



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

MODELACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL PROCESO LLUVIA Y ESCURRIMIENTO
EN UNA CUENCA URBANA, PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE PELIGRO
POR INUNDACIÓN

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
CARLOS EDUARDO VARGAS GERARDO

TUTOR:
DR. VÍCTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares
Secretario: M.I. José Alfredo González Verdugo
Vocal: Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka
1er. Suplente: M.I. José Manuel Rodríguez Varela
2do. Suplente: Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval

Lugar o lugares en donde se realizó la tesis:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
Col. Progreso C.P. 62550
Jiutepec, Morelos
México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka

FIRMA

¿Qué es la ciencia?

*La ciencia no es más que un
refinamiento del pensamiento
cotidiado.*

Albert Einstein

(1879-1955)

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todas las personas que contribuyeron en el desarrollo de esta tesis de maestría.

A mis padres que siempre los he considerado un ejemplo a seguir, por todo el apoyo y amor brindado en el trayecto de mi vida, espero poder recompensarles todo el sacrificio que han hecho por mí. A mis hermanas Reyna por el ánimo y por la fortaleza que me transmitiste en los momentos más difíciles, y Flor, que aunque no estés con nosotros te dedico este trabajo por los consejos valiosos que me brindaste y los momentos agradables que compartimos que atesoro tanto. A mi sobrina María José, espero que el tiempo nos reúna pronto para poder verte crecer como una persona exitosa y decirte que siempre podrás contar conmigo.

También dedico este trabajo a la familia Juárez Gama por integrarme a su hermosa familia de la cual me siento honrado por considerarme parte sus vidas. A todos y cada uno de ustedes, a los cuales aprecio y estimo mucho.

Asimismo, quiero extender esta dedicatoria a dos personas que admiro y aprecio desde el punto de vista profesional: M.I. Romeo Ballinas Avendaño y M.I. Leopoldo Hernández Valencia. Al M.I. Leopoldo por los consejos brindados y darme la oportunidad de ampliar mis conocimientos técnicos en topografía durante la carrera. Al M.I. Romeo por su vocación como un gran profesor que año tras año realiza los viajes de estudio para motivar, impulsar y encaminar a los alumnos a la investigación, así como sus valiosos consejos para la vida y el crecimiento profesional.

AGRADECIMIENTOS

No existen palabras que puedan expresar mi enorme agradecimiento a mi familia por apoyarme y ser mi inspiración durante esta etapa de mi vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en el área de ingeniería hidráulica y por haber ampliado mi panorama en la investigación.

De igual manera agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme apoyado económicamente con la BECA CONACyT, este apoyo hizo que me facilitara mi estancia durante los dos años de estudios.

Le agradezco al *Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka* por permitirme trabajar bajo su tutela, por creer en mi capacidad y por todo el conocimiento adquirido sus clases, así como las recomendaciones y el apoyo brindado en este trabajo. Además de ser para mí un ejemplo a seguir como persona y profesionalista, le reitero mi respeto y agradecimiento.

Al *M.I. José Manuel Rodríguez Varela* por brindarme su apoyo, tiempo, confianza, paciencia y las herramientas para desarrollar este trabajo, así como un espacio donde trabajar, información, sugerencias y recomendaciones en esta tesis. Sin su ayuda este trabajo no se hubiese concluido, es por ello le expreso mis más sinceros respetos y agradecimiento.

Al *Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval* por los conocimientos adquiridos en su cátedra y por compartir su experiencia en clases.

Al *Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares* por las recomendaciones y observaciones de este trabajo, así como el conocimiento, paciencia, motivación y consejos en el ámbito académico, además de su excelente vocación como docente.

M.I. José Alfredo González Verdugo. Gracias a sus recomendaciones y sugerencias realizadas, me permitió mejorar este trabajo.

Asimismo, quiero expresar mi infinito agradecimiento y respeto a *M.I. Hector A. Ballinas González* y *M.I. Javier de J. Canto Ríos* por las recomendaciones y las revisiones realizadas en este trabajo, así como sus consejos de fortaleza para seguir avanzando, y por supuesto la amistad que me brindaron en los dos años de mi estancia en Morelos.

A cada uno de los profesores que son los responsables de mi formación académica durante la maestría en el campus Morelos estoy profundamente agradecido por compartir sus conocimientos, experiencias y consejos académicos.

Al personal administrativo del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería UNAM Campus Morelos en especial al *Dr. Ariosto Aguilar Chávez* y a la *M.I. Olga María Guzmán Lucas*, quienes siempre estuvieron en la mejor disposición, buscando las mejores condiciones para los estudiantes.

Finalmente, mi reconocimiento al organismo de cuenca frontera sur (región XI) en especial a la Ing. Yendi Alvarez C. y Al Fis. Cesar Triana que siempre estuvieron en la mejor disposición de brindar la información solicitada.

A todos los integrantes de la generación 2014-1: Fernando Z., Nadir F., Alan R., Penélope C., Luis E., Lila O., Aldo B., Lidia T., Alejandro O., Natalie L., Ángel M., Itzel R. y Oscar B. que estuvieron presentes en esta parte de mi vida y donde compartimos alegrías, reuniones, desvelos, trabajos y tiempo juntos en las aulas.

A Gloria May, José Luis A, Selene B. y Víctor N. por sus consejos y agradable compañía.

A mis colegas Emérito D., Ezequiel C., Erika O., Paulette P. y Alejandra M. por sus buenos consejos.

A mis amigos de siempre que me acompañaron en mis pensamientos: Níger S., Octavio M., Emmanuel D., Carlos L., Karina M., Luis E., Edgar G. y Tania J.

También quiero agradecer a todas las personas que de alguna manera se involucraron en esta etapa de mi vida, llenándola de buenos momentos y que me acompañaron en este gran viaje.

A todos ustedes muchas gracias...

C.E.V.G.

**MODELACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL PROCESO LLUVIA Y
ESCURRIMIENTO EN UNA CUENCA URBANA, PARA LA
GENERACIÓN DE MAPAS DE PELIGRO POR INUNDACIÓN**



ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	21
1.1. Conceptos fundamentales.....	22
1.2. Panorama mundial de los desastres naturales	25
1.3. Panorama local de los desastres naturales	27
1.4. Planteamiento del problema.	30
1.5. Objetivo de la investigación.....	31
CAPÍTULO 2 MODELACIÓN DEL PROCESO LLUVIA-ESCURRIMIENTO	33
2.1 La importancia de los modelos en el análisis y la gestión de inundaciones	35
2.1.1 Áreas de aplicación de la modelación del proceso LL-E	35
2.2 Modelos hidrológicos para el análisis de inundación	37
2.2.1 Estimación de gasto de diseño mediante análisis de frecuencia de información de lluvia 37	
2.2.2 Estimación de gasto de diseño mediante el método del hidrograma unitario	38
2.2.3 Simulación continua de lluvia y caudales	38
2.3 Modelos hidrodinámicos	39
2.3.1 Modelos unidimensionales (1D).....	40
2.3.2 Modelos bidimensionales (2D).....	41
2.4 Modelos para el cálculo del proceso LL-E y tránsito de hidrogramas.	42
CAPÍTULO 3 ENFOQUES PARA EL ANÁLISIS DE LLUVIAS	47
3.1 El Ciclo hidrológico.....	47
3.1.1 Características básicas de la lluvia.....	49
3.1.2 Estimación de la lluvia	51
3.2 Enfoques para el análisis del pronóstico y diseño de tormentas.....	53
3.2.1 Enfoque estadístico	53
3.2.2 Enfoque estocástico.....	54
CAPÍTULO 4 CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE DRENAJE URBANO	63
4.1 Técnicas de calibración.....	64
4.2 Error en la modelación.....	66
4.2.1 Fuentes de incertidumbre y error en la estructura del modelo	67
4.3 Medida de la verosimilitud	67
4.3.1 Criterios para medir la verosimilitud	68
4.4 Herramienta de calibración SRTC en PC-SWMM	70
4.4.1 Parámetros de calibración en PCSWMM.....	71
4.4.2 ¿Cuándo se considera que un modelo está lo suficientemente calibrado?	72
4.5 Validación del modelo.....	73
CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA	75
5.1 Integración de los modelos 1D y 2D	75

5.2	Fase de calibración y validación	76
5.3	Obtención de los hietogramas.....	77
5.4	Generación de los escenarios	77
5.5	Generación de mapas de peligro	77
CAPÍTULO 6 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO		81
6.1	Instrumentación de la cuenca.....	83
6.1.1	Esquema hidrométrico	83
6.1.2	Distribución pluviométrica.....	84
6.2	Registros de los instrumentos de medición.....	85
6.3	Infraestructura hidráulica.	87
CAPÍTULO 7 RESULTADOS.....		89
7.1	Obtención de lluvias.....	89
7.1.1	Método Tholin y Keifer	89
7.1.2	Método estocástico.....	91
7.1.3	Criterio de selección de lluvias	93
7.1.4	Lluvias sintéticas.....	94
7.2	Modelación con parámetros iniciales	95
7.3	Calibración.....	101
7.4	Validación del modelo.....	107
7.5	Modelación de escenarios	109
7.5.1	Simulación de lluvias de 30min	109
7.5.2	Simulación de lluvias de 60 min	114
7.5.3	Simulación de las lluvias estocásticas	119
7.6	Análisis de los resultados obtenidos	128
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		133
8.1	Conclusiones	133
8.2	Recomendaciones	137
REFERENCIAS		139
ANEXO A. DATOS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS.....		145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación del subgrupo de desastres naturales “hidrológico” (CRED, 2015).	23
Figura 1.2. Tipos de inundaciones (Salas S. et al., 2013).....	25
Figura 1.3. Ocurrencia de desastres naturales. (CRED, 2015).....	26
Figura 1.4 Tendencias en las inundaciones y otros tipos de desastres naturales en el mundo, (CRED, 2015).....	27
Figura 1.5. Desastres naturales en México de 1951 – 2015. a) ocurrencia de los desastres naturales, b) pérdidas humanas, c) Total de personas afectadas y d) daño total en %. (CRED, 2015).	28
Figura 1.6. Zonas afectadas por inundaciones en el estado (CONAGUA, 2007).	29
Figura 1.7. Línea del tiempo de las inundaciones registradas en la capital del estado.....	30
Figura 2.1. Desarrollo de los modelos proceso lluvia-escurrimiento.	34
Figura 2.2. Clasificación de los modelos LL-E (Vargas G., Ibáñez L., & Ramírez R., 2015).....	34
Figura 3.1. Representación esquemática del ciclo del agua a nivel de la cuenca hídrica (Juan Vich, 1996).....	48
Figura 3.2. Efectos en la escorrentía e infiltración ocasionado por la urbanización. Fuente: http://www.hidrologiasostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds/	48
Figura 3.3. Distribución temporal de la lluvia (Methods & Durrans, 2003).	50
Figura 3.4. Avances e investigaciones aplicada a la generación de lluvia mediante el análisis de series.	55
Figura 3.5. Series de tiempo.	56
Figura 4.1. Estrategia usada para la calibración de un modelo (Gupta, Sorooshian, Hogue, & Boyle, 2003).....	63
Figura 4.2. Técnicas de calibración comúnmente usadas.....	65
Figura 4.3. Tipos de error en los modelos de simulación lluvia-escurrimiento (Knigth et al., 2006). 66	
Figura 4.4. Error en tiempo real del pronóstico (Knigth et al., 2006).....	66
Figura 5.1. Configuración de la distribución espacial de la lluvia para las EMA’s.	76
Figura 5.2. Criterio emitido por la FEMA (López, 2013).	78
Figura 5.3. Metodología de investigación (William, 2005).....	79
Figura 6.1 Subcuencas de los afluentes que aportan agua al cauce principal	82
Figura 6.2. Instrumentación hidrométrica de la cuenca.	83
Figura 6.3. Ubicación de las estaciones pluviométricas.	84
Figura 6.4. Registro de hidrometría y precipitación del 2011.....	86
Figura 6.5. Revestimiento de los márgenes con muro gavión: a) puente casa Kolping, b) 20 ote. Norte, c) 11ª calle norte y d) libramiento norte a un costado de procuraduría	87
Figura 6.6. Colectores pluviales existentes en la zona de estudio.....	88
Figura 7.1. Hietogramas de diseño de precipitación total para una duración de 30 minutos para distintos periodos de retornos obtenidos por el método de regionalización de lluvia de Tholin y Keifer (1956).	90
Figura 7.2. Tormentas de diseño con duración de 60 minutos para distintos periodos de retornos obtenidos por el método de regionalización de lluvia de (Tholin y Keifer, 1956).....	91
Figura 7.3. Series sintéticas generadas para cada estación.....	92

Figura 7.4. Criterio para la selección de lluvias.....	93
Figura 7.5. Integración de las lluvias sintéticas seleccionadas a partir del criterio establecido de las estaciones.....	94
Figura 7.6. Resultado de la simulación sin parámetros calibrados, las barras verticales de color azul tenue representan los eventos algunos de los eventos seleccionados del registro comprendido de 26-Jun-2011 a 31-Nov-2011.	97
Figura 7.7 Hidrometría observada contra hidrometría simulada para diferentes eventos ocurridos en el año 2011.	98
Figura 7.8 Resultado de la simulación con parámetros calibrados, las barras verticales de color azul tenue representan los eventos seleccionados del registro comprendido de 26-Jun-2011 a 31-Nov-2011.	104
Figura 7.9. Hidrometría observada contra hidrometría simulada con parámetros calibrados para diferentes eventos ocurridos en el año 2011.	105
Figura 7.10. Evento V-1.....	107
Figura 7.11. Evento V-2.....	108
Figura 7.12. Evento V-3.....	109
Figura 7.13. Simulación del hietograma de diseño Tr 5 años de 30 minutos.	110
Figura 7.14. Simulación del hietograma de diseño Tr 10 años de 30 minutos.	111
Figura 7.15. Simulación del hietograma de diseño Tr 20 años de 30 minutos.	112
Figura 7.16. Simulación del hietograma de diseño Tr 50 años de 30 minutos.	113
Figura 7.17. Simulación del hietograma de diseño Tr 5 años de 60 minutos.	115
Figura 7.18. Simulación del hietograma de diseño Tr 10 años de 60 minutos.	116
Figura 7.19. Simulación del hietograma de diseño Tr 20 años de 60 minutos.	117
Figura 7.20. Simulación del hietograma de diseño Tr 50 años de 60 minutos.	118
Figura 7.21. Escenario ST1.....	120
Figura 7.22. Escenario ST2.....	121
Figura 7.23. Escenario ST3.....	122
Figura 7.24. Escenario ST4.....	123
Figura 7.25. Escenario ST5.....	124
Figura 7.26. Escenario ST7.....	125
Figura 7.27. Escenario ST8.....	126
Figura 7.28. Escenario ST9.....	127
Figura 7.29. Hidrometría observada vs hidrometría simulada (escenarios obtenidos mediante el enfoque de lluvia estocástico).....	129
Figura 7.30. Hidrometría observada vs hidrometría simulada (tormentas de diseño con duración de 30 minutos).....	130
Figura 7.31. Hidrometría observada vs hidrometría simulada (tormentas de diseño con duración de 60 minutos).....	130
Figura 7.32. Resultados de la hidrometría de la simulación de los enfoques de lluvia en el nodo J109.	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Registro de algunos ciclones y huracanes que han afectado al estado de Chiapas (CONAGUA, 2007).....	29
Tabla 2.1. Algunos programas computacionales para la simulación, análisis de inundaciones y tránsito de hidrogramas (Rodríguez, 2012).	43
Tabla 4.1. Características de la calibración manual y la calibración automática (Gupta et al., 2003). 65	
Tabla 4.2. Valores de referencias para el criterio Nash-Sutcliffe (Molnar, 2011).	69
Tabla 4.3 Valores de referencias para el criterio R^2	70
Tabla 4.4 Parámetros y atributos de las subcuencas en SWMM.	72
Tabla 6.1. Datos generales de las estaciones hidrométricas (CONAGUA, 2009).....	83
Tabla 6.2. Información general de las estaciones pluviométricas.	84
Tabla 6.3. Información general de las estaciones automáticas (EMA's).....	85
Tabla 7.1. Parámetros iniciales en el modelo PCSWMM.	96
Tabla 7.2 Medida de la verosimilitud de la hidrometría observada contra la simulada sin previa calibración.....	98
Tabla 7.3. Parámetros hidráulicos de las subcuencas.	101
Tabla 7.4. Actualización de los parámetros iniciales.	102
Tabla 7.5. Medida de la verosimilitud de la hidrometría observada contra la simulada con calibración de los parámetros de la subcuencas.	103
Tabla 7.6. Ventajas y desventajas de los mapas de inundación y escurrimiento de acuerdo al enfoque Tholin-Keifer y el estocástico.	132

RESUMEN

A nivel mundial las inundaciones son algunos de los principales problemas que se presenta cada año, ocasionando grandes pérdidas millonarias por daños materiales y al ambiente, así como el cobro de vidas humanas. En la actualidad existen diversos modelos numéricos basados en plataformas computacionales que permiten pronosticar y determinar la magnitud de las inundaciones, estos modelos usan las ecuaciones fundamentales de la hidráulica para el análisis de las inundaciones. Se puede decir que la incertidumbre del análisis hidráulico de estos programas es un problema casi resuelto ya que actualmente estos programas de cómputo integran herramientas robustas que facilitan la representación del pronóstico de las inundaciones con resolución detallada, cabe aclarar que esto es aplicable siempre que existan la suficiente información o datos.

Por otra parte, la lluvia es uno de los parámetros de entrada de mayor relevancia en el análisis hidrológico para el pronóstico de las inundaciones, su estimación es compleja cuando no se cuenta con suficiente información. La lluvia por si sola es de carácter aleatorio, asimismo existen diversos métodos para estimar y representar la variación de la lluvia tales como el estocástico y determinísticos ambos influenciados por la incertidumbre de los datos que se propagan durante el análisis de la estimación de la lluvia.

El objetivo de esta tesis es integrar, calibrar y validar en un modelo de simulación del proceso lluvia y escurrimiento aplicado a una cuenca urbana que permita comparar los resultados de simulación de dos enfoques de lluvia como el método estocástico y determinístico, esto permitirá obtener mapas de peligro por inundación y así determinar el nivel de certidumbre de ambos enfoques de estimación de la lluvia respecto a eventos registrados.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural más importante de cualquier país debido a los beneficios sociales y económicos que se derivan de su consiente explotación; sin embargo, junto con sus ventajas también existen desventajas, como cuando su exceso origina inundaciones (Aragón, 2007).

El proceso hidrológico es un fenómeno natural que ha prevalecido durante miles de millones de años; las inundaciones de los valles siempre han existido y son el resultado de los eventos hidrometeorológicos extremos y otros fenómenos naturales. Éstos no se consideraban peligros sino hasta la llegada de los asentamientos humanos en las márgenes de ríos, lagunas, costas, y otros, aprovechándolos como medio de transporte, fuente de abastecimiento para su consumo, así como el uso de los valles y llanuras de inundación fértiles como zona de cultivo. En la actualidad, el crecimiento rápido de la población, crecimiento urbano no planificado, y el manejo inadecuado de los recursos naturales han causado desequilibrios en el ciclo hidrológico. En consecuencia, las inundaciones son cada vez más intensas, frecuentes y catastróficas.

Por otra parte, a nivel mundial existen pocos lugares en los que el ser humano no tenga que preocuparse por las inundaciones. Cualquier lugar en el que exista precipitaciones o se encuentre cercano a cuerpos de agua es vulnerable, la lluvia no es el único impulsor de las inundaciones también existen los maremotos (tsunami) y otros fenómenos que pueden originarla. La mayoría de las inundaciones tardan horas e incluso días en formarse, lo que permite a los residentes prepararse para evacuar; pero pueden también generarse rápidamente y sin aviso. Se puede decir que el peligro se origina cuando se da el aumento del tirante en los ríos y arroyos esto hace que se transformen en grandes corrientes de agua que arrasan todo a su paso al moverse aguas abajo.

El hombre desde su aparición y la creación los primeros centros urbanos se dio la tarea de diseñar y construir sistemas de drenaje artificiales, para controlar y proteger su entorno ante la problemática de las inundaciones. La evidencia arqueológica muestra que los sistemas de drenaje han sido utilizados en muchas civilizaciones antiguas, como los mesopotámicos, los minoicos (Creta) y los griegos (Atenas) (Butler & Davies, 2004). Por su parte, los romanos son conocidos por sus hazañas



en ingeniería para la salud pública, en particular los inmensos acueductos para llevar agua a la ciudad; menos espectaculares, pero igualmente vitales fueron los drenajes artificiales que construyeron, de los cuales el más conocido es la “Colector máximo”, construido para drenar el Foro Romano y aún en uso hoy en día (Butler & Davies, 2004).

En el presente los esfuerzos masivos para mitigar y redireccionar inundaciones inevitables han generado los proyectos de ingeniería más ambiciosos por el ser humano, tal como el sofisticado sistema de diques de Nueva Orleans y las represas de grandes dimensiones en los Países Bajos. Por otra parte, debido a los avances tecnológicos de los sistemas informáticos actuales ha permitido generar herramientas computacionales como los modelos de pronóstico que permiten a las autoridades de defensa civil estimar y simular escenarios con gran precisión en los puntos donde pueden ocurrir inundaciones, así como la magnitud del problema. (National Geographic, 2013).

1.1. Conceptos fundamentales.

De acuerdo con el glosario del Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres CRED, 2015 un desastre se define como “Situación o evento, que sobrepasa la capacidad local, lo que exige una petición a nivel nacional o internacional para la asistencia externa debido a un acontecimiento imprevisto y repentino que a menudo causa grandes daños, destrucción y sufrimiento humano. Aunque a menudo causadas por la naturaleza, los desastres también pueden tener orígenes humanos”.

Otra definición desastre por la secretaría de Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres EIRD, 2004 es: “Interrupción seria del funcionamiento de una comunidad o sociedad que causa pérdidas humanas y/o importantes pérdidas materiales, económicas o ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o sociedad afectada para hacer frente a la situación utilizando sus propios recursos. Un desastre es función del proceso de riesgo. Resulta de la combinación de amenazas, condiciones de vulnerabilidad e insuficiente capacidad o medidas para reducir las consecuencias negativas y potenciales del riesgo”.

Con referencia a CRED, 2015 la clasificación general de los desastres se divide en dos grupos, los naturales y tecnológicos, dentro del subgrupo de los desastres naturales están los geofísicos, meteorológicos, hidrológicos, climatológicos,



biológico y extraterrestre (causados por asteroides, meteoritos y otros), mientras que en el subgrupo tecnológico son los accidentes industriales, los de transporte y otros.

Por otra parte, es importante mencionar que en este trabajo nos centraremos en la categoría de inundaciones del subgrupo desastres naturales “hidrológicos”, ver figura 1.1

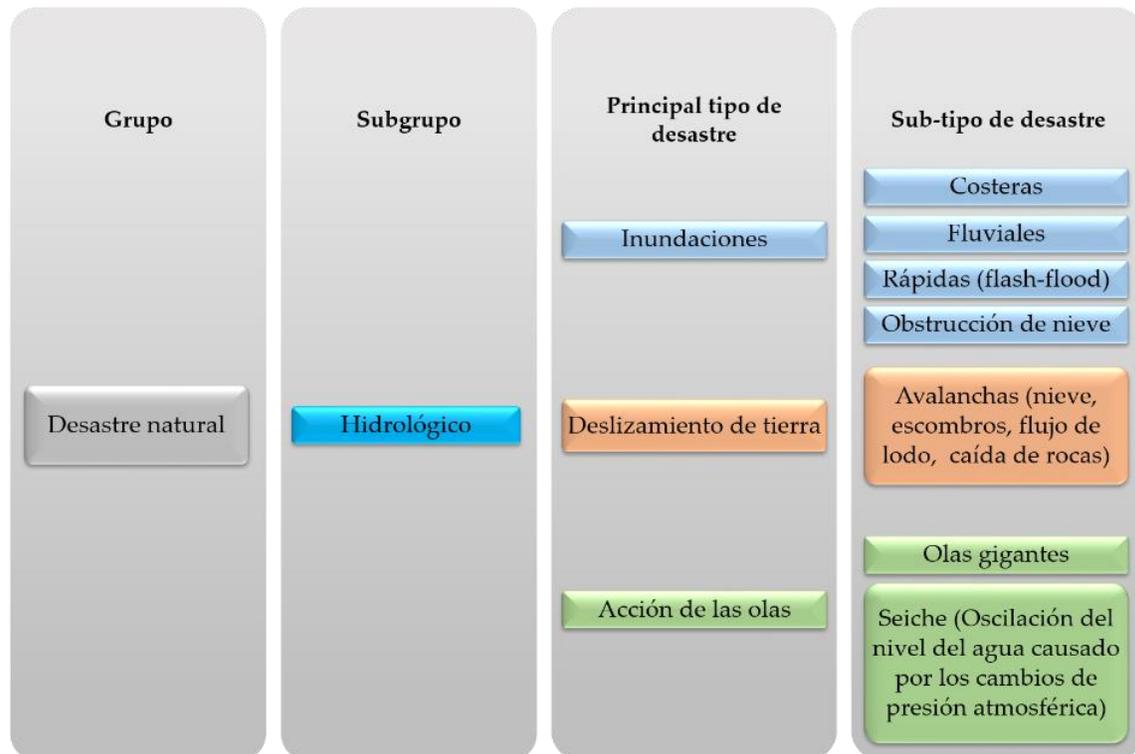


Figura 1.1 Clasificación del subgrupo de desastres naturales “hidrológico” (CRED, 2015).

Para entrar en materia del tema de desastres naturales como la inundación, es necesario definir algunos importantes conceptos que serán mencionados en el desarrollo de este trabajo:

Alerta temprana: Provisión de información oportuna y eficaz a través de instituciones identificadas, que permiten a individuos expuestos a una amenaza, la toma de acciones para evitar o reducir su riesgo y su preparación para una respuesta efectiva. Los sistemas de alerta temprana incluyen tres elementos a saber: conocimiento y mapeo de amenazas; monitoreo y pronóstico de eventos inminentes; proceso y difusión de alertas comprensibles a las autoridades políticas y población; así como adopción de medidas apropiadas y oportunas en respuesta a tales alertas (EIRD, 2004).



Amenaza/Peligro: Evento físico, potencialmente perjudicial, fenómeno y/o actividad humana que puede causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental. Estos incluyen condiciones latentes que pueden derivar en futuras amenazas/peligros, los cuales pueden tener diferentes orígenes: natural (geológico, hidrometeorológico y biológico) o antrópico (degradación ambiental y amenazas tecnológicas). Las amenazas pueden ser individuales, combinadas o secuenciales en su origen y efectos. Cada una de ellas se caracteriza por su localización, magnitud o intensidad, frecuencia y probabilidad (EIRD, 2004).

Amenazas hidrometeorológicas: Procesos o fenómenos naturales de origen atmosférico, hidrológico u oceanográfico, que pueden causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental. Ejemplos de amenazas hidrometeorológicas son: inundaciones, flujos de lodo y detritos, ciclones tropicales, frentes de tormentas, rayos/truenos, tormentas de nieve, granizo, lluvia y vientos y otras tormentas severas; permagel (suelo permanentemente congelado, avalanchas de nieve o hielo; sequía, desertificación, incendios forestales, temperaturas extremas, tormentas de arena o polvo (EIRD, 2004).

Capacidad: Combinación de todas las fortalezas y recursos disponibles dentro de una comunidad, sociedad u organización que puedan reducir el nivel de riesgo, o los efectos de un evento o desastre. El concepto de capacidad puede incluir medios físicos, institucionales, sociales o económicos, así como cualidades personales o colectivas tales como liderazgo y gestión. La capacidad puede también ser descrita como aptitud (EIRD, 2004).

Inundación: La palabra inundación en términos generales está definida en el diccionario de la Real Academia Española (RAE). como "*cantidad excesiva de algo*" pero de acuerdo al glosario internacional de hidrología (OMM/UNESCO, 1974) su definición oficial es: "*Aumento de agua por arriba del nivel normal del cauce*". Otra definición más extensa por Salas S. & Jiménez E., (2013) "*aquel evento que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura*". En la figura 1.2 se presenta la clasificación de los tipos de inundaciones.

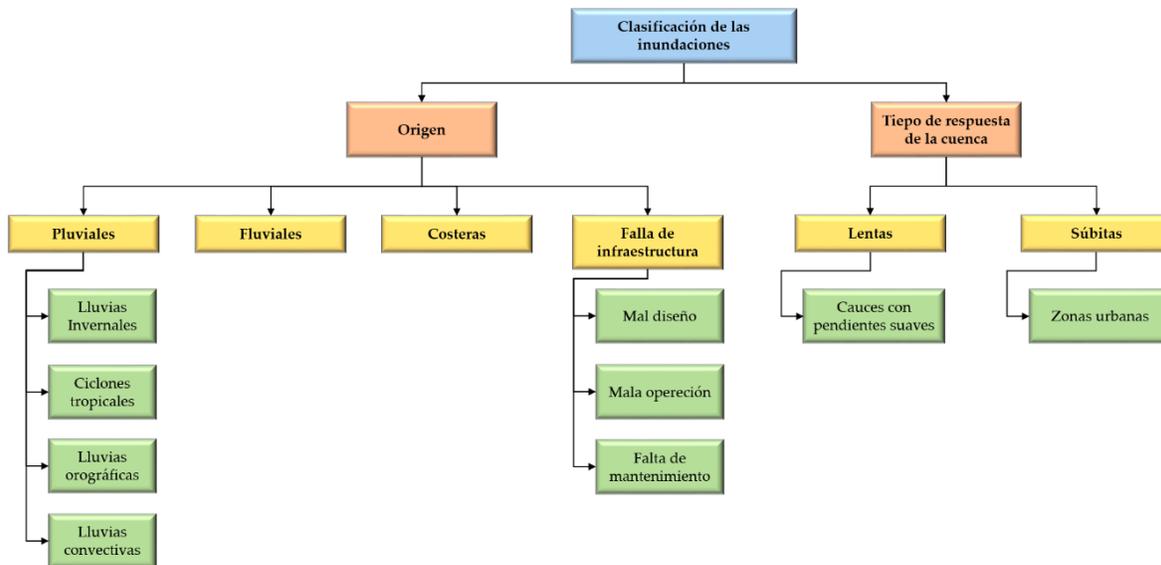


Figura 1.2. Tipos de inundaciones (Salas S. et al., 2013).

Riesgo: Probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiente) resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad. Convencionalmente el riesgo es expresado como $Riesgo = Amenazas \times vulnerabilidad$ (EIRD, 2004). Algunas disciplinas también incluyen el concepto de exposición para referirse principalmente a los aspectos físicos de la vulnerabilidad. Más allá de expresar una posibilidad de daño físico, es crucial reconocer que los riesgos pueden ser inherentes, aparecen o existen dentro de sistemas sociales. Igualmente es importante considerar el contexto social en los cuales los riesgos ocurren, por consiguiente, la población no necesariamente comparte la misma percepción sobre el riesgo y sus causas subyacentes (EIRD, 2004).

Vulnerabilidad: Condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos, y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de amenazas. Para factores positivos que aumentan la habilidad de las personas o comunidad para hacer frente con eficacia a las amenazas, véase la definición de capacidad (EIRD, 2004).

1.2. Panorama mundial de los desastres naturales

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) destacó la importancia de los desastres ocasionados por el clima debido a las pérdidas de vidas y al constante retroceso en el desarrollo económico, para ello realizó la publicación del “*Atlas de la Mortalidad y Pérdidas económicas por el Tiempo, Clima y Lluvias extremas*” (Gubin, 2014). El estudio publicado en julio del 2012, registró 8,835 eventos desastrosos en el



planeta entre 1970 y 2012, con un resultado de 1,910,000 muertes y US\$ 1'760,000 millones en pérdida. Asimismo, en este estudio se determinó que las tormentas e inundaciones ocupan el 79 por ciento de los desastres y estos eventos significaron el 55 por ciento de las muertes, y 86 por ciento de las pérdidas económicas (Gubin, 2014).

Es importante mencionar que los desastres naturales que se presentan con mayor frecuencia a nivel mundial son: sequía, problemas climatológicos, geológicos, terremotos y tsunamis, las inundaciones y problemas hidrológicos, ver figura 1.3, (CRED, 2015).

En 2006 y 2007, más de la mitad de todos los desastres naturales fueron inundaciones, mientras que para el año 2008 al 2015 tuvieron una presencia cada vez menor y el número de inundaciones se mantuvo por encima de su promedio, es decir que las inundaciones representan el 42% de todos los desastres en las dos décadas transcurridas, ver figura 1.4, (CRED, 2015).

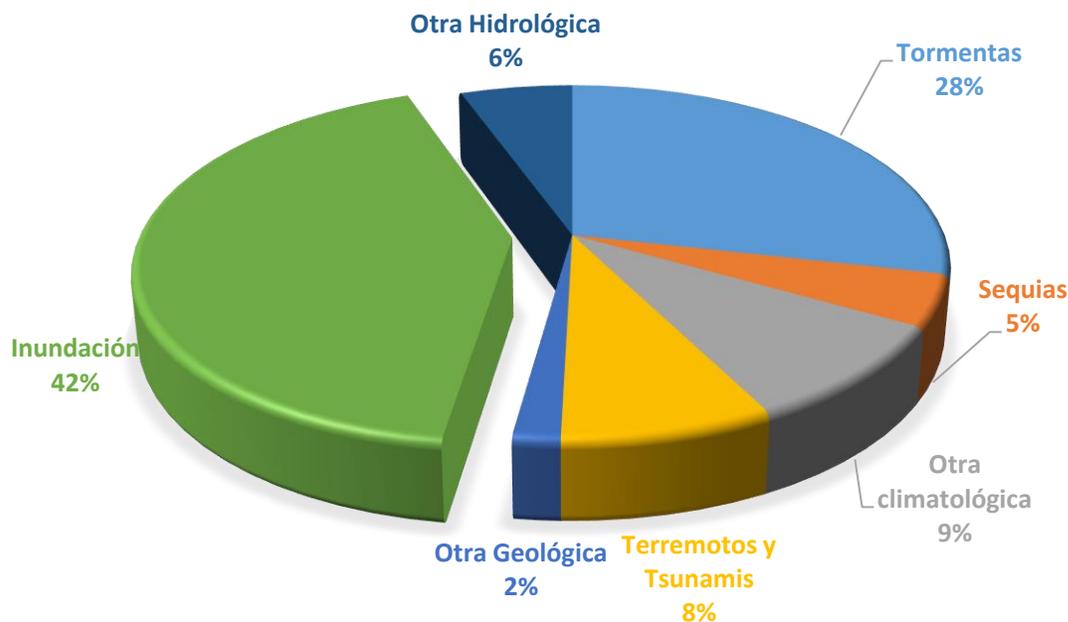


Figura 1.3. Ocurrencia de desastres naturales. (CRED, 2015).

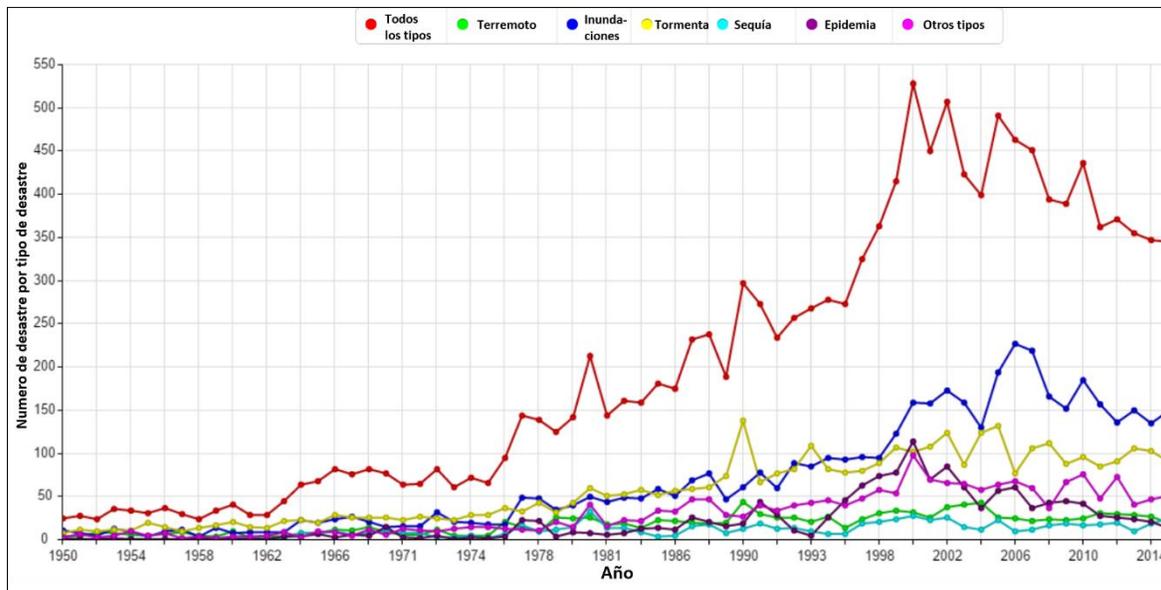


Figura 1.4 Tendencias en las inundaciones y otros tipos de desastres naturales en el mundo, (CRED, 2015).

En América del Norte, América Central y el Caribe entre 1970 y 2015 se notificaron 2981 desastres naturales, que causaron 515,621 víctimas mortales y daños económicos por valor de 1'003,136,529.7 millones de dólares. El 55% de los desastres notificados en esta región se atribuyeron a tormentas y el 30% a inundaciones. Se notificó que es la principal causa de la pérdida de vidas humanas 77%, y el 79% fueron daños económicos por tormentas (CRED, 2015).

1.3. Panorama local de los desastres naturales

México por su naturaleza y condiciones geográficas tiene una amplia variedad de desastres como los sismos, inundaciones, erupciones volcánicas y deslizamientos de tierras entre otros. Estos desastres crean situaciones de emergencia que requieren la atención organizada y efectiva del gobierno (CONAGUA, 2009).

De acuerdo a la base de datos de "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database" (CRED, 2015), del año 1951 al 2015 se han presentado 243 desastres naturales en la República Mexicana en los cuales destacan la actividad volcánica, los deslizamientos, incendios, inundaciones, sequías y otras, además de 22,004 pérdidas humanas registradas, más de 18 millones de personas afectadas y un daño total de 44'039,210 millones de dólares, ver figura 1.5.

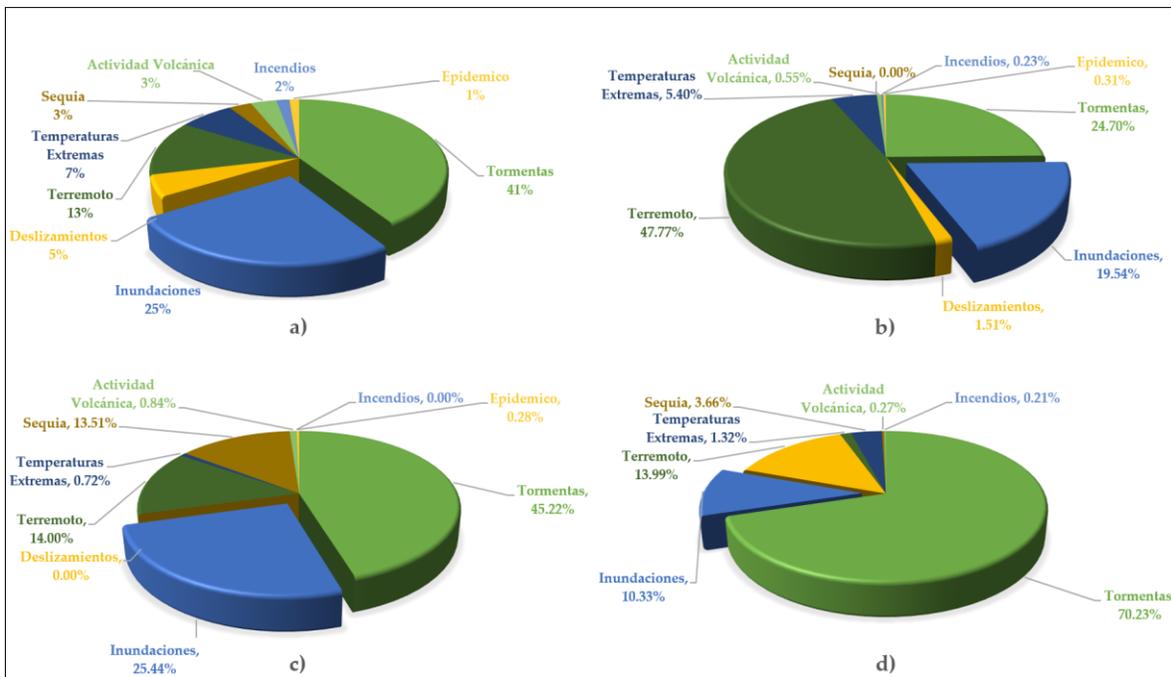


Figura 1.5. Desastres naturales en México de 1951 – 2015. a) ocurrencia de los desastres naturales, b) pérdidas humanas, c) Total de personas afectadas y d) daño total en %. (CRED, 2015).

Por otra parte, el estado de Chiapas ubicado al sureste de la República Mexicana, se ve afectado en toda su extensión por fenómenos hidrometeorológicos extremos entre los que destacan: sistemas de alta y baja presión, frentes fríos y cálidos, ondas tropicales, masas de aire polar y otros como lluvias que son originados por la orografía accidentada del sitio que repercute de manera directa con el clima (SEMARNAT, 2012).

En consecuencia, el tipo de desastre natural que más afectan al estado son las inundaciones propiciadas por lluvias provenientes de ciclones y frentes fríos, ver tabla 1.1, debido a las áreas de escasa pendiente que dificultan el escurrimiento de los drenajes naturales de las cuencas de la zona centro y norte del estado, mientras que en la zona costa del estado las inundaciones son ocasionadas por las pendientes pronunciadas de las cuencas que originan respuestas rápidas ante un evento de lluvia, repercutiendo en daños materiales y humanos, ver figura 1.6. La incidencia de las inundaciones acarrea en gran cantidad azolves, que se deslizan y depositan en las partes más bajas, por lo que las obras de protección se ven afectadas en cada ciclo de lluvia (SEMARNAT, 2012).



Tabla 1.1. Registro de algunos ciclones y huracanes que han afectado al estado de Chiapas (CONAGUA, 2007)

Tipo	Nombre	Año	Personas afectadas	Daños económicos (Millones de peso)
Ciclón	Noel	1995	-	9,435
Ciclón	Larry	2003	39,000	16,848
Huracán	Stan	2005	133,570	16,010
Ciclón	Bárbara	2007	15,000	107

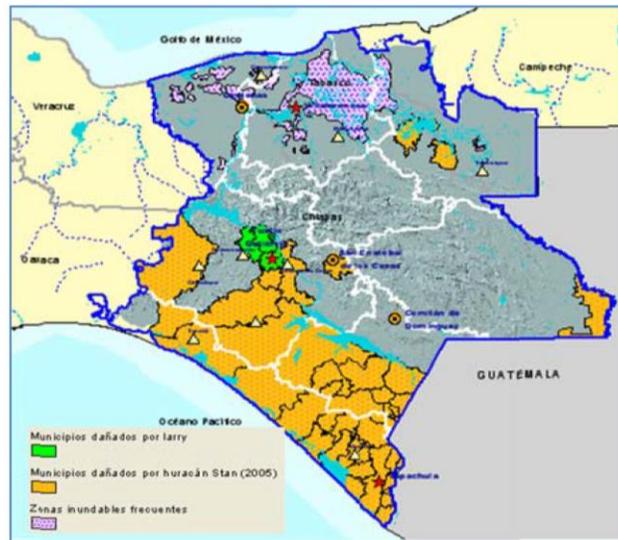


Figura 1.6. Zonas afectadas por inundaciones en el estado (CONAGUA, 2007).

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez capital del estado de Chiapas históricamente cuenta con dos aspectos principales de riesgos que son: geológicos por sismos e inundaciones generadas por los eventos hidrometeorológicos extremos que se presentan en temporada de lluvia y ciclones. La ciudad se ha visto afectada mayormente por las inundaciones, debido al desborde del río Sabinal que cruza en una longitud aproximada de 15 kilómetros la zona urbana y en el cual existen quince afluentes (intermitentes y perenes) que aportan agua al río. Cabe mencionar que algunas de las inundaciones ocurridas también han sido causadas por algunos de los afluentes como el Potinaspak y el Totoposte, en la figura 1.7 se muestra los registros de ocurrencia de inundación de la ciudad comprendida del año 1920 al 2015.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) calcula que cuando menos dos mil casas están construidas en las márgenes de 13 de los 21 afluentes del río Sabinal (CECOM, 2011).

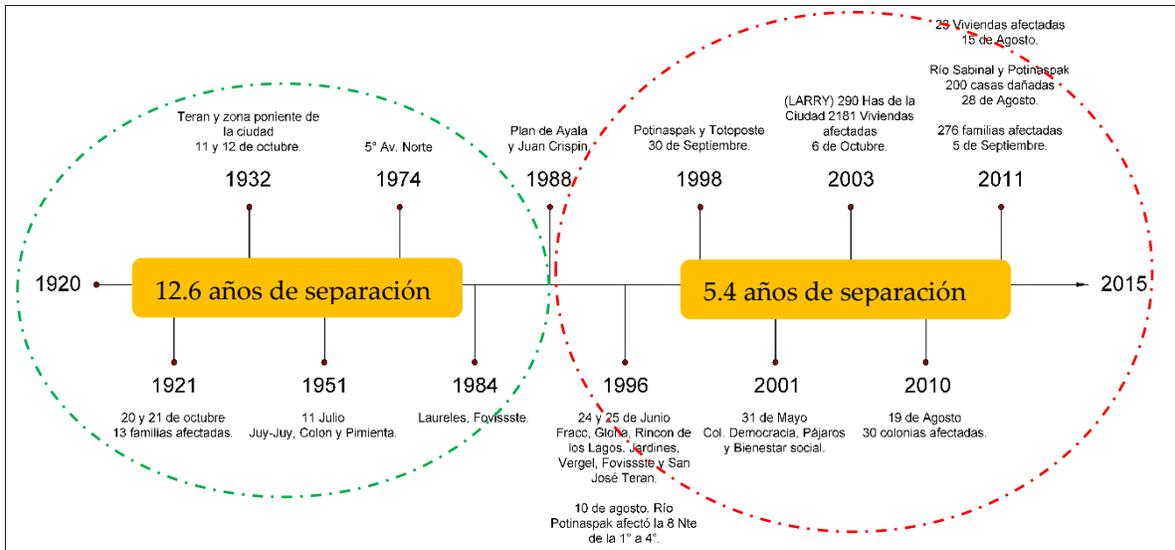


Figura 1.7. Línea del tiempo de las inundaciones registradas en la capital del estado.

1.4. Planteamiento del problema.

El crecimiento desorganizado y la falta de un plan de desarrollo urbano, ha convertido a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en una zona muy vulnerable a inundaciones en las temporadas de lluvias, comprendida entre los meses de mayo a octubre, con intensas lluvias de poca duración. Diferentes tipos de obras se han construido para prevenir estos problemas, pero no resultan adecuadas, ni factibles, e incluso agravando la situación cuando se presentan fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Los modelos modernos de simulación de drenaje urbano que integran herramientas computacionales como Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten generar mapas de riesgo, estos son un conjunto de datos que proporcionan información, que sirven para evaluar las zonas afectadas, así como proponer soluciones eficientes. Pero si los modelos de simulación no están calibrados o comparados con los datos de medición de sucesos o eventos registrados, estos carecen de valor y sustento, es por ello que es imprescindible la importancia de su calibración.



1.5. Objetivo de la investigación.

El objetivo general del presente trabajo es calibrar un modelo del proceso lluvia-escurrecimiento en el río Sabinal con la información de lluvia e hidrometría disponible en el lugar, posteriormente generar series de lluvias aleatorias con un método de simulación estocástica, para simular las lluvias sintéticas generadas en un modelo de drenaje urbano en dos dimensiones (2D) y finalmente obtener los mapas de peligro.

Objetivos particulares:

- Aplicar una metodología de calibración en la cuenca Sabinal, utilizando un software unidimensional (1D) de drenaje urbano.
- Utilizar simulación bidimensional (2D) para la obtención de las velocidades y llanuras de inundación a partir de la lluvia sintética.
- Generar mapas de peligro bajo el criterio FEMA.

A continuación, se presenta una descripción del contenido de cada capítulo incluido en esta tesis.

Capítulo 1. Se presenta una breve explicación de conceptos y antecedentes de las inundaciones, así como el índice de recurrencia de los desastres naturales comunes a nivel mundial y local.

Capítulo 2. En este capítulo se trata de los diferentes tipos de modelos existentes que tienen como objetivo estimar el escurrecimiento en cuencas. Además, se describen importancias de la implementación de los modelos y las áreas de aplicación, finalmente se describen algunos de los programas computacionales disponibles para la estimación del proceso lluvia-escurrecimiento.

Capítulo 3. En este apartado se menciona la naturaleza del ciclo hidrológico, algunas características básicas de la lluvia, así como la estimación y los errores que existen en su estimación, también se describen dos enfoques para el análisis de los registros de lluvia; el estadístico y estocástico.

Capítulo 4. En este capítulo se hace énfasis a la calibración de un modelo de drenaje urbano, de igual manera se hace mención de algunas técnicas de calibración, además de los errores típicos que se presentan en la modelación del proceso lluvia-escurrecimiento, criterios para medir la eficiencia de los resultados de un modelo respecto al observado y por último una breve explicación del funcionamiento de la herramienta de calibración del programa utilizado en este trabajo.



Capítulo 5. En este apartado se presenta la metodología desarrollada y empleada en este trabajo.

Capítulo 6. Se trata de la descripción general de la zona de estudio en la que se desarrolló este trabajo y se aplicó la metodología propuesta.

Capítulo 7. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del proceso de modelación del proceso lluvia-escurrimiento, calibración del modelo, los enfoques para la generación de diseño de tormentas y la simulación de los escenarios obtenidos con el modelo computacional utilizado.

Capítulo 8. En este capítulo se presentan las conclusiones generales obtenidas del análisis de la calibración del modelo, de igual manera el resultado de los diseños de tormentas por los dos enfoques de lluvia y la simulación de los escenarios obtenidos.

Un modelo se define como un sistema matemático o físico, obedeciendo a ciertas condiciones y se utiliza para comprender un sistema físico, biológico, químico o social a la que es análoga de alguna manera (McGraw-Hill, 1974). Por otra parte, un modelo es una representación abstracta, conceptual y visual de fenómenos, sistemas o procesos que tiene como fin analizar, describir, explicar y simular el comportamiento de estos fenómenos. Asimismo, un modelo permite determinar un resultado final a partir de los datos de entrada (Lagrost, Depettris, & Ruberto, 2005).

El desarrollo de modelos que describen el proceso lluvia-escurrimiento (LL-E) es uno de los temas centrales de investigación para la hidrología desde hace varios años. Un modelo LL-E es una abstracción de la realidad que representa una parte del ciclo hidrológico, dicho de otra manera, el escurrimiento es el resultado de los procesos físicos de transformación del agua que cae en forma de lluvia sobre una cuenca hidrográfica (Vargas, Ibáñez, y Ramírez, 2015). Los modelos de LL-E, ver figura 2.2, son comúnmente utilizados para entender el proceso del escurrimiento, también usados en el pronóstico de caudales con el propósito de regularizar el uso del agua y útiles en la estimación de gastos picos para diseño de obras hidráulicas que sirven para el control de inundaciones. Con el desarrollo de herramientas de computo en los años cincuenta y años sesenta, tuvo como consecuencia el aumento de modelación hidrológica e hidráulica por parte de varios investigadores. Desde entonces, los modelos se han desarrollado en respuesta a necesidad de utilizar herramientas hidrológicas e hidráulicas que permitan ayudar a la comunidad en la investigación para avanzar en el estado del conocimiento del tema.

Hasta el presente, el avance reciente de los modelos LL-E refleja el desarrollo histórico de la ciencia de la hidrología, las soluciones a los problemas hidrológicos percibidos de la necesidad y disciplinas a las que los investigadores han llegado. Así, el desarrollo de modelos ha sido promovido en su gran mayoría por investigadores en el área de la hidráulica e hidrología que requieren soluciones prácticas y eficientes a problemas reales (Bowles & O'Connell, 1991). En este sentido se comprende que en el pasado solamente ha habido algunos esfuerzos de modelación para soluciones teóricas, ver figura 2.1, pero que en la actualidad aún son utilizados por su practicidad.

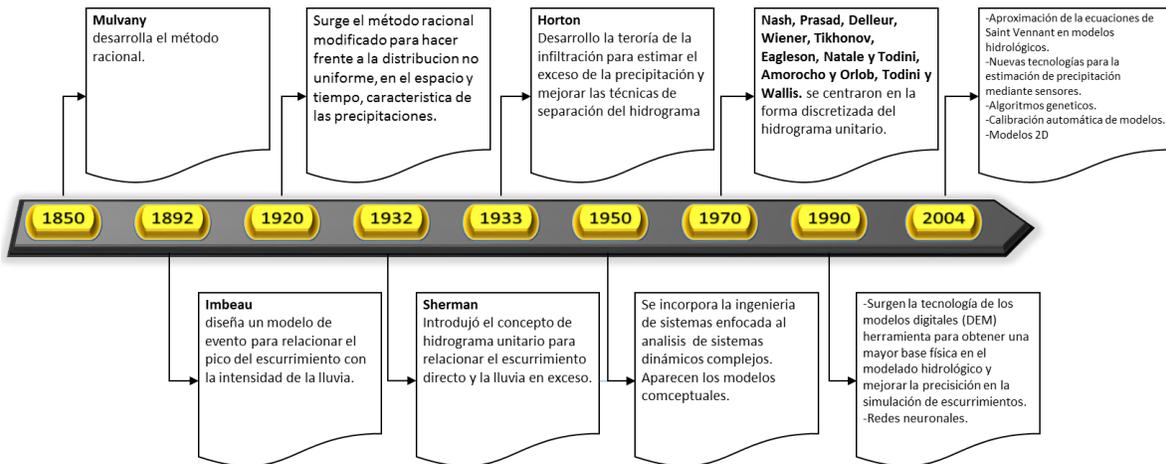


Figura 2.1. Desarrollo de los modelos proceso lluvia-escurrimiento.

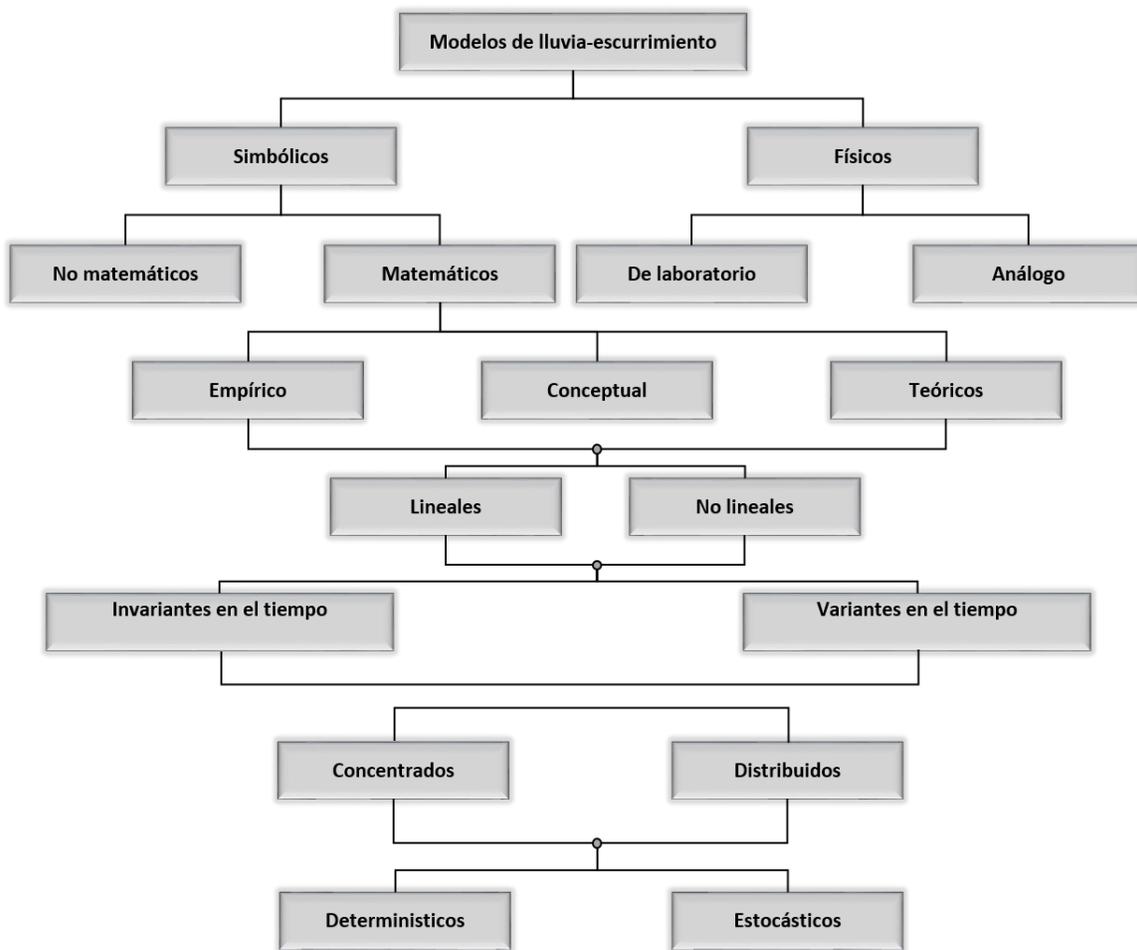


Figura 2.2. Clasificación de los modelos LL-E (Vargas G., Ibáñez L., & Ramírez R., 2015)



2.1 La importancia de los modelos en el análisis y la gestión de inundaciones

Las aportaciones de las investigaciones que se muestran en la figura 2.1 son aproximaciones que representan algunas de las características importantes del proceso LL-E para el pronóstico de inundaciones que han sido de mucha relevancia en la actualidad. Asimismo, la representación de las inundaciones por parte de los modelos LL-E se hace mediante números e imágenes. Por ejemplo: una representación fundamental es el hidrograma, la cual es una serie de números que miden el flujo total (gastos), nivel del agua, profundidad, o algún otro parámetro importante.

De acuerdo con Knigh y Shamseldin, (2006) en la hidráulica e hidrología, no existe un modelo universal que pueda ser aplicado para todas las circunstancias. La elección del método y el modelo dependerá de los resultados o detalle de información que el investigador requiera, en este sentido existen por lo menos cuatro áreas principales de aplicación:

- Diseño de estructuras para el control de cauces.
- Pronóstico de flujo en tiempo real.
- Reconstrucción de las inundaciones anteriores.
- Investigación de escenarios futuros para la planeación (derivados del cambio climático, el desarrollo humano y otros factores).

2.1.1 Áreas de aplicación de la modelación del proceso LL-E

2.1.1.1 *Diseño*

El diseño de estructuras para el control de los ríos es condicionado normalmente por la ubicación del proyecto a considerar, ya sea para el desarrollo o para la construcción de infraestructuras como: llanuras de inundación y obras de defensa contra inundaciones de una zona urbana. Las estructuras de control son diseñadas bajo un estándar establecido por la legislación nacional de proyectos del lugar y para ello es necesaria la estimación de las condiciones de inundación, por ejemplo, si se trata de una zona amplia para el análisis, las condiciones podrían ser numerosas en comparación a si se selecciona un solo tramo de un río o canal. Es importante mencionar que la duración o tiempo de funcionamiento de cualquier estructura de control está establecido en términos de la frecuencia de inundaciones, expresada como periodo de retorno " T " o como la probabilidad anual de ocurrencia de uno o varios eventos (Knigh & Shamseldin, 2006).



2.1.1.2 *Prevención*

Los requerimientos de los modelos LL-E para la prevención de inundación son diferentes en comparación a los casos de diseño. El objetivo es proporcionar una predicción de la magnitud, tiempo de llegada del gasto pico y determinar las zonas más vulnerables a inundaciones.

En la mayoría de los casos el principal aspecto o valor de referencia de prevención es el nivel del agua o tirante alcanzado por la inundación. Para la prevención oportuna de un modelo LL-E basado en los registros de gastos medidos, es recomendable que exista una correlación entre los gastos medidos y el nivel alcanzado originado por la inundación en los puntos de observación, los requerimientos clave de los modelos computacionales de LL-E para la prevención de inundaciones son:

- Simulación continua del modelo LL-E para pronóstico de corto plazo (horas) y a largo plazo (días).
- Métodos para corregir el error y actualización inmediata de la información corregida para mejorar el pronóstico.
- Cálculo rápido.
- Usar como dato de entrada el pronóstico de lluvia calculado.
- Validar y usar en tiempo real información de flujo sobre el río y niveles.

2.1.1.3 *Reconstrucción de eventos históricos*

Los modelos LL-E utilizados para la reconstrucción de eventos históricos son importantes porque permiten reconstruir hechos a partir de los registros históricos de eventos que causaron inundación (Kundzewicz & Samuels, 1998). Además, permiten calibrar y verificar el proceso hidrodinámico de un modelo usado para el diseño de un tramo de algún río o la posibilidad de determinar pérdidas por inundaciones.

Es necesario señalar que el componente clave de la reconstrucción es la estimación del estado actual y distribución de lluvia efectiva sobre de la cuenca y cabe mencionar que existen diversos métodos hidrometeorológicos estándar que pueden ser usados para integrar una variedad de información como: registros de pluviómetros diarios, estaciones automáticas e imágenes de radar que describan la distribución de las lluvias.



Resulta claro que la reconstrucción de eventos que han causado inundación están basados en eventos y la duración de la reconstrucción puede ser en ocasiones de días o meses.

2.1.1.4 *Investigación de escenarios futuros*

Los modelos LL-E aplicados al desarrollo de investigación para el pronóstico de escenarios futuros es parte del reciente interés por comprender el impacto potencial del cambio climático y además de ser una herramienta que sirve para tomar medidas para contrarrestar o minimizar los impactos ambientales negativos que pudieran tener algunas intervenciones antrópicas, tal como: cambios del uso del suelo en la cuencas (deforestación, reforestación, cultivo, urbanización y otros). Por otra parte, los modelos LL-E que simulan el comportamiento de los efectos mencionados que implementados en computadoras hacen posible predecir estos impactos, son el único método viable de investigación (Knigth & Shamseldin, 2006). Varios de los procesos hidrológicos e hidrodinámicos de estos modelos computacionales han sido parametrizados y la variación de los parámetros con cambio ambiental es conocida, por ejemplo, es posible estimar la sensibilidad de respuesta de un hidrograma de diseño a través de un método que requiera la variación del cambio en el porcentaje de escurrimiento y tiempos de respuesta con cambios en la condición de la cuenca (Knigth & Shamseldin, 2006).

2.2 Modelos hidrológicos para el análisis de inundación

2.2.1 Estimación de gasto de diseño mediante análisis de frecuencia de información de lluvia

El análisis de frecuencia para el análisis de lluvia se basa en registro histórico de los datos de lluvia de un sitio o dentro de una región hidrológica. La metodología para el análisis de datos de un sitio se desarrolla en tres etapas que son: en primer lugar, la estadística de los eventos registrados, como segundo la distribución de frecuencia y por último el método de ajuste de los parámetros de las distribuciones (Knigth & Shamseldin, 2006).

La estadística en base a los registros de lluvia anuales y de series parciales con cierta duración, que han originado inundaciones permite estimar el riesgo y el daño que puede ocurrir en el diseño de eventos para escenarios futuros. La distribución de frecuencia de la inundación seleccionada permite conocer la ocurrencia del tiempo en que se presenta un evento seleccionado. La distribución de frecuencia de un evento dependerá de dos o más parámetros y estos parámetros dependen de los



datos seleccionados del sitio. Otro aspecto importante es la regionalización de lluvias en una cuenca, esto permite que los datos de lluvia de diferentes cuencas puedan ser agrupadas para estimar con más precisión la frecuencia gastos extremos en una determinada zona de estudio (Knighth & Shamseldin, 2006).

2.2.2 Estimación de gasto de diseño mediante el método del hidrograma unitario

Para usar el método del hidrograma unitario, en cualquiera de las modalidades vistas, siempre es necesario contar con al menos un hidrograma medido a la salida de la cuenca, además de los registros de precipitación. Sin embargo, la mayor parte de las cuencas, no solo en nuestro país, sino en todo el mundo, no cuentan con una estación hidrométrica o bien con los registros pluviográficos necesarios (Aparicio, 2012).

Aparicio, (2012) “se define como el hidrograma de escurrimiento directo que se produce por una lluvia efectiva o en exceso de lámina unitaria duración d_e y repartida uniformemente en la cuenca. Este método fue desarrollado por Sherman en 1932”.

2.2.3 Simulación continua de lluvia y caudales

La disponibilidad de computadoras de alto rendimiento en la actualidad ha permitido el desarrollo de modelos hidrológicos robustos y complejos, a la vez ha facilitado y ha hecho que la simulación continua de gastos o lluvias sea común en estos días como opción viable para la estimación de gastos de inundación. Los modelos hidrológicos de simulación continua (MHSC) se originaron en respuesta a la problemática en estudios de recursos hídricos, donde el balance hídrico global con tiempos de escala de meses a años es el objetivo principal de estudio (Knighth W. & Shamseldin Y., 2006)

Por otra parte, los MHSC han demostrado ser eficaces para la evaluación de riegos por inundación, y de acuerdo con Knighth W. & Shamseldin Y., (2006) desde el punto de vista de la planificación y diseño, la simulación debe enfocarse a la estimación adecuada y precisa del gasto pico de inundación. Además, el tiempo de paso del cálculo en el modelo para la simulación debe ser apropiada para resolver de manera rápida el escurrimiento de la cuenca, es importante mencionar que no se le da tanta prioridad al balance hídrico global en la estimación de gastos picos de inundación, también se necesita de procedimientos rápidos para actualizar continuamente la respuesta del sistema fluvial en el pronóstico del gasto pico. En fin, los MHSC representan varios procesos hidrológicos los cuales incluye:



- Precipitación y evaporación.
- Superficie de almacenamiento y flujo superficial.
- Infiltración dentro de zonas de almacenamiento subsuperficial.
- Transferencia entre los almacenamientos subsuperficiales y generación del caudal.

Entorno a la complejidad de los MHSC cabe mencionar que estos pueden estar basados en subcuencas de superficie (modelo distribuido) o una sola cuenca (modelo concentrado). Algunas de las ventajas potenciales de estos modelos incluyen:

- La Mejora para la estimación de gastos picos de inundación en cuencas no aforadas (Lamb, Crewett, & Calver, 2000).
- Evaluar el impacto de cambio en el uso de suelo por la urbanización.
- Desarrollar escenarios de futuros escenarios incluyendo el cambio climático.

2.3 Modelos hidrodinámicos

De acuerdo con el instituto nacional de hidráulica de Chile INH, (2010) la hidrodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia el movimiento del agua. Es evidente que el campo de la hidrodinámica en la modelación matemática ha adquirido cada vez más importancia y se ha hecho común su uso en la actualidad, esto en gran parte se debe al avance tecnológico en los equipos de cómputo.

Los modelos hidrodinámicos son utilizados para cuantificar los impactos ambientales producto de proyectos, o evaluar la pertinencia de una obra en particular, lo que, en síntesis, los convierte en una herramienta fundamental en la toma de decisiones (INH, 2010).

En la hidráulica, la modelación hidrodinámica de inundaciones puede analizarse en modelos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D), cabe señalar que en este trabajo solo nos enfocaremos en los primeros dos. Los modelos hidrodinámicos 1D y 2D que están basados en las ecuaciones de Saint Venant (Leyes de conservación de masa y momento) para calcular la superficie libre del agua para flujo estacionario y no estacionario. Estas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mediante discretización numérica, usando frecuentemente el método de diferencias finitas, y en algunos casos mediante elementos finitos, en un esquema implícito.



Por otra parte, a diferencia de los modelos hidrodinámicos 1D, para los modelos 2D las ecuaciones de conservación de la masa y momento son expresadas en dos dimensiones y los resultados se calculan en cada punto de la malla en el dominio de solución (Rodríguez, 2012).

2.3.1 Modelos unidimensionales (1D)

Algunas de las características básicas de los modelos hidrodinámicos 1D es su poco requerimiento de datos, bajo costo computacional y rapidez en la evaluación de distribución de los niveles del agua al transitar avenidas de diseños para la simulación, análisis y estudio de las inundaciones.

Cabe mencionar que en los modelos unidimensionales se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Es decir, la dimensión que prevalece en a lo largo del eje de un río o canal es el tirante. Con respecto a la información topográfica e hidráulica se introduce mediante secciones transversales, en las cuales se calculan el tirante y velocidad promedios en toda la sección transversal. Es decir, toda la sección es representada por un valor medio de velocidad, no considerándose variaciones en la distribución de velocidades tanto horizontal como verticalmente. Asume por defecto que el flujo es perpendicular a la sección transversal, lo cual es una de sus limitaciones. Estos modelos son aplicables en tramos de ríos y canales muy largos, y cuando el objetivo es determinar el máximo nivel de agua (Rodríguez, 2012).

El conjunto de arreglos matemáticos que describen el comportamiento del fenómeno en la modelación hidrodinámica 1D son las ecuaciones diferenciales de Saint Venant. Estas ecuaciones expresan la ecuación de continuidad y la ecuación de momentum en una dimensión ver ecuaciones (2.1) y (2.2) respectivamente.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_o) = qV \quad (2.2)$$

Donde Q es el gasto, A es la sección transversal, S_o es la pendiente de la plantilla, S_f es la pendiente de fricción, q es la entrada de flujo lateral, y el tirante hidráulico, x el desplazamiento en la horizontal y t el tiempo.



Algunas suposiciones para usar la ecuación de Saint Venant es que la distribución de presión es hidrostática, la pendiente del fondo de la plantilla es pequeña de tal manera que el tirante puede ser medido perpendicularmente al fondo de la plantilla, la pérdida de carga en flujo no permanente puede ser calculado mediante las ecuaciones de Manning o Chezy, entre otras simplificaciones.

2.3.2 Modelos bidimensionales (2D)

Los modelos 2D son sistemas de soluciones más complejas y robustas, esto quiere decir que para su análisis se requiere de ordenadores con una mayor capacidad de cálculo, en la actualidad es común el uso de modelos 2D, y esto es a causa del avance tecnológico que ha permitido el desarrollo de equipos de cómputo con mayor potencia de cálculo, que cuenta con la capacidad de ejecutar programas complejos, que en comparación a los equipos de la década de los noventa era imposible de lograr.

Los modelos bidimensionales consideran las variaciones en dos dimensiones de un plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asume como un único valor. Estos modelos son especialmente útiles en flujos muy extendidos donde la variación vertical de velocidad es pequeña, por eso suelen llamarse modelos de aguas someras o poco profundas (Rodríguez, 2012).

Por otra parte, a diferencia de los modelos 1D, los modelos bidimensionales consideran que la fuerzas que actúan son: la gravedad en la dirección vertical y la fuerza de Coriolis en el plano horizontal, la curvatura que tiene las líneas de corriente es pequeña, por lo que también se considera una distribución hidrostática y el movimiento principal de las partículas ocurre en los planos horizontales (Rodríguez, 2012). Resultando de esta manera las ecuaciones usadas para modelos 2D son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = Cvh + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + gh(S_{ox} - S_{fx}) + S_{t1} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) = Cuh + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + gh(S_{oy} - S_{fy}) + S_{t2} \quad (2.5)$$



Donde h es el tirante, u y v son las componentes del vector velocidad en las direcciones x y y respectivamente, en cada punto del plano horizontal, g es la aceleración de la gravedad, C refleja el efecto de la fuerza de Coriolis, τ_{sx} y τ_{sy} están asociados con el efecto del viento en la superficie del fluido. Los términos $S_{ox} = -\frac{\partial z}{\partial x}$ y $S_{oy} = -\frac{\partial z}{\partial y}$ miden la pendiente del terreno en las direcciones x y y respectivamente, siendo z una función que describe el fondo o terreno. Las ecuaciones

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2.6)$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2.7)$$

Reflejan el efecto de la fricción del fluido con el terreno, donde n es el coeficiente de Manning, y

$$S_{t1} = \frac{\partial}{\partial x} \left[2v_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t h \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (2.8)$$

$$S_{t2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t h \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2v_t h \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (2.9)$$

Representan los efectos turbulentos del fluido, siendo v_t la viscosidad turbulenta.

Es necesario añadir las condiciones iniciales y de contorno para la resolución del sistema de ecuaciones de Saint Venant, aunque en situaciones generales no existen soluciones analíticas del problema, Ante esto, una opción es recurrir a los métodos numéricos para su solución.

2.4 Modelos para el cálculo del proceso LL-E y tránsito de hidrogramas.

En la actualidad existen diversos programas que pueden modelar adecuadamente los procesos LL-E y el tránsito de hidrogramas en cauces para determinar las zonas de inundación. Sin embargo, cabe aclarar que todo modelo matemático es una simplificación de la realidad y que las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo no permanente tienen limitaciones por sí solas.



En la tabla 2.1 se muestra algunos de los programas usados en la modelación del proceso LL-E y tránsito de hidrogramas. Cabe mencionar que la elección o uso de estos programas está sujeto a las necesidades del modelador.

Tabla 2.1. Algunos programas computacionales para la simulación, análisis de inundaciones y tránsito de hidrogramas (Rodríguez, 2012).

Modelo	Descripción	Método de cálculo	Datos básicos de entrada	Resultados
HEC-RAS	Modelo de dominio público desarrollado por el centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EUA. Permite el intercambio de datos con el sistema de información geográfica, mediante el HEC-GeoRAS. El modelo numérico de este programa permite realizar análisis de flujo permanente unidimensional gradualmente variado en superficie libre	Soluciona las ecuaciones de Saint Venant para flujo no permanente en canales abiertos. Las ecuaciones básicas de momento y continuidad con aproximaciones mediante sistema de ecuaciones lineales implícitas, usando esquemas de Preissman, además de usar la ecuación empírica de Manning.	Datos geométricos y topográficos de la cuenca de estudio.	Permite la modelación hidráulica en régimen permanente en canales y ríos. A partir de esta herramienta se pueden obtener los datos de entrada para los modelos de predicción de inundaciones, por ejemplo, elevaciones de la superficie de agua durante un determinado evento.
SWMM	Modelo de alcantarillado para aguas pluviales SWMM (Storm Water Management Model) desarrollado por Environmental Protection Agency de EUA. Sirve para simular el flujo de agua en sistemas de drenaje. Por otro lado, es útil en el análisis de flujos de escurrimiento que superan la capacidad de diseño de los sistemas de alcantarillado, así como desborde del agua en colectores, pozos y estaciones de bombeo, que conducen las inundaciones urbanas.	Utiliza soluciones numéricas de las ecuaciones de Saint Venant, así como ecuaciones empíricas de la hidráulica como las de Manning y Darcy.	Pendiente, datos geométricos del alcantarillado y del área de escurrimiento, uso del suelo, coeficientes de fricción, entre otros	Hidrogramas y análisis de los flujos que exceden la capacidad de los sistemas de alcantarillado. Combinado con los modelos 2D da resultados para el manejo de inundaciones urbanas.



Tabla 2.1. Continuación.

Modelo	Descripción	Método de cálculo	Datos básicos de entrada	Resultados
DAMBRK	Este modelo fue desarrollado por la NWS (National Weather Service de EUA) FLDWAV, ya que éste último es la perfección del primero.	Calcula los hidrogramas de salida de presas que están fallando teniendo en cuenta la geometría de la falla, el almacenamiento en el embalse y las entradas a este. El hidrograma de salida es transitada dinámicamente a través del valle aguas abajo.	Es necesario tener una solución aproximada a las ecuaciones completas de Saint Venant. Con el fin de poder utilizar DAMBRK en forma exitosa, al igual que cualquier otro programa que soluciones las ecuaciones completas.	Los resultados del modelo incluyen las profundidades aguas abajo en función del tiempo y el tiempo de viaje de la onda.
FLO-2D	El modelo permite el cálculo de las profundidades, velocidades y presiones en cualquier momento y en cualquier celda analizada. Se centra en la obtención de sedimentos por inundación y el depósito de materiales. Simulación de flujos y avalanchas.	Este programa se caracteriza por contar con la interacción de un modelo hidráulico con uno hidrológico. Basado en la modelación de procesos físicos los cuales introducen hidrogramas de precipitación-escorrimento y flujo sobre superficies no confinadas y canales usando la aproximación cinemática, difusa y dinámica de la ecuación de momento. Este programa trabaja con elementos finitos que permite la interacción entre el canal del cauce y la planicie de inundación.	Requiere un modelo de elevación digital del terreno (DEM) y la hidrografía de entrada.	Permite transitar crecientes con flujos hiperconcentrados y simular la ruptura de diques lo que lo hace una herramienta muy útil para evaluar el riesgo por inundación en ríos de planicie y de alta pendiente.



Tabla 2.1. Continuación.

Modelo	Descripción	Método de cálculo	Datos básicos de entrada	Resultados
MIKE 21	Modelo de cálculo hidrodinámico desarrollado por DHI (1999).	Basado en ecuaciones lineales de continuidad y balance de momento.	Registros históricos de caudales.	Nivel del agua para diferentes puntos y flujo a la profundidad promedio en las redes de análisis. Los componentes del flujo son evaluados en los bordes de malla y el nivel del agua es evaluado en el centro de la malla.
LIS FLOOD-FP	Generación de modelos de inundación en 2D, Es un modelo de lluvia-escorrimento de base parcialmente física. Se puede combinar con un modelo climático de alta resolución como HIRHAM.	El modelo es evaluado con la herramienta GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) Monte Carlo. Esta metodología reconoce que diferentes combinaciones de parámetros del modelo pueden generar representaciones aceptables de las observaciones disponibles.	Niveles de un río para un evento de inundación. Datos observados mediante sensor de radar de inundaciones de eventos pasados. Datos hidráulicos básicos (tales como rugosidad en el plano de flujo y en el canal, ancho efectivo del río, etc). Se puede utilizar datos de entrada generados por HIRHAM, los cuales permiten una simulación realista del régimen de descarga.	Valores de profundidad del agua para la elaboración de mapas. Y datos para la elaboración de mapas de amenaza por inundación.
SOBEK	Modelo hidrodinámico 2D para la representación de inundaciones.	Modelo con base en redes simultanea de inundación de canales, flujos multidireccionales, saltos hidráulicos etc.	Utiliza un modelo de elevación digital de terreno (DEM) y además requiere de una hidrografía inicial.	Profundidad y velocidad de caudales. La exportación de estos datos a un Sistema de Información Geográfica permite la obtención de esfuerzos cortantes, niveles de corriente y número de Froude.



Tabla 2.1. Continuación.

Modelo	Descripción	Método de cálculo	Datos básicos de entrada	Resultados
IBER	Iber consta de un modelo hidrodinámico que permite la simulación bidimensional de cauces (y en consecuencia posibilita la definición de zonas inundables, la delimitación de vías de intenso desagüe o en general la zonificación del dominio público hidráulico). Un módulo de turbulencia y un módulo de transporte sólido por arrastre de fondo y en suspensión para la cuantificación de procesos de erosión y sedimentación.	Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí. La versión actual incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia, y un módulo de transporte de sedimentos por carga de fondo y por carga en suspensión. Entre las líneas prioritarias de desarrollo de Iber a corto plazo se encuentran los modelos de transporte de mezclas de sedimento, los modelos de hábitat fluvial y los modelos de calidad de aguas.	Modelo digital de terreno (DEM), uso de suelo	Los resultados obtenidos pueden ser procesados con cualquier herramienta GIS para el mejor manejo de la información.
PC-SWMM	Modelo basado en el motor hidráulico e hidrológico de EPA SWMM de los EUA. Además de usar los mismos principios de SWMM tiene integrado herramientas de SIG que agilizan el desarrollo del modelo. Se pueden realizar simulaciones 1D, 2D o ambas.	Consta de varios módulos entre ellos el hidráulico e hidrológico nativos de EPA SWMM	Para el modelo 1D, al igual que el modelo 2D se requiere de: secciones, topografía, hidrograma, hietogramas de diseño. Con la única diferencia que en el 2D se necesita un modelo digital para la delimitación de la malla para el cálculo en el modelo.	Con la integración del motor GIS en el programa, permite visualizar y generar mapas de peligro por inundación.

La información de lluvia es un elemento fundamental para determinar la cantidad de escurrimiento que las cuencas rurales o urbanas aportan a cauces naturales o artificiales, lagos y lagunas. Una forma práctica de ver la aplicación de la hidrología es la estimación de los gastos de diseño de los sistemas de conducción de aguas pluviales que contienen el volumen vertido originado por las lluvias (Knigh & Shamseldin, 2006).

En general, existen diversos métodos hidrológicos para el diseño de hietogramas y predicción de la lluvia, tal como los estadísticos y los estocásticos que se trata en el subtema 3.2 “enfoques para el análisis del pronóstico y diseño de tormentas”. Los métodos hidrológicos se pueden clasificar en los que se basan en eventos y los continuos. Los métodos basados en eventos están enfocados en la predicción de gastos y volumen de escurrimiento, como resultado del evento de una lluvia en particular. Los métodos continuos simulan escorrentía de forma ininterrumpida e incluyen periodos de tiempo húmedo y seco. En la actualidad cada vez se les presta más atención a los problemas de calidad de agua y escurrimientos en zonas urbanas por lo que los métodos de simulación continua son cada vez más empleados (Methods & Durrans, 2003).

3.1 El Ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es un sistema complejo de circulación ininterrumpida, ver figura 3.1, que asegura el transporte de agua en todas sus formas. Este a su vez constituye un ejemplo típico de la *ley de conservación de la materia*. Se debe destacar, que la mayor parte del agua participa constantemente en el ciclo, incluso el agua subterránea que se acumulan en depósitos por tiempos variables (Juan Vich, 1996).

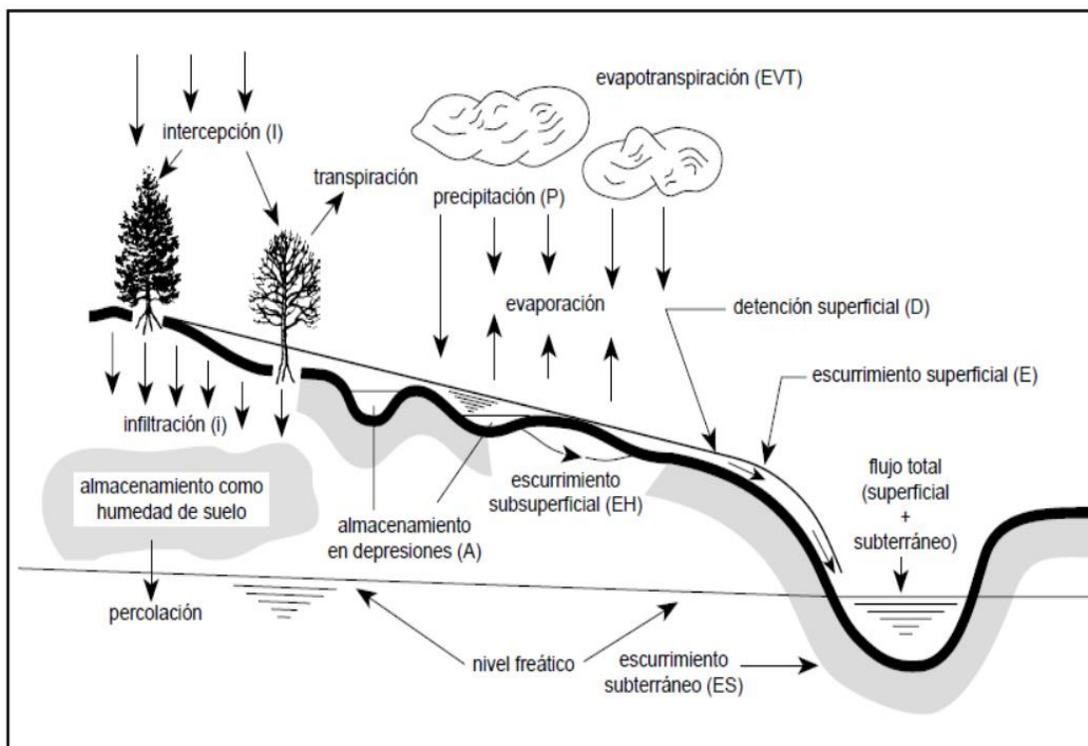


Figura 3.1. Representación esquemática del ciclo del agua a nivel de la cuenca hídrica (Juan Vich, 1996).

A lo largo de la historia el hombre ha sido un modificador del ciclo del agua con su intervención, pues produce cambios, alteraciones de energías, modificaciones en las corrientes de las aguas y alteraciones a un sistema más amplio que el ser humano no logra visualizar en un futuro a largo plazo, así como las consecuencias que pueden ocasionar estas actividades desde su perspectiva limitada del entorno que le rodea (UNESCO-ROSTLAC, 1986), ver figura 3.2.

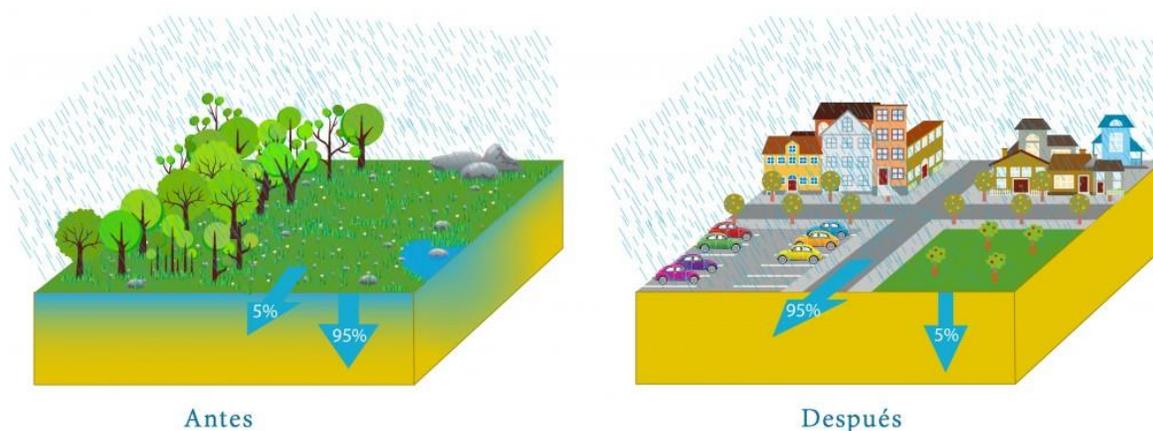


Figura 3.2. Efectos en la escorrentía e infiltración ocasionado por la urbanización. Fuente: <http://www.hidrologiasostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds/>



Con referencia a la UNESCO-ROSTLAC (1986) las principales características del ciclo hidrológico son las siguientes:

- a) El agua cumple un ciclo en la naturaleza, se encuentra en permanente movimiento, desplazándose de un almacenamiento a otro y cambiando de estado físico.
- b) El ciclo es una sucesión de transferencias y acumulaciones en distintos medios, por ejemplo, un río transporta o transfiere agua de un lugar a otro; el mar es la acumulación de agua; la evaporación del agua de mar hacia la atmósfera es una transferencia; entre otros.
- c) Los flujos entre los almacenamientos no son regulares, ni constantes, tanto a través del tiempo como en su distribución espacial.
- d) El agua constituye un vehículo fundamental de transporte e intercambio de nutrientes para los seres vivos.
- e) El flujo de agua (en estado líquido o sólido) sobre la superficie genera cierta energía, que se traduce en un trabajo que modifica el paisaje, convirtiendo la superficie en cauces naturales.

3.1.1 Características básicas de la lluvia

Para el diseño ingenieril, Methods & Durrans, (2003) consideran que las características más importantes de la lluvia son:

- La altura o volumen de lluvia durante un intervalo de tiempo en específico (o de manera equivalente, su intensidad promedio durante ese intervalo de tiempo).
- Duración de la lluvia.
- El área o zona sobre la que se produce la precipitación.
- La distribución temporal y espacial de la lluvia dentro de la tormenta.
- El intervalo de frecuencia con que se presenta en promedio la lluvia.

3.1.1.1 Intensidad y altura

La intensidad de lluvia representa la tasa a la cual ocurre la lluvia. Así la intensidad media durante un período es la altura de lluvia dividido por el tiempo durante el cual se produce la precipitación y la altura de precipitación es la cantidad de lluvia, en pulgadas o milímetros, que cae dentro de un periodo de tiempo.



3.1.1.2 Distribución temporal

La distribución temporal de las precipitaciones, se comprende como una visualización de la variación de la intensidad de las precipitaciones en el tiempo para un evento, ver figura 3.3.

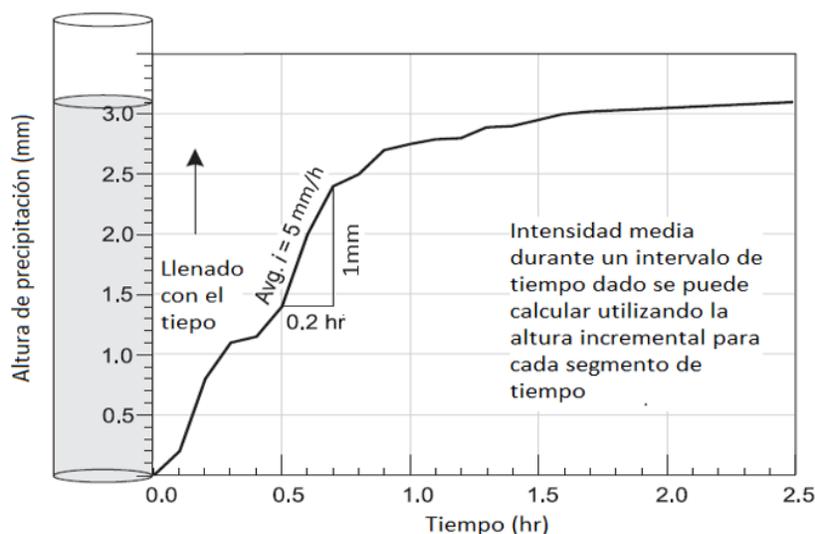


Figura 3.3. Distribución temporal de la lluvia (Methods & Durrans, 2003).

3.1.1.3 Distribución espacial

La distribución espacial de la precipitación se refiere a cómo llueve en una cuenca, si las alturas de lluvia o intensidades en otros lugares es diferente cantidad que cae o varía para el mismo evento. Por otra parte, el aspecto espacial de la lluvia en la práctica para cuencas pequeñas se considera, que la variación espacial no es un aspecto relevante y algunas ocasiones se pueden despreciar, cosa contrario con las cuencas grandes.

3.1.1.4 Intervalo de recurrencia

La probabilidad de que un evento de lluvia con cierta magnitud se produzca en un año determinado se expresa en términos de intervalo de recurrencia (también llamado período de retorno o la frecuencia de eventos). El intervalo de recurrencia es el promedio de tiempo que debe transcurrir entre eventos de lluvia de magnitud igual o mayor y está en función de la ubicación geográfica, la duración y altura de la precipitación. Aunque el intervalo de recurrencia se expresa en años, en realidad se basa en la probabilidad de excedencia de un evento de tormenta, que es la probabilidad de que la magnitud de una tormenta se igual o superior a la observada.



3.1.2 Estimación de la lluvia

De acuerdo con UNESCO-ROSTLAC, (1986) se denomina precipitación al agua que proviene de la humedad atmosférica y cae a la superficie terrestre, principalmente en estado líquido (lluvia) o sólido (nieve o granizo). Su evaluación requiere el estudio y el análisis de los siguientes puntos:

- Errores en su medida.
- Consistencia y ajuste de las estadísticas.
- Ampliación de los registros.
- Evaluación de la precipitación espacial.
- Régimen pluviométrico de un lugar, zona o región.

3.1.2.1 Confiabilidad de la estimación de la lluvia

Comúnmente las lluvias son la única fuente de humedad que llega a la superficie terrestre, la precisión en su medición y su evaluación es determinante en el resultado de las simulaciones para la obtención de escurrimientos, ya que este parámetro junto con la infiltración se puede considerar como los más importantes en la intervención del proceso de lluvia-escurrimiento (UNESCO-ROSTLAC, 1986).

A pesar de la importancia de este parámetro, no es posible aún estimar con un alto grado de exactitud, ya que la obtención de los valores puntuales obtenidos en el instrumento de medición se ve afectada por dos tipos de errores: la media puntual y la evaluación espacial de la precipitación registrada sobre una superficie (UNESCO-ROSTLAC, 1986).

3.1.2.1.1 Error en la medida puntual

La principal causa de error en la medición de la precipitación es la acción del viento que produce una turbulencia que desvía la trayectoria de las gotas de lluvia o copos de nieve registrando valores que tienen error por defecto, aumentado conforme incrementa la velocidad del viento y disminuye la velocidad de caída de la gota de agua o copo de nieve.

De acuerdo a los estudios realizados en Europa por Sokolov, (1976) el error o coeficiente de deficiencia puede variar, para la lluvia, desde un 20% para velocidad del viento de 16 Km/h hasta un 50% para velocidades de 80 Km/h. No obstante, en el caso de que los instrumentos tengan pantalla protectora de viento la captación de lluvia puede aumentar un 20%.



3.1.2.1.2 *Error de la evaluación espacial*

Para evaluar la precipitación caída en una zona de la superficie terrestre, es indispensable basarse en las medidas puntuales registradas en los distintos instrumentos que constituyen la red pluviométrica.

La exactitud de dicha evaluación depende esencialmente de la densidad de la red y de la calidad de los instrumentos, instalaciones y observadores. Por otra parte, la densidad de la red y la calidad de los instrumentos sobre la cuenca dependerá de la zona de estudio y del fin que persigue.

La densidad de la red de los instrumentos está en función de las siguientes condiciones:

- Si el origen de las precipitaciones que se producen son de origen frontal que abarcan grandes extensiones de superficie, la red puede ser menos densa respecto a las de origen convectivo, que generalmente son más locales que las anteriores.
- De acuerdo al relieve de la zona, en una zona plana se necesita una red menos densa para detectar las variaciones de precipitación que se producen en ella.

3.1.2.2 *Análisis de la confiabilidad de los registros*

Otro punto importante al manejar series de registros de precipitación es la calidad y confiabilidad de la información, para ello existen diferentes técnicas estadísticas que son útiles para evaluar la certeza de los datos. Escalante & Reyes, (2008) en su capítulo siete mencionan que las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media, desviación estandar y los coeficientes de relación serial se ven afectados cuando la serie de datos presenta tendecia en la media o en la varianza o cuando ocurren saltos negativos o positivos, asimismo señalan que la falta de homogeneidad de los datos es inducida por las actividades humanas y por los procesos naturales súbitos. También detallan tres pruebas de homogeneidad que se realizan a una serie de datos, tales como: prueba estadística de Herlmert, t de Student y Cramer.



3.2 Enfoques para el análisis del pronóstico y diseño de tormentas.

Existen distintos enfoques para el análisis de la lluvia, entre ellos se encuentran los métodos determinísticos, probabilísticos, conceptuales y paramétricos (Lagrost et al., 2005). En esta investigación nos enfocaremos al método probabilístico, este método está basado en los criterios y propiedades de la probabilidad, también se clasifican en dos tipos: los estadísticos y estocásticos. Ambos trabajan con datos observados, el desarrollo de modelos estadísticos requieren invariablemente el uso de datos, mientras que los modelos estocásticos se centran en las características aleatorias del proceso hidrológico.

3.2.1 Enfoque estadístico

3.2.1.1 Hietogramas de diseño

El hietograma es la curva de variación de la intensidad o precipitación en el tiempo y sirve para determinar la distribución de la lluvia media registrada en una cuenca o superficie hidrológica en un determinado tiempo, también utilizados para estimar escurrimientos en cuencas, es decir, la obtención de hidrogramas de diseño que tienen como objetivo particular evaluar las obras hidráulicas. Existen varios métodos para determinar hietogramas de diseño como son: las curvas IDF (Intensidad Duración y Frecuencia), el estadístico, método Tholin y Keifer (1959) y otros.

Por otra parte, es preciso mencionar que para fines de practicidad en este trabajo solo se detallará el método Tholin y Keifer (1959).

El método diseñado por Tholin y Keifer en el año de 1959, considera fundamental la forma típica de las curvas masas acumuladas de precipitación que se han registrado en el pasado, es decir se recopila la información de las principales tormentas que han ocurrido durante un tiempo lo suficientemente confiable, en las estaciones pluviográficas de la cuenca o región de análisis. En una fase posterior, con la información disponible se efectúa un análisis espacial para detectar si la distribución de las curvas masas de precipitación, registradas en la red de estaciones de medición, presenta un comportamiento homogéneo y/o heterogéneo (García, 2006).

Ahora bien, para detectar si la distribución de las curvas masas de precipitación en la región de análisis presenta un pauta homogénea o heterogénea se lleva a cabo un análisis gráfico y estadístico de las curvas masas de precipitación.



En el análisis de tipo gráfico se dibujan en forma conjunta la totalidad de las curvas masas de precipitación y con el apoyo de observaciones se detecta su comportamiento a lo largo del tiempo. Si la distribución de las curvas masas no presenta grandes variaciones, se concluye que hay consistencia y homogeneidad y en caso contrario hay una heterogeneidad en los datos (García, 2006).

Por su parte, el objetivo del análisis estadístico es verificar la consistencia de los datos y para tal efecto se calculan los parámetros estadísticos de la media, desviación estándar y coeficiente de variación, de cada uno de los valores discretos de lluvia asociados a 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100 y 120 minutos, los cuales integran las curvas masas medias de precipitación (García, 2006).

Se considera que los datos son homogéneos, cuando el parámetro estadístico del coeficiente de variación de cada uno de los valores discretos de las curvas masas de lluvia, asociados a las diferentes duraciones, es de una magnitud menor o igual al 15%. Ahora bien, en el caso de una heterogeneidad de los datos se proceda a regionalizar la cuenca de estudio, es decir se agrupan las curvas masas de precipitación en áreas donde su distribución sea homogénea (García, 2006).

3.2.2 Enfoque estocástico.

El análisis de series de datos ha sido satisfactoriamente aplicado en diferentes campos como la geología, ingeniería oceánica, sismología, climatología y entre otros (Machiwal & Kumar Jha, 2012). En la hidrología, el análisis de serie ha permitido detectar ciertas características esenciales en el comportamiento de la lluvia, además es una parte importante en la implementación de modelos matemáticos basados en la estadística que permiten la generación de series sintéticas de precipitación a diferentes escalas en el tiempo, tales como la resolución anual, mensual, diaria y horaria. Los primeros inicios de estos métodos fueron al principio de la década de los sesenta, aunque la literatura revisada es extensa, solo se menciona algunos de los desarrollos e investigaciones relevantes en este trabajo, ver figura 3.4.

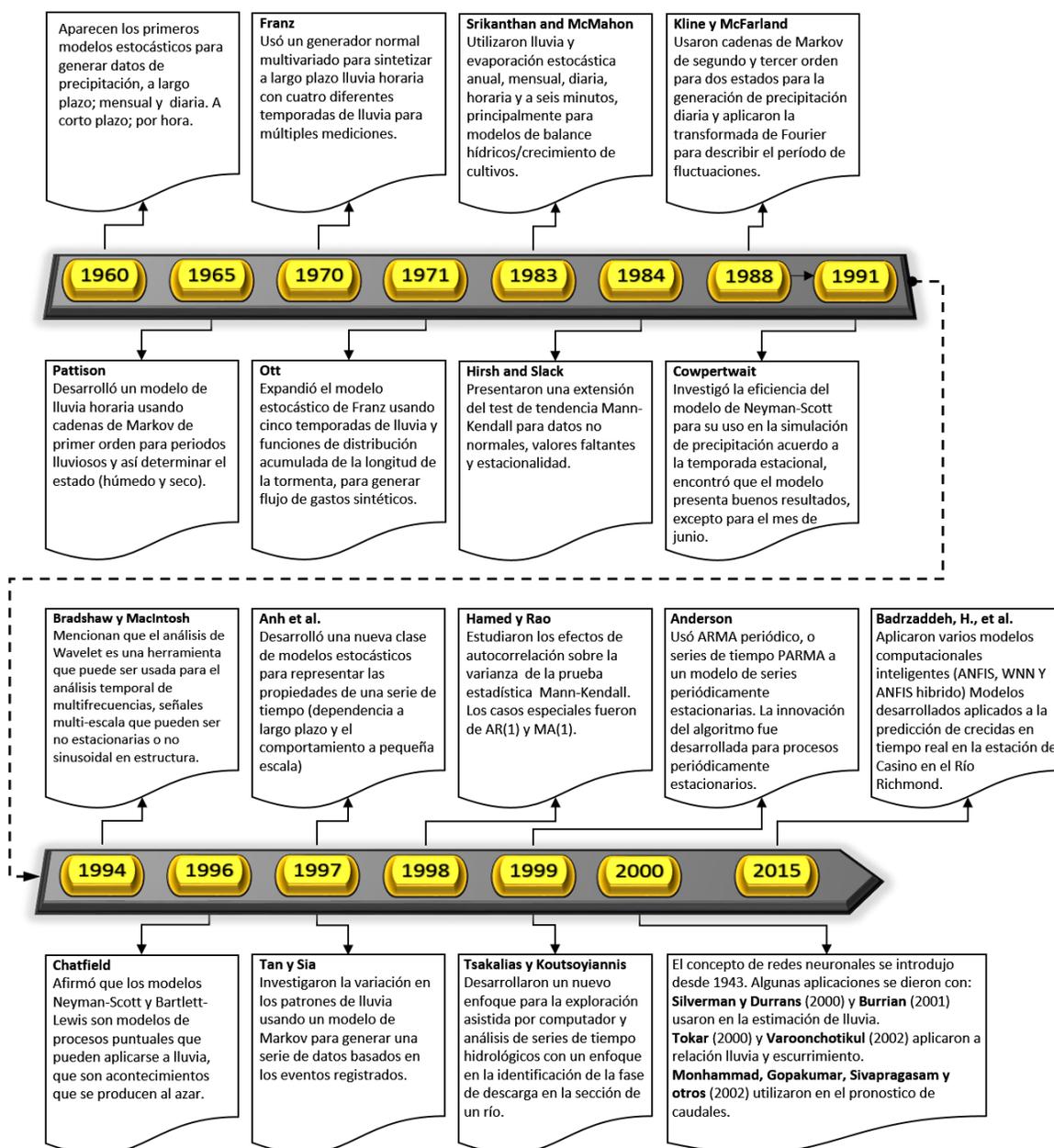


Figura 3.4. Avances e investigaciones aplicada a la generación de lluvia mediante el análisis de series.

3.2.2.1 Aplicación de series de tiempo en hidrología

En este subtema se hace referencia a los apuntes de Escalante (2014) para la definición y descripción de las series de tiempo. Supóngase que en una cuenca se lleva el registro de precipitación en sitios alejados entre sí. Si $X_i(t)$ es el registro de las lluvias en el sitio i , los registros correspondientes a los distintos sitios tendrán una forma como se muestra en la figura 3.5.

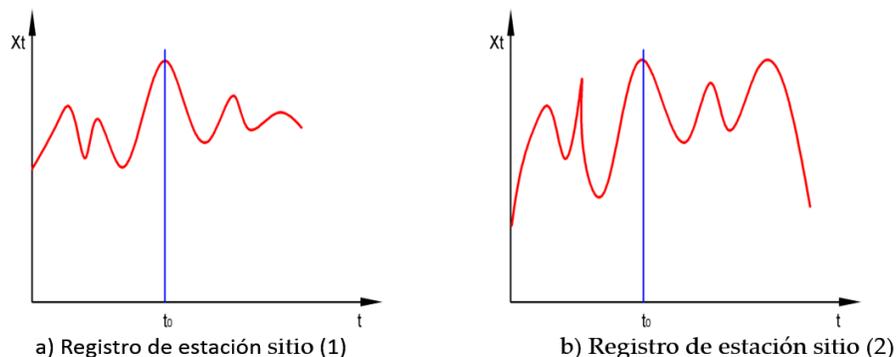


Figura 3.5. Series de tiempo.

Si para un tiempo cualquiera " t_0 " se toman las lluvias registradas en los distintos sitios $\{X_1(t_0), X_2(t_0), \dots, X_n(t_0)\}$ los valores correspondientes estarán caracterizados por su función de distribución $F(x_0)$. Si el proceso se repite para tiempos: t_1, t_2, \dots, t_n . las funciones de distribución $F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_t), \dots, F(x_n)$ serán en general distintas, esto es la función de distribución de la variable aleatoria X será función del instante t que se considera en un proceso como el anterior se le denomina estocástico.

Por otra parte, el proceso de conversión de la lluvia en escurrimiento depende del estado de la cuenca al inicio del proceso (grado de saturación de los suelos, almacenamiento en acuíferos) lo que determina que el escurrimiento en un instante " t " dependa de la historia del proceso. Se dice entonces que el proceso tiene memoria y, por lo tanto, lo que ocurre en un momento dado depende en cierto grado de lo que ocurrió en los instantes previos.

Este mecanismo al que se debe la existencia de la persistencia o componente autorregresiva es evidente en el proceso del escurrimiento. Sin embargo, en menor grado se presenta también con la precipitación y la evaporación.

Si la cuenca sufre modificaciones graduales debidas a urbanización o deforestación, éstas se manifiestan en el escurrimiento, que presenta una tendencia a crecer o a decrecer con el tiempo. Finalmente, aun pudiendo conocer con precisión la tendencia, las variaciones cíclicas y la dependencia del proceso con su historia, quedarían algunas variaciones, imposibles de explicar en términos de relaciones causa-efecto.

Estas variaciones pueden atribuirse a fenómenos completamente casuales y son adicionadas a la serie de tiempo mediante una componente estocásticas. Las componentes principales de las series de tiempo son:



- Tendencia
- Periodicidad
- Componente autorregresiva

El concepto de generación de muestras sintéticas es usado para la etapa de planeación (largo plazo) y el concepto de pronóstico es usado para la etapa de operación (corto plazo).

3.2.2.1.1 Características básicas de una serie de tiempo

$$y_t = \frac{x_t^\lambda - 1}{\lambda} \quad (3.1)$$

$$y_t = \ln x_t \quad (3.2)$$

Donde:

x_t Serie registrada

y_t Serie normalizada.

$$Z_t = y_t - \bar{y} \quad (\text{series anuales}) \quad (3.3)$$

$$Z_t = \frac{y_t - \bar{y}}{S_y} \quad (\text{series periodicas}) \quad (3.4)$$

Donde:

Z_t Serie estandarizada.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n x_t \quad (3.5)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n y_t \quad (3.6)$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \quad (3.7)$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 \quad (3.8)$$

$$g = \frac{N \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^3}{(N-1)(N-2)S^3} \quad (3.9)$$



Función de autocovarianza: Mide el grado de dependencia lineal (auto-dependencia) de la serie de tiempo.

La autocovarianza C_k entre x_t y x_{t+k} es:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad 0 \leq k < N \quad (3.10)$$

Dónde:

C_k Autocovarianza de retraso k

Una medida adimensional de la dependencia lineal se obtiene dividiendo C_k por C_0

$$r_k = \frac{C_k}{C_0} = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (3.11)$$

Dónde:

r_k Coeficiente de autocorrelación de retraso k

3.2.2.1.2 Características complejas de una serie de tiempo (periódicas)

$$x_{v,\tau} \quad (3.12)$$

Dónde:

$v =$ Denota el año

$\tau =$ Periodo $1, \dots, \omega$

$\omega =$ número total de periodos

$$y_{v,\tau} = \ln x_{v,\tau} \quad (3.13)$$

$$Z_{v,\tau} = \frac{y_{v,\tau} - \bar{y}_\tau}{S_\tau} \quad (3.14)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^n x_{v,\tau} \quad (3.15)$$

$$S_\tau^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N (x_{v,\tau} - \bar{x}_\tau)^2 \quad (3.16)$$

$$g_\tau = \frac{N \sum_{v=1}^n (x_{v,\tau} - \bar{x}_\tau)^3}{(N-1)(N-2)S_\tau^3} \quad (3.17)$$

$$r_{k,\tau} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^{N-k} (x_{v,\tau} - \bar{x}_\tau)(x_{v,\tau-k} - \bar{x}_{\tau-k})}{S_\tau S_{\tau-k}} \quad (3.18)$$



Cuando $\tau - k < 1$ se deben remplazar los términos:

$$\frac{1}{N} \text{ por } \frac{1}{N-1}$$

$$v = 1 \text{ por } v = 2$$

$$x_{v,\tau-k} \text{ por } x_{v-1,\omega+\tau-k}$$

$$x_{\tau-k} \text{ por } x_{\omega+\tau-k}$$

$$S_{\tau-k} \text{ por } S_{\omega+\tau-k}$$

3.2.2.1.3 Características de las series de tiempo bivariadas

$$r_k^{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t^{(i)} - \bar{x}_t^{(i)})(x_{t+k}^{(j)} - \bar{x}_{t+k}^{(j)})}{\left[\sum_{t=1}^{N-k} (x_t^{(i)} - \bar{x}_t^{(i)})^2 \sum_{t=1}^{N-k} (x_{t+k}^{(j)} - \bar{x}_{t+k}^{(j)})^2 \right]^{1/2}} \quad (3.19)$$

Dónde:

$\bar{x}_t^{(i)}$ Es la media de los primeros $N - k$ valores de la serie i

$\bar{x}_{t+k}^{(j)}$ Es la media de los últimos $N - k$ valores de la serie j

Para n series de tiempo es común representar la correlación por medio de una matriz

$$\hat{M}_k \begin{bmatrix} r_k^{11} & r_k^{12} & - & - & r_k^{1n} \\ r_k^{21} & r_k^{22} & - & - & r_k^{2n} \\ - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - \\ r_k^{n1} & r_k^{n2} & - & - & r_k^{nn} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Donde:

r_k^{ij} Se calcula con la ecuación anterior

Cuando se trata con series periódicas la estructura de la dependencia periódica entre dos series $x_{v,\tau}^{(i)}$ y $\bar{x}_{v,\tau}^{(j)}$ es determinada por:

$$r_{k,\tau}^{ij} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (x_{v,\tau}^{(i)} - \bar{x}_\tau^{(i)})(x_{v,\tau+k}^{(j)} - \bar{x}_{\tau+k}^{(j)})}{S_\tau^{(i)} S_{\tau+k}^{(j)}} \quad (3.21)$$



3.2.2.1.4 Modelos estocásticos

Los modelos estocásticos en la predicción de eventos tal como la precipitación tienen como objetivo representar las características estadísticas más relevantes de las series históricas (Ortiz, 2012). Además, en hidrología los modelos estocásticos comúnmente usados son: modelos aleatorios puros (o ruido blanco), modelos autorregresivos (AR), modelos de media móvil (MA), modelos autorregresivos de media móvil (ARMA) y los modelos autorregresivos con media móvil integrados (ARIMA) (Machiwal & Kumar Jha, 2012). También, es relevante mencionar que la aplicación de algunos de los métodos puede hacerse para una variable (métodos univariados) y para dos o más variables en el mismo proceso (métodos multivariados).

Por cuestiones de simplicidad en este trabajo solo se limitó a trabajar con un modelo multivariado MAR(P) ya que el propósito de esta investigación no es evaluar todos los modelos de pronósticos existentes. Para más información de la descripción detallada acerca de las ecuaciones, procedimientos y componentes de los otros modelos mencionados en este apartado, se aconseja consultar a Escalante, 2014; Machiwal y Kumar Jha, 2012; Salas, Delleur, Yevjevich, y Lane, 1980; Pankratz, 1983; y Kottegoda, 1980.

3.2.2.1.4.1 Modelos Multivariados Periódicos MAR (P) Periódicos

El análisis multivariado trata de un conjunto de métodos los cuales pueden analizar simultáneamente la relación existente entre dos o más variables correlacionadas. Kendall (1980) define “Análisis multivariado como la rama del análisis estadístico concerniente con las relaciones de conjuntos de variables dependientes”.

Por otra parte, cuando se analizan u observan distintas características o variables de un mismo fenómeno, evento o experimento entre otros, estas variables en la mayoría de los casos se encuentran correlacionadas, en ocasiones realizar un tratamiento de los datos con métodos univariados conlleva a interpretaciones erróneas de los resultados, debido a que se ignora la correlación o interdependencia que pueda existir entre las variables.

En este capítulo se mencionaron algunas de las propiedades de las series de tiempo multivariadas, por lo que en este apartado solo se muestran algunos de los parámetros estadísticos, así como el modelo matemático para el pronóstico estocástico de series multivariadas.



Para una serie:

$$Z_{v,\tau} = \frac{y_{v,\tau} - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \quad (3.22)$$

a) MAR (P) para coeficientes constantes

Se convierte en un AR (1)

$$Z_t = A_1 Z_{t-1} + B \varepsilon_t \quad (3.23)$$

b) MAR (P) para coeficientes periódicos

$$Z_{v,\tau} = A_{1,\tau} Z_{v,\tau-1} + B_\tau \varepsilon_{v,\tau} \quad (3.24)$$

Para la serie con coeficientes periódicos:

$$\hat{A}_{1,\tau} = \hat{M}_{1,\tau} \hat{M}_{0,\tau-1}^{-1} \quad (3.25)$$

$$\hat{B}_\tau \hat{B}_\tau^T = \hat{M}_{0,\tau} - \hat{M}_{1,\tau} \hat{M}_{0,\tau-1}^{-1} \hat{M}_{1,\tau}^T \quad (3.26)$$

Las matrices se obtienen con:

$$\hat{M}_{k,\tau} = \begin{bmatrix} r_{k,\tau}^{11} & r_{k,\tau}^{12} & \dots & r_{k,\tau}^{1n} \\ r_{k,\tau}^{21} & r_{k,\tau}^{22} & \dots & r_{k,\tau}^{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{k,\tau}^{n1} & r_{k,\tau}^{n2} & \dots & r_{k,\tau}^{nn} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$r_{k,\tau}^{i,j} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (x_{v,\tau}^{(i)} - \bar{x}_\tau^{(i)}) (x_{v,\tau-k}^{(j)} - \bar{x}_{\tau-k}^{(j)})}{S_\tau^{(i)} S_{\tau-k}^{(j)}} \quad (3.28)$$



Dónde:

$\bar{x}_{\tau}^{(i)}$ y $\bar{x}_{\tau-k}^{(j)}$ Son las medias periódicas en los tiempos τ y $\tau - k$.

$S_{\tau}^{(i)}$ y $S_{\tau-k}^{(j)}$ Son las desviaciones estándar en los tiempos τ y $\tau - k$

Cuando $\tau - k < 1$ se reemplazan los términos:

$$\frac{1}{N} \rightarrow \frac{1}{N-1} \quad (3.29)$$

$$\nu = 1 \rightarrow \nu = 2 \quad (3.30)$$

$$x_{\nu, \tau-k}^{(j)} \rightarrow x_{\nu-1, \omega+\tau-k}^{(j)} \quad (3.31)$$

$$\bar{x}_{\tau-k}^{(j)} \rightarrow \bar{x}_{\omega+\tau-k}^{(j)} \quad (3.32)$$

$$S_{\tau-k}^{(j)} \rightarrow S_{\omega+\tau-k}^{(j)} \quad (3.33)$$

CAPÍTULO 4

CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE DRENAJE URBANO

Desde la perspectiva más general la *calibración* se define como: “la comparación de un estándar de medición, o de un instrumento, con un estándar o equipo de mayor exactitud, a fin de detectar y cuantificar imprecisiones y reportarlas o eliminarlas mediante un ajuste” (EPA, 2013).

Con referencia al siguiente enunciado “La calibración del modelo consiste en ajustar los valores de los parámetros con el objetivo de obtener coincidencia satisfactoria entre los valores de las variables producto de las simulaciones del modelo con los medidos en el sistema real” (Alcocer, 2007).

Bustamante, (2008) la expresa como: “El objetivo de la calibración consiste en minimizar la diferencia entre las respuestas observadas del sistema y las respuestas simuladas por el modelo utilizado. La representación matemática de esta diferencia es lo que se conoce como función objetivo”.

De acuerdo con lo anterior, el procedimiento de calibración es una parte importante en los procesos de simulación de drenaje urbano, puesto que permite estimar el nivel de confiabilidad de un modelo respecto a las mediciones observadas en un sitio de estudio. Además, esto se desarrolla típicamente a través de tres etapas: primero, recopilación de información (fisiografía de la zona de estudio, datos de lluvia, hidrometría y otros); segundo, estimación de los parámetros de modelación; y tercero, simulación de entrada y salida con la elección de parámetros seleccionados (Boyle, 2000) ver figura 4.1.

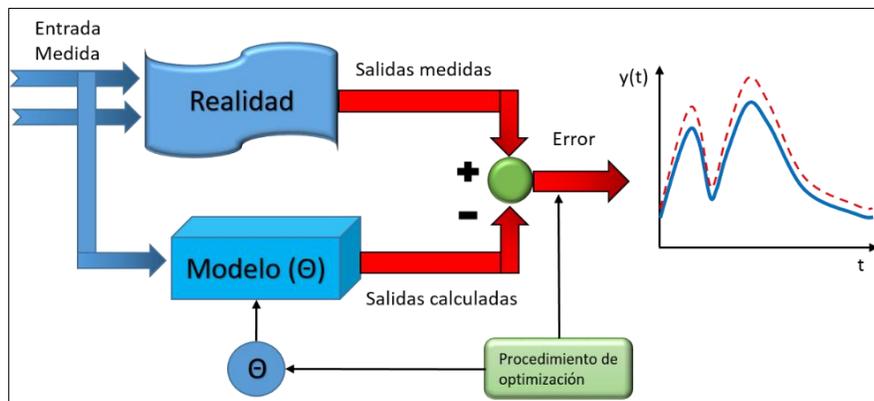


Figura 4.1. Estrategia usada para la calibración de un modelo (Gupta, Sorooshian, Hogue, & Boyle, 2003).



Por otra parte, para llevar a cabo la calibración también es importante seleccionar el tipo de modelo a utilizar, que será con base en el detalle de simulación requerido, que de acuerdo con Mancipe M, et al., (2013) pueden ser simulados como agrupados, estos tipos de modelos simplifican la cantidad de los datos de entrada y esfuerzo para calibrar, mientras que modelos semidistribuidos representan mayor dificultad y costo computacional en la simulación, pero ofrecen mejores resultados al momento de calibrar el modelo.

Además, la calibración de los modelos del proceso lluvia-escurrimiento en los modelos puede ser de un evento simple (registros cortos de lluvia) o de una serie continua de eventos, por ejemplo, un registro anual de lluvia sobre una cuenca. La calibración de un evento simple proporciona mejor tiempo en el pico y la forma general del hidrograma, estas dos características permiten que el proceso calibración sea más rápido, al mismo tiempo no requieren de una gran cantidad de datos observados en comparación a los de calibración continua. Sin embargo, la calibración de un evento continuo es más preciso en la estimación del volumen de escurrimiento (Mancipe et al., 2013).

No obstante, en estudios realizados por Mancipe et al. (2011) encontró que en un modelo de lluvia-escurrimiento muy detallado tal como los semidistribuidos pueden ser calibrados únicamente a través de una serie de eventos con una sola tormenta representativa, siempre y cuando se ajusten las variables que representan físicamente la geometría de la cuenca.

En síntesis, de lo mencionado con antelación se puede decir que la calibración en la modelación es un proceso importante que da validez y mejora la precisión (estadísticamente reduce la dispersión) de los resultados simulados respecto a la información observada.

4.1 Técnicas de calibración

Hasta el presente existen dos formas de calibrar un modelo, ver figura 4.2, en primer lugar, está la calibración manual esta técnica se basa en la experiencia del modelador, aun así, esta técnica es usada en la actualidad. Por ultimo está la calibración automática basada en algoritmos matemáticos que tienen como fin encontrar una función objetivo que ajusta la similitud de los resultados del modelo con los datos observados. Gupta, et al., (2003) afirman que con las investigaciones pasadas se han logrado obtener resultados aceptables con la calibración automática, sin embargo, consideran que hay muchas más investigaciones por realizar, para mejorar estas



técnicas automáticas en continuo desarrollo, además estas se consideran como buenas herramientas a futuro para estimar con más precisión el escurrimiento ocasionado por las tormentas. A fin de ver algunas características entre estas dos técnicas de calibración en la tabla 4.1 se enlistan algunas de las cualidades y requerimientos de cada una.

Tabla 4.1. Características de la calibración manual y la calibración automática (Gupta et al., 2003).

Calibración Manual	Calibración Automática
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conocimiento y experiencia del usuario. ▪ Subjetivo (realista). ▪ Complicado y altamente laborioso. ▪ Pérdida de tiempo. ▪ Excelente resultados. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipo de computo del alto rendimiento. ▪ Objetivo (Estadística) ▪ Cálculo intensivo ▪ Ahorra tiempo ▪ Algunas veces los resultados suelen ser poco confiables.

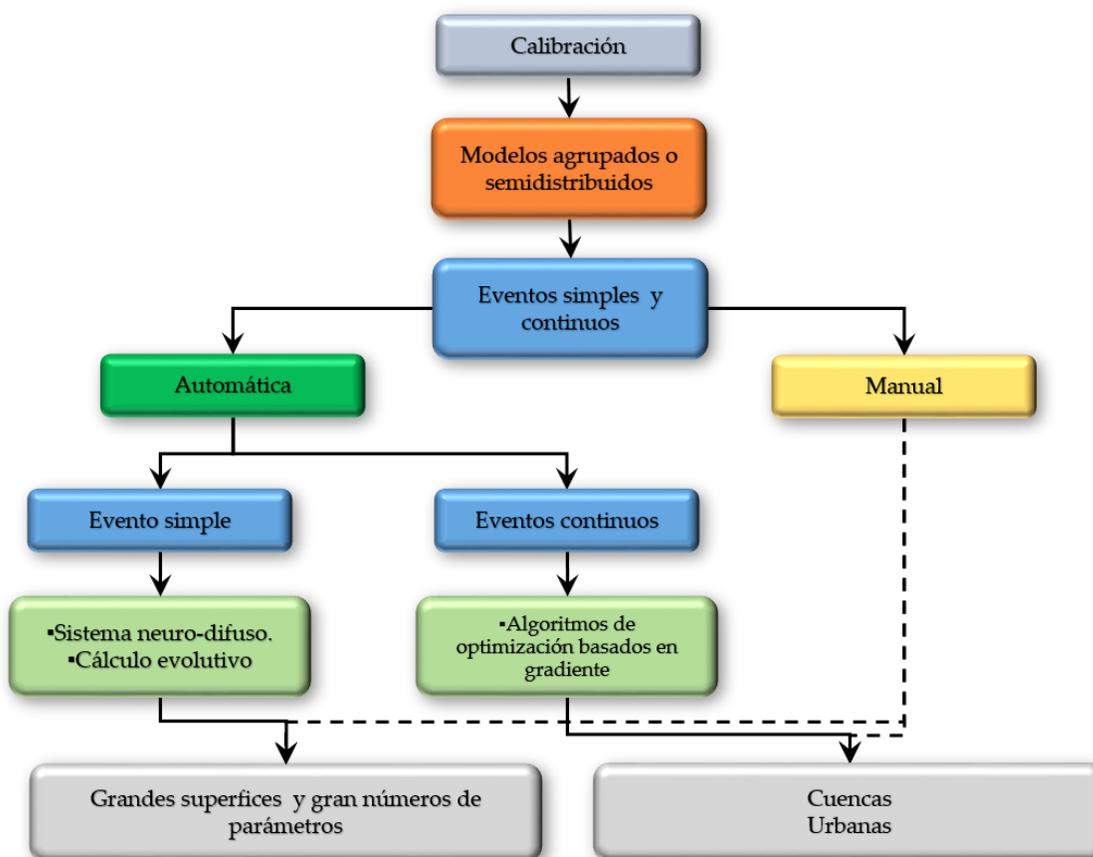


Figura 4.2. Técnicas de calibración comúnmente usadas.



4.2 Error en la modelación

De acuerdo con Knigth, et al., (2006) se presentan cuatro tipos de errores en los resultados de simulación de un modelo lluvia-escurrimiento, ver figura 4.3, descubrir cuál es el error causante del error final es un proceso complicado, ver figura 4.4, al mismo tiempo durante el pronóstico en tiempo real del caudal, cabe mencionar que es necesaria información adicional para identificar el tipo de error.

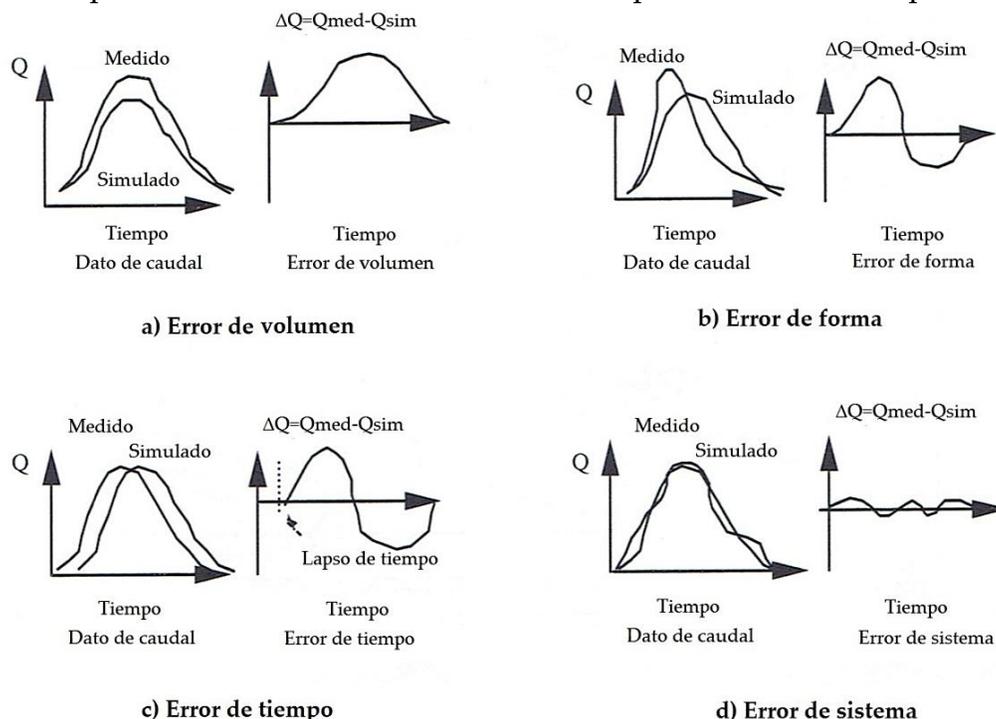


Figura 4.3. Tipos de error en los modelos de simulación lluvia-escurrimiento (Knigth et al., 2006).

Por otra parte, un aspecto que facilita o que podría ser usado para identificar la fuente del error en el modelo es contar con información de lluvia con alta resolución temporal y espacial, siempre que algunas características de las lluvias, tales como la intensidad de la lluvia, lugar de la tormenta, dirección de la tormenta puedan describir los efectos sobre la eficiencia del modelo (Knigth et al., 2006).

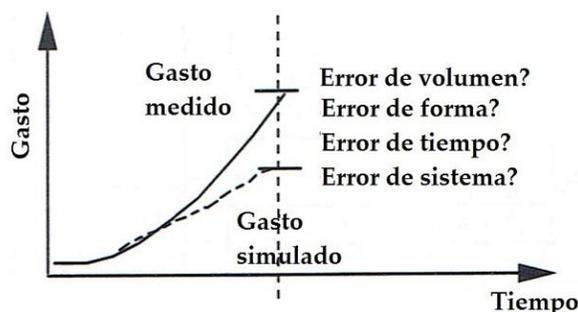


Figura 4.4. Error en tiempo real del pronóstico (Knigth et al., 2006).



4.2.1 Fuentes de incertidumbre y error en la estructura del modelo

De acuerdo con Beven & Binley, (1992) existen varias fuentes de error en cualquier modelo de estudio: error debido a las condiciones de frontera mal definidas y los datos de entrada; error asociado con mediciones utilizadas en la calibración del modelo y el error debido a deficiencias en la estructura del modelo. En consecuencia la influencia del error de cualquier método se vera siempre mostrada por las fuentes de error ya mencionadas durante el proceso de la modelación, es decir que el error de la incertidumbre se propaga hasta los resultados finales del modelo.

4.3 Medida de la verosimilitud

En los subtemas anteriores de este capítulo, se ha mencionado la importancia de la elección del modelo, las técnicas para calibrar, así como las ventajas que tienen uno sobre otro y los tipos de errores que se producen al modelar. En este subtema se trata acerca de las diferentes maneras de medir la eficiencia o similitud, o dicho de otra manera *medir el error* de los resultados de un modelo respecto a los datos observados en la realidad.

Deben señalarse, primeramente, dos conceptos importantes para introducir a las distintas formas de medir el error: la exactitud y precisión. La exactitud mide la eficiencia de un modelo; es decir, la similitud entre los valores simulados y los observados, se refiere a cuán cerca del valor real se encuentra el valor medido. En términos estadísticos, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. Cuanto menor es el sesgo más exacto es una estimación. Cuando se expresa la exactitud de un resultado, se expresa mediante el error absoluto que es la diferencia entre el valor experimental y el valor verdadero, estos se encuentran siempre dentro de un rango alrededor de la medida observada. Por otra parte, la precisión mide la frecuencia de repetitividad del experimento; es decir, la similitud entre valores simulados. Un modelo preciso arroja resultados similares, pero estos no son necesariamente cercanos a la medida observada (Cabrera, 2012).

En relación a lo anterior, los errores que se presenta al medir como son: el error aleatorio y sistemático, que a su vez están relacionados con los conceptos de exactitud y precisión, Cabrera (2012) menciona que: “Los errores aleatorios son errores propios de fluctuaciones aleatorias de la magnitud medida o del proceso de medición y no son controlables. Debido a que son aleatorios, la medición realizada se encontrará alrededor de la medida real, muy característico de las medidas exactas. Por otro lado, los errores sistemáticos son errores que se repiten permanentemente y aproximadamente en la misma magnitud; esta característica hace que todas las



mediciones se encuentren desviadas en un mismo valor de la medida real (como las medidas precisas). De esta manera, si se determina el valor sistemático, es fácil corregir la medida y obtener medidas mucho más exactas". Estos errores pueden ser de origen por defecto del instrumento de medición, el proceso de medición, procesamiento de la información medida y otros.

4.3.1 Criterios para medir la verosimilitud

Desde la perspectiva más general, el proceso de calibración de un modelo normalmente se centra en el criterio de la exactitud y para medir la exactitud existen distintos métodos, tales como se mencionan en las diversas investigaciones citadas por ejemplo, Motovilov, Gottschalk, Engeland, & Rodhe (1999) usaron el criterio NS y R^2 ; mientras Bárdossy (2007) optó por NS; en cuanto a Camilo Múnera & Francés (2009) utilizaron NS y RMSE; para Barros, Bolaño, Caicedo, & Castro (2009) el RMSE; Muñoz Arriola, et al. (2011) aplicaron tres: NS, EVA (Error del volume anual) y DPP (Diferencia del promedio de los picos); Mancipe et al. (2013) emplearon RVE y NS; y recientemente (Badrzadeh, Ranjan, & Jayawardena 2015) obtuvieron resultados aceptables con NS y RMSE.

Cabe considerar que en este trabajo por motivos de simplicidad solo se describirán tres criterios para evaluar la verosimilitud en los modelos, aclarando que la elección de ellos no da por hecho que sean los mejores criterios.

4.3.1.1 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Este criterio es uno de los más usado en los distintos campos de investigación (Magaña, Bâ & Guerra, 2013) y se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (4.1)$$

Magaña, et al., (2013) menciona que el coeficiente E establece la relación entre el comportamiento real y el modelado. El dominio valor del coeficiente E es de $-\infty$ a 1 donde la unidad representa simulación perfecta, esto quiere decir que la varianza de los errores es cero; vale cero cuando la varianza de los errores es igual a la varianza observada, lo cual significa que el modelo produce estimaciones del promedio de las observaciones en todos los intervalos. Los valores negativos indican un desempeño peor del modelo.



De acuerdo a Molnar 2011 se presentan algunos valores sugeridos para la toma de decisiones en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de referencias para el criterio Nash-Sutcliffe (Molnar, 2011).

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

4.3.1.2 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}} \quad (4.2)$$

Donde Q_{sm} es el gasto simulado, Q_i representa el gasto medido. El rango de valores que puede tomar va desde *cero* hasta el infinito (positivo). El *cero* corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

4.3.1.3 Coeficiente de determinación R^2

Este coeficiente tiene como finalidad indicar porcentaje del ajuste que se ha conseguido con el modelo lineal, es decir el porcentaje de la variación de Y que se explica a través del modelo lineal que se ha estimado, es decir a través del comportamiento de X . A mayor porcentaje mejor es nuestro modelo para predecir el comportamiento de la variable Y

En este sentido se comprende que la medida de bondad de ajuste de este criterio, mide la proximidad de ajuste de la recta de regresión a la nube de puntos (observaciones hechas).

En el caso en que las observaciones sean una muestra aleatoria proveniente de una población, se interesa realizar inferencias sobre la misma.

$$y = \beta_1 + \beta_2 x + \varepsilon \quad (4.3)$$

De acuerdo a los trabajos hechos por Motovilov et al. (1999) y Popov (1979) en el cual utilizarón un modelo que simula el proceso LL-E y basandose en datos de



observaciones diarias encontraron un rango de valores de aceptación de ajuste para los resultados de simulación respecto a la observada, tal como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores de referencias para el criterio R^2

R^2	Ajuste
< 0.36	Insuficiente
0.36 – 0.75	Satisfactorio
> 0.75	Bueno

4.4 Herramienta de calibración SRTC en PC-SWMM

Antes de describir el proceso de esta herramienta es necesario definir que es un *parámetro*, de acuerdo con la definición de Mc Graw-Hill, (2001) es “Variable que se designa en una ecuación una magnitud dada a la que se pueden asignar diferentes valores. // Variable que interviene en la ecuación de algunas familias de funciones o curvas. // Variable de entrada suministrada externamente a un programa o un procedimiento informático”.

Una vez definido lo anterior se puede decir que el método utilizado por SRTC (Sensitivity-based Radio Tuning Calibration) modulo del programa PCSWMM para la calibración del modelo se basa en un algoritmo genético (GA). William, 2005 menciona que *los GA consiste en dos operaciones principales: combinación y mutación. Es decir dos archivos de entrada con datos de escurrimiento representa los cromosomas padres, despues de completar la operación de combinación se generan varias series hijas y alguno parametros de las hijas son mutados al azar. La eficiencia de la serie hija es evaluada por su grado de conveniencia (valor). Cualquier serie hija o padre pueden ser seleccionados para llenar la proxima generación si su rendimiento es el mejor ente hijas y padres. La calibración por GA es seciencial y el proceso se detiene cuando un el valor del rendimiento es aceptable para cualquier miembro de la población alcanzada.*

El proceso de calibración en el modulo SRTC consiste en asignar un porcentaje conocido de incertidumbre en cada uno de los parámetros con los que el usuario requiere calibrar en el modelo, ver William (2005). Es por ello que es importante el análisis de incertidumbre en los parámetros de un modelo, pues resulta claro que cada zona de estudio cuenta con ciertas características particulares, tal como las fisiográficas, la ocurrencia y la intensidad del evento, y entre otros, es decir que el valor que se le atribuye a cada parámetro en el modelo es diferente para cada caso de estudio.



De tal modo habiendo establecido el porcentaje de incertidumbre en los parámetros seleccionados y definido la función objetivo para el proceso de calibración, se ejecuta la herramienta, esta realiza el análisis de simulación en la escala máxima y mínima, del valor de cada parámetro, este valor de escala máxima y mínima (valores extremos) es establecido por la herramienta de acuerdo a las ecuaciones (4.4) y (4.5) respectivamente, de acuerdo con el porcentaje de incertidumbre introducida al parámetro. En consecuencia, al terminar el análisis, el programa muestra barras de deslizamiento para observar como el parámetro afecta a los resultados obtenidos, esto con el fin de que el usuario pueda determinar el conjunto de parámetros óptimo que mejor ajuste la serie de valores simulados a la serie observada, este análisis hace que el módulo de calibración interpole linealmente entre los valores extremos para cada uno de los parámetros seleccionados.

Finalmente, el programa dentro de sus opciones permite al usuario hacer la verificación del ajuste de la serie observada con la simulada, después de haber determinado el conjunto de parámetros óptimos.

$$V_{max} = V_{actual} * (1 + V_f) \quad (4.4)$$

$$V_{min} = V_{actual} * \left(\frac{1}{1 + V_f} \right) \quad (4.5)$$

Donde V_{max} y V_{min} son los valores extremos de los parámetros en la escala alta y baja respectivamente, V_{actual} es el valor del parámetro usado en la pre-calibración del modelo PCSWMM y V_f es la fracción representativa del porcentaje de la variabilidad calculada para el rango.

4.4.1 Parámetros de calibración en PCSWMM

Como ya se mencionó en el capítulo dos, PCSWMM depende directamente del motor del software SWMM y como consecuencia ambos usan los mismos atributos y parámetros que se asigna a cuencas, conductos, almacenamientos, entre otros. Los atributos dependen de dimensiones, alturas, elevaciones y otros, por ejemplo, el ancho de una cuenca, pendiente, elevación del fondo de un canal y otros, mientras los parámetros son datos que se han obtenido de acuerdo a observaciones e investigaciones realizadas en un laboratorio o en campo para determinar un valor que represente el comportamiento de un fenómeno, tal como la infiltración del suelo, la permeabilidad, la rugosidad, por mencionar algunos. Para el modelo usado en



este trabajo solo nos enfocaremos a los parámetros hidrológicos que intervienen en el escurrimiento y a los atributos de las subcuencas, ver tabla 4.4.

Tabla 4.4 Parámetros y atributos de las subcuencas en SWMM.

Parámetros y atributos	Descripción
Área	Área de la cuenca (hectáreas o acres)
Width	Ancho característico de la trayectoria de flujo debido a la escorrentía superficial.
%Slope	Pendiente media de la cuenca en %.
%Imperv	Porcentaje de cuenca cuyo suelo es impermeable.
N-Imperv	Coefficiente n de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable sobre la cuenca.
N-Perv	Coefficiente n de Manning para el flujo superficial sobre el área permeable sobre la cuenca.
Dstore-Imperv	Altura de almacenamiento en depresión sobre el área impermeable de la cuenca.
Dstore-Perv	Altura de almacenamiento en depresión sobre el área permeable de la cuenca.
%Zero-Imperv	Porcentaje del suelo impermeable que no presenta almacenamiento en depresión.
Percent Routed	Porcentaje de escorrentía entre distintas áreas.
Infiltration	<p>La infiltración, es el proceso de precipitación que penetra en la superficie del suelo en la zona de suelo no saturado de sub-áreas de captación permeables. SWMM ofrece cinco modelos como opción en la modelación de la infiltración:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Método clásico de Horton. ▪ Método modificado de Horton. ▪ Método Green-Ampt. ▪ Método modificado de Green-Ampt. ▪ Método del número de curva.

4.4.2 ¿Cuándo se considera que un modelo está lo suficientemente calibrado?

William (2005) menciona que un modelo puede o no ser considerado suficientemente calibrado, esta restricción depende en gran medida al enfoque y objetivo del tipo de información que el modelador desee obtener en el modelo, por ejemplo, puede ser con fines de planeación o de operación. Además, no existe un estándar como tal para el cumplimiento de ciertas normas en el proceso de calibración, solo existen algunas recomendaciones referentes a los rangos de aceptación, por lo que para algunos usuarios una precisión de 25% es adecuada y otros insisten que con solo el 10% es suficiente.



Por otra parte, William (2005) considera que son tres los resultados del histograma estadístico que normalmente se analizan en la calibración tales como: el *volumen*, *gasto pico* y *tiempo hasta el pico*.

- Volumen: Esta variable llega a ser predominante cuando se está considerando retención de volumen de agua.
- Gasto pico: Se considera importante para el dimensionamiento y la estimación de la capacidad disponible de los sistemas pluviales existentes.
- Tiempo pico: Es el tiempo que transcurre desde que se inicia el escurrimiento directo hasta el pico del hidrograma.

Aunque en los párrafos anteriores no se mencione el *tirante* como variable de comparación entre los resultados de simulación y la información registrada de eventos pasados para la calibración de un modelo, es preciso señalar que esta variable se utilizará en este trabajo durante el proceso de la calibración y validación, esto se debe en gran medida a que la información de las estaciones hidrométricas disponibles en la zona de estudio únicamente miden y registran el tirante del Río Sabinal.

4.5 Validación del modelo

El proceso de validación es una extensión importante de la calibración de un modelo y tiene como objetivo comprobar el parámetro o conjunto de parámetros óptimos seleccionados y determinados durante la etapa de calibración del modelo, esto con la finalidad de comparar los resultados simulación de cualquier evento o conjunto de eventos adicionales independientes respecto a los registros u observaciones de eventos pasados y así poder establecer la precisión del modelo (William, 2005).

En apartado se muestra la metodología y todas las consideraciones que se utilizaron para realizar este trabajo, ver figura 5.3.

5.1 Integración de los modelos 1D y 2D

La integración del modelo 1D y 2D se realizó sobre un modelo digital de elevaciones LiDAR (Light Detection and Ranging) con resolución de malla de 5x5 metros, obtenido en el portal web de INEGI. El LiDAR es un sistema activo de rayos láser que emite un haz de luz sobre la superficie terrestre (pulsos) para luego recoger sus reflejos, también denominados retornos o rebotes (INEGI, 2015).

A partir de estos modelos se pueden modelar las alturas y obtener entre otros aspectos, pendientes, secciones, desniveles, áreas sujetas a inundación, generación de curvas de nivel, volúmenes de tierra, delimitación de cuencas, entre otros. Estos datos son útiles en aplicaciones de cartografía topográfica, animaciones en 3D, para simuladores de vuelo, estudios hidráulicos e hidrológicos, ingeniería civil, gestión de zonas de costa, estudios generales de vegetación (INEGI, 2015).

Para el modelo SWMM 1D se construyeron las secciones del río a cada veinte metros, obtenidas del modelo digital de elevaciones LiDAR. También se requirió la incorporación de puentes y estructuras hidráulicas existentes en el sitio.

Para el modelo PCSWMM 2D, el mallado utilizado consistió en una malla rectangular variada en tamaños de 5x5 para la zona urbana y de 10x10 en llanuras planas y extendidas. Por otra parte, del modelo 1D solo fue necesario implementar los tramos y secciones de los puentes. A su vez mediante un fichero shapefile se agregó la capa de obstrucciones que representa a los edificios, estructuras y cualquier objeto que interfiera el curso normal del río.

De la información proporcionada por el organismo frontera sur de CONAGUA, tales como registros de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs) y estaciones de nivel, se seleccionó el intervalo de eventos de lluvia e hidrometría de las bases de los registros para cada estación que presentaron característica de consistencia y continuidad en el tiempo. Después de haberse realizado la depuración de información, se establecieron los pesos o influencia de las estaciones automáticas



con el método de polígonos de Thiessen en la cuenca de estudio, ver figura 5.1, para después cargarlas al modelo computacional 1D y 2D.

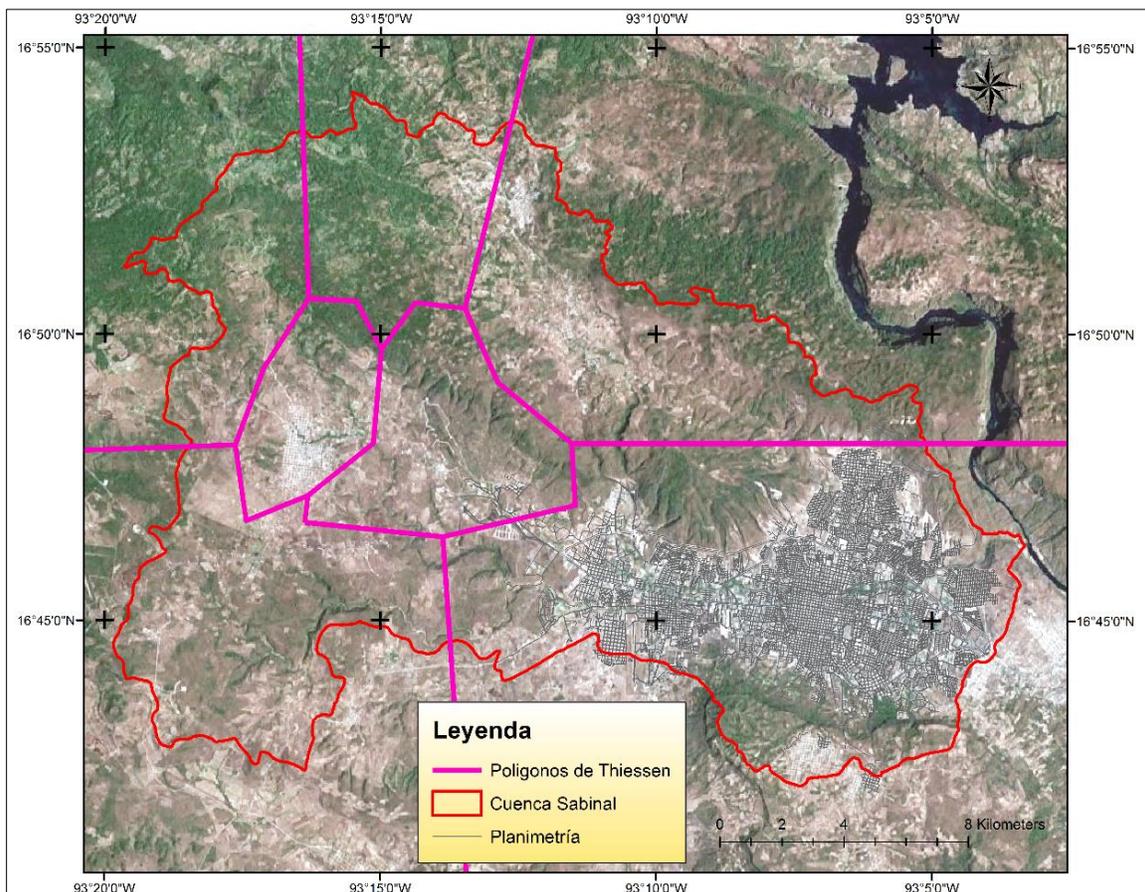


Figura 5.1. Configuración de la distribución espacial de la lluvia para las EMA's.

5.2 Fase de calibración y validación

Habiendo establecido todos los datos de entrada y condiciones iniciales en el modelo 1D, se inician las primeras simulaciones continuas. Se comparan la hidrometría observada con los resultados del modelo. Se considera como umbral de aceptación el criterio de Molnar (2011) y Motovilov, et al. (1999) para la medida de verosimilitud haciendo referencia a la eficiencia Nash-Sucliffe. Una vez obtenidos el conjunto de parámetros óptimos que calibran el modelo SWMM se procede a realizar simulaciones con distintos registros de lluvia para después comparar los valores simulados respecto a la hidrometría observada



5.3 Obtención de los hietogramas

Para la generación sintética de la precipitación y obtención de hietograma se utilizaron dos modelos, un modelo multivariado periódico MAR(P) para la simulación de series tiempo del registro de lluvia de las estaciones disponibles en el sitio de estudio y el segundo Tholin y Keifer (1959) para la obtención de los hietogramas de diseño que tiene como consideración fundamental la forma típica de las curvas masas acumuladas de precipitación registradas en el pasado.

5.4 Generación de los escenarios

Una vez obtenido el conjunto de parámetros óptimos que calibran el modelo 1D, se procedió a actualizar los parámetros de las subcuencas en el modelo 2D y así continuar con la modelación de las lluvias generadas estocásticamente y generados por el método de regionalización de lluvias de Tholin y Keifer (1959) y finalmente obtener los mapas de peligro por inundación de los distintos escenarios.

5.5 Generación de mapas de peligro

En la generación de mapas de peligro por inundación existen diferentes criterios tales como: criterios OFEE (Office Federal de l'Économie des Eaux), FEMA (Federal Emergency Management Agency) y otros. Ambos utilizan el vector velocidad y la variable tirante, sin embargo, el criterio OFEE considera la variable tirante como el factor determinante en la generación de los mapas de peligro, mientras que el criterio FEMA considera el vector velocidad (López, 2013).

Para la generación de los mapas, en este trabajo, se consideró el criterio FEMA, debido a que una de las características principales de la subcuencas del río Sabinal es la pendiente pronunciada existente, que de acuerdo a la ecuación (2.2) es un factor que afecta directamente a la velocidad del flujo. En la figura 5.2 se observa la relación del tirante con el vector velocidad, criterio utilizado por la FEMA.

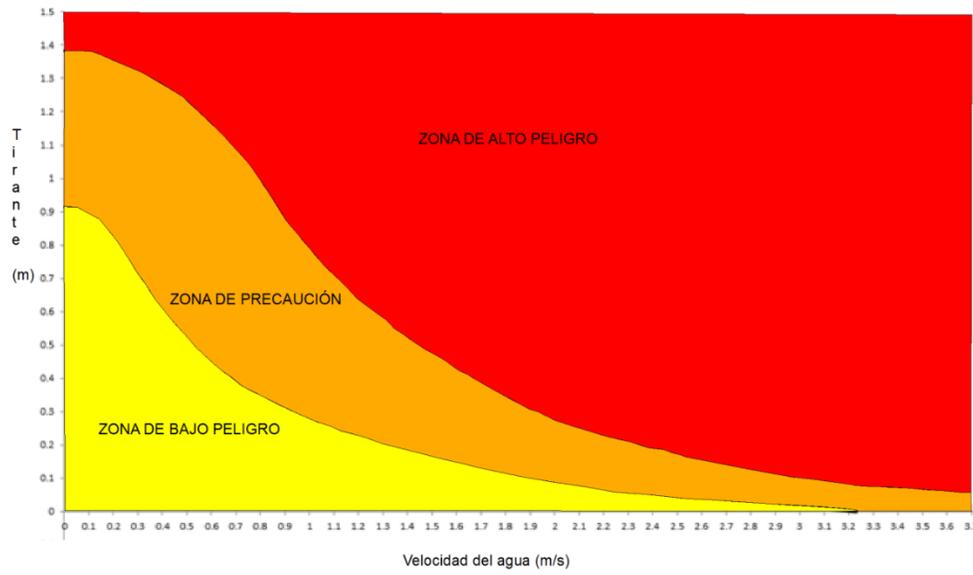


Figura 5.2. Criterio emitido por la FEMA (López, 2013).

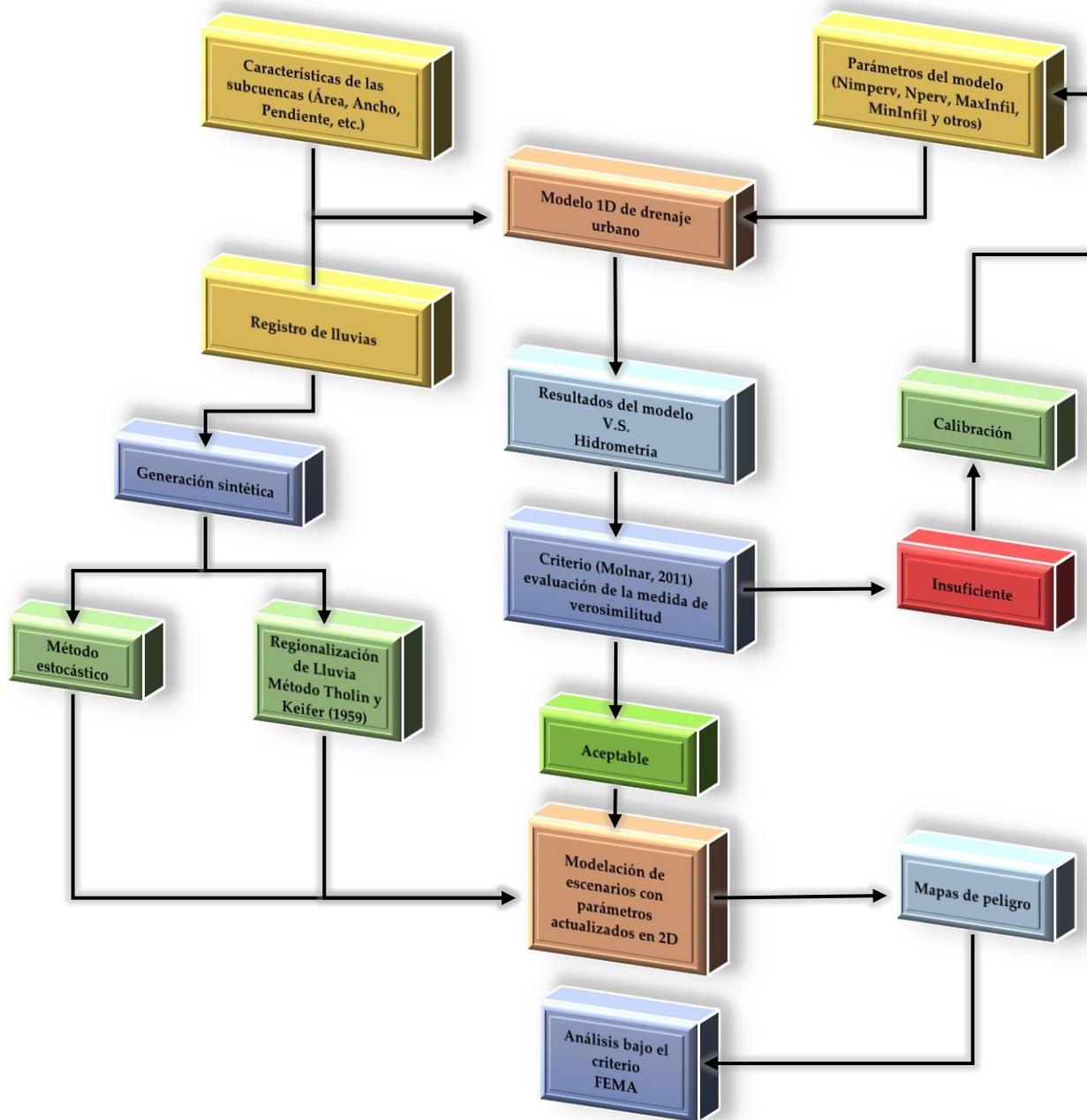


Figura 5.3. Metodología de investigación (William, 2005).

CAPÍTULO 6

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Tuxtla Gutiérrez se ubica en un valle rodeado de montañas, lomeríos y piedemonte, comprendido casi en su totalidad en la cuenca del río Sabinal. Estas condiciones la hacen vulnerable por la ocupación histórica y social de este territorio, que ha rebasado las prevenciones de riesgos y desastres socialmente construidos. Este municipio contiene 115 localidades con una población de 553,374 habitantes según los resultados del Censo General de Población y Vivienda 2010. Destaca la cabecera municipal, en la que habita una población de 537,102 habitantes en 437 colonias, fraccionamientos o unidades habitacionales. Esta localidad presenta la mayor concentración de población, infraestructura, equipamiento y servicios urbanos en el estado (CECOM, 2011).

La cuenca del Río Sabinal está ubicada dentro de la Región Hidrológica No. 30 denominada Grijalva-Usumacinta, en la Cuenca administrativa Grijalva-Tuxtla Gutiérrez. Su cauce principal atraviesa la capital de poniente a oriente teniendo una longitud medida desde la confluencia con el Río San Francisco hasta su desembocadura en el Río Grijalva de 21.00 km, y un desnivel de 800 metros (CONAGUA, 2009).

El Río Sabinal nace en La Loma, El Chupadero, 5 km. al noroeste de la población de Berriozábal, Chiapas, a una altitud de 1,100 m.s.n.m., corre en dirección sureste, atravesando la población y continuando hacia la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, aguas abajo cambia su curso al oriente y posteriormente al sur, para recibir la aportación del Arroyo San Francisco y siguiendo su curso al oriente para cruzar por la colonia Terán, Municipio de Tuxtla Gutiérrez; un poco antes de dejar esta colonia, recibe por la margen izquierda el Arroyo San Agustín, para luego arribar a la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (CONAGUA, 2009).

Existen 15 afluentes principales, ver figura 6.1, cuyos nombres son los siguientes: 24 de Junio, Arroyo Centro Sur, Arroyo Sur Oriente, Cerro Hueco, Chacona, Potinaspak, Patria Nueva y Otros, Poc Poc, Pomarroza, Sabinal, San Francisco, San José, San Roque, Santa Ana, Totoposte, la mayoría de estos arroyos son intermitentes y algunos con pequeños tramos embovedados, que a su vez reciben descargas de aguas pluviales y residuales; finalmente el cauce del Río Sabinal sale de la mancha urbana, para descargar por la margen izquierda del Río Grijalva (CONAGUA, 2009).

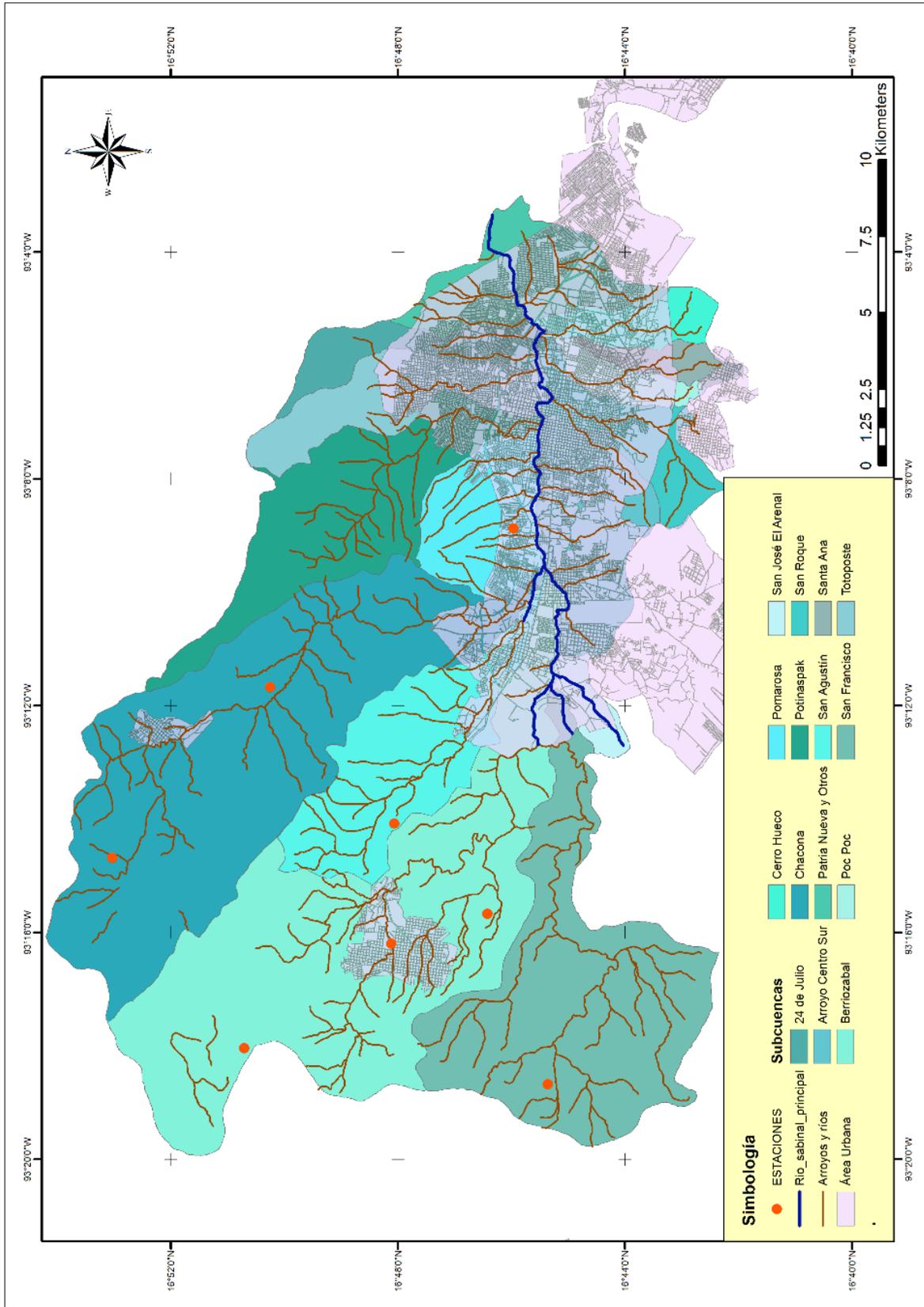


Figura 6.1 Subcuencas de los afluentes que aportan agua al cauce principal



6.1 Instrumentación de la cuenca

6.1.1 Esquema hidrométrico

La cuenca Sabinal cuenta con cinco estaciones de nivel que permiten medir, registrar y analizar los volúmenes de agua que transitan por el río, ver figura 6.2, y además permiten tomar decisiones en casos en que los niveles del agua sean críticos. El nivel *mínimo* que es el lecho del cauce, el *crítico* indica el tirante donde se inicia el desbordamiento y el *máximo* es el nivel superior de la escala donde se pierde la definición del cauce por inundación ver tabla 6.1.

Tabla 6.1. Datos generales de las estaciones hidrométricas (CONAGUA, 2009)

No.	Estación	Niveles		
		Critico msnm	Máximo msnm	Mínimo msnm
1	Carretera Terán-Areopuerto	561.00	561.70	557.60
2	Joyyo Mayu	544.50	548.20	541.00
3	Kolping	540	544	538
4	Cipres	501	499.7	495
5	Parque del Oriente	497.00	498.30	493.00

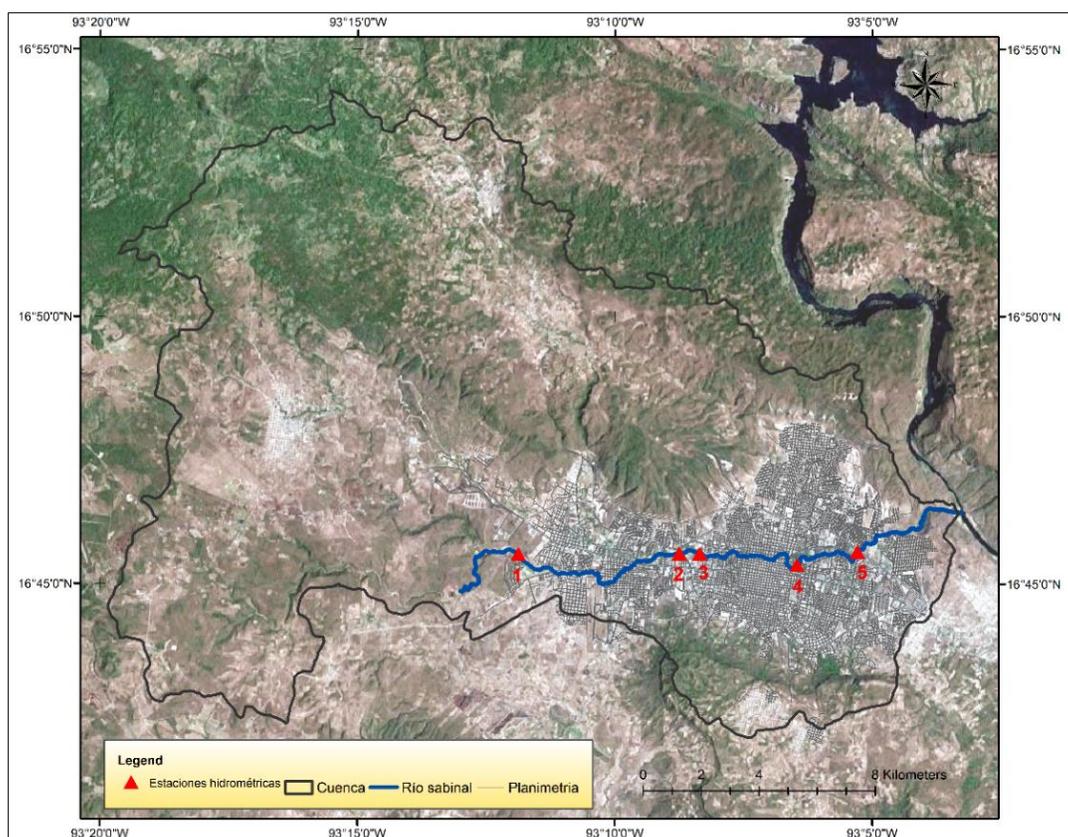


Figura 6.2. Instrumentación hidrométrica de la cuenca.



6.1.2 Distribución pluviométrica

La cuenca contiene de cuatro estaciones pluviométricas, las cuales cuentan con distintos periodos de registro, esto se debe al año de instalación ver tabla 6.2, y ocho estaciones meteorológicas automáticas (EMAs), ver tabla 6.3.

Tabla 6.2. Información general de las estaciones pluviométricas.

Estación	Latitud	Longitud	Años de registro	Periodo de registro
El Sabinal (TGZ)	16.759	-93.089	20	1987-2010
Puente colgante	16.741	-93.031	56	1951-2006
Tuxtla Gtz (CFE)	16.767	-93.133	30	1970-2008
Tuxtla Gtz (DGE)	16.763	-93.147	56	1951-2006



Figura 6.3. Ubicación de las estaciones pluviométricas.

La información de las estaciones pluviométricas consiste en reportes diarios de estaciones climatológicas tradicionales, los reportes diarios contienen variables como temperatura observada (°C), temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), precipitación en 24h (mm), evaporación (mm), Tormenta (0=No hubo, 1= Sí hubo), granizo (0=No hubo, 1= Sí hubo), niebla (0=No hubo, 1= Sí hubo) y cobertura del cielo (0=No hubo, 1= medio nublado, 2= nublado).



Tabla 6.3. Información general de las estaciones automáticas (EMA's).

Estación	Latitud	Longitud	Años de registro	Periodo de registro
Berriozábal	16.8	-93.268	4	2008-2011
Caridad	16.799	-93.236	4	2008-2011
Mirador	16.885	-93.239	4	2008-2011
Observatorio	16.763	-93.147	4	2008-2011
San Antonio Bombanó	16.753	-93.308	4	2008-2011
Vista Hermosa	16.845	-93.302	4	2008-2011
Viva Cárdenas	16.834	-93.194	4	2008-2011

La información que reportan las EMAs son registros con una resolución de tiempo a cada diez minutos; estos datos son almacenados en ordenadores los cuales graban las siguientes variables: temperatura(°C), humedad, lluvia(mm) y evaporación(mm).

6.2 Registros de los instrumentos de medición

En este trabajo se utilizaron datos de precipitación de los registros de las EMAs durante la temporada de lluvia que comprende de junio a noviembre, ver figura 6.4 estos datos corresponden al año 2011. También cabe señalar que se usaron datos de la estación hidrométrica número cinco, esta estación será representada por el nodo J373 en el modelo PCSWMM®, ver figura 6.2. De acuerdo a lo anterior la elección de la información se hizo en base a la consideración de que estos registros del instrumento en comparación a las otras estaciones, no presentaba discontinuidad o incongruencias en los registros de medición.

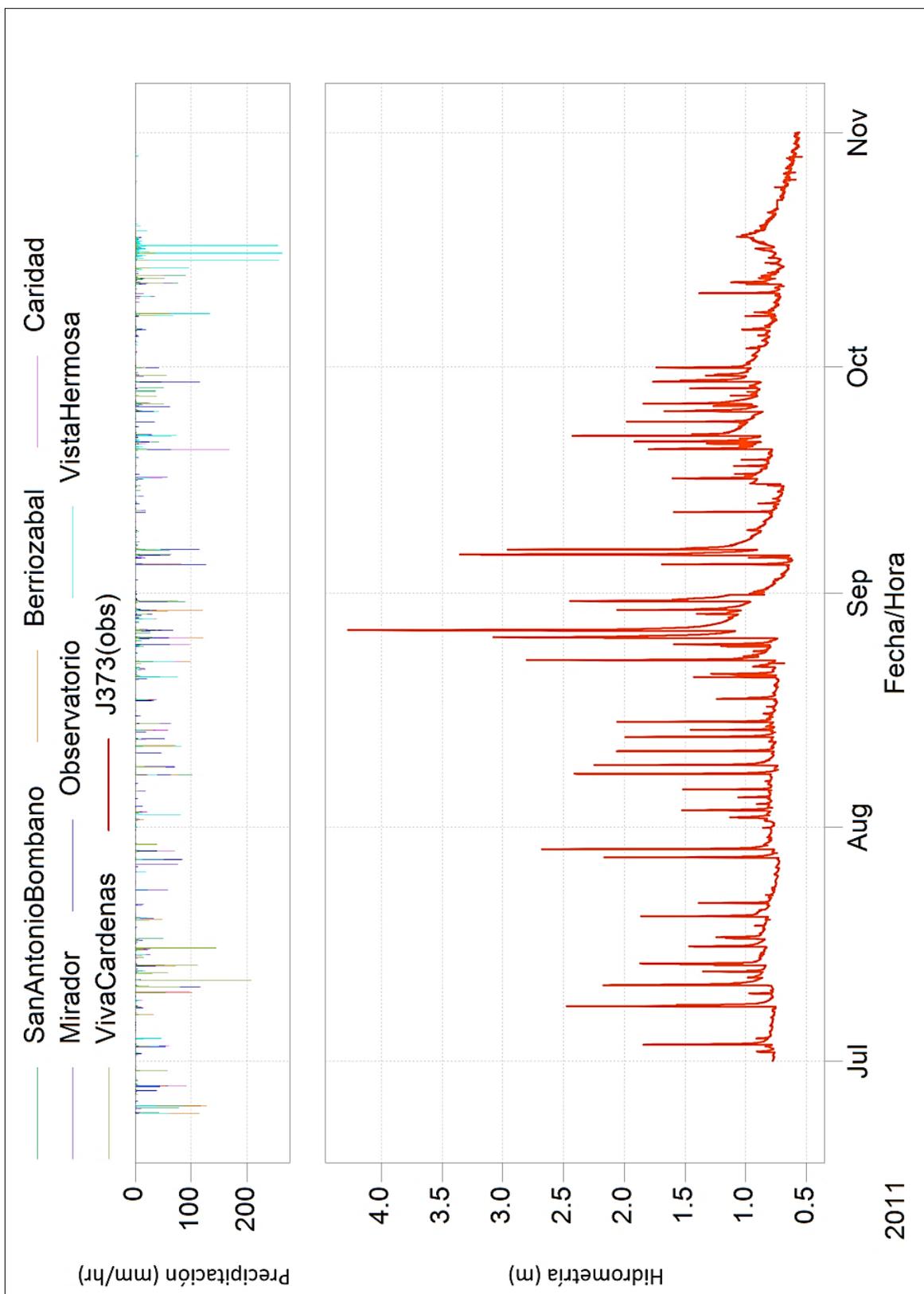


Figura 6.4. Registro de hidrometría y precipitación del 2011.



6.3 Infraestructura hidráulica.

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez cuenta con infraestructura para el control de aguas pluviales y tratamiento de aguas residuales como: nueve colectores pluviales en la zona poniente de la ciudad ver figura 6.6, además se han implementado para la protección de los márgenes del cauce principal del río Sabinal estructuras como: muro gavión, revestimiento con concreto y ampliación de las secciones del canal desde el poniente al oriente de la ciudad ver figura 6.5. Asimismo, cuenta con dos plantas de tratamiento de aguas residuales; la primera se encuentra a la altura del parque Joyyo Mayu y la segunda ubicada al oriente de la capital.



Figura 6.5. Revestimiento de los márgenes con muro gavión: a) puente casa Kolping, b) 20 ote. Norte, c) 11ª calle norte y d) libramiento norte a un costado de procuraduría.

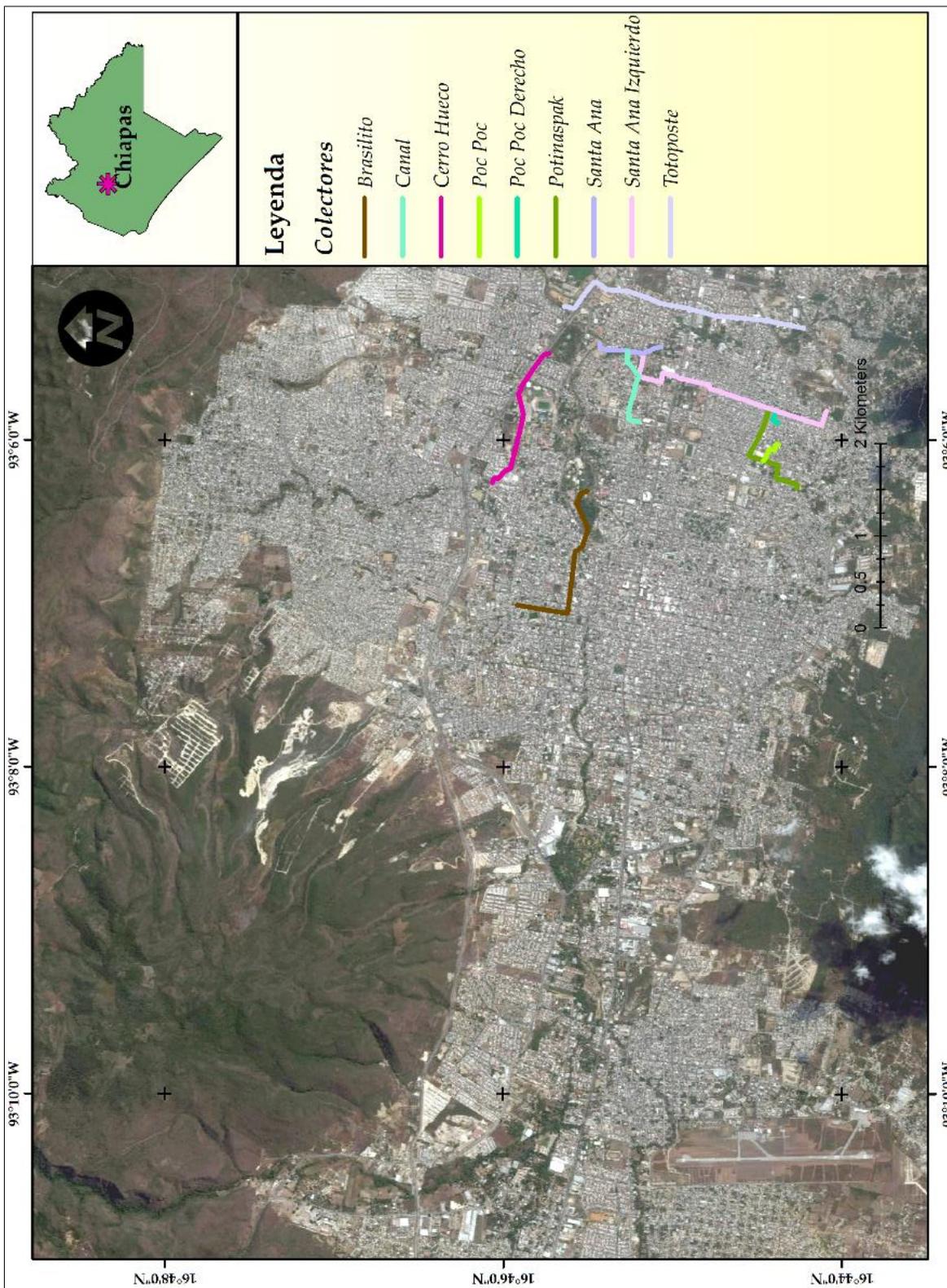


Figura 6.6. Colectores pluviales existentes en la zona de estudio.

De acuerdo a la metodología establecida, al análisis de los datos disponibles en la zona de estudio, y a la integración de un modelo 1D y 2D se obtuvieron resultados que se explican en este capítulo.

7.1 Obtención de lluvias.

7.1.1 Método Tholin y Keifer

Con respecto a tormentas de diseño, en este trabajo se utilizó el método Tholin y Keifer (1959) para obtención de la lluvias medias en la cuenca, se realizó el análisis de la distribución temporal para datos de tormenta con duración de 30 y 60 minutos de los registros de lluvia del sistema de alerta temprana del río Sabinal empleando la metodología de Lopez (2012) que se presenta a continuación:

- Generación de la lluvia acumulada en cada tormenta.
- Generación de distribución adimensional de la lluvia (lluvia acumulada en cada intervalo de tiempo entre la lluvia total acumulada).
- Generación de la distribución adimensional de la duración para los cuatros intervalos de tiempo arriba mencionados (tiempo acumulado de la tormenta entre la duración total de dicha tormenta).
- Estimación de la distribución adimensional media.
- Estimación de las distribuciones que encierran el 95 % de las distribuciones estimadas.
- Selección de la distribución adimensional para su empleo como lluvia de proyecto.

Con el procedimiento anterior se obtuvo el conjunto de todas las distribuciones adimensionales temporales para igual número de tormentas en los dos intervalos de duración, en torno a la distribución media y las distribuciones que encierran aproximadamente el 90% de las distribuciones analizadas. Este análisis dio como resultado los histogramas adimensionales para las tormentas de diseño de 30 y 60 minutos. Además, realizó el cálculo de la lluvia media en la cuenca del río Sabinal para periodos de retorno y los histogramas adimensionales con las duraciones mencionadas, a su vez consideró que estas lluvias se dan en forma de intensidades estimadas a cada 5 minutos y donde el promedio de las intensidades de un hietograma con cierta duración y un periodo de retorno dado corresponde a la



intensidad media para la misma duración y periodo de retorno. En la figura 7.1 y 7.2 se muestran los hietogramas de diseño.

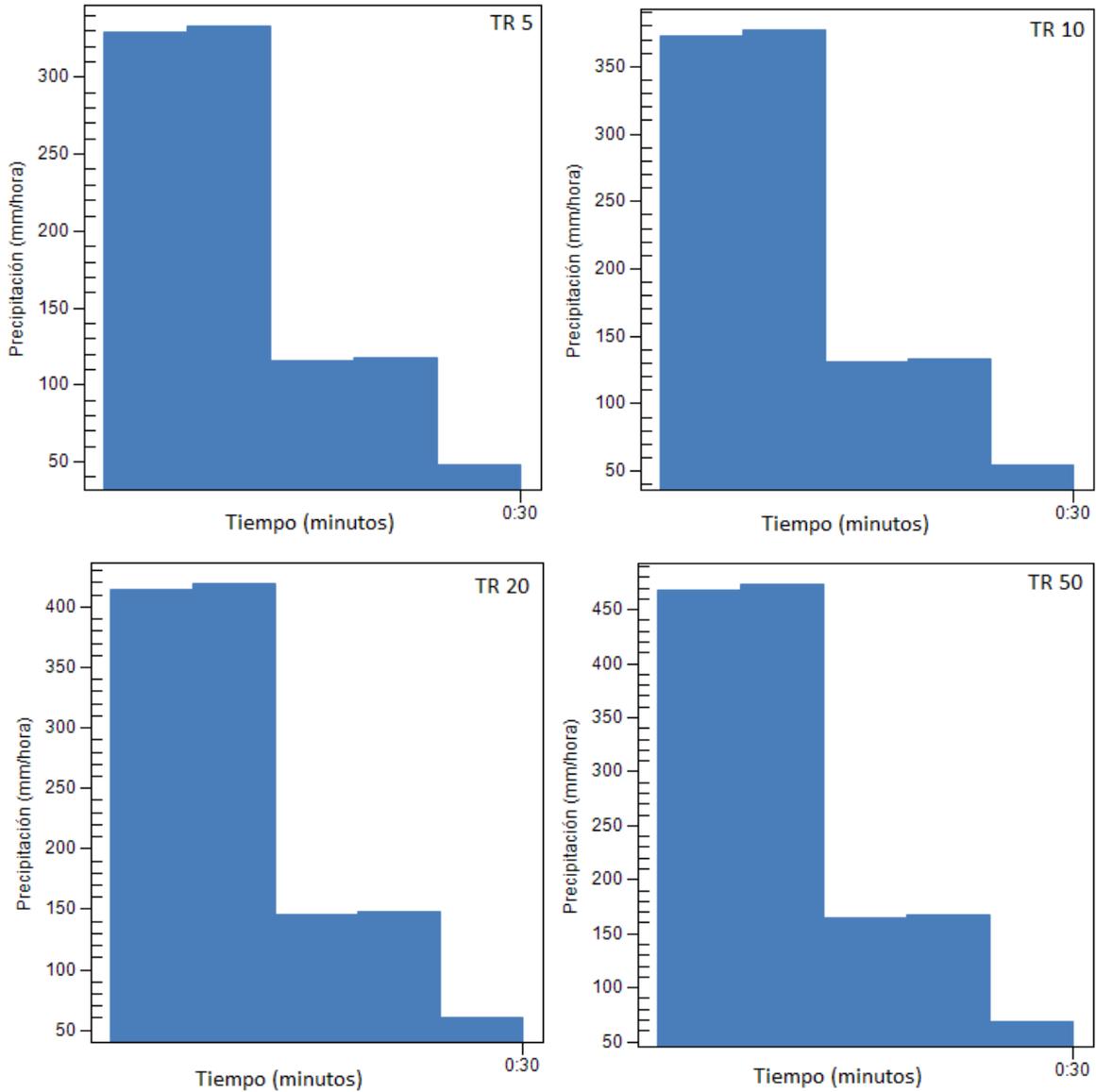


Figura 7.1. Hietogramas de diseño de precipitación total para una duración de 30 minutos para distintos periodos de retornos obtenidos por el método de regionalización de lluvia de Tholin y Keifer (1956).

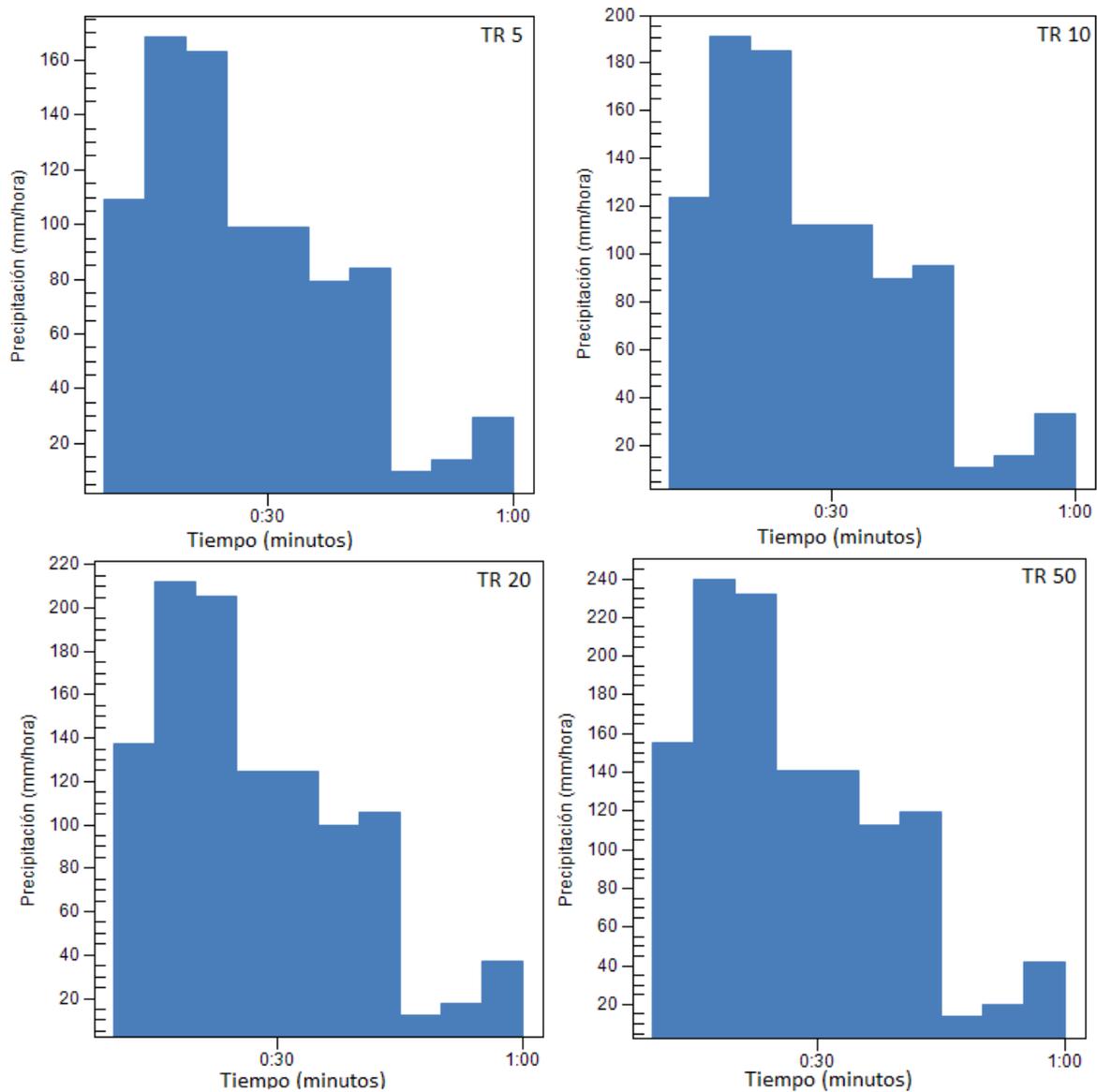


Figura 7.2. Tormentas de diseño con duración de 60 minutos para distintos periodos de retornos obtenidos por el método de regionalización de lluvia de (Tholin y Keifer, 1956).

7.1.2 Método estocástico

Para la simulación de lluvias sintéticas con el método MAR(1), se eligieron eventos de los registros del año 2011 de las estaciones automáticas con distintas duraciones e intensidades, se aplicaron las pruebas de homogeneidad e independencia mencionados en el capítulo tres, para determinar la calidad de información de los datos. De lo anterior los eventos seleccionados se procedió a generar la simulación de lluvias sintéticas con parámetros estadísticos similares a los de la muestra original ver figura 7.3. Es preciso señalar que se generaron cinco mil muestras sintéticas de las cuales se eliminaron quinientas para evitar tendencias en las series de datos.

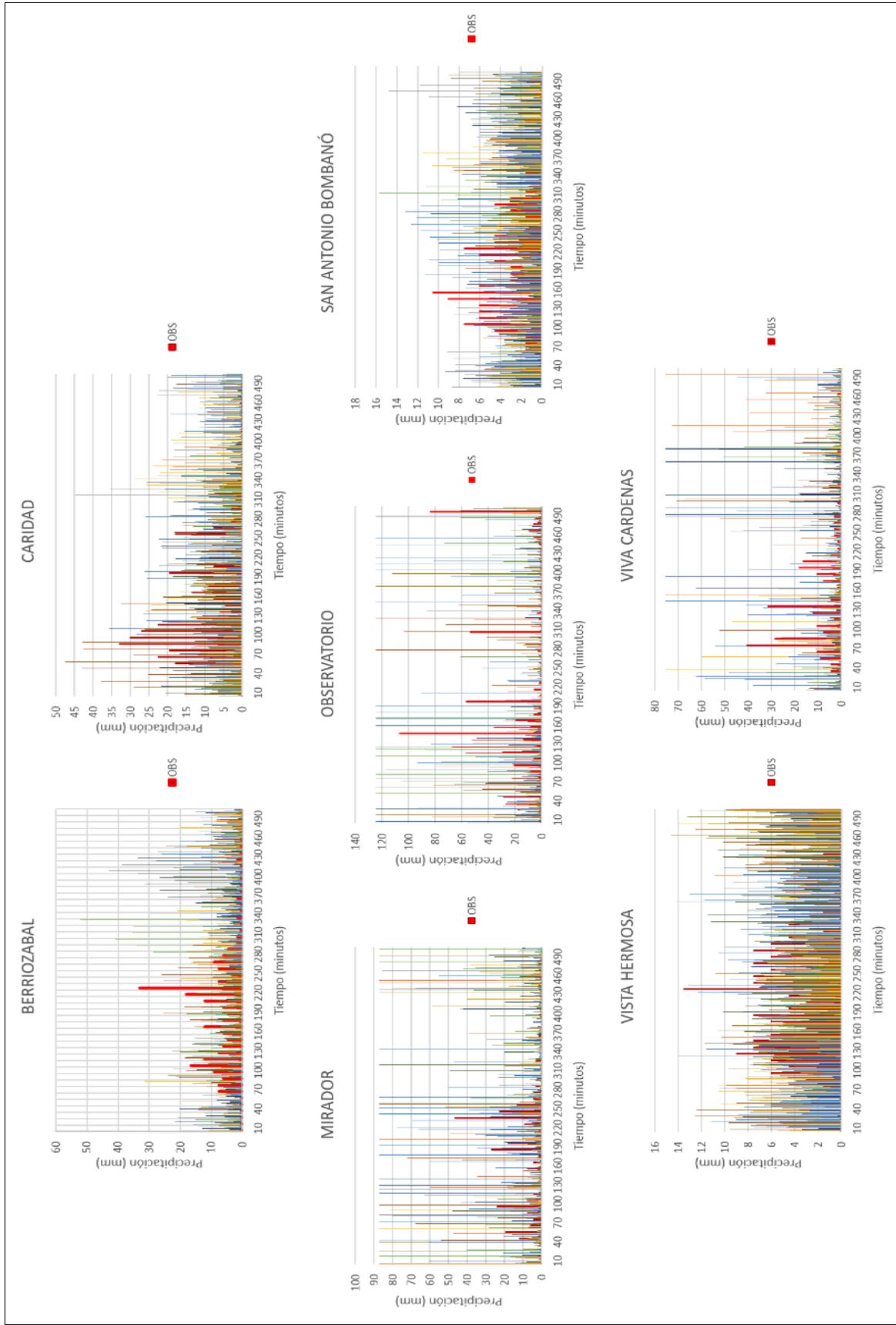


Figura 7.3. Series sintéticas generadas para cada estación.



7.1.3 Criterio de selección de lluvias

El criterio para la selección de lluvias se elaboró a partir de la recopilación de resultados de varias investigaciones realizadas en la cuenca del río Sabinal y con base a los registros del 2011, esto debido a que era la información que contaba con resolución de lluvia a cada diez minutos.

Aragón (2007) estimó un umbral de precipitación media en la cuenca, el cual consideró que un periodo de retorno de 5 años es el más adecuado para determinar los umbrales de precipitación, esto en referencia a los datos de precipitación máxima anual acumulada en 24 horas asociada a un periodo de retorno de 5 años y a los hietogramas base que obtuvo. Asimismo, determinó los hietogramas de precipitación para cada subcuenca y con los coeficientes de escurrimiento que propuso, estableció los hietogramas de precipitación efectiva, que corresponden a los umbrales de precipitación.

Por otra parte, en el registro de lluvias del 2011 se encontraron lluvias acumuladas alrededor de los 300mm y con menor duración por lo que al establecer el criterio de lluvias seleccionadas la tormenta Larry que ocasionó estragos en el 2003 se encuentra dentro del rango en cuanto a la magnitud de la lluvia acumulada.

De las afirmaciones anteriores, en base a la duración y la altura de precipitación acumulada se estableció el criterio de selección de lluvias, ver figura 7.4, la parte sombreada de color rojo de la gráfica representa el rango en el cual se eligieron las lluvias sintéticas generadas por el modelo estocástico MAR(1), que comprende lluvias estimadas por, Aragón (2007) y las del 2011.

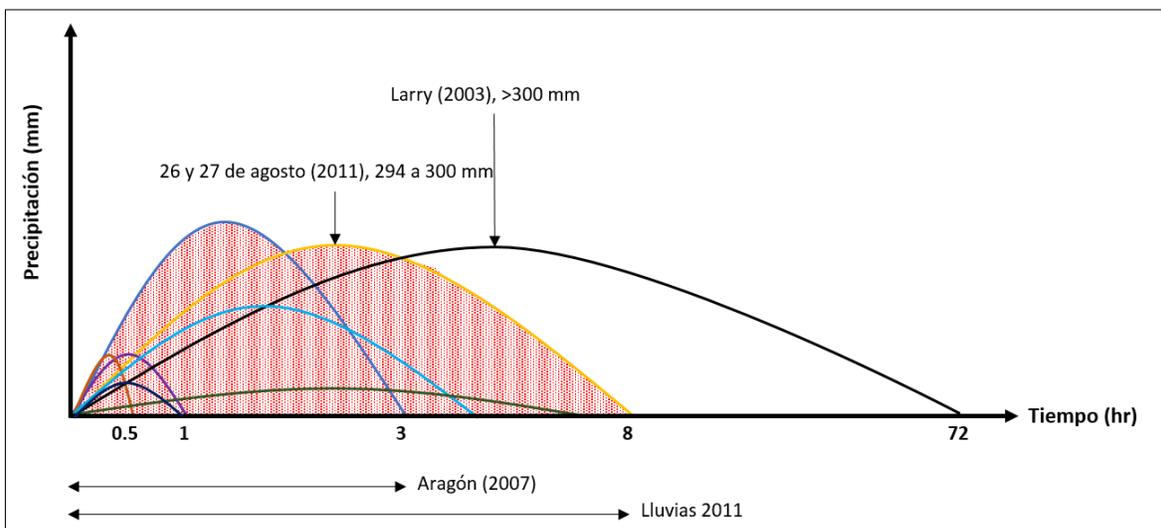


Figura 7.4. Criterio para la selección de lluvias.



7.1.4 Lluvias sintéticas

De acuerdo con el criterio de selección de lluvia se determinaron los eventos a utilizar en el modelo PCSWMM para la generación de los escenarios que se presentan en la Figura 7.5 y 7.5b.

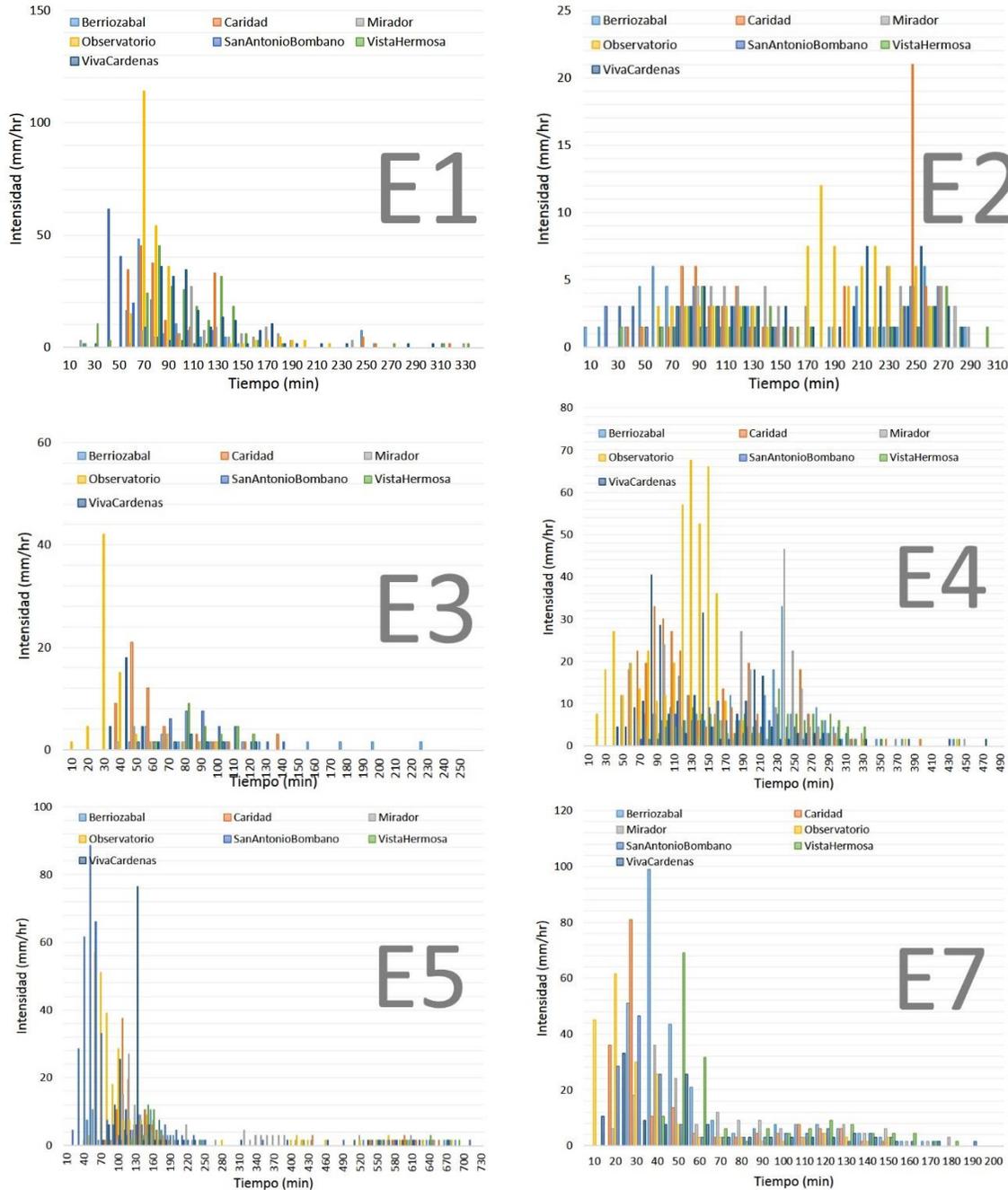


Figura 7.5. Integración de las lluvias sintéticas seleccionadas a partir del criterio establecido de las estaciones.

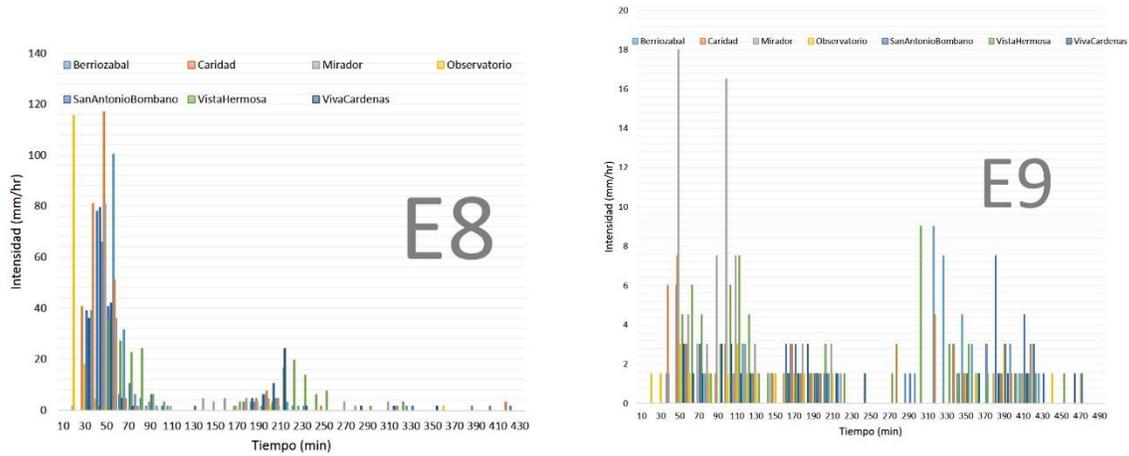


Figura 7.5b. Integración de las lluvias sintéticas seleccionadas a partir del criterio establecido de las estaciones.

7.2 Modelación con parámetros iniciales

De acuerdo a la metodología general establecida en esta investigación, ver figura 5.3, y en base a la integración del modelo 1D semidistribuido y a la configuración espacial de la lluvia, se realizaron alrededor de 100 simulaciones para determinar el gasto base para los meses comprendidos entre junio y noviembre, ver anexo A, esto se realizó considerando la hidrometría y los parámetros iniciales del modelo construido en PCSWMM, ver tabla 7.1, cuyo valores fueron determinados con cartas vectoriales digitales tal como la edafológica, uso del suelo y vegetación de la zona de estudio.

Ya establecido las condiciones de frontera se inició la simulación en PCSWMM de la cual se obtuvo la serie de tiempo de la variación del tirante en el nodo J373 del modelo que se muestran en la figura 7.6, se puede observar que los resultados de simulación señalada en líneas azules muestra diferencias considerables respecto a la hidrometría observada, con lo que se puede inferir que los parámetros iniciales no son adecuados, es decir, la incertidumbre de los valores iniciales de los parámetros es alta, en este sentido el modelo carece de certeza y tiene una eficiencia baja tal como lo muestran los métodos para evaluar la verosimilitud de la tabla 7.2.

Siguiendo la metodología de este trabajo resulta evidente pasar al proceso de calibración para determinar el conjunto de valores óptimos para cada uno de los parámetros seleccionados y así reducir la incertidumbre de los resultados de simulación del modelo con referencia a la hidrometría observada.



Tabla 7.1. Parámetros iniciales en el modelo PCSWMM.

Name	Area (ha)	Width (m)	Slope (%)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Zero Imperv (%)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
S3	139.76	523.26	10.996	47.998	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S4	240.62	703.98	12.861	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S7	321.79	589.79	11.874	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S9	141.8	577.61	3.498	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S11	221.86	841.97	5.136	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S12	867.91	1568.04	8.147	28.248	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S13	368.31	915.07	8.285	18.348	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S14	50.74	556.97	3.187	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S15	364.53	1110.35	9.624	33.264	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S16	132.22	422.84	13.354	38	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S17	14.89	350.32	3.24	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S18	85.48	554.34	1.676	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S19	133.7	520.84	3.416	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S20	134.19	579.67	1.468	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S21	83	457.57	18.879	39.072	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S22	11.36	187.49	6.378	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S23	7.66	140.72	3.835	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S24	14.52	209.84	4.461	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S25	44.79	548.94	1.718	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S26	46.76	634.52	3.729	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S27	103.18	442.84	5.907	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S28	29.64	509.3	1.102	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S29	76.92	408.48	13.683	45.688	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S30	18.64	207.11	8.917	98.06	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S31	72.74	291.18	22.219	36.878	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S32	52.88	329.87	4.126	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S33	55.64	328.64	2.909	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S34	47.89	553.66	1.373	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S35	49.58	397.31	4	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S36	64.79	286.19	3.789	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S37	95.72	482.95	3.628	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S38	198.45	489.87	21.083	27.357	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S39	258.45	1348.03	2.998	27.126	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S40	341.17	1021.66	2.707	11.764	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S41	143.56	815.95	2.109	78.441	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S42	156.83	1363.75	1.877	51.678	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S43	110.89	401.96	10.29	58.179	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S44	205.32	747.03	1.745	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S45	240.46	959.08	5.159	20.163	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S46	138.36	863.5	1.955	87.764	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S48	171.5	414.24	15.73	16.582	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S49	108.61	490.55	17.128	45.028	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S50	208.5	577.08	13.401	35.508	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S51	97.94	536.07	14.399	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S52	178.59	547.65	15.752	18.15	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S53	80.4	660.64	13.216	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S54	373.56	723.66	11.641	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S55	80.09	666.87	3.855	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S56	35.77	352.06	2.759	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S57	116.86	612.78	5.106	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S58	234.98	837.43	9.426	39.484	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S59	121.21	570.15	8.084	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S60	52.73	352.5	6.128	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S61	88.71	661.52	3.663	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S62	40.98	484.96	2.187	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S63	53.99	329.99	4.287	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S65	105.38	363.89	9.108	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S66	32.58	570.61	2.54	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S_100	78.1	673.84	1.245	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S69	93.14	685.32	5.336	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S70	191.1	524.58	18.555	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S71	50.67	342.39	8.288	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S72	150.61	641.15	9.412	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S73	78.23	373.59	13.398	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S74	99.39	948.34	1.705	100	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S1_1	269.27	3185.54	3.17	0	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S2_1	476.74	4743.28	3.44	10.478	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S2_3	889.21	4743.28	3.44	10.478	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S1_3	5176.39	3185.54	3.17	10	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S1_4	71.97	3185.54	3.17	0	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S2_2	118.05	4743.28	3.44	10.478	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S2_4	2691.35	4743.28	3.44	10.478	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S2_7	1141.1	4743.28	3.44	10.478	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S2_5	2163.24	4743.28	3.44	10.478	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S6_1	310.47	4092.56	2.996	6.006	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S8_1	1836.38	2787.9	6.445	0.594	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S8_2	462.75	2787.9	6.445	0.594	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S10_1	436.02	4194.95	11.574	18.166	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S10_2	236.33	4194.95	11.574	18.166	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S64_1	48.7	1198.85	19.476	22.556	0.01	0.1	5	1.27	25	150	30	3	5
S64_2	127.07	1198.85	19.476	22.556	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S5_2	6.65	1911.51	6.362	7.706	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	3	5
S5_3	9.87	1911.51	6.362	7.706	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	3	5
S5_4	23.36	1911.51	6.362	7.706	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	3	5
S5_6	366.4	1911.51	6.362	7.706	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S47_1	34.89	949.47	11.507	37.224	0.01	0.1	5	1.27	25	254	30	4	2
S47_2	275.64	949.47	11.507	37.224	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S6_2	334.1	4092.56	2.996	6.006	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S6_7	3074.54	4092.56	2.996	6.006	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S6_6	29.77	4092.56	2.996	6.006	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	3	5
S6_9	936.51	4092.56	2.996	6.006	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	4	2
S1	2207.251	1911.51	6.362	7.706	0.01	0.1	5	1.27	25	127	30	3	5
S5	25.191	4743.28	3.44	10.478	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S6	426.023	4743.28	3.44	10.478	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S8	45.077	4743.28	3.44	10.478	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5
S10	4277.918	4092.56	2.996	6.006	0.01	0.1	7.62	1.27	25	127	30	3	5

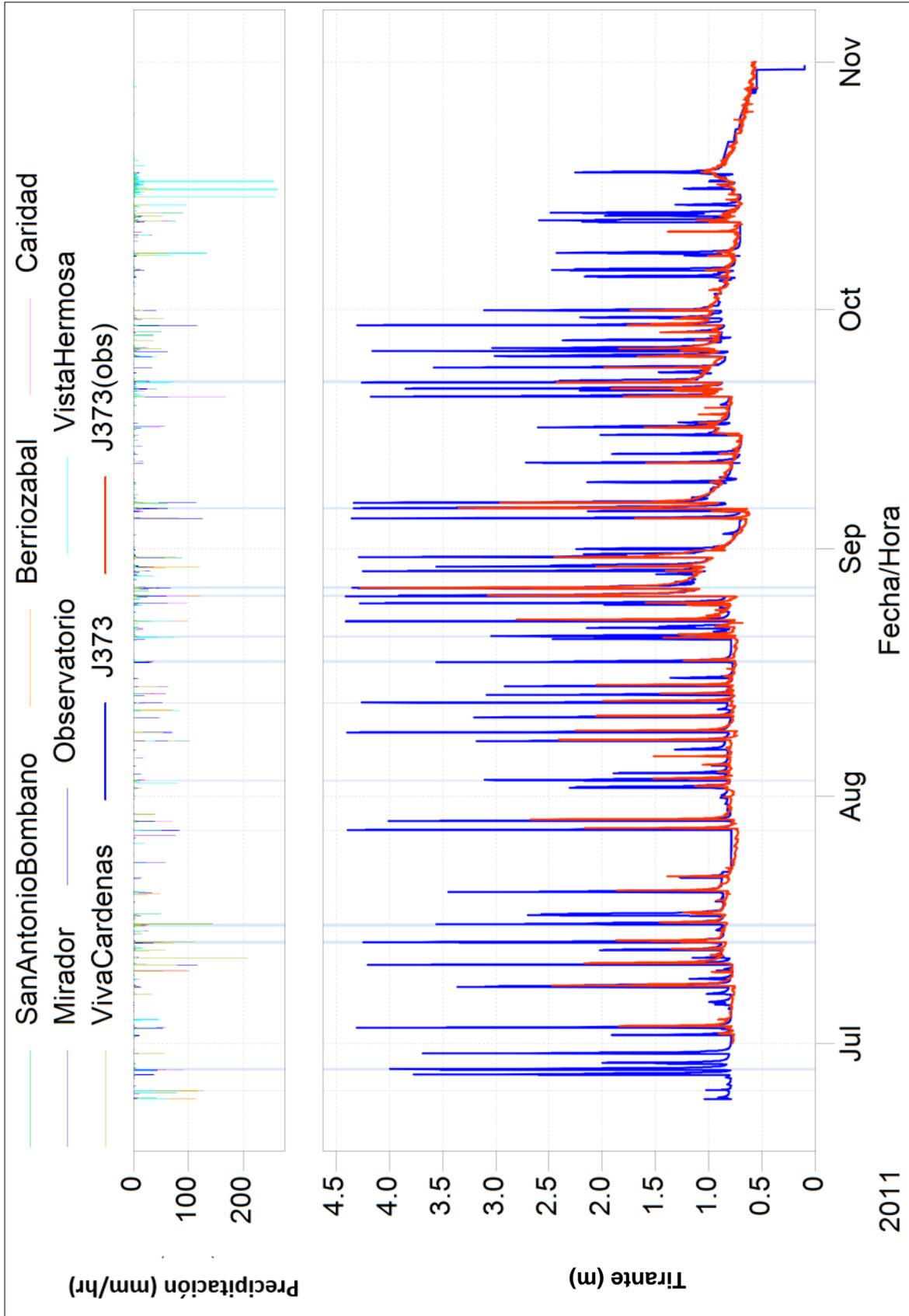


Figura 7.6. Resultado de la simulación sin parámetros calibrados, las barras verticales de color azul tenue representan los eventos de algunos de los eventos seleccionados del registro comprendido de 26-Jun-2011 a 31-Nov-2011.



Tabla 7.2 Medida de la verosimilitud de la hidrometría observada contra la simulada sin previa calibración.

Medida de verosimilitud	Valor
Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE)	-2.08
Error estimado estándar (R ²)	0.329
Error raíz promedio cuadrada (RMSE)	23.5

Como parte del proceso de simulación, se comparó a nivel local la hidrometría observada con la simulada de treinta y seis eventos registrados, en la figura 7.7, 7.7b y 7.7c se muestran algunos de los eventos seleccionados, en cada gráfica se muestra la eficiencia de acuerdo a cada medida de verosimilitud que el programa PCSWMM calcula automáticamente. Por consiguiente, en base a todas las observaciones hechas se puede concluir que a nivel global como local la certidumbre del modelo es bajo y algunas de las razones que originan estas deficiencias en el modelo son los errores típicos que se presentan durante la simulación, tales como el error de desfase y volumen respecto a hidrometría observada que se presentan en las figuras anteriormente enunciadas en este párrafo.

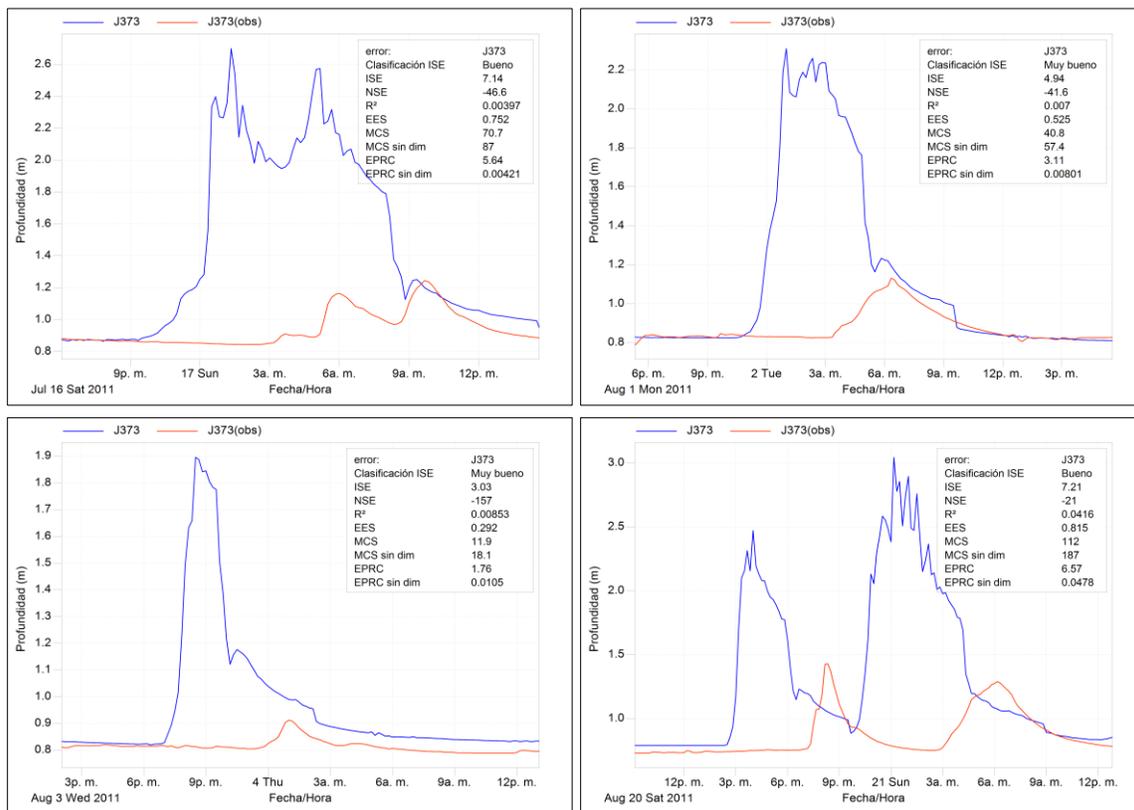


Figura 7.7 Hidrometría observada contra hidrometría simulada para diferentes eventos ocurridos en el año 2011.

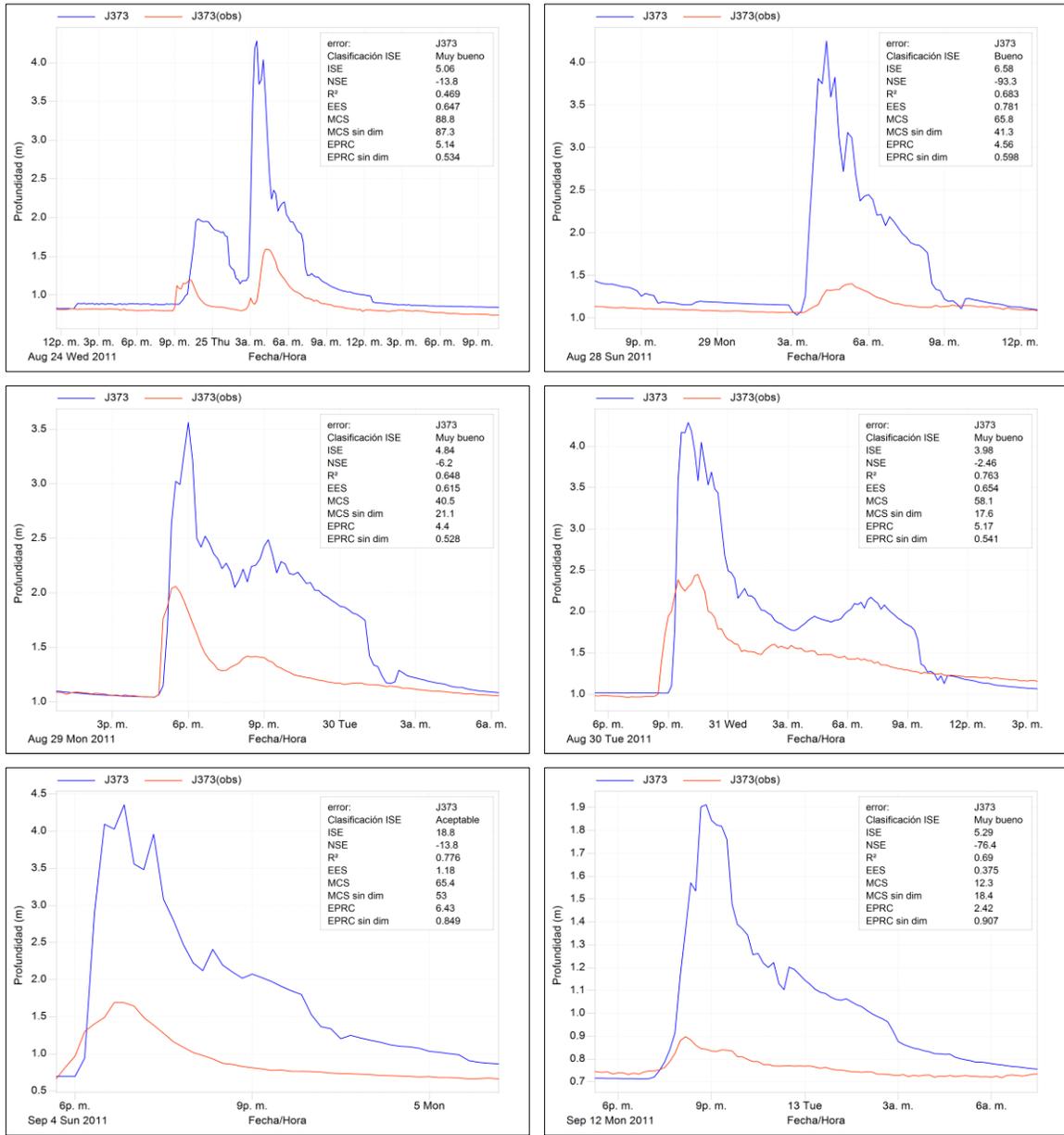


Figura 7.7b. Hidrometría observada contra hidrometría simulada para diferentes eventos ocurridos en el año 2011 (Continuación).

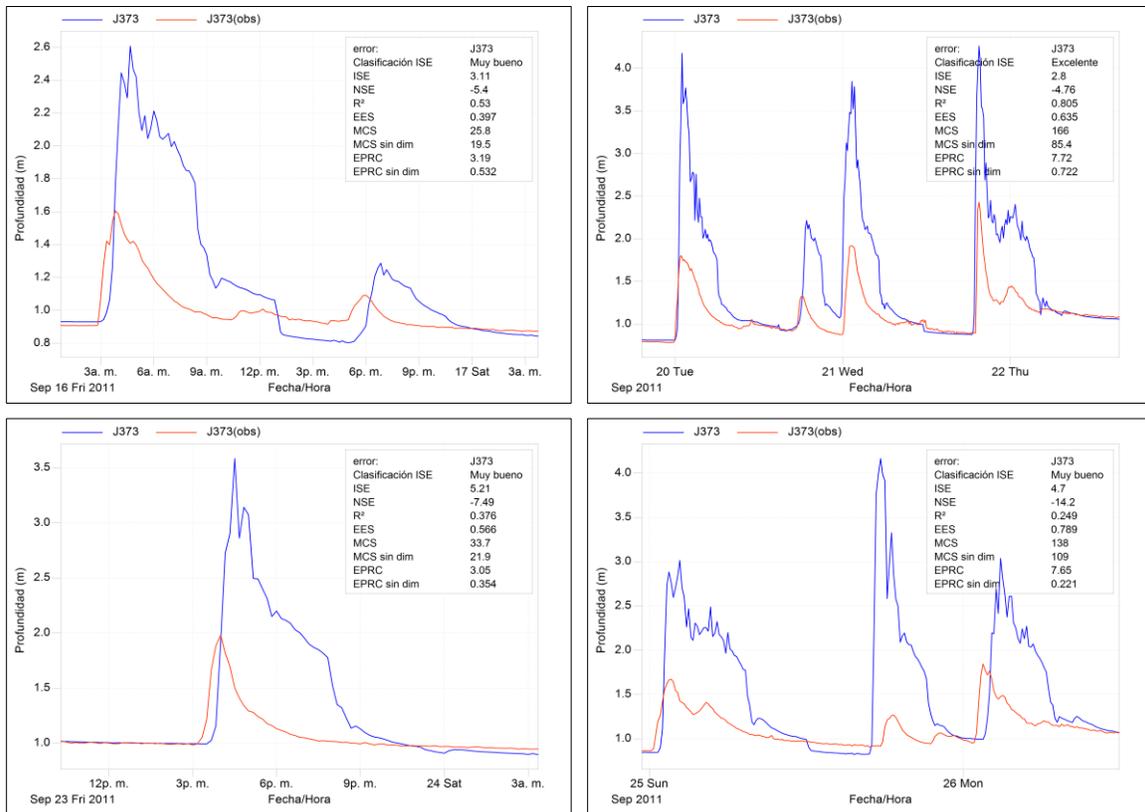


Figura 7.7c. Hidrometría observada contra hidrometría simulada para diferentes eventos ocurridos en el año 2011 (Continuación).



7.3 Calibración

El proceso de la calibración se realizó con los resultados de la simulación inicial y con los valores iniciales de los parámetros de las cuencas, como primer paso fue seleccionar los eventos a calibrar en el programa PCSWMM® y cargar la hidrometría observada, en este caso se seleccionaron treinta seis eventos, como se segundo paso fue establecer la función objetivo, en este caso la función objetivo para el modelo es el tirante tal como se enfatizó en el subtema 4.4.3.

Definido lo anterior se procedió a ejecutar el módulo de calibración automática SRTC del programa PCSWMM, el proceso de calibración tuvo una duración de aproximada de 15 horas, al finalizar este proceso, el algoritmo del programa nos da como resultado la sensibilidad de los parámetros, ver tabla 7.3.

Tabla 7.3. Parámetros hidráulicos de las subcuencas.

Parámetro	+/-	Porcentaje
Imperv(%)	-	50
N Imperv	+	37
N Perv	+	5
Dstore Imperv	n/a	0
Dstore Perv	n/a	0
Zero Imperv	n/a	0
Max. Infil. Rate	n/a	0
Min. Infil. Rate	-	63
Decay Constant	+	1
Drying Time (days)	n/a	0

En la tabla 7.3 se puede ver que de los 10 parámetros seleccionados inicialmente solo cinco son los que tienen influencia al momento de calibrar el modelo, de estos cinco el parámetro más sensible es la velocidad de infiltración mínima *Min. Inf. Rate* y el menos sensible fue el decaimiento constante *Decay Constant*. El símbolo +/- representa cómo se comportan los valores iniciales del parámetro, si el valor del parámetro disminuye “-” y si aumenta “+”, también se muestra el porcentaje variación respecto a los parámetros originales.

Siguiendo la metodología, se actualizaron los valores de los parámetros iniciales como se observa en la tabla 7.4 con los que se realizó nuevamente la simulación. Los resultados obtenidos de la simulación con los nuevos parámetros, ver figura 7.8, se observa que los tirantes calculados por el modelo representados por la línea azul tienen un mejor ajuste, es decir que la diferencia entre los valores de la hidrometría observada denotada por la línea de color rojo y la simulada disminuye.



Tabla 7.4. Actualización de los parámetros iniciales.

Name	Area (ha)	Width (m)	Slope (%)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Zero Imperv (%)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
S3	139.76	523.26	10.996	8	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S4	240.62	703.98	12.861	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S7	321.79	589.79	11.874	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S9	141.8	577.61	3.498	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S11	221.86	841.97	5.136	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S12	867.91	1568.04	8.147	4.708	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S13	368.31	915.07	8.285	3.058	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S14	50.74	556.97	3.187	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S15	364.53	1110.35	9.624	5.544	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S16	132.22	422.84	13.354	6.333	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S17	14.89	350.32	3.24	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S18	85.48	554.34	1.676	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S19	133.7	520.84	3.416	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S20	134.19	579.67	1.468	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S21	83	457.57	18.879	6.512	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S22	11.36	187.49	6.378	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S23	7.66	140.72	3.835	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S24	14.52	209.84	4.461	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S25	44.79	548.94	1.718	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S26	46.76	634.52	3.729	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S27	103.18	442.84	5.907	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S28	29.64	509.3	1.102	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S29	76.92	408.48	13.683	7.615	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S30	18.64	207.11	8.917	16.343	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S31	72.74	291.18	22.219	6.146	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S32	52.88	329.87	4.126	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S33	55.64	328.64	2.909	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S34	47.89	553.66	1.373	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S35	49.58	397.31	4	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S36	64.79	286.19	3.789	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S37	95.72	482.95	3.628	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S38	198.45	489.87	21.083	4.56	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S39	258.45	1348.03	2.998	4.521	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S40	341.17	1021.66	2.707	1.961	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S41	143.56	815.95	2.109	13.074	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S42	156.83	1363.75	1.877	8.613	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S43	110.89	401.96	10.29	9.696	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S44	205.32	747.03	1.745	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S45	240.46	959.08	5.159	3.36	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S46	138.36	863.5	1.955	14.627	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S48	171.5	414.24	15.73	2.764	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S49	108.61	490.55	17.128	7.505	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S50	208.5	577.08	13.401	5.918	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S51	97.94	536.07	14.399	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S52	178.59	547.65	15.752	3.025	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S53	80.4	660.64	13.216	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S54	373.56	723.66	11.641	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S55	80.09	666.87	3.855	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S56	35.77	352.06	2.759	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S57	116.86	612.78	5.106	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S58	234.98	837.43	9.426	6.581	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S59	121.21	570.15	8.084	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S60	52.73	352.5	6.128	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S61	88.71	661.52	3.663	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S62	40.98	484.96	2.187	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S63	53.99	329.99	4.287	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S65	105.38	363.89	9.108	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S66	32.58	570.61	2.54	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S_100	78.1	673.84	1.245	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S69	93.14	685.32	5.336	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S70	191.1	524.58	18.555	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S71	50.67	342.39	8.288	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S72	150.61	641.15	9.412	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S73	78.23	373.59	13.398	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S74	99.39	948.34	1.705	16.667	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S1_1	269.27	3185.54	3.17	0	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S2_1	476.74	4743.28	3.44	1.746	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S2_3	889.21	4743.28	3.44	1.746	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S1_3	5176.39	3185.54	3.17	1.667	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S1_4	71.97	3185.54	3.17	0	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S2_2	118.05	4743.28	3.44	1.746	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S2_4	2691.35	4743.28	3.44	1.746	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S2_7	1141.1	4743.28	3.44	1.746	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S2_5	2163.24	4743.28	3.44	1.746	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S6_1	310.47	4092.56	2.996	1.001	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S8_1	1836.38	2787.9	6.445	0.099	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S8_2	462.75	2787.9	6.445	0.099	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S10_1	436.02	4194.95	11.574	3.028	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S10_2	236.33	4194.95	11.574	3.028	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S64_1	48.7	1198.85	19.476	3.759	0.03	0.025	5	1.27	25	150	12.903	3.15	5
S64_2	127.07	1198.85	19.476	3.759	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S5_2	6.65	1911.51	6.362	1.284	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S5_3	9.87	1911.51	6.362	1.284	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S5_4	23.36	1911.51	6.362	1.284	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S5_6	366.4	1911.51	6.362	1.284	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S47_1	34.89	949.47	11.507	6.204	0.03	0.025	5	1.27	25	254	12.903	4.2	2
S47_2	275.64	949.47	11.507	6.204	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S6_2	334.1	4092.56	2.996	1.001	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S6_7	3074.54	4092.56	2.996	1.001	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S6_6	29.77	4092.56	2.996	1.001	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S6_9	936.51	4092.56	2.996	1.001	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	4.2	2
S1	2207.251	1911.51	6.362	1.284	0.03	0.025	5	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S5	25.191	4743.28	3.44	1.746	0.03	0.025	7.62	1.27	25	127	12.903	3.15	5
S6	426.023	4743.28	3.44										



Cabe mencionar que el programa PCSWMM® calcula la eficiencia del modelo en base a la función objetivo seleccionada. En la tabla 7.5 se muestran alguna de las medidas de verosimilitud que calculó el programa entre el resultado de la simulación de lluvias de junio-noviembre del 2011 (simulación global) y el registro hidrometrico de la estación número 5.

Tabla 7.5. Medida de la verosimilitud de la hidrometría observada contra la simulada con calibración de los parámetros de la subcuencas.

Medida de verosimilitud	Valor
Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE)	0.353
Error estimado estándar (R^2)	0.446
Error raíz promedio cuadrada (RMSE)	12.4

Además de evaluar el conjunto de parámetros óptimos que calibran el modelo matemático respecto hidrometría observada en el Río Sabinal. Los valores de la tabla 7.5 establecen el nivel de certidumbre del modelo, es decir que tan confiable son los resultados obtenidos en el modelo.

De acuerdo al análisis de la simulación con parámetros iniciales se realizó un procedimiento similar para la calibración, esto consistió en la observación de eventos puntuales (locales) tal como se muestran en las figura 7.9 y 7.9b. En estos resultados de simulación locales con los parámetros actualizados se encontró que el tirante calculado por el modelo decreció en la mayoría de los eventos seleccionados e inclusive se presentaron valores de eficiencias mayores y por debajo del estimado con las medidas verosimilitud utilizadas tal como (NSE=0.35) y ($R^2=0.44$) que de acuerdo con los rangos recomendados por Molnar, (2011) y Motovilov et al., (1999) para la aceptación de la eficiencia de un modelo se puede decir que la certidumbre del modelo es satisfactoria.

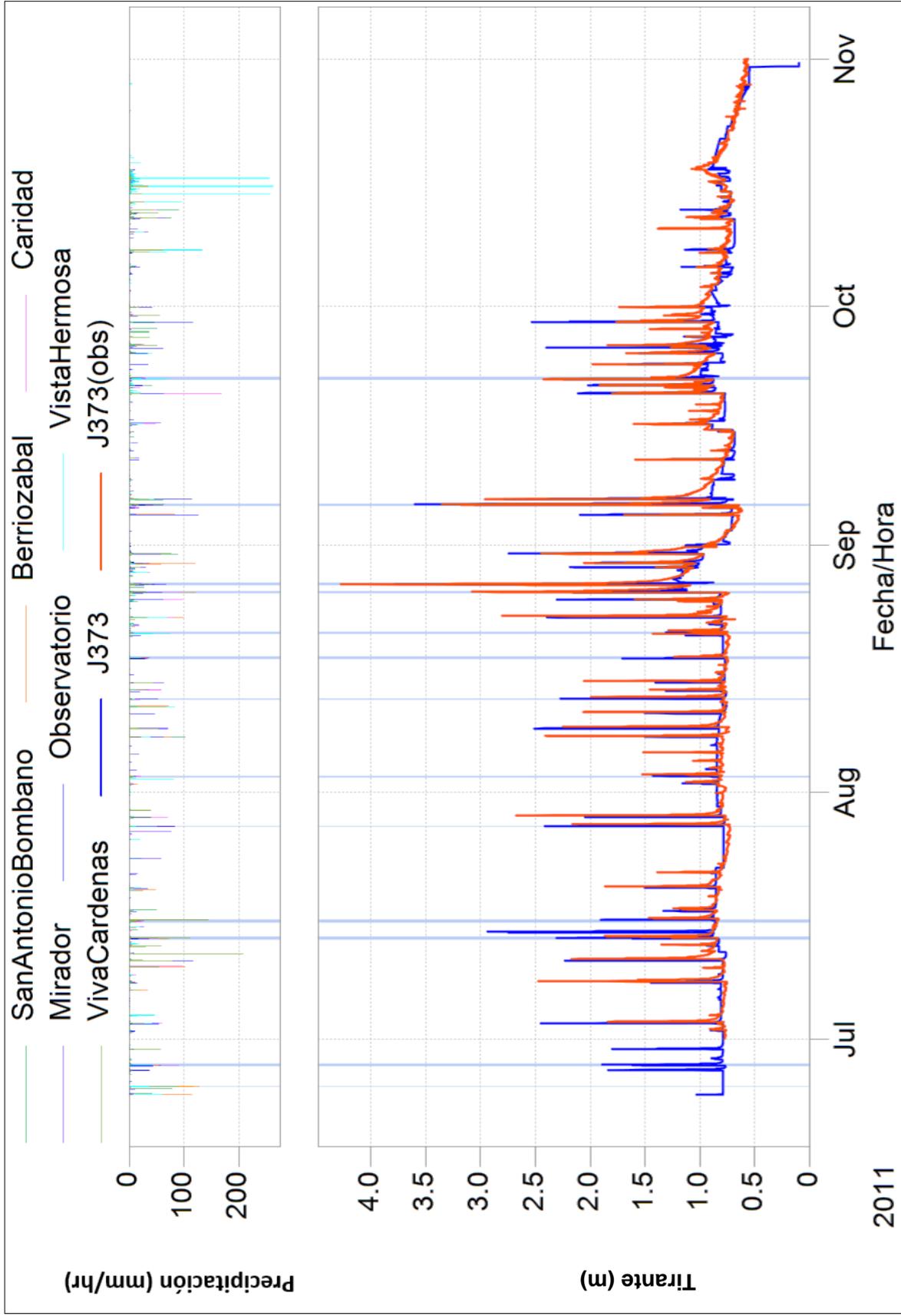


Figura 7.8 Resultado de la simulación con parámetros calibrados, las barras verticales de color azul tenue representan los eventos seleccionados del registro comprendido de 26-Jun-2011 a 31-Nov-2011.

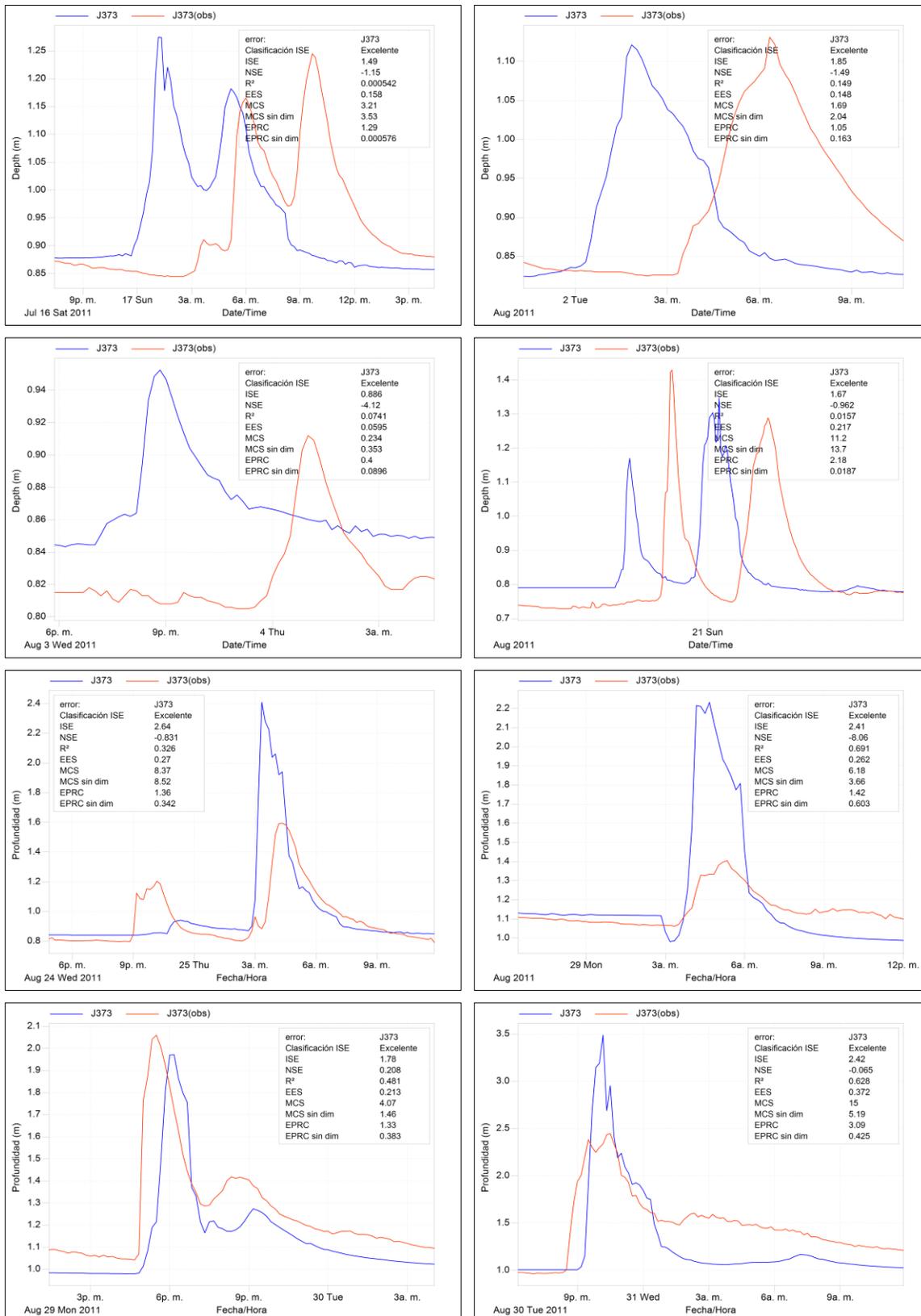


Figura 7.9. Hidrometría observada contra hidrometría simulada con parámetros calibrados para diferentes eventos ocurridos en el año 2011.

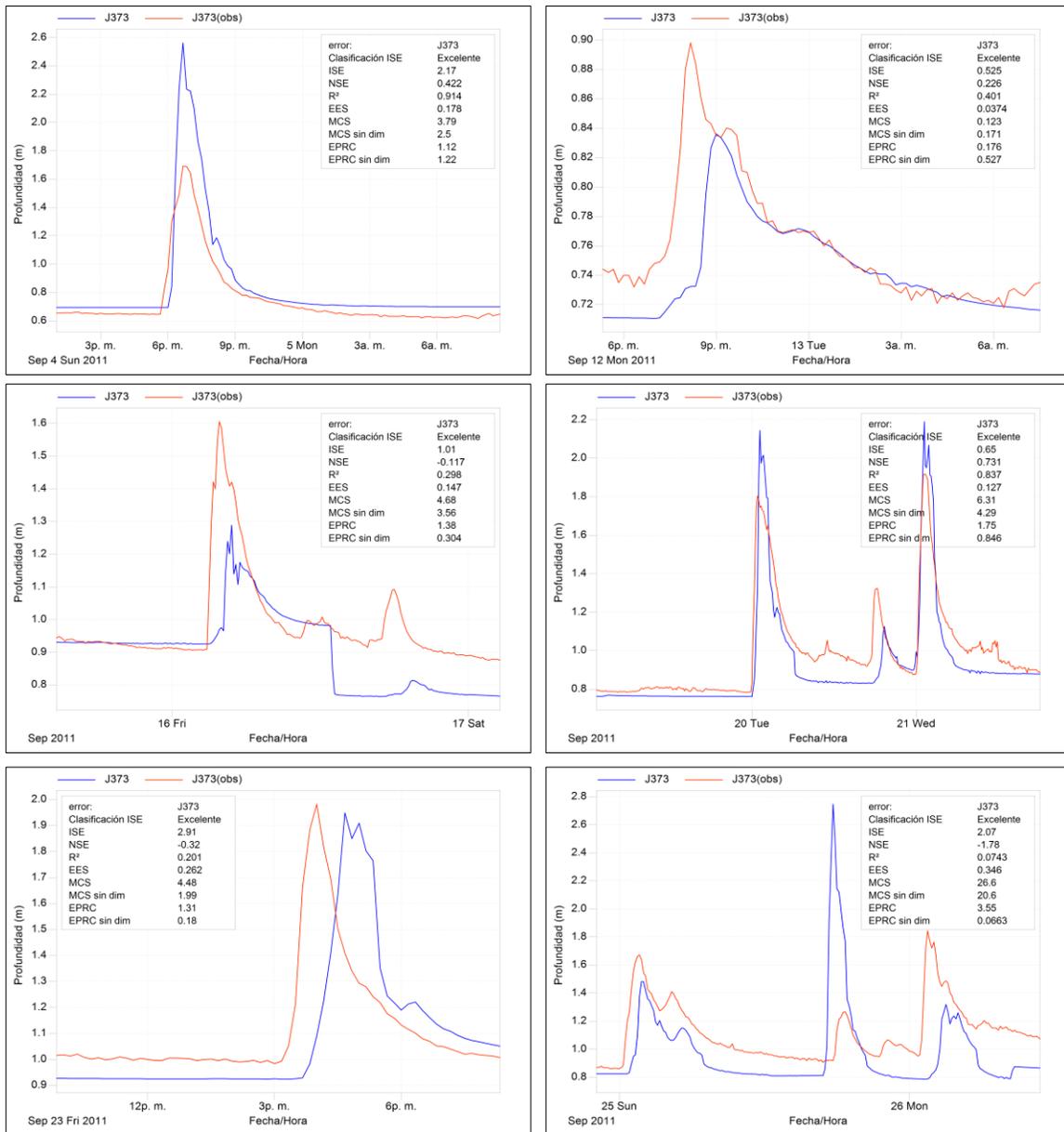


Figura 9b. Hidrometría observada contra hidrometría simulada con parámetros calibrados para diferentes eventos ocurridos en el año 2011.



7.4 Validación del modelo

Para la validación del modelo se seleccionaron tres eventos registrados en el 2011 a simular. El evento V-1 con una intensidad de lluvia acumulada total de 493.5 mm/h y duración de 1600 minutos para el análisis con el registro observado, V-2 con una intensidad de lluvia acumulada de 3502.5 mm/h y duración 3970 minutos de análisis y V-3 con una intensidad de lluvia acumulada de 660mm/h con una duración 1870 minutos de análisis.

De acuerdo a los resultados de las simulaciones de los eventos seleccionados para para la validación del modelo, se puede observar que en los resultados obtenidos de la simulación del evento V-1, ver figura 7.10, a pesar de haber una diferencia de 40cm entre el tirante máximo registrado respecto al tirante máximo calculado y al desfase que presenta el hidrograma derecho se puede apreciar un aumento arriba del 40% del valor de los coeficientes de verosimilitud como el NSE (0.77) y R^2 (0.78) en comparación a los valores de los coeficientes encontrados en la calibración global con NSE (0.35) y R^2 (0.44).

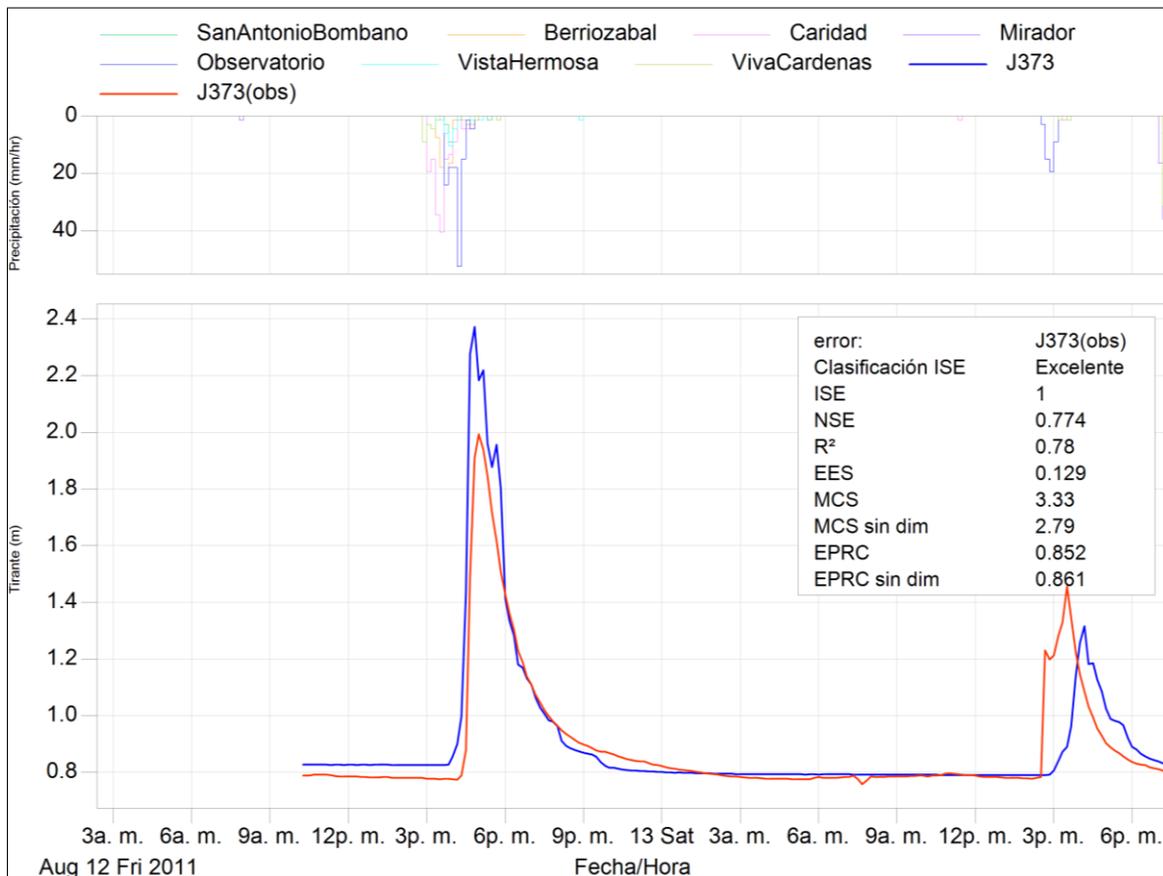


Figura 7.10. Evento V-1



Para el evento V-2 se muestra un caso similar al evento V-1, los tirantes máximos calculados y observados mostraron una diferencia mayor al 20% entre ellos, pero adicionalmente se presentó con más énfasis el error de volumen en dos hidrogramas después del seis de septiembre tal como se aprecia en la figura 7.11.

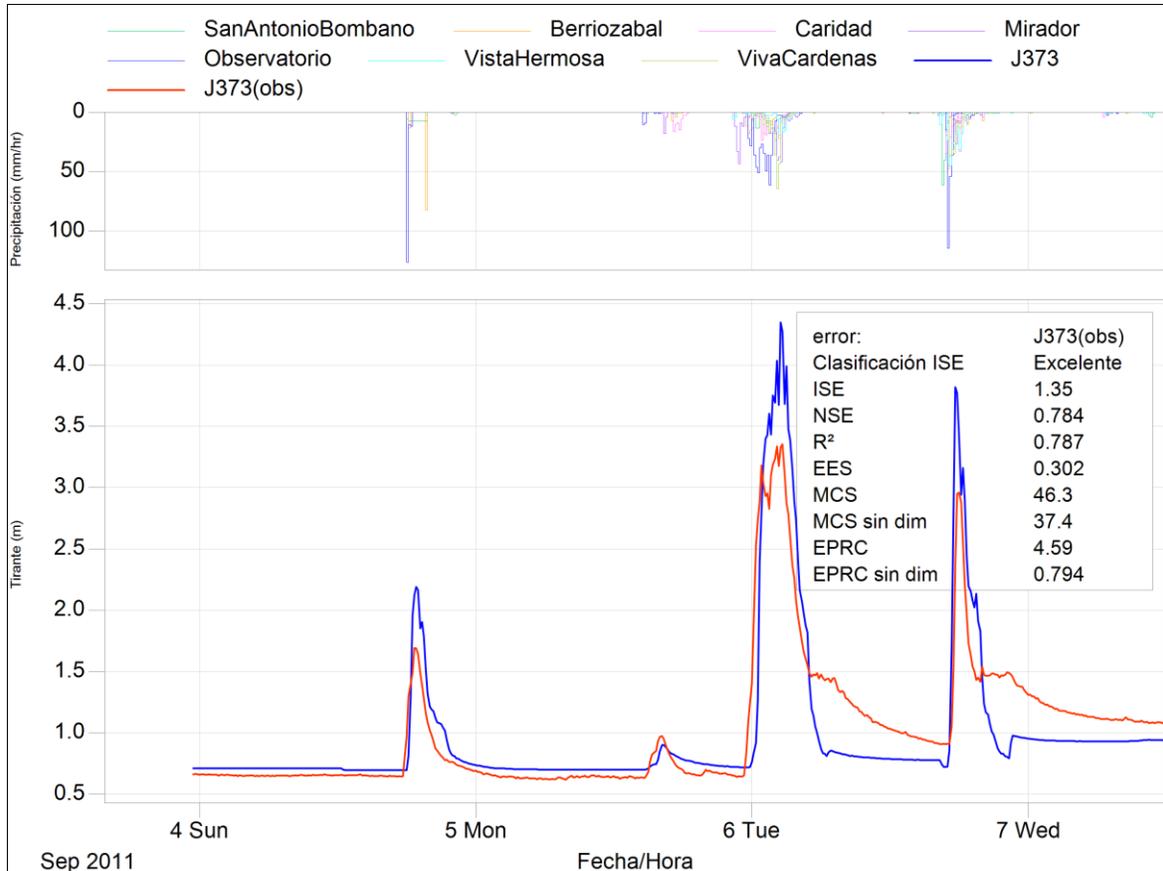


Figura 7.11. Evento V-2

Por último, está el caso del evento V-3 el modelo calculó un tirante 18% menor al observado, ver figura 7.12, es evidente la presencia del error de volumen, a pesar de estos inconvenientes el valor del coeficiente R² (0.92) es el más alto de los tres eventos seleccionados para la validación, aunque el valor del coeficiente NSE es el más bajo de los tres eventos, este aún se encuentra por encima del valor global del coeficiente obtenidos en la calibración, por lo que en base a los criterios, recomendaciones y a los rangos de aceptación del modelo sugeridas por Molnar (2011) y Motovilov et al. (1999) se puede afirmar que los resultados del modelo son aceptables.

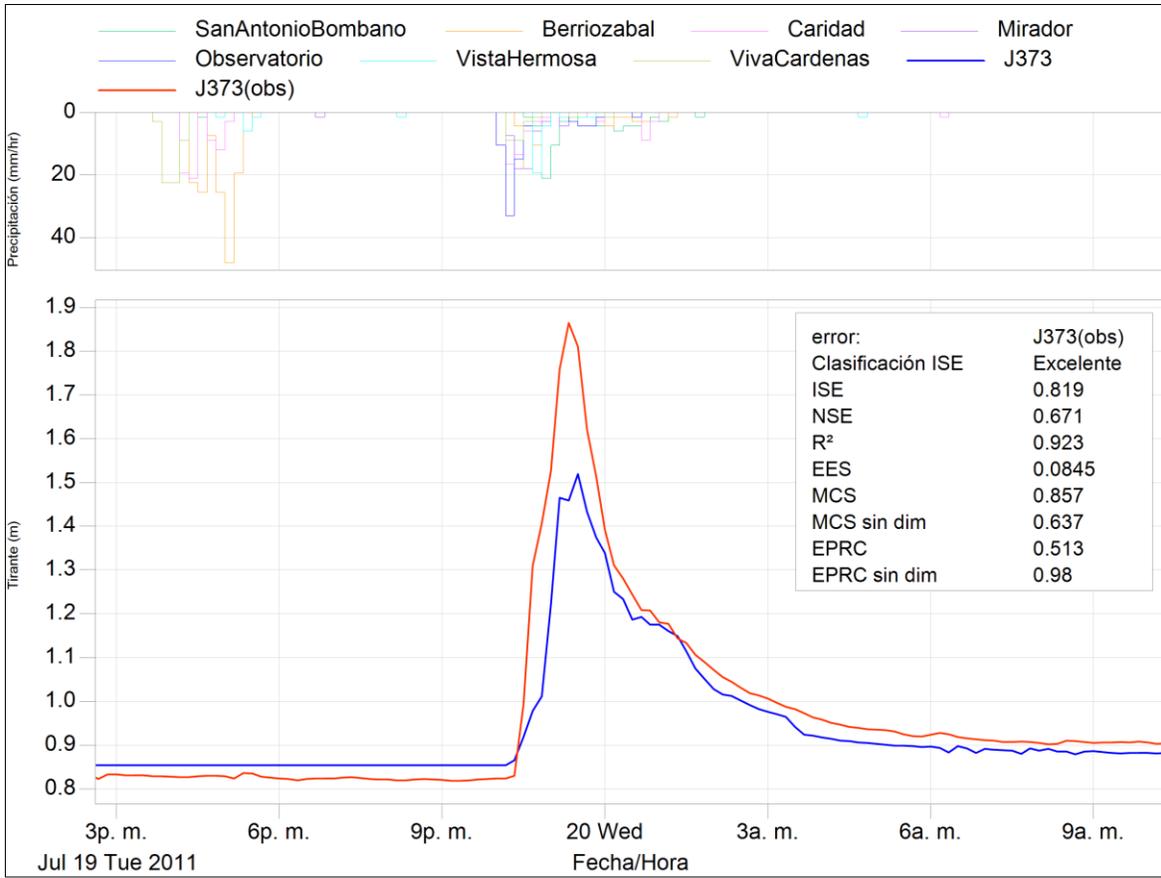


Figura 7.12. Evento V-3

7.5 Modelación de escenarios

La generación de los escenarios se estableció de acuerdo a los dos enfoques de lluvias analizados el cual consiste en 16 escenarios, ocho corresponden al análisis de lluvia estocástica (ST1, ST2, ST3, ST4, ST5, ST7, ST7 Y ST9) y el resto al método Tholin y Keifer para duración de lluvias de 30 minutos y 60 minutos con periodos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años.

7.5.1 Simulación de lluvias de 30min

De los escenarios generados con tormentas de diseño con duración de treinta minutos para periodos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años se observó que el nivel de peligro alto y medio solamente se presentó en el cauce principal de río Sabinal, además en la parte poniente de la ciudad se presentaron algunos desbordamientos, tanto como en la zona oriente con tirantes mayores a los 3.5 m con un nivel de peligro alto, ver figura 7.13, 7.13, 7.14 y 7.15.

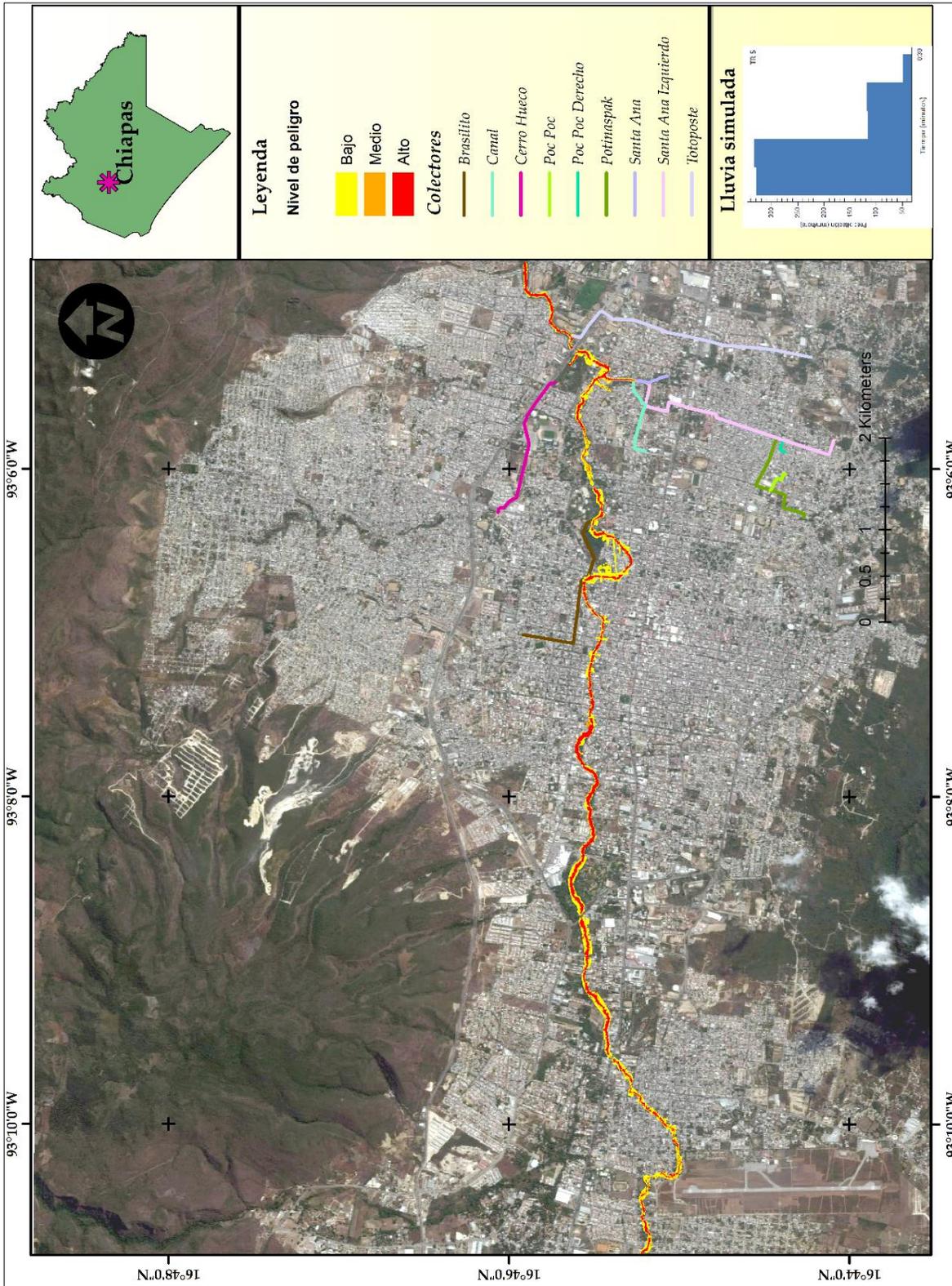


Figura 7.13. Simulación del hietograma de diseño Tr 5 años de 30 minutos.

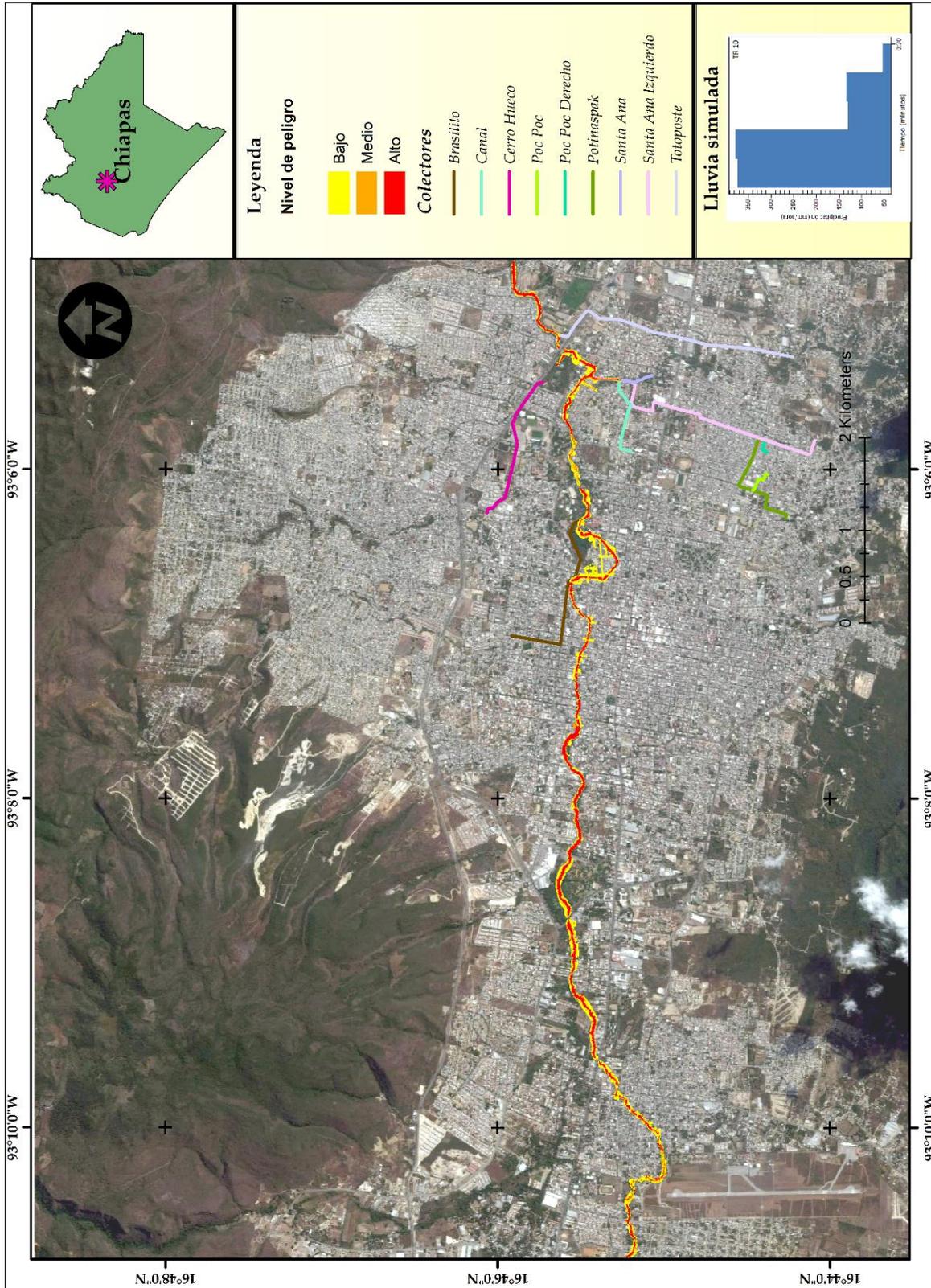


Figura 7.14. Simulación del hietograma de diseño Tr 10 años de 30 minutos.

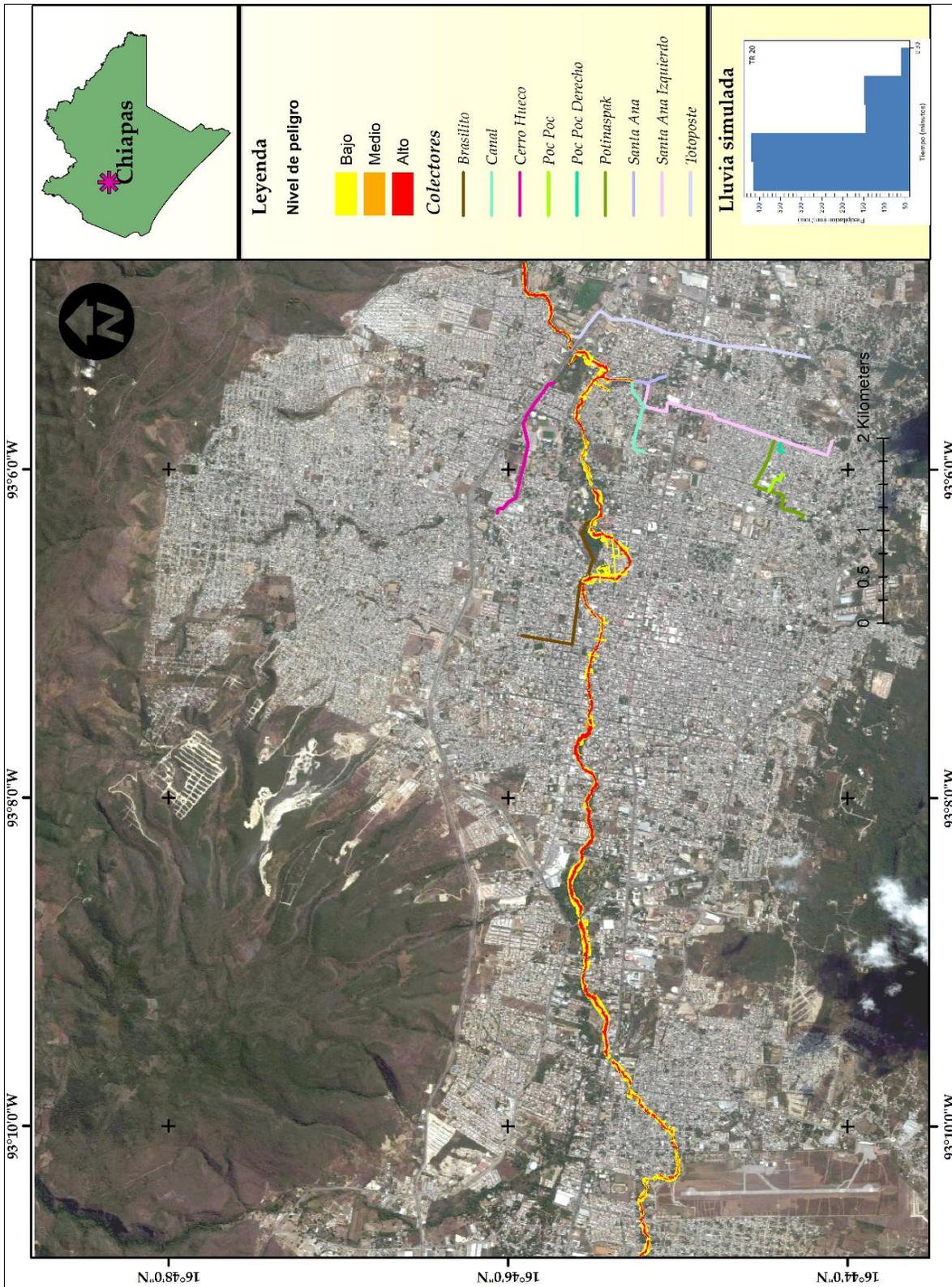


Figura 7.15. Simulación del hietograma de diseño Tr 20 años de 30 minutos.

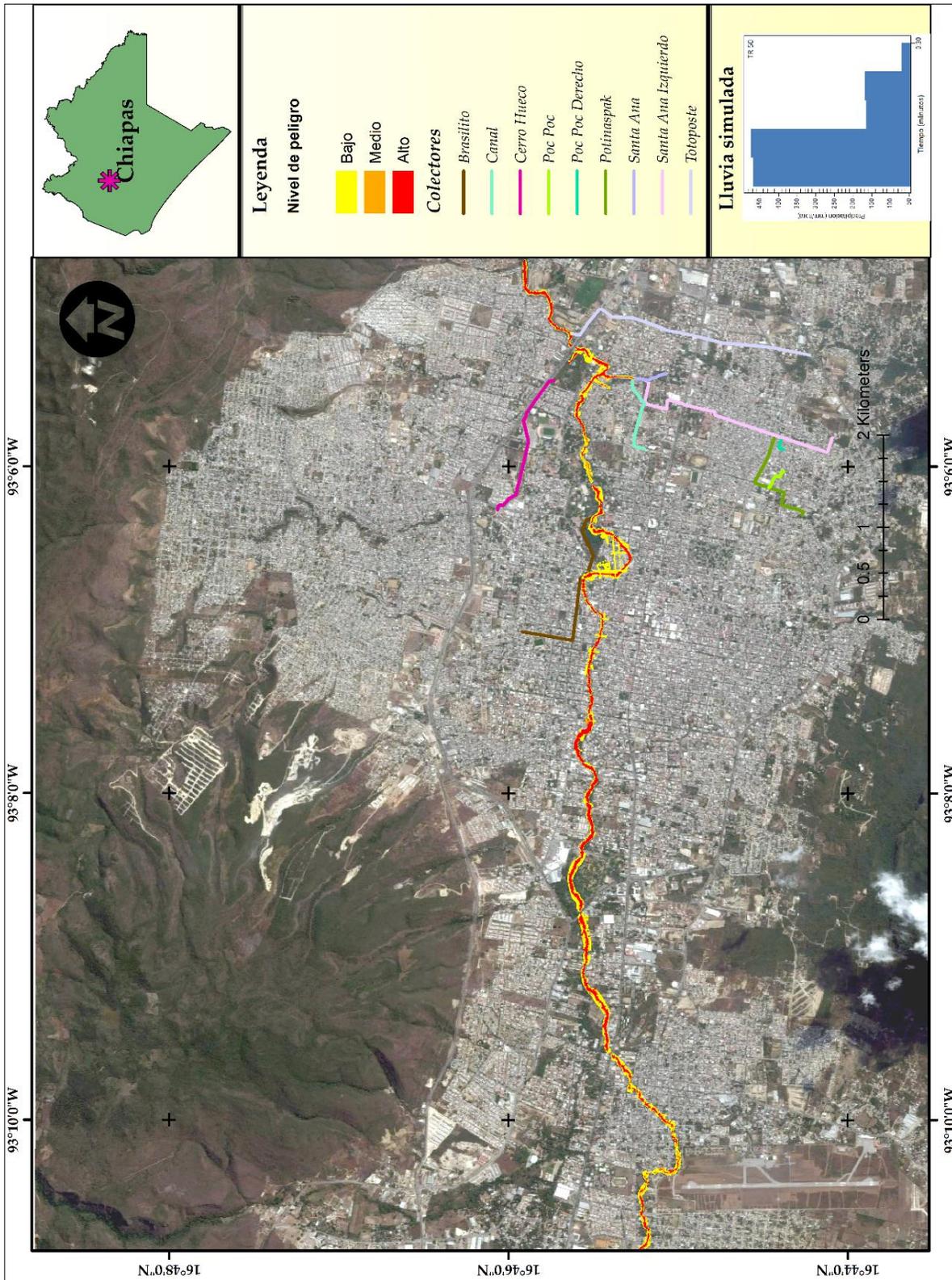


Figura 7.16. Simulación del hietograma de diseño Tr 50 años de 30 minutos.



7.5.2 Simulación de lluvias de 60 min

Para los escenarios generados con tormentas de diseño de duración de sesenta minutos para periodos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años se realizó un análisis similar al utilizado con las tormentas de treinta minutos, al igual se observó que el nivel de peligro alto y medio solamente se presentó en el cauce principal de río Sabinal, y en este caso el encharcamiento fue de menor intensidad en la zona oriente de la ciudad, ver figura 7.17, 7.16, 7.17 y 7.18, esto se debe principalmente a la distribución temporal de la lluvia acumulada. Es decir que las tormentas de diseño de treinta minutos son el doble de intensas que las de sesenta minutos.

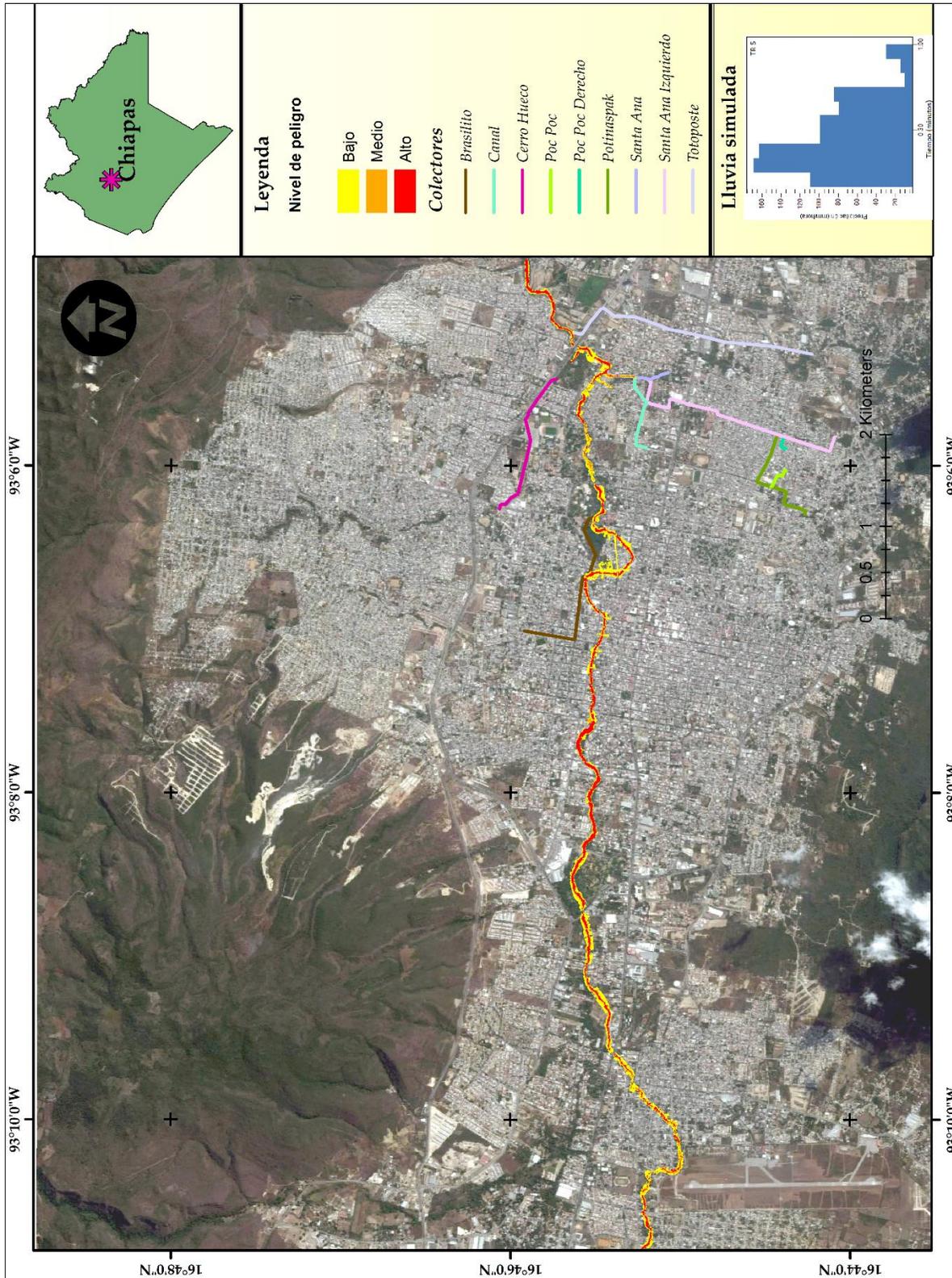


Figura 7.17. Simulación del hietograma de diseño Tr 5 años de 60 minutos.

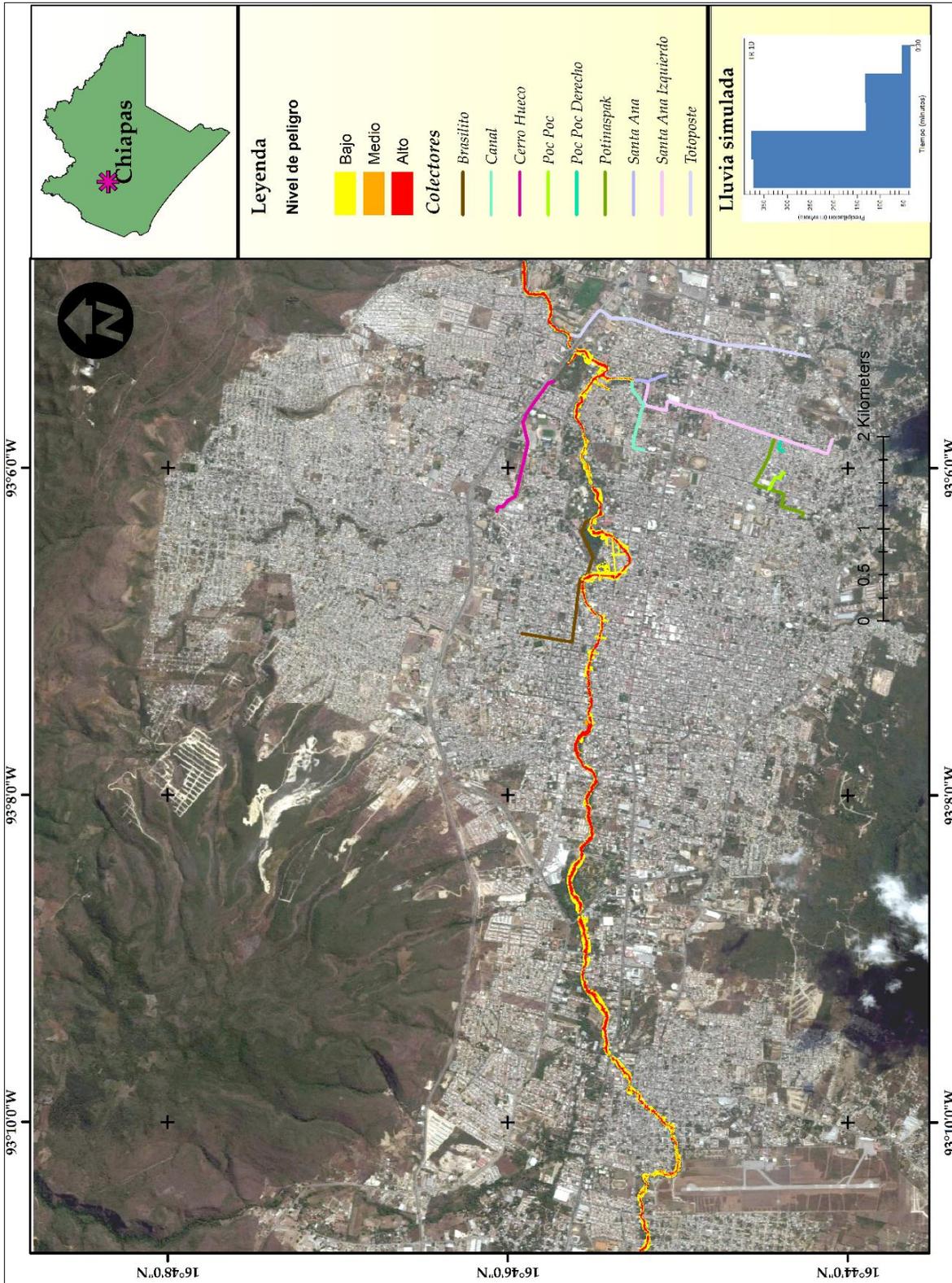


Figura 7.18. Simulación del hietograma de diseño Tr 10 años de diseño Tr 10 años de 60 minutos.

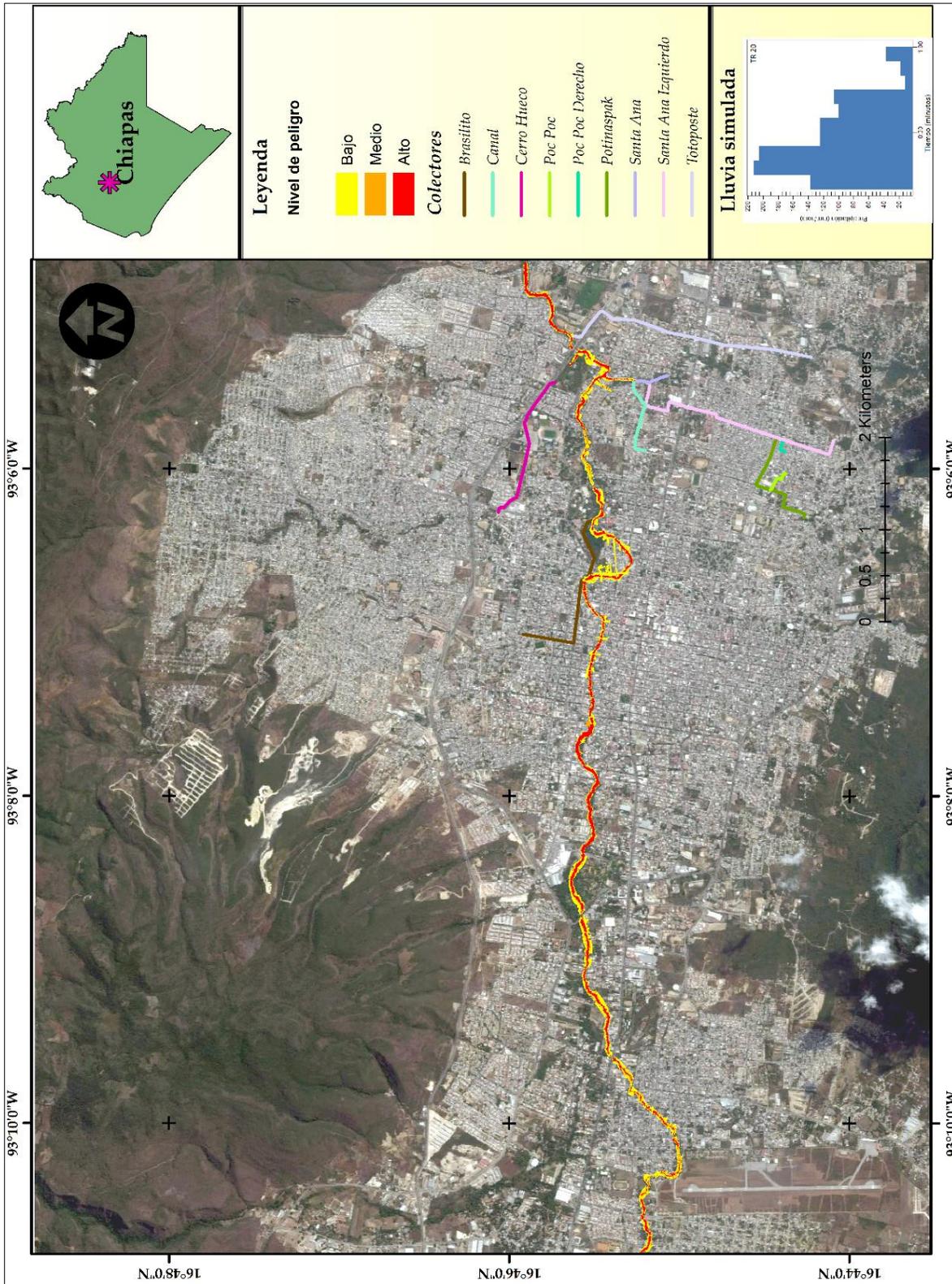
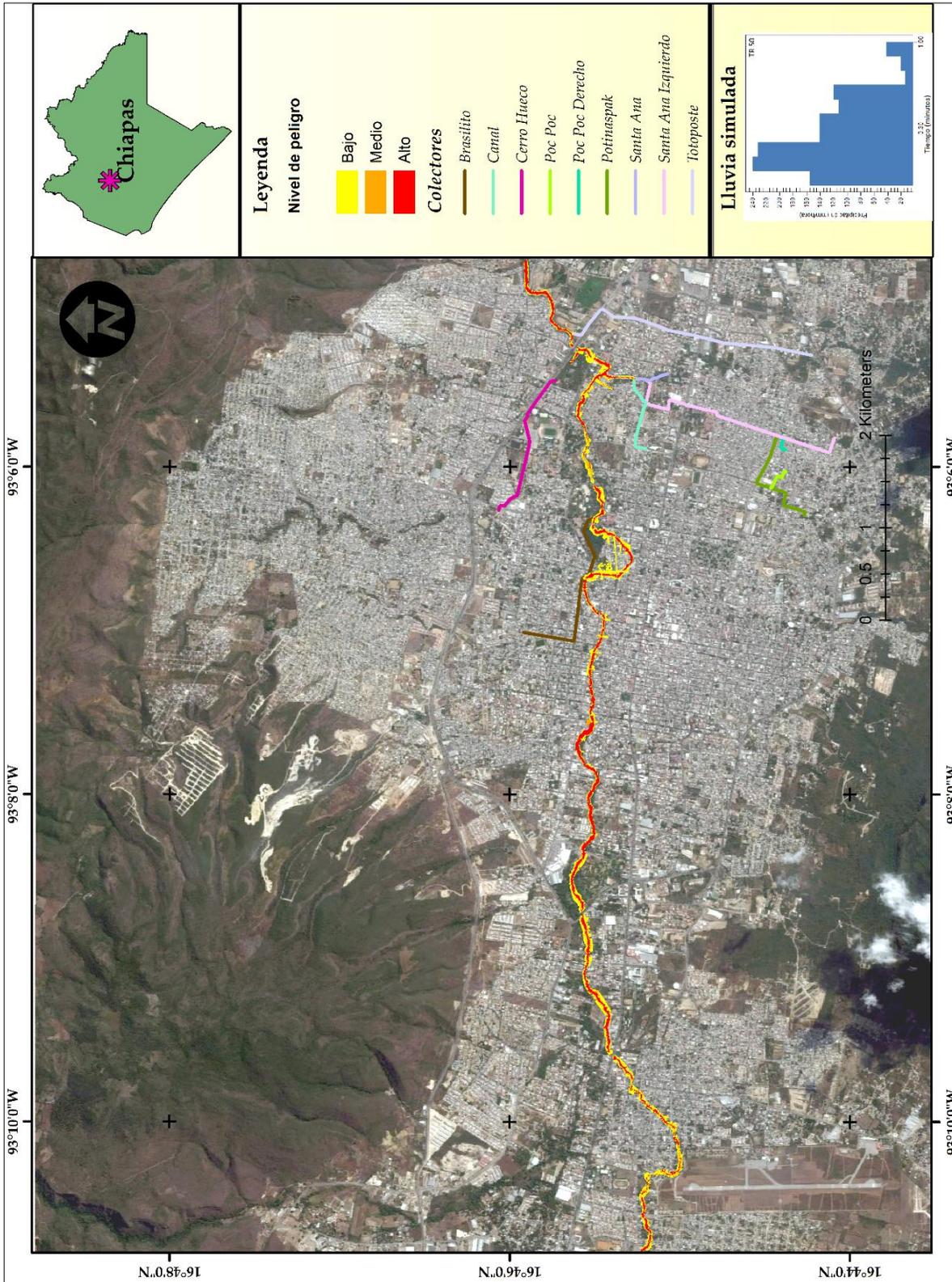


Figura 7.19. Simulación del hietograma de diseño Tr 20 años de 60 minutos.





7.5.3 Simulación de las lluvias estocásticas

De acuerdo a los resultados obtenidos con la simulación de lluvias generada con el modelo MAR(1) se afirma que los escenarios ST3, ST7 y ST9, ver figura 7.23, 7.24 y 7.26 respectivamente, simulados con lluvias acumuladas menores de 70mm con duraciones de 120 a 240 minutos no presentan riesgo para las personas que habitan cerca del río Sabinal. A diferencia de los escenarios ST1, ST2, ST5 y ST8, ver figura 7.21, 7.20, 7.23 y 7.25 respectivamente, que presentaron más zonas de encharcamiento con nivel de peligro bajo de poniente a oriente en varios tramos del río, el nivel de peligro es alto en el centro del canal representados por las variable vector de velocidad y profundidad, la principal característica de estas lluvias en estos escenarios son precipitaciones acumuladas con alturas mayor a los 200mm sobre la cuenca con duración de 300 a 700 minutos. Mientras que el escenario más crítico o desfavorable fue el ST4 con lluvia acumulada de 294mm sobre la cuenca y duración de 450 minutos, ver figura 7.24.

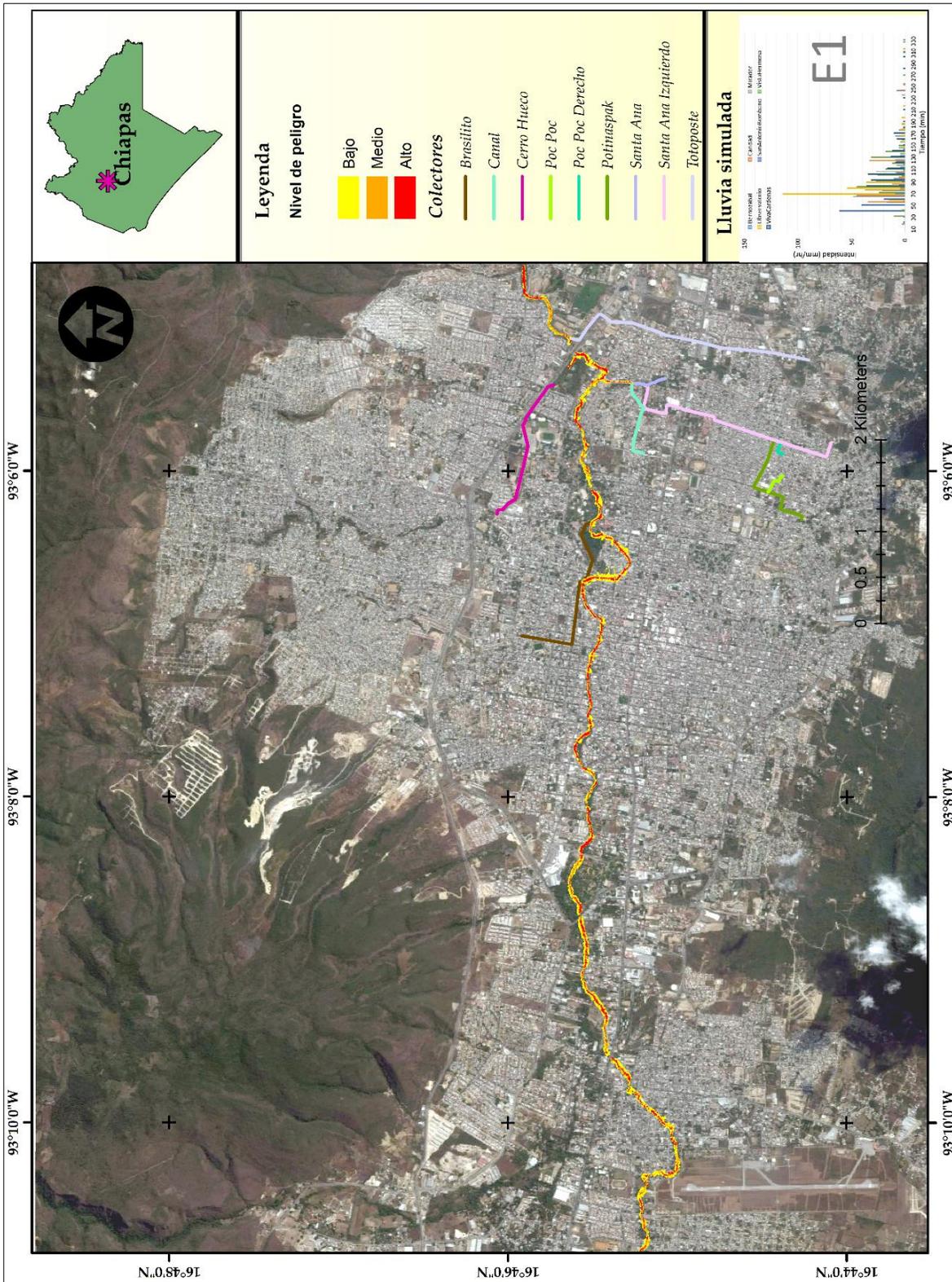


Figura 7.21. Escenario STI.

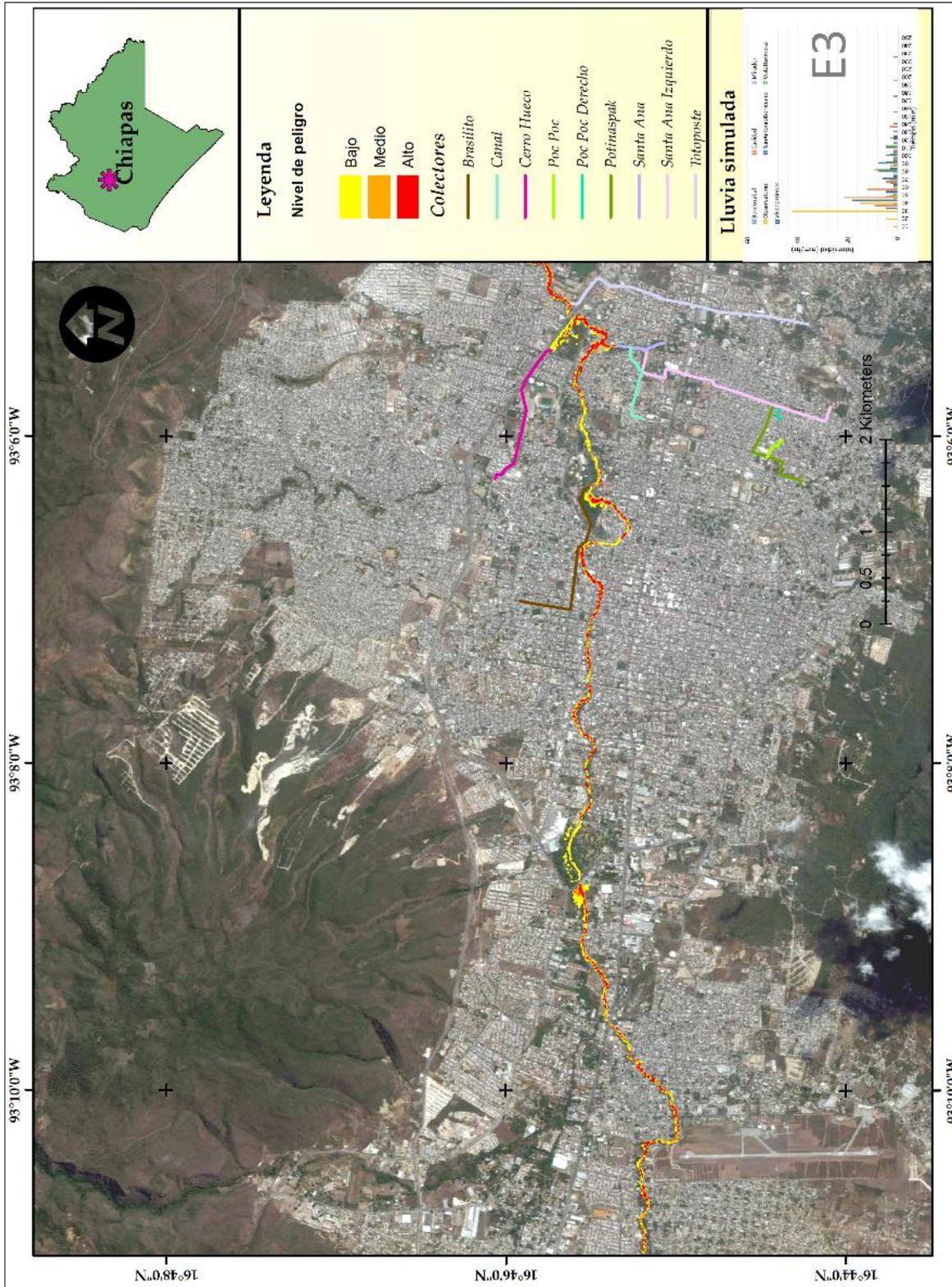


Figura 7.23. Escenario ST3.

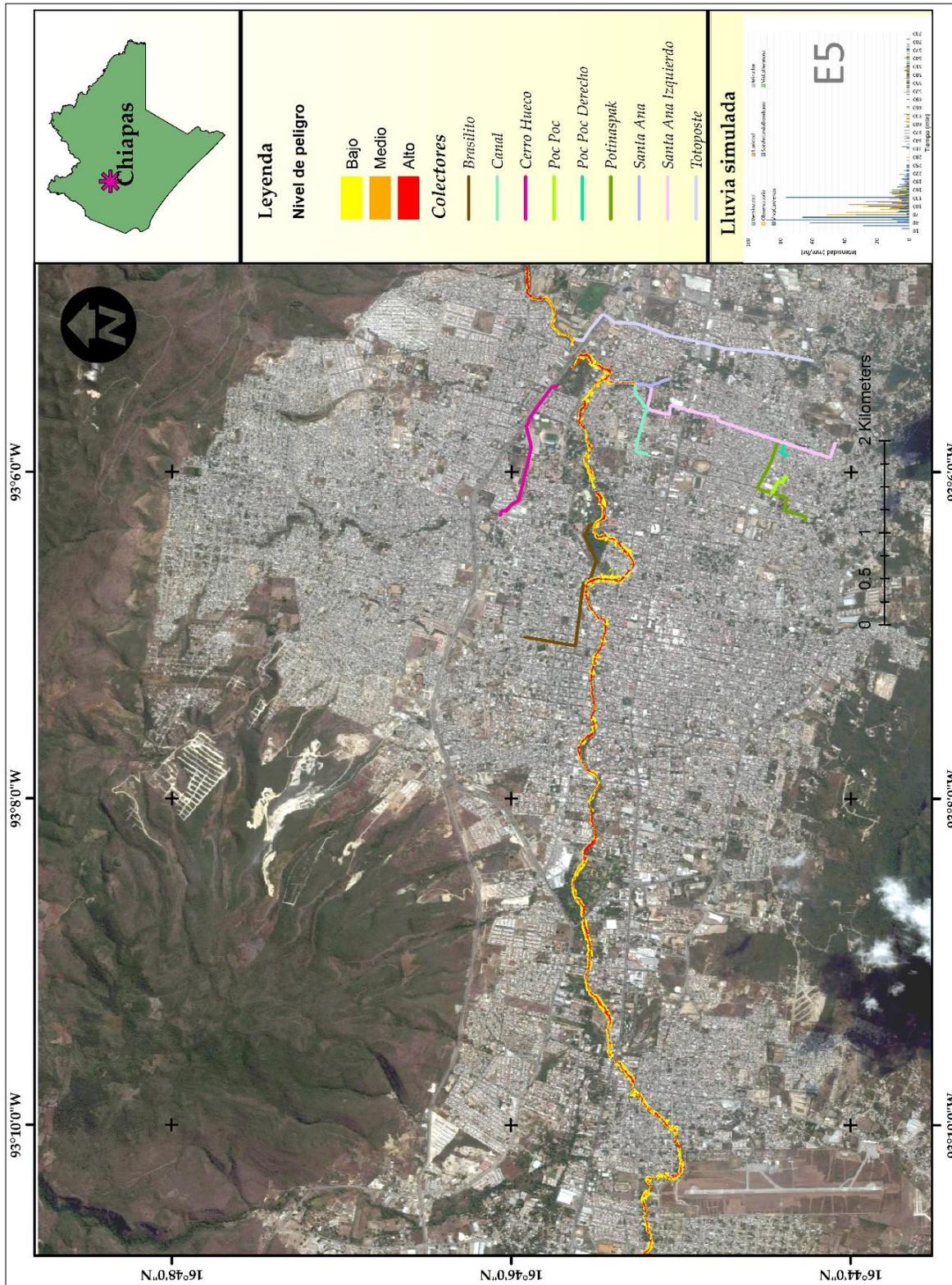


Figura 7.25. Escenario ST5.

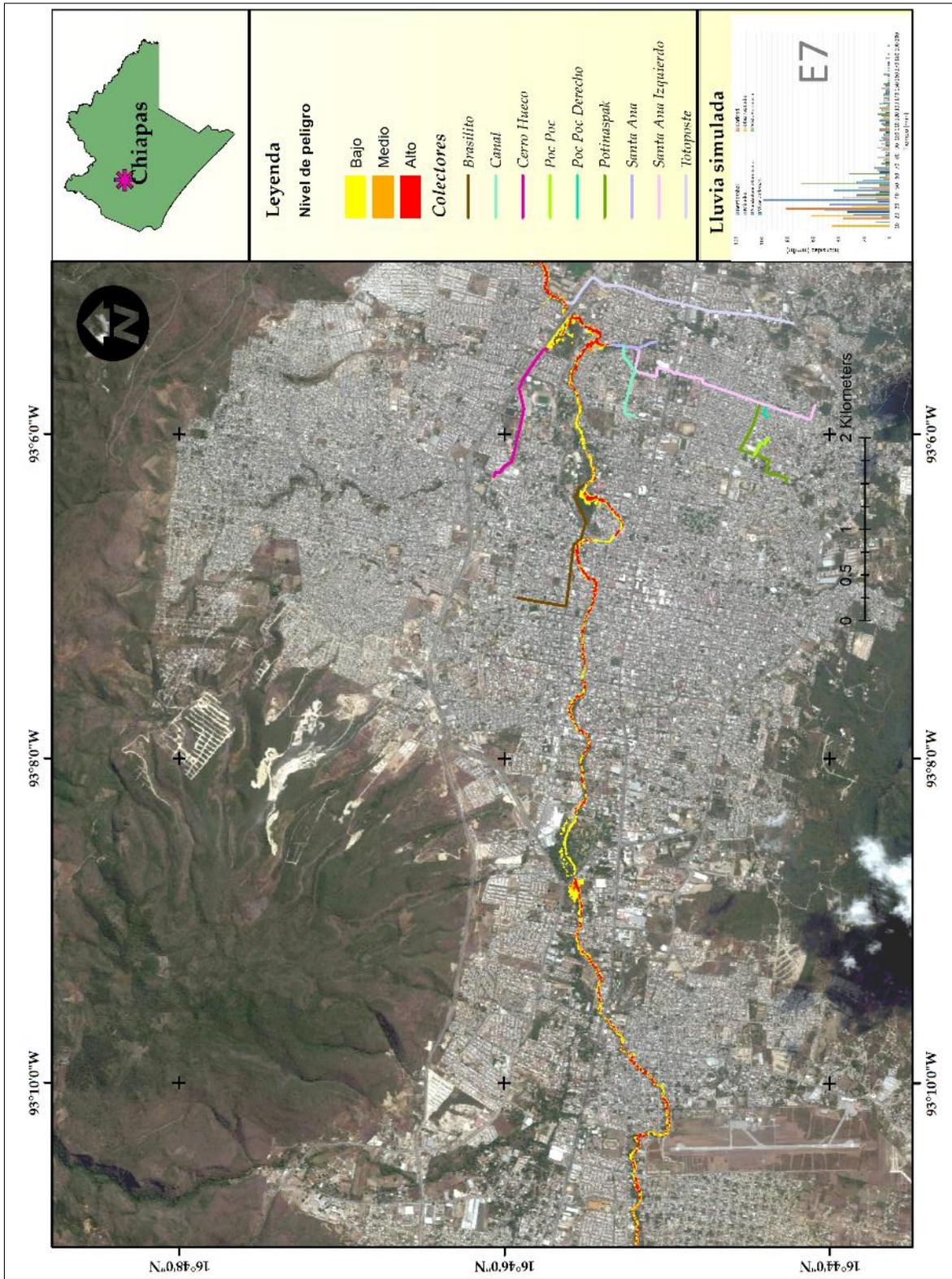


Figura 7.26. Escenario ST7.

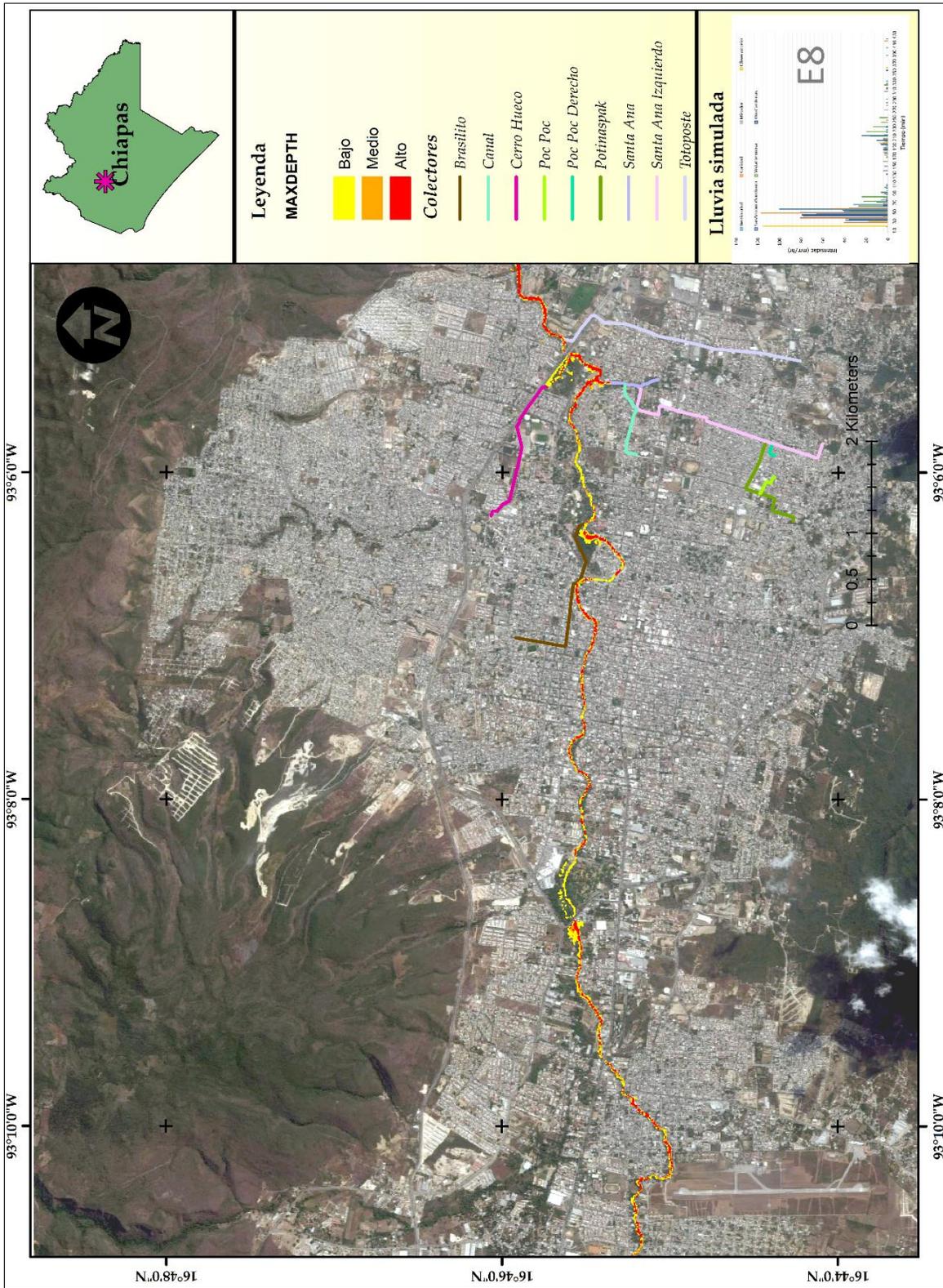


Figura 7.27. Escenario ST8.

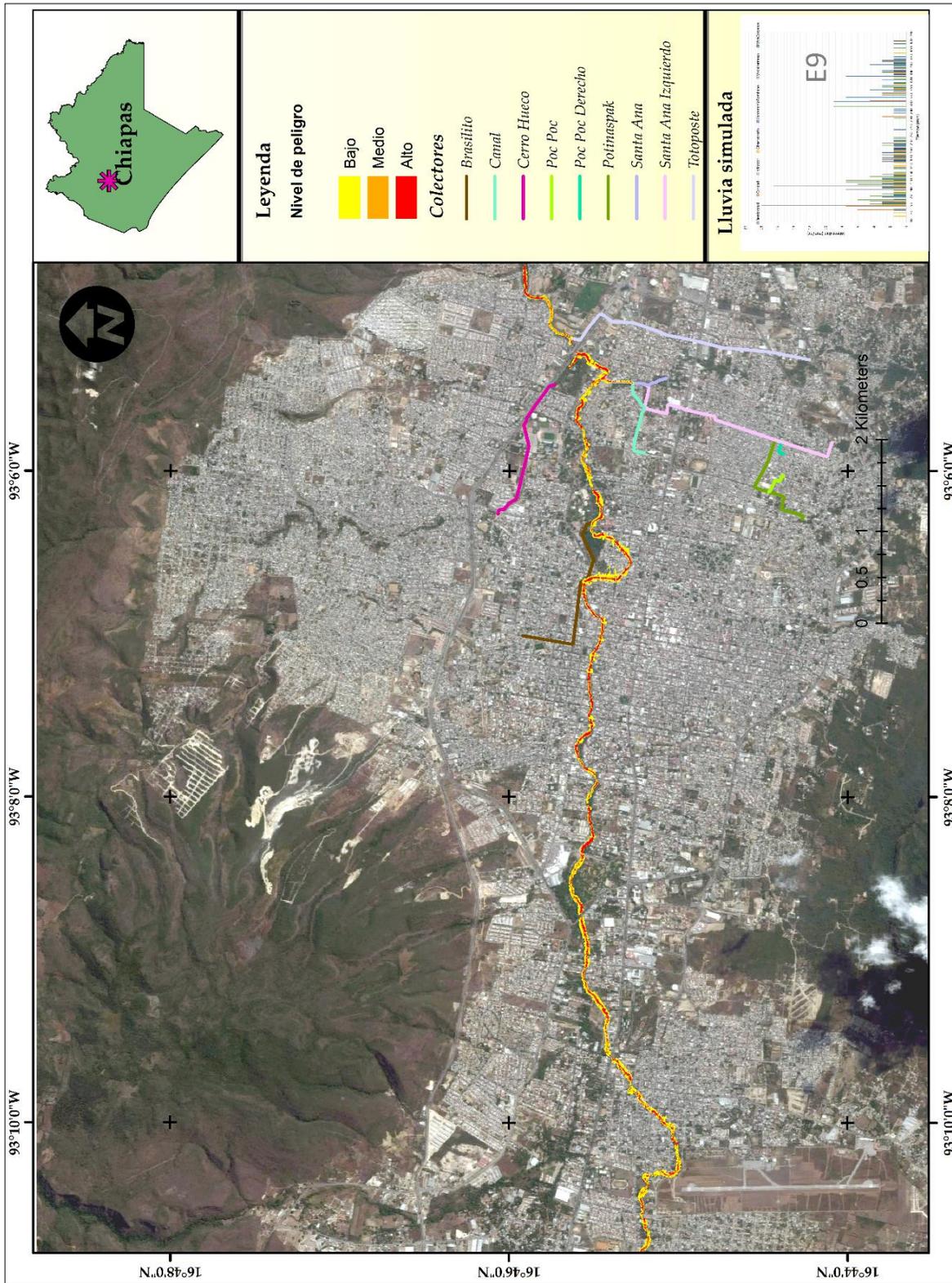


Figura 7.28. Escenario ST9.



7.6 Análisis de los resultados obtenidos

Es preciso mencionar que en el capítulo cinco se estableció como punto de referencia el nodo J373 para comparar el tirante calculado por el modelo PCSWMM® con los tirantes registrados, puesto que este nodo representa al instrumento ubicado en la margen derecha del río que mide y reporta las elevaciones al sistema de alerta temprana denotado como la estación número 5 en la figura 6.2.

De acuerdo a los escenarios obtenidos por los dos enfoques aplicados al registro de lluvia del año 2011, se realizó un análisis de los tirantes máximos alcanzados por los eventos simulados, ver figura 7.29 y 7.28, en las cuales se compara la hidrometría observada originada por un evento máximo y la hidrometría calculada por el modelo de los diferentes escenarios generados por los dos enfoques de lluvia.

En relación a los resultados de la figura 7.29, se puede decir que de los ocho escenarios simulados, el escenario ST4 representa un evento extremo con un gasto máximo de 132,000 litros por segundo en comparación a los demás, asimismo presenta una similitud en el tirante máximo alcanzado respecto a la hidrometría registrada. Cabe mencionar que la hidrometría observada pertenece al evento ocurrido el día 26 de agosto que inició alrededor de las once de la noche y que tuvo una duración aproximada de 5 horas, también, se determinó la duración del pico, es decir, el tiempo que el tirante del agua permaneció por encima de los cuatro metros y se encontró que la duración del pico para el escenario ST4 es de una hora, mientras que para la hidrometría observada fue de una hora con diez minutos.

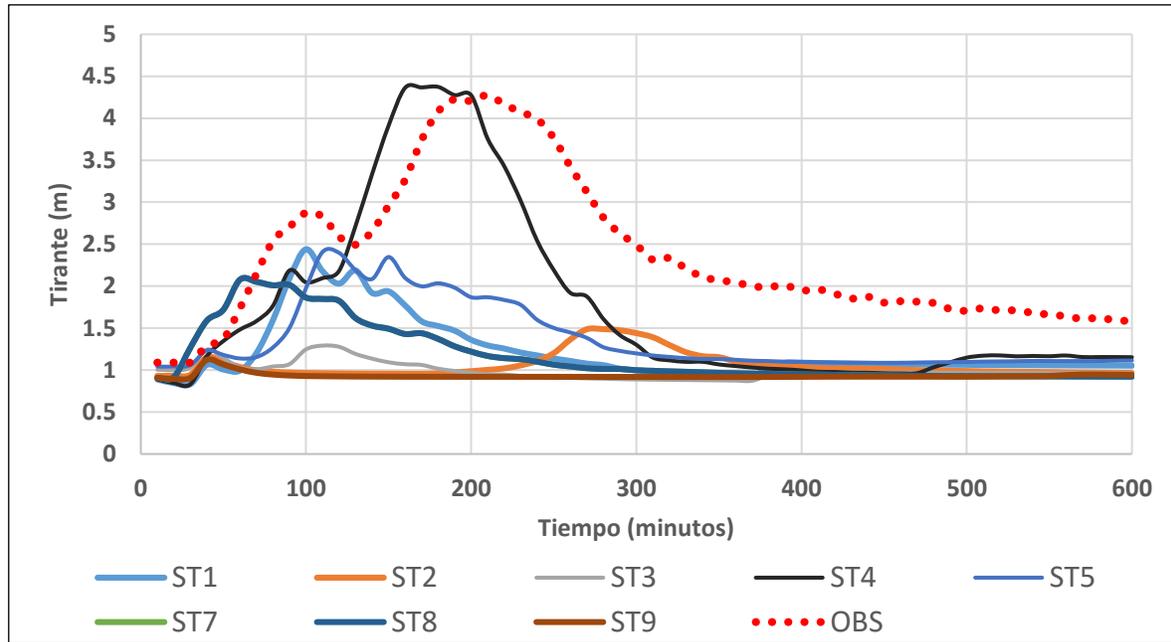


Figura 7.29. Hidrometría observada vs hidrometría simulada (escenarios obtenidos mediante el enfoque de lluvia estocástico).

A diferencia del escenario ST4, las condiciones que se presentaron en el escenario ST5 fue de un canal con la capacidad de transitar un gasto de 56,000 litros por segundo, sin presentar desbordamientos en ninguna sección transversal del río, alcanzando un tirante máximo de 2.5 metros en el nodo J373 con duración de 90 minutos. En cambio, con el escenario ST9 se presentó una condición menos desfavorable alcanzando un tirante máximo de 1.23 metros en el punto de referencia de medición, por lo que este escenario representa una condición mínima en el canal de los eventos registrados durante la simulación de este enfoque utilizado.

Respecto a las simulaciones hechas con los eventos obtenidos por el método de Tholin y Keifer para eventos de 30 y 60 minutos se observa que los resultados muestran similitud en la forma del hidrograma entre ellas y difiriendo en los tirantes máximos alcanzados, ver figura 7.30 y 7.29. El escurrimiento que producen estos hietogramas de diseño provocan que la mayoría de las secciones del modelo construido con la información LiDAR se encuentren en a su máxima capacidad o en su condición más desfavorable (desbordándose).

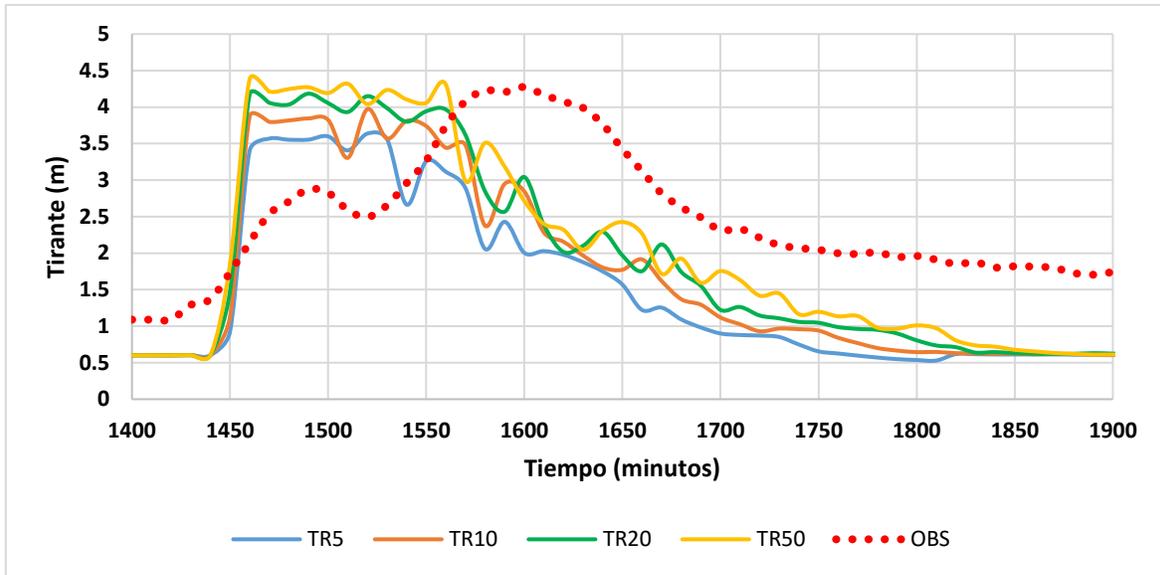


Figura 7.30. Hidrometría observada vs hidrometría simulada (tormentas de diseño con duración de 30 minutos).

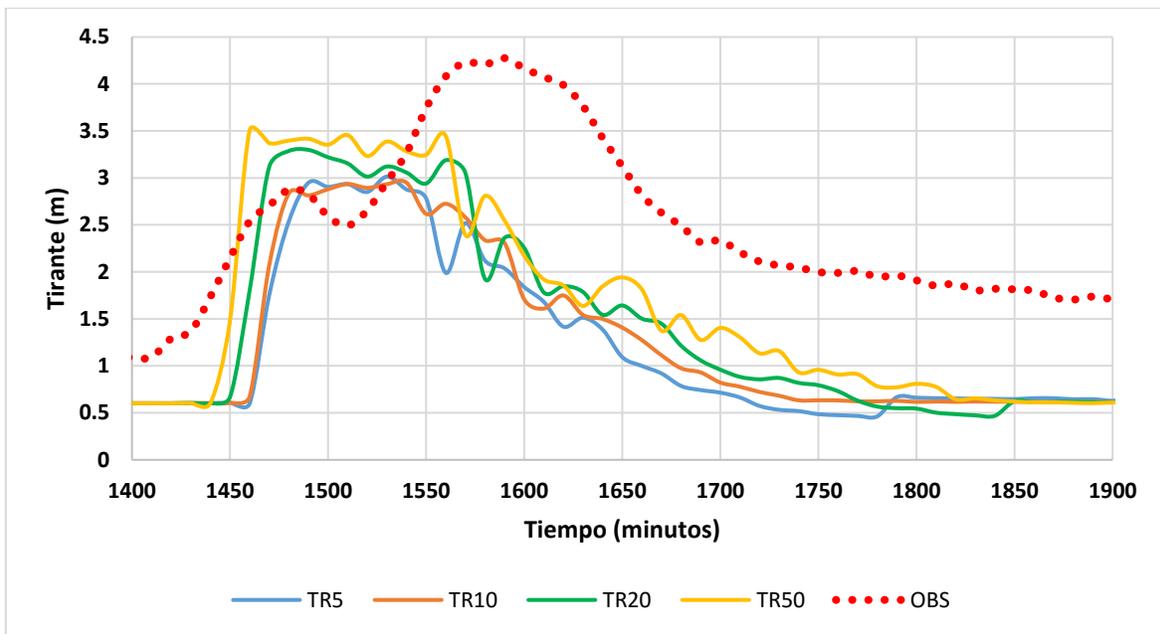


Figura 7.31. Hidrometría observada vs hidrometría simulada (tormentas de diseño con duración de 60 minutos).



Por otra parte, con base en los reportes emitidos por los medios de comunicación acerca de las inundaciones frecuentes en la Cuarta poniente norte a la altura de la 5ta norte, se realizó un análisis similar al del nodo J373 en la cual se obtuvieron los resultados de la figura 7.32, es importante mencionar que de acuerdo al LiDAR con que se trabajó se encontró que en esta zona de la ciudad el canal cuenta con secciones transversales que van desde los 2.1 a 3.8 metros de profundidad. Esto quiere decir que para el escenario extremo obtenido como el ST4 se produce desbordamiento en varios tramos del río, debido a que en el punto de referencia (nodo J109) se obtuvieron tirantes mayores a 3.5 m, mientras que el escenario ST5 representa una condición crítica en el canal, esto quiere decir que con este escenario el canal se encuentra a su máxima capacidad en esta zona del río antes de empezar a desbordarse. Y para el resto del escenario es evidente que no representan peligro alguno al dar como resultados tirantes por debajo de altura promedio de las secciones del río.

Por otra parte, para los escenarios TR50_30m y TR50_50m resulta claro que algunas secciones estarán a su capacidad máxima o presentarán desbordamientos en esta zona al presentarse tirantes alrededor de los cuatro metros.

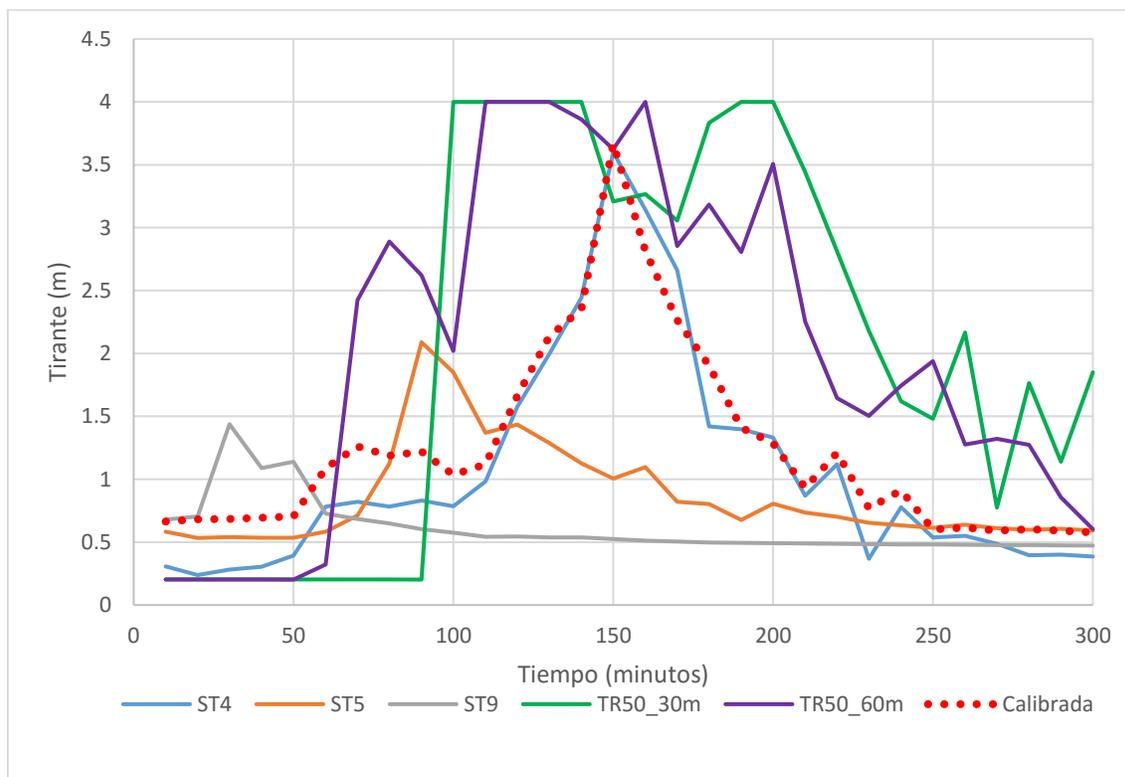


Figura 7.32. Resultados de la hidrometría de la simulación de los enfoques de lluvia en el nodo J109.



De acuerdo los resultados obtenidos, en la tabla 7.6 se muestran algunas de las ventajas y desventajas que se encontraron al momento de realizar las simulaciones de las lluvias por los dos enfoques.

Tabla 7.6. Ventajas y desventajas de los mapas de inundación y escurrimiento de acuerdo al enfoque Tholin-Keifer y el estocástico.

Ventajas	Desventajas
Tholin-Keifer	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Requieren de tiempos menos prolongados en la simulación del modelo LL-E para la obtención del gasto pico. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puede subestimar o sobrestimar el gasto pico con respecto a la hidrometría observada.
Estocástico	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se obtuvieron gastos picos semejantes a la hidrometría observada. ▪ De un evento registrado se pueden generar distintos escenarios. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Si se trabaja con eventos que cuenta con series de información extensa se requiere más tiempo en la simulación en un modelo de LL-E para la obtención del gasto pico.

8.1 Conclusiones

A través de la presente tesis, se obtuvieron resultados capaces de representar el comportamiento del proceso lluvia-escorrentamiento en una zona urbana como la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas de los cuales se obtuvieron las siguientes conclusiones referentes a la modelación y calibración, análisis de los registros de precipitación para la obtención de lluvia sintética con los métodos determinístico y estocástico, y por último la simulación de los resultados de ambos métodos para el análisis de lluvia para la generación de los escenarios de peligro por inundación.

Las conclusiones que obtuvieron referentes a la modelación y calibración son las siguientes.

- De acuerdo con la metodología empleada en este trabajo, se realizó la integración de un modelo 1D semidistribuido con una configuración de lluvias espacialmente distribuidas que dieron como resultado la estimación de los valores de los parámetros que calibran y disminuyen la incertidumbre en el modelo LL-E, obteniendo valores aceptables en los estimadores de la verosimilitud tales como la NSE y R^2 cuyos valores en la calibración global fueron de 0.35 y 0.44 respectivamente. Por otra parte, para los eventos aislados (locales) seleccionados, se obtuvo un rango de 0.25 a 0.8 en el estimador de la verosimilitud de NSE, mientras que en el criterio R^2 el intervalo fue de 0.14 a 0.95, es decir que bajo estos criterios los conjuntos de parámetros determinados representan de manera aceptable el proceso lluvia escurrimiento en la zona de estudio.
- Utilizar un modelo semidistribuido en el que se integran secciones de ríos, obras hidráulicas y un modelo digital de alta resolución representa un costo computacional elevado cuando en el modelo bidimensional se considera un mallado muy fino y mal distribuido.



Con respecto, al análisis de los registros de precipitación para la obtención de lluvia sintética con los métodos determinístico y estocástico se concluyó que:

- Los valores de la lluvia acumulada de los hietogramas de diseño obtenidos por el método Tholin y Keifer para 30 y 60 minutos con periodos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años fueron mayores de un 60 a 75% respecto a los calculados con el método estocástico. Asimismo, estas lluvias fueron de 3 a 4 veces mayores a los eventos máximos registrados en el año 2011 por lo que se concluye que las lluvias calculadas por el método Tholin y Keifer en este trabajo están sobre-estimadas.
- Utilizar métodos estocásticos implica que la serie de datos a utilizar sea consistente, homogénea y cuente con un número suficiente de información. Si las series de datos no cuentan con estas características conlleva a la obtención de información errónea.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en el modelo estocástico para la generación sintética de lluvia, no todos los eventos seleccionados estuvieron dentro de los límites del análisis de consistencia de datos, esto debido a que el método empleado MAR(1) presenta deficiencia cuando los datos o información no es continua ya sea por la misma ocurrencia en que se presenta el fenómeno (la lluvia) o en su caso más desfavorable la falta de información. Estos datos faltantes son representados por “ceros” en los registros. En este sentido, la deficiencia se da porque al momento de estimar los parámetros estadísticos de una serie continua como por ejemplo la media, varianza y desviación estándar, estos consideran al dato a lo largo del cálculo para estimar el valor de parámetro, y como se dio a conocer el modelo MAR(1) depende de estos parámetros para la generación sintética de lluvia.

Finalmente, de la simulación de los resultados de ambos métodos para el análisis de lluvia para la generación de los escenarios de peligro por inundación se concluye lo siguiente.

- Los resultados observados en los mapas generados usando hietogramas de diseño obtenidos por el método Tholin y Keifer para 30 y 60 minutos con periodos de retorno de 5 a 50 años con tirantes máximos de 3 a 4.5 m en el Río Sabinal, presentaron mayores zonas de encharcamientos de lado poniente de



la ciudad, estos encharcamientos no representan un peligro elevado ya que el campo de velocidad y los tirantes son máximos solo en las secciones del río.

- Por otra parte, en los escenarios generados con lluvias sintéticas por el método MAR(1), se observó lo siguiente: los escenarios ST2, ST3, ST7 y ST9 presentan ligeros encharcamientos con tirantes máximo en el Río Sabinal de 1.48, 1.29, 2.07 y 1.12 metros respectivamente, con un nivel de peligro bajo en la zona poniente. En cuanto a los escenarios ST1, ST5 y ST8 presentaron tirantes máximos entre 2 y 3m, la principal característica de estos escenarios fue que la mayor parte de la lluvia se centró en la zona alta de la cuenca, produciendo grandes volúmenes de escurrimientos, este dato es reflejado en las llanuras de inundación del mapa, el mismo caso se presenta para el escenario ST4 pero con mayor lamina acumulada.
- En todo caso para los mapas de peligro por inundación obtenidos bajo el enfoque de generación sintética con el método MAR(1) en el cual se obtuvieron resultados satisfactorios al obtener eventos de lluvia con características similares a las ocurridas en los cuales se obtuvieron distintos escenarios críticos y con los que se determinó que lluvias acumuladas del orden de 30 a 50 mm sobre la parte urbanizada y alta de la cuenca con duraciones mayores 120 minutos no representan amenaza alguna a la ciudad, mientras que lluvias acumuladas mayores a 100 mm con duraciones arriba de 180 a 300 minutos sobre la parte alta y urbanizada de la cuenca representa peligro en la zona aguas abajo de la cuenca afectando solo a las a las zonas aledañas al río en la ciudad. Asimismo, se detectaron eventos extremos como lluvias acumuladas de 200 a 300 mm sobre la cuenca con duración de 300 a 450 min que ocasiona el desborde del río Sabinal en varios puntos de la ciudad tal como el escenario ST4.
- De los resultados obtenidos de la simulación de las lluvias de ambos enfoques en el modelo PCSWMM para la generación de los mapas de peligro de inundación es claro que el método Tholin y Keifer representa condiciones más desfavorables en comparación al modelo estocástico. Asimismo, estos resultados se verán reflejados en la toma de decisiones, es decir que desde el punto de vista del diseño y construcción de obras para el control de avenidas el método de regionalización de lluvias (Tholin y Keifer) en este trabajo sobreestimó el volumen, esto repercute directamente en el costo y



dimensionamiento de la obra que para este método daría costos elevados mientras que para método estocástico es todo lo contrario ya que al representar de manera similar los eventos, el volumen no estaría sobrestimando por lo tanto se estimarían costos más bajo en comparación al método anterior.



8.2 Recomendaciones

Las recomendaciones de este trabajo se enfocan en la continuación de trabajos futuros en cuanto a la generación de mapas de peligro por inundación y por consiguiente a encaminarse a investigaciones más complejas como los mapas de vulnerabilidad y riesgo.

Las recomendaciones para la modelación y calibración son las siguientes.

- Es recomendable utilizar modelos digitales con alta resolución siempre y cuando haya disponibilidad de la información se requiera obtener mayor precisión del comportamiento de un hidrograma de entrada en puntos específico de la problemática y no sobre toda la zona de estudio, esto permitirá disminuir el costo computacional.
- Se debe distribuir la malla solo en los puntos donde se obtendrá información de la simulación (llanuras de inundación) no delimitar bien la malla trae como consecuencia elevado tiempo en el cálculo computacional del modelo.
- Es importante realizar un análisis de incertidumbre de los parámetros en la zona de estudio de acuerdo a las características morfológicas de la cuenca, el hacerlo permitirá ahorrar tiempo al momento de escoger los parámetros que se deben calibrar en un modelo de proceso lluvia-escurrimiento.

Con respecto al análisis de los registros de precipitación para la obtención de lluvia sintética con los métodos determinístico y estocástico la recomendación es la siguiente.

- Es importante que la simulación de lluvias deba ser representativa de la zona de estudio, es decir que presenten y preserven las características básicas mencionadas en el capítulo tres. Se sugiere no hacer suposiciones o hipótesis de menor o mayor duración de la lluvia representativa de la zona, realizar esto conlleva a la subestimación o sobre-estimación de los gastos pico en los modelos de escurrimiento, obteniendo como resultado información que carece de certeza y confiabilidad.

Finalmente, de la simulación de los resultados de ambos métodos para el análisis de lluvia para la generación de los escenarios de peligro por inundación se recomienda lo siguiente.



- En gran medida el problema que comúnmente origina las inundaciones es la falta de planeación en el desarrollo urbano, la falta de ello origina el cambio repentino del uso del suelo en una cuenca. Como consecuencia, la cuenca responde de manera excesiva a cualquier tipo de tormenta y tal es el caso de la zona de estudio. Partiendo de los supuestos anteriores se puede decir que los mapas de peligro por inundación son considerados como una herramienta de prevención. Además de estimar el peligro, deberían ser vistas como herramientas correctivas que permitan beneficiar a la sociedad en la etapa de planeación para el desarrollo urbano a corto y largo plazo en un sitio.

REFERENCIAS

- Alcocer Yamanaka, V. H. (2007). *Flujo estocástico y transporte en redes de distribución de agua potable*. Morelos: UNAM.
- Aparicio, F. J. (2012). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Aragón Hernández, J. L. (2007). *Procesamiento hidráulico en un sistema de alerta hidrometeorológica y su aplicación al río Sabinal en Tuxtla Gutiérrez, Chis.* México D.F.
- Bárdossy, A. (2007). Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4-8.
- Barros Trout, A., Bolaño Ortiz, T. R., Caicedo Camargo, Y., & Castro, M. S. (2009). Modelación y simulación hidráulica del alcantarillado sanitario del sector Rodadero-Gaira distrito de Santa Marta, Colombia. *RE TAKVN*, 6.
- Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 1-20.
- Boyle, D. H. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models, combining the strengths of manual and automatic models. *Water Resources Research*, 36(12) 3663-3674.
- Bustamante Ortega, R. S. (2008). *Calibración y validación del modelo HEC-HMS, en la cuenca de Huechún, región Metropolitana*. Talca, Chile: Universidad de Talca.
- Butler, D., & Davies, J. W. (2004). *Urban Drainage*. London: Spon Press Taylor & Francis Group.
- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. *Universidad Nacional de ingeniería*, 1-7.
- Camilo Múnera, J., & Francés, F. (2009). Integración del modelo TETIS en el sistema de alarma temprana DELFT FEWS para predicción de avenida en tiempo real en algunas cuencas de la C. H. del Júcar. *Hidrología y Gestión del agua*, 4-5.
- CECOM. (2011). *Atlas de riesgos del municipio de Tuxtla Gutiérrez*. Tuxtla Gutiérrez: CECOM A.C.
- Cervantes Osornio, R., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M. A., Ojeda Bustamante, W., & Quevedo Nolasco, A. (2011). Redes neuronales artificiales

en la estimación de la evapotranspiración de referencia. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*.

- CONAGUA. (2007). *Programa Hídrico por Organismo de Cuenca Visión 2030*.
- CONAGUA. (2009). *Plan de Emergencia de Inundación Corrientes problemáticas, Río Sabinal Estado de Chiapas*. México.
- Cortéz Ledezma, C. N. (2003). Regionalización de tormentas de diseño en la cuenca del Valle de México. México.
- CRED. (2015). *EM-DAT: the Centre for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED) International Disaster database*. Obtenido de <http://www.emdat.be/>
- EIRD. (2004). *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (Las Américas)*. Obtenido de <http://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>
- EPA, E. P. (2013). *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems*, (Vol. II Part 1). USA: Office of Air Quality Planning and Standards.
- Escalante Sandoval, C. A. (2014). *Apuntes de hidrología estocástica*. México D.F.
- Escalante Sandoval, C. A., & Reyes Chávez, L. (2008). *Técnicas estadísticas en hidrología*. México D.F.: Facultad de ingeniería, UNAM.
- García Rojas, A. (2006). *Hietogramas de diseño en zonas urbanas*.
- Geographic, N. (2013). *National Geographic*. Obtenido de <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/desastres-naturales/floods-profile>
- Gubin, A. (2014). *La gran época*. Obtenido de <http://www.lagranepoca.com/archivo/32593-atlas-del-clima-extremo-sequia-e-inundaciones-causa-millonarias-perdidas-sudamerica.html>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., Hogue, T. S., & Boyle, D. P. (2003). Advances in Automatic Calibration of Watershed Models. *Water Science and Application*, 13.
- Honey, B., Ranjan, S., & Jayawardena, A. (2015). Hourly runoff forecasting for flood risk management: Application of various computational intelligence models. *Journal of Hydrology*, 2-8.

- INEGI. (2015). INEGI. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/presentacion.aspx>
- INH, C. (2010). *Instituto Nacional de hidráulica de Chile , ministerio de obras públicas*. Obtenido de <http://www.inh.cl/home/documents/library/Modelos%20hidrodinamicos.pdf>
- Juan Vich, A. I. (1996). *Aguas Continentales Formas y Procesos*. Mendoza.
- Kendall, M. (1980). *Multivariate Analysis* (Second ed.). London: Griffin.
- Knigh W., D., & Shamseldin Y., A. (2006). *River Basin Modeling for Flood Risk Mitigation*. Netherlands: Taylor & Francis/Balkema.
- Kottegoda, N. (1980). *Stochastic Water Resources Technology*. London and Basingstoke: The Macmillan Press Ltd.
- Kundzewicz, Z., & Samuels, P. (1998). Towards sustainable development of water resources, RIBAMOD River basin modeling management and flood mitigation Concerted Action. *Proceedings of the second Workshop on Impact of Climate Change on flooding and Sustainable River Management*.
- Lagrost, L., Depettris, C., & Ruberto, A. (2005). Apuntes de hidrología, curso de grado de ingeniería civil. En V. Ponce, *Engineering Hydrology*. Pretince Hall.
- Lamb, R., Crewett, J., & Calver, A. (2000). Progress on te spatial generalisation of continuous simulation flood frequency modelling. *Proceedings of the International Sy,posium on Flood Defense, University of Kassel*.
- Lopez Orozco, J. (2012). *Manejo integral del agua pluvial en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. México.
- Machiwal, D., & Kumar Jha, M. (2012). *Hydrologic Time Series Analysis, Theory and practice*. India: Springer.
- Magaña Hernandez, F., Bâ, K. M., & Guerra-Cobian, V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencias*, 739-752.

- Mancipe M, N. A., Buchberger, S. G., Suidan, M. T., & Lu, T. (2013). Calibration of Rainfall-Runoff Model in Urban Watersheds for Stormwater Management Assessment. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1-11.
- Mc Graw-Hill. (2001). *Diccionario enciclopédico McGraw-Hill Ilustrado*. México D.F.
- McGraw-Hill. (1974). *Gran Diccionario Enciclopédico* .
- Methods, H., & Durrans, S. R. (2003). *Stormwater Conveyance Modeling and Desing*. USA: Haestad Press.
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modeling. Institute of Environmental Engineering. Chair of Hydrology and Water Resources Management*. ETH Zürich. Switzerland.
- Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K., & Rodhe, A. (1999). Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 257-277.
- Muñoz Arriola, F., Salgado Rabadán, J. H., Marie Rocchiccioli, H., Shrraddnnand , S., Güitron de los Reyes, A., & Lobato Sánchez, R. (2011). Hidrología superficial en la cuenca del Río Grijalva: Calibración del modelo hidrológico de capacidad de infiltración variable (VIC). *Aqua-LAC*, III(1), 7-11.
- Nullis, C. (2014). *Organización Metereológica Mundial*. Obtenido de https://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_998_es.html
- Obregón, N., Fragala, F., & Prada, L. (2015). Redes neuronales artificiales en hidroinformática. *Seminario Internacional la Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*, (págs. 1-5).
- OMM/UNESCO. (1974). *Glosario hidrológico internacional, WMO/OMM/BMO. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial*.
- Ortiz, E. (2012). *Memoria sobre modelos de previsión hidrológica empleados en otras organizaciones*. HidroGaia.
- Pankratz, A. (1983). *Forescasting with univariate Box-Jenkins Models, Concepts an cases*. United States of America: John Wiley & Sons.
- Rodríguez, H. G. (2012). *Inundaciones en zonas urbanas. Medidas preventivas y correctivas, acciones estructurales y no estructurales*. Cuernavaca, Morelos: UNAM.

- Salas Salinas, M. A., & Jiménez Espinosa, M. (2013). *Inundaciones. Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Secretaría de Gobernación. México D.F.: CENAPRED.*
- Salas Salinas, M. A., Jiménez Espinosa, M., Eslava, M. H., Franco Sánchez, M. Á., & González Prado, J. (2004). *Configuración del sistema de alerta hidrometeorológica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. CENAPRED.*
- Salas, J., Delleur, J., Yevjevich, V., & Lane, W. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series. United States of America: Water Resources Publications.*
- SEMARNAT. (2012). *Programa de Acciones y Proyectos para la Sustentabilidad Hídrica, Visión 2030 Estado de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.*
- Sokolov, A. A. (1976). *Water balance of Europe. Workshop on the water balance of Europe. UNESCO. Paris: Varna.*
- Tholin, A., & Keifer, C. (1959). The Hydrology of Urban Runoff. (ASCE, Ed.) *Journal of the Sanitary Engineering Division, 47-106.*
- Torena, F. (2013). *Revista Alerta temprana. Obtenido de <http://revistaalertatemprana.blogspot.mx/2013/09/inundaciones-los-desastres-naturales.html>*
- UNESCO-ROSTLAC. (1986). *Agua, vida y desarrollo (Manual de uso y conservación del agua en zonas rurales de América Latina y el Caribe) (Vol. 2). Montevideo, Uruguay: INCA-Mendoza.*
- Vargas Castañeda, G., Ibáñez Castillo, L., & Ramírez, A. (2015). *Desarrollo, Clasificación y Tendencias de la Modelación Lluvia-Escurrecimiento. Obtenido de http://www.chapingo.mx/revistas/revistas/articulos/html/inagbi/index.php?id_articulo=1962*
- William, J. (2005). *Rules for Responsible Modeling (Cuarta ed.). Guelph, Ontario, Canada: CHI.*

ANEXO A. DATOS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS.

Se extrajo de la información de cada EMA, la altura de precipitación de lluvia que está dada a una resolución temporal de 10min, se estableció un rango de acuerdo a los meses más lluviosos, del 01 de julio al 30 de octubre del 2011.

- Estaciones Automáticas Meteorológicas

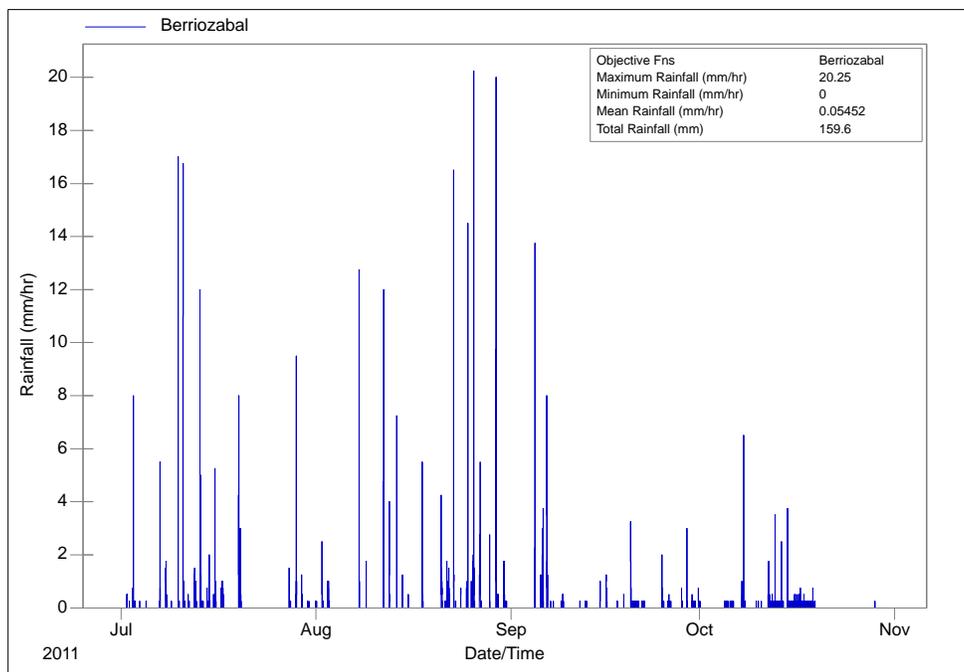


Figura A- 1. Registro estación Berriozábal

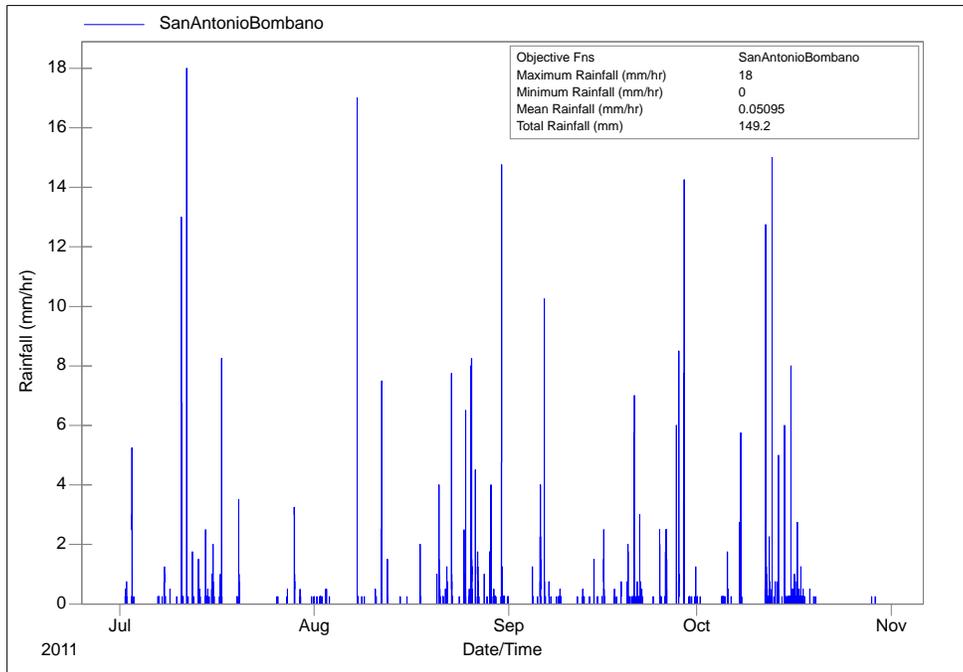


Figura A- 2. Registro estación San Antonio Bombano

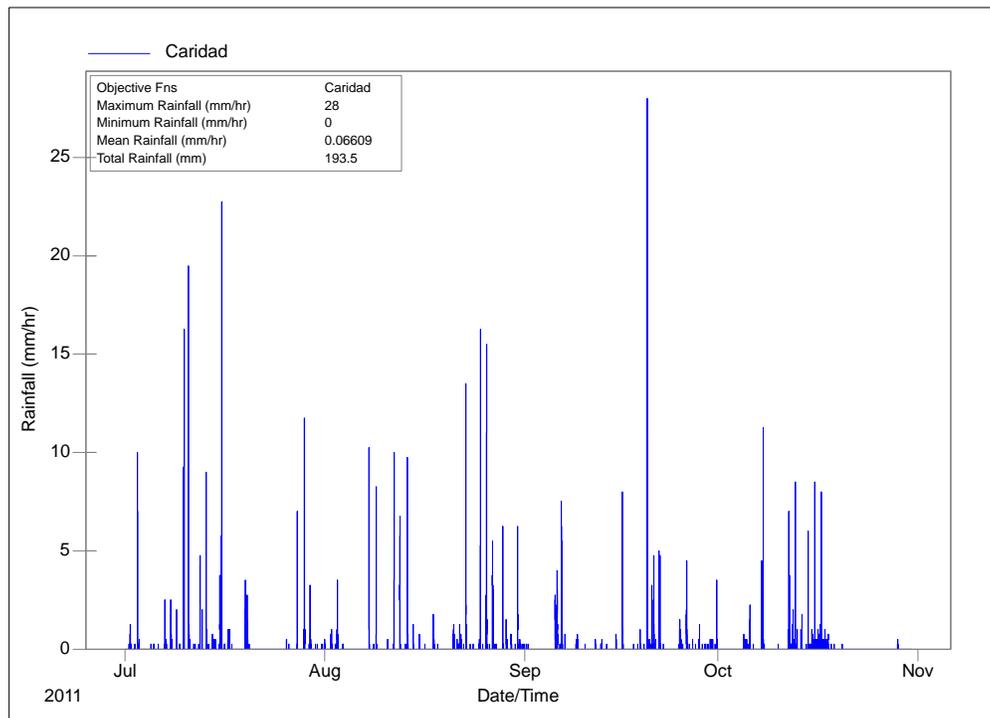


Figura A- 3. Registro estación Caridad.

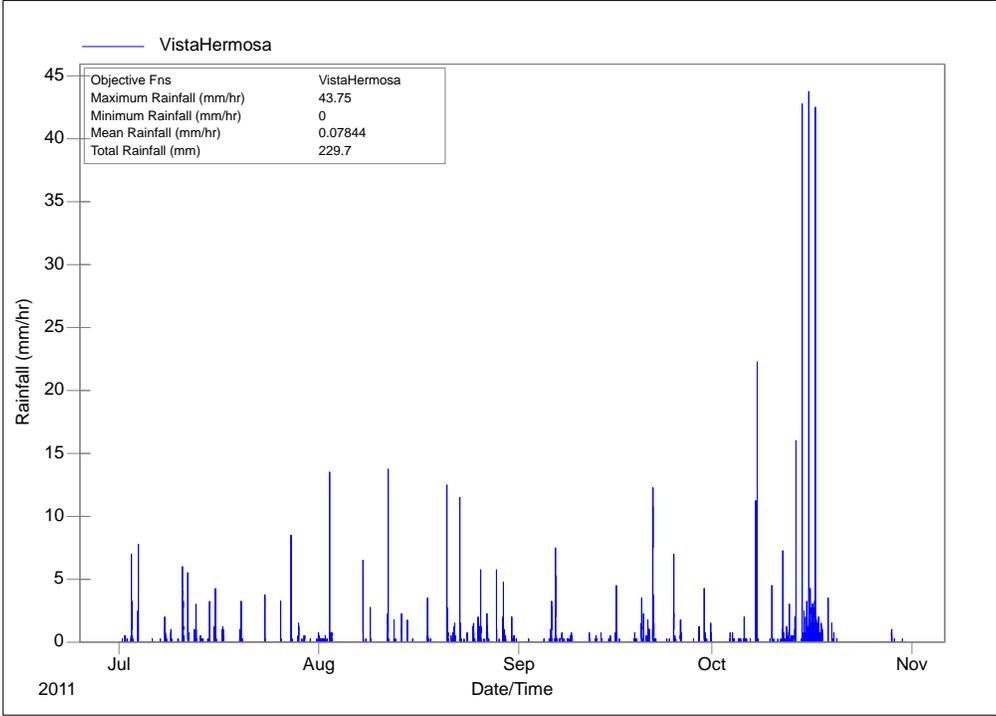


Figura A- 4. Registro estación Vista Hermosa.

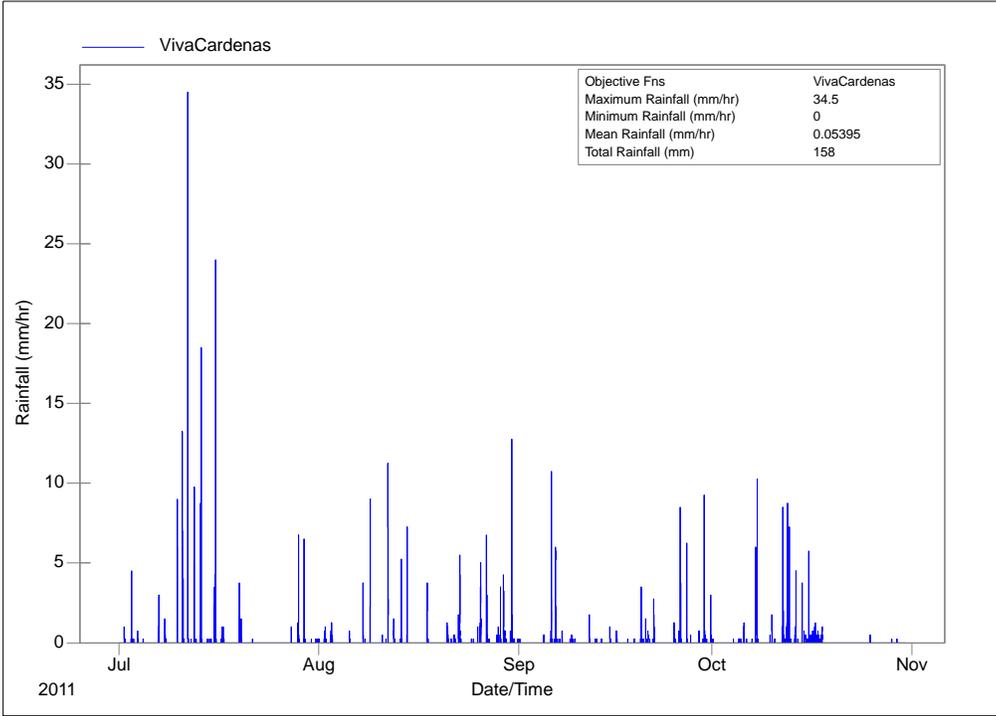


Figura A- 5. Registro estación Viva Cárdenas.

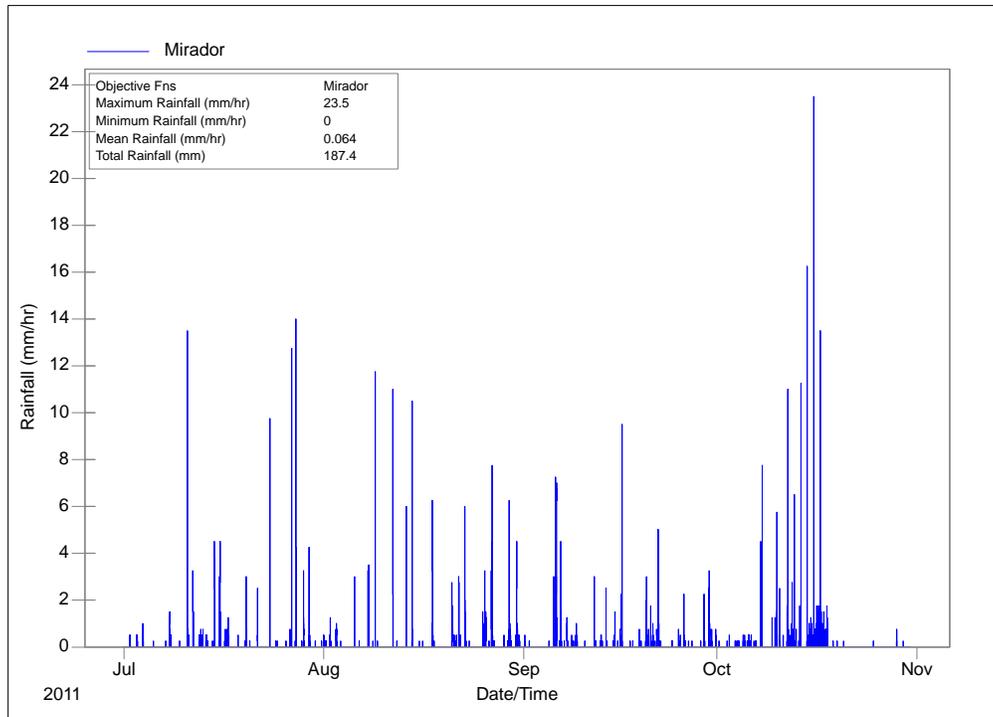


Figura A- 6. Registro estación Mirador.

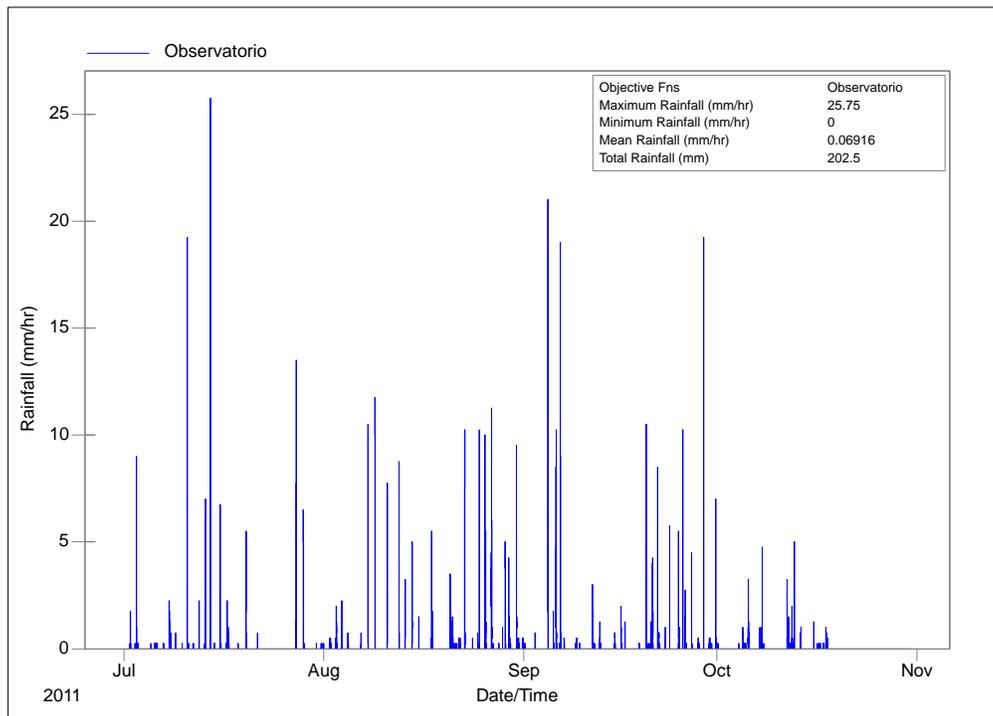


Figura A- 7. Registro estación Observatorio.

▪ Hidrometría disponible

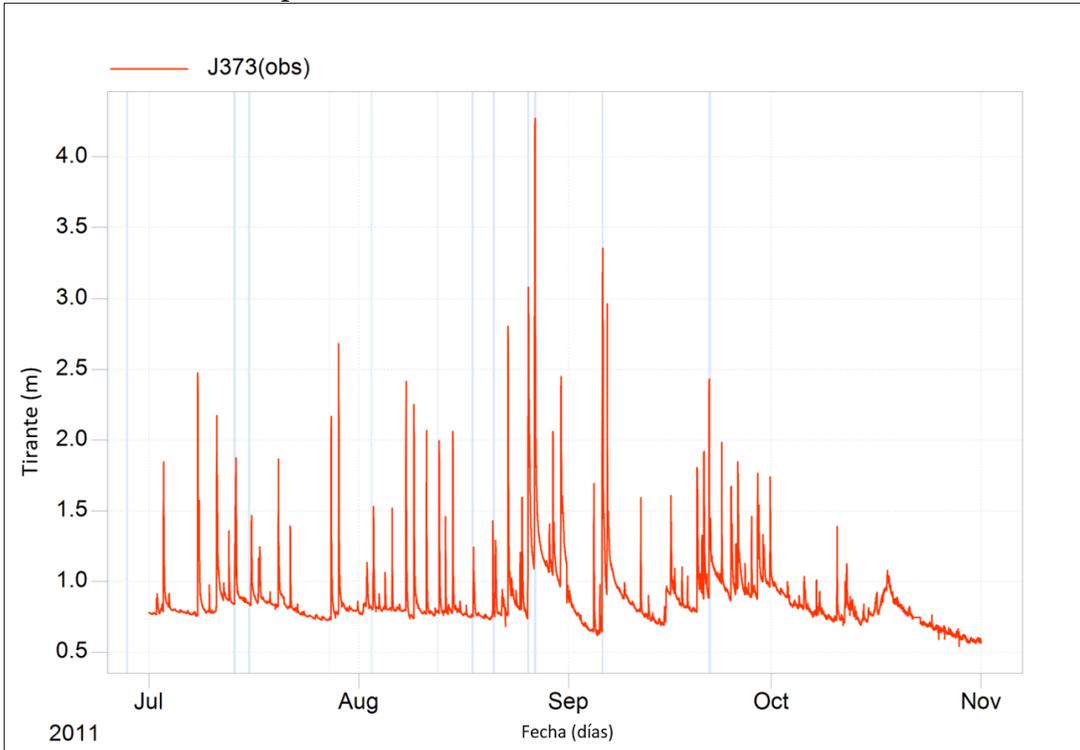


Figura A- 8. Registro de la estación hidrométrica del oriente.

▪ Gasto base

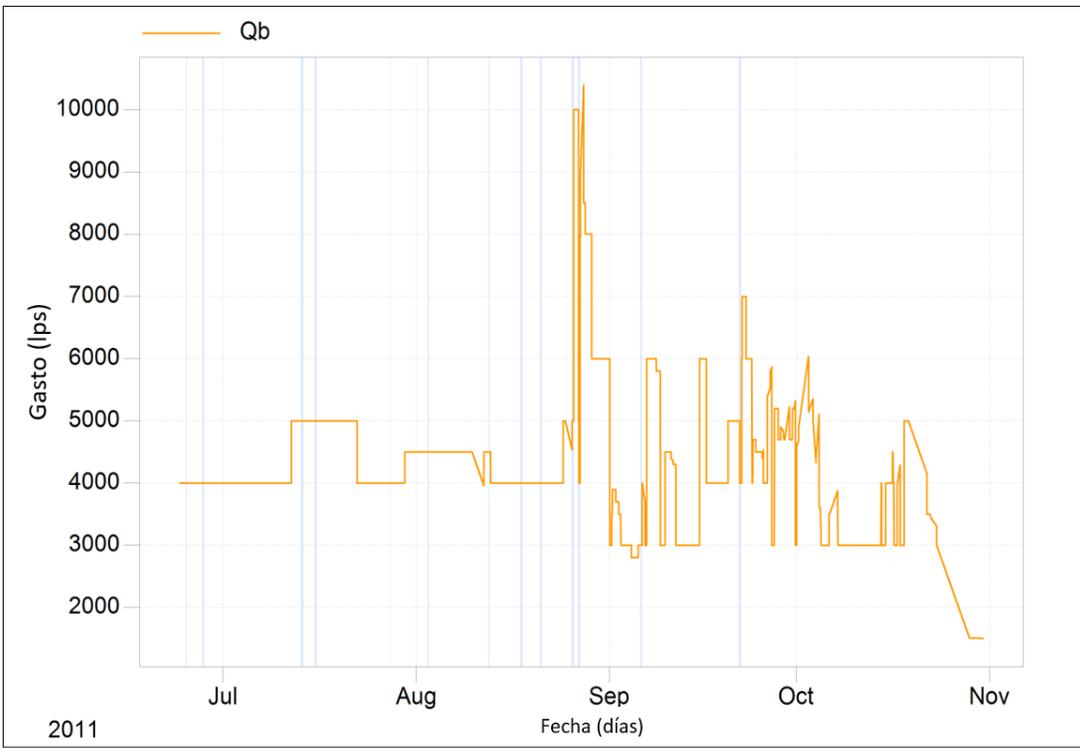


Figura A- 9. Obtención del gasto base durante las simulaciones.