar sus planes de estudio. A su personal administrativo.

A la CONAGUA por las facilidades para hacer uso de la información del proyecto de monitoreo de procesos hidrológicos en la Costa de Chiapas.

A la Doctora Laura Alicia Ibáñez Castillo, por la dirección del presente trabajo, por su enseñanza, por incluir esta investigación en un proyecto que de no haber sido así, no hubiera sido posible, por la gestión de recursos para la logística y materiales de este trabajo, por el compromiso y esfuerzo de no abandonar el proyecto del que dependió esta investigación.

Al Doctor Ramón Arteaga Ramírez por su asesoría en la realización de este trabajo, por sus consejos, sus cátedras, por las oportunas correcciones y observaciones

Al Doctor Mario Alberto Vázquez Peña, por la asesoría brindada para esta tesis, por sus cátedras, por sus correcciones, comentarios y sugerencias para mejorar el trabajo.

Al Doctor Jesús Chávez Morales, por las observaciones y comentarios encaminados a mejorar este trabajo.

A los compañeros del posgrado quienes no referiré por nombre para no discriminar debido a mi memoria.

Al Instituto de Ingeniería de la UACH a su personal por su apoyo directo e indirecto en la realización de esta tesis.

A los residentes de campo del monitoreo de procesos hidrológicos en la Costa de Chiapas.

DEDICATORIA

A los campesinos que trabajan bajo el sol, se curten y arrancan el alimento de la tierra para dárnoslo a los que bajo los techos de cemento nos quejamos ingratamente de los precios de esos alimentos.

A mi familia:

Ernesto

Oliveria

Erika

Alicia

Ernesto

Marissa

José

Marina

Emanuel

Karina

Angélica

Daniel

Fernanda

Manuel

Jenifer

Marisol

Ángel

Diego

Soledad

CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE CUADROS	x
RESUMEN	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación	1
1.2. Objetivos generales	3
1.3. Objetivos particulares	3
1.4. Revisión de literatura	3
1.4.1. Relaciones lluvia escurrimiento	6
1.4.2. Información de la relación lluvia escurrimiento	6
1.4.2.1. Estimación de la relación lluvia escurrimiento	7
1.4.2.2. Estimación de la relación lluvia-escurrimiento con hidrográmas unitarios	7
1.4.2.3. Supuestos y limitaciones del hidrograma unitario	8
1.4.2.4. Derivación del hidrograma unitario	9
1.4.2.5. Hidrograma unitario tradicional	10
1.4.2.6. Hidrogramas unitarios sintéticos	11
A. Hidrograma unitario del SCS	11
B. Hidrograma unitario adimensional	12
C. Hidrograma de Snyder	13
1.4.2.7. Cálculo del escurrimiento a través del método de las envolventes	13
1.4.2.8. Estimación del escurrimiento a través del Método Racional Americano	14
1.4.3. Modelación lluvia escurrimiento	16
1.6. Literatura citada	20
CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1. La cuenca del Río Coatán	23
2.1.1. Ubicación geográfica	23
	vi

2.1.2.	Clima	25
2.1.3.	Geología	26
2.1.4.	Edafología	27
2.1.5.	Fisiografía	27
2.1.6.	Hidrografía	28
2.1.7.	Vegetación	29
2.1.7.1.	Bosque muy húmedo montano bajo subtropical	29
2.1.7.2.	Bosque muy húmedo montano subtropical	30
2.1.8.	Fauna	30
2.2.	Descripción general de materiales y métodos	31
2.2.1.	Comparación de gastos máximos	32
2.2.2.	Comparación de números de curva de escurrimiento	32
2.2.3.	Modelación con HEC-HMS	33
2.3.	Literatura citada	33

**CAPÍTULO 3. GASTOS PICO CON HIDROGRAMAS
UNITARIOS SINTÉTICOS EN MICROCUENCAS DE
MONTAÑA** 35

3.1.	Introducción	36
3.2.	Materiales y métodos	37
3.2.1.	Gasto pico con el hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos	38
3.2.2.	Gasto al pico con el hidrograma unitario sintético de Snyder	39
3.2.3.	Error de los gastos pico estimados	40
3.3.	Resultados y discusión	41
3.4.	Conclusiones	46
3.5.	Agradecimientos	47
3.6.	Literatura citada	47

**CAPÍTULO 4. IDENTIFICACIÓN DE CURVA DE
ESCURRIMIENTO EN MICROCUENCAS DEL RÍO** 49

COATÁN, CHIAPAS, MÉXICO

4.1.	Introducción	50
4.2.	Materiales y métodos	53
4.2.1.	Precipitación	53
4.2.2.	Escurrimiento	54
4.2.3.	Transformación de límnigramas a hidrogramas	54
4.2.4.	Obtención del número de curva de escurrimiento con el método del SCS	54
4.2.5.	Condición de humedad antecedente	55
4.2.6.	Cálculo del Número de Curva de escurrimiento	56
4.2.7.	Estimación del error entre los números de curva de tablas y los estimados	57
4.3.	Resultados y discusión	59
4.4.	Conclusiones	64
4.5.	Agradecimientos	65
4.6.	Literatura citada	65

CAPÍTULO 5. MODELACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO COATÁN CON HEC-HMS

5.1.	Introducción	68
5.2.	Revisión de literatura	70
5.2.1.	Cálculo del escurrimiento	70
5.2.2.	Descripción del Modelo HMS	72
5.2.3.	Aplicación de los SIG en la modelación hidrológica	73
5.2.3.1.	Percepción remota	74
5.3.	Materiales y métodos	76
5.3.1.	Área de estudio	76
5.3.2.	Datos	78
5.3.3.	Uso de suelo	79
5.3.4.	Componentes del Modelo HEC-HMS	81
5.4.	Resultados y discusión	83

5.5.	Conclusiones	96
5.6.	Recomendaciones	96
5.7.	Agradecimientos	97
5.8.	Literatura citada	97
	CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
	GENERALES	
6.1.	Conclusiones	102
6.2.	Recomendaciones	103
	ANEXOS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	Hidrograma unitario triangular. 12
Figura 1.2	Hidrograma unitario adimensional. Fuente: Chow (1971). 13
Figura 2.1	Ubicación geográfica de la cuenca del Río Coatán 24
Figura 2.2	Hidrografía de la cuenca del Río Coatán 29
Figura 2.3	Ubicación de las microcuencas 31
Figura 3.1	Hidrograma unitario medido, del SCS y de Snyder 07 de junio de 2011. 46
Figura 5.1	Localización geográfica de la cuenca del Río Coatán. 77
Figura 5.2	Hietograma del 11 de octubre de 2011 de la estación Buena Vista. 86
Figura 5.3	Hietograma del 11 de octubre de 2011 de la estación Chanjalé. 86
Figura 5.4	Hietograma del 11 de octubre de 2011 de la estación Progreso. 87
Figura 5.5	Hietograma del 11 de octubre de 2011 de la estación Vega de los gatos. 87
Figura 5.6	Hietograma del 4 de octubre de 2005 de la estación Chicharras con el patrón de distribución de la estación Argovia. 88
Figura 5.7	Hietograma del 4 de octubre de 2005 de la estación Malpaso con el patrón de distribución de la estación UNACH. 88
Figura 5.8	Hietograma del 4 de octubre de 2005 de la estación San Jerónimo con el patrón de distribución de la estación Argovia. 89
Figura 5.9	Hidrograma a la salida de la cuenca del 11 de octubre de 2011, modelación empírica, Run 1. 92
Figura 5.10	Hidrograma del 11 de octubre de 2011 a la salida de la cuenca, modelación a partir de medición directa, Run 2. 92
Figura 5.11	Hidrograma a la salida de la cuenca del 4 de octubre de 2005, modelación empírica, Run 3. 93
Figura 5.12	Figura 5.12. Hidrograma a la salida de la cuenca del 4 de octubre de 2005, modelación a partir de medición directa, Run 4. 94
Figura 5.13	Rangos de gastos máximos en $m^3/s. km^2$ en los cuatro escenarios 95

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 3.1 Características físicas y geométricas de las microcuencas instrumentadas.	38
Cuadro 3.2 Gastos Pico estimados con el método del SCS, de Snyder y medidos en la microcuenca Vega de los Gatos.	42
Cuadro 3.3 Cuadro 2.3. Gastos Pico estimados con el método del SCS, de Snyder y medidos en la microcuenca Progreso.	43
Cuadro 3.4 Gastos Pico estimados con el método del SCS, de Snyder y medidos en la microcuenca Chanjalé.	44
Cuadro 4.1 Características físicas y geométricas de las microcuencas.	53
Cuadro 4.2 Números de curva de tablas y calculado en la microcuenca Vega de los Gatos	59
Cuadro 4.3 Número de Curva de escurrimiento de tablas y calculado de la microcuenca Progreso	61
Cuadro 4.4 Número de Curva de escurrimiento de tablas y calculado de la microcuenca Chanjalé	61
Cuadro 4.5 Parámetros de comparación de varianzas y medias de los NC de tablas y calculados	64
Cuadro 5.1 Localización de los pluviógrafos dentro de la cuenca	78
Cuadro 5.2 Precipitación total del 3 al 6 de octubre de 2005 de las estaciones dentro de la cuenca	78
Cuadro 5.3 Parámetros de las subcuencas y números de curva de escurrimiento	82
Cuadro 5.4 Porcentajes de usos de suelo en las subcuencas del Río Coatán	84
Cuadro 5.5 Escenarios estudiados con el modelo HMS en la cuenca del Río Coatán.	85
Cuadro 5.6 Gastos máximos por subcuenca en los cuatro escenarios	90

Relaciones lluvia-escurrimiento en la cuenca del río Coatán, Chiapas, México.

Rainfall-runoff relationship in the Coatán river basin, Chiapas, México.

Homero Alonso Sánchez¹ Laura A. Ibáñez Castillo²

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue estudiar las relaciones lluvia escurrimiento en la Cuenca del Río Coatán, una de las cuencas pioneras del monitoreo en México, donde los asentamientos en las partes bajas han sido víctimas de recientes desastres por la crecida de sus ríos. Con información de los años 2010 y 2011 de cuatro microcuencas de monitoreo establecidas por la CONAGUA en la parte baja media y alta de la cuenca, se trabajó con hidrogramas unitarios sintéticos (métodos de Snyder y del SCS), se identificaron los Números de Curva de escurrimiento a partir de mediciones, también se identificaron los usos de suelo con imagen Spot V, y mediante la técnica de análisis espacial, se extrapolaron los parámetros encontrados a las subcuencas para poder alimentar el modelo hidrológico HEC-HMS. De los hidrogramas unitarios sintéticos se encontró que el de Snyder tuvo menor error en los gastos pico estimados que el triangular del SCS respecto a los gastos unitarios máximos medidos, también se identificaron los coeficientes de Snyder C_p y C_t . Los números de curva identificados a partir de mediciones resultaron más conservadores, es decir, los valores de tablas los sobreestimaron. El modelo HMS se corrió como cuenca no instrumentada y con los parámetros obtenidos a partir de las mediciones. Se modelaron dos eventos extremos: 4 de octubre de 2005 y 11 de octubre de 2011. En ambos eventos la modelación empírica sobreestimo la modelación con parámetros medidos bajo un programa de monitoreo.

Palabras Clave: hidrogramas unitarios sintéticos, números de curva, usos de suelo, análisis espacial, modelo HMS.

ABSTRACT

The main objective of this work was the study of relationships rainfall runoff of the Coatán River Basin, one of the monitoring pioneers of basins in Mexico, where the settlements in the lowlands have been victims of disasters by rising rivers. With information from the years 2010 and 2011 four monitored micro basin established by the CONAGUA in the lower, middle and upper basin, we worked with synthetic unit hydrographs (Snyder and SCS methods). We identified Curve Numbers runoff from measurements, also we identified land uses with Spot image V, and using spatial analysis technique, the parameters were extrapolated to the sub basins to feed the hydrologic model HEC-HMS. We found that method of Snyder synthetic unit hydrograph had lower error in estimate peak flow that method of SCS with respect to measured unit peak flow, also we identified Snyder coefficients C_p and C_t . Curve numbers that were identified from measurements were more conservative, the values of tables overestimate them. The HMS model was run as non-instrumented basin and whit the parameters obtained from the measurements. Two extreme events were modeled: October 4, 2005 and October 11, 2011. Both empirical modeling overestimates the modeling whit measured parameters in a monitoring program.

Keywords: synthetic unit hydrograph, curve numbers, land uses, spatial analysis, HMS model

¹ Autor de tesis

² Director de tesis

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. PRESENTACIÓN

El agua tiene diferentes intereses para cada profesional, en el caso de los hidrólogos interesan los aspectos relacionados con el diseño y operación de proyectos para el control y uso del agua.

El agua contenida en glaciares, lagos, ríos, acuíferos y embalses es menor al 3% del total global, debido a esa escasez existen problemas en ciertos lugares y otros problemas acontecen por la variación en la distribución espacial y temporal del agua. Por ejemplo las personas que viven en el Norte de México tienen gran preocupación debido a la carencia de agua, así también el exceso o la falta de agua trae consigo serios problemas a la agricultura. Las inundaciones son un problema que afecta a los asentamientos humanos ubicados en las márgenes de los ríos. Los cultivos no crecen a su tasa óptima cuando el suelo está muy saturado o cuando el suelo está seco. Pareciera que la cantidad de agua dulce en la tierra es suficiente para resolver nuestras necesidades, pero no es así debido a su heterogénea distribución espacial y temporal.

En un intento por resolver los problemas debidos a la distribución espacial y temporal de agua, los científicos intentan hacer predicciones sobre su disponibilidad. Estas predicciones se utilizan en la evaluación de alternativas encaminadas a prevenir o a resolver los problemas de exceso o falta de agua. La ocurrencia de la precipitación no se predice con certeza, por lo que no se sabe qué cantidad de agua lloverá en un cierto periodo de tiempo, por lo cual es difícil construir obras que controlen el agua en todas las condiciones de variación espacial y temporal. Si se tuviera información más completa, sería menor el costo de las obras necesarias para tener la disponibilidad óptima.

Los procesos hidrológicos como la lluvia y el escurrimiento son complejos y no existe teoría completa de la hidrología, por lo tanto para estudiarlos es necesario medir la ocurrencia de los fenómenos hidrológicos. Sin embargo, debido al limitado registro de información, la precisión de los diseños es menor de lo que se quisiera.

Debido a las carencias de información y a los problemas de la distribución espacial y temporal de agua, es necesaria la estimación de datos que permitan a los ingenieros hacer diseños racionales que resuelvan las necesidades de manejo del agua.

Los procesos físicos que controlan la distribución y movimiento del agua son mejor comprendidos en términos del ciclo hidrológico. Aunque no existe un punto de inicio o término del ciclo hidrológico, en cuencas hidrológicas se asume que se inicia en la precipitación.

La precipitación puede caer en la superficie continental, en cuencas hidrológicas en cuerpos de agua y viajar sobre ella hasta alcanzar un curso de agua o infiltrarse en el suelo. Una parte de la lluvia es interceptada por la vegetación, es almacenada temporalmente hasta que se evapora y regresa a la atmósfera. Otra parte de la lluvia es almacenada en las depresiones naturales donde también se evapora o se infiltra al subsuelo. El agua que se almacena en depresiones, la que es interceptada por la vegetación y la que se infiltra durante el inicio de un evento de lluvia se conocen como abstracciones. Las pérdidas son agua que no aparece como escurrimiento durante o inmediatamente después del evento de lluvia. El agua que corre sobre la superficie alcanza riachuelos que son tributarios cada vez mayores que se unen a los grandes ríos y luego a los océanos.

Los desastres causados por eventos extremos en diversas partes del mundo provocan pérdidas irreversibles por lo que es necesario el estudio de las relaciones lluvia escurrimiento para realizar estimaciones con mayor certeza y construir obras de protección en la parte baja de las cuencas donde se encuentran los asentamientos humanos. Las metodologías para su estudio han sido desarrolladas principalmente en Estados Unidos y para obtener mejor predicción de los fenómenos físicos que estiman, es necesario ajustarlas a otras regiones como las zonas tropicales de México. Por lo que en este trabajo se presentan estudios en forma de tres artículos técnicos que comprenden; 1. La comparación de gastos máximos obtenidos con hidrográmas unitarios elaborados a partir de medición directa versus los estimados con los hidrográmas unitarios sintéticos obtenidos con los métodos del SCS y el de Snyder, 2. La comparación de los números de curva de escurrimiento identificados a partir de medición de lluvia y escurrimiento contra los obtenidos de las tablas del SCS, y 3. Comparación de los resultados de la modelación con el modelo Hydrologic Modeling System (HMS), en el caso de los gastos máximos y números de curva estimados y medidos, obtenidos en los estudios anteriores.

1.2. OBJETIVOS GENERALES

Obtener los hidrogramas unitarios sintéticos de Snyder y triangular del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de microcuencas ubicadas en la cuenca del Río Coatán.

Identificar los números de curva de escurrimiento en microcuencas de la cuenca del Río Coatán a partir de medición directa de lluvia y escurrimiento.

Modelar la relación lluvia escurrimiento en la cuenca del Río Coatán con el modelo Hydrologic Modeling System, HMS, del Hydrologic Engineering Center, HEC, del U.S. Army Corps of Engineers, USACE, utilizando información observada de dos eventos extremos de lluvia.

1.3. OBJETIVOS PARTICULARES

Comparar los gastos máximos estimados con los hidrogramas unitarios sintéticos versus los medidos, en tres microcuencas ubicadas dentro de la cuenca del Río Coatán, Chiapas, México.

Comparar los números de curva de escurrimiento identificados a partir de mediciones en las tres microcuencas, con aquellos que se seleccionan de las tablas elaboradas por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

Comparar la modelación empírica realizada en HEC-HMS con respecto a los resultados que produce el mismo modelo, al alimentarlo con algunos parámetros calculados a partir de mediciones.

1.4. REVISIÓN DE LITERATURA

En la actualidad el estudio de la relación lluvia escurrimiento juega un papel imprescindible en la planeación de los recursos naturales y se ha llegado a convertir en una parte

fundamental en el diseño de obras que tienen que ver con suministro de agua, drenaje, recreación y en muchas regiones en protección contra la crecida de los ríos.

Para su estudio se utiliza la cuenca como la unidad básica porque es ahí donde se pueden medir, con algún grado de acercamiento a la realidad, las características geométricas y las cantidades de lluvia y escurrimiento que permiten estudiar la transferencia de lluvia a escurrimiento. A través de la hidrometría se miden las variables hidrológicas por medio de trabajos de campo y con el uso de instrumentos de medición en sitios seleccionados adecuadamente donde se efectúa la toma de datos.

Los modelos hidrológicos son una representación simplificada de un complejo sistema real que involucra una gran cantidad de variables, pero que sólo se enfoca en las de mayor efecto en el fenómeno que se estudia. Su importancia radica en la simulación y predicción de los fenómenos físicos que ocurren en la cuenca, algunas de sus ventajas son: se pueden simular relaciones causa efecto sin realizar cambios en los sistemas reales, se puede repetir un fenómeno tantas veces como se quiera y se pueden modelar condiciones extremas y observar los efectos espaciales como en la modelación lluvia-escurrimiento.

La relación lluvia escurrimiento es una parte del ciclo hidrológico, para su estudio es necesario aplicar modelos matemáticos conceptuales que en la actualidad son implementados en ambientes de computadora y son alimentados con información registrada en la cuenca.

La interpretación matemática del proceso lluvia escurrimiento es una pequeña rama en el campo de la hidrología, su origen se remonta a la mitad del siglo XIX en respuesta a la necesidad de conocer los caudales para diseño de alcantarillas, de sistemas de drenaje y obras de excedencias en los almacenamientos artificiales.

El primer intento para estimar el escurrimiento a partir de la lluvia fue el Método Racional Americano a finales del siglo XIX derivado para pequeñas cuencas de montaña y basado en el concepto de tiempo de concentración. Más adelante evolucionó este método y se basó en el concepto de isócronas siendo el primer modelo lluvia escurrimiento basado en una función de transferencia, sus parámetros se derivaron a partir de mapas topográficos y usando la fórmula de Manning para la obtención de los caudales.

Sherman (1932) introdujo el concepto de hidrograma unitario bajo el principio de superposición de causas y efectos, pero la separación del escurrimiento directo del flujo

base, la obtención de la duración efectiva de la precipitación y la obtención del hidrograma unitario estaban acompañadas de un alto grado de subjetividad.

En los 50's se originaron los modelos conceptuales, estos modelos se alejaban cada vez más de la realidad del fenómeno físico causando un gran daño a la modelación. Para los matemáticos era sencillo plantear un modelo en base a valores de lluvia y escurrimiento, pero era difícil interpretar sus resultados en términos reales.

En los 60's se intentó interpretar la relación lluvia escurrimiento bajo un enfoque más realista buscando una interpretación física del proceso que pudiera representar el comportamiento de esos componentes del ciclo hidrológico. Varios programas de investigación en universidades e instituciones gubernamentales como Harvard, Stanford y el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos fueron los pioneros en implementar el uso de modelos en la hidrología usando las primeras versiones de computadoras digitales para la simulación del comportamiento de la cuenca en forma continua, la mayoría de los modelos desarrollados en esa época estaban basados en ecuaciones de balance (Bedient *et al.*, 2013).

La carencia de una relación estrecha entre modelo y realidad propició que un gran número de instituciones de hidráulica e hidrología se enfocaran en integrar en un modelo la solución de ecuaciones diferenciales que expresaran la continuidad de masa y momento tomando en cuenta las condiciones de frontera. El resultado fue el modelo Sistema Hidrológico Europeo (SHE).

En la actualidad la relación lluvia escurrimiento es representada con modelos que incluyen los procesos dinámicos como difusión de fertilizantes y contaminantes. La disponibilidad de gran cantidad de información digital junto con las herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y las imágenes de satélite constituyen la solución de ecuaciones diferenciales en finas discretizaciones. Los avances en tecnología de software y hardware desde 1970 combinado con una gran cantidad de información hidrológica han permitido el desarrollo y aplicación de los modelos en la hidrología.

1.4.1. Relaciones lluvia escurrimiento

En el proceso lluvia-escurrimiento intervienen un sinnúmero de factores, algunos de ellos son los que tienen mayor impacto en su estimación como la intensidad y la duración de la precipitación. Algunos factores están implícitos en los métodos del número de curva de escurrimiento y en los HUS de transformación. En este trabajo se identificaron los números de curva y los coeficientes del HUS de Snyder y se utilizaron para alimentar el modelo HEC- HMS.

1.4.2. Información de la Relación lluvia-escurrimiento

Es común que no se cuente con registros completos de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas. En México los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento además de que no se afectan por cambios en la cuenca tales como construcción de obras de almacenamiento y derivación, deforestación, crecimiento de las manchas urbanas, vías de comunicación, otros. Por lo que se estima conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento de la cuenca mediante las características de la misma y la precipitación. Las características de la cuenca se conocen por medio de levantamientos topográficos y de uso de suelo, la precipitación a través de mediciones directas en el caso de predicción de avenidas frecuentes y actualmente con sistemas de fotografía satelital y modelos de información geográfica.

Las principales características de la cuenca que intervienen en el proceso de lluvia-escurrimiento son: el área, forma, topografía, altura total de precipitación, distribución espacial y temporal de la lluvia, tipo y uso de suelo.

Debido a que la calidad y cantidad de información disponible varía sustancialmente, ya que no siempre se requiere la misma precisión en los resultados, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para analizar la relación lluvia-escurrimiento.

Aunque se pueden involucrar más parámetros en el estudio de esta relación, la complejidad de los métodos aumenta significativamente, en este sentido también aumenta su precisión, en consecuencia los datos que se requieren deben ser de mejor calidad.

1.4.2.1. Estimación de la relación lluvia escurrimiento

La estimación de la relación lluvia-escurrimiento puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos y el más usado es el del hidrograma unitario (HU), introducido por Sherman (1932).

El método del HU para transformar lluvia-escurrimiento es utilizado por los investigadores y es la herramienta más usada para la estimación de hidrogramas de flujo (Bahram, 2006; Paz-Pellat, 2009). El HU es usado por sus estimaciones de hidrogramas de flujo; en su aplicación se hacen los supuestos de linealidad y varianza en el tiempo. En teoría, sólo el gasto pico de un hidrograma de equilibrio sigue una proporcionalidad lineal con la intensidad de la lluvia en exceso, en cambio la respuesta de una cuenca no es lineal. Según Bahram (2006), en las cuencas no instrumentadas o con condiciones limitadas de monitoreo se utilizan los HU sintéticos (HUS) derivados con los métodos de Snyder (1938) y del SCS, el termino sintético significa que se puede derivar de características de la cuenca que se pueden medir. Con base en ecuaciones empíricas el HUS extiende la aplicación de la teoría del HU a cuencas no instrumentadas, usando las características de la cuenca (Jena y Tiwari, 2005). Se pueden aplicar en cuencas no instrumentadas debido a que no requieren registros de escurrimiento.

La necesidad de desarrollar HUS origina estudios basados en dos enfoques: 1) cada cuenca tiene un hidrograma único, y 2) todos los hidrogramas unitarios pertenecen a una familia de curvas (Bedient *et al.*, 2013). El HU de Snyder (1938) se basa en el primer enfoque teórico y el método del SCS en el segundo enfoque. Bernard (1935) propuso la transformación de lluvia a escurrimiento por medio de gráficas de distribución, Snyder (1938) mejoró el procedimiento de Bernard.

Otro enfoque para obtener los parámetros de un HUS es modelar con parámetros geomorfológicos para luego integrarlo, para ello los investigadores monitorean las cuencas manualmente o usando instrumentos (Jena y Tiwari, 2005).

1.4.2.2. Estimación de la relación lluvia-escurrimiento con hidrogramas unitarios

El concepto de hidrograma unitario se ha usado ampliamente en todo el mundo desde su publicación original, esta idea se ha ampliado y mejorado de forma considerable.

El hidrograma unitario es la función respuesta a un pulso unitario para un sistema hidrológico lineal. El hidrograma unitario de una cuenca, se define como el hidrograma de escurrimiento directo (DRH, por sus siglas en inglés) resultante de 1 unidad lineal de precipitación en exceso, 1 pulgada o 1 cm en unidades del SI generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva (d_e) y repartida uniformemente en la cuenca (Chow *et al.*, 1971).

La duración efectiva puede ser 1, 2, 3 o más horas dependiendo del tamaño de la cuenca y de las características de la tormenta. Sin embargo, *la duración efectiva no debe ser mayor que el tiempo de concentración*, que es el tiempo que le toma al agua viajar desde el punto más lejano a la salida de la cuenca.

1.4.2.3. Supuestos y limitaciones del hidrograma unitario

Los siguientes supuestos son hechos al usar el principio del hidrograma unitario propuesto por Sherman (1932):

- La lluvia efectiva debe estar uniformemente distribuida sobre la cuenca, lo que significa que si hay N pluviómetros distribuidos uniformemente sobre la cuenca, entonces todos los pluviógrafos deben registrar la misma cantidad de lluvia durante el tiempo especificado.
- La lluvia efectiva es constante sobre la cuenca durante el tiempo unitario
- El hidrograma de escurrimiento directo para una lluvia efectiva dada de una cuenca es siempre el mismo independientemente de cuándo ocurra. Por lo tanto, cualquier evento previo no es considerado. La lluvia antecedente es de cualquier manera importante por su efecto en la tasa de infiltración del suelo, en el almacenamiento en depresiones, y por tanto, en el hidrograma resultante.
- Las ordenadas del hidrograma unitario son directamente proporcionales a las del hidrograma de la lluvia efectiva, por tanto, si un hidrograma unitario de 6 horas debido a 1 cm de lluvia es dado, entonces un hidrograma unitario de 6 horas debido a 2 cm de lluvia puede significar el doble de las ordenadas del hidrograma unitario, quedando el mismo tiempo base.

Bajo las condiciones naturales de lluvia sobre la cuenca, los supuestos del hidrograma unitario no se pueden satisfacer perfectamente, sin embargo, cuando la información hidrológica es seleccionada cuidadosamente de manera que se acerque a los supuestos, los resultados obtenidos por la teoría del hidrograma unitario pueden ser aceptables para todos los propósitos prácticos.

En teoría, el principio del hidrograma unitario es aplicado a cuencas de cualquier tamaño, sin embargo, en la práctica para encontrar los supuestos básicos en la derivación del hidrograma unitario lo más cerca posible, es importante seleccionar tormentas que estén uniformemente distribuidas sobre la cuenca y que produzcan una lluvia en exceso a una velocidad uniforme, estas tormentas no ocurren en áreas muy grandes. El tamaño de la cuenca es limitada por detenciones, almacenamiento en valles y la infiltración que minimizan el efecto de la variabilidad de la lluvia. El límite es generalmente de 5000 kilómetros cuadrados, más allá de ese tamaño la aplicabilidad del método del hidrograma unitario disminuye (Nania, 2003). Cuando el tamaño de la cuenca excede este límite, se tiene que hacer una subdivisión en subcuencas y el hidrograma unitario se desarrolla para cada subcuenca. La descarga a la salida de la cuenca se calcula combinando el flujo de cada subcuenca usando el procedimiento de tránsito de avenidas. El tránsito de avenidas es un término usado para denotar el principio computacional para estimar el valor de descarga en tiempo y espacio a través de un tramo del río.

Si en dos cuencas con las mismas características de suelo y superficie, pero de forma distinta se presenta una misma tormenta el volumen escurrido será el mismo las características del hidrograma de salida varía de una cuenca a otra. El hidrograma unitario toma en cuenta este efecto y considera implícitamente la altura total de precipitación, el área de la cuenca, su forma, vegetación, pendiente, condición de humedad antecedente, otros.

1.4.2.4. Derivación del hidrograma unitario

Un hidrograma observado en una estación de aforo puede ser un hidrograma resultante de una intensa tormenta aislada de duración pequeña de distribución uniforme en tiempo y espacio, o puede ser debido a un evento de lluvia complejo de intensidades variables. En el primer caso el hidrograma observado puede ser de un solo pico mientras que para el último,

el hidrograma puede tener varios picos dependiendo de la variación en las intensidades de lluvia. El procedimiento puede ser dividido principalmente en los siguientes pasos.

- a. Obtener tantos registros de lluvia como sea posible del área de interés para asegurarse de que la distribución de la lluvia sobre la cuenca se conoce con precisión. Solo se seleccionan aquellos eventos aislados con distribución espacial y temporal uniforme con hidrograma observado en la salida de la cuenca.
- b. Eventos que reúnan el criterio siguiente son seleccionados de tormentas uniformes colectadas en el paso a.
- c. Eventos con duración de lluvia alrededor de 20 a 30% el tiempo de retraso
- d. Eventos que tengan un exceso entre 1 y 4.5 cm
- e. De los hidrogramas de flujo observados separar el flujo base y graficar el escurrimiento directo.
- f. Medir el volumen total de agua que paso el punto de medición encontrando el área bajo la curva del hidrograma de escurrimiento directo, como se conoce el área de la cuenca, calcular la lámina de escurrimiento, esto da la lluvia efectiva correspondiente a la tormenta. este procedimiento se repite para cada evento seleccionado.
- g. Expresar las ordenadas del hidrograma para cada evento donde T-horas es la duración del evento de lluvia. Dividir cada ordenada del hidrograma entre la respectiva lluvia efectiva para obtener el hidrograma unitario de cada evento.
- h. Todos los HUs obtenidos de diferentes eventos deben ser convertidos a la misma duración por el método de la curva S.

El HU final de duración específica se obtiene promediando las ordenadas de los diferentes HU obtenidos en el paso f.

1.4.2.5. Hidrograma unitario tradicional

Para la obtención de un hidrograma unitario tradicional, primero se debe separar el escurrimiento base del directo; al hidrograma resultante se le denominará *hidrograma de calibración*. Con lo anterior se puede conocer, en primer lugar, el volumen de escurrimiento directo (V_e), y, en segundo lugar, el tiempo base (t_b), (Aparicio, 2006).

$$V_e = \Delta t \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1.1)$$

Donde V_e es el volumen de escurrimiento directo, en m^3 , Δt el intervalo de tiempo, en h y Q_i el gasto de los aforos, en m^3/s . Una vez calculado el volumen de escurrimiento directo, se determina la altura de lluvia efectiva (h_{pe}).

$$h_{pe} = \frac{V_e}{A_c} \quad (1.2)$$

Donde h_{pe} es la altura de lluvia efectiva, en m, A_c es el área de la cuenca en m^2 .

Con el hidrograma unitario es posible determinar hidrogramas de escurrimiento directo para cualquier tormenta cuya duración de lluvia en exceso sea la misma con la que se calculó el hidrograma unitario (Aparicio, 2006).

1.4.2.6. Hidrogramas unitarios sintéticos

Para cuencas con insuficientes datos de lluvia y escurrimiento se puede obtener hidrogramas unitarios usando únicamente datos de características generales de la cuenca, tales como: área de la cuenca, longitud del cauce principal, tipo de suelo, uso del suelo y pendiente del cauce principal. Los hidrogramas unitarios así obtenidos se denominan sintéticos.

Debido a su importancia, se han desarrollado varios hidrogramas unitarios sintéticos, entre ellos están el hidrograma del Soil Conservation Service (SCS), el de Clark y Snyder.

A. Hidrograma unitario del SCS. El Hidrograma Unitario Triangular que se presenta en la Figura 1.1 propuesto por el SCS (USDA-SCS, 1972), es uno de los más aceptados dentro del medio profesional hidrológico, la explicación a detalle de este hidrograma se presenta en el capítulo 3.

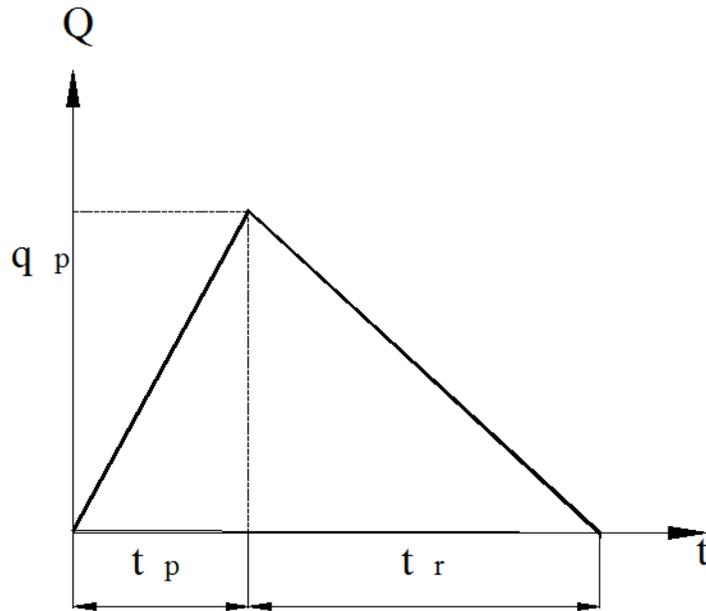


Figura 1.1. Hidrograma unitario triangular.

B. Hidrograma unitario adimensional. Según Chow *et al.* (1971), el hidrograma unitario adimensional del SCS es un hidrograma unitario sintético en el cual el gasto se expresa por la relación del gasto q con respecto al gasto pico q_p y el tiempo por la relación del tiempo t con respecto al tiempo al pico t_p en el hidrograma unitario. Dadas el gasto pico y el tiempo de retraso para la duración del exceso de precipitación, el hidrograma unitario puede estimarse a partir del hidrograma sintético adimensional mostrado en la figura 1.2.

En la mayoría de los casos, es suficiente con las características de un hidrograma unitario triangular para propósitos prácticos. Sin embargo, si la extensión de la curva de recesión del hidrograma afecta el diseño, puede usarse un hidrograma curvilíneo.

El hidrograma unitario adimensional fue obtenido a partir de varios hidrogramas registrados en una gran variedad de cuencas.

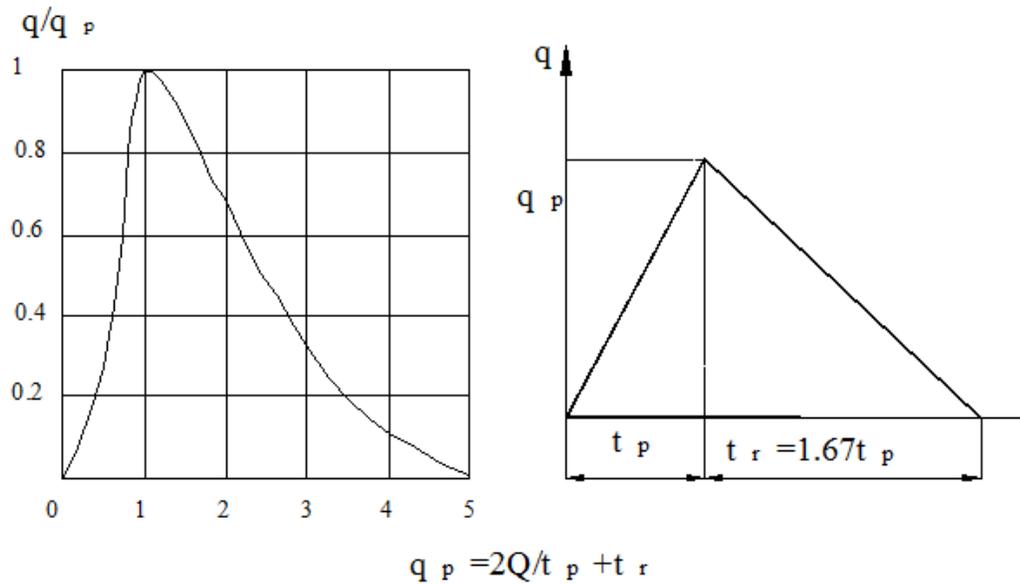


Figura 1.2. Hidrograma unitario adimensional. Fuente: Chow (1971).

Para obtener un hidrograma unitario a partir de la figura 1.2 para una cuenca en particular, basta con multiplicar las ordenadas por el gasto pico (q_p), y las abscisas por el tiempo pico (t_p).

C. Hidrograma de Snyder. En un estudio de cuencas en los montes Apalaches de los Estados Unidos, Snyder (1938) encontró relaciones sintéticas para cinco características de un hidrograma unitario estándar, se detallan en el capítulo 3.

1.4.2.7. Cálculo del escurrimiento a través del método de las envolventes

El método toma en cuenta el área de la cuenca, aunque no es un método que analice propiamente la relación lluvia-escurrimiento se aplica por ser de enorme utilidad en los casos en los que solo se requieren estimaciones gruesas de los gastos máximos probables, o bien cuando se carece por completo de información.

La idea fundamental es relacionar el gasto máximo con el área de la cuenca en la forma:

$$Q = \alpha A_c^\beta \tag{1.3}$$

Donde Q es el gasto máximo y α y β son parámetros empíricos, que también pueden ser funciones de A_c . Esta es la fórmula racional haciendo un ajuste del coeficiente α y del exponente $\beta=1$.

Existen varias fórmulas para el método de envolventes, en México es común usar la fórmula de Lowry y de Creager.

La fórmula de Creager es:

$$q = 1.303C_c (0.386A_c)^\alpha A_c^{-1} \quad (1.4)$$

donde q es el gasto máximo por unidad de área, $q=Q/A_c$

$$\alpha = \frac{0.936}{A_c^{0.048}} \quad (1.5)$$

A_c es el área de la cuenca y C_c es un coeficiente empírico.

La fórmula de Lowry es;

$$q = \frac{C_L}{(A_c + 259)^{0.85}} \quad (1.6)$$

C_L es otro coeficiente empírico que junto con C_c se determina por regiones. Llevando a una gráfica logarítmica los gastos unitarios máximos registrados contra sus respectivas áreas de cuenca y seleccionando el valor de C_c y C_L que envuelva a todos los puntos medidos.

Creager encontró un valor de $C_c=200$ como envolvente mundial para todos los puntos analizados, para la fórmula de Lowry se toma un valor de $C_L =3500$. En el caso de México Ramírez-Orozco *et al.* (2005) encontraron $C_c=250$ y $C_L =7200$ y en el caso de la Región Hidrológica 23 Costa de Chiapas obtuvieron $C_c=85$ y $C_L =2456$.

1.4.2.8. Estimación del escurrimiento a través del Método Racional Americano

La fórmula racional del Método Racional Americano para estimar el caudal o gasto máximo es posiblemente el modelo más antiguo de la relación lluvia escurrimiento. Este modelo toma en cuenta, además del área de la cuenca, la altura o intensidad de la precipitación y hoy en día es muy utilizado en el diseño de drenaje rural y alcantarillado urbano.

Si en una cuenca impermeable se hace caer una lluvia de intensidad constante durante un largo tiempo al principio el gasto que sale de la cuenca será creciente a través del tiempo y llegara un momento en el que alcance el punto de equilibrio.

En el sustento teórico del método racional, el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio se denomina tiempo de concentración y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca. El tiempo de concentración depende del recorrido que debe hacer el agua para llegar a la salida y de la velocidad promedio que adquiere en su recorrido. La velocidad depende de la pendiente media del terreno, de los cauces y de la rugosidad de la superficie. Una de las ecuaciones para calcular el tiempo de concentración en un cauce definido es la siguiente:

$$t_c = \frac{L}{3600 v} \quad (1.7)$$

Siendo t_c el tiempo de concentración en horas, L es la longitud del cauce principal en metros y v la velocidad media del agua en el cauce principal en m/s.

También se usa la fórmula de Kirpich para obtener el tiempo de concentración:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (1.8)$$

donde S es la pendiente del cauce principal, L es la longitud del cauce, en metros y t_c en horas. McCuen (2004) muestra una serie de ecuaciones para obtener el tiempo de concentración.

La fórmula racional se basa en aceptar que durante la lluvia una vez establecido el gasto de equilibrio en la cuenca, la capacidad de infiltración es constante entonces la fórmula racional se escribe como:

$$Q_p = CiA_c \quad (1.9)$$

Donde C es un coeficiente adimensional de escurrimiento, representa la parte de la precipitación que se transforma en escurrimiento directo; Q_p es el gasto máximo [L^3/T] que se presenta en una lluvia con intensidad i [L/T] en una superficie de área A_c [L^2]. El coeficiente C , puede tener variaciones de una cuenca a otra y de una lluvia a otra en una misma cuenca debido a la condición de humedad antecedente e iniciales, aunque se pueden tomar valores representativos de acuerdo a las características de la cuenca. Se han elaborado algunas tablas conservadoras para diseño urbano donde se proponen valores de este factor.

1.4.3. Modelación lluvia escurrimiento

Con la disponibilidad y desarrollo de las computadoras los esfuerzos para la modelación y simulación de la dinámica de una cuenca se han reducido mejorando la predicción de la relación lluvia-escurrimiento (Yener *et al.*, 2007). No es posible representar cada modelo a detalle, pero cada concepto representa los procesos físicos por medio de un modelo matemático conceptual que puede ser representado por una ecuación diferencial u ordinaria. Estas ecuaciones se resuelven haciendo un cambio de la ecuación de modo que se pueda resolver por medio de algoritmos escritos en diferentes ambientes de programación. Sin embargo, con el uso de programas generalmente se ingresan los datos a través de una interfaz gráfica mientras hay una gran cantidad de información espacial para ser incluida como uso de suelo, cobertura, propiedades del suelo, otros. Hoy en día esta interacción de información entre el usuario y la computadora es a través de los sistemas de información geográfica. Una vez que la información ha sido procesada, los resultados se muestran gráficamente.

En cada uno de los modelos, los parámetros internos y externos requeridos tienen sus propias características (Valle, 2009). En México, la aplicación de los modelos hidrológicos se limita por la falta de datos para calibrarlos y validarlos (Flores-López *et al.*, 2003; Aisha *et al.*, 2008).

La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la predicción de fenómenos a largo plazo, también permiten obtener relaciones causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales (Carvajal y Roldan, 2007).

La mayor dificultad en hidrología asociada con el uso de modelos conceptuales lluvia escurrimiento es su calibración debido a que estos modelos involucran un gran número de parámetros (Cooper, 2007). Los modelos conceptuales son aquellos en los que sus parámetros no pueden ser medidos directamente y tienen que ser inferidos (calibrados) a partir de observaciones. Los errores de un modelo son debidos a la estructura del modelo asociado con sus ecuaciones y debido a los valores de los parámetros usados en esas ecuaciones (Ewen, 2006), además Kavetski (2006) menciona que las deficiencias de la modelación se deben en parte al uso de técnicas clásicas en la parametrización.

Debido a las deficiencias los modelos requieren una calibración para ajustar al menos algunos de sus parámetros. La calibración del modelo consiste en lograr un ajuste

satisfactorio entre los escurrimientos observados y los calculados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia, aún de aquellos que se consideraban conocidos.

Los modelos también requieren validarlos para verificar su bondad en la predicción. La validación consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos calculados y los observados con los parámetros determinados en la fase de calibración pero en un período diferente del utilizado en la calibración. Generalmente el ajuste entre escurrimientos observados y calculados obtenidos durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración (Aparicio *et al.*, 2001).

Como indica Grayson *et al.* (1992) una correcta simulación de los caudales a la salida de una cuenca no indica necesariamente una correcta simulación de los procesos internos de dicha cuenca. Normalmente para medir la bondad de un modelo hidrológico se utiliza el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970) que compara los valores observados y simulados (Yusop *et al.*, 2007).

Los modelos de simulación hidrológica pueden ser clasificados de acuerdo a un amplio rango de características, en general se tienen los siguientes tipos de modelos (Bedient *et al.*, 2013):

Parámetros generalizados: HEC-HMS, Snyder o Clark HU

Distribuidos: Vflo, MIKE URBAN, MIKE FLOOD

Evento único: HEC-HMS, SWMM, SCS TR-20

Continuos: SWMM, HSPF, Vflo

Parámetros físicos: HEC-HMS, SWMM, HFOS, Vflo

Estocásticos: Syntetic Streamflow

Aunque varios de estos modelos son vendidos comercialmente, existen algunos pocos que se desarrollaron por instituciones educativas y por agencias de gobierno que son libres y se pueden descargar de internet para propósitos no comerciales. El cuerpo de Ingenieros de la armada de Estados Unidos ha desarrollado: HEC-HMS y GeoHMS, GRASSS y TOPMODEL.

El modelo HEC-HMS utilizado en este trabajo es un modelo híbrido, que está constituido por un conjunto de modelos conceptuales de parámetro generalizado (modelo matemático con pocos o ningún parámetro físico que puede obtenerlos por medio de ecuaciones

empíricas), pero también tiene incluido el modelo de evento único y modelos de parámetros físicos, estos tipos de modelos se pueden o no usar conjuntamente cuando se modela un sistema en HMS.

La modelación para obtener los hidrográmas de flujo se realiza en diversas partes del mundo aplicando diferentes métodos y modelos programados en ambientes de computadora. Triviño-Pérez y Ortiz-Rojas (2004) realizaron un estudio para la modelación distribuida de la esorrentía superficial, utilizaron el modelo HMS y delimitaron zonas inundables con HEC-RAS en el Río Ramblas del Mediterráneo. También Rojas (2005), evaluó el modelo HMS con información de aforos en cuencas de EU y de Venezuela, encontró que el modelo calibrado es buen estimador de eventos máximos y extremos. Yener *et al.* (2007) realizaron un estudio de modelación con HEC-HMS en la cuenca de Yuvacik en Turquía y Yusop *et al.* (2007) realizaron el estudio de aplicación de ese modelo para modelar hidrográmas de flujo en una cuenca de Malasia encontrando buen ajuste al calibrarlo y validarlo. Entre otros trabajos que se han realizado en diferentes partes del mundo donde los autores han coincidido en la utilidad del modelo HMS al alimentarlo con información confiable.

Aun que el modelo HMS del Cuerpo de Ingeniero de la Armada de E.U. se ha infiltrado en varios países para la modelación lluvia-escorrimento, otros modelos han hecho lo propio, Khalidou *et al.* (1995) aplicaron en Sahel África el modelo OTTHYMO que utiliza el método del SCS y el modelo de Nash como funciones de producción y transferencia.

Algunos otros modelos hidrológicos aplicados son; SWRRB que lo utilizaron Maldonado-De-León *et al.* (2001) para generar alternativas de manejo en la cuenca Iztapa en la República de Guatemala. El modelo GR4J por Carvajal y Roldan (2007) quienes realizaron la calibración de ese modelo lluvia-escorrimento y lo aplicaron a la cuenca del Río Aburra en Colombia. Por otro lado Aisha *et al.* (2008) aplicaron el modelo Kineros2 para modelar la relación lluvia escurrimento en una cuenca de Arizona en EU y también Borges *et al.* (2008) analizaron el proceso lluvia-escorrimento en una Cuenca de Brasil usando TOPMODEL y HYCYMODEL, encontrando en el último mejor eficiencia en la estimación de los caudales.

En México el uso de los modelos hidrológicos no es ajeno a la investigación en el estudio de la dinámica hidrológica. Los estudios se realizan de forma aislada por parte de instituciones educativas o de gobierno en algunos sitios del país como el trabajo de González-Cervantes *et*

al. (2006) que analizaron los factores que afectan la relación lluvia-escorrentamiento en una zona semiárida del norte de México. Además se aplican modelos como en el trabajo de Torres-Benítez *et al.*, (2004) quienes realizaron una calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca “El Tejocote” en Atlacomulco Estado de México. Torres-Benítez *et al.* (2005) también realizaron la adaptación del modelo hidrológico SWAT a la cuenca del Río La Laja en Guanajuato, México. En diversos trabajos hidrológicos de instituciones de gobierno se realizan aplicaciones con HEC-HMS, pero no se documentan.

Aunque se aplican los modelos con gran versatilidad, las metodologías que se siguen para obtener sus parámetros son de forma empírica y con metodologías clásicas en el mejor de los casos. En México la condición de cuencas no instrumentadas prevalece en todo el país y los números de curva que se usan son los que más se aproximan a las tablas del SCS. Se han hecho trabajos para identificar los NC de otros usos de suelo, pero todavía no se han elaborado tablas unificando todas esas investigaciones. En México se han realizado algunos trabajos sobre NC como el de Campos (2010) que identificó los números de curva en las cuencas del Río Coatán y Despoblado, pero lo realizó mediante un algoritmo de aproximación sin datos de lluvia ni escorrentamiento. En el capítulo 3 correspondiente a número de curva, se describe la metodología empleada para identificar los números que corresponden a usos generales de zonas tropicales.

El proceso de modelación lluvia-escorrentamiento requiere coeficientes de escorrentamiento que de alguna manera se obtienen de tablas desarrolladas para condiciones de los Estados Unidos; lo ideal es que a través de un sistema de monitoreo de variables hidrológicas se obtengan los propios coeficientes para las cuencas ubicadas en Costa de Chiapas.

Este estudio se presenta en base a tres artículos técnicos; número de curva de escorrentamiento, gastos pico con hidrogramas unitarios sintéticos y modelación del escorrentamiento con el modelo hidrológico HEC-HMS. Que se elaboraron con información del “Monitoreo de procesos hidrológicos erosivos en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, en la costa de Chiapas” realizado por la Universidad Autónoma Chapingo para la Comisión Nacional del Agua.

1.5. LITERATURA CITADA

- Aisha A., M. Neil, W.Howard, and U. Carl. 2008. Application of the Kineros2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman. *J. Hydrol.* 355: 91-105.
- Aparicio M., O., O. Palacio V., R. Springall G., D. Fernández R. 2001. Empleo del Modelo SWRB para Generar Alternativas de Manejo en la Cuenca Iztapa, Guatemala, Agrocienza, mayo-junio, año/vol. 35, número 003 Colegio de Postgraduados, Texcoco, México, pp. 335-345.
- Aparicio M., F. J. 2006. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa. México. 303 p.
- Bahram S. 2006. Nonlinear transformation of unit hydrograph. *J. Hydrol.* 330: 596-603.
- Bedient P. B., W. C. Huber, and B. E. Vieux. 2013. *Hydrology and Floodplain Analysis*. 5th ed. Prentice Hall, New Jersey. 816 p.
- Borges C. P., R. D. Valmir, and M. Kobiyama. 2008. Rainfall-Runoff process analysis of the Pequeño River Catchment, Caritiba metropolitan region, Brazil, whit two hydrological models. *Ambiente e Agua. J. Appl.Sci.* 003: 43-54.
- Campos-Aranda D. F. 2008. Calibración del método racional en ocho cuencas rurales menores de 1,650 km² de la región hidrológica No 10 (Sinaloa), México. *Agrocienza*, Vol. 42 (6): 615-627.
- Campos-Aranda D. F. y M. S. Martínez. 2010. Calibración del número N con predicción de crecientes en dos cuencas rurales en la Costa de Chiapas. *Memorias del XXI Congreso Nacional de Hidráulica (AMH)*. Guadalajara, Jalisco.
- Carvajal L. F. y Roldan E. 2007. Calibración del modelo lluvia –escorrentía agregado GR4J aplicación: Cuenca del Río Aburra. Vol. 74(152): 73-87.
- Chow V. T. 1971. *Applied Hydrology*. Mc Graw Hill. 624p.
- Cooper V. A., Nguyen V. T. V. y Nicell J. A. 2007. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimisation methos with hydrologic process-based parameter constraints. *J. hydrol.* Vol. 334:455-466.
- Ewen J., O'Donnell G., Burton A. y O'Connell E. 2006. Errors and uncertainty in physically-based rainfall-runoff modelling of catchment change effects. *J. Hydrol.* Vol. 330:641-650.

Flores-López H., E. Ramírez-Vega, H. Byerly-Murphy, K. F. Ruiz-Corral, J.A. Martínez-Sifuentes, J. A. Díaz-Mederos, y P. Alemán-Martínez. 2003. Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuite, México. *TERRA Lat.* 21: 389-400.

González-Cervantes G., Estrada-Ávalos J., González-Barrios J. L., Cueto-Wong J. A., Sánchez-Cohen I.; Castillo-Santillán G. 2006. Análisis de los factores que afectan la relación precipitación - escurrimiento en una zona semiárida del norte de México *TERRA Latinoamericana*, Vol. 24, Núm. 3, julio-septiembre. pp. 337-345 Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Grayson R. B., I.D. Moore, and T. A. McMahon. 1992. Physically based hydrologic modeling. *Water Resources Res.* 26: 2659-2666.

Jena S.K., and K.N. Tiwari. 2005. Modeling synthetic unit hydrograph parameters with geomorphologic parameters of watersheds. *J. Hydrol.* 319:1-14.

Kavetski D., Kuczera G. y Stewart W. F. 2006. Calibration of conceptual hydrological models revisited: 1. Overcoming numerical artefacts. *J. Hydrol.* Vol. 320:173-186.

Khalidou M., B., Diaz C., Llamas J., Llano H. 1995. Zonas semiáridas y su modelación hidrológica (lluvia-escurrimiento). *Ingeniería hidráulica en México*, vol. X, número 2, pp. 21-31, mayo-agosto.

Maldonado-de-Leon O. A., Palacios-Velez O. L., Springall-Galindo R., Fernández-Reynoso. D. S. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia*. Vol. 35 (003):335-345.

McCuen R. H. 2004. *Hydrologic Analysis and Design*. Prentice-Hall. 3rd Ed. New Jersey. 888p.

Nania L.S. 2003. *Métodos de transformación lluvia-escurrimiento y propagación de caudales*. Apuntes de clase. Universidad de Granada. España.

Nash J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10:282–290.

Paz-Pellat F. 2009. Mitos y Falacias del Método Hidrológico del Número de Curva del SCS/NRCS. *Agrociencia* 43: 521-528.

Ramírez-Orozco A.I. J.F., Gómez-Martínez. D.F., Campos-Aranda. 2005. Actualización de las envolventes regionales de gastos máximos para la República Mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México*. 20(1):99-108.

Rojas R. 2005. Evaluación preliminar del modelo HEC-HMS. Universidad de los andes facultad de ciencias forestales y ambientales centro de estudios forestales y ambientales de postgrado.

Sherman L. K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. Engineering News Record 108:501–505.

Snyder F. F. 1938. Synthetic unit hydrographs. Trans. Amer. Geophysical Union 19:447–454.

Torres-Benítez E., Fernández-Reynoso D. S., Oropesa-Mota J. L., Mejía-Saenz E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México TERRA Latinoamericana, Vol. 22, Núm. 4, octubre-diciembre. pp. 437-444 Universidad Autónoma Chapingo México

Torres-Benítez E., Mejía-Sáenz E., Cortés-Becerra J., Palacios-Vélez E., Exebio-García A. 2005 Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del Río Laja, Guanajuato, México. Agrociencia. Vol. 39 (005):481-490.

Triviño-Pérez A. y Ortiz-Rojas S. 2004. Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en Ramblas y Río-Rambla Mediterraneo. Inv. Geog. Núm. 35:67-83.

USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service), 1972. SCS Natural Engineering Handbook, section 4, Hydrology. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Washington, D.C. pp. 1-24.

Valle-Paniagua R. Arjona E., Bueno G., Oleschko L. K., 2009. Modelación de procesos del régimen hídrico del suelo. Terra latinoamericana. Vol 27 (2): 161-168.

Yener M.K., Sorman A.U., Sensoy A. y Gezgin T. 2007. Modelling Studies whit HEC-HMS and Rundoff Scenarios in Yuvacik Basin. Turkiye. Department of civil Engineering. Middle East Technical University, 06531 Ankara/Turkiye.

Yusop Z., C. H.Chan, and A. Katimon. 2007. Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modeling stormflow hydrograph in an oil palm catchment. Water science and technology 56:41-48.

CAPITULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. LA CUENCA DEL RÍO COATÁN

Como se indicó, el estudio de las relaciones lluvia escurrimiento se tomó como estudio de caso la cuenca del río Coatán, en el Estado de Chiapas, México.

Las condiciones naturales y de clima en que se encuentran las cuencas de la Costa de Chiapas, dan como resultado procesos de degradación de sus recursos, principalmente el suelo y el agua. La combinación de alto potencial erosivo de las lluvias, la topografía accidentada, la susceptibilidad del suelo a la erosión y las prácticas inadecuadas de manejo del suelo y del agua en terrenos de cultivo, hacen que esta región sea propensa a los daños causados por el fenómeno erosivo.

Por otra parte, en los últimos años se han presentado eventos extremos de precipitación que han originado problemas de inundaciones en suelos ya degradados por la erosión y cuya textura de manera natural es susceptible a la erosión. Las inundaciones han causado daños a la infraestructura y a la población, por lo que se han originado iniciativas que van hacia el establecimiento de un sistema de alerta temprana de inundaciones; un aporte importante a dicho sistema de alerta es un modelo lluvia-escurrimiento.

2.1.1. Ubicación geográfica

La cuenca del Río Coatán, (figura 2.1) pertenece a la Región Hidrológica No 23 Costa de Chiapas en la región administrativa de la CONAGUA Frontera Sur, abarca principalmente el estado de Chiapas aproximadamente desde los 14° 59' a los 15° 20' de latitud Norte y desde los 92° 20' a los 91° 95' de longitud Oeste.

El Río Coatán tiene su origen en la República de Guatemala continúa en el estado de Chiapas y desemboca en el Océano Pacífico en la Barra de San Simón. La dirección general que sigue es hacia el Sur-Suroeste hasta la ciudad de Tapachula, la que queda sobre su margen izquierda; de donde cambia la dirección de su curso hacia el Oeste y después de 14 km lo modifica nuevamente hacia el Suroeste; cruza el pueblo de Mazatán e inmediatamente aguas abajo de dicha población recibe el afluente del Río de los Toros, (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1970).

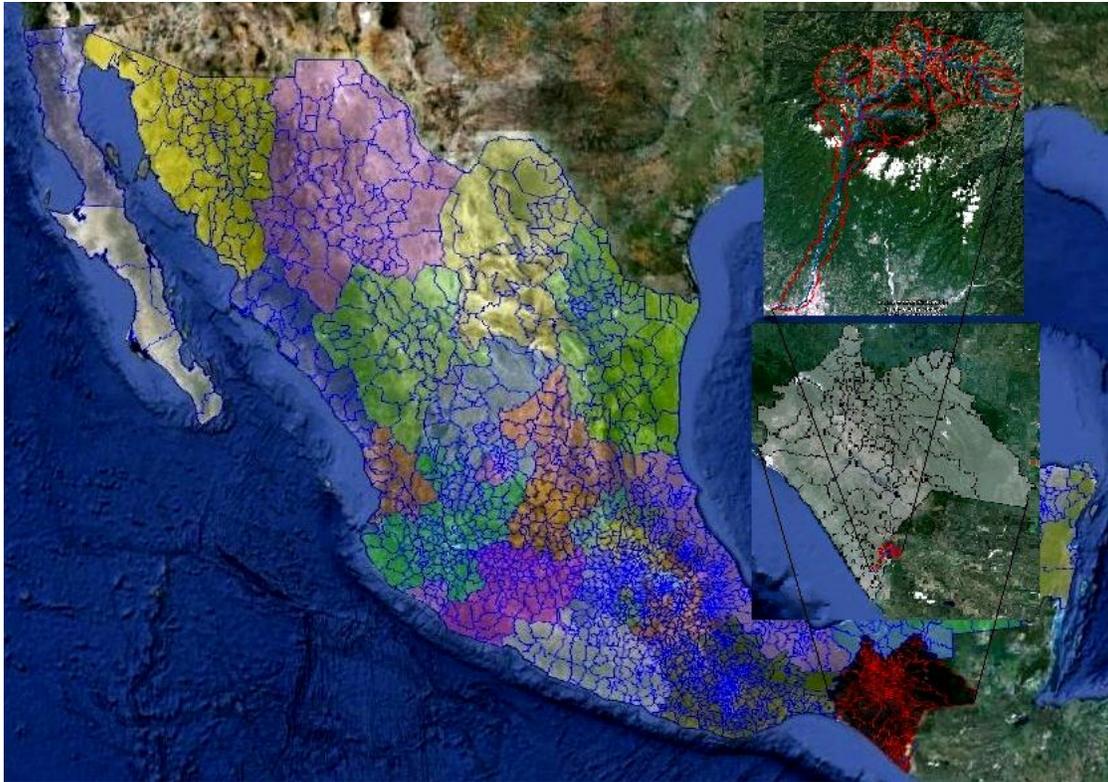


Figura 2.1. Ubicación geográfica de la cuenca del Río Coatán.

La cuenca del Río Coatán es la más pequeña de las seis cuencas transfronterizas que México y Guatemala comparten en su frontera común. Alcanza una superficie de 480 km^2 tomando como salida el puente Malpaso y es una cuenca costera que desemboca en el Océano Pacífico. La parte en Guatemala se encuentra en la parte alta y la de México en la parte baja. Tiene una densidad de población de 140 habitantes por km^2 , en la parte Mexicana $103 \text{ hab}/\text{km}^2$ y en la parte de Guatemala $206 \text{ hab}/\text{km}^2$. A pesar de tener menos territorio que su vecino en la cuenca del río Coatán, Guatemala se registran más habitantes que en la parte de México. La cuenca es una de las más deterioradas de la frontera, subsisten selvas y bosques en solo el 24% de su superficie, esta situación se manifiesta más en la parte de Guatemala ya que únicamente 8.5 % de su territorio, en la cuenca, está cubierta aún de bosques y selvas. La parte Mexicana de la cuenca registra un menor deterioro con 33% de su cobertura vegetal. La parte alta del Coatán se caracteriza por una intensa deforestación, en un territorio donde predomina la agricultura de subsistencia. Administrativamente la cuenca del río Coatán se extiende en los municipios de Mazatán, Tapachula, Cachoatán y Motozintla del

estado de Chiapas, en México y en los de Tacaná, Sibinal, Tectitán, San José, Ojotenam e Ixchiguan en Guatemala que pertenecen a los departamentos de San Marcos y Huehuetenango (PDM, 2008).

La cuenca del Río Coatán tiene una fuerte pendiente ya que su altura sobre el nivel del mar oscila entre 4100 en el volcán Tacaná y cero metros en su desembocadura al Océano Pacífico, en menos de 100 kilómetros. Las condiciones de deterioro de la parte alta de la cuenca del Río Coatán se suman a la existencia de un poblado de importancia regional en su parte Mexicana, la Ciudad de Tapachula, cuya mancha urbana se encuentra parcialmente ubicada en la parte baja del Río Coatán, la otra parte de la ciudad corresponde a la cuenca del Río Cahocacán. En las últimas décadas el crecimiento de la zona urbana de Tapachula entre estos dos ríos, anteriormente ubicados fuera de la zona urbana, ha tenido como resultado que numerosos barrios y colonias se encuentran dentro de la rivera de ambos ríos, en consecuencia la vulnerabilidad de la población de Tapachula es muy notable en la actualidad y las orillas de ambos ríos han sido escenario de violentas inundaciones en 1998 y 2005 que afectaron la mayor parte de la ciudad afectando colonias completas. (IFDM, 2005).

2.1.2. Clima

La cuenca del Río Coatán a pesar de tener una baja extensión posee amplia variación altitudinal, lo que define la diversidad climática en la misma. El clima de la cuenca es variado y está definido por un gradiente adiabático altitudinal que va de 1590 hasta los 4093 msnm. De acuerdo a Thornthwaite y García (1997) se distinguen dos tipos de climas: a) templado con invierno benigno, húmedo con invierno seco ($B_2 \text{ } b \text{ } B_{1i}$) y b) semicálido, sin estación fría bien definida, muy húmedo sin estación seca bien definida ($B \text{ } a \text{ } Ar$).

El comportamiento del régimen hidrológico en la cuenca es muy variado, predominando el mayor escurrimiento en época húmeda de mayo a octubre. Los meses secos van de Noviembre hasta Abril, a excepción de algunos cerros volcánicos nublados que mantienen una precipitación horizontal de Noviembre a Marzo.

Los promedios anuales de temperatura varían de 13 a 15 °C a excepción de la zona alta del Tacaná donde prevalecen las temperaturas menores a los 12°C. Aunque los promedios de temperatura máxima y mínima varían a lo largo de la cuenca, existe probabilidad de heladas

en la parte alta en los meses de Noviembre a Marzo. La humedad relativa es de 83% para las zonas más altas mientras que para las zonas bajas es de 76%. (SRH, 1970).

En general la precipitación es abundante en toda la zona y varía entre 4,500 y 5,000 mm; sobresale el valor máximo registrado en la estación de la Chiripa, a 32 km al Norte de Tapachula dentro de la cuenca del Río Cahuacán, de 5,164 mm de lluvia anual máxima en el año de 1953. En general la lluvia se concentra en los meses de Mayo a Octubre donde se tiene el 90% de la lámina total, y en el resto de los meses hay lluvias menores pero que se presentan con toda regularidad (SRH, 1970).

2.1.3. Geología

La estructura, en general, de la Región Hidrológica No 23 queda completamente definida por la sierra Madre de Chiapas, que origina un parteaguas paralelo a la costa, se tienen altitudes máximas hasta de 2900 m en la Sierra del Soconusco y de 2500 m en el Cerro de Tres picos, al Noreste de Tonalá, Chiapas. Hacia el otro límite de la región, hay una faja de unos 25 km de ancho, contigua al litoral, cuya altitud es muy baja, donde se forman muchas ciénegas y marismas. Sobresale en esta zona el llamado Mar Muerto, que está considerado como un residuo del proceso de emersión en el Pleistoceno, generado a base de depósitos de detritus (SRH, 1970).

La cuenca presenta un rango terrestre prominente de tierras altas, como el Volcán Tacaná que tiene elevaciones máximas de 4092 msnm, considerado uno de los volcanes más altos de América Central. El Tacaná es un cono ubicado sobre el límite fronterizo México-Guatemala. Sus erupciones se caracterizan por ser de un estilo explosivo, aun así se desconoce cualquier actividad histórica y solo se registra la aparición de fumarolas durante los últimos años.

Debido a la condición de actividad volcánica ocurrida hace años y por formar parte de la cadena volcánica de la región, los materiales son de origen netamente volcánico y las formaciones geológicas son de origen ígneo y metamórfico.

La geología regional y las características morfológicas de las formaciones lito-estratigráficas de la cuenca, dan lugar a la identificación de 3 formaciones geológicas definidas por los siguientes materiales (Mullerried, 1957):

Qv: Rocas volcánicas del periodo cuaternario, incluye coladas de lava, material lahárico, tobas y edificios volcánicos. Dentro de esta categoría geológica se ubica el volcán de Tacaná.

Tv. Rocas volcánicas sin dividir del terciario. Predominantemente del Mio-Plioceno. Incluye tobas coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos y está formada por depresiones de origen volcánico, se distribuyen en toda la cuenca ocupando la mayor extensión. El dominio de este material geológico es del 66% del área total de la cuenca.

I: Rocas plutónicas sin dividir del terciario. Incluye granitos y dioritas de edad pre-pérmico cretácico y terciario se identifican en diferentes puntos de la cuenca y comprenden un 23.6% del área total de la cuenca.

2.1.4. Edafología

La génesis de los suelos de la cuenca está caracterizada por tres categorías (Carranza, 1986).

i) Suelos desarrollados sobre material fluvio-volcánico reciente a elevaciones bajas; ii) suelos desarrollados sobre material fluvio-volcánico reciente a elevaciones medianas, y iii) suelos desarrollados sobre ceniza volcánica a elevaciones altas.

De acuerdo al esquema FAO/UNESCO, en el área de estudio se encuentran clasificadas dos subunidades de suelos; los Andosoles Mólicos (Tm) y los Andosoles Húmicos (h), que poseen las siguientes características:

Andosoles Húmicos (h): poseen un alto contenido de materia orgánica en forma de turba, con un pH extremadamente ácido (4.12 a 5.2), poseen bajo contenido de bases intercambiables especialmente Ca y Mg. Son altamente susceptibles a la erosión.

Andosoles Mólicos (Tm): son de textura mediana, contenido medio de materia orgánica en el horizonte A, pH ácidos (4.48 a 5.35). Poseen mayores nutrimentos disponibles, alta fertilidad, moderada susceptibilidad a la erosión.

2.1.5. Fisiografía

La conformación fisiográfica de la cuenca está definida por la prolongación de la Sierra Madre que se interna a territorio guatemalteco. Se caracteriza por la disposición de las formaciones rocosas y por la estrecha relación que tiene con la tectónica regional. La provincia fisiográfica se orienta de Este a Oeste

La cuenca presenta características montañosas en toda su extensión, con elevaciones que van desde los 1590 hasta los 4093 msnm, se encuentra dentro de la unidad fisiográfica correspondiente a una Provincia volcánica con pendiente volcánica reciente y tierras altas volcánicas, se identifican conos volcánicos, montañas elevadas y cerros así como una pequeña parte de la provincia de tierras altas cristalinas.

2.1.6. Hidrografía

La hidrografía se rige por un esquema típico que siguen los ríos de la vertiente del Pacífico: con nacimiento en el parteaguas de la Sierra Madre de Chiapas y recorrido más o menos directo hacia el Pacífico. Así, el conjunto adopta la forma de un peine y las cuencas quedan limitadas lateralmente por las ramificaciones transversales de la propia sierra (SRH, 1970).

La cuenca del río Coatán presenta un patrón de drenaje que favorece la precipitación de materiales inestables desde altas elevaciones. Además presenta algunos cauces abandonados en áreas llanas o meandros secundarios en los valles fluviales más extendidos. Al Sur de la cuenca, hay zonas de frecuente inundación sobre zonas costeras (PDM, 2008).

La cuenca posee una extensa red hidrográfica (Figura 2.2), principalmente en su parte alta, en Guatemala, donde existen 34 corrientes de diversos tamaños entre los que se destacan el Río de Las Majadas, la Quebrada Toloj, el Río Chochaljá y el Río Isquichá por su importancia. Existen también 212 corrientes o porciones de escurrimiento que no tienen nombre. El Río Coatán tiene una longitud de 23 km en territorio Guatemalteco y de 80 kilómetros del lado Mexicano, hasta su desembocadura al Oceano Pacifico.

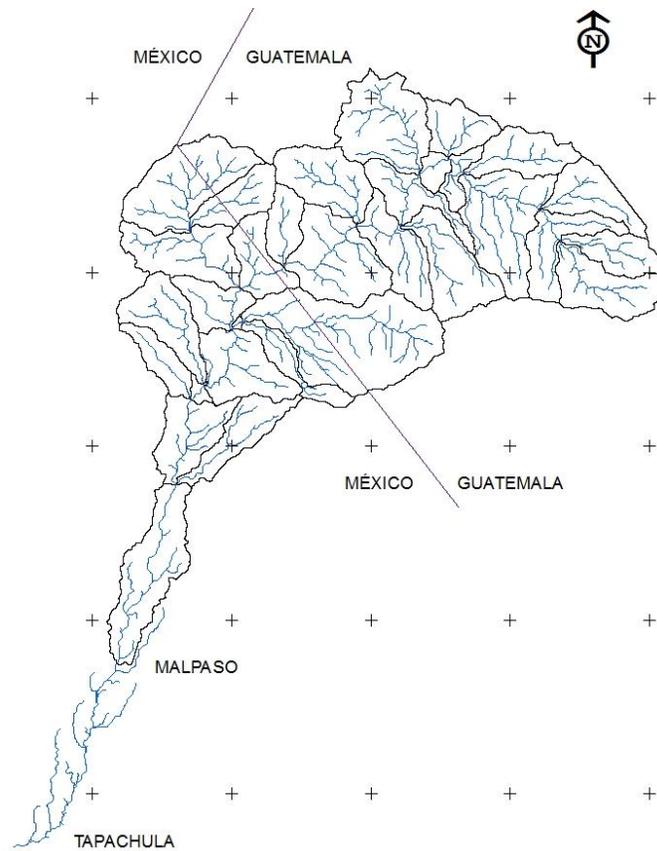


Figura 2.2. Hidrografía de la cuenca del Río Coatán.

2.1.7. Vegetación

El área de estudio se encuentra en la zona neotropical dentro de la región florística del Soconusco; se ha perdido una parte importante de la vegetación original de la zona, siendo la planicie costera la que más ha sido afectada con una pérdida de hasta el 92% de su vegetación original.

Existen dos formaciones ecológicas o ecosistemas: A) bosque muy húmedo montano bajo subtropical y B) bosque muy húmedo montano subtropical.

2.1.7.1. Bosque muy húmedo montano bajo subtropical

Este ecosistema se localiza en la parte alta o zona montañosa volcánica de la cuenca, a una elevación abajo de los 2,700 msnm. La precipitación media anual varía de 2000 a 3000 mm con un promedio de 2500 mm/año.

Las especies vegetales que predomina son: pino triste (*Pinus pseudostrobus*), pino ocote (*Pinus montesumae*), encino (*Quercus sp.*), ciprés (*Cupressus lusitánica*), mano de mono (*Chiranthodendron pentadactylon*), sauce de tierra fría (*Salix benplandia*), cerezo (*Prunus caupulli*), aguacatillo (*Persea schedianana*), aliso (*Alnus jurullensis*) otras. Esta zona tiene una extensión de 202 km² dentro de la cuenca (Rzedowski, 1978).

2.1.7.2. Bosque muy húmedo montano subtropical

Este ecosistema es una faja que va desde el Tacaná recorriendo todo el parteaguas de la cuenca, localizada arriba de los 2,700 msnm. La precipitación media anual es de 1,500 mm y la temperatura media anual es menor a los 12°C.

Las especies vegetales que dominan esta zona son: ciprés común (*cupressus lusitánica*), pino blanco o curtidor (*Pinus ayacahuite*), pinabete (*Abies religiosa* o *Abies guatemalensis*), pino de las cumbres (*Pinus hartwegii*), pino triste (*pinus pseudostrobus*), Mano de león (*Voconá volcánica*), encino (*Quercus sp.*), salvia santa (*Buddleia sp.*), huele de noche (*Cestrum sp.*), begonia gigante (*Garya sp*), arrayán (*Bacharis sp*), otras. Este ecosistema se distribuye en 67 km².

Los principales cultivos de la zona alta son: Maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), y trigo (*Triticum vulgare*). La actividad económica predominante en la cuenca es la agricultura de subsistencia caracterizada principalmente por cultivos anuales (Rzedowski, 1978).

2.1.8. Fauna

Existe una gran abundancia de especies animales en esta región, algunas de ellas sólo son conocidas por los nativos, las más comunes son: Mazacuata (*Boa constrictor*), lagartijas verde azules (*Cnemidophorus guttatus*), iguana rayada (*Ctenosaura similis*), iguana verde (*Iguana iguana*), casquito (*Kinosteron scorpioides cruentatum*), lagarto (*Crocodylus acutus*), mapache (*Procyon lotor*), venado (*Odocoileus virginianus*) y otros.

Algunos especímenes de aves son: Pijiji (*Dendrocygna bicolor*), Cormorán (*Phalacrocorax auritus*), Zopilote (*Coragyps atratus*), Paraculito (*Numenius americanus*), Ibis (*Eudocimus albus*), Rabiocardo (*Fregata magnificens*) y otros (Rzedowski, 1978).

2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo de investigación doctoral, se presenta bajo la modalidad de elaboración de tres artículos técnicos, mismos que se han enviado a revistas científicas para su posible publicación.

Los estudios se realizaron con información del “Monitoreo de procesos hidrológicos erosivos en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, en la costa de Chiapas”, en tres microcuencas (Progreso, Chanjalé y Vega de los Gatos) ubicadas dentro de la Cuenca del Río Coatán (figura 2.3) en Chiapas, México. La información utilizada básicamente consistió en registros de lluvia y escurrimiento del año 2011, también se utilizaron algunas características de los suelos muestreadas *in situ* y de la geometría de las microcuencas que se obtuvo mediante levantamientos topográficos.

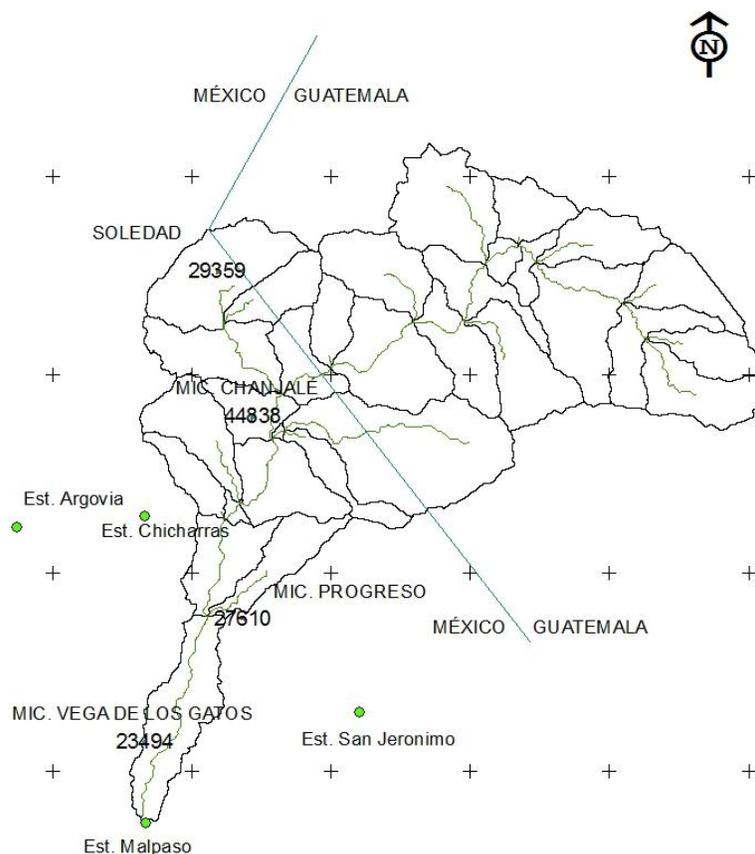


Figura 2.3. Ubicación de las microcuencas.

Los trabajos realizados en el área de estudio incluyeron; comparación de gastos máximos en microcuencas de montaña, comparación de números de curva (NC) calculados versus NC de tablas y finalmente se corrió el modelo HEC-HMS de tipo evento con información de los dos estudios previos y se comparó con lo que calcula el modelo como si se tratara de una cuenca no instrumentada. Estos trabajos se desarrollaron con datos de medición directa de lluvia y escurrimiento del año 2011 de un programa de monitoreo mencionado.

2.2.1. Comparación de gastos máximos

En el artículo **“comparación de gasto máximo con hidrográmas unitarios sintéticos en microcuencas de montaña”** (capítulo 3) se presenta el estudio. La comparación de gastos máximos se realizó comparando los valores unitarios medidos versus los gastos unitarios máximos estimados por medio de los métodos de los hidrogramas unitarios sintético de Snyder y del Servicio de Conservación de Suelos (SCS).

El HUS de Snyder se obtuvo a partir de medición de características geométricas de cada microcuenca y a partir de medición directa de lluvia y escurrimiento. El HU del SCS se obtuvo a partir de características geométricas de cada microcuenca y con las relaciones empíricas del método del SCS.

2.2.2. Comparación de Números de curva de escurrimiento

En el artículo **“Identificación de números de curva de escurrimiento en microcuencas del río coatán, Chiapas, México”** referente a número de curva (capítulo 4) se detalla el procedimiento de la comparación. Para identificar el número de curva (NC) por evento de cada microcuenca se utilizó la expresión que resulta de resolver la ecuación cuadrática del método del SCS para calcular escurrimiento. Esta ecuación de NC está en función de la precipitación y del escurrimiento, variables que se midieron directamente en las tres microcuencas.

Los NC de tablas se obtuvieron utilizando las tablas del SCS de acuerdo al uso de suelo, condición hidrológica, textura del suelo y realizando la corrección por humedad antecedente y pendiente.

2.2.3. Modelación con HEC-HMS

Para correr el modelo HEC-HMS tipo evento se utilizó el modelo de cuenca del río Coatán importado de Geo-HMS y se alimentaron los parámetros de sus diferentes fases como si se tratara de una cuenca no instrumentada.

Los hietogramas de precipitación con los que se alimentó el modelo fueron dos eventos extremos que ocurrieron el 4 de octubre de 2005 y el 11 de octubre de 2011, sus pluviogramas correspondientes se discretizaron cada 30 minutos.

También se corrió el modelo HMS alimentando algunas de sus fases con parámetros como los coeficientes del HU de Snyder y NC obtenidos en los estudios de **“Gastos pico con hidrogramas unitarios sintéticos en microcuencas de montaña”** y de **“Identificación de curva de escurrimiento en microcuencas del Río Coatán, Chiapas, México”** respectivamente.

En el artículo de **“Modelación de la cuenca del Río Coatán con HEC-HMS”** (capítulo 5) se detalla la comparación de las dos metodologías.

Los resultados de los tres estudios realizados en este trabajo se presentan como artículos en los siguientes tres capítulos.

2.3. LITERATURA CITADA

Carranza E.A. 1986. Estudio sedimentológico de playas del estado de Chiapas, México. An. Inst. Cienc. Mar y Limnol. UNAM. México.

García, E. 1997. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. Limusa 4 ed.

IFDM. 2005. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Chiapas.

McCuen, R. H. 2004. Hydrologic Analysis and Design. Prentice-Hall. 3rd Ed. New Jersey. 888p.

Mullerried, F. 1957. La Geología de Chiapas, Gobierno constitucional del estado de Chiapas.

PDM. 2008. Plan de Desarrollo Municipal 2008-2010. H. Ayuntamiento Municipal de Mazatán, Chiapas.

Ramírez-Orozco, A.I. J.F., Gómez-Martínez. D.F., Campos-Aranda. 2005. Actualización de las envolventes regionales de gastos máximos para la República Mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México*. 20(1):99-108.

Rzedowski, J. 1978. *La vegetación de México*, Editorial Limusa. México.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1970. *Boletín Hidrológico* No. 37. Regiones Hidrológicas No. 23 (Costa de Chiapas) y No. 29 (Río Coatzacoalcos). “Datos hidrométricos, climáticos y de azolves. Jefatura de Irrigación y Control de Ríos, México”.

Sherman, L. K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News Record* 108:501–505.

Snyder, F. F. 1938. Synthetic unit hydrographs. *Trans. Amer. Geophysical Union* 19:447–454.

USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service), 1972. *SCS Natural Engineering Handbook*, section 4, Hydrology. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Washington, D.C. pp. 1-24.

CAPÍTULO 3

GASTOS MÁXIMOS CON HIDROGRAMAS UNITARIOS SINTÉTICOS EN MICROCUENCAS DE MONTAÑA¹

RESUMEN

Los Hidrogramas Unitarios (HU) tienen aplicaciones en el diseño y revisión de obras de excedencia de presas de almacenamiento y en la protección de asentamientos humanos en las orillas de los ríos mediante los bordos de protección contra inundaciones. En este trabajo, a partir de medición directa, se obtuvieron los gastos pico con hidrogramas unitarios para tres microcuencas de montaña ubicadas en la cuenca Coatán, Chiapas, México, y se compararon con los gastos pico de los hidrogramas unitarios sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) y de Snyder. Para identificar el HU sintético de Snyder se utilizaron características de las microcuencas y se fortalecieron con mediciones lluvia-escurrimiento. En el caso del HU del SCS, este dependió principalmente del tiempo de concentración y del área. El análisis de los eventos de precipitación fueron así: microcuenca Vega de los gatos se analizaron 36 eventos, microcuenca Progreso 13 eventos y en la microcuenca Chanjalé 13 eventos; todos ocurridos en el 2011. El análisis estadístico de comparación entre los gastos pico medidos y los sintéticos muestran que con el HU de Snyder se tiene menor error de ajuste que con los gastos obtenidos a partir del HU del SCS en las tres microcuencas, además, los gastos con el HU del SCS sobreestiman los medidos en los tres sitios. Lo anterior se atribuye a que el HU de Snyder se fortalece a partir de mediciones lluvia-escurrimiento y en el caso del HU del SCS, el tiempo de concentración que se utilizó fue el del SCS, el cual considera como variables principales la longitud hidráulica de la cuenca, el número de curva de escurrimiento y la pendiente media de la cuenca.

Palabras clave: hidrograma unitario, gasto pico, caudal diseño

¹Alonso-Sánchez H., Ibáñez-Castillo L. A., Arteaga-Ramírez R., Vázquez-Peña M. A. 2013. Enviado a la revista *Agrociencia*.

PEAK DISCHARGE WITH SYNTHETIC UNIT HYDROGRAPH IN MOUNTAIN SMALL WATERSHED

ABSTRACT

The Unit hydrographs (HU) have applications in the design and review of exceedance works of storage dams and protection of human settlements on the banks of rivers by levees to protect of flooding. In this paper, based on direct measurement, was obtained the unit hydrograph peak flows with three-mountain micro watersheds located in the basin Coatán, Chiapas, Mexico, and were compared with peak flow from synthetic unit hydrograph Conservation Service soil (SCS) and Snyder. To identify the synthetic HU Snyder were used the micro basin characteristics and strengthened with rainfall-runoff measurements. In the case of the SCS HU, this mainly depended on the time concentration and area. In the three micro watersheds studied the analysis of rainfall events were as follows: Vega de Los Gatos were analyzed 36 events, in Progreso 13 events and Chanjalé 13 events, all of which occurred in 2011. The statistical comparison between the measured peak flows and synthetic show that Snyder HU has less fit error that with peak flows obtained whit SCS HU in the three micro watersheds Additional flows whit SCS HU overestimate those measured at the three sites. This was attributed to the fact that Snyder HU strengthens from rainfall-runoff measurements and in the case of HU of SCS, the time of concentration used was that of SCS equation which considered as main variables the hydraulic length basin, the runoff curve number and average slope of the basin.

Keywords: unit hydrograph, peak discharge, design flow

3.1. INTRODUCCIÓN

La solución a problemas de inundaciones, la estimación del flujo superficial o escurrimiento y flujo máximo son algunos de los principales objetos de estudio en una cuenca hidrológica (Borges, 2008; Singh *et al.*, 2007). La búsqueda de una relación simple entre la precipitación (P) y el escurrimiento (Q) directo es una de las tareas básicas de los modeladores de los procesos hidrológicos en cuencas experimentales (Paz-Pellat, 2009).

En México, la aplicación de modelos hidrológicos es muy limitada por la falta de datos (Flores-López *et al.*, 2003). Los modelos hidrológicos tienen varias limitaciones para la

correcta simulación del balance de agua, como la carencia de datos que restringe la precisión y aplicabilidad de los modelos (Aisha *et al.*, 2008). Modelos lluvia-escorrentía implementados en software mundialmente conocido como HEC-HMS se basan en la teoría del hidrograma unitario (Miranda *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2010).

El HU es la técnica de transformación de lluvia efectiva a escorrentía más ampliamente utilizada por los hidrólogos y es el más utilizado para estudios de estimación de hidrogramas de flujo (Bahram, 2006). El Hidrograma Unitario Sintético (HUS) reproduce la forma del HU mediante las características de la cuenca como la longitud y el área de la cuenca (Jena y Tiwari, 2005).

El término sintético de un HUS significa que el HU se deriva de características fisiográficas de la cuenca fáciles de medir o calcular. El método del HUS usa pocos parámetros para definir el HU: el gasto al pico (Q_p), tiempo de retraso (t_r), tiempo base (t_b), y en el caso de Snyder, de manera adicional, se utilizan los anchos a $0.5Q_p$ y $0.75 Q_p$. En el caso del HUS del SCS el gasto pico se calcula a partir de parámetros como área de la cuenca, tiempo al pico y algunos coeficientes empíricos y se usa un hidrograma adimensional para obtener una curva suavizada del HUS.

La escasa red de estaciones hidrométricas, y su falta de mantenimiento en México, en particular en la cuenca del Río Coatán en Chiapas, hace necesario el uso de métodos sintéticos para identificar los gastos a la salida de la cuenca. Los métodos de HUS se desarrollaron en cuencas de Estados Unidos, y se extendieron a la mayor parte del mundo, pero en México es más común el uso del HUS del SCS. Para tener certeza de su eficiencia es necesario compararlos con HU de cuencas instrumentadas, por lo cual el objetivo de este trabajo fue comparar los gastos pico unitarios medidos en tres microcuencas con los gastos pico estimados con los métodos sintéticos del HU de Snyder (1938) y del SCS, con el fin de extrapolar la aplicación de los métodos sintéticos a cuencas no instrumentadas con características semejantes a las instrumentadas, (Chow, 1971).

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las microcuencas Vega de los Gatos, Progreso y Chanjalé cuentan con pluviógrafo y estación de aforo instrumentada con limnógrafo en el punto de salida, en este último se mide el escorrentía directa y es ajustado por un residente de campo como parte del monitoreo.

Las microcuencas se encuentran en la parte baja, media y alta respectivamente de la cuenca del Río Coatán, en la Región Hidrológica No 23 costa de Chiapas en la Frontera Sur con Guatemala. En el Cuadro 3.1, se dan algunas de las características de los tres sitios.

Cuadro 3.1. Características físicas y geométricas de las microcuencas instrumentadas.

Microcuenca	Latitud (° ‘ ‘’)	Longitud (° ‘ ‘’)	Área (m ²)	Elevación (msnm)	Longitud de cauce (m)	Pendiente cauce (%)	Textura	Uso de suelo
Vega de los Gatos	15° 01’ 44’’	92° 13’ 55’’	23 494	471	314	29.6	Migajón	Selva baja y media
Chanjalé	15° 12’ 35’’	92° 11’ 45’’	44838	1473	343	63.2	Migajón	Café con selva baja y media
Progreso	15° 45’ 05 ‘ ‘’	92° 11’ 46’’	27609	944.5	365	24.9	Migajón Arenoso	Café plátano y frutales

A partir del límnigrama de escurrimiento se calculó el volumen escurrido; con el cociente entre el volumen total escurrido y el área de la cuenca se obtuvo la lámina de escurrimiento superficial. Para obtener el HU y el gasto pico de las microcuencas se dividieron los valores de gasto total entre la lámina de escurrimiento. Tomando en cuenta que el HU se construyó para una duración efectiva de acuerdo a cada tormenta.

3.2.1. Gasto pico con el hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos

Un hidrograma es una gráfica tiempo versus caudal; este último es normalmente expresado en unidades de litros por segundo o metros cúbicos por segundo y la escala del tiempo es la correspondiente a un evento que dure horas o un par de días, o bien la escala temporal referirse a una semana, un mes o un año. Un hidrograma unitario es un hidrograma de escurrimiento directo de 1 mm, 1 cm o 1 pulgada de lluvia efectiva distribuida uniformemente en la cuenca ligada a una duración efectiva (Aparicio, 2006); la definición anterior aplica a cualquier hidrograma medido o sintético. En este trabajo se utilizaron los hidrogramas para eventos y el hidrograma unitario será referido a aquel de 1 mm.

El hidrograma del SCS usa características geométricas y el tiempo de concentración de la cuenca para su deducción.

El tiempo de concentración t_c , se calculó mediante la fórmula propuesta por el SCS (McCuen, 2004):

$$t_c = 0.00526 L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7} S^{-0.5} \quad (3.1)$$

Donde L es la longitud de la cuenca (ft), S es la pendiente media de la cuenca (ft/ft) y CN es el número de curva de escurrimiento, t_c es el tiempo de concentración en horas. El CN depende de la textura y uso de suelo, con correcciones por pendiente y humedad antecedente. Note que el CN es un valor diferente para cada evento debido a la condición de humedad antecedente, referida como la lámina de lluvia acumulada los cinco días anteriores. En un estudio de hidrogramas unitarios de varias cuencas rurales grandes y pequeñas, Chow (1971) indica que el tiempo de retraso (t_r) en la cuenca es aproximadamente $0.6t_c$:

$$t_r \approx 0.6t_c \quad (3.2)$$

El tiempo de ocurrencia del pico T_p se expresa en términos del tiempo de retraso t_r y de la duración de la lluvia efectiva de que se obtuvo del registro de cada evento:

$$T_p = \frac{de}{2} + t_r \quad (3.3)$$

Empíricamente el SCS sugiere que el tiempo de recesión se aproxima como $1.67T_p$. Como el área bajo el hidrograma unitario debería ser igual a una escorrentía directa de 1 mm, entonces el gasto al pico q_p se obtuvo como:

$$q_p = \frac{CA}{T_p} \quad (3.4)$$

donde $C = 2.08$ y A es el área de drenaje de la cuenca en kilómetros cuadrados. Adicionalmente el tiempo base se generó con $t_b = 2.67T_p$.

3.2.2. Gasto al pico con el hidrograma unitario sintético de Snyder

En una investigación de cuencas localizadas en los montes Apalaches de los Estados Unidos, Snyder (1938) encontró relaciones sintéticas para las características de un hidrograma unitario estándar. El hidrograma unitario estándar es aquel cuya duración de la lluvia de , está relacionada con el tiempo de retraso de la cuenca t_r por:

$$t_r = 5.5de \quad (3.5)$$

Para calcular el retardo de la cuenca se utilizó la siguiente ecuación:

$$t_r = C_1 C_t (LL_c)^{0.3} \quad (3.6)$$

donde t_r está en horas, L es la longitud de la corriente principal en kilómetros desde el parteaguas hasta el punto de salida de la cuenca, L_c es la distancia en kilómetros desde la salida de la cuenca hasta el punto más cercano al centroide del área de la cuenca, $C_t=0.75$ y C_t es un coeficiente basado en la cuenca. El caudal pico por unidad de área de drenaje en $m^3 s^{-1} km^{-2}$ del hidrograma unitario estándar es:

$$q_p = \frac{C_2 C_p}{t_r} \quad (3.7)$$

donde $C_2=2.75$

A partir del hidrograma unitario deducido de la cuenca se obtuvieron los valores de duración efectiva de en horas, el tiempo de retraso t_{rR} en horas y su caudal pico por unidad de área de drenaje, q_{pR} , en $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2} \cdot cm$. En los casos en que $t_{rR} = 5.5de$, entonces $de = de$, $t_{rR} = t_r$ y $q_{pR} = q_p$, y C_t y C_p se calcularon con las ecuaciones (3.5) y (3.6). Como t_{rR} resultó diferente de $5.5de$, el retardo de la cuenca se calculó usando:

$$t_r = t_{rR} + \frac{de - t_r}{4} \quad (3.8)$$

y las ecuaciones (3.5) y (3.8) se resolvieron simultáneamente para encontrar de y t_r . Luego los valores de C_t y C_p se calcularon con (3.6) y (3.7) con $t_{rR} = t_r$ y $q_{pR} = q_p$.

Para calcular q_{pR} del hidrograma unitario requerido se utilizó q_p y la relación es:

$$q_{pR} = \frac{q_p t_r}{t_{rR}} \quad (3.9)$$

3.2.3. Error de los gastos pico estimados

Para medir la bondad de un modelo hidrológico se utilizan algunos estadísticos (Yusop *et al.*, 2007). El estadístico de la Raíz Cuadrada del Cuadrado Medio del Error (RCCME) o error medio cuadrático, se obtuvo con:

$$RCCME = \sqrt{\frac{Sr}{n-1}} \quad (3.10)$$

donde: S_r , es la suma de los cuadrados de los residuos entre los datos de tablas o estimados y los calculados u observados, n , es el número de datos. Lo deseable de esta medida es que sea cercana a cero para medir la bondad de un modelo hidrológico.

El Error Relativo (ER) que se interpreta como un porcentaje de error, se calculó como:

$$RE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2} \right) * 100 \quad (3.11)$$

Donde O_i es el valor observado y E_i es el valor estimado por el modelo. En este caso lo deseable es que los valores sean cercanos a 100 para medir la bondad de un modelo hidrológico.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como indica Grayson *et al.* (1992), una correcta simulación de los gastos a la salida de una cuenca no es necesariamente una correcta modelación de sus procesos internos.

Los gastos máximos de los HU medidos se encontraron dividiendo la lámina escurrida entre el gasto máximo de cada evento, por lo que el gasto resulto en $L \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1}$ y en esas unidades se obtuvieron también los caudales sintéticos. Los gastos unitarios de los eventos están sujetos a todos los factores que afectan la relación lluvia-escurrimiento como la vegetación, las características del suelo, la condición de humedad antecedente y otros.

Según lo recomendado por McCuen (2004) los coeficientes de Snyder deben ser calibrados por lo que el coeficiente al pico C_p utilizado para este trabajo se obtuvo a partir de las mediciones realizadas en las tres microcuencas resultando de 1.5, 0.5 y 8.8 en Vega de los Gatos, Progreso y Chanjalé, respectivamente y en el mismo orden el coeficiente C_t : 0.6, 0.5 y 4.4, se observan valores más grandes que los reportados por Mc Cuen (2004) con C_p en el rango de 0.5 a 0.7, y Bedient *et al.* (2013) que encontraron un rango de C_p de 0.4 a 0.8 y C_t de 1.8 a 2.2; esta discrepancia se debe a las pronunciadas pendientes que hay en las microcuencas de este trabajo y sobresale a la vista Chanjalé donde se tienen los coeficientes más grandes asociados a la mayor pendiente de 63.2% con respecto a los otros dos sitios.

Cabe señalar que Bedient *et al.* (2013) también reportan que C_t varía de 0.4 a 8.0 a lo largo del Golfo de México. Sin embargo todos los resultados citados por McCuen (2004) y Bedient *et al.* (2013), corresponden a las condiciones de las cuencas en Estados Unidos.

En la microcuenca Vega de los Gatos se analizaron 31 eventos, los gastos pico calculados con el HU del SCS variaron de 1.4 a 13.5 $L.s^{-1}.mm^{-1}$ subestimando 30 de los gastos pico medidos que oscilaron entre 3.7 y 28.3 $L.s^{-1}.mm^{-1}$, esto es similar a lo encontrado por Castiglioni *et al.* (1999). En el caso de los gastos pico calculados mediante el HU de Snyder se obtuvieron valores que van de 4.86 a 20.7 $L.s^{-1}.mm^{-1}$, 19 sobreestimaron los valores medidos. En el cuadro 3.2 se nota que la media de los gastos con el HU de Snyder es más cercana a la media de los gastos pico medidos.

Cuadro 3.2. Gastos Pico estimados con el método del SCS, de Snyder y medidos en la microcuenca Vega de los Gatos.

Fecha	P (mm)	HU del SCS qp(L/s.mm)	HU de Snyder qp(L/s.mm)	HU medido qp(L/s.mm)
16/05/11	57.1	8.3	17.2	9.8
24/05/11	89.3	7.8	17.2	9.7
07/06/11	97.2	3.4	9.8	8.5
25/06/11	25.8	13.5	20.7	15.4
26/06/11	145.8	2.2	6.8	3.7
02/07/11	46.3	3.6	10.1	6.1
04/07/11	91	4.0	11.3	9.9
10/07/11	77.2	5.1	12.9	15.4
14/07/11	52.6	4.2	11.3	13.7
15/07/11	31	10.1	18.5	11.2
18/07/11	122.1	2.9	8.7	6.0
19/07/11	71.3	2.4	7.6	10.7
24/07/11	41.3	8.1	16.8	22.3
29/07/11	38.9	11.0	19.5	16.0
31/07/11	86.9	1.6	5.5	5.4

07/08/11	33.1	4.3	11.3	4.2
14/08/11	23.1	2.8	8.4	14.0
16/08/11	58.9	1.4	4.9	11.1
17/08/11	24.4	4.5	11.6	20.7
18/08/11	57.3	3.9	10.8	17.6
27/08/11	15.6	5.1	12.5	17.2
27/08/11	51.7	3.4	9.6	19.5
30/08/11	73.3	2.3	7.3	11.0
01/09/11	25.8	10.3	18.5	28.3
04/09/11	25.1	4.3	11.3	10.7
05/09/11	128.4	2.0	6.5	12.5
12/09/11	60	5.5	13.6	11.7
13/09/11	57.6	2.8	8.6	9.3
14/09/11	34.4	6.7	14.9	13.3
19/09/11	129.6	1.9	6.3	10.5
29/09/11	28.4	5.5	13.2	7.2
PROMEDIO		5.0	11.7	12.35
Var		9.5	19.4	30.57
Desv Est		3.1	4.4	5.53

En el caso de la microcuenca Progreso se analizaron 11 eventos (Cuadro 3.3) donde los gastos pico obtenidos con el HU del SCS van de 1.9 a 14.7 L.s⁻¹.mm⁻¹, los obtenidos con el HU de Snyder de 2.4 a 7.1 l.s⁻¹.mm⁻¹ y los gastos pico medidos de 2.5 a 7.7 l.s⁻¹.mm⁻¹.

Cuadro 3.3. Gastos Pico estimados con el método del SCS, de Snyder y medidos en la microcuenca Progreso.

Fecha	P (mm)	HU del SCS qp(L/s.mm)	HU de Snyder qp(L/s.mm)	HU medido qp(L/s.mm)
23/04/11	43.8	11.0	7.1	7.7
08/06/11	110.1	14.2	3.6	3.5

06/07/11	58.1	2.2	2.4	5.0
10/07/11	70.0	5.8	5.2	5.3
27/08/11	59.7	3.3	3.9	5.7
30/08/11	55.3	3.7	3.2	4.7
04/09/11	55.8	14.7	2.8	6.5
14/09/11	52.8	9.7	5.8	7.5
19/09/11	186.7	1.9	2.5	2.5
21/09/11	55.3	6.8	5.6	6.0
27/09/11	55.2	5.4	5.2	8.3
PROMEDIO		7.2	4.3	5.71
Var		21.2	2.5	3.18
Desv Est		4.6	1.6	1.78

En la microcuenca Chanjalé se analizaron 11 eventos (Cuadro 3.4), en el primer caso los gastos pico estimados con el HU del SCS se encuentran en el rango de 6.7 a 44.9 L.s⁻¹.mm⁻¹ en el segundo caso los gastos obtenidos con el HU de Snyder van de 26.9 a 34.6 L.s⁻¹.mm⁻¹ y los gastos medidos varían entre 11.3 y 29.9 L.s⁻¹.mm⁻¹, en el segundo caso se sobreestiman los gastos medidos. La varianza con el HU del SCS es muy grande ya que en esta microcuenca aunque es la de mayor tamaño es donde se presenta menor escurrimiento.

Cuadro 3.4. Gastos Pico estimados con el método del SCS, de Snyder y medidos en la microcuenca Chanjalé.

Fecha	P (mm)	HU del SCS qp(L/s.mm)	HU de Snyder qp(L/s.mm)	HU medido qp(L/s.mm)
21/07/11	45.4	11.9	27.8	11.3
29/09/11	27.2	21.6	33.3	12.5
23/08/11	43.1	15.0	30.9	21.0
06/07/11	12.4	44.9	31.3	15.7
07/08/11	29.3	12.7	27.7	26.0
10/09/11	44.8	6.8	29.7	15.7
25/08/11	9.3	10.2	34.6	29.9

23/07/11	12.7	20.0	33.4	27.4
24/07/11	20.7	6.7	29.9	18.3
03/08/11	5.3	13.4	34.4	24.9
14/08/11	15.6	20.1	27.0	13.7
PROMEDIO		16.7	30.9	19.67
Var		113.5	7.6	42.41
Desv Est		10.7	2.8	6.51

En la microcuenca Vega de los Gatos el error residual (RE) del HU del SCS resultó de 229.3 y de 0.58 del HU de Snyder ambos con respecto al medido. En la microcuenca progreso este error resulto de 28.5 con el HU del SCS y de 17.75 en el HU de Snyder. En Chanjalé el RE resulto de 47.1 con el HU del SCS y el HU de Snyder tuvo un RE de 16.13. Como se observa en los tres sitios el error residual es menor con el HU de Snyder.

El estadístico que determina el error promedio entre los datos observados y los estimados, la raíz cuadrada del cuadrado medio del error RCCME, resulto de la siguiente manera; en Vega de los Gatos de 9.0 y 0.97 para la estimación con el HU del SCS y el HU de Snyder respectivamente, en progreso de 4.8 y 2.01, y en Chanjalé de 14.1 y 13.1.

El hidrograma de Snyder mostró menor error en la estimación de los gastos pico, sin embargo al comparar toda la curva de los tres hidrogramas no hay buen ajuste como se ve en la figura 3.1. Sobresale la discrepancia del tiempo base calculado del HU de Snyder que no es acorde a las otras seis coordenadas.

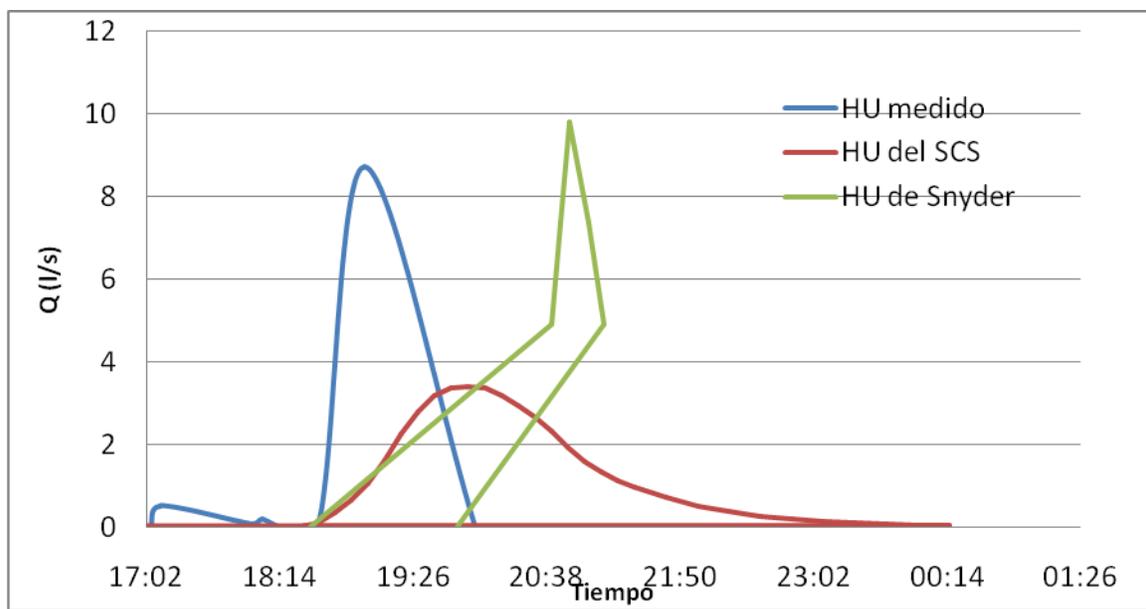


Figura 3.1. Hidrograma unitario medido, del SCS y de Snyder 07 de junio de 2011.

Esta discrepancia en el tiempo se debe a los tamaños de cuenca para los que fueron desarrollados los métodos sintéticos, que son cientos de veces más grandes, tan sólo el método sintético de Snyder se desarrolló para cuencas entre 30 y 30 000 km², en comparación con los tamaños de las microcuencas de este estudio en las que el tiempo de concentración es de algunos minutos.

3.4. CONCLUSIONES

En este estudio el cálculo del gasto pico con el Hidrograma Unitario Sintético de Snyder resultó con menor error al estimar los gastos pico medidos; así, los valores de C_p y C_t del hidrograma de Snyder se pueden extrapolar a otras cuencas vecinas que no están instrumentadas, incluso las subcuencas donde se encuentran las microcuencas Vega de los Gatos, Progreso y Chanjalé. Estos coeficientes se pueden usar en la modelación de la cuenca del Río Coatán realizando una adecuada aplicación en sus subcuencas, ya que uno de los objetivos fundamentales del estudio con cuencas instrumentadas es extrapolar los parámetros a cuencas vecinas. Sin embargo en el caso de Snyder, la principal desventaja es que requiere tener mediciones regionales para que los HU obtenidos se hagan extensivos a cuencas dentro de la misma región.

El uso de hidrogramas unitarios sintéticos es una buena alternativa para cuencas no instrumentadas donde es necesario conocer los gastos máximos para la planeación de los recursos hídricos, para el diseño de obras y para la toma de decisiones en la operación. Sin embargo se debe tener cuidado al aplicarlos en tamaños de cuenca menores a los recomendados en la literatura, debido a las discrepancias en los tiempos al pico y base.

Los métodos del hidrograma unitario sintético sobreestiman el tiempo de concentración lo que significa retardar el gasto máximo, sin embargo en microcuencas menores a 5 hectáreas la respuesta es instantánea.

Las ecuaciones empíricas para obtener el tiempo base en el hidrograma unitario sintético de Snyder no son aplicables en microcuencas menores a 5 hectáreas de tamaño.

3.5. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua de México, en especial a la Gerencia de Distritos de Temporal Tecnificado de Oficinas Centrales.

3.6. LITERATURA CITADA

Aisha, A., M. Neil, W.Howard, and U. Carl. 2008. Application of the Kineros2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman. *J. Hydrol.* 355: 91-105.

Aparicio, M. F.J. 2006. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Ed. LIMUSA, México. 303 p.

Bahram, S. 2006. Nonlinear transformation of unit hydrograph. *J. Hydrol.* 330: 596-603.

Bedient, P.B., W. C. Huber, and B.E.Vieux. 2013. *Hydrology and Floodplain Analysis*. 5thed. Prentice Hall, New Jersey.816 p.

Borges, C.P., R. D. Valmir, and M. Kobiyama. 2008. Rainfall-Runoff process analysis of the Pequeño River Catchment, Caritiba metropolitan region, Brazil, whit two hydrological models. *Ambiente e Agua. J. Appl.Sci.* 003: 43-54.

Castiglioni, M. G., M. J. Massobrio, C. I. Chagas, O. J. Santanatoglia. 1999. Study of a hydrological model in a microbasin belonging to the Pampa Ondulada, Argentina. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 14: 531-543.

Chow, V.T. 1971. *Applied Hydrology*. Mc Graw Hill. 624p.

- Flores-López, H., E. Ramírez-Vega, H. Byerly-Murphy, K. F. Ruiz-Corral, J.A. Martínez-Sifuentes, J. A. Díaz-Mederos, y P. Alemán-Martínez. 2003. Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuite, México. *TERRA Lat.* 21: 389-400.
- Grayson, R. B., I.D. Moore, and T. A. McMahon. 1992. Physically based hydrologic modeling. *Water Resources Res.* 26: 2659-2666.
- Jena, S.K., and K.N. Tiwari. 2005. Modeling synthetic unit hydrograph parameters with geomorphologic parameters of watersheds. *J. Hydrol.* 319:1-14.
- McCuen, R. H. 2004. *Hydrologic Analysis and Design*. 3rd ed. Prentice-Hall. New Jersey. 888p.
- Miranda-Aragón, Liliana., Ibáñez-Castillo, Laura. A., Valdez-Lazalde J.R., Hernández-de la Rosa P. 2009. Modelación Hidrológica Empírica del Gasto de 100 años de periodo de retorno del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso de suelo. *Agrociencia*, 43(4): 333-344.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10:282–290.
- Paz-Pellat, F. 2009. Mitos y Falacias del Método Hidrológico del Número de Curva del SCS/NRCS. *Agrociencia* 43: 521-528.
- Rodríguez López Yakelin, Marrero de León, N. y Laura Gil Urrutia. 2010. Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Reno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.* 19 (2): 31-37.
- Sherman, L.K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News Record* 108:501–505.
- Singh, P. K., P. K. Bhunya, S. K. Mishra, and U. C. Chaube. 2007. An extended hybrid model for synthetic unit hydrograph derivation. *J. hydrol.* 336:347-360.
- Snyder, F. F. 1938. Synthetic unit hydrographs. *Trans. Amer.Geophysical Union* 19:447–454.
- Yusop, Z., C. H.Chan, and A. Katimon. 2007. Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modeling stormflow hydrograph in an oil palm catchment. *Water science and technology* 56:41-48.

CAPÍTULO 4

IDENTIFICACIÓN DE CURVA DE ESCURRIMIENTO EN MICROCUENCAS DEL RÍO COATÁN, CHIAPAS, MÉXICO¹

RESUMEN

La metodología de los números de curva de escurrimiento (NC) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos (EU) tiene aplicaciones en el campo de la hidrología y se ha extendido ampliamente a muchos países incluyendo México, sin embargo dichos valores fueron obtenidos en cuencas de EU y son para categorías muy generales de uso de suelo por lo que se puede caer en errores al usarlos. En este trabajo se identificaron y compararon los números de curva de escurrimiento de tres microcuencas dentro de la cuenca del Río Coatán en Chiapas para varios eventos de lluvia que van desde 13 hasta 36 eventos ocurridos durante el 2011. Por un lado se utilizaron los valores de tablas del SCS que corresponden a las microcuencas y a sus eventos, haciendo las correcciones respectivas por humedad antecedente y por pendiente y por otro lado, se calcularon los valores de NC a partir de medición directa de la lluvia y el escurrimiento. Las mediciones se realizaron con pluviógrafo y limnógrafo establecidos cerca de la microcuenca y a la salida de ella, respectivamente. Se compararon ambos NC, los obtenidos a partir de la medición y los de las tablas del SCS y se encontraron diferencias significativas entre sus medias. Estos resultados se atribuyen a que al usar las tablas del SCS no se tiene el uso de suelo que se requiere y se tiene que usar el más cercano.

Palabras clave: Numero de curva de escurrimiento del SCS, número de curva de escurrimiento calculado, comparación entre NC de tablas y NC calculado.

¹Alonso-Sánchez H., Ibáñez-Castillo L. A., Arteaga-Ramírez R., Vázquez-Peña M. A. 2013. Enviado a la revista *Tecnología y Ciencias del Agua*.

RUNOFF CURVE IDENTIFICATION IN SMALL WATERSHEDS OF THE COATÁN RIVER, CHIAPAS, MÉXICO

ABSTRACT

The methodology of curve numbers (CN) of the Soil Conservation Service (SCS) have applications in the field of hydrology and is very used in many countries including Mexico. However these values were obtained from U.S. basins and their values are for very general categories of land use so you can fall in errors when using their tables. This study identified and compared the runoff curve number of three micro watersheds within the basin of the Río Coatán in Chiapas for several rain events ranging from 13 to 36 events during 2011. On one side values were used from SCS tables corresponding to the micro watersheds and his events, making the respective corrections of antecedent moisture and slope and on the other hand, NC values were calculated from direct measurement of rainfall and runoff. The measurements were made with rain gauges and water level recorder set near the watersheds and at outlet of them, respectively. It was compared both NC, obtained from the measurement and the tables of SCS, finding significant differences between their means. These results are attributed to the use of SCS tables that do not have the land use required and you have to use the closest.

Key words: SCS Runoff curve number, calculated curve number, comparison between SCS curve number and calculated runoff curve number.

4.1. INTRODUCCIÓN

El procedimiento del número de curva (NC) fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y por el entonces Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1972) como un simple procedimiento para calcular el volumen de escurrimiento generado por grandes tormentas en pequeñas cuencas agropecuarias, debido a su simplicidad pronto evoluciono mas allá de sus objetivos generales y fue adoptado para diferentes usos de suelo como cuencas urbanas y forestales (Rawls *et al.*, 1980; Mishra and Singh,1999), así rápidamente llego a ser una de las técnicas más utilizadas por ingenieros e hidrólogos (Mishra *et al.*, 2006) incluso se han desarrollado metodologías para la generación automática del NC usando los sistemas de información geográfica (Montserrat *et al.*, 1995),

además es la única metodología razonablemente bien documentada y es un método bien establecido, ampliamente aceptado para su uso en EU y otros países.

El procedimiento fue de un diseño simple debido a que su desarrollo fue antes del amplio uso de las computadoras y antes de que los sistemas de información geográfica, los extensos bancos de datos de suelo y vegetación estuvieran disponibles. El método contiene dos parámetros; el número de curva y las abstracciones iniciales. Como la metodología se puede aplicar a cuencas no instrumentadas, los parámetros del modelo, número de curva, relacionados con suelo y vegetación se incorporaron en un solo parámetro NC y se pueden obtener de tablas que puede tener modificaciones por pendiente y por humedad antecedente. El primer documento para este procedimiento fue publicado por el USDA-SCS (1972), y es ampliamente descrito en diferentes libros de textos de hidrología. El mismo está sometido a frecuentes revisiones debido a algunas inconsistencias en la definición de la condición de humedad antecedente, la falta de consideración de la energía de la lluvia y la no comprensión por parte de los usuarios del carácter probabilístico del método (Celio, 2008).

Por otro lado, el método tiene los siguientes supuestos: no considera el impacto de la intensidad de la lluvia y su distribución temporal, no toma en cuenta el efecto de la escala espacial, es muy sensible a cambios en valores de sus parámetros (Ponce and Hawkins, 1996). Debido a lo anterior el número de curva es ajustado cada día a un valor mayor o menor para que refleje el incremento o decremento de las abstracciones del suelo. El uso del número de curva en este sentido presenta problemas y malinterpretaciones que indeterminan su utilidad para determinar una representación real y precisa de los valores de flujo, tirantes, y áreas bajo erosión además de otras predicciones sobre escurrimiento.

Joseph and Russell (2011) encontró que existe variabilidad en el tiempo del NC para un mismo sitio, además recomienda hacer una mejor discretización de los usos de suelo evitando usar valores promedio de NC para grandes áreas a fin de ser más precisos al utilizar el NC.

Los métodos que han sido propuestos para encontrar diferentes valores de NC presentan variabilidad en los valores evaluados para la misma cuenca para diferentes láminas de lluvia, esta variabilidad se atribuye a la variación de las condiciones de humedad antecedente y a la variabilidad espacial de la lluvia, los efectos de escala, y muchas otras razones. Así mismo

otros estudios se han hecho con el objetivo de mejorar el método y encontrar un mejor camino para incorporar las mediciones de humedad antecedente (Mishra *et al.*, 2006).

En la cuenca del Río Despoblado y Coatán, Campos *et al.* (2010) estimaron el valor promedio de las curvas numéricas a partir de los datos de lluvia máxima en 24 horas (mm) y escurrimiento pico (m^3/s), ajustados ambos a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Mediante iteraciones calcularon el valor de CN con tres métodos hidrológicos: TR 55, Chow e Hidrograma Unitario Triangular. Para la cuenca del Río Despoblado Obtuvieron un NC de 64 mientras que para la cuenca del Río Coatán obtuvieron un NC de 58. Estos valores corresponden a los de tablas para bosque natural con grupo hidrológico de suelo C y D, para bosque espeso con alta transpiración $62 \leq NC \leq 69$ para la cuenca del Río Despoblado y para bosque muy espeso con alta transpiración $54 \leq NC \leq 61$ para la cuenca del Coatán.

El método usado por Campos *et al.* (2010) para la estimación de los NC promedio en las cuencas de los Ríos Despoblado y Coatán, Chiapas no es un procedimiento de calibración *in situ* con datos hidrológicos; es un proceso de ajuste entre variables observadas y calculadas, también es un procedimiento de cálculo de similitud estadística de datos de lluvia extrema y caudales pico para un mismo periodo de retorno, es decir, no toma en cuenta la heterogeneidad de la cuenca, la distribución espacial de las características hidráulicas del suelo, la variabilidad espacial de las condiciones de uso del suelo sus prácticas de manejo y la dinámica y composición de la cubierta vegetal, parámetros que están intrínsecos en el concepto de Número de Curva como un estimador del coeficiente de escurrimiento del proceso hidrológico lluvia escurrimiento.

El método ha sido sujeto de diferentes estudios con el objeto de encontrar una base teórica del mismo facilitando su uso en regiones y climas con condiciones no evaluadas previamente y soportando su aplicación. (Hjelmfelt, 1991), que se ha investigado en varias regiones del mundo y para diferentes usos de suelo y condiciones de clima mientras los valores de NC se obtienen experimentalmente de mediciones de lluvia y escurrimiento sobre un amplio rango de condiciones geográficas, de suelo y manejo de suelo

Así el NC del SCS es ampliamente usado para la predicción de volúmenes de escurrimiento de eventos de lluvia. La aplicabilidad de este método y el mecanismo de generación de escurrimiento deben ser analizados en escenarios diferentes.

En México se utiliza en gran medida el método del número de curva debido a su simplicidad y a la falta de instrumentación en las cuencas, sin embargo, las condiciones de uso de suelo son diferentes a las que se presentan en EU donde se desarrollaron las tablas para el método, en particular la región Frontera Sur de México cuenta con usos de suelo que no existen en las tablas de NC, por ello el objetivo de este trabajo fue identificar el número de curva para el uso de suelo presente en las microcuencas de monitoreo ubicadas en la cuenca del Río Coatán en el estado de Chiapas, México.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se eligieron microcuencas ubicadas en la cuenca del Río Coatán que mantuvieron un registro ininterrumpido de información gráfica lluvia escurrimiento del año 2011. La instrumentación de este sitio obedece a las acciones de monitoreo que la CONAGUA (2011) realiza en la costa de Chiapas. En el cuadro 4.1 se observan las coordenadas y algunas características de las microcuencas que se encuentran en la parte baja, media y alta de la cuenca del Río Coatán, en la Región Hidrológica No 23 costa de Chiapas en la Frontera Sur con Guatemala.

Cuadro 4.1. Características físicas y geométricas de las microcuencas.

Microcuenca	Latitud (° ‘ ‘’)	Longitud (° ‘ ‘’)	Área (m ²)	Elevación (msnm)	Longitud de cauce (m)	Pendiente de cauce (%)	Textura	Uso de suelo
Vega de los Gatos	15° 01’ 44’’	92° 13’ 55’’	23 494	471	314	29.6	Migajón	Selva baja y media
Chanjalé	15° 12’ 35’’	92° 11’ 45’’	44838	1473	343	63.2	Migajón	Café con selva baja y media
Progreso	15° 45’ 05 ‘ ‘’	92° 11’ 46’’	27609	944.5	365	24.9	Migajón Arenoso	Café plátano y frutales

4.2.1. Precipitación

Esta variable se midió usando un pluviógrafo de la marca Thies de importación Alemana, consiste en un sistema de relojería que gira el rollo de papel, una probeta graduada a 10 mm de altura, contiene un flotador que está conectado a la plumilla, se arrastra sobre el rollo de papel y dibuja la gráfica que recibe el nombre de pluviograma.

De las gráficas de los pluviógramas se obtuvo la lluvia acumulada para cada evento, en algunos casos se perdió información debido a las fallas en los mecanismos de registro, que no fueron tomados en cuenta en este estudio.

4.2.2. Escurrimiento

Para medir el escurrimiento se utilizó un aforador tipo H, consiste en un canal de llegada, y un vertedor triangular para el que se tiene una tabla de calibración, en un extremo del canal de llegada se encuentra un cilindro de metal perforado que mediante un flotador transmite las diferencias de nivel a un tambor sobre el que está montado el papel y en el cual una plumilla dibuja la gráfica de niveles. Este dispositivo tiene un sistema de relojería que permite el avance de la plumilla.

No todas las lluvias produjeron escurrimiento además algunos eventos se perdieron por fallas por lo que teniendo los registro de limnigramas, se compararon con los eventos de lluvia y se descartaron los escurrimientos en los que se perdió el registro de lluvia.

4.2.3. Transformación de limnigramas a hidrogramas

La interpretación de los limnigramas, registrados con limnógrafo de la marca Stevens, se realizó tomando en cuenta que estos registran a la escala 1:5 y luego con la tabla de calibración del aforador se obtuvieron los gastos a diferentes intervalos, con una hoja de cálculo se obtuvo el área bajo la curva de los hidrogramas que corresponde al volumen total escurrido. La lámina de escurrimiento se calculó dividiendo el volumen total entre el área de la microcuenca.

4.2.4. Obtención del número de curva con el método del SCS

El método establecido por el SCS utiliza una tabla de valores NC generados experimentalmente en cuencas de EU, tiene cuatro columnas; la primera refiere la descripción del uso de suelo, la segunda al tratamiento o prácticas que se realicen sobre cada uso de suelo, la tercera es la condición hidrológica y la cuarta son los NC de acuerdo a los grupos hidrológicos de suelo.

El tipo de vegetación o cobertura vegetal en una cuenca y su densidad tienen un gran impacto en la capacidad de infiltración de un suelo dado. Así se tienen los siguientes tipos de cobertura:

Pobre: Áreas empastadas o incendiadas, menos del 50% de la superficie está protegida por la cobertura vegetal.

Regular: Cobertura moderada con una protección vegetal de la superficie del suelo de 50 a 75%.

Buena: Densa cobertura con más del 75% del suelo protegido por la vegetación.

Por otro lado se encuentra el grupo de suelo, según los científicos del SCS después de analizar más de 4000 suelos en base en su potencial de escurrimiento los clasificaron en cuatro grupos hidrológicos identificándolos con las letras A, B, C y D donde:

A: Arenas profundas, loess profundos y limos agregados. Bajo potencial de escurrimiento superficial, alta capacidad de infiltración incluso cuando están mojados (mayor a 0.76 cm/h). Suelos profundos de bien a excesivamente drenados como arenas y gravas.

B: Loess superficiales y franco arenosos. Capacidad de infiltración moderada cuando están saturados (de 0.38 a 0.76 cm/h). Medianamente profundos, de moderados a bien drenados, moderadamente finos a granos de cuarzo finos, (Franco arenoso).

C: Franco arcillosos, franco arenosos superficiales, suelos con bajo contenido de materia orgánica, suelos con alto contenido de arcilla. Baja capacidad de infiltración cuando están saturados (0.13 a 0.38 cm/h). Suelos moderadamente finos a granulados finos o suelos con una capa impermeable (Fragipan).

D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas plásticas y ciertos suelos salinos. Alto potencial de escurrimiento superficial, muy baja capacidad de infiltración cuando están saturados (menor a 0.13 cm/h). Suelos arcillosos, suelos con una capa permanente de agua, suelos con una capa de arcilla cerca de la superficie, suelos poco profundos sobre roca impermeable.

4.2.5. Condición de humedad antecedente

La condición de humedad antecedente tiene un efecto significativo en el volumen y la tasa de escurrimiento, reconociéndolo como un factor importante, se desarrollaron tres

“condiciones” de humedad antecedente (AMC, por sus siglas en inglés) por el SCS, estas son:

Condición I: suelos secos, pero no en el punto de marchitez; se presentan condiciones satisfactorias para los cultivos. Precipitación acumulada inferior a 34 mm en los 5 días anteriores

Condición II: Condiciones promedio. Precipitación acumulada entre 34 y 54 mm en los 5 días anteriores.

Condición III: lluvias diurnas intensas y bajas temperaturas en los cinco días anteriores, suelos saturados. Precipitación acumulada mayor a 54 mm en los 5 días anteriores.

4.2.6. Cálculo del Número de Curva de escurrimiento

El método del NC del SCS se basa en la ecuación de balance:

$$P = Q + I_a + F \quad (4.1)$$

Siendo P la lluvia total en mm, I_a las abstracciones iniciales, Q el escurrimiento directo en mm, F la infiltración acumulada en mm. Asumiendo que la tasa de escurrimiento entre la lluvia efectiva es igual a la retención real entre la retención potencial:

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (4.2)$$

y S la retención potencial máxima en mm. Para obtener la expresión básica del método del SCS se combinan las ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (4.3)$$

que es válida si $P \geq I_a$ de otro modo $Q=0$.

Asumiendo además que la cantidad de abstracciones iniciales es una fracción de la retención potencial máxima:

$$I_a = \lambda S \quad (4.4)$$

La expresión 3.3 queda como:

$$Q = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S} \quad (4.5)$$

La ecuación 4.5 se expresa normalmente con un valor constante de las abstracciones iniciales ($\lambda=0.2$), para que así S sea el único parámetro del método. Además, la retención potencial S se expresa en términos del número de curva (NC) adimensional a través de la ecuación:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \quad (4.6)$$

Donde S es la retención potencial máxima en mm y NC es el número de curva de escurrimiento adimensional.

Así los valores de NC van de 0 cuando S tiende a infinito, a 100, cuando S tiende a cero. Los valores de NC se obtienen de tablas para los diferentes tipos de suelo, cobertura y condiciones de manejo del suelo, sin embargo es preferible la estimación de valores de NC basados en datos reales.

Para estimar S de datos reales, la ecuación 4.5 se puede resolver con la ecuación cuadrática (Hawkings, 1979):

$$S = 5\left(P + 2Q - \sqrt{4Q^2 + 5PQ}\right) \quad (4.7)$$

Combinando la ecuación 4.7 y la ecuación 4.6, el NC se puede estimar directamente con datos reales de lluvia y escurrimiento:

$$NC = \frac{25400}{5\left(P + 2Q - \sqrt{4Q^2 + 5QP}\right) + 254} \quad (4.8)$$

Donde P es la lámina precipitada en mm y Q es la lámina escurrida en mm.

4.2.7. Estimación del error entre los números de curva de tablas y los estimados

Para medir el nivel de ajuste de un modelo hidrológico se utilizan algunos estadísticos (Yusop *et al.*, 2007). El estadístico de la Raíz Cuadrada del Cuadrado Medio del Error (RCCME) o error medio cuadrático, se obtuvo con:

$$RCCME = \sqrt{\frac{Sr}{n-1}} \quad (4.9)$$

donde: Sr, es la suma de los cuadrados de los residuos entre los datos observados y los estimados, n, es el número de datos.

Otro estadístico de comparación es el Error Relativo (ER), el cual se calculó con:

$$RE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2} \right) * 100 \quad (4.10)$$

El estadístico de eficiencia entre los datos observados y los estimados es el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970) que compara los hidrogramas observados y simulados (Yusop *et al.*, 2007), el cual se calculó con:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (4.11)$$

donde Q_o^t es el valor observado, Q_m^t el valor que estima el modelo y \bar{Q}_o es la media de los valores observados. Pero la ecuación 4.11 puede llevarse a la comparación de NC de tablas y NC "medido" como

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (NC_{med}^i - NC_{tablas}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (NC_{med}^i - \overline{NC_{med}})^2} \quad (4.12)$$

Con NC_{med} es el número de curva medido, adimensional y NC_{tablas} es el valor de número de curva obtenido de tablas, adimensional.

La eficiencia de Nash puede ir desde $-\infty$ a 1. Una eficiencia de 1 corresponde a una combinación perfecta de los datos medidos con los datos observados, una eficiencia de 0 indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, mientras que una eficiencia menor a cero se produce cuando la media observada es un mejor predictor que la predicción del modelo, es decir, cuando la varianza residual es mayor que la varianza de los datos. Básicamente cuanto más cercano sea el valor de la eficiencia a 1 mejor será la predicción del modelo.

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cada microcuenca se obtuvo el NC de tablas del SCS, también el NC observado o calculado con los datos de lluvia y escurrimiento medidos. En el caso de Vega de los Gatos los NC se calcularon para 36 eventos, en Progreso para 13 y en Chanjalé 13.

En los cuadros 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran los resultados obtenidos de números de curva calculados y los obtenidos de tablas. Los estadísticos de comparación entre los valores de tablas y los calculados resultaron de la siguiente manera para la microcuenca Vega de los Gatos; el RCCME igual a 16.02 mientras que el RE resultó de 5.16, por último el Coeficiente de eficiencia de Nash resultó de -73.62 lo que indica en este último caso es que la media de los valores de tablas del SCS es diferente a los valores calculados con mediciones, lo que se comprueba estadísticamente más adelante.

Los resultados indican que los NC estimados de acuerdo a las tablas del SCS son muy diferentes a los obtenidos con variables medidas. Lo primero que podría decirse es que el método del NC no sirve, que es un método sin fundamentos hidrológicos, que no explica la naturaleza física del fenómeno lluvia escurrimiento y diversas críticas se podrían hacer al respecto, sin embargo, originalmente el método fue desarrollado para un tipo de condiciones diferentes a las que se tienen en Chiapas, las tablas no están hechas para los usos de suelo que predominan en la región de estudio. Para hacer uso de las tablas se toma un uso de suelo similar al que prevalece. En el caso de la cuenca de estudio existe el uso de suelo de selva; en EU donde se desarrolló el método no existe este uso de suelo. Si se desea usar este método aceptando sus supuestos, se deben generar los números de curva de los usos de suelo que interesan, haciendo mediciones para tener mayor precisión y así evitar usar los números de curva de las tablas del SCS para los usos que no contienen éstas.

Cuadro 4.2. Números de curva de tablas y calculado en la microcuenca Vega de los Gatos

Evento	Fecha	Lamina	Lamina	NC	NC de tablas
		escurrida (mm)	precipitada (mm)	Calculado	del SCS ¹
1	20/04/2011	4.0	65.1	58.5	79.56
2	16/05/2011	6.9	57.1	67.5	79.56
3	24/05/2011	5.9	89.3	51.2	79.56
4	07/06/2011	18.7	97.2	61.2	79.56
5	25/06/2011	3.6	25.8	83.2	79.56
6	26/06/2011	27.6	145.8	51.0	79.56

7	02/07/2011	2.3	46.3	65.0	79.56
8	04/07/2011	7.2	91	52.3	79.56
9	10/07/2011	14.9	77.2	66.6	79.56
10	14/07/2011	4.4	52.6	65.9	79.56
11	15/07/2011	2.8	31	77.1	79.56
12	18/07/2011	24.0	122.1	56.0	79.56
13	19/07/2011	13.7	71.3	68.3	79.56
14	24/07/2011	3.8	41.3	71.9	79.56
15	29/07/2011	2.5	38.9	70.5	79.56
16	31/07/2011	7.0	86.9	53.6	79.56
17	07/08/2011	3.3	33.1	76.6	79.56
18	08/08/2011	6.0	29.8	84.2	79.56
19	14/08/2011	2.4	23.1	82.7	79.56
20	16/08/2011	7.9	58.9	68.0	79.56
21	17/08/2011	2.8	24.4	82.5	79.56
22	18/08/2011	11.2	57.3	73.0	79.56
23	19/08/2011	8.3	42.3	78.5	79.56
24	26/08/2011	3.8	94.9	46.1	79.56
25	27/08/2011	3.1	15.6	91.0	79.56
26	27/08/2011	10.0	51.7	74.8	79.56
27	30/08/2011	13.1	73.3	66.6	79.56
28	01/09/2011	2.4	25.8	80.5	79.56
29	04/09/2011	3.4	25.1	83.3	79.56
30	05/09/2011	17.7	128.4	49.6	79.56
31	12/09/2011	4.0	60	61.1	79.56
32	13/09/2011	3.6	57.6	61.4	79.56
33	14/09/2011	4.5	34.4	78.2	79.56
34	18/09/2011	7.9	46.6	75.3	79.56
35	19/09/2011	24.8	129.6	54.1	79.56
36	29/09/2011	2.7	28.4	79.1	79.56
Promedio				68.5	79.26

¹NOTA: corregidos por humedad antecedente y por pendiente.

Además de los resultados que se muestran en el cuadro 4.3 del sitio progreso, los estadísticos de comparación entre los valores de tablas del SCS y los calculados, son; el RCCME resultó de 15.7, el RE igual a 21.9 y por último el coeficiente de eficiencia de Nash igual a -69.9, como se puede ver el coeficiente de eficiencia muestra que no hay similitud entre los valores de tablas y los obtenidos a partir de mediciones.

Cuadro 4.3. Número de Curva de escurrimiento de tablas y calculado de la microcuencia Progreso

Evento	Fecha	Lamina escurrida (mm)	Lamina precipitada (mm)	NC Calculado	NC de tablas del SCS
1	23/04/11	2.6	43.8	67.5	69
2	08/06/11	4.7	110.1	42.9	80
3	06/07/11	1.0	58.1	54.2	75
4	10/07/11	2.8	70.0	53.7	80
5	27/08/11	2.3	59.7	57.3	80
6	30/08/11	1.0	55.3	55.6	80
7	31/08/11	1.2	57.4	55.3	80
8	04/09/11	1.2	55.8	56.1	80
9	06/09/11	1.0	46.3	60.5	80
10	14/09/11	1.4	52.8	58.5	80
11	19/09/11	13.4	186.7	34.0	80
12	21/09/11	1.5	55.3	57.5	80
13	27/09/11	1.2	55.2	56.5	80
Promedio				54.6	79

En el sitio Chanjalé (Cuadro 4.4) los estadísticos de comparación entre los valores de tablas y los calculados son; el RCCME resultó de 11.3, el Error residual igual a 2.43 y el coeficiente de eficiencia de Nash igual a -6.9. Note que en los tres sitios el coeficiente de Nash es menor a cero lo que implica que la media de los valores observados es diferente a la media de los valores de tablas lo que se prueba más adelante estadísticamente, aunque los errores y el coeficiente de eficiencia son más conservadores en Chanjalé, también existe discrepancia de acuerdo a la teoría de Nash y Sutcliffe.

Cuadro 4.4. Número de Curva de escurrimiento de tablas y calculado de la microcuencia Chanjalé

Evento	Fecha	Lamina escurrida (mm)	Lamina precipitada (mm)	NC Calculado	NC de tablas del SCS
1	21/07/11	0.693	45.4	59.8	69

2	29/09/11	0.378	27.2	71.0	80
3	30/09/11	0.713	36.0	66.1	80
4	23/08/11	0.310	43.1	58.8	69
5	06/07/11	0.033	12.4	82.2	80
6	26/08/11	0.011	28.2	65.3	80
7	07/08/11	0.058	29.3	65.7	75
8	10/09/11	0.042	44.8	54.8	80
9	25/08/11	0.002	9.3	84.9	80
10	23/07/11	0.024	12.7	81.5	80
11	24/07/11	0.028	20.7	72.7	80
12	03/08/11	0.002	5.3	91.0	80
13	14/08/11	0.009	15.6	77.5	80
Promedio				71.7	78

Los valores de NC obtenidos de tablas con los parámetros de uso de suelo señalados, corregidos por la condición de humedad antecedente y pendiente, se compararon con los calculados a través de la ecuación 4.8, una solución por medio de la ecuación cuadrática de la ecuación del SCS para obtener los valores de NC con mediciones de lluvia y escurrimiento.

Se realizó un análisis estadístico de la información para verificar si existe diferencia significativa entre los valores de tablas y los calculados con datos medidos, por lo que se aplicó una estadística de prueba que permite determinar la diferencia de medias entre dos poblaciones.

Partiendo de un supuesto de normalidad de los datos se procedió a realizar una prueba de homogeneidad de varianzas muestrales. La técnica empleada para la homogeneidad de varianzas fue la descrita por Montgomery (2004) quien propone el juego de hipótesis como sigue:

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \text{ vs } H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \quad (4.12)$$

Donde la estadística de prueba es la F de Fisher que es el cociente de las varianzas muestrales:

$$F_o = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (4.13)$$

La referencia de comparación con F_0 es una F de tablas (F_t) con n_1-1 grados de libertad en el numerador y n_2-1 grados de libertad en el denominador, el nivel de significancia de la prueba es α .

En esta prueba se rechaza H_0 si:

$$F_0 \geq F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1} \text{ ó } F_0 \leq F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1} \quad (4.14)$$

Las tablas de F de la mayoría de los libros proporcionan valores de la cola derecha, pero también se puede usar MATLAB para calcular los valores correspondientes de la función de distribución de probabilidades acumuladas F.

Para la comparación de medias de dos poblaciones se utilizó la estadística de prueba t de student con varianzas iguales y que proceden de una distribución normal, la estadística de prueba es:

$$t_0 = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4.15)$$

Donde:

\bar{x}_1, \bar{x}_2 = medias de las poblaciones; n_1, n_2 = número de observaciones de las muestras; S_p = Desviación estándar ponderada.

El criterio de rechazo de la hipótesis nula es rechazar H_0 si:

$$|t_0| \geq t_{\alpha/2, v} \quad (4.16)$$

con una significancia de $\alpha=0.05$ y $v=(n_1+n_2-2)$ grados de libertad .

La varianza ponderada se obtiene como:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_{x_1}^2 + (n_2 - 1)S_{x_2}^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (4.17)$$

$$S_p = \sqrt{S_p^2} \quad (4.18)$$

Los resultados de las pruebas se muestran en el cuadro 4.5. En las tres microcuencas F_0 es menor que F de tablas por lo tanto se concluye que las varianzas muestrales son iguales a un nivel de significancia de 0.05. En la prueba de medias en los tres sitios si hay diferencia significativa entre medias a un nivel de significancia de 0.05.

Cuadro 4.5. Parámetros de comparación de varianzas y medias de los NC de tablas y calculados.

Variable	Vega de los Gatos (n=36)	Progreso(n=13)	Chanjalé (n=13)
F₀	0.02	0.15	0.14
F_t	1.78	2.42	2.77
S_p²	73.60	38.44	70.59
S_p	8.58	6.20	8.40
t₀	-5.38	-9.84	-2.08
t_{α/2}	1.99	0.68	0.68

4.4. CONCLUSIONES

Se identificaron los números de curva 69 para Vega de los Gatos que corresponde a un uso de suelo de selva baja y media, 55 para un uso de café, plátano y frutales en la microcuenca Progreso y 72 para una combinación de café, selva baja y media en la microcuenca Chanjalé, estos valores se pueden usar en estudios hidrológicos futuros.

La comparación estadística entre las medias de los valores de tablas del SCS y los calculados mostró diferencia significativa en las tres microcuencas a un nivel de significancia de 0.05; significa que en el caso de Vega de los Gatos, Progreso y Chanjalé es más preciso usar los NC calculados que los de tablas para estudios hidrológicos.

Los números de curva del SCS están acotados a usos de suelo exclusivos de Estados Unidos y por lo tanto es difícil elegir un uso de las tablas que realmente se adapte a las condiciones de México. En las varias posibilidades de uso de suelo las tablas del SCS no están suficientemente discretizadas para tener valores más precisos.

Por las medias encontradas los NC de tablas sobreestiman los NC identificados a partir de mediciones, implica que teóricamente haya menor escurrimiento en la cuenca, sin embargo los valores encontrados representan menor infiltración debido a diferentes factores como la pendiente que existe en el área de estudio.

Los números de curva del SCS no se pueden aplicar con certeza si no existe específicamente el tipo de uso de suelo en sus tablas, no porque estén mal, sino porque cada tipo de vegetación en combinación con otras características modifica el fenómeno físico de escurrimiento.

El método del SCS fue elaborado en condiciones distintas a las que prevalecen en la Costa de Chiapas, los supuestos que hace el método no son válidos en esta región ni en ninguna otra parte si no se comprende que el método, puede dar una idea de la relación lluvia escurrimiento, pero, no fue creado para todas las condiciones hidrológicas de México. Para poder usar el método de manera precisa y tener una mejor aproximación al fenómeno físico lluvia escurrimiento se tendrán que generar los NC para los usos de suelo y condiciones hidrológicas de México.

4.5. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua, en especial a la Gerencia de Distritos de Temporal Tecnificado de Oficinas Centrales.

4.6. LITERATURA CITADA

Campos A. D., M. S. Martínez. 2010. Calibración del número N con predicción de crecientes en dos cuencas rurales en la Costa de Chiapas. *Memorias del XXI Congreso Nacional de Hidráulica* (AMH). Guadalajara, Jalisco.

Celio, I. C., O. J. Santanatoglia, M. G. Castiglioni, M. J. Massobrio, A. Bujan y C. Iurrtia. 2008. Número de curva de escurrimiento para una microcuenca de Pampa ondulada bajo labranza convencional y siembra directa. Argentina. *CI Suelo* 26:63-69.

CONAGUA. 2011. Monitoreo de procesos hidrológicos erosivos en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, en la costa de Chiapas. Convenio de colaboración con la Universidad Autónoma Chapingo No Sgih-gdtt-uach-11/09/rf/cc.

Hawkins, R. H. 1979. Runoff curve numbers from partial area watersheds. *Journal Irrigation and Drainage Div., ASCE*, Vol105núm. 4, 1979, pp. 375–389.

Hjelmfelt, A. T. 1991. Investigation of curve number procedure. *J Hydraul Eng* 117:725-737.

Joseph, R. A., Russell, M. 2011. High-resolution land cover dataset, composite curve numbers, and storm water retention in the Tampa Bay, FL region. *Applied Geography*. Vol. 31:740-747.

- Mishra, S. K., R. K. Sahu, T. I. Eldho, M. K. Jain. 2006. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. *Water Resour Manag.* 20: 643-660.
- Mishra, S. K. and V. P. Singh. 1999. Another look at SCS-CN method. *J Hydrol Eng* 4:257-264.
- Montgomery D.C., 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Segunda edición. Lymusa-Wiley. México. 686p.
- Montserrat F., R. Joaquín, E. Teodoro. 1995. Generación Automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica. *Ingeniería del Agua.* 2(4): 43-58.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10:282–290.
- Ponce, V. M. and R. H. Hawkins. 1996. Runoff Curve Number: Has it reached maturity?. *J. Hydrol Eng.* 1:11-19.
- Rawls, W. J., C. A. Onstad, H. H. Richardson. 1980 Residue and tillage effects on SCS runoff curve numbers. *Trans Am Soc Agric Eng* 37:411-418.
- USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service), 1972. *SCS Natural Engineering Handbook*, section 4, Hydrology. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Washington, D.C. pp. 1-24.
- Yusop, Z., C. H. Chan, and A. Katimon. 2007. Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modeling stormflow hydrograph in an oil palm catchment. *Water science and technology* 56:41-48.

CAPÍTULO 5

MODELACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO COATÁN CON HEC-HMS¹

RESUMEN

En este trabajo se modeló la cuenca del Río Coatán con dos eventos extremos (04 de octubre de 2005 y 11 de octubre de 2011), de forma empírica y por otro lado con algunos parámetros obtenidos a partir de mediciones en tres microcuencas ubicadas dentro de la cuenca de tal Río. Se realizó la clasificación de imagen Spot V de 10 m de resolución espacial de noviembre de 2005 para obtener los usos de suelo, por medio de ese mapa se extrapolaron algunos parámetros de las microcuencas a toda la cuenca. La modelación empírica consistió en alimentar la fase de pérdidas del modelo con números de curva de escurrimiento de las tablas del SCS y la fase de transformación lluvia-escurrimiento se alimentó con el hidrograma triangular del SCS que arrojó gastos pico de 3074.2 m³/s en 2005 y de 446 m³/s en 2011. Estos gastos resultaron mayores que en los escenarios donde se modelo con números de curva estimados a partir de mediciones y con los parámetros del hidrograma de Snyder, que se obtienen con mediciones en la cuenca, con lo que el modelo calculó gastos máximos de 2106.9 m³/s en 2005 y de 239 m³/s en 2011. La diferencia entre los gastos estimados con la modelación empírica y los gastos estimados alimentando el modelo con algunos parámetros a partir de mediciones, se atribuye a la sensibilidad del modelo al número de curva y al tiempo de retraso, el cual depende del tiempo de concentración entre el empirismo y los datos reales.

Palabras Clave: gasto máximo, eventos extremos, modelación empírica, modelación con mediciones, clasificación de imágenes.

¹Alonso-Sánchez H., Ibáñez-Castillo L. A., Arteaga-Ramírez R., Vázquez-Peña M. A. 2013.

COATÁN RIVER WATERSHED MODELACIÓN WITH HEC-HMS

ABSTRACT

In this paper was modeled Coatán River basin with two extreme events (October 4, 2005 and October 11, 2011), empirically and on the other side with some parameters obtained from measurements on three micro watersheds located within the Coatán River basin. We performed image classification Spot V 10 m spatial resolution of November 2005 for land uses, through that map some parameters were extrapolated to watersheds throughout the basin. The empirical modeling phase involved feeding loss model with runoff curve numbers of SCS tables and phase rainfall-runoff transformation was fed with SCS triangular hydrograph that produce peak flows of $3074.2 \text{ m}^3 / \text{s}$ in 2005 and $446 \text{ m}^3 / \text{s}$ in 2011. These values were higher than in the cases in which model was fed with curve numbers obtained from measurements, and Snyder hydrograph parameters, obtained from measurements in the basin, which were obtained $2106.9 \text{ m}^3 / \text{s}$ in 2005 and $239 \text{ m}^3 / \text{s}$ in 2011. The difference between the flows obtained with empirical modeling and values obtained by feeding the model with some parameters from measurements, is attributed to the sensitivity of the model to the curve number and time lag, which depends on the time of concentration between empiricism and the actual data.

Keywords: peak flow, extreme events, empirical modeling, modeling with measurements, image classification.

5.1. INTRODUCCIÓN

El cambio en los flujos de ríos, la disponibilidad de los recursos hídricos y el incremento global y potencial del escurrimiento se deben a la intensificación del ciclo hidrológico (Tarana and Slobodan, 2009). Simular el comportamiento de una cuenca hidrológica con la ayuda de un modelo matemático cobra sentido cuando la información obtenida con el mismo resulta imprescindible para lograr un objetivo difícilmente alcanzable por otros medios menos costosos (Treviño y Ortiz, 2004). Una de las ventajas del uso de los modelos hidrológicos es que se pueden correr tantas veces como se desee, se pueden estudiar

condiciones extremas y observar cómo se comportan los gastos máximos, para mejorar la precisión se puede alimentar con la medición de variables.

Las inundaciones causadas por fuertes lluvias son temas de interés en muchas partes del mundo (Dutta *et al.*, 2000; Knebl *et al.*, 2005), debido a que causan más de una tercera parte del total de pérdidas económicas por catástrofes naturales y son responsables de dos tercios del total de personas afectadas por desastres naturales. Por otro lado, estudios y análisis han mostrado que la reducción de daños anuales por inundaciones debido al pronóstico han disminuido en un porcentaje de 35%. Los estudios de inundaciones tienen un importante rol en las investigaciones hidrológicas ya que aportan información importante a la planeación ingenieril (Hudson and Colditz, 2003). En el pasado el tema de las inundaciones no había tenido mucho impacto, sin embargo, en la actualidad si lo tiene, debido al crecimiento demográfico y los asentamientos en las márgenes de los ríos.

Estableciendo un sistema de mediciones se puede mejorar la mitigación de desastres dando información para que se puedan tomar acciones apropiadas a tiempo. Esto ha incrementado la importancia de estudiar los modelos de escurrimiento o pronóstico de escurrimiento para así tener una alerta temprana en caso de tormentas y reducir la pérdida de vidas. La precisión de los modelos hidrológicos recae principalmente en la entrada de datos de lluvia que sean precisos y con buena resolución espacial y temporal (Pathirana *et al.*, 2005). Para tener un sistema de alerta en tiempo real se deben tener datos en tiempo real que alimenten el modelo, aunque esto sería lo deseable en muchos casos no está disponible.

El uso de la información hidrométrica local sobre crecientes para calibrar cualquier modelo o método de estimación, es un enfoque confiable y seguro para lograr estimaciones reales (Campos-Aranda, 2008).

Es necesario formular metodologías basadas en un análisis hidrológico que permita estimar los escurrimientos asociados a los usos actuales y futuros del suelo. El presente estudio tiene como objetivo comparar dos metodologías en la relación lluvia escurrimiento usando el modelo HEC-HMS, por un lado con valores empíricos, y por el otro con algunos parámetros generados a partir de mediciones en las fases de pérdidas y transformación de lluvia a escurrimiento de dicho modelo.

5.2. REVISIÓN DE LITERATURA

El conocimiento de la hidrología es necesario para determinar reservas, demandas y suministros de agua, para predecir fenómenos de frecuencia extrema (inundaciones, desbordes, sequías) y para proteger la calidad del agua. La forma de abordar un estudio hidrológico de una región debe ser a través de una cuenca, debido a que esta última constituye la unidad física completa donde la entrada es la precipitación y las salidas son el escurrimiento y el sedimento, incluyendo en el proceso la influencia de vegetación, suelo y topografía. El problema de trabajar a escala de cuencas lo representa la manipulación de grandes volúmenes de información, su análisis y la posterior toma de decisiones. En México, la medición de la cantidad y calidad del agua no es realizada de manera periódica y directa a través de estaciones hidrométricas y de monitoreo, respectivamente. Ante esta circunstancia, una alternativa para evaluar la cantidad y calidad del agua en las cuencas y presas que no cuentan con infraestructura de medición, es el uso de los modelos hidrológicos de simulación, debido a su bajo costo y a la estimación razonable de sus resultados. (Torres-Benítez *et al.*, 2004).

5.2.1. Cálculo del escurrimiento

De acuerdo a Bjerklie *et al.* (2003) y Fekete *et al.* (1999) citados por Roux and Dartus (2006), menos del 60% del escurrimiento continental es monitoreado en su llegada a los océanos, y es menor su estudio dentro de los continentes. Además Borges *et al.* (2008) menciona que para la solución de futuros problemas de inundaciones, la estimación del flujo superficial o escurrimiento y flujo base son unas de las principales tareas en una cuenca hidrológica.

En una cuenca hidrológica, el escurrimiento es la parte de la precipitación que fluye sobre la superficie hacia cuerpos de agua mayores. Antes de que el escurrimiento ocurra, la lluvia debe satisfacer las demandas inmediatas de infiltración, evaporación, intercepción, almacenamiento y/o detención superficial a través de estructuras geológicas (Kurczyn *et al.*, 2007). Villegas *et al.*,(2009) mencionan que el escurrimiento superficial es la porción de lluvia que alcanza la red de drenaje y drena en forma de avenida hacia un punto de desfogue. Dicha proporción depende de factores climáticos, de relieve y edáficos destacando en estos últimos el contenido de humedad en el perfil del suelo. También González –Cervantes *et al.*,

(2006) refieren que el escurrimiento se genera cuando la intensidad de la lluvia sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo, a este proceso, conocido como escurrimiento por excedencia de infiltración, se le asocian otros dos procesos: escurrimiento por saturación, que da origen al escurrimiento una vez que se satura el suelo, y el escurrimiento originado por exfiltración, en manantiales, zonas hidromórfas, otros.

La influencia de la cobertura vegetal es mayor cuando se presentan bajas intensidades de lluvia (30 mm/h), ya sea en suelo seco o húmedo, y disminuye a medida que se incrementa la intensidad de la lluvia (60 y 90 mm/h) (González-Cervantes *et al.*, 2006). De acuerdo a lo anterior el escurrimiento depende fundamentalmente de la estructura de la lluvia (Uijlenhoet and Torres, 2006).

En los últimos años la modelación se ha utilizado ampliamente para tener una mejor predicción de la relación lluvia escurrimiento (Yener *et al.*, 2007). Para ello se reportan diversas metodologías para la evaluación del escurrimiento superficial (Aparicio *et al.*, 2001) con el avance tecnológico de las computadoras y software, como HEC-HMS se han generado modelos hidrológicos que estiman con bastante precisión los procesos involucrados en una cuenca. En cada uno de los modelos, los parámetros internos y externos requeridos tienen sus propias características (Valle *et al.*, 2009). En México, sin embargo, la aplicación de estos modelos hidrológicos es muy limitada por la falta de datos, tanto para calibrarlos, como en su validación (Flores *et al.*, 2003).

La búsqueda de una relación simple entre la precipitación (P) y el escurrimiento (Q) directo ha sido una de las tareas básicas de los modeladores de los procesos hidrológicos en cuencas o en parcelas experimentales (Paz, 2009). El cálculo de los escurrimientos superficiales con la técnica de la curva numérica del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) (1972), usa las tres condiciones de humedad con la finalidad de proporcionar estimaciones más realistas del número de curva, este método es uno de los más ampliamente usados para estimaciones precisas de escurrimiento superficial de cuencas no instrumentadas (Patil *et al.*, 2008).

Una vez que se ha estudiado el régimen de precipitaciones de una cuenca, habiendo obtenido una lluvia de diseño asociada a un determinado periodo de retorno y habiendo estimado las pérdidas con alguno de los modelos disponibles, de manera tal de encontrar la lluvia neta o efectiva, el paso siguiente es transformar esa lluvia efectiva en escorrentía o caudal.

Esta transformación puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos. El más usado es el del hidrograma unitario, introducido por Sherman en los años '30. También es posible la utilización de modelos de depósito y, si el nivel de información es el adecuado, también se pueden usar modelos basados en las ecuaciones del movimiento del fluido, especialmente en zonas urbanas (Nania, 2003).

5.2.2. Descripción del Modelo HMS

El escurrimiento es una de las variables hidrológicas más importantes usada en la mayoría de las aplicaciones del recurso agua. Es difícil obtener predicciones confiables de la distribución espacial del escurrimiento y su alcance de arroyos y ríos, consumiéndose mucho tiempo en obtener información para cuencas no instrumentadas. La carencia de información topográfica de alta resolución e información hidrológica hace necesaria la aplicación de modelos (Chen *et al.*, 2009), los cuales junto con la Percepción Remota (PR) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden aumentar la aplicación de los métodos convencionales usados en los estudios del proceso lluvia escurrimiento. Esas técnicas pueden ser usadas para estimar la variación espacial de los parámetros hidrológicos, que son útiles como entradas de los modelos lluvia escurrimiento (Khalidou *et al.*, 1995), los cuales se han venido convirtiendo en una herramienta indispensable para la estimación de hidrogramas de flujo (Tan *et al.*, 2005).

La aplicación de tecnologías computacionales para analizar el proceso lluvia escurrimiento y la hidráulica de los ríos se ha expandido en los últimos años. Un gran número de programas para propósitos especiales y algunos otros diseñados para aplicaciones generales han sido desarrollados y aplicados a problemas ingenieriles de la hidrología. El centro de Ingenieros Hidrológicos (HEC, por sus siglas en inglés) ha desarrollado varios programas de computadora generalizados para el uso del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos en el análisis de problemas de hidrología.

La extensión geoespacial para modelación hidrológica (HEC-GeoHMS) usa ArcGIS y Análisis Espacial para desarrollar diversas entradas de modelos hidrológicos. Analizando la información terrestre, HEC-GeoHMS transforma la red de drenaje y los límites de la cuenca

en una estructura hidrológica que representa la respuesta de la cuenca a la precipitación. El modelo lluvia escurrimiento se desarrolla usando HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) y se importan los datos de HEC-geoHMS. Este modelo fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de EU, fue desarrollado para simular el proceso lluvia–escurrimiento en cuencas (USACE, 2005). La representación física de la cuenca se logra con un modelo. Los elementos hidrológicos son conectados en una red para simular el proceso de escurrimiento. Una variedad de métodos están disponibles para simular perdidas por infiltración, transformar precipitación en exceso en escurrimiento, cálculo de contribuciones de flujo base, entre otros (venkatesh, 2007). El gasto a la salida de la cuenca es calculado sustrayendo las pérdidas a los datos de lluvia, luego se transforma la precipitación en exceso y se adiciona el flujo base.

Los métodos que integran el modelo están conformados por una serie de parámetros. Para introducir algunos de estos parámetros es necesario de observaciones o mediciones en la cuenca, sin embargo algunos otros no se pueden simular por simples observaciones o mediciones, para ello es necesario calibrar el modelo (Yener *et al.*, 2007).

En un estudio de verificación de HEC-HMS, Rojas (2005), encontró que el modelo simula satisfactoriamente los eventos medidos, siempre y cuando la información suministrada sea la correcta.

5.2.3. Aplicación de los SIG en la modelación hidrológica

La tecnología geoespacial tiene aplicaciones en diversos campos de investigación, en los estudios ambientales y más precisamente en la hidrología. Mediante las imágenes satelitales se pueden cubrir grandes áreas y obtener información sobre los rasgos terrestres de interés

En el estudio de las relaciones lluvia escurrimiento es fundamental el uso de las diferentes técnicas y disciplinas de la geomática para caracterizar espacial y temporalmente la dinámica del fenómeno físico, con la finalidad de generar un conocimiento útil en la planificación y prevención de los fenómenos climáticos extremos.

Anteriormente al amplio desarrollo de los satélites artificiales proliferó el uso de la fotografía aérea como una técnica de percepción remota, sin embargo después de la segunda guerra mundial y el uso de sistemas de posicionamiento global se comenzó con la era espacial y con ello comenzó un gran auge en la percepción remota.

La técnica de percepción remota para el estudio del medio ambiente se ha extendido ampliamente y ha diversificado su aplicación, en el manejo de cuencas es útil para determinar los usos de suelo, un parámetro necesario para la aplicación de modelos empíricos paramétricos para determinar las relaciones lluvia escurrimiento.

Actualmente se están generando y probando metodologías para el estudio del territorio Mexicano ya que la aplicación de los sensores remotos está en mejora continuamente.

El conocimiento del uso del suelo es una base necesaria para la planeación y manejo de los recursos naturales como la vegetación y el suelo. En el pasado fue muy común el uso de fotografías aéreas para el estudio del impacto de los cambios en el ambiente, pero en la actualidad con el desarrollo de la percepción remota se han desarrollado métodos basados en interpretación de imágenes de sensores remotos con la ayuda de las computadoras que permiten tener mayor certeza y ahorro de tiempo en el procesamiento para la generación de mapas.

Una de las ventajas de los sensores remotos es la constante toma de datos de la superficie terrestre, es decir, juegan un importante papel de monitoreo que permite estudiar temporalmente los procesos de cambios de uso de suelo que ocurren en la superficie terrestre. En este trabajo se eligió la imagen Spot V porque es la que ofrece los índices de vegetación necesarios, además de su buena resolución espacial, sus sensores detectan con precisión el espectro electromagnético que refleja la vegetación.

5.2.3.1. Percepción remota

Se define como la ciencia para obtener información sobre los objetos sobre la superficie terrestre a partir de imágenes satelitales o aéreas usando la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie en una o más regiones del espectro electromagnético.

La percepción remota ha sido dirigida en su mayoría al estudio de los recursos naturales, esta ciencia se apoya en el registro del espectro electromagnético teniendo varias aplicaciones. El sensor Landsat TM 5 tiene 7 bandas cada una de ellas registra cierta longitud de onda que pueden servir para diferentes propósitos, la banda 1 se usa para estudios hidrológicos y mapeo de costas, la banda 2 para estudios de vegetación sana y su vigor, la banda 3 para clasificación de vegetación y estudios de clorofila, la banda 4 para el contenido de biomasa y cuerpos de agua, la banda 5 para contenidos de humedad, nieve y

nubes, la banda 6 para estudios vulcanológicos y de contaminación, la banda 7 para estudios de fisiografía del terreno.

Una de las limitantes de la tecnología de los sensores remotos es el nivel de precisión al realizar estudios a detalle, ya que los sensores Landsat ofrecen una resolución espacial de 28.5 metros, los Spot de 2.5 m, los Quickbird 1 m y entre mayor sea la escala mayor es el costo de las matrices de datos, así para poder tener mejores precisiones al usar esta tecnología, es necesaria la aplicación de procesos de corrección y mejora de las matrices de datos con el fin de obtener una mejor precisión de la interpretación digital de ellas.

Se han realizado diferentes estudios con la aplicación de los sensores remotos teniendo en cuenta la respuesta espectral de los objetos de interés. Jefferson *et al.* (1992) realizaron una clasificación de uso de suelo y vegetación utilizando la combinación de bandas Landsat y Spot procesadas con ArcGIS las cuales proporcionaron información de la cubierta vegetal del 80% de precisión o superior.

Algunas otras técnicas utilizadas para mejorar las bandas han sido la utilización de filtros o realces, Bradbury *et al.* (1988) realizaron una clasificación de uso de suelo obteniendo una precisión del 62% al aplicar el algoritmo de máxima verosimilitud, algunas categorías fueron clasificadas con mayor precisión que otras, como el bosque con un 92% y los pastizales con una precisión del 43%.

El programa para la obtención de imágenes Spot presenta un desarrollo prometedor dentro de los actuales proyectos de percepción remota, esto debido a la versatilidad para obtener matrices de datos del pancromático y multibanda, así como a sus respectivas precisiones espaciales, así también a su capacidad de variación del ángulo de observación.

Manière *et al.* (1991) realizaron una comparación de las aportaciones del sensor Landsat TM y Spot aplicados a los inventarios forestales, en su trabajo se definieron cuatro correlaciones lineales entre las bandas de los dos tipos de sensores. La combinación de las bandas 2-3-4 del Landsat TM tuvo una precisión de 61.5%, para ese mismo sensor la combinación de las bandas 3-4-5 encontraron un 68.1%, en el sensor Spot XS en la combinación de las bandas 1-2-3 encontraron un 69.4% y en la combinación de Spot XS 1-2 y Landsat TM 5 un 84.4%. Por ese estudio se pudo encontrar la utilización de la banda 5 del Landsat TM. También encontraron que en la combinación de bandas de Landsat Tm y Spot HRV, que tienen buenas

cualidades espectrales y espaciales, tienen un resultado final de pixeles bien clasificados del 97% en montes altos y un 96% en montes bajos.

Para obtener mejores resultados algunos autores prefieren aplicar procesos previos a la clasificación como Knippers (1992) quien realizó dos pre-procesos a las imágenes encontrando una precisión de 64.5% para el método del vecino más cercano y de 59.2% al aplicar el método de máxima verosimilitud.

5.3. MATERIALES Y MÉTODOS

5.3.1. Área de estudio

La cuenca del Río Coatán se encuentra localizada en la zona costera del Estado de Chiapas (figura 4.1) y forma parte, en su mayor extensión territorial, del municipio de Tapachula, y en menor proporción de los municipios de Motozintla, Cacaohatán, y Mazatán.

La cuenca del Río Coatán con un área aproximada de 432 km² hasta la estación de aforo Malpaso es una cuenca fronteriza por lo que 260 km² son de lado Gutemalteco y 172 km² de lado Mexicano, forma parte de la Región Hidrológica No 23, que constituye una unidad muy homogénea, llamada Costa de Chiapas. La región hidrológica No 23, es la que queda más al Sur del país, sobre la vertiente del Pacífico. Tiene la forma de una faja alargada de anchura variable orientada de SE a NW. Abarca desde los 14° 30' a los 16°30' de latitud Norte y desde los 92°04' a los 94° 19' de longitud Oeste.

Hidrográficamente está limitada hacia el noroeste por la región hidrológica No 22, hacia el Noreste con varios afluentes izquierdos del Río Grijalva, todos ellos pertenecientes a la Región Hidrológica No 30; hacia el Sureste con corrientes pertenecientes a Guatemala, colindantes con el Río Suchiate y hacia el suroeste con el Océano Pacífico.

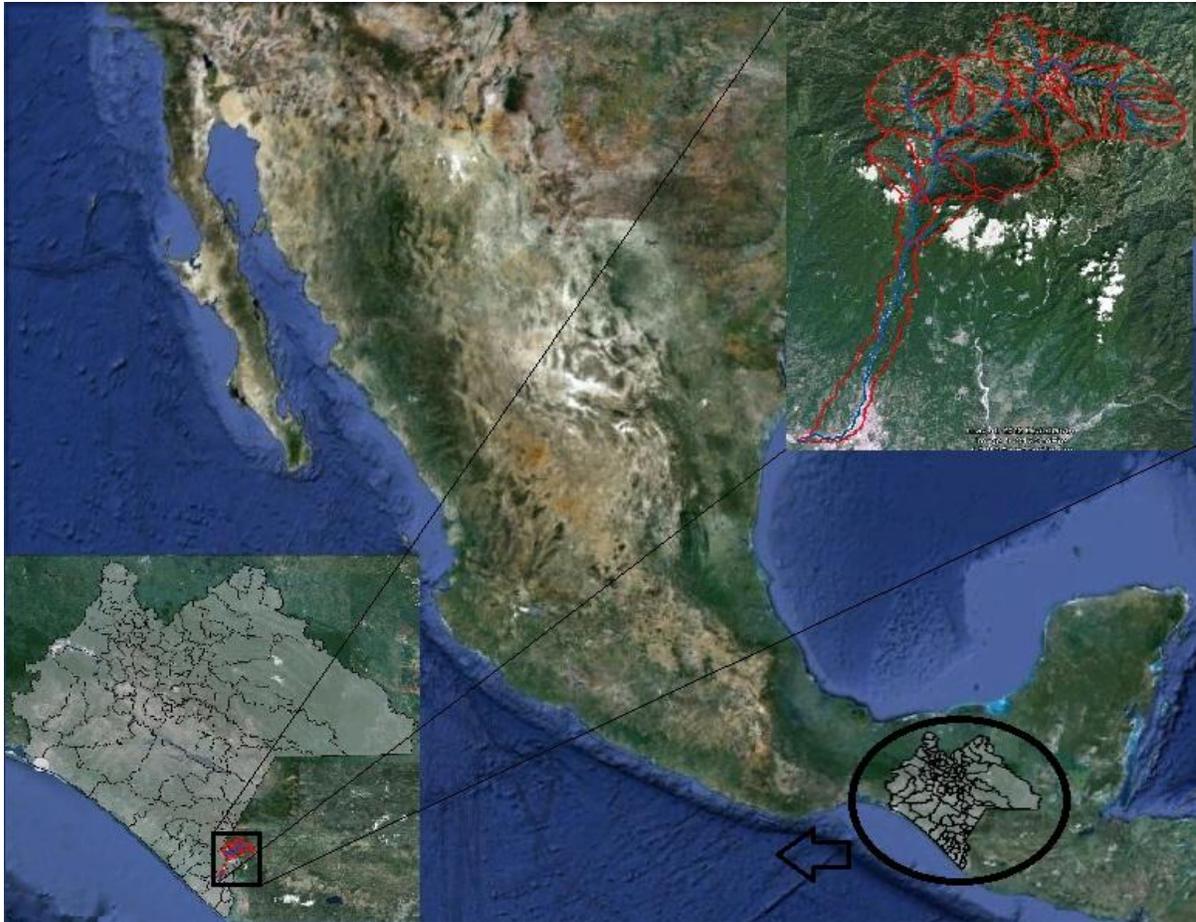


Figura 5.1. Localización geográfica de la cuenca del Río Coatán.

El cauce principal de la cuenca tiene una longitud de 61.138 km con un desnivel de 2700 m. La precipitación media anual varía entre 4500 y 5000 mm, concentrando valores más grandes en la parte baja de la cuenca. El tiempo de concentración de la cuenca es de aproximadamente 5.6 horas y la pendiente media ponderada de la cuenca es de 47%, en el anexo A.1 se muestra el mapa de pendiente. El cauce principal tiene pendiente media de 0.052. Los usos de suelo que predominan en el lado Mexicano es bosque y selva en cambio en el lado Guatemalteco predominan los pastizales.

La textura predominante es de media a gruesa ya que los análisis de la CONAGUA, 2011, encontraron migajón en la parte baja, media y alta de la cuenca.

5.3.2. Datos

Para correr el modelo HMS se eligieron dos eventos de lluvia, del 3 al 6 de octubre de 2005 y del 11 al 14 de octubre de 2011. En la simulación del modelo conviene usar eventos extremos por lo que se eligieron dos eventos con registro completo de pluviograma. En el primer periodo se utilizó la precipitación en 24 horas de tres estaciones cercanas a la cuenca, donde se utilizaron los patrones de distribución de las estaciones UNACH y Argovia debido a que no se tenía en ese periodo ningún pluviógrafo en las estaciones dentro de la cuenca. En el evento del 2011 se obtuvieron los hietogramas de los registros de cuatro pluviógrafos ubicados dentro de la cuenca, en el cuadro 5.1. se muestran las coordenadas de tales estaciones y la precipitación total del 11 al 14 de octubre de 2011.

Cuadro 5.1. Localización de los pluviógrafos dentro de la cuenca

Pluviógrafo	Latitud (° ‘ ‘’)	Longitud (° ‘ ‘’)	Elevación (msnm)	Precipitación (mm)
Vega de los Gatos	15° 01’ 44’’	92° 13’ 55’’	471	73.7
Chanjalé	15° 12’ 35’’	92° 11’ 45’’	1473	91.6
Progreso	15° 45’ 05 ‘ ‘	92° 11’ 46’’	944.5	84.4
Buena vista	15° 12’ 38’’	92° 11’ 08’’	2419	104.2

La precipitación total del 3 al 6 de octubre de 2005 se obtuvo del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III,) para las tres estaciones cercanas a la cuenca, sus coordenadas se muestran en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Precipitación total del 3 al 6 de octubre de 2005 de las estaciones dentro de la cuenca

Clave Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Precipitación(mm)
007191	Malpaso	14.99	-92.24	799
007057	Chicharras	15.13	-92.24	674
007146	San Jerónimo	15.04	-92.14	972

Se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) generado por la UNAM (Anexo A.2) con una resolución espacial de 20 metros, fue utilizado por Geo HMS como materia prima para el preproceso de la cuenca.

Como ya se ha mencionado en capítulos 3 y 4 la información lluvia escurrimiento necesaria para generar los números de curva y los coeficientes del hidrograma de Snyder se obtuvo del monitoreo de procesos hidrológicos que la CONAGUA (2011) lleva a cabo en la región en colaboración con la Universidad Autónoma Chapingo.

Para encontrar los números de curva se requirió tener los usos de suelo que se obtuvieron mediante la clasificación de las imágenes de satélite Spot V del año 2005 (Anexo A.3) que a su vez se realizó por medio del algoritmo de clasificación no supervisada para la discriminación de clases.

La textura del suelo se obtuvo de muestras tomadas en los sitios de monitoreo, se analizaron en laboratorio para obtener la textura utilizada para definir el grupo hidrológico necesario para utilizar las tablas del Número de Curva (NC).

El modelo es una integración de HEC-HMS y HEC Geo HMS en un ambiente de GIS. Un gran número de estudios han mostrado que esos modelos generan resultados útiles y precisos (Knebl *et al.*, 2005). Por un lado Geo HMS se anidó en ArcGIS 9.3 donde se realizó el preproceso que en general es la preparación del modelo de cuenca (Anexo A.4) el cual se exporta desde esa plataforma para poder ser importado en HEC-HMS 3.5.

5.3.3. Uso de suelo

Como material de apoyo para la obtención de uso de suelo se emplearon imágenes Spot V del año 2005 del mes de noviembre, cuentan con cinco bandas espectrales con una resolución espacial de 10 metros.

La clasificación, se divide en dos tipos; la supervisada y la no supervisada, en la primera cada pixel es asignado a una clase nominal y las muestras son seleccionadas en áreas homogéneas de la imagen de acuerdo a la experiencia y conocimiento que se tenga del lugar, auxiliándose también de fotografías aéreas y de trabajo de reconocimiento en campo. En la clasificación no supervisada se carece de información de campo, así que los algoritmos agrupan los pixeles en clases de acuerdo a criterios estadísticos de vecindad. En este trabajo

se utilizó la clasificación no supervisada apoyándose con recorridos de campo para así poder definir las clases de usos de suelo.

Los pixeles de entrenamiento deben ser sitios dentro de la imagen que sean representativos de la clase de interés, es decir, el ambiente circundante debe de ser lo más homogéneo posible. Los pixeles deben ser seleccionados antes de la clasificación (Jensen, 1996).

Según Jensen y Toll (1982) la gráfica de elipses en dos dimensiones provee muy buena información visual de la separabilidad entre clases. Para la construcción de estas gráficas se usa la media y la desviación estándar de cada clase.

Existen varios algoritmos de clasificación para asignar pixeles a alguna clase, estos algoritmos difieren en el criterio usado para definir los límites de decisión (ITT, 2008). La decisión para asignar un determinado pixel a una clase depende de las reglas del algoritmo. Los algoritmos paramétricos asumen que la clasificación de los pixeles está basada en una naturaleza Gaussiana, es decir asume una distribución normal, en cambio los algoritmos no paramétricos no hacen esa asunción.

El algoritmo de Mínima Distancia es muy sencillo computacionalmente por sus reglas de decisión. Usándose apropiadamente puede arrojar resultados tan buenos como el algoritmo del paralelepípedo o el del vecino más parecido. El algoritmo solo requiere que el usuario introduzca el vector medio de cada clase μ_{ck} en cada banda como muestras de entrenamiento, para hacer la clasificación el programa calcula la distancia entre cada vector medio con cada pixel desconocido BV_{ijk} (Jahne, 1991). Esta distancia euclidiana se calcula con el teorema de Pitágoras.

$$Dist = \sqrt{(BV_{ijk} - \mu_{ck})^2 + (BV_{ijl} - \mu_{cl})^2} \quad (5.1)$$

Donde μ_{cl} y μ_{ck} representan los vectores medios de la clase c medidos en las bandas k y l.

En este trabajo se utilizó el algoritmo Máxima verosimilitud como regla de decisión para la clasificación de las imágenes.

Este algoritmo se basa en que las muestras de cada clase y cada banda son normalmente distribuidas, así que la regla de decisión para un pixel X desconocido es:

Asignar X a la clase c solo si;

$p_c \geq p_i$, Donde $i= 1, 2, 3, \dots, m$ posibles clases

$$y p_c = \{-0.5 \log_e [\det(V_c)]\} - [0.5(X - M_c)^T V_c^{-1} (X - M_c)] \quad (5.2)$$

Donde M_c es el vector medio de clase, V_c es la matriz de covarianza y $\det(V_c)$ es el determinante de la matriz de covarianza V_c .

Así, para asignar el vector X de un pixel desconocido dentro de una clase, la regla de decisión calcula el valor de P_c para cada clase, luego el pixel es asignado a la clase que tiene valor más grande de probabilidad (ITT, 2008).

5.3.4. Componentes del Modelo HEC-HMS

Una de las principales ventajas al usar GIS para manejo de cuencas es su potencial para análisis espacial y la estimación con algebra de mapas. El conocimiento de las características de la cuenca como la distribución temporal y espacial de los flujos y la distribución de la precipitación son muy importantes para establecer un modelo hidrológico.

Con el Modelo digital de elevación con una resolución espacial de 20 m se trabajó con la extensión Geo HMS anidada en ArcGIS 9.3 donde se generaron los archivos de entrada de HMS que son; red de drenaje, subcuencas, y la conectividad de los elementos hidrológicos. A través de una serie de pasos conocidos como pre-procesamiento del terreno y procesamiento de la cuenca. La representación física de las cuencas y los ríos se configuró en el modelo de la cuenca. Los elementos hidrológicos se conectaron en una red para simular el proceso de escurrimiento. La cuenca se dividió en subcuencas (Anexo A.5) para representar los tributarios del Río Coatán.

El Número de Curva NC del SCS se usó para predecir las propiedades del escurrimiento basándose en el grupo hidrológico de suelo y cobertura del suelo. El NC se obtuvo por un lado de tablas y por otro se calculó según lo descrito en el capítulo 3 y posteriormente se extrapoló a todas las subcuencas de acuerdo al uso de suelo, usando para ello un proceso de análisis espacial (Anexo A.6).

El tiempo de retraso se obtuvo para cada subcuenca calculando el 60 % del tiempo de concentración, se obtuvo según la metodología del SCS. También se calculó usando la ecuación de Snyder con el coeficiente para el tiempo de retraso identificado en el capítulo 3.

El escurrimiento directo se obtuvo interpretando los limnigrámas registrados a la salida de las microcuencas instrumentadas.

El flujo base es un parámetro importante en estudios de escurrimientos por que define el tirante sobre el cual se acumula el escurrimiento adicional. Los modelos que desprecien el flujo base pueden subestimar los niveles del agua y por lo tanto fallar al identificar los niveles de inundación (Knebl *et al.*, 2005). En este estudio se usaron los valores mensuales de escurrimiento reportados por la CONAGUA en BANDAS para calcular el flujo base medio mensual.

Para el modelo del flujo en el río (modelo de Tránsito) se realizó con el método de Muskingun que depende de dos parámetros, el almacenamiento en cuña x y k .

El método del hidrograma unitario del SCS requiere como entrada el tiempo de retraso, y es tomado como 0.6 del tiempo de concentración (USACE, 2005). El tiempo de concentración se calcula usando alguna de las ecuaciones ya sea de Kirpich, Kerby, Onda cinemática, Federal Aviation Agency o Bransby Williams, en este trabajo se utilizó el método del SCS donde se usa el NC como parámetro calculado. En el cuadro 5.3 se muestran los parámetros con los que se alimentó el modelo y algunas características de las subcuencas.

Por otro lado se usó el hidrograma de Snyder como método de transformación donde se utilizaron los coeficientes estudiados en el capítulo 3 para obtener los parámetros de tiempo de retardo y coeficiente al pico requeridos por el modelo. Que fueron extrapolados dividiendo la cuenca en zona baja de 300 a 900 msnm, media de 900 a 1500 msnm, y alta para elevaciones de más de 1500 msnm.

Cuadro 5.3. Parámetros de las subcuencas y números de curva de escurrimiento.

ID	Nombre	Área (km ²)	Pendiente (%)	L cauce (km)	CN Tablas	CN calculado	Tc_SCS (min)	Tlag_SCS (min)	Tlag Snyder (h)
1	W320	23.3	35.7	5.3	84.9	72.3	6.5	3.9	1.0
2	W330	9.7	37.9	0.5	83.2	70.1	1.0	0.6	0.2
3	W340	12.3	39.4	3.4	84.3	71.4	4.4	2.7	0.8
4	W350	4.0	27.3	1.4	87.8	77.3	2.2	1.3	0.5
5	W360	3.1	27.4	2.1	88.4	78.1	3.0	1.8	0.6
6	W370	10.8	37.2	3.8	85.2	74.5	4.6	2.8	0.8

7	W380	16.6	46.4	3.7	72.7	63.9	5.4	3.2	0.8
8	W390	12.4	33.7	2.2	83.0	71.2	3.5	2.1	0.6
9	W400	24.7	47.7	3.0	81.9	71.6	3.7	2.2	0.7
10	W410	24.9	33.9	5.8	83.7	72.8	7.1	4.3	1.1
11	W420	10.1	55.9	2.6	82.1	72.7	3.0	1.8	0.7
12	W430	12.5	32.6	2.6	85.5	73.9	3.7	2.2	0.6
13	W440	14.1	49.8	3.2	82.0	71.9	3.7	2.2	0.7
14	W450	17.8	36.4	4.0	83.0	73.3	5.0	3.0	0.8
15	W460	22.7	63.4	6.0	83.9	74.0	5.2	3.1	1.1
16	W470	17.8	54.7	5.3	83.8	73.2	5.2	3.1	1.0
17	W480	9.6	36.4	2.1	87.1	76.4	2.7	1.6	0.6
18	W490	7.5	60.0	0.7	88.2	77.3	0.9	0.5	0.3
19	W500	10.6	67.1	3.3	86.0	75.4	3.0	1.8	0.8
20	W510	15.9	37.0	4.8	86.2	75.3	5.5	3.3	0.9
21	W520	9.0	66.0	3.0	86.3	75.1	2.8	1.7	0.7
22	W530	44.7	54.2	11.6	81.3	71.7	10.1	6.1	1.6
23	W540	0.3	64.7	0.8	86.3	77.6	0.9	0.5	0.3
24	W550	7.8	50.5	1.2	80.1	71.3	1.7	1.0	0.4
25	W560	16.8	68.5	4.9	82.6	73.3	4.3	2.6	0.9
26	W570	14.7	62.7	3.9	84.3	73.9	3.7	2.2	0.8
27	W580	1.3	58.8	1.2	85.2	75.9	1.4	0.9	0.4
28	W590	7.2	59.6	0.5	84.4	74.0	0.7	0.4	0.2
29	W600	14.2	51.6	5.8	79.2	69.6	6.3	3.8	1.1
30	W610	11.7	57.1	4.6	79.8	70.1	4.9	2.9	0.9
31	W620	24.0	25.2	12.8	80.7	70.8	16.4	9.9	1.7

5.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación de las imágenes se realizó en el software Erdas 9.1 y posteriormente en ArcGis 9.3 mediante el análisis espacial se obtuvieron los porcentajes de cada uso de suelo por subcuenca (cuadro 5.4), se encontraron 6 usos de suelo. En el lado guatemalteco predomina el Pastizal y vegetación secundaria, esto se debe a que la parte alta, que es donde predomina este uso, se ha dado un proceso acelerado de deforestación llevando a un cambio de uso de bosque a zonas de cultivo que al abandonarlas se convierte en pastizal y vegetación secundaria. El bosque predomina en la parte media alta de la cuenca que está

comprendida entre México y Guatemala, en cambio del lado mexicano predomina la selva en la parte baja de la cuenca, para mejor apreciación del uso de suelo ver anexo A.7.

El porcentaje no clasificado (1.3%) se debe a que hay una parte de la cuenca que no se cubre con las imágenes de satélite utilizadas.

Cuadro 5.4. Porcentajes de uso de suelo en las subcuencas del Río Coatlán.

Sub-Cuenca	No Clasificado	Suelo Desnudo	Cuerpos de agua	Pastizal y vegetación secundaria	Selva mediana caducifolia	Bosque muy húmedo montano alto	Bosque muy húmedo montano
W320	1.5	4.1	0.2	67.1	13.0	13.5	0.6
W330	1.4	4.6	0.1	58.8	22.1	12.5	0.4
W340	1.1	4.4	0.1	63.1	15.8	14.7	0.8
W350	0.0	11.2	1.5	56.6	8.6	19.8	2.2
W360	0.0	17.2	3.0	51.2	10.1	16.9	1.7
W370	0.0	6.6	2.3	46.4	14.7	25.0	5.1
W380	15.9	7.5	1.3	42.7	13.0	15.5	4.2
W390	3.2	4.3	0.4	58.9	15.6	17.0	0.7
W400	2.2	7.5	0.9	33.4	29.4	21.2	5.3
W410	0.1	3.0	1.1	46.2	10.5	32.3	6.8
W420	0.1	4.4	1.5	25.6	17.1	35.1	16.1
W430	0.2	3.6	0.6	58.8	13.8	22.0	1.0
W440	0.0	5.3	1.6	27.9	18.1	32.3	14.7
W450	0.4	5.7	1.6	33.7	10.0	33.6	15.0
W460	0.0	8.3	2.0	34.3	13.2	26.2	16.0
W470	0.4	8.5	1.5	36.5	27.0	20.3	5.7
W480	0.7	3.3	0.6	66.7	8.3	18.8	1.7
W490	0.0	12.4	1.3	60.5	11.1	13.7	1.1
W500	0.0	14.1	2.0	43.9	10.3	20.2	9.5
W510	0.9	4.6	0.7	61.8	8.8	22.1	1.2
W520	0.0	9.5	1.7	51.2	22.8	12.3	2.4
W530	0.5	4.9	1.9	22.5	21.4	30.6	18.2
W540	0.0	9.6	8.7	30.4	24.5	22.0	4.8
W550	1.1	2.6	2.8	15.5	23.0	35.2	19.9
W560	0.0	3.4	2.9	24.3	28.7	23.8	16.9
W570	0.4	8.7	1.8	35.4	33.3	17.0	3.3
W580	0.0	5.1	2.9	34.6	33.0	17.6	6.8
W590	0.9	9.0	1.2	40.8	23.4	22.3	2.3
W600	4.9	3.2	1.4	24.1	53.1	8.7	4.6
W610	2.7	1.0	0.3	21.5	50.6	15.6	8.3
W620	1.5	6.3	3.7	8.7	70.5	8.1	1.3

Los usos de suelo encontrados son: bosque muy húmedo montano alto subtropical 20.8%, bosque muy húmedo montano subtropical 6.4%, selva mediana caducifolia 21.8%, pastizales y vegetación secundaria 41.4%, suelos desnudos 6.6% y cuerpos de agua 1.7%.

Se analizaron dos eventos de lluvia, en cada evento se corrió de dos formas el modelo, primero como si se tratara de una cuenca no instrumentada y luego se modeló utilizando datos de monitoreo en cuatro sitios distribuidos en la cuenca que cuentan con instrumentación, por lo que se corrió el modelo HMS de acuerdo a los escenarios que se muestran en el cuadro 5.5, se estudiaron dos eventos de mayor intensidad (04 de octubre de 2005 y 11 de octubre de 2011), se modificaron los parámetros de transformación lluvia escurrimiento y la fase de perdidas, por un lado como si se tratara de una cuenca no instrumentada y por el otro usando métodos que requieren parámetros estimados necesariamente a partir de mediciones.

Cuadro 5.5. Escenarios estudiados con el modelo HMS en la cuenca del Río Coatán.

Escenario	Fecha	Transformación	Pérdidas
Run 1	11 oct 2011	Hidrograma de Snyder	CN calculado
Run 2	11 oct 2011	Hidrograma Triangular	CN de tablas
Run 3	4 oct 2005	Hidrograma de Snyder	CN calculado
Run 4	4 oct 2005	Hidrograma Triangular	CN de tablas

Los hietogramas de la tormenta del 11 de octubre de 2011 se muestran en la figura 5.2-5.5, se obtuvieron a partir de la interpretación de pluviogramas y se discretizaron cada 30 minutos con lo que se alimentó el modelo.

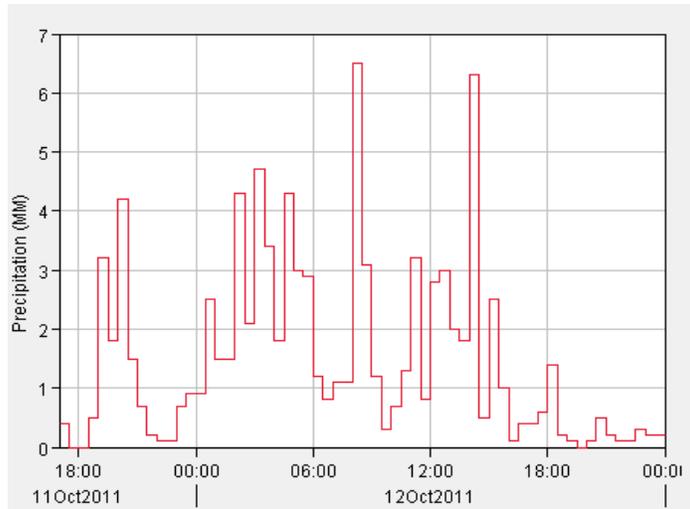


Figura 5.2. Hietograma del 11 de octubre de 2011 de la estación Buena Vista.

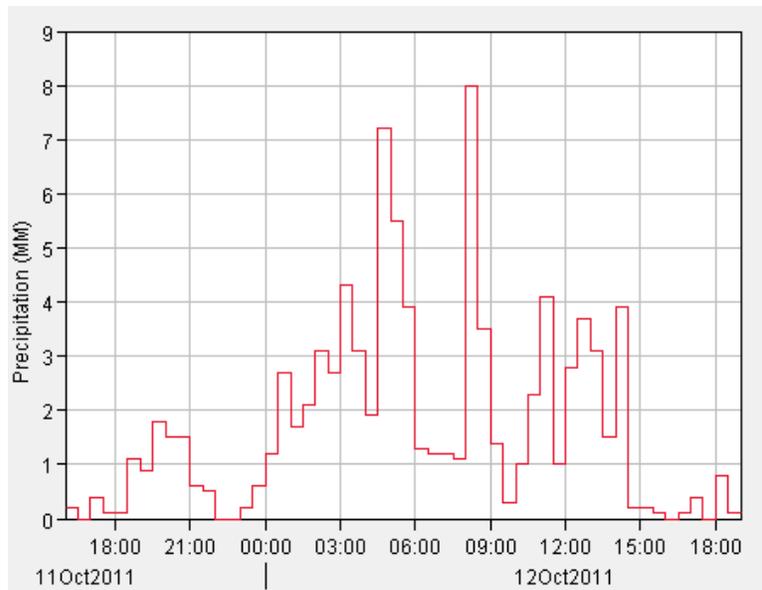


Figura 5.3. Hietograma del 11 de octubre de 2011 de la estación Chanjalé.

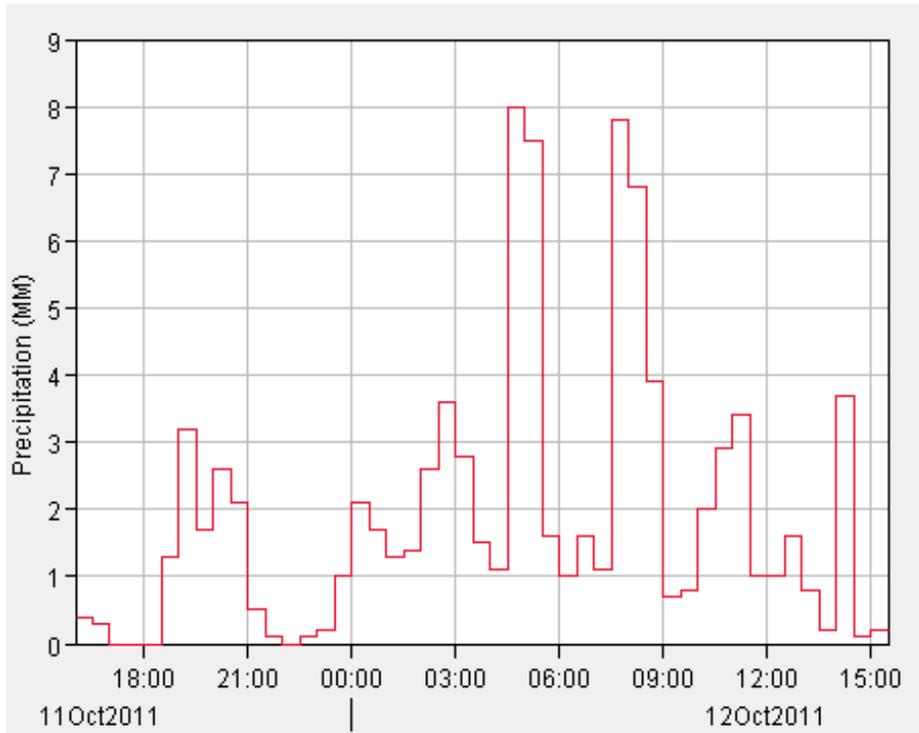


Figura 5.4. Hietograma del 11 de octubre de 2011 de la estación Progreso.

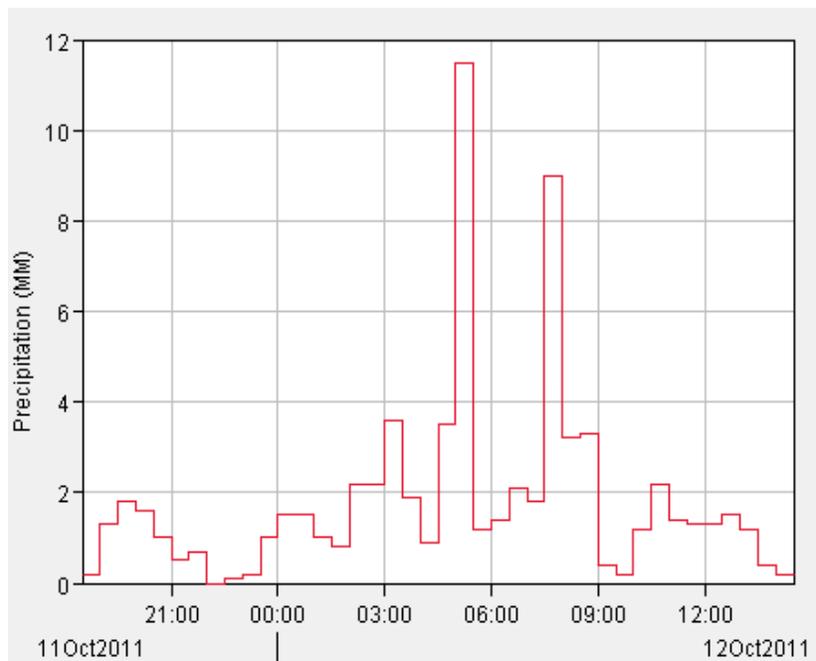


Figura 5.5. Hietograma del 11 de octubre de 2011 de la estación Vega de los gatos.

En el evento del 04 de octubre de 2005 se utilizó el patrón de distribución de las estaciones más cercanas a la cuenca dado que en ese año no se tenían pluviógrafos dentro de ella. Los hietogramas de las tres estaciones (Chicharras, Malpaso y San Jerónimo) son los que se muestran en las Figuras 5.6-5.8, para obtenerlos se utilizó el patrón de distribución de las estaciones UNACH y Argovia y se discretizaron cada 30 minutos para alimentar el modelo.

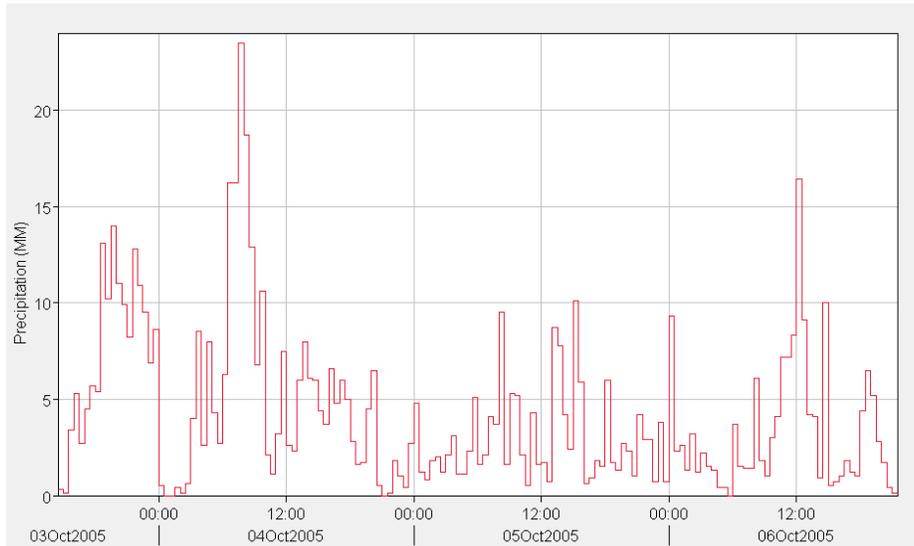


Figura 5.6. Hietograma del 4 de octubre de 2005 de la estación Chicharras con el patrón de distribución de la estación Argovia.

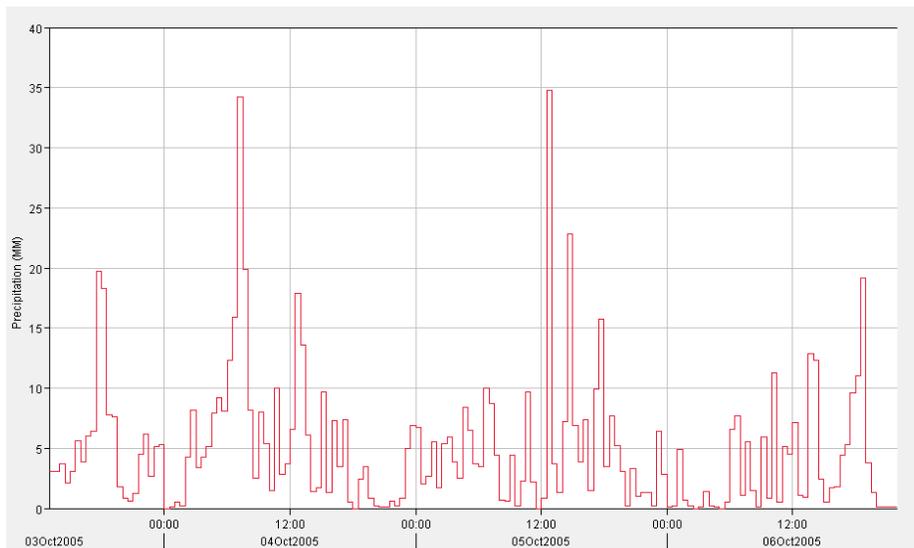


Figura 5.7. Hietograma del 4 de octubre de 2005 de la estación Malpaso con el patrón de distribución de la estación UNACH.

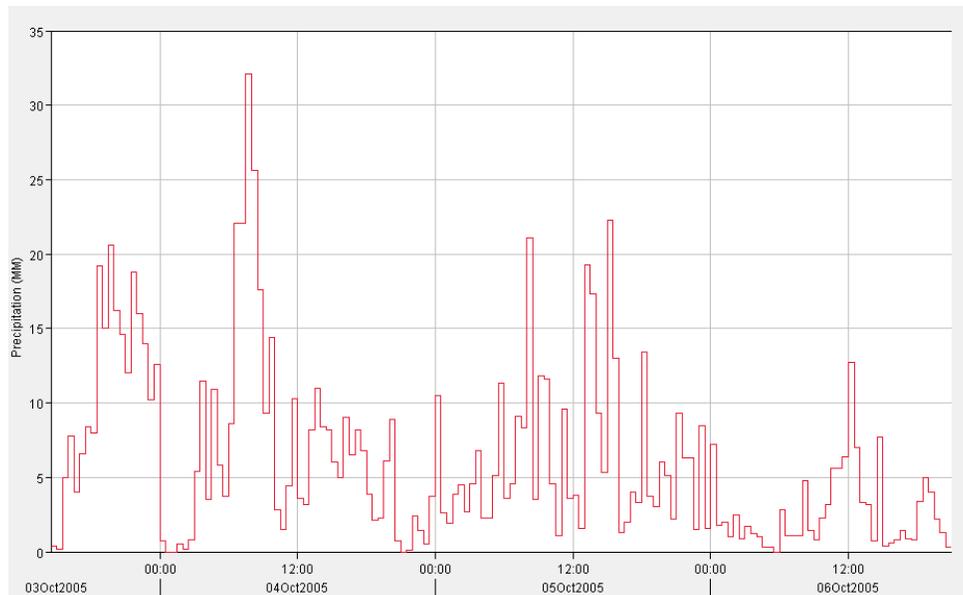


Figura 5.8. Hietograma del 4 de octubre de 2005 de la estación San Jerónimo con el patrón de distribución de la estación Argovia.

En un estudio de esta naturaleza lo deseable es calibrar el modelo, ya que la disponibilidad de información así lo permite, tomando en cuenta que en ninguna cuenca en México se hacen mediciones en microcuencas como las que se realizan en la Costa de Chiapas. Sin embargo, para poder calibrar es necesario tener una referencia confiable de mediciones hidrométricas a la salida de la cuenca a detalle lo cual es difícil o imposible dado que las mediciones de caudal a la salida de la cuenca en la costa de Chiapas solo se están realizando cuando hay pronóstico de eventos meteorológicos extremos, pero en ocasiones no hay registros como el 4 de octubre de 2005 donde sólo se realizó una medición.

Para calibrar el modelo HMS de tipo evento, como en este caso, se requiere de manera simultánea de información detallada de pluviógrafos y aforos de caudal a la salida de la cuenca con incrementos de tiempo entre 10 y 30 minutos. En este trabajo donde se modelaron dos eventos, uno de octubre de 2005 y otro de octubre de 2011, no se contó con información detallada de aforos a la salida.

HMS mostró alta sensibilidad al parámetro de número de curva, aun así este parámetro no se calibro en ninguno de los escenarios. Esa sensibilidad se puede corroborar en el contraste al correr el modelo con los NC de tablas y por el otro lado con este mismo parámetro estimado a partir de las mediciones.

El tránsito por los cauces se realizó con el método de Muskingum en los cuatro casos usando valores recomendados en la literatura. El parámetro de almacenamiento X se propuso de 0.2, como una media recomendada por Aparicio (2006) donde no se tienen mediciones a la entrada y a la salida de la corriente. El parámetro k se estimó usando una formula empírica que está en función de la velocidad media del cauce.

Se agregó el flujo base en la subcuenca de salida, esto en el escenario 2011 (Figura 5.2 y 5.3), para ello se utilizaron promedios mensuales que se obtuvieron de las mediciones que la CONAGUA realiza en la estación de aforo MALPASO II estas mediciones se toman cada 24 horas.

El caudal máximo obtenido por HMS es superior al que probablemente realmente se obtuvo en los cuatro escenarios, para saber si la rama ascendente y descendente están anticipada y/o desplazada en el tiempo es necesario tener el hidrograma medido a la salida por lo menos cada dos horas. En el cuadro 5.6 se muestran los flujos máximos por subcuenca obtenidos con el modelo.

Cuadro 5.6. Gastos máximos por subcuenca en los cuatro escenarios

Subcuenca	Área (km ²)	Run 1 Qp(m ³ /s)	Run 2 Qp(m ³ /s)	Run 3 Qp(m ³ /s)	Run 3 Qp(m ³ /s)
W620	24.0084	27.4	72.8	220.7	376.1
W610	11.7348	12.9	31	131	179.4
W600	14.1644	14.2	36.6	152.5	215.7
W590	7.2228	15.7	21.3	98.6	113.3
W580	1.2736	2.8	3.8	17.6	20.1
W570	14.6776	27.7	43.1	175.3	230.1
W560	16.8148	29.3	47.1	194	261.4
W550	7.8228	11.8	17.6	103.9	119.8
W540	0.3292	0.7	0.9	4.6	5.2
W530	44.7348	42.9	105.1	380.9	509.7
W520	8.9604	13.8	24.6	92.5	104.5
W510	15.8584	19.5	39.4	157	184.8
W500	10.5812	16.5	28.7	108.5	123.2
W490	7.504	9.2	19.3	54.9	88.1
W480	9.6332	9.6	24.3	54.6	112.7
W470	17.7524	11.9	42.2	78	204.9
W460	22.7452	17.6	54.1	117.2	262.5
W450	17.7912	14.5	41.5	98.1	204.4
W440	14.0508	11.3	32.1	76.5	160.7

W430	12.506	9.9	30.7	57.9	145.4
W420	10.1312	8.7	23.2	80.4	161.6
W410	24.9296	16.1	59.1	157.1	399.5
W400	24.7104	17.4	56.4	164.4	394
W390	12.3664	10.3	28.9	97.3	197.8
W380	16.598	8	29.8	102.9	255.2
W370	10.798	9.2	26.3	86.7	173.7
W360	3.0732	2.8	7.9	21.3	49.7
W350	4.0136	3.6	10.2	27.7	64.9
W340	12.296	9.7	29.5	96.8	197.3
W330	9.6764	6.7	22.7	63.7	154.9
W320	23.27	17.6	56.4	180.1	374
Outlet1	432.0288	239	446	2106.9	3074.2

En los escenarios del 2011 (Figura 5.9 y 5.10) el hidrograma a la salida modelado como si se tratara de una cuenca no instrumentada mostró un gasto de 446 m³/s, que resulta 86.6% superior al caso donde se usaron parámetros a partir de mediciones, el cual resultó de 239 m³/s para la transformación de lluvia a escurrimiento, lo mismo sucede en los casos del 2005 (Figura 5.11 y 5.12), esto se debe a que:

Cuando se usó el método del SCS para la transformación de lluvia a escurrimiento, se usaron los NC de tablas que en general son valores más grandes que los encontrados en el capítulo 4, lo que implica mayor escurrimiento dado que hay menor infiltración, esto aumenta el volumen y por lo tanto el caudal que produce la cuenca.

Los casos en los que se utilizó el hidrograma de Snyder para la transformación también se utilizaron los números de curva encontrados en el capítulo 4, que fueron extrapolados a las subcuencas. Esos valores son menores a los encontrados en tablas lo que implica mayor infiltración y menor escurrimiento lo que disminuye el gasto a la salida.

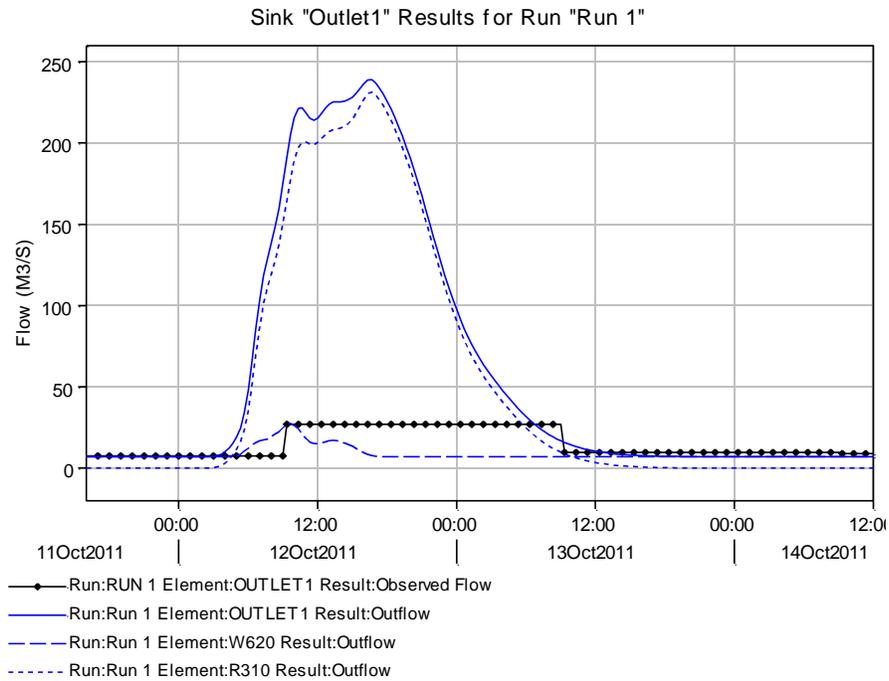


Figura 5.9. Hidrograma a la salida de la cuenca del 11 de octubre de 2011, modelación empírica, Run 1.

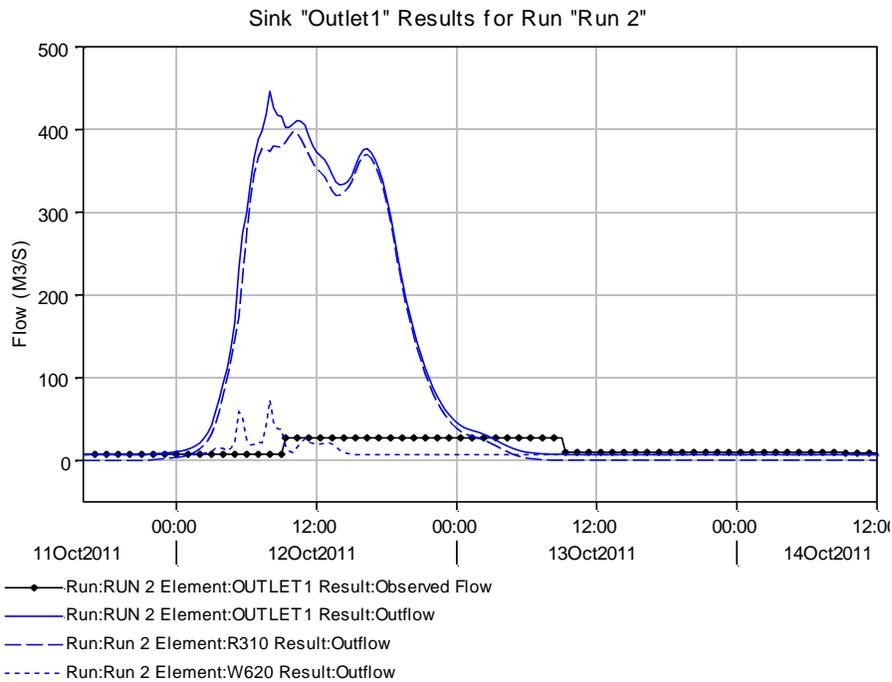


Figura 5.10. Hidrograma del 11 de octubre de 2011 a la salida de la cuenca, modelación a partir de medición directa, Run 2.

En el caso de 2005 Run 3 (Figura 5.11) se presentó el caudal pico de 2106.9 m³/s el 4 de octubre a las 12:30, en el Run 4 (Figura 5.12) el gasto máximo fue de 3074.2 m³/s el 4 de octubre a las 11:00, existe una diferencia del 45.9% con respecto al caudal modelado con parámetros generados a partir de mediciones, esto se debe a que en el caso de las mediciones, los números de curva son menores con respecto a los de tablas lo que provoca menor volumen escurrido, el modelo HMS es muy sensible al NC según Rojas (2005).

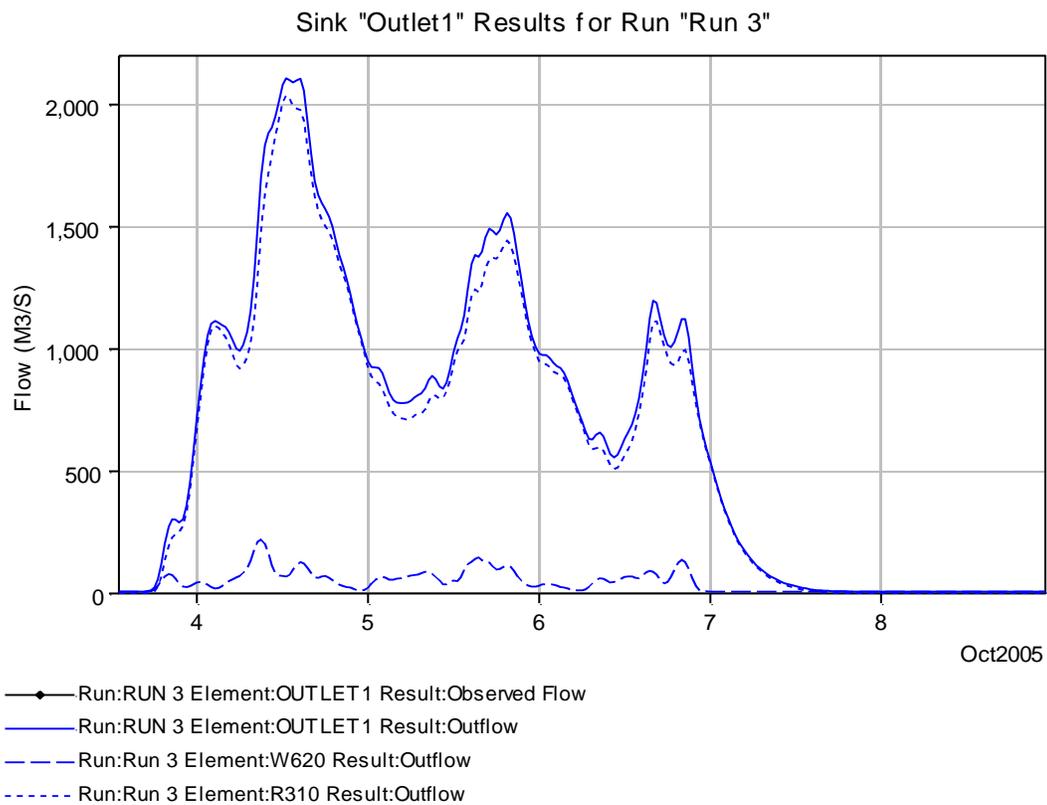


Figura 5.11. Hidrograma a la salida de la cuenca del 4 de octubre de 2005, modelación empírica, Run 3.

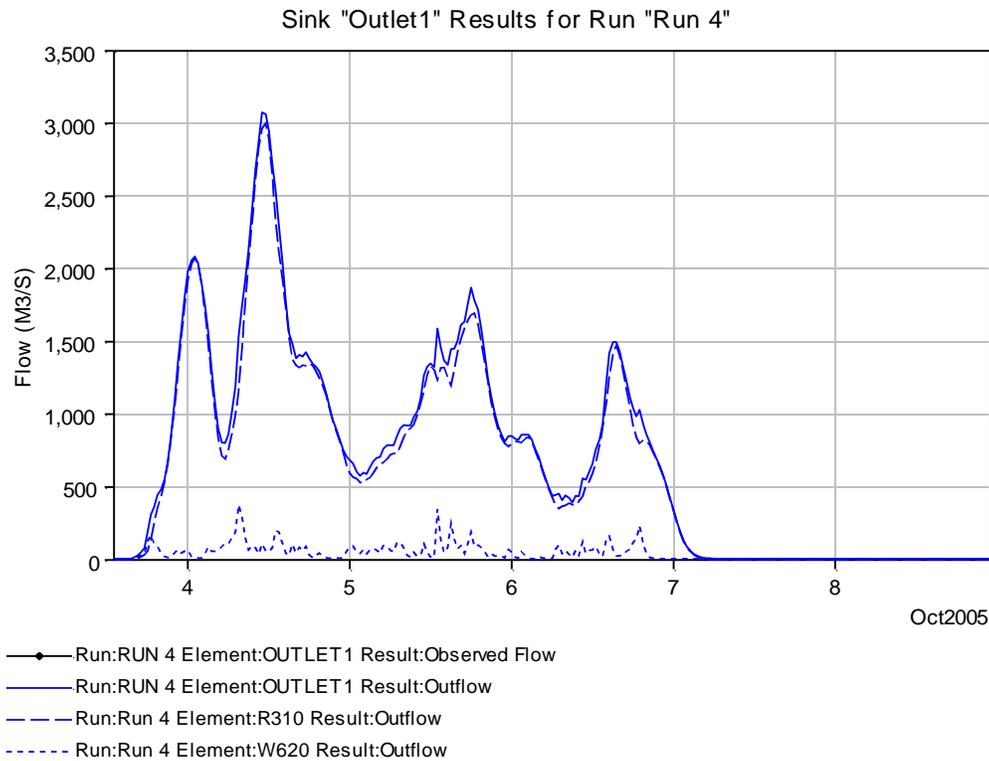


Figura 5.12. Hidrograma a la salida de la cuenca del 4 de octubre de 2005, modelación a partir de medición directa, Run 4.

En los casos donde se modeló con hidrograma de Snyder (Run1 y Run 3) el hidrograma es más suavizado que en los modelados con el hidrograma triangular (Run 2 y Run 4) donde son más pronunciadas las pendientes de las ramas ascendentes y descendentes, esto se debe a que los tiempos de retraso calculados con el método de Snyder son más grandes por lo tanto el escurrimiento tarda más en concentrarse dando una curva más suavizada sin picos pronunciados. Rojas (2005) encontró que los tiempos de retraso grandes provocan tiempos de concentración grandes esto es acorde ya que el tiempo de concentración es dependiente del tiempo de retraso.

Aunque las abstracciones iniciales tienen un papel importante en la relación lluvia escurrimiento porque de ellas depende también el tiempo de concentración del flujo y la pendiente de la rama ascendente del hidrograma, no se alimentó el modelo con este parámetro porque no hay mediciones al respecto, en cambio el modelo las calcula

empíricamente. Las abstracciones iniciales son importantes porque tienen una relación inversa con el gasto máximo.

En la figura 5.13 se muestra la contribución por kilómetro cuadrado al gasto máximo a la salida de las subcuencas en los cuatro escenarios, en general los rangos de mayor producción de escurrimiento se dan en la región de mayor pendiente en la parte media de la cuenca, sobresale el Run 1, Run 2 y Run 3.

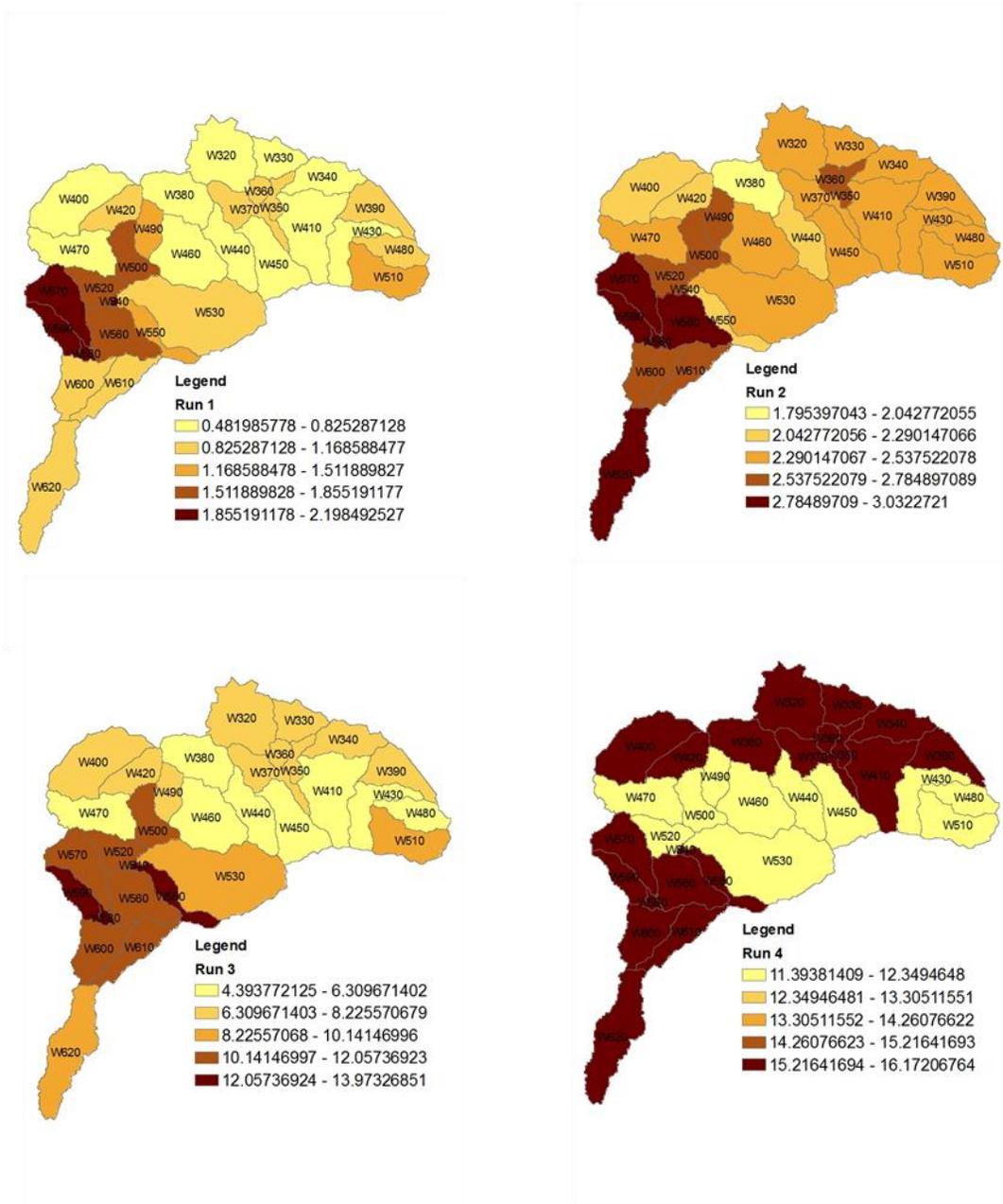


Figura 5.13. Rangos de gastos máximos en $m^3/s.km^2$ en los cuatro escenarios

5.5. CONCLUSIONES

La modelación de la cuenca en HMS sin mediciones, donde se usa el método del Servicio de Conservación de Suelos para la transformación lluvia-escorrimento y los números de curva de las tablas del mismo SCS para la fase de pérdidas, sobreestima los medidos.

El uso de parámetros medidos (Números de curva de escurrimientos e hidrogramas unitarios) en el modelo HMS muestra valores menores a aquellos obtenidos por corridas en HMS usando parámetros calculados empíricamente u obtenidos de tablas.

El modelo HMS es muy sensible al parámetro de número de curva que es determinante en el valor del gasto máximo, en este trabajo los valores más grandes, NC de tablas, produjeron gastos mayores.

Los valores grandes del tiempo de retraso, que determina la pendiente de la rama ascendente del hidrograma al estar relacionado directamente con el tiempo de concentración, produce hidrogramas mas suavizados.

Los usos de suelo dominantes en la cuenca son Selva y Bosque en el lado de México y pastizales en la parte alta de lado de Guatemala que se han inducido por la deforestación para el establecimiento de agricultura de temporal.

5.6. RECOMENDACIONES

Retomar la medición en la Estación hidrométrica Malpaso con el fin de obtener hidrogramas bien discretizados y así poder calibrar el modelo HMS, la información generada en el monitoreo de procesos hidrológicos en la costa de Chiapas es única en el país, sin embargo, por no contar con hidrogramas a la salida, no se puede calibrar.

Para que el caudal pico no sea tan elevado es necesario optimizar los parámetros de la fase loss (pérdidas). En los casos en que se utilizó el método del SCS, se puede optimizar el NC y las abstracciones iniciales en los datos de las 31 subcuencas. Por otro lado para contrarrestar el desplazamiento del hidrograma resultante es necesario optimizar el parámetro de coeficiente al pico del hidrograma de Snyder utilizado en la transformación de lluvia a escurrimiento.

El tiempo de retraso del hidrograma de Snyder de cada subcuenca juega un papel importante en la concentración del escurrimiento a la salida, por lo tanto es necesario optimizar este parámetro de cada subcuenca.

5.7. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua por permitir el uso de la información para el desarrollo de esta investigación.

5.8. LITERATURA CITADA

Aparicio M., O., O. Palacio V., R. Springall G., D. Fernández R. 2001. Empleo del Modelo SWRB para Generar Alternativas de Manejo en la Cuenca Iztapa, Guatemala, *Agrociencia*, mayo-junio, año/vol. 35, número 003 Colegio de Postgraduados, Texcoco, México, pp. 335-345.

Aparicio M., F. J. 2006. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa. México. 303 p.

Bjerklie, D., M., L. Dingman S., J. Vorosmarty C., H. Bolster C., G. Congalton R. 2003. Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *J. Hydrol.* 278: 17–38.

Borges C., P., R. Valmir D., Kobiyama M. 2008. Rainfall-Runoff process analysis of the Pequeño River Catchment, caritiba metropolitan region, Brazil, whit two hydrological models. *Ambiente e Agua- An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, decembro, año/vol. 3, número 003 Universidade de Taubaté, Taubaté, Brasil, pp. 43-54

Bradburyi, P.A., Haiwes, Young R. H., Mather P. M., Smart C. W. 1988. Woodlands in the welsh landscap: analysts based on remotely sensed satellite data and digital terrain information. ITE Symposium institute of terrestrial ecology, natural environment research council, UK No 21, pp48-55.

Campos-Aranda D. F. 2008. Calibración del método racional en ocho cuencas rurales menores de 1,650 km² de la región hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. *Agrociencia*, Vol. 42, Núm. 6, agosto-septiembre, pp. 615-627 Colegio de Postgraduados México.

Chen J., Arleen A. H., Lensyl D. U. 2009. A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of hydrology.* 373. Pp 184-192.

CONAGUA. 2011. Monitoreo de procesos hidrológicos erosivos en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, en la costa de Chiapas. Convenio de colaboración con la Universidad Autónoma Chapingo No Sgih-gdtu-uach-11/09/rf/cc.

Dutta D., Herath S., Musiak K. 2000. Flood inundation simulation in a river basin using a physically based distributed hydrologic model. *Hydrological Processes* 14 (3), 497–519.

ESRI. 2008. ArcGIS Desktop: Ver. 9.3. Environment System Research Institute.

Flores-López H., E., Ramírez-Vega, H., Byerly-Murphy, K.F., Ruiz-Corral, J.A., Martínez-Sifuentes, J.A., Díaz-Mederos, P., Alemán-Martínez, V. 2003. Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuite, México *TERRA Latinoamericana*, Vol. 21, Núm. 3, julio-septiembre. pp. 389-400.

González-Cervantes G., Estrada-Ávalos J., González-Barrios J. L., Cueto-Wong J. A., Sánchez-Cohen I.; Castillo-Santillán G. 2006. Análisis de los factores que afectan la relación precipitación - escurrimiento en una zona semiárida del norte de México *TERRA Latinoamericana*, Vol. 24, Núm. 3, julio-septiembre. pp. 337-345 Universidad Autónoma Chapingo Chapingo, México.

Hudson P. F. and Colditz R. R. 2003. Flood delineation in a large and complex alluvial valley, lower Panuco basin, Mexico. *Journal of Hydrology* 280, 229–245.

IMTA. 2009. Extractor rápido de información climatológica. ERIK III, Ver 2.0.

IMTA. 2008. Banco nacional de aguas superficiales. BANDAS.

ITT. 2008. Exploring ENVI, Region of Interest and Classification Techniques, pp. 131-132.

Janhe, B., 1991, *Digital Image Processing*. New York: Springer-Verlag, pp. 219-230

Jefferson, F., Krummel J., Yarnasary S., Ekasingb M., Podger N. 1992. land use and landscape dynamics in northern Thailand; assessing change in tree upland watersheds since 1954. Program environment, East- West center. Honolulu, Hawaii. 20 p.

Jensen, J. R., 1996 *Introductory Digital Image Processing a remote Sensing Perspective*, Prentice Hall Series in Geographic Information Science, pp 197-252.

Jensen, J.R., and Toll, D. J., 1982 Detecting Residential Land Use Development at the Urban Fringe, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48: 1039-1046.

- Khalidou M., B., Diaz C., Llamas J., Llano H. 1995. Zonas semiáridas y su modelación hidrológica (lluvia-escorrentamiento). Ingeniería hidráulica en México, vol. X, número 2, pp. 21-31, mayo-agosto.
- Knebl M. R., Yang Z. L., Hutchison K., Maidment D. R. 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. Journal of Environment Managment. Vol. 75. pp 325-336.
- Knippers R. 1992. Monitoring land cover in southern France, a proyect for tech remote sensing classification techniques cartography section. Faculty of Geographical Sciences, Utrecht. University Utrecht the Netherlands. 7p.
- Kurczyn R. J., Kretzschmar T., Hinojosa C. A. 2007. Evaluación del Escorrentamiento Superficial en el Noreste del Valle de Guadalupe, B.C., México, Usando el Método de Curvas Numeradas y Datos de Satélite. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, año/vol. 24, número 001, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México, pp. 1-44
- Leica Geosystem GIS and Mapping LLC. 2009. ERDAS 9.1 software. Atlanta, Georgia..
- Manière R., Chamingnon C., Ourboulés J. 1991. Iansat-TM et Spot-HVR appliqués aux inventaires forestiers Méditerranéens, apports compares. Rev. Photointerpretation. (5) 13-20.
- Nania L.S. 2003. Metodos de transformación lluvia-escorrentamiento y propagación de caudales. Apuntes de clase. Universidad de Granada. España.
- Patil J.P., Sarangi A., Singh A.K., Ahmad T. 2008. Evaluation of modified CN methods for watershed runoff estimation using a GIS-based interfase. Biosystems Engineering. Vol 100 pp 137-146.
- Paz, P.F. 2009. Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS *Agrociencia*, Vol. 43, Núm. 5, julio-agosto. pp. 521-528 Colegio de Postgraduados México
- Pistocchi A., Mazzoli, P. 2002. Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management.
- Pathirana A., Herath S. and Swain D., 2005. Hydrometeorological input for improving flood forecasting in the Mekong, Proc. International Symposium on role of Water science in transboundary river basin management, Ubon Ratchathani, Thailand, pp 49-56.

- Rojas R. 2005. Evaluación preliminar del modelo HEC-HMS. Universidad de los andes facultad de ciencias forestales y ambientales centro de estudios forestales y ambientales de postgrado.
- Roux H., Dartus D. 2006. Use of parameter optimisation to estimate a flood wave: Potential applications to remote sensing of rivers. *Journal of Hydrology*. Vol 328 pp 258-266.
- Soulis K. X., Valiantzas J. D., Dercas N., Londra P. A. 2009. Analysis of the runoff generation mechanism for the investigation of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Journal Hydrology and Earth System Sciences*. Número 6, pp. 373-400.
- Tan, K. S., Chiew F. H. S., Grayson R. B., Scanlon P. J., Siriwardena L. 2005. Calibration of a Daily Rainfall-Runoff Model to Estimate High Daily Flows Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Melbourne, Australia.
- Tarana A.S., Slobodan P.S. 2009. NCEP-NCAR Reanalyses Hydroclimatic Data for Rainfall-Runoff Modeling on a Watershed Scale, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, London.
- Torres-Benítez E., Fernández-Reynoso D. S., Oropeza-Mota J. L., Mejía-Saenz E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México *TERRA Latinoamericana*, Vol. 22, Núm. 4, octubre-diciembre. pp. 437-444 Universidad Autónoma Chapingo México
- Treviño P.A., Ortiz G.R. 2004. Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. *Investigaciones geográficas (Esp)*, septiembre-diciembre, número 035, Universidad de Alicante Alicante, España, pp. 67-83
- Uijlenhoet R., Torres S. D. 2006. Measurement and parameterization of rainfall microstructure. *Journal of Hydrology*. Vol 328 pp 1-7
- U. S. Army of Corps Engineers (USACE), 2005. Hydrologic Modeling System: User's Manual Version 3.0.0, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA.
- U. S. Army of Corps Engineers (USACE). 2010. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Software ver. 3.4. Davis Ca.

USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service), 1972. SCS Natural Engineering Handbook, section 4, Hydrology. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Washington, D.C. pp. 1-24.

Valle P., R., Arjona E., Bueno G., Oleschko L.K. 2009. Modelación de procesos del régimen hídrico del suelo, Terra Latinoamericana, Vol. 27, Núm. 2. pp. 161-168 Universidad Autónoma Chapingo México

Venkatesh M.. 2007. Hydrologic Modeling using HEC-HMS, School of Civil Engineering, Purdue University vmerwade@purdue.edu .

Villegas-Romero I., Oropeza-Mota J. L., Martínez-Ménes M., Mejía-Sáenz E. 2009. Trayectoria y relación lluvia- escurrimiento causados por el huracán paulina en la cuenca del río la sabana, guerrero, México. *Agrociencia*, Vol. 43, Núm. 4, mayo-junio, 2009, pp. 345-356 Colegio de Postgraduados México.

Yener M.K., Sorman A.U., Sensoy A., Gezgin T. 2007. Modelling Studies whit HEC-HMS and Rundoff Scenarios in Yuvacik Basin. Turkiye. Department of civil Engineering. Middle East Technical University, 06531 Ankara/Turkiye.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

6.1. CONCLUSIONES

Los hidrográmas sintéticos son muy útiles para estudio de caudales en cuencas no instrumentadas, sin embargo en el caso del hidrográma de Snyder es necesario calibrar sus coeficientes a partir de mediciones. Usar los rangos de valores reportados por la literatura es inconveniente ya que esos valores se obtuvieron en cuencas de Estados Unidos y existen diferencias con las condiciones que prevalecen en México como las pendientes, los tipos y usos de suelo.

El hidrográma sintético de Snyder se puede aplicar en microcuencas entre dos y cuatro hectáreas de tamaño para el cálculo de gastos pico, teniendo en cuenta que sus coeficientes deben ser calibrados también en microcuencas. En este trabajo el hidrográma sintético de Snyder mostro mejor ajuste a los gastos pico que el hidrográma triangular del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos.

Los hidrográmas unitarios sintéticos no son buenos estimadores del tiempo al pico y el tiempo base en microcuencas debido a los tamaños de cuenca en los que se recomienda la aplicación de esos hidrográmas.

Utilizar los números de curva de las tablas del servicio de conservación de suelos no es buena opción donde los usos de suelo no coinciden con los que contienen estas, ya que en el caso de la cuenca del Río Coatán, existe selva mediana caducifolia y lo más parecido en las tablas es el bosque, pero en la realidad la relación lluvia escurrimiento es diferente. El número de curva de tablas es subjetivo si las condiciones de uso de suelo y grupo hidrológico de suelo no coinciden con los que contienen estas.

En la cuenca del Río Coatán los números de curva de tablas sobreestiman los números de curva encontrados a partir de las mediciones de lluvia y escurrimiento.

Las imágenes de satélite con las herramientas de análisis geoespacial son indispensables en los estudios hidrológicos.

El modelo HMS engloba un gran número de factores de los que depende la relación lluvia escurrimiento los cuales deben ser preferentemente obtenidos por medio de mediciones en la cuenca, de lo contrario existe un factor de inseguridad en los hidrográmas que arroja y más

aún si no se tienen mediciones hidrométricas a la salida de la cuenca con lo que se pueda comparar los resultados y en dado caso realizar la calibración.

El modelo HMS es sensible al parámetro número de curva del que depende el gasto máximo del hidrograma de salida y también es sensible al tiempo de retraso ya que de este último depende el tiempo en el que se concentra el escurrimiento directo.

6.2. RECOMENDACIONES

Instrumentar cuencas de mayor tamaño entre 5 y 100 km² con el fin de observar el efecto de escala en las relaciones lluvia escurrimiento y poder aplicar los métodos sintéticos de los hidrográmas unitarios. Los estudios de inundaciones se realizan en base a cuencas muy grandes y el estudio en microcuencas, aunque es bueno para la obtención de parámetros por la homogeneidad, limita el estudio de la dinámica física a gran escala del fenómeno lluvia escurrimiento que realmente interesa por su impacto social.

Se recomienda realizar más investigación en otras cuencas acerca de la aplicación del hidrograma de Snyder para calibrar sus coeficientes y en el futuro no sólo usar en México el hidrograma triangular del Servicio de Conservación de Suelos.

Con el monitoreo en cuencas de tamaño medio se recomienda calibrar las ecuaciones empíricas de los métodos para obtener los hidrográmas unitarios sintéticos.

Se recomienda obtener los números de curva de los usos de suelo que existen en México, comenzando con aquellos en los sitios donde se tienen mediciones, es importante unificar la investigación hidrológica que al respecto se realice para construir una tabla de números de curva para los usos que existen en México y que no están contenidos en las tablas del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos.

Hacer mediciones en tramos de cauces para obtener los parámetros del método de Muskingum para el tránsito de avenidas.

Realizar pruebas de infiltración que permitan obtener las abstracciones iniciales para alimentar el modelo HMS de otro modo el modelo las estima empíricamente.

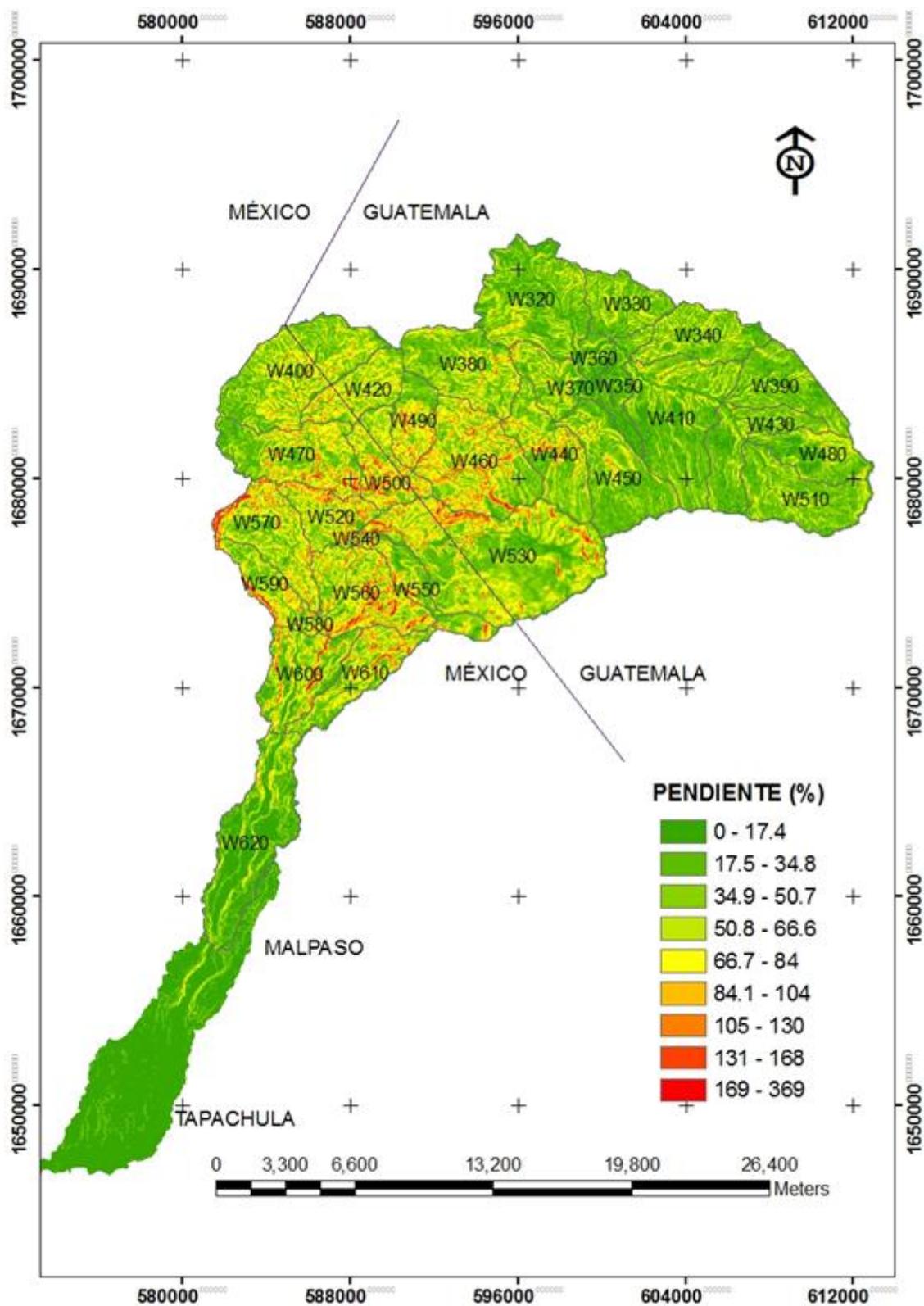
Para calibrar el modelo HMS no basta con realizar mediciones diarias a la salida y menos si el método empleado para el aforo es impreciso, es necesario realizar mediciones automatizadas precisas y continuas en el punto de salida de la cuenca que permitan tener un hidrograma bien discretizado que es indispensable en la calibración y validación del modelo

hidrológico. Con tales mediciones también se identifica el flujo base que es muy importante porque sobre este gasto se acumula el escurrimiento directo, si se desprecia o no se conoce el flujo base se corre el riesgo de subestimar los caudales a la salida de la cuenca.

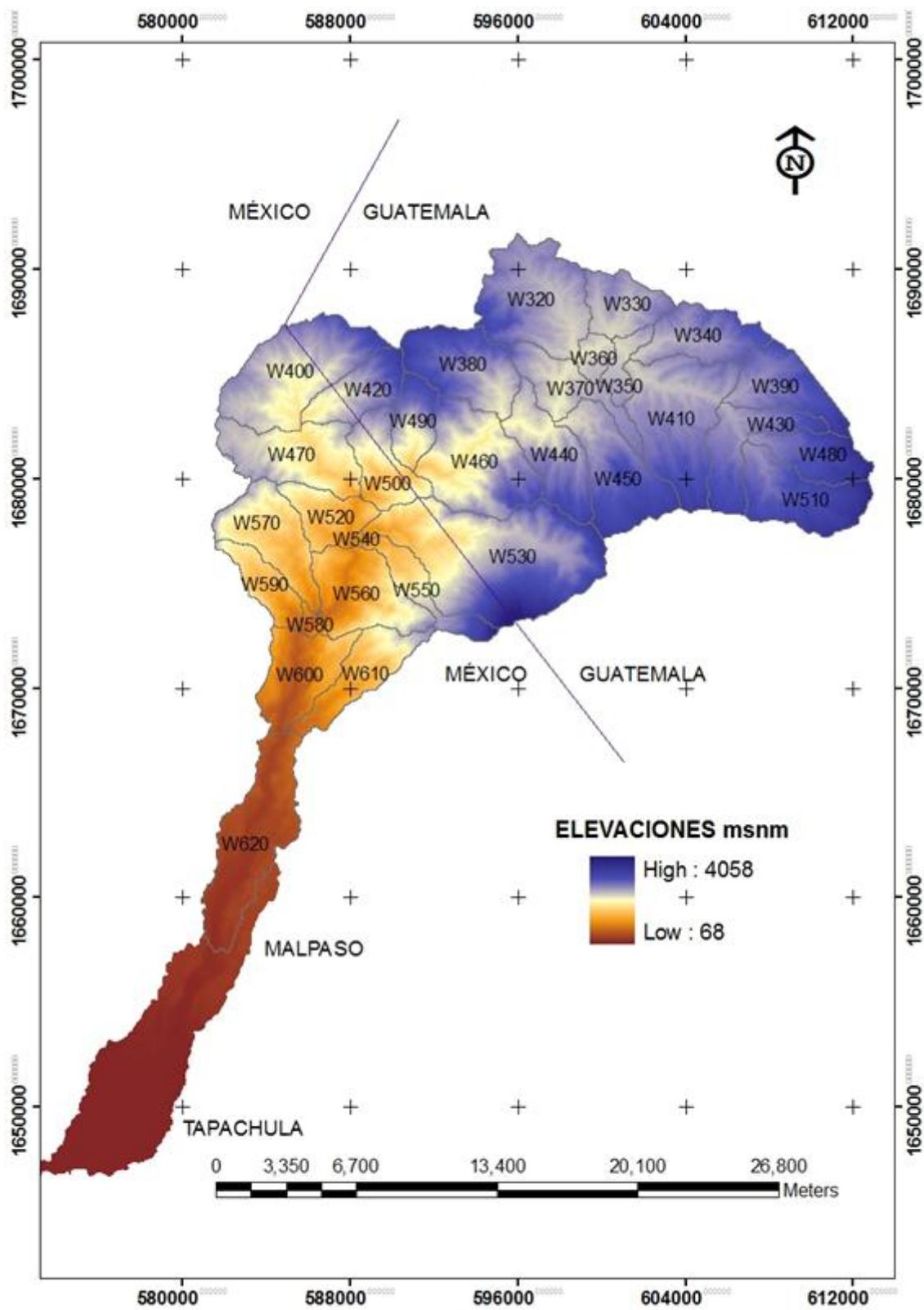
El número de curva de escurrimiento para un mismo uso de suelo es variable en las estaciones del año por lo tanto es recomendable si es posible obtenerlo mensualmente.

ANEXOS

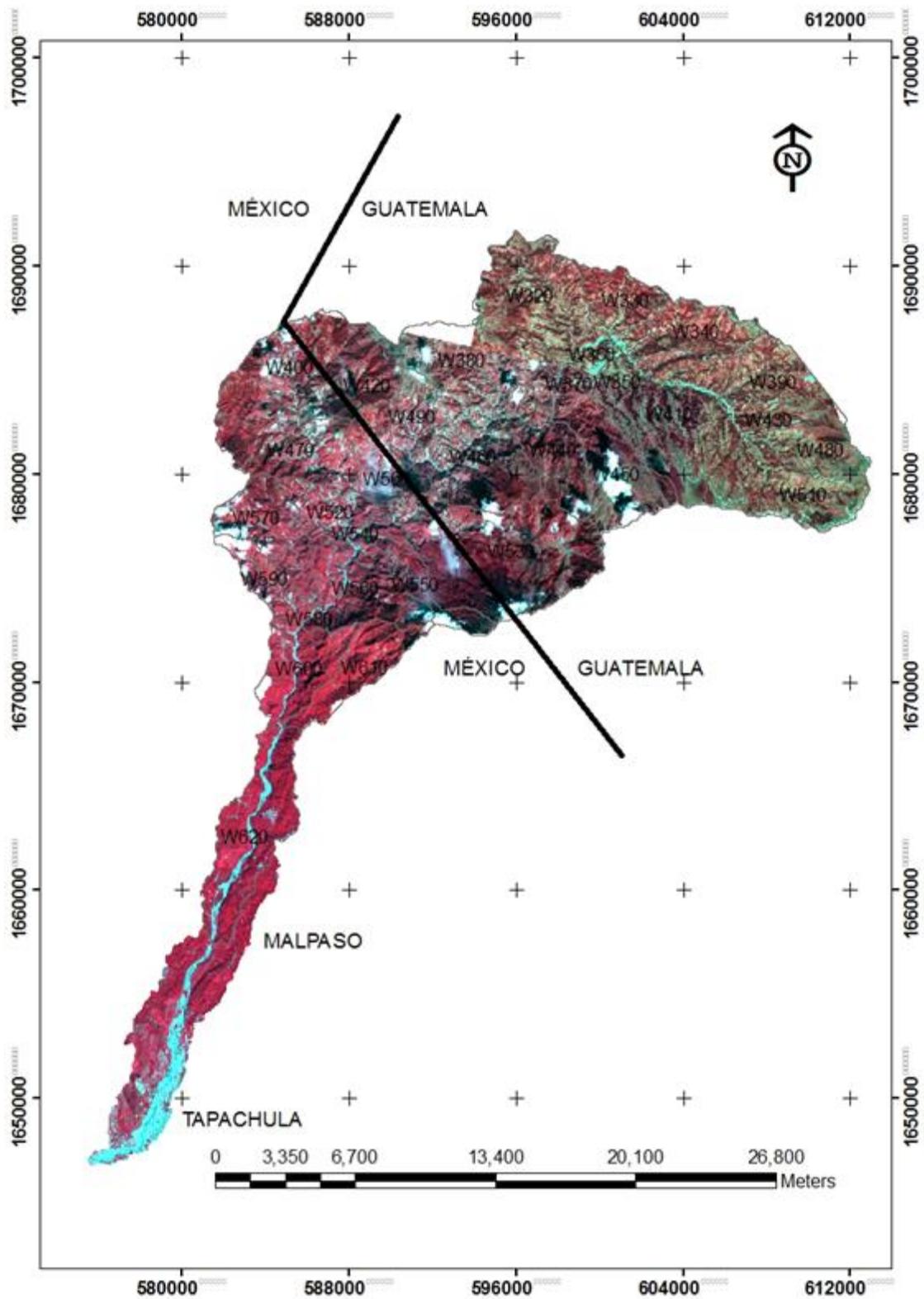
Anexo 1. Mapa de pendiente



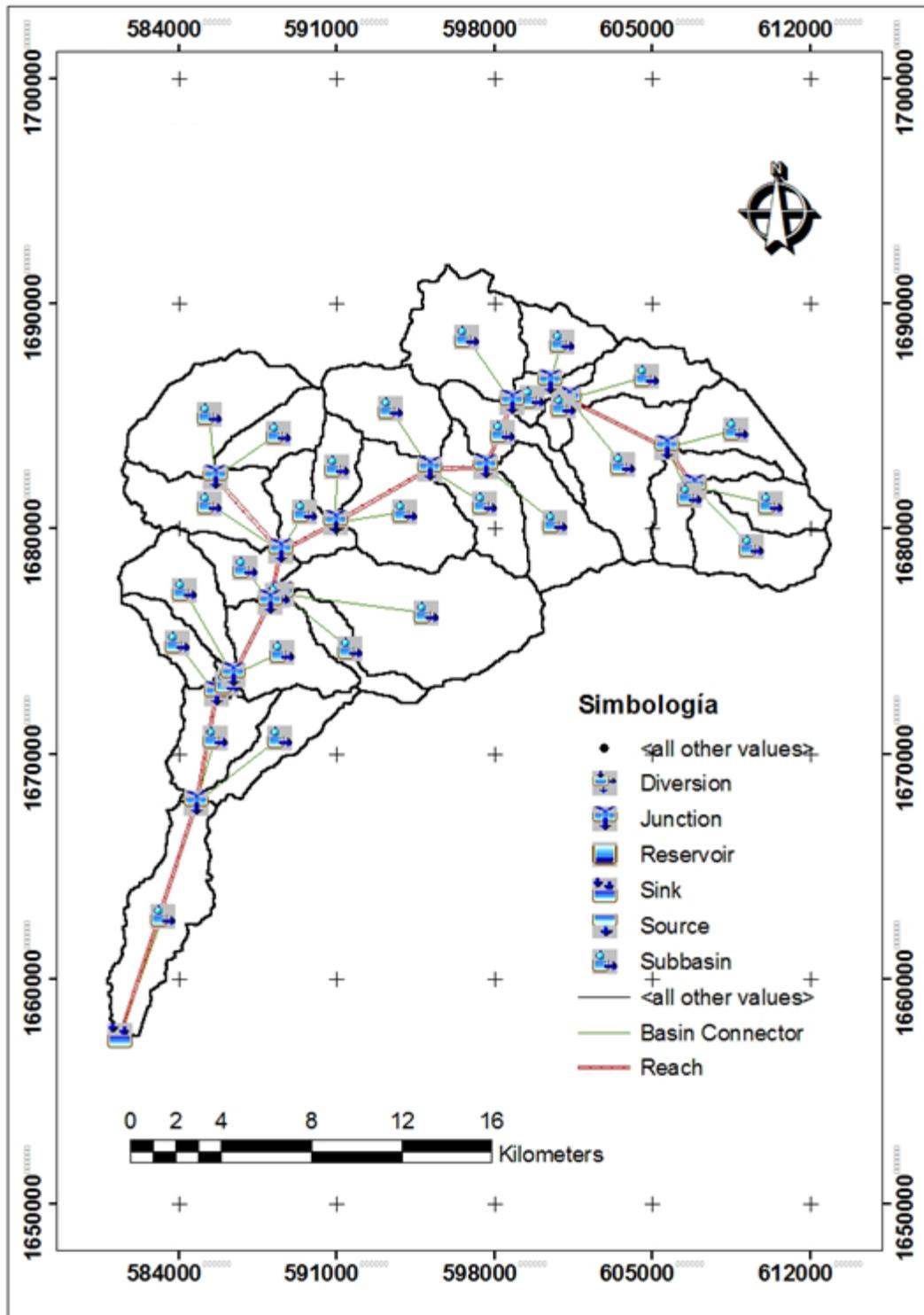
Anexo 2. Modelo Digital de Elevación



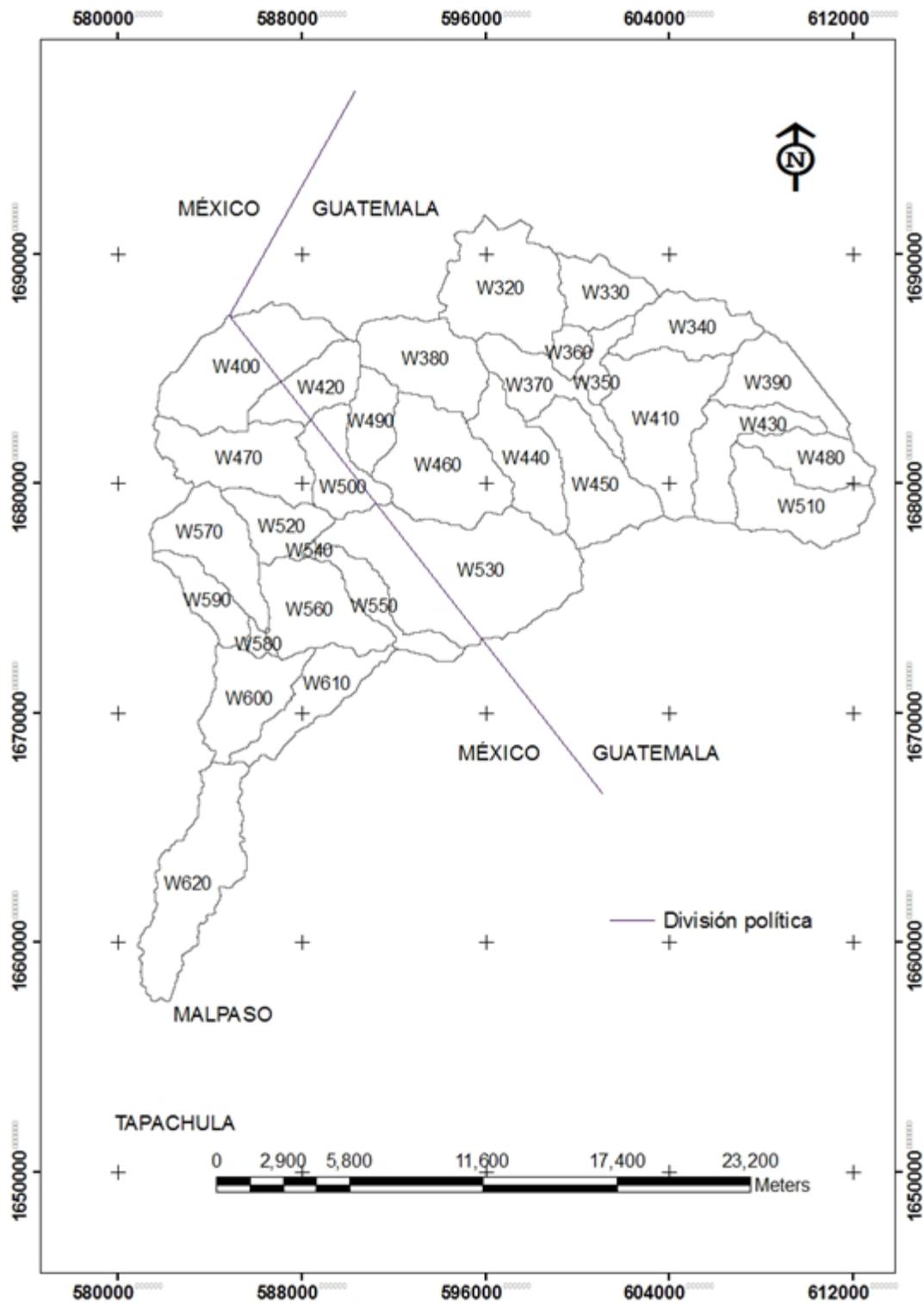
Anexo 3. Imagen Spot V de Noviembre de 2005



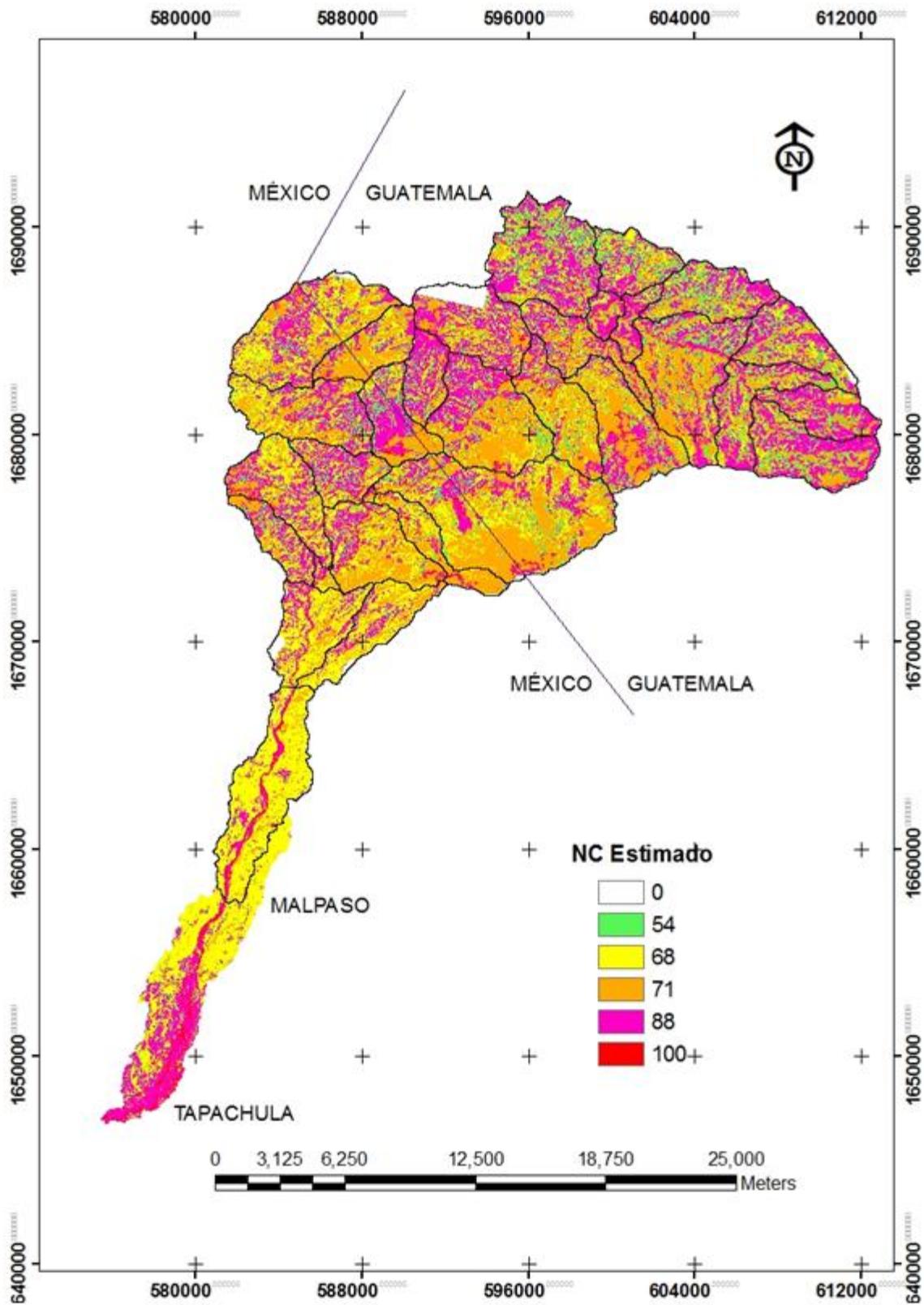
Anexo 4. Modelo de cuenca para HMS



Anexo 5. Subcuencas del Río Coatán



Anexo 6. Número de curva de escurrimiento a partir de medición directa



Anexo 7. Usos de suelo en la cuenca del Río Coatán

