



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL**

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN CUENCAS
URBANAS. COMPARACIÓN DE APROXIMACIONES**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

ING. OSWALDO AGUIRRE MATURANO

DIRECTOR DE TESINA:

DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. MAYO 2018



AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), UNAM por el apoyo económico proporcionado a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) para el desarrollo del proyecto con Clave: TA101116 “MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN CUENCAS URBANAS. COMPARACIÓN DE APROXIMACIONES”, durante el año 2017.

Agradecimiento a Irma, Sandra y Eliza quienes me apoyaron en esta travesía de seguir estudiando a pesar del sacrificio que tuve que hacer para lograr este objetivo personal.

Omar y Rafael por haberme permitido intercalar el estudio con el trabajo durante todo lo que duro el proceso de especialización.

Dr. Aragón quien tuvo la paciencia y tiempo de guiarme por el camino del conocimiento y quien me moldeó como especialista durante la tesina.

A todos los profesores que conocí a lo largo de mi estancia como alumno y de quienes me llevo lo mejor de ellos.

A todos mis compañeros con quienes me toco compartir aulas y de quienes me llevo muy buenas amistades.

Finalmente a la UNAM por haberme abierto las puertas y permitirme ser su alumno.

A todos MUCHAS GRACIAS!

RESUMEN

La cuenca del río Chapingo está expuesta frecuentemente a inundaciones, por lo tanto, mediante modelación numérica distribuida se calcularon los tirantes y velocidades asociado a distintos periodos de retorno (10,100, y 1,000 años). Para esto, se determinaron las características fisiográficas de la cuenca, como área, pendiente, características del suelo y lluvias. Las lluvias fueron analizadas mediante el método de Chen con la finalidad de obtener las curvas I-D-T, con las que se construirán los hietogramas para cada período de diseño. Teniendo en cuenta todos estos parámetros, se construyó el modelo hidrológico distribuido en Iber, el cual fue calibrado mediante la comparación de los hidrogramas que género el modelo, en el mismo punto donde se encuentra la estación hidrométrica Chapingo.

Los resultados obtenidos muestran que en los gastos pico para los periodos de retorno de 10 y 100 años, la diferencia fue mínima (menor al 5 %), en cambio para 1,000 años fue del 18 % (15.09 m³/s)

Cabe mencionar que se realizaron distintas aproximaciones, en la primera se consideró el terreno sin la presencia de la traza urbana, en la segunda se consideró la elevación de las viviendas y finalmente, en la tercera, se determinaron de forma separada los hidrogramas correspondientes a cada manzana.

Se determinaron los mapas de tirantes, velocidades y peligro por inundación, donde se compararon en los tres casos de modelación, el periodo de retorno de 1,000 años, ya que es el mayor evento en donde se aprecia mejor el comportamiento de dichas variables en el área de estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN.....	V
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO	2
2 CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA	5
2.1 MODELOS LLUVIA ESCURRIMIENTO	7
2.1.1 Clasificación de modelos de cuenca	7
2.1.2 MIKE SHE.....	11
2.1.3 SAC-SMA	12
2.1.4 DBSIM	12
2.1.5 TOPMODEL.....	13
2.1.6 MIKE 11.....	13
2.1.7 IBER.....	13
2.2 HIDROLOGÍA	16
2.2.1 Inverso de la distancia	16
2.2.2 Análisis de frecuencias.....	16
2.2.2.1 Distribución Gamma de 3 parámetros	17
2.2.2.2 Distribución Exponencial	18
2.2.2.3 Distribución Log Pearson tipo III	19
2.2.3 Curvas I-D-T. Método de Chen	20
2.2.4 Tormenta de diseño.....	22
2.2.4.1 Pendiente media del cauce principal.....	23
2.2.4.2 Tiempo de concentración.....	24
2.2.5 Infiltración: Numero de escurrimiento (N).....	25
2.2.6 Hidrograma Unitario Sintético Triangular (HUST)	27
2.2.7 Duración de la tormenta.....	29
2.2.8 Peligro por inundación.....	30
3 CASO DE ESTUDIO	31
3.1 LOCALIZACIÓN	31
3.2 TOPOGRAFÍA	33
3.3 USO Y TIPO DE SUELO	36
3.4 ANÁLISIS HIDROLÓGICO	37
3.4.1 Estaciones climatológicas e hidrométricas.....	37
3.4.2 Datos de precipitación y gastos	38
3.4.3 Análisis de frecuencias.....	42
3.4.4 Número de Escurrimiento (N)	44
3.4.5 Curvas I-D-T.....	47
3.4.5.1 Hidrograma Unitario Sintético Triangular (HUST)	53
3.5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA	54

3.6	RESULTADOS	59
3.6.1	<i>Comparación de gastos pico</i>	59
3.6.2	<i>Mapa de inundaciones</i>	61
3.6.3	<i>Mapas de profundidades y velocidades máximas</i>	61
3.6.4	<i>Mapas de peligro por inundación</i>	68
3.6.5	<i>Comparación de resultados</i>	70
4	CONCLUSIONES	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo hidrológico [2].....	5
Figura 2. Número de escurrimiento [3]	25
Figura 3. Hidrograma unitario sintético triangular [3]	27
Figura 4. Localización de la RHA XIII Aguas del Valle de México [20].....	31
Figura 5. Subregiones de la RHA XIII Aguas del Valle de México [20].....	32
Figura 6. Esquema hidrográfico del río Chapingo [4].....	33
Figura 7. Topografía de la cuenca del río Chapingo	33
Figura 8. Cuenca del río Chapingo.....	34
Figura 9. Mapa de pendientes de la cuenca del río Chapingo	34
Figura 10. Perfil del cauce principal	35
Figura 11. Edafología	36
Figura 12. Uso de suelo y vegetación.....	37
Figura 13. Estaciones climatológicas e hidrométricas	38
Figura 14. Precipitación máxima anual en 24 Hrs.	41
Figura 15. Precipitación acumulada anual.	41
Figura 16. Gasto máximo anual instantáneo.....	42
Figura 17. Programa AFA	43
Figura 18. Valor extrapolado vs valor registrado.....	43
Figura 19. Uso de suelo, edafología y pendiente	45
Figura 20. Curvas I-D-T. Estación Plan Lago de Texcoco.....	49
Figura 21. Curvas I-D-T. Estación Chapingo	50
Figura 22. Curvas I-D-T. Estación San Miguel Tlaixpan.....	51
Figura 23. Hietogramas de intensidad. Estación San Miguel Tlaixpan	51
Figura 24. Hietogramas de intensidades. Estación Plan Lago de Texcoco	52
Figura 25. Hietogramas de intensidades. Estación Chapingo (DGE)	52
Figura 26. Traza urbana.....	53
Figura 27. Hidrograma unitario sintético triangular.....	54

Figura 28. Geometría de la zona de estudio.....	55
Figura 29. Hietograma de intensidades	56
Figura 30. Número de curva	56
Figura 31. Mallado opción 1	57
Figura 32. Mallado opción 2	57
Figura 33. Mallado opción 3	57
Figura 34. Coeficiente de fricción de Manning	58
Figura 35. Topografía. Opción 1	58
Figura 36. Topografía. Opción 2	59
Figura 37. Topografía. Opción 3	59
Figura 38. Hidrograma calculado. Opción 1 para distintos periodos de retorno	60
Figura 39. Tirantes máximos para $Tr=10$ años. Opción 1	62
Figura 40. Velocidades para $Tr=10$ años. Opción 1	62
Figura 41. Tirantes máximos para $Tr=100$ años. Opción 1	63
Figura 42. Velocidades para $Tr=100$ años. Opción 1	64
Figura 43. Tirantes máximos para $Tr=100$ años. Opción 1	65
Figura 44. Velocidades para $Tr=1,000$. Opción 1	65
Figura 45. Tirantes máximos para $Tr=1,000$ años. Opción 2	66
Figura 46. Velocidades para $Tr=1,000$ años. Opción 2	66
Figura 47. Tirantes máximos para $Tr=1,000$ años opción 3	67
Figura 48. Velocidades para $Tr=1,000$ años opción 3	67
Figura 49. Peligro por inundación para $Tr=10$ años. Opción 1	68
Figura 50. Peligro por inundación para $Tr=100$ años. Opción 1	68
Figura 51. Peligro por inundación para $Tr=1,000$ años. Opción 1	69
Figura 52. Peligro por inundación para $Tr=1,000$ años. Opción 2	69
Figura 53. Peligro por inundación para $Tr=1,000$ años. Opción 3	69
Figura 54. Comparación de hidrogramas. $Tr=1,000$ años	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Selección de N.....	26
Tabla 2 Textura de Suelo	27
Tabla 3 Clasificación de cuencas	29
Tabla 4 Criterio de peligro.....	30
Tabla 5 Método de Taylor y Schwarz	35
Tabla 6 Tiempo de Concentración	36
Tabla 7 Estaciones climatológicas e hidrométrica	37
Tabla 8 Precipitación máxima anual (mm).....	39
Tabla 9 Gasto máximo anual de la estación hidrométrica Chapingo (m ³ /s).....	40
Tabla 10 Precipitaciones y gastos asociada a distintos períodos de retorno.....	44
Tabla 11 Número de escurrimiento en el área de influencia de la estación San Miguel Tlaixpan	45
Tabla 12 Número de escurrimiento en el área de influencia de la estación Plan Lago de Texcoco	46
Tabla 13 Número de escurrimiento en el área de influencia de la estación Chapingo (DGE).....	46
Tabla 14 Precipitaciones máximas en 24 horas maximizadas	47
Tabla 15 Precipitaciones con duración de 1 hora para cada período de retorno de Isoyetas	47
Tabla 16 Factor de conectividad R.....	47
Tabla 17 Valor de F, a, b, y c.....	48
Tabla 18 Método de bloque alterno. Estación Plan Lago de Texcoco	48
Tabla 19 Método de bloque alterno. Estación Chapingo.....	49
Tabla 20 Método de bloque alterno. Estación San Miguel Tlaixpan	50
Tabla 21 Parámetros del hidrograma unitario sintético triangular	53
Tabla 22 Hidrograma unitario sintético triangular	54
Tabla 23 Comparación de gastos pico (m ³ /s).....	60
Tabla 24 Comparación de hidrogramas de salidas para el Tr 1,000 de las tres opciones	70
Tabla 25 Tiempo de simulación.....	70

1 INTRODUCCIÓN

En la zona oriente del Valle de México se encuentran 7 ríos, los cuales vierten sus aguas mediante un sistema de canales y compuertas al Lago Nabor Carrillo, dichos ríos pasan por zonas urbanas, el área de estudio que se analizó es la cuenca del río Chapingo debido a que ha presentado de forma recurrente inundaciones, las cuales afectan a los predios aledaños al cauce del río que muchas veces no respetan las zonas federales. En esta tesina mediante modelación numérica se determinaron las zonas que son susceptibles a una inundación y su peligro. Para ello, primero se analizaron las lluvias, posteriormente mediante el modelo distribuido Iber, se determinó el comportamiento de los escurrimientos de la cuenca para finalmente determinar los tirantes, las velocidades y el peligro por inundación, tanto en el cauce como en sus llanuras.

1.1 PROBLEMÁTICA

El fenómeno de las inundaciones tiene un gran impacto en las zonas urbanas, debido a que sobre sus márgenes de los ríos se encuentran asentamientos humanos, escuelas y zonas ejidales lo cual genera pérdidas económicas y humanas. La zona de estudio del río Chapingo que atraviesa el municipio de Texcoco de Mora, presenta afectaciones por inundaciones. El día 27 de julio del 2011, se desbordó el río al taparse uno de sus desagües, afectando el fraccionamiento de Bellavista y el poblado de Boyeros, llegando a afectar al menos 100 viviendas, alcanzando el agua un metro de altura [1]. Por lo cual resulta una zona susceptible a inundaciones al presentarse un fenómeno meteorológico extremo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Para determinar las áreas de inundaciones, el peligro por inundación ante eventos de lluvia extrema, es necesario el empleo de la modelación numérica, la cual combina todos estos elementos, y permite cuantificar y visualizar, el comportamiento hidráulico del cauce y las áreas inundables del río Chapingo.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo general consiste en evaluar distintas configuraciones geométricas para reproducir el proceso lluvia-escurrimiento en una cuenca urbana mediante un modelo numérico de tipo hidrológico de para metro distribuido.

Para complementar el objetivo general, en este trabajo se plantearon las configuraciones geométricas del terreno siguientes:

- La topografía sin la existencia de la traza urbana
- La elevación aproximada de las viviendas
- Calculo de los hidrogramas de las manzanas de forma separada

1.4 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

En el capítulo uno se mencionan los conceptos básicos los cuales son parte fundamental ya que dan un mejor entendimiento. En el capítulo dos se hace mención a los distinto tipo de modelo de distribución que existen, además de los procesos que se realizaron en el análisis hidrológico, los cuales son insumos importantes para que el modelo funcione, tales como precipitación, periodos de retorno, curvas I-D-T, tiempos de concentración. En el capítulo tres se describe la zona de estudio, además de procesar la información, hasta determinar las lluvias

de diseño. Se analizarán los resultados de las simulaciones propuestas, una en condiciones naturales, otras con la traza urbana. Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones obtenidas.

2 CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

El ciclo del agua o hidrológico, es el proceso de circulación del agua entre los distintos comportamientos de la hidrósfera (Figura 1). Se trata de un ciclo biogeoquímico en el que hay una intervención mínima de reacciones químicas, y el agua solamente se traslada de un lugar a otro o cambia de estado físico.



Figura 1. *El ciclo hidrológico* [2]

El proceso del ciclo hidrológico se lleva a cabo mediante las siguientes etapas [3]:

- **Evaporación.** El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento.
- **Condensación.** El agua en forma de vapor de agua sube y se condensa formando las nubes.
- **Precipitación.** El agua de vapor condensado cae hacia la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve y granizo.

- **Infiltración.** Ocurre cuando el agua precipitada atraviesa la superficie, penetra en el suelo y el subsuelo alimentando a las aguas subterráneas. La proporción de agua que se infiltra y la que circula en la superficie depende de la permeabilidad del estrato, de la pendiente y de la cobertura vegetal.
- **Escurrimiento.** Este término se refiere a los diversos medios por lo que el agua líquida se desliza cuesta abajo por la superficie del terreno. En los climas excepcionalmente secos, incluidos la mayoría de los llamados desérticos, el escurrimiento es el principal agente geológico de erosión y transporte.
- **Evapotranspiración.** Es la cantidad de agua que se mueve en conjunto por medio de los procesos de la evaporación y la transpiración de las plantas. El proceso de transpiración es el siguiente: las raíces de las plantas absorben el agua que se desplaza hacia arriba [4] a través de los tallos o troncos, movilizándolo consigo los elementos que necesita la planta para nutrirse. Al llegar a las hojas y flores se integra al aire en forma de vapor de agua.
- **Fusión.** Se produce cuando el agua pasa del estado sólido al líquido, un ejemplo de ello son los deshielos.

El ciclo hidrológico es un agente modelador de la corteza terrestre debido a la erosión y al transporte y deposición de sedimentos por vía hidráulica. Condiciona la cobertura vegetal y, de una forma más general, la vida en la Tierra [5].

2.1 MODELOS LLUVIA ESCURRIMIENTO

Para evaluar cada una de las fases del ciclo hidrológico, primero es necesario describir cada proceso mediante un modelo matemático o hidrológico. En las aplicaciones prácticas de la hidrología y la hidráulica, interesa conocer la respuesta de una cuenca ante un evento de precipitación, ello se logra mediante modelos lluvia-escorrimento.

2.1.1 Clasificación de modelos de cuenca

Los modelos de cuenca pueden ser agrupados en dos categorías generales:

1.-Un modelo material es una representación física del prototipo, más simple en cuanto a su estructura pero con propiedades que reúnen las del prototipo, por ejemplo son simuladores de lluvia y cuencas experimentales. Los modelos materiales de la cuenca son caros en cuanto a su diseño y de aplicabilidad limitada.

2.-Un modelo formal es una abstracción matemática de una situación idealizada que conserva las propiedades estructurales importantes del prototipo. Ya que los modelos formales son invariablemente matemáticos en naturaleza, es costumbre referirse a ellos como modelos matemáticos. Los modelos matemáticos que se usan con la ayuda de una computadora se denominan modelos computacionales. Los modelos formales están rápidamente disponibles, ya que son altamente flexibles, y comparativamente más económicos al utilizarlos [6].

Tipos de modelos matemáticos de cuencas

Un modelo matemático de la cuenca, consiste en varios componentes, cada uno describe cierta fase o fases del ciclo hidrológico. Un modelo matemático puede ser de tres tipos: a) teórico, b) conceptual o c) empírico. Los modelos teóricos y empíricos son exactamente opuestos en significado, los modelos conceptuales se ubican entre ellos. En conjunto, un modelo matemático puede ser determinístico o probabilístico, lineal o no lineal, invariable o variable en el tiempo, concentrado o distribuido, continuo o discreto, analítico o numérico, de evento aislado o proceso continuo. A continuación se describe cada uno de ellos.

Modelo de tiempo variable: el parámetro o parámetros varían con el tiempo.

Modelo distribuido: permite que los parámetros varíen espacialmente dentro de la cuenca. Por lo tanto, el cálculo permite no sólo la respuesta de toda la cuenca sino también la respuesta de las subcuencas individuales. Los modelos concentrados pueden ser utilizados como componentes de modelos distribuidos. En una aplicación típica, un modelo concentrado (hidrograma unitario) es utilizado para la generación de hidrogramas de subcuencas individuales. Subsecuentemente, estos hidrogramas son combinados y guiados a través de una red de canales de corriente y embalses.

La diferencia entre los modelos concentrados y los distribuidos es la variabilidad espacial de los parámetros. Un modelo concentrado evalúa la respuesta de la cuenca en un punto de salida de la cuenca, sin considerar la respuesta de las subcuencas en forma individual, por otro lado, los modelos distribuidos evalúan la respuesta de la cuenca en conjunto con las subcuencas de manera individual, obteniendo una respuesta en cualquier punto de la cuenca [6].

Un modelo distribuido permite la variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros, mediante la división de las cuencas en celdas, en las cuales se simulan los diferentes procesos hidrológicos, ya que las heterogeneidades espaciales de un sistema hidrológico pueden no estar bien reproducidas mediante valores medios de los parámetros.

Un modelo distribuido necesita mayor tiempo de cálculo respecto a los modelos concentrados, debido a que requiere mayor detalle para realizar las simulaciones, además tienen el inconveniente de requerir una calidad y cantidad de datos importantes en la cuenca [7].

Modelo continuo: el término continuo es utilizado para referirse a modelos cuyas soluciones pueden ser obtenidas en cualquier punto. No obstante, en los modelos discretos, las soluciones pueden ser obtenidas solo en ciertos puntos predeterminados.

Modelo aislado: los modelos de eventos aislados son de corto plazo, diseñados para simular eventos individuales de lluvia-escorrentía. Su principal función está en la infiltración y en el escurrimiento de superficie, su objetivo es la evaluación del escurrimiento directo. Los modelos de evento aislado son aplicables para el cálculo de flujo de inundación, particularmente en los casos donde el escurrimiento directo es el mayor contribuyente al escurrimiento total. Comúnmente los modelos de evento no tienen en cuenta la recuperación de humedad entre eventos de tormenta, por lo cual, no se ajustan para la simulación de flujos de tiempo seco.

Existen cuatro tipos de modelos matemáticos generales los cuales son:

Modelos determinísticos: son formulados siguiendo fórmulas de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales. Además de que es formulado en términos de un grupo de variables, parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos. También implica una relación

causa-efecto entre los valores de los parámetros elegidos y los resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones. Idealmente, un modelo determinístico debería proveer un mejor detalle en la simulación de los procesos físicos o químicos. Sin embargo, la aplicación de modelos determinísticos está asociada frecuentemente a la incapacidad del modelo o del modelador, de resolver la variabilidad temporal y espacial del fenómeno natural en incrementos suficientemente pequeños.

Modelos probabilísticos: son opuestos a los modelos determinísticos. Se formulan mediante el análisis de los datos observados y de la probabilidad.

Modelos conceptuales: son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas (ya sean en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias), que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales. El uso de los modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias. Por lo tanto, los modelos conceptuales son sustitutos útiles y prácticos para los modelos determinísticos.

Modelos paramétricos (empírico o caja negra): son los más simples de todos los tipos de modelado. Consiste en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico. La aplicabilidad de los modelos paramétricos está restringida al rango de datos utilizados en la determinación de los valores de los parámetros. Los modelos paramétricos son útiles cuando los modelos conceptuales, determinísticos o probabilísticos no son prácticos o son demasiado caros.

Hoy día, existe una gran variedad de modelos lluvia-escorrentamiento, ya sea comerciales, de uso libre o académicos, que incluyen una o más de las opciones descritas anteriormente [6].

2.1.2 MIKE SHE

Fue uno de los primeros modelos que utilizó una división de la cuenca en celdas. La estructura del modelo se fundamenta en la unión de dos módulos independientes; esto es, un módulo unidimensional el cual representa las columnas de flujo vertical no saturado de una profundidad variable, y el otro, un módulo bidimensional que representa el escurrimiento saturado, (DHI, 2007). Los componentes que conforman el modelo son:

- El proceso de intercepción de la lluvia: se representa por la cubierta vegetal y evapotranspiración, utilizando los datos meteorológicos de entrada y los de la vegetación.
- Los procesos de escurrimiento y flujo en un canal: calcula el transporte del agua superficial del escurrimiento por el terreno y el flujo en los cauces, utilizando la topografía, forma del cauce y parámetros de rugosidad.
- La zona no saturada: calcula el contenido de humedad del suelo, además de las distribuciones de las presiones en la zona saturada.
- La zona saturada: calcula la cota del nivel freático y los flujos en la zona saturada.
- Deshielo: calcula la transferencia de humedad a la nieve, partiendo de los parámetros de la vegetación, nieve y datos meteorológicos.

2.1.3 SAC-SMA

SAC-SMA (Modelo de Sacramento de humedad del suelo) ha sido desarrollado por el Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos. Consta de un algoritmo que calcula el escurrimiento generado por la división del suelo en dos capas, la superior y la inferior. Cada capa incluye almacenamientos, los cuales generan estados de humedad del suelo. Las formas que generan los escurrimientos son:

- 1.-Superficial: es generado por la precipitación, la cual es más rápida que el tiempo necesario para que se produzca el proceso de percolación cuando las zonas más altas de almacenamiento están llenas.
- 2.-Directo: proviene de las zonas impermeables, ya sea temporales y permanentes [8].

2.1.4 DBSIM

DBSIM (*Distributed Basin Simulator*) parametriza los procesos de generación del escurrimiento de manera física en vez de conceptual [9]; se compone de:

- Módulo de escurrimiento: calcula la distribución espacial de la infiltración superficial en una cuenca, obteniendo así, la evolución de las zonas saturadas que se presentan durante una tormenta.
- Módulo del transporte del flujo superficial: calcula el caudal en un punto de la cuenca a partir de la distribución de la generación del escurrimiento en una cuenca y la respuesta instantánea de cada celda.

2.1.5 TOPMODEL

Es utilizado para simular el comportamiento hidrológico de una cuenca pequeña [10]. Parte de la representación del flujo subterráneo utilizando la aproximación de la onda cinemática, suponiendo que la variación de la zona saturada se puede simular mediante representaciones en régimen uniforme y el gradiente hidráulico de la zona saturada es simulado mediante la pendiente topográfica.

2.1.6 MIKE 11

Es un modelo hidrológico en 2 dimensiones; simula el proceso de escurrimiento, transporte de sedimentos y de calidad del agua. Uno de sus módulos es el hidrológico, el cual analiza el comportamiento de la cuenca, de forma semi-distribuido, mediante la división de la cuenca en subcuencas, unidas mediante la red de drenaje. Otra de las bondades es que permite simular el proceso de lluvia-escurrimiento utilizando las zonas rurales, tomando en cuenta el contenido de humedad en los almacenamientos interconectados, o mediante el hidrograma unitario sintético adimensional [11].

2.1.7 IBER

IBER es un modelo de uso libre, por lo que se utilizará para el desarrollo de este trabajo. Cuenta con un modelo hidrológico distribuido basado en las ecuaciones de aguas someras, para la transformación lluvia-escurrimiento.

Los modelos hidrológicos incluyen:

- 1.-Definición de campos de precipitación a partir de pluviómetros o de rasters de precipitación.
- 2.-Definición de pérdidas por infiltración con diferentes modelos: Green-Ampt, Horton e infiltración constante, *Soil Conservation Service (SCS)*.

3.-Esquema numérico adaptado al cálculo de la escorrentía superficial resolviendo las ecuaciones de aguas someras.

4.-Utilidades para suavizar modelos digitales de terreno mal condicionados.

Una de la desventaja de IBER, es que no incluye un modelo de flujo subterráneo, por lo cual la escorrentía subterránea no se considera en el modelo. Esto limita la aplicabilidad de IBER como modelo hidrológico a eventos de precipitación intensos y de corta duración, en los cuales la escorrentía subterránea resulta poco relevante en relación a la escorrentía superficial. Sin embargo, en un futuro las versiones incluirán diferentes formas de calcular el flujo subterráneo [12].

El modelo IBER cuenta con un módulo hidrodinámico, el cual resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en la profundidad, conocida como *2D Shallow Water Equational (2D-SWE)* o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales. Estas ecuaciones asumen una distribución de la presión hidrostática y una distribución uniforme de la velocidad en la profundidad. Ambas hipótesis se cumplen para el flujo en ríos como en las corrientes generadas por la marea en estuarios [13]. Actualmente los modelos numéricos que utilizan las ecuaciones en aguas someras bidimensionales son los más utilizados para estudios de dinámica fluvial y litoral, evaluación de zonas de inundación, cálculos de transportes de sedimentos y contaminantes.

En el módulo hidrodinámico de IBER, resuelve las ecuaciones de conservación de la masa y momento en dos direcciones horizontales, que son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = M_s \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial hU_x}{\partial t} + \frac{\partial hU_x^2}{\partial x} + \frac{\partial hU_xU_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h\tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial h_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \dots \dots \dots (3)$$

donde:

g; aceleración de la gravedad.

h; tirante o calado.

Ms, Mx, My; son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

U_x, U_y ; velocidades horizontales promediadas en la profundidad, en las direcciones “x” y “y”.

Zs; elevación de la superficie libre del agua.

λ ; latitud del punto considerado.

ρ ; densidad del agua.

Tb; fricción debida al rozamiento del fondo.

Ts; fricción en la superficie libre del agua debida al rozamiento producido por el viento.

$T_{xx}^e, T_{xy}^e, T_{yy}^e$; tensiones tangenciales efectivas horizontales.

Ω ; velocidad angular de rotación de la tierra.

.

2.2 HIDROLOGÍA

En este apartado se describen algunos conceptos hidrológicos necesarios para el desarrollo de la tesina.

2.2.1 Inverso de la distancia

En la literatura existen diferentes métodos para complementar datos faltantes, en este trabajo se utilizará el Inverso de la distancia. Los valores faltantes en la estación en estudio (hp_x), pueden ser obtenidos a través de los registros de las estaciones cercanas sin importar si la escala de tiempo es diaria, mensual o anual. La metodología consiste en asignar un factor de peso W a las estaciones cercanas al punto con datos faltantes, este factor de peso tomará en cuenta la distancia (D) que existe entre el sitio con datos faltantes y la estación vecina, así como su precipitación registrada (hpi) para el día, mes o año en cuestión, es decir:

$$hp_x = \frac{\sum_{i=1}^N (hpi W_i)}{\sum_{i=1}^N W_i} \dots\dots\dots(4)$$

donde:

$$W_i = \frac{1}{D^2}$$

D; distancia, en km.

hp; variable de precipitación, en mm.

2.2.2 Análisis de frecuencias

En el análisis de frecuencias existen distintas Funciones de Distribución de Probabilidad (F.D.P.). Cada función de distribución de probabilidad se conforma por la variable aleatoria (gastos, precipitaciones, etc.) y sus parámetros. Las funciones de distribución usadas en el

trabajo fueron: Normal, Exponencial (1 parámetro), Exponencial (2 parámetros), Log Normal (2 parámetros), Log Normal (3 parámetros), Gamma (2 parámetros), Gamma (3 parámetros), LogPearson Tipo III, General de valores extremos, Gumbel y Doble Gumbel ya que son las más comunes; se eligió la que menor error tuvo y son las descritas a continuación:

2.2.2.1 Distribución Gamma de 3 parámetros

La función de distribución de probabilidad está dada por la siguiente ecuación [14]:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} \dots\dots\dots (5)$$

Donde la ecuación anterior tiene una función de distribución ji-cuadrada, con 2β grados de libertad y $x^2=2y$.

Los estadísticos de la función de distribución acumulada (fda) son:

Media: $\mu=x_0 + \alpha\beta$

Varianza: $\sigma^2 = \alpha^2\beta$

Coefficiente de asimetría: $g = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$

Coefficiente de curtosis: $k = 3 \left(1 + \frac{g^2}{2}\right)$

Para calcular el evento correspondiente a una probabilidad de excedencia $(1-F(x))$ o para un periodo de retorno Tr , se utiliza la siguiente ecuación:

$$x = \widehat{x}_0 + \alpha\beta \left\{1 + \frac{1}{9\beta} + U_T \sqrt{\frac{1}{9\beta}}\right\}^3 \dots\dots\dots (6)$$

donde:

$$U_T \approx v - \frac{b_0+b_1V+b_2V^2}{1+b_3V+b_4V^2+b_5V^3} \dots\dots\dots (7)$$

donde:

$$V = \sqrt{\text{Ln} \left\{ \frac{1}{[F(x)]^2} \right\}}$$
 para $F(x) \leq 0.50$, además se le cambia el signo al valor obtenido de U_T .

$$V = \sqrt{\text{Ln} \left\{ \frac{1}{[1-F(x)]^2} \right\}}$$
 para $0.5 < F(x) \leq 1$ y el signo de U_T no se cambia.

$$b_0 = 2.2515517$$

$$b_1 = 0.802853$$

$$b_2 = 0.010328$$

$$b_3 = 1.432788$$

$$b_4 = 0.189269$$

$$b_5 = 0.001308$$

2.2.2.2 Distribución Exponencial

La función de densidad de probabilidad resulta:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\left[\frac{x-\alpha}{\beta}\right]} \dots\dots\dots(8)$$

donde:

α ; parámetro de ubicación

γ ; parámetro de escala

La media, la varianza y el sesgo de esta función respectivamente son:

$$\mu = \alpha + \beta, \sigma^2 = \beta^2, \gamma = 2$$

Para calcular el evento correspondiente a una probabilidad de excedencia $(1-F(x))$ o para un

periodo de retorno (Tr), se despeja directamente el valor de x de la ecuación de la función de distribución de probabilidad, esto es:

$$x = \hat{\alpha} - \hat{\beta} \text{Ln} |1 - F(x)| \dots \dots \dots (9)$$

2.2.2.3 Distribución Log Pearson tipo III

Si los logaritmos naturales de una variable x (ln x) presentan una distribución Pearson tipo III entonces la variable x presentará una distribución Log Pearson tipo III.

La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha T(\beta)x} \left(\frac{\text{Ln}x - \gamma_0}{\alpha} \right)^{\beta - 1} e^{-\left[\frac{\text{Ln}x - \gamma_0}{\alpha} \right]} \dots \dots \dots (10)$$

$$0 < x < \infty$$

$$\gamma > 0$$

donde:

γ_0 ; parámetro de ubicación

A; parámetro de escala

B; parámetro de forma

Para calcular el evento correspondiente a una probabilidad de excedencia (1-F(x)) o para un periodo de retorno (Tr), se usa un procedimiento similar al descrito en el caso de la función Gamma de 3 parámetros, con la diferencia que aquí interviene la función exponencial, es decir:

$$x = \exp \left\{ \hat{x}_0 + \alpha \beta \left[1 + \frac{1}{9\beta} + U_T \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3 \right\} \dots \dots \dots (11)$$

donde:

$$U_T \approx V - \frac{b_0 + b_1 V + b_2 V^2}{1 + b_3 V + b_4 V^2 + b_5 V^3} \dots \dots \dots (12)$$

Y para $F(x) \leq 0.50$, además se le cambia el signo al valor

$$\text{Obtenido de } U_T \quad V = \sqrt{\text{Ln} \left\{ \frac{1}{[F(x)]^2} \right\}} \dots \dots \dots (13)$$

$$\text{Para } 0.5 < F(x) \leq 1 \text{ y al valor de } U_T \text{ no se le cambia de signo } V = \sqrt{\text{Ln} \left\{ \frac{1}{[F(x)]^2} \right\}} \dots \dots \dots (14)$$

$$b_0 = 2.2515517$$

$$b_1 = 0.802853$$

$$b_2 = 0.010328$$

$$b_3 = 1.432788$$

$$b_4 = 0.189269$$

$$b_5 = 0.001308$$

2.2.3 Curvas I-D-T. Método de Chen

Las curvas Intensidad, Duración, y Periodo de Retorno (I-D-T) son la representación gráfica de la relación que existe entre la intensidad, duración y la frecuencia o periodo de retorno de la precipitación. El método de Chen permite calcular las curvas I-D-T, mediante el procedimiento siguiente [15]:

De los mapas de isoyetas se recaban las intensidades con duración de 60 minutos y períodos de retorno de 10,100 y 1,000 años, y se designan por P_1^T . Las precipitaciones máximas en 24 horas se ajustan para cada período de retorno y se maximizan al multiplicarlas por 1.13 y se

convierten en P_{24}^T , con las cuales se obtienen los cocientes lluvia-duración (R) y lluvia-frecuencia (F).

Cociente de la Lluvia – Duración (R).

$$R = \frac{P_1^T}{P_{24}^T} \dots\dots\dots(15)$$

Cociente de la Lluvia – Frecuencia (F).

$$F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}} \dots\dots\dots(16)$$

Se calculan los parámetros a, b y c, para valores de $0.10 \leq R \leq 0.6$ con las siguientes ecuaciones:

$$a = -2.297536 + 100.0389 * R - 432.5438 * R^2 + 1256.228 * R^3 - 1028.905 * R^4 \dots\dots\dots(17)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864 * R - 341.4349 * R^2 + 757.9172 * R^3 - 598.7461 * R^4 \dots\dots\dots(18)$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294 * R - 16.08111 * R^2 + 29.09596 * R^3 - 20.06288 * R^4 \dots\dots\dots(19)$$

Para valores de $0.20 \leq R \leq 0.7$ se usan las siguientes ecuaciones:

$$a = 21.03453 - 186.4683 * R + 825.4915 * R^2 - 1084.846 * R^3 - 535.06 * R^4 \dots\dots\dots(20)$$

$$b = 3.487775 - 68.13976 * R + 389.4625 * R^2 - 612.4041 * R^3 + 315.8724 * R^4 \dots\dots\dots(21)$$

$$c = 0.2677553 + 0.9481759 * R + 2.109415 * R^2 - 4.827012 * R^3 + 2.459584 * R^4 \dots\dots\dots(22)$$

Posteriormente se utiliza la ecuación de Chen.

$$i_d^{Tr} = \frac{a P_1^{10} \log[10^{2-F} Tr^{F-1}]}{[d + b]^c} \dots\dots\dots (23)$$

donde:

D; duración, en minutos.

Tr; período de retorno, en años.

P_1^{10} ; precipitación, en mm.

i_d^{Tr} ; intensidad, en mm/h.

Los valores de los cocientes R y F definen, respectivamente la forma de las curvas I-D-T y su separación entre ellas; en cambio P_1^{10} , establece el escalamiento.

2.2.4 Tormenta de diseño

Para realizar un proceso de evaluación del impacto que provocan los eventos hidrológicos en los sistemas rurales y urbanos, la hidrología superficial se apoya en los registros climáticos e hidrométricos. Cuando estos registros no están disponibles, con el proceso lluvia-escurrimiento se intenta reproducir modelando, por una parte la tormenta que incide en la cuenca y después la fase terrestre del ciclo hidrológico que se desarrolla en ésta. Por lo tanto, las tormentas de diseño son el punto de partida de las estimaciones hidrológicas de crecientes, para las cuencas rurales y urbanas, cuando no existe información hidrométrica. Existen dos tipos de tormentas de diseño: las históricas y las sintéticas o hipotéticas. Las primeras son eventos severos o extraordinarios que han ocurrido en el pasado y fueron registradas; además de que pueden estar documentadas en relación a los problemas y daños que causaron en una ciudad o sistema de drenaje. Las segundas se obtienen a partir del estudio y generalización de un gran

número de tormentas severas observadas; con el objetivo de estimar un hietograma, el cual represente las tormentas en la zona de estudio [15].

Para la construcción de hietogramas de diseño en zonas urbanas a partir de curvas I-D-T, la duración se considera igual al tiempo de concentración de la cuenca (T_c). El método usado es el de bloque alterno, donde la mayor intensidad se coloca al centro, el segundo mayor del lado derecho, el tercero mayor del lado izquierdo, así sucesivamente hasta colocar todas las intensidades.

2.2.4.1 Pendiente media del cauce principal

Un parámetro muy importante para definir la respuesta de una cuenca ante una tormenta es la pendiente media del cauce principal. Existen varios métodos para obtener la pendiente media, para nuestro caso sólo aplicaremos el método de Taylor y Schwarz para tramos no equidistantes [16].

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \dots\dots\dots(24)$$

donde:

S; pendiente media del cauce principal, adimensional.

L; longitud total del río, en m.

l_n ; longitud del tramo n, en m.

S_n ; pendiente del tramo n, adimensional.

2.2.4.2 Tiempo de concentración

Tiempo de concentración es lo que tarda una partícula de agua en pasar del punto más alejado de la cuenca hasta la salida de la misma. Para determinarlo se tienen las ecuaciones de Kirpich, Rowe y SCS (*Soil Conservation Service*).

El tiempo de concentración a considerar será el que represente un tiempo crítico, siendo este el tiempo de menor valor.

1) Kirpich

$$t_c = 0.00325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.0385}} \dots\dots\dots (25)$$

donde:

L; longitud del cauce principal, en m.

S; pendiente de la cuenca, adimensional.

t_c; tiempo de concentración, en hrs.

2) Rowe

$$t_c = \left(\frac{0.87 L^3}{D} \right)^{0.385} \dots\dots\dots (26)$$

donde:

L; longitud del cauce principal, en km.

D; desnivel del cauce principal, en m.

t_c; tiempo de concentración, en hrs.

3) SCS

$$t_c = \frac{L^{1.15}}{3085 D^{0.385}} \dots\dots\dots(27)$$

donde:

L; longitud del cauce principal, en m.

D; desnivel del cauce principal, en m.

t_c; tiempo de concentración, en hrs.

2.2.5 Infiltración: Numero de escurrimiento (N)

Para determinar la infiltración cuando no hay aforos, el método de los números de escurrimiento es el más recomendado. El U.S. SCS propone el método llamado número de escurrimiento, en el cual, la altura de lluvia total (P) se relaciona con la altura de la precipitación efectiva (Pe) mediante las curvas de la (Figura 2), [3].

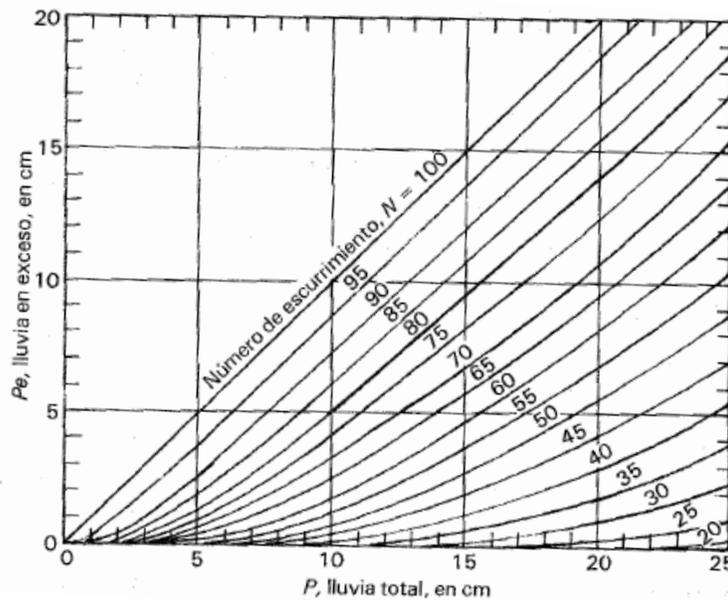


Figura 2. Número de escurrimiento [3]

Las curvas pueden expresarse algebraicamente mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } P - \frac{5080}{NC} + 50.8 \leq 0 \text{ entonces } Pe = 0 \dots\dots\dots(28)$$

$$\text{Si } P - \frac{5080}{NC} + 50.8 > 0 \text{ entonces } Pe = \frac{\left(P - \frac{5080}{NC} + 50.8\right)^2}{P + \frac{20320}{NC} - 203.2} \dots\dots\dots(29)$$

donde:

P; precipitación total, en mm.

N; número de escurrimiento.

Pe; precipitación efectiva, en mm.

Para determinar el valor de N se utilizan las Tabla 1 y Tabla 2 (Aparicio, 2006).

Tabla 1 Selección de N

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno, en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo Cultivos en surco	Surcos rectos	-	77	86	91	94
	Surcos rectos	> 1	72	81	88	91
	Surcos rectos	< 1	67	78	85	89
	Contorneo	> 1	70	79	84	88
	Contorneo	< 1	63	75	82	86
	Terrazas	> 1	66	74	80	82
	Terrazas	< 1	62	71	78	81
Cereales	Surcos rectos	> 1	65	76	84	88
	Surcos rectos	< 1	63	75	83	87
	Contorneo	> 1	63	74	82	85
	Contorneo	< 1	61	73	81	84
	Terrazas	> 1	61	72	79	82
	Terrazas	> 1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	> 1	66	77	85	89
	Surcos rectos	< 1	58	72	81	85
	Contorneo	> 1	64	75	83	85
	Contorneo	< 1	55	69	78	83
	Terrazas	> 1	63	73	80	83
	Terrazas	< 1	51	67	76	80
Pastizales	-----	> 1	68	79	86	89
	-----	< 1	39	61	74	80
	Contorneo	> 1	47	67	81	88
	Contorneo	< 1	6	35	70	79
Pradera permanente	-----	< 1	30	58	71	78
Bosques naturales	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	Muy ralo	-----	56	75	86	91
	Ralo	-----	46	68	78	84
	Normal	-----	36	60	70	77
	Espeso	-----	26	52	62	69
Muy espeso	-----	15	44	54	61	
Caminos	De terracería	-----	71	82	87	89
	Con superficie dura	-----	74	84	90	92

Tabla 2 *Textura de Suelo*

Tipo de Suelo	Textura del suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla; suelos muy permeables.
B	Arenas finas y limos.
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla.
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables.

2.2.6 Hidrograma Unitario Sintético Triangular (HUST)

Se desarrolló para determinar un hidrograma unitario sintético en cuencas y la forma es triangular [17], ver Figura 3.

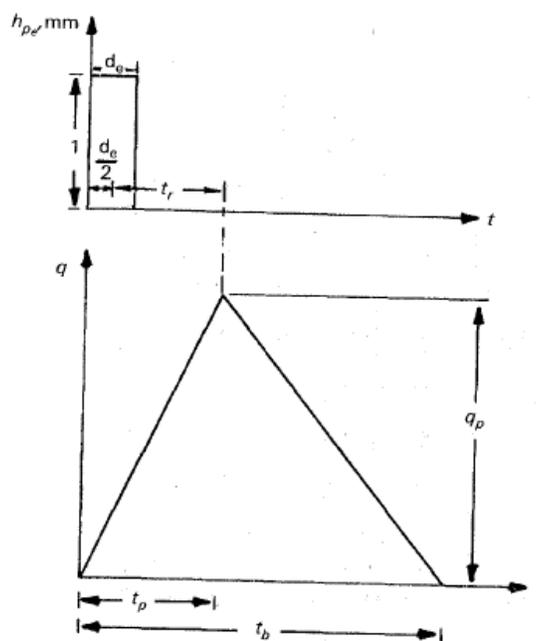


Figura 3. *Hidrograma unitario sintético triangular [3]*

De la geometría del hidrograma unitario, se presenta en la siguiente ecuación el gasto pico:

$$q_p = \frac{0.208 \cdot A}{t_p} \dots \dots \dots (30)$$

donde:

A; área de la cuenca, en km².

t_p ; tiempo pico, en hrs.

q_p ; gasto pico, en m³/s/mm.

Del análisis de varios hidrogramas, se concluyó que el tiempo base y el tiempo pico se relacionan mediante la siguiente ecuación [17]:

$$t_b = 2.67 * t_p \dots\dots\dots (31)$$

donde:

t_b ; tiempo base, en hrs.

Por lo tanto, el tiempo pico se expresa como:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \dots\dots\dots (32)$$

donde:

t_p ; tiempo pico, en hrs.

d_e ; duración en exceso, en hrs.

t_r ; tiempo de retardo, en hrs.

El tiempo de retardo se calcula mediante el tiempo de concentración:

$$t_r = 0.6 * t_c \dots\dots\dots (33)$$

2.2.7 Duración de la tormenta

La duración en exceso con la que se tiene mayor gasto pico se calcula para cuencas grandes como:

$$d_e = 2 * \sqrt{t_c} \dots\dots\dots (34)$$

donde:

d_e ; duración en exceso, en hrs.

t_c ; tiempo de concentración, en hrs.

Pero para cuencas pequeñas $d_e = t_c$. En la Tabla 3, se muestra la clasificación de las cuencas [18].

Tabla 3 Clasificación de cuencas

Tamaño de la cuenca (Km ²)	Descripción
<25	Muy pequeña
25-250	Pequeña
250-500	Intermedia-pequeña
500-2,500	Intermedia-Grande
2,500-5,000	Grande
>5,000	Muy grande

2.2.8 Peligro por inundación

El peligro por inundación se define como como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado [19].

La Agencia Catalana de Agua [12] clasifica el peligro como moderado o elevado en función de la profundidad, la velocidad o una combinación de ambas (Tabla 4).

Tabla 4 Criterio de peligro

Peligro	Criterio
Elevado	$v > 1 \text{ m/s}$ o $y > 1 \text{ m}$ o $v_y > 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$
Moderado	$v > 0.4 \text{ m/s}$ o $y > 0.4 \text{ m}$ o $v_y > 0.08 \text{ m}^2/\text{s}$
Sin peligro	En caso contrario

3 CASO DE ESTUDIO

La cuenca del río Chapingo vierte sus aguas en el lago Nabor Carrillo, sin embargo, atraviesa varias localidades urbanas, las cuales se encuentran expuestas a inundaciones. Para determinar el peligro por inundación, en este capítulo, primero se determinan las características mas importantes de la cuenca, posteriormente se realiza el análisis estadístico de la lluvia y escurrimiento y finalmente, mediante modelación hidrológica distribuida se determinan, áreas inundables, campos de profundidades, velocidades y peligro por inundación.

3.1 LOCALIZACIÓN

La cuenca del río Chapingo se encuentra dentro de la Región Hidrológica-Administrativa XIII, la cual lleva por nombre Aguas del Valle de México (Figura 4).



Figura 4. Localización de la RHA XIII Aguas del Valle de México [20].

La cuenca Chapingo comprende las Subregiones Hidrológicas Valle de México (26F) y Tula (26D), que a su vez forman parte de la Región Hidrológica 26 Pánuco (Figura 5).

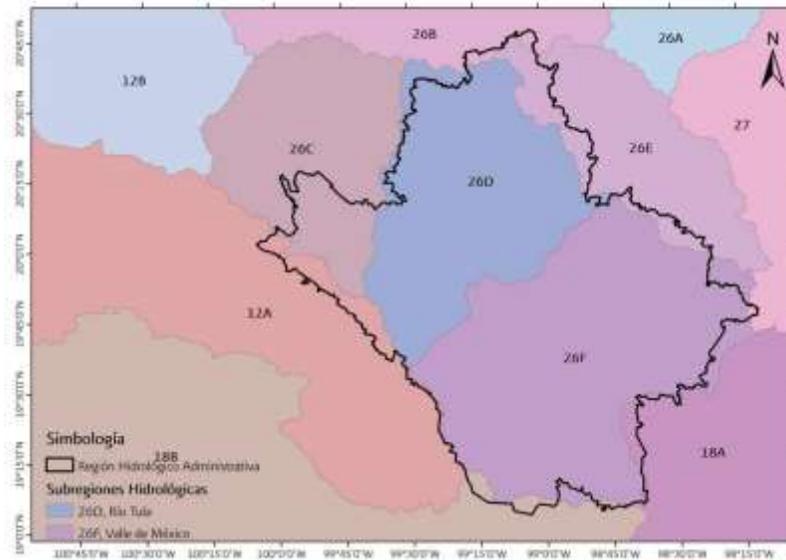


Figura 5. Subregiones de la RHA XIII Aguas del Valle de México [20]

El río Chapingo tiene su origen en una serie de torrentes que, con dirección al Norte, bajan de los cerros Tearco y Tecorral, desde una altitud del orden de los 3,500 m.s.n.m. Los anteriores cerros pertenecen al accidente orográfico denominado Sierra de Quetzaltepec. Las corrientes se unen a la cañada de Carcaces, donde forman el arroyo Tepetlaya, éste sigue una dirección al Nor-Noreste, para recibir un pequeño afluente en la margen derecha de nombre arroyo Almeya; a partir de éste, corrige su curso al Oeste y se le conoce como río Chapingo, que pasa al Sur de la población de Tequexquináhuac, México, y más adelante, por San Luis Huexotla y San Xate Huexotla. Aguas abajo, el río cruza la carretera federal México-Texcoco, atravesando a continuación por una zona dedicada a la agricultura; en este tramo, su cauce se encuentra canalizado, para finalmente descarga a la zona del ex-vaso de Texcoco [21]. La Figura 6 muestra la cuenca y las localidades que se encuentran en la cuenca.

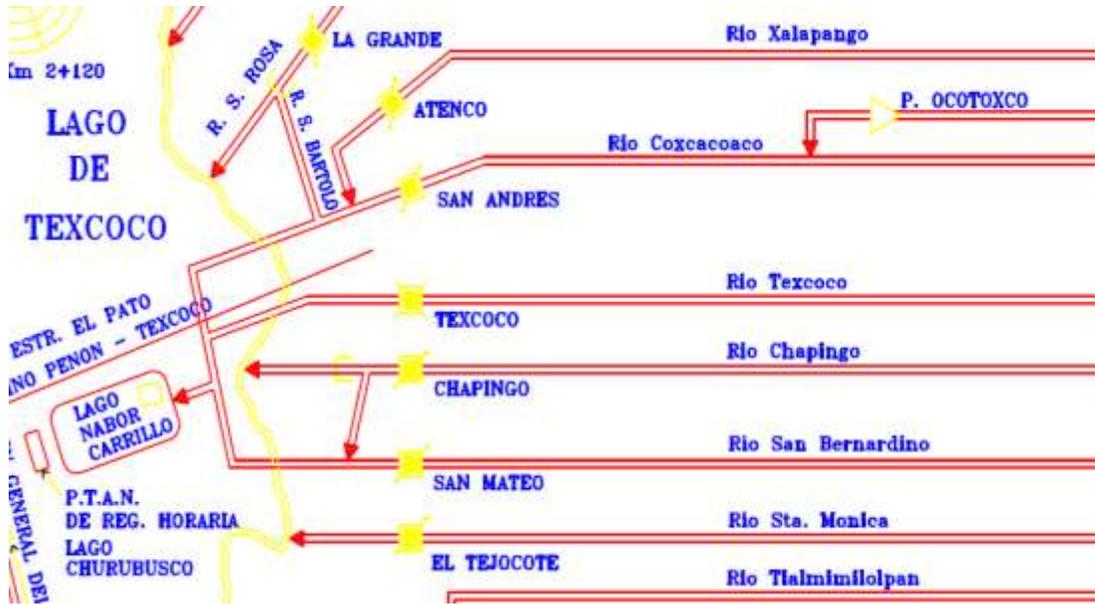


Figura 6. *Esquema hidrográfico del río Chapingo [4]*

3.2 TOPOGRAFÍA

Con el Continuo de Elevación Mexicano (CEM) 3.0 con una resolución de 15 metros (Figura 7) correspondiente a las cartas del INEGI con escala 1:50,000 E14B21 y E14B31, se trazó el parteaguas y la red de drenaje de la zona de estudio (Figura 8) con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica, resultando una cuenca con un área de 28.89 Km².



Figura 7. *Topografía de la cuenca del río Chapingo*

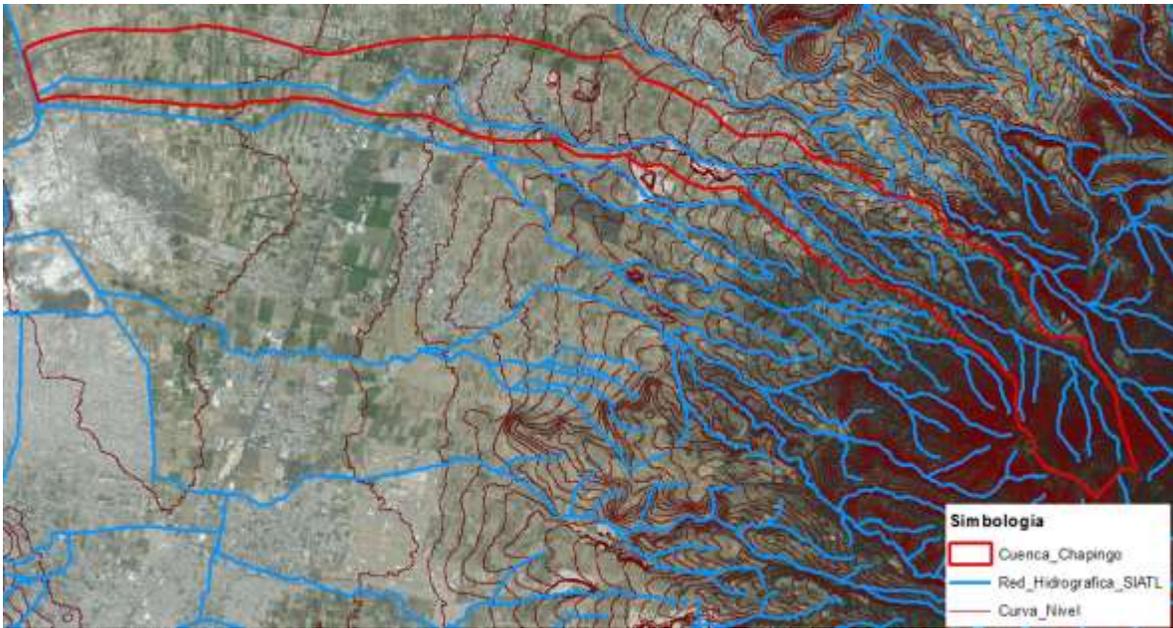


Figura 8. Cuenca del río Chapingo

Las elevaciones de la cuenca del río Chapingo van desde los 2,229 m.s.n.m hasta los 3,603 m.s.n.m. El mapa de pendientes clasificadas en menor y mayor a 1 %, se muestra en la Figura 9.

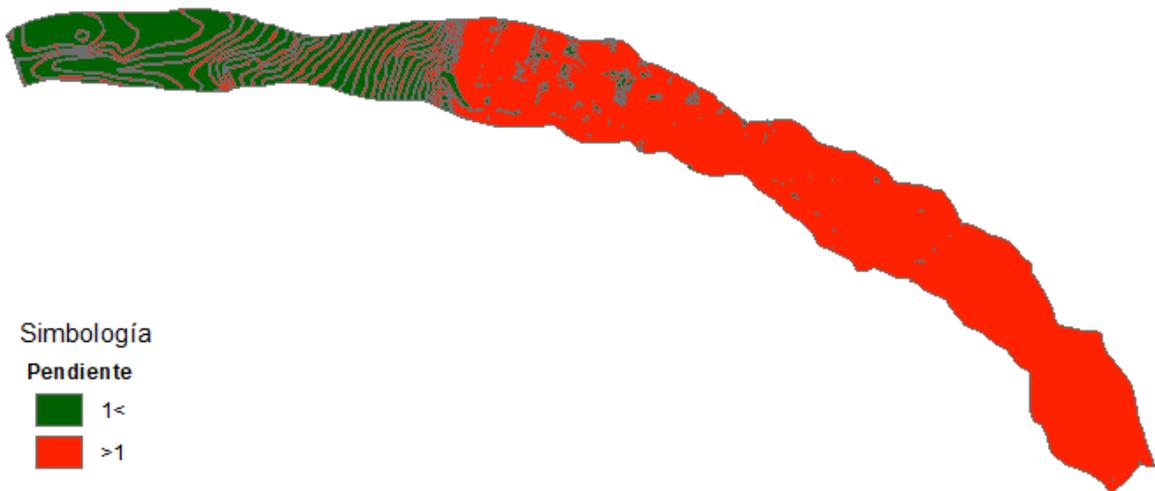


Figura 9. Mapa de pendientes de la cuenca del río Chapingo

Se determinó la longitud del cauce principal de 23.37 km y una pendiente media con el método de Taylor Schwarz de 0.41%, (Figura 10 y Tabla 5).

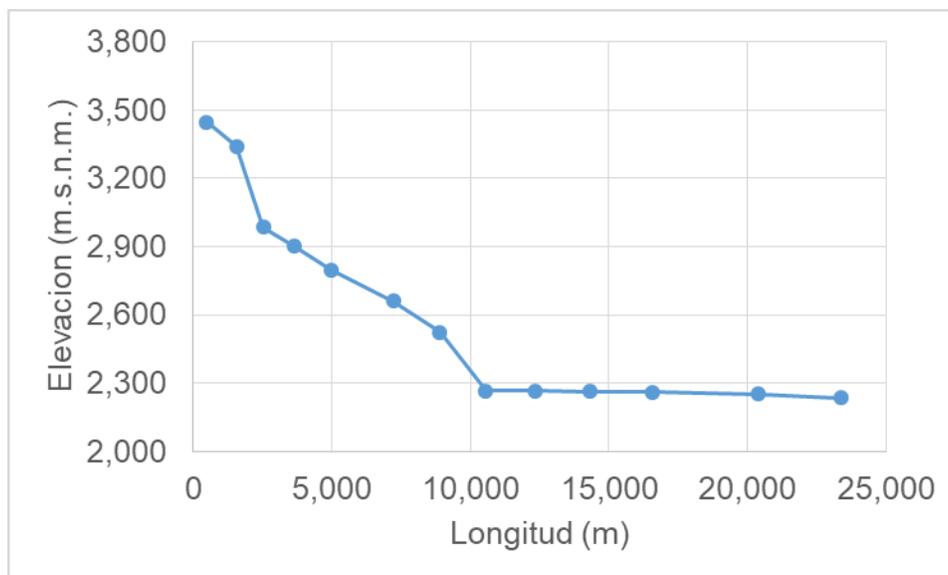


Figura 10. Perfil del cauce principal

Tabla 5 Método de Taylor y Schwarz

Tramo	Elevación 1	Elevación 2	Longitud	Desnivel	$\frac{l_n}{\sqrt{S_n}}$
1	3340	3447	495.48	107	1066.23
2	2986	3340	1061.96	354	1839.34
3	2900	2986	967.54	86	3245.32
4	2799	2900	1135.52	101	3807.41
5	2660	2799	1315.50	139	4046.96
6	2524	2660	2246.11	136	9128.05
7	2267	2524	1690.41	257	4335.34
8	2265	2267	1642.43	2	47066.78
9	2263	2265	1782.93	2	53233.52
10	2261	2263	1959.16	2	61318.36
11	2253	2261	2265.07	8	38113.38
12	2235	2253	3828.13	18	55826.95
13	2231	2235	2982.89	4	81456.71
		Total	23373.14	1216	364484.34
Sm=					0.0041

Con la información anterior se determinó el tiempo de concentración mediante 3 métodos, eligiendo la más desfavorable, 133.42 minutos (Tabla 6).

Tabla 6 Tiempo de Concentración

Método	tc (hrs)	tc (min)
Rowe	2.34	140.62
Kirpich	6.23	373.70
SCS	2.22	133.42

3.3 USO Y TIPO DE SUELO

El tipo de suelo de la cuenca corresponde a fino y medio (Figura 11), según la carta edafológica, escala 1:1'000,00, en la figura se presenta el uso de suelo y vegetación, Serie V a escala 1:250,000 (Figura 12).



Figura 11. *Edafología*

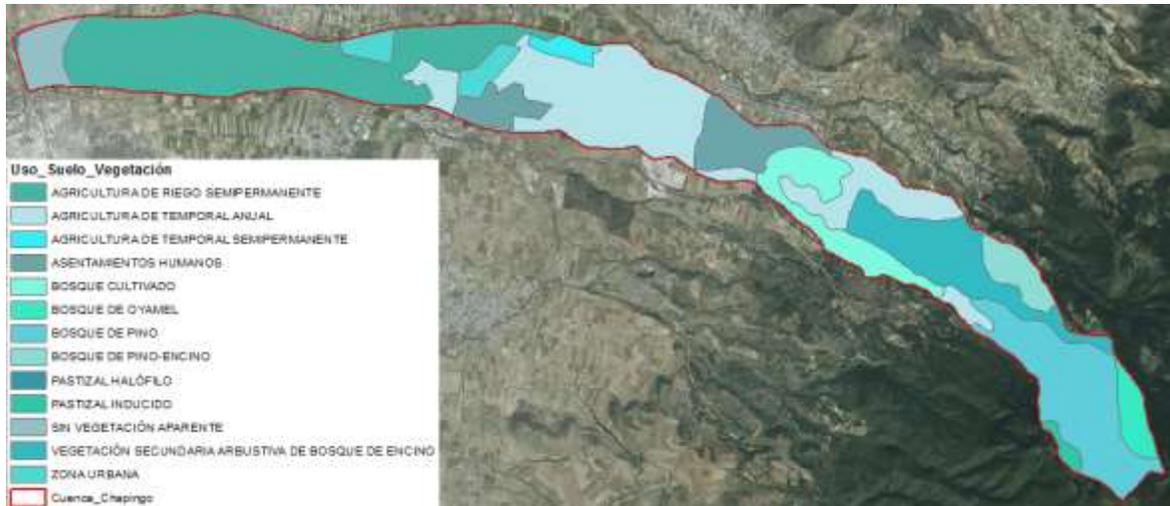


Figura 12. Uso de suelo y vegetación

3.4 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Se analizaron los registros de las estaciones climatológicas e hidrométricas que tiene influencia en la cuenca del río Chapingo. Posteriormente se ajustaron a funciones de distribución de probabilidad para determinar las precipitaciones y gastos asociados a los distintos periodos de retorno.

3.4.1 Estaciones climatológicas e hidrométricas

Empleando el método de los polígonos de Thiessen, se determinó que 3 estaciones climatológicas tienen influencia en la cuenca del río Chapingo. En la Tabla 7 se muestran los datos generales de las mismas. Además, se cuenta con una estación hidrométrica (Figura 13).

Tabla 7 Estaciones climatológicas e hidrométrica

Estación	Clave	Nombre	UTM		Registro
			Coordenadas X	Coordenadas Y	
Climatológicas	15101	San Miguel Tlaixpan	519672.345	2158310.295	1961-2015
	15145	Plan Lago de Texcoco	507168.998	2150687.991	1967-2014

Estación	Clave	Nombre	UTM		Registro
			Coordenadas X	Coordenadas Y	
	15170	Chapingo (DGE)	511921.349	2154463.793	1952-2015
Hidrométrica	26183	Chapingo	512021.621	2154614.647	1944-2014

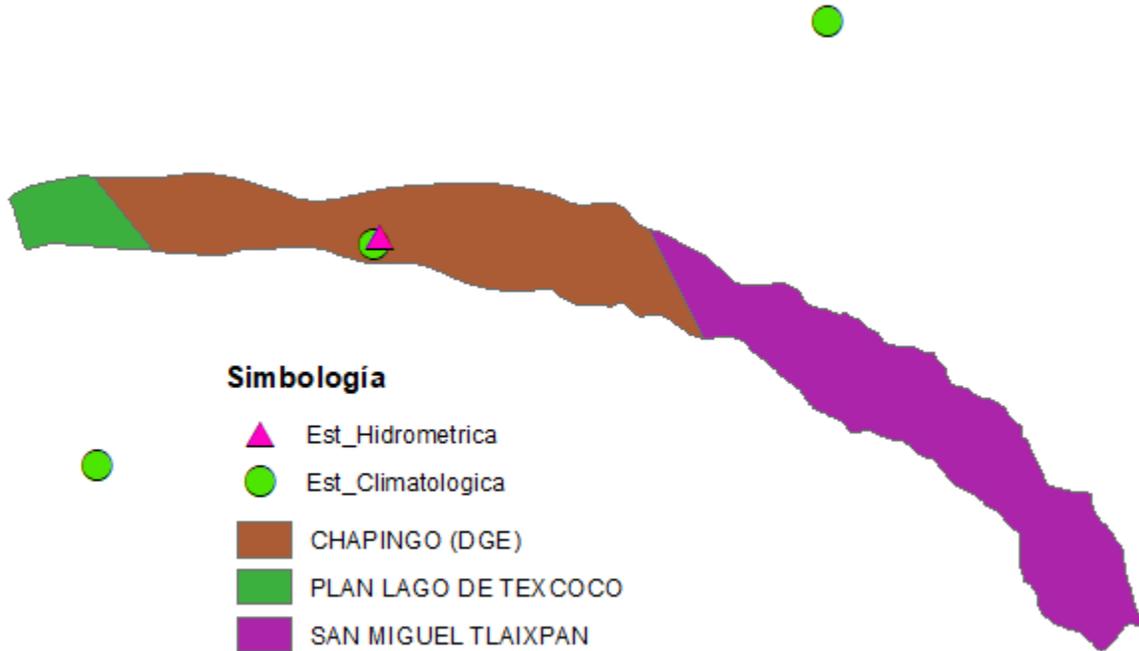


Figura 13. Estaciones climatológicas e hidrométricas

3.4.2 Datos de precipitación y gastos

Los datos diarios de las estaciones climatológicas fueron complementados empleando el método del inverso de la distancia (ecuación 4), con lo que el periodo de la serie de tiempo es del año 1961-2015. Posteriormente para cada estación se obtuvieron las precipitaciones máximas de cada año (Tabla 8). En cambio, la serie de tiempo de los gastos máximos anuales es de 1961-2011 (Tabla 9).

Tabla 8 *Precipitación máxima anual (mm)*

San Miguel Tlaixpan				Plan Lago de Texcoco				Chapingo (DGE)			
Año	Máx.	Año	Máx.	Año	Máx.	Año	Máx.	Año	Máx.	Año	Máx.
1961	34	1989	32.2	1961	40	1989	40.8	1961	35	1989	44.2
1962	35	1990	30.1	1962	28	1990	61.8	1962	30.9	1990	61.6
1963	44	1991	27	1963	25.5	1991	36.3	1963	31	1991	41
1964	36	1992	60.7	1964	38.5	1992	35.5	1964	27.5	1992	60.7
1965	30	1993	33.4	1965	30	1993	54.5	1965	29.2	1993	33.9
1966	30	1994	32.2	1966	32	1994	58.5	1966	52.7	1994	44.9
1967	69	1995	30.7	1967	50	1995	31.7	1967	52	1995	32.8
1968	63	1996	32.5	1968	40	1996	34.5	1968	39.5	1996	34.2
1969	46	1997	20	1969	43	1997	32.5	1969	40.7	1997	31
1970	22	1998	40	1970	46	1998	35.7	1970	37.7	1998	56
1971	38	1999	20	1971	49.2	1999	21.5	1971	25.1	1999	36
1972	29	2000	22.5	1972	30.2	2000	42	1972	23.3	2000	24
1973	41	2001	20.5	1973	36.3	2001	26.4	1973	25	2001	28
1974	54	2002	21	1974	33.2	2002	32	1974	50.5	2002	45
1975	31	2003	33	1975	32.2	2003	55	1975	27.3	2003	34
1976	58	2004	33.2	1976	50.7	2004	55	1976	34	2004	45
1977	40	2005	35	1977	37.1	2005	38.6	1977	34	2005	34.5
1978	43	2006	21	1978	37.6	2006	59	1978	57.6	2006	28.5
1979	39	2007	36.4	1979	44.5	2007	46	1979	56.5	2007	53
1980	36	2008	36.5	1980	27	2008	124	1980	26.7	2008	30
1981	56.5	2009	32.1	1981	43.8	2009	43	1981	44.3	2009	38.8
1982	70	2010	12.6	1982	36	2010	42.2	1982	18.2	2010	43.7
1983	27	2011	71.9	1983	23	2011	45.7	1983	25.1	2011	60.7
1984	33	2012	29.9	1984	31.5	2012	32.3	1984	29.6	2012	38.3
1985	51	2013	34.5	1985	28.5	2013	48	1985	37	2013	40
1986	24	2014	80	1986	35.3	2014	57	1986	26.4	2014	46.7
1987	33	2015	43.3	1987	35	2015	56.2	1987	30.1	2015	75.4
1988	59.4			1988	59.5			1988	60.4		

Tabla 9 Gasto máximo anual de la estación hidrométrica Chapingo (m³/s)

Año	Máx.	Año	Máx.	Año	Máx.
1961	48.7	1977	3.4	1993	1.8
1962	23.8	1978	14.4	1994	1.0
1963	25.1	1979	7.6	1996	3.3
1964	30.8	1980	2.7	1997	2.0
1965	33.5	1981	3.7	1998	2.9
1966	42.5	1982	1.2	1999	2.3
1967	19.5	1983	5.2	2001	1.2
1968	42.6	1984	2.8	2002	1.6
1969	11.3	1985	6.2	2003	2.5
1970	13.3	1986	1.2	2004	2.7
1971	12.8	1987	1.5	2006	2.8
1972	22.5	1988	1.1	2007	3.1
1973	14.9	1989	1.2	2009	2.0
1974	21.4	1990	2.1	2010	6.3
1975	7.3	1991	3.4	2011	12.5
1976	7.9	1992	1.9		

La serie de tiempo de máximos anuales de precipitación y de gastos se presentan en las Figura 14 y Figura 15, respectivamente. Se observa que los datos de precipitaciones tiene un comportamiento similar, en cambio en los gastos a partir de 1977 el comportamiento es diferente.

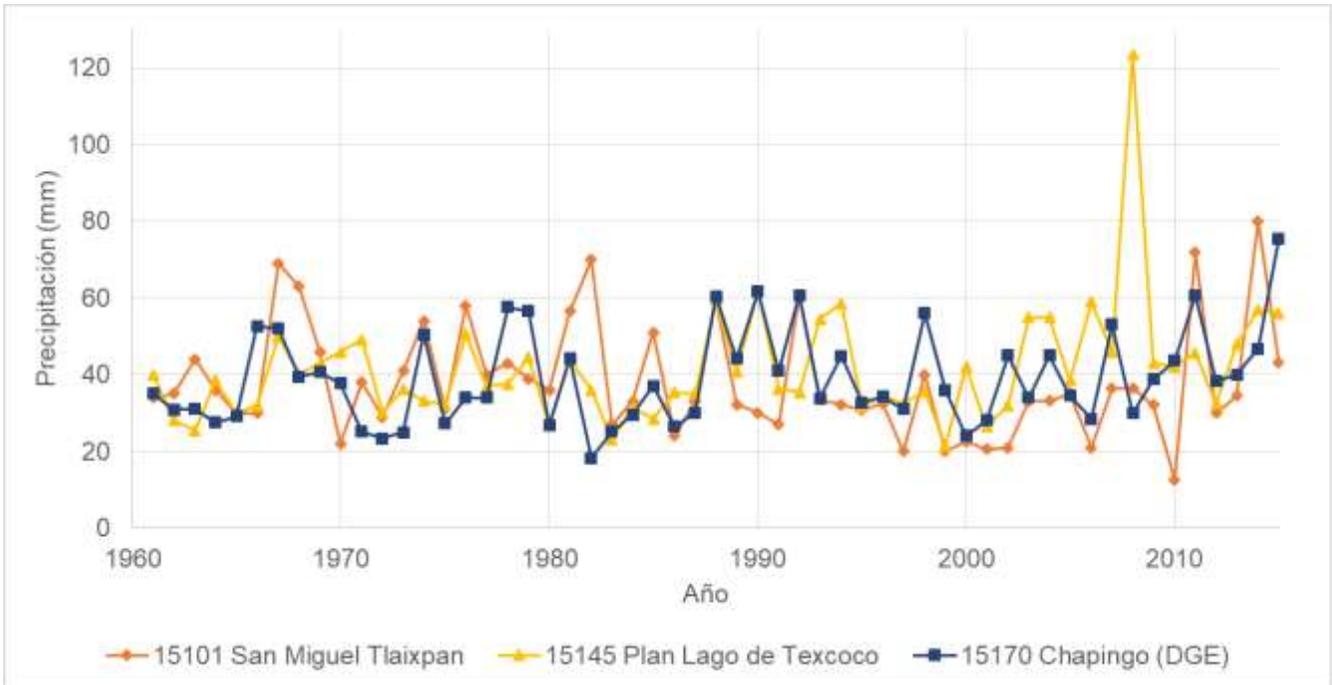


Figura 14. Precipitación máxima anual en 24 Hrs.

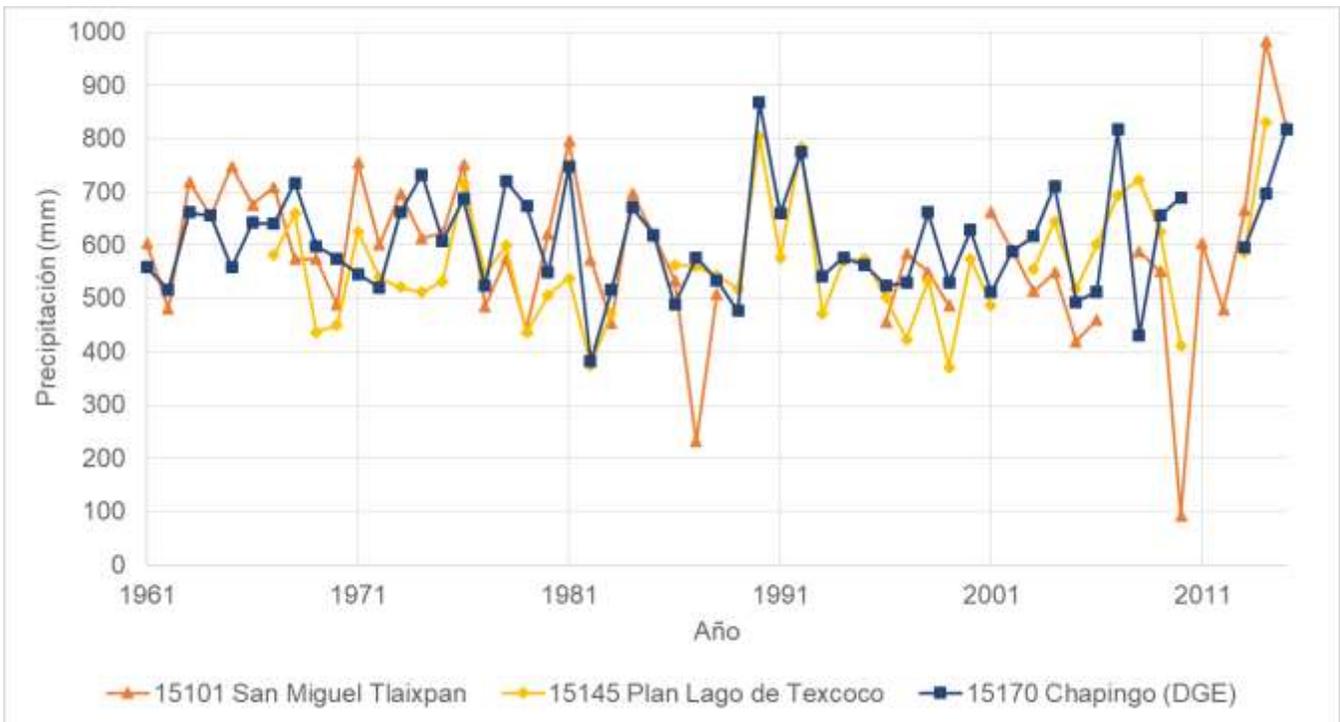


Figura 15. Precipitación acumulada anual.

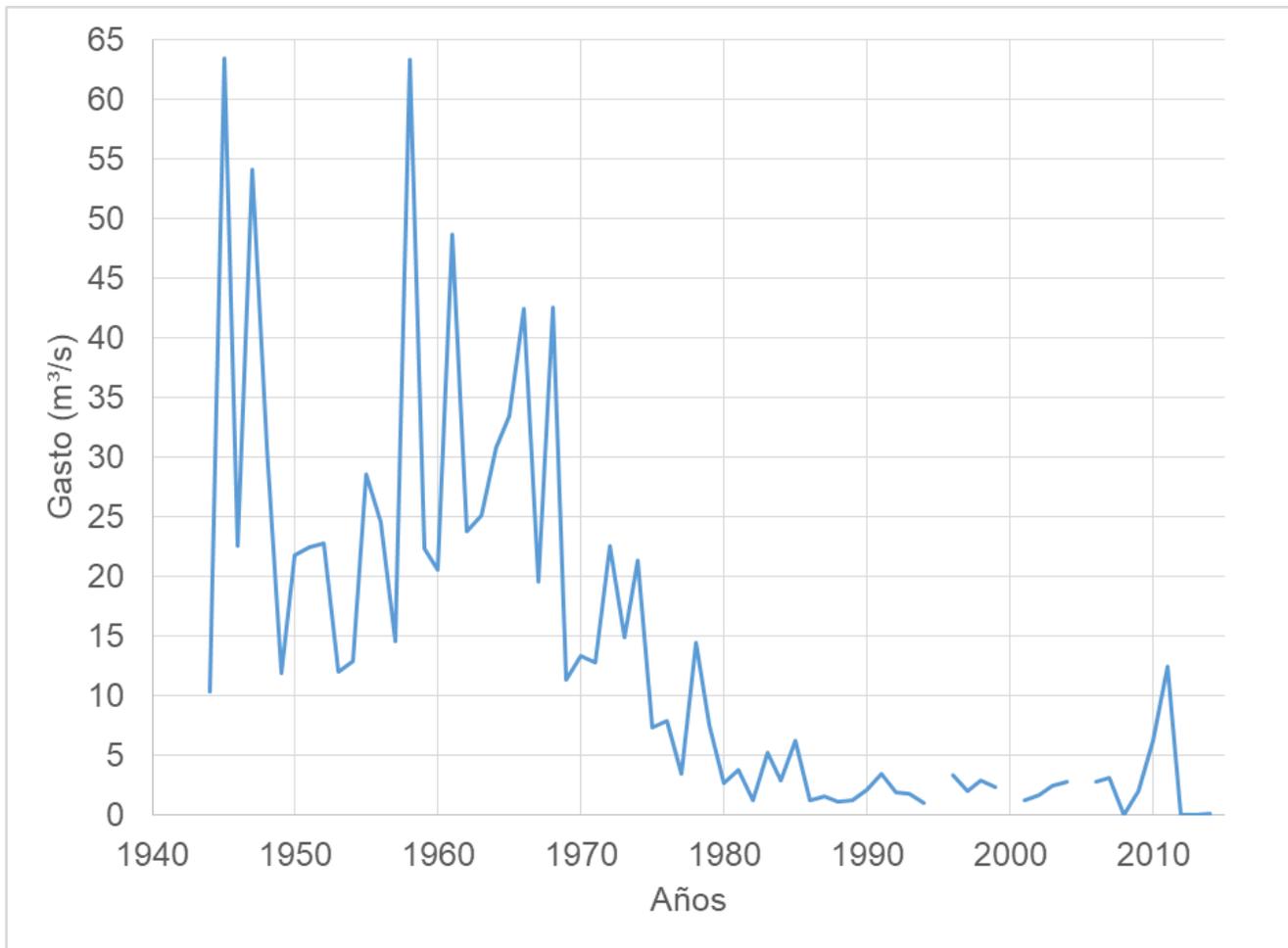


Figura 16. Gasto máximo anual instantáneo

3.4.3 Análisis de frecuencias

A las muestras de máximos anuales tanto de precipitaciones como de gastos se les ajustó la mejor función de distribución de probabilidad con el programa de Análisis de Frecuencia (AFA) [14], el cual cuenta con 11 Funciones de Distribución de Probabilidad (Figura 17), eligiendo la que tenga el mínimo error ajustado. Por ejemplo, para la estación San Miguel Tlaixpan, la mejor función de distribución de probabilidad fue la LogPearson Tipo III (Figura 18). Los resultados se presentan en la Tabla 10.

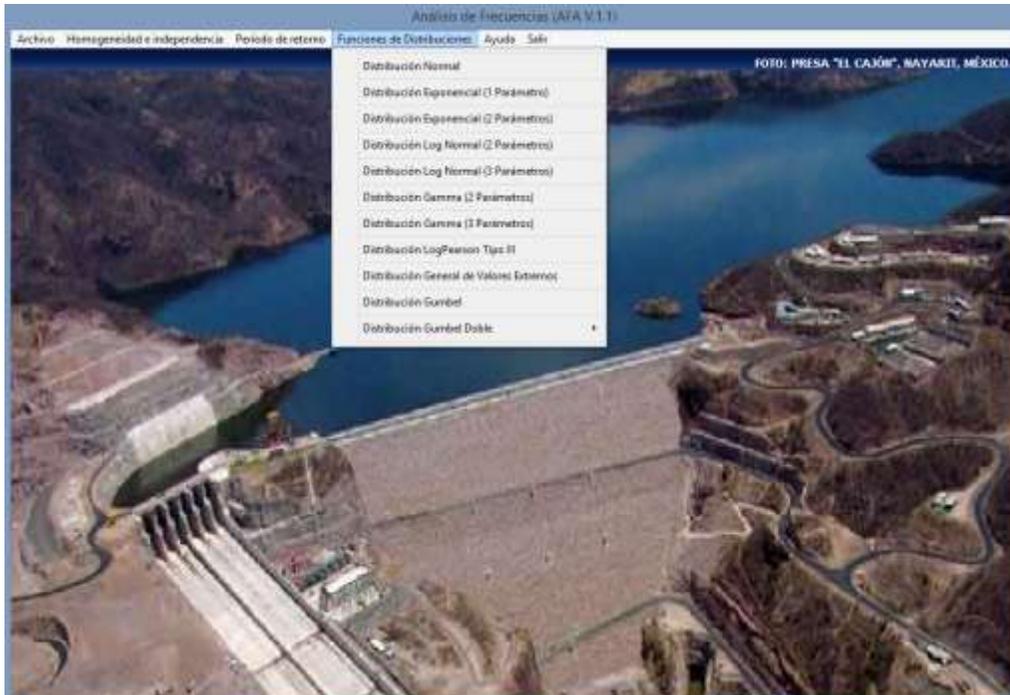


Figura 17. Programa AFA

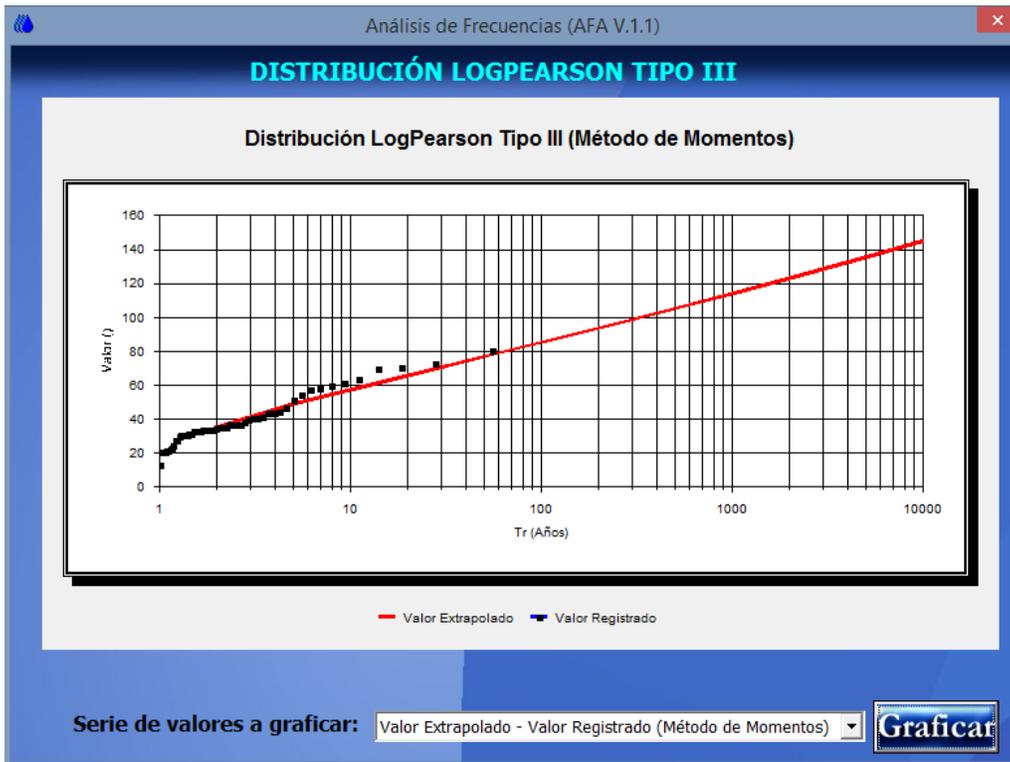


Figura 18. Valor extrapolado vs valor registrado

Tabla 10 *Precipitaciones y gastos asociada a distintos períodos de retorno*

Período de Retorno	San Miguel Tlaixpan	Plan Lago de Texcoco	Chapingo (DGE)	Chapingo
Tr	hp (mm)	hp (mm)	hp (mm)	Q(m ³ /s)
2	35.501	38.044	37.08	6.53
5	48.663	49.781	48.323	17.88
10	57.434	59.01	55.469	26.47
20	65.878	69.142	62.079	35.06
50	76.902	84.41	70.326	46.41
100	85.277	97.691	76.322	55.00
200	93.753	112.729	82.173	63.59
500	105.182	135.748	89.744	74.94
1,000	114.035	155.909	95.379	83.53
2,000	123.093	178.799	100.953	92.12
5,000	135.413	213.887	108.251	103.47
10,000	145.006	244.638	113.726	112.06
MEA	2.697168	5.706717	1.714159	2.71
FDP	LogPearson Tipo III	Exponencial (2 Parámetros)	Gamma (3 Parámetros)	Exponencial (2 Parámetros)

3.4.4 Número de Escurrimiento (N)

Mediante un Sistema de Información Geográfica, se intersectoron las capas de uso de suelo, edafología, pendientes del terreno, con ello se determinó el número de escurrimiento (N), para cada superficie (Figura 19), empleando el método de SCS. Posteriormente se determinó un N ponderado para el área de influencia de cada estación climatológica (Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13)



Figura 19. Uso de suelo, edafología y pendiente

Tabla 11 Número de escurrimiento en el área de influencia de la estación San Miguel

Tlaxpan

Uso de suelo	Tipo de suelo B						
	S<1 % Área (Km ²)	N	N x Área (Km ²)	S>1 % Área (Km ²)	N	N x Área (Km ²)	Total (Km ²)
Agricultura de temporal anual	0.018	75	1.35	2.334	79	184.36	2.35
Asentamientos humanos	0.010	82	0.80	1.359	82	111.41	1.37
Bosque cultivado	0.001	52	0.07	1.882	52	97.86	1.88
Bosque de oyamel	0.0002	52	0.01	0.628	52	32.67	0.63
Bosque de pino	0.002	52	0.09	3.706	52	192.69	3.71
Bosque de pino-encino		52		0.785	52	40.84	0.79
Pastizal inducido		61		0.192	79	15.15	0.19
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	0.002	52	0.09	2.763	52	143.66	2.76
						N Ponderado	60.02

Tabla 12 Número de escurrimiento en el área de influencia de la estación Plan Lago de

Texcoco

Uso de suelo	Tipo de suelo C						
	S<1 % Área (Km ²)	N	N x Área (Km ²)	S>1 % Área (Km ²)	N	N x Área (Km ²)	Total (Km ²)
Agricultura de riego semipermanente	0.8860	82	72.65	0.3131	84	26.30	1.20
Pastizal halófilo	0.0073	74	0.54	0.0051	86	0.44	0.01
Sin vegetación aparente	0.7141	88	62.84	0.1311	88	11.54	0.85
		Total	136.03		Total	38.28	2.06
						N Ponderado	84.75

Tabla 13 Número de escurrimiento en el área de influencia de la estación Chapingo (DGE)

Uso de suelo	Tipo de suelo C						
	S<1 % Área (Km ²)	N	N x Área (Km ²)	S>1 % Área (Km ²)	N	N x Área (Km ²)	Total (Km ²)
Agricultura de riego semipermanente	2.1987	82	180.29	0.9244	84	77.65	3.12
Agricultura de temporal anual	0.0218	82	1.79	0.2184	84	18.35	0.24
Agricultura de temporal semipermanente	0.0283	82	2.32	0.2763	84	23.21	0.30
Asentamientos humanos		87			87		
Zona urbana	0.0018	90	0.16	0.0282	90	2.54	0.03
Uso de suelo	Tipo de suelo B						
	S<1 % Área (Km ²)	N	N x Área (Km ²)	S>1 % Área (Km ²)	N	N x Área (Km ²)	Total (Km ²)
Agricultura de riego semipermanente	2.0913	75	156.85	1.1961	79	94.49	3.29
Agricultura de temporal anual	0.3870	75	29.03	4.0942	79	323.45	4.48
Agricultura de temporal semipermanente	0.0053	75	0.40	0.0266	79	2.10	0.03
Asentamientos humanos	0.0465	82	3.81	0.7807	82	64.02	0.83
Zona urbana	0.2732	84	22.95	0.5072	84	42.61	0.78
						N Ponderado	79.81

3.4.5 Curvas I-D-T

Para determinar las curvas I-D-T, se empleó el método de Chen (apartado 2.2.3 Método Chen), para periodos de retorno de 10, 100 y 1,000 años. Para ello, se obtuvieron las precipitaciones máximas en 24 horas, las cuales se maximizaron con el factor de 1.13 (Tabla 14).

Tabla 14 Precipitaciones máximas en 24 horas maximizadas

Estación/Tr	hp (mm) 10	hp (mm) 100	hp (mm) 1,000
San Miguel Tlaixpan	64.9	96.4	128.9
Plan Lago de Texcoco	66.7	110.4	176.2
Chapingo (DGE)	62.7	86.2	107.8

De las isoyetas de precipitación e intensidad de la Secretaria de Comunicación y Transporte (SCT) y el CENAPRED, se obtuvo la precipitación con duración de 1 hora para periodos de retorno de 10,100 y 1,00 años, (Tabla 15).

Tabla 15 Precipitaciones con duración de 1 hora para cada período de retorno de Isoyetas

	P_1^{10} (mm)	P_1^{100} (mm)	P_1^{1000} (mm)
San Miguel Tlaixpan	39	56	80
Plan Lago de Texcoco	33	55	80
Chapingo (DGE)	34	54	80

Se calculó el factor de convectividad (R), como promedio aritmético (Tabla 16).

Tabla 16 Factor de convectividad R

	San Miguel Tlaixpan	Plan Lago de Texcoco	Chapingo (DGE)
$R = \frac{P_1^{10}}{P_{24}^{10}}$	0.60	0.49	0.54
$R = \frac{P_1^{100}}{P_{24}^{100}}$	0.58	0.50	0.63
$R = \frac{P_1^{1000}}{P_{24}^{1000}}$	0.62	0.45	0.74
Prom. R	0.60	0.48	0.64

Se calculó el valor de F (ecuación 16) y los parámetros a, b y c (Tabla 17).

Tabla 17 Valor de F, a, b, y c

	F	P_{24}^{10}	P_{24}^{100}	$P_{24}^{1,000}$	a	b	c
San Miguel Tlaixpan	1.48	57.43	85.28	114.04	40.06	30.61	43.09
Plan Lago de Texcoco	1.66	59.01	97.69	155.91	11.51	10.13	11.83
Chapingo (DGE)	1.38	55.47	76.32	95.38	0.87	0.82	0.88

Se igualó el tiempo de concentración con la duración del hietograma, el cual se redondeó a 150 minutos. Aplicando la ecuación de Chen para cada estación se calculó la intensidad para diferentes duraciones y distintos periodos de retorno, (Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20) y las Figura 20, Figura 21 y Figura 22 muestran las curvas I-D-T correspondientes. Posteriormente se generaron los hietogramas de precipitación mediante el método de bloques alternos, los cuales serán ingresados como lluvia al modelo (Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20).

Tabla 18 Método de bloque alterno. Estación Plan Lago de Texcoco

Duración (Min)	i (mm/hr)			i (mm/hr) Bloque alterno		
	10	100	1,000	10	100	1,000
30	49	82	114	19	31	44
60	31	52	72	31	52	72
90	23	39	54	49	82	114
120	19	31	44	23	39	54
150	16	26	37	16	26	37

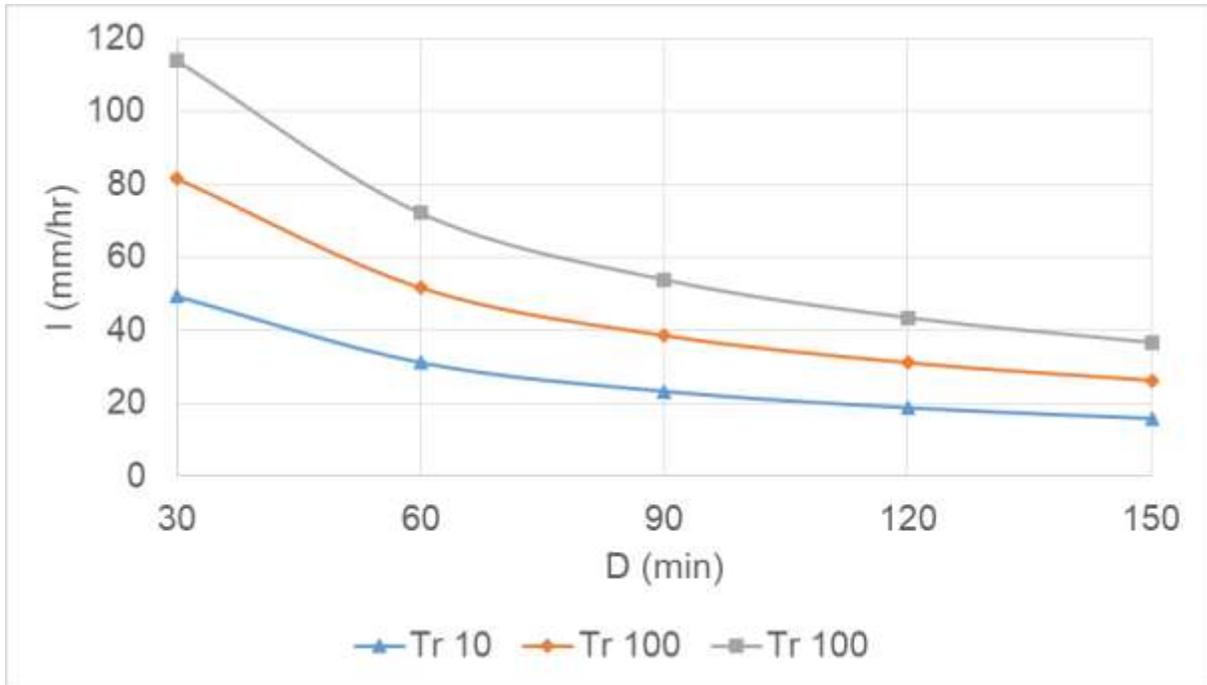


Figura 20. Curvas I-D-T. Estación Plan Lago de Texcoco

Tabla 19 Método de bloque alterno. Estación Chapingo

Duración (Min)	i (mm/hr)			i (mm/hr) Bloque alterno		
	10	100	1,000	10	100	1,000
30	54	74	94	19	27	34
60	33	46	58	33	46	58
90	24	34	43	54	74	94
120	19	27	34	24	34	43
150	16	22	28	16	22	28

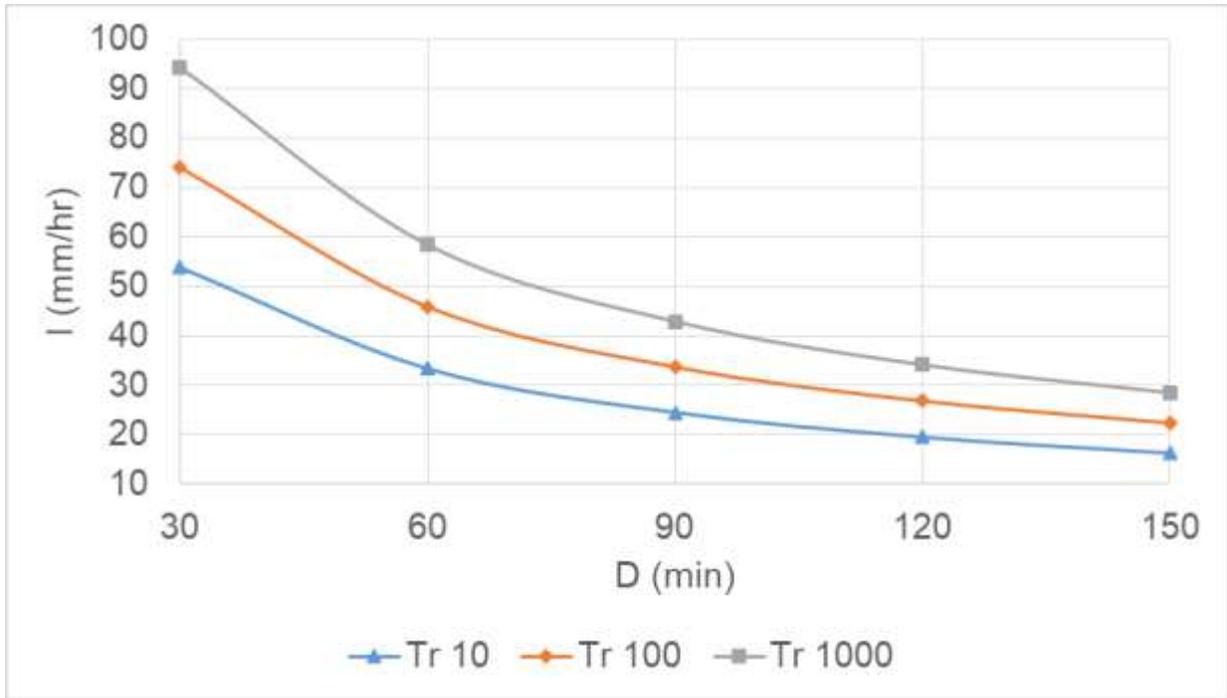


Figura 21. Curvas I-D-T. Estación Chapingo

Tabla 20 Método de bloque alterno. Estación San Miguel Tlaixpan

Duración (Min)	i (mm/hr)			i (mm/hr) Bloque alterno		
	10	100	1,000	10	100	1,000
30	61	90	120	22	33	44
60	38	56	74	38	56	74
90	28	41	55	61	90	120
120	22	33	44	28	41	55
150	19	28	37	19	28	37

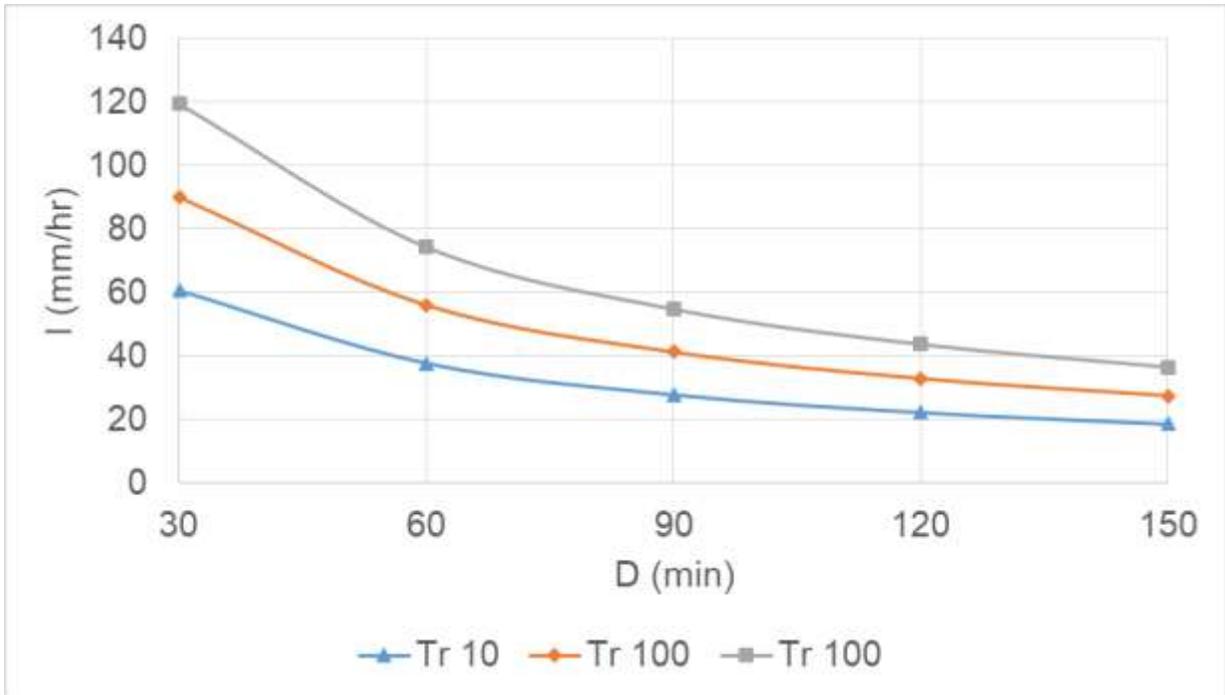


Figura 22. Curvas I-D-T. Estación San Miguel Tlaixpan

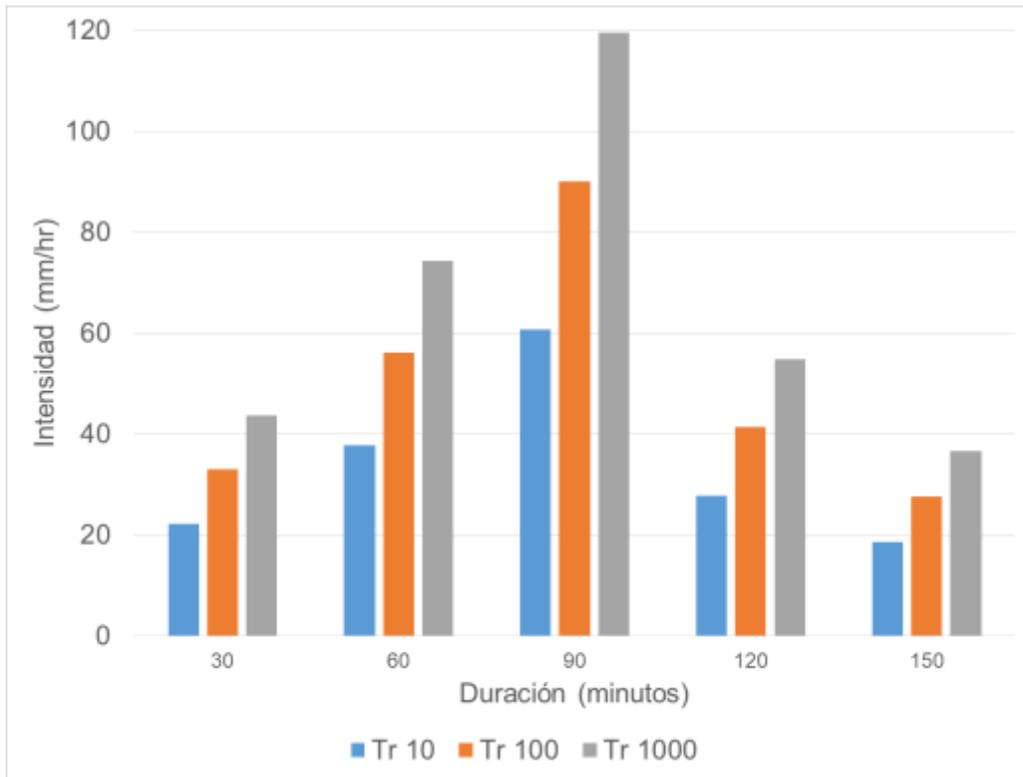


Figura 23. Hietogramas de intensidad. Estación San Miguel Tlaixpan

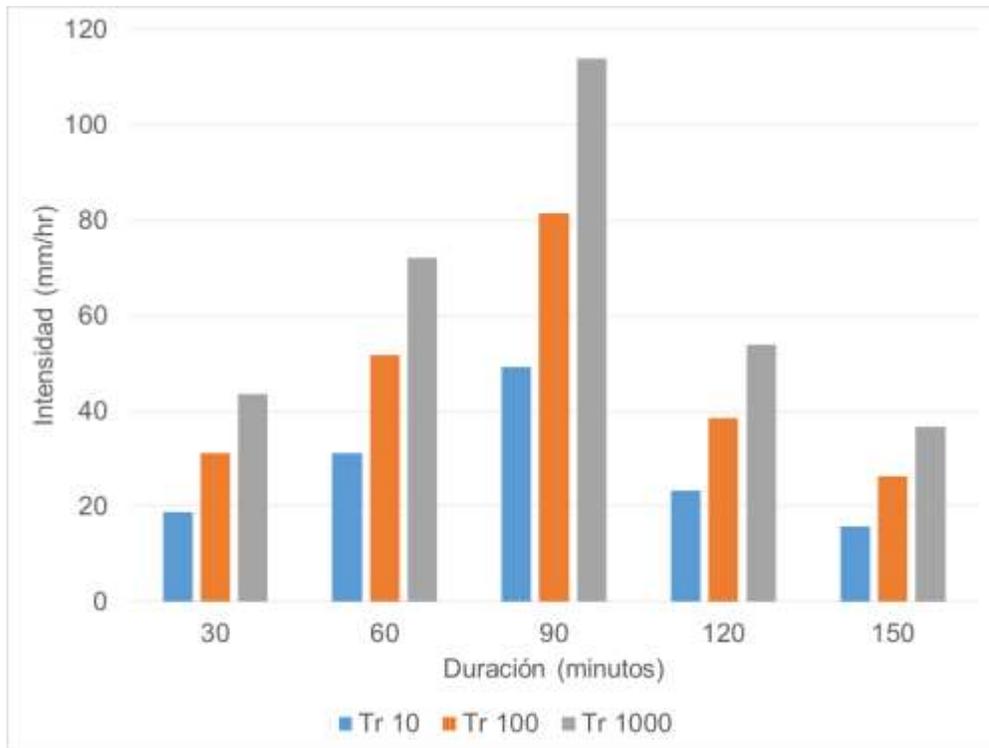


Figura 24. Hietogramas de intensidades. Estación Plan Lago de Texcoco

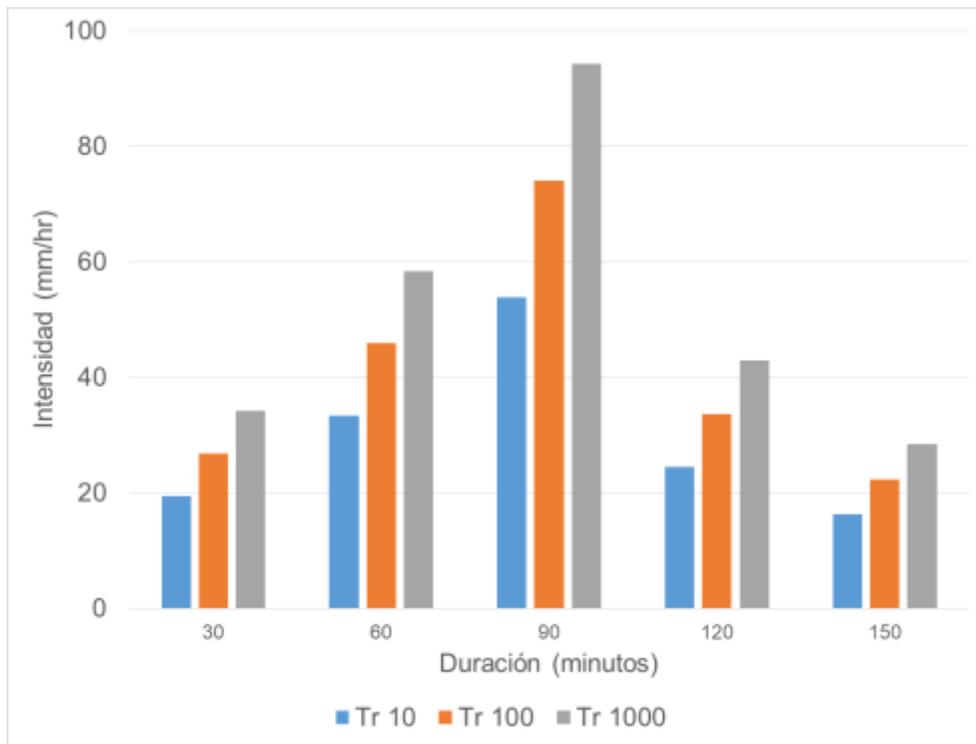


Figura 25. Hietogramas de intensidades. Estación Chapingo (DGE)

3.4.5.1 Hidrograma Unitario Sintético Triangular (HUST)

Debido a que existen distintos tipos de formas y áreas de las manzanas (Figura 26), se promedió una longitud del centroide a una esquina de la manzana, un promedio de área, y una pendiente de 2 % que tendría el techo de las manzanas, con lo cual se determinó mediante la ecuación de Kirpich un promedio de tiempo de concentración, resultado de 0.03 hr. (1.63 minutos).

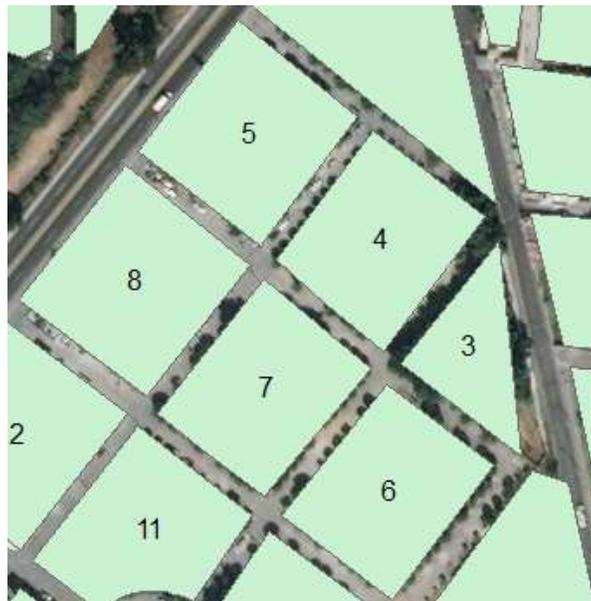


Figura 26. Traza urbana

Con la información anterior se calcularon los parámetros necesarios para aplicar el método de HUST (Tabla 21).

Tabla 21 Parámetros del hidrograma unitario sintético triangular

Parámetro	(Hrs.)	Segundos
tc	0.03	97.88
de	0.03	97.88
tr	0.02	58.73
tp	0.03	107.67
tb	0.08	287.48

Considerando un área tipo de 0.0009 km², y la precipitación efectiva correspondiente se obtuvo el HUST (Tabla 22 y Figura 27).

Tabla 22 *Hidrograma unitario sintético triangular*

Parámetro	Tiempo (s)	Gasto (m ³ /s)
Tiempo Inicio	0	0
Tiempo pico	108	0.0004
Tiempo base	287	0

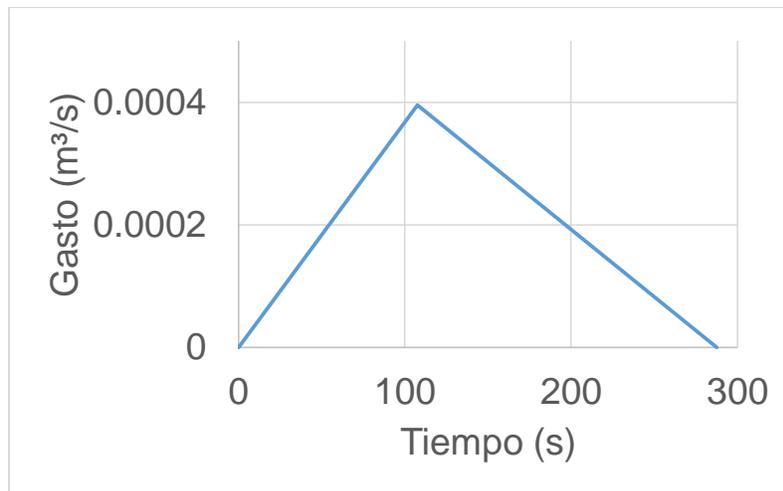


Figura 27. *Hidrograma unitario sintético triangular*

3.5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo, la modelación hidrológica distribuida se realizó con el modelo Iber. Para ello, primero es necesario realizar un pre-proceso de datos, posteriormente se realizan los cálculos y finalmente se procesan los resultados.

Para ello, se hicieron tres consideraciones en la topografía con la finalidad de analizar la influencia de la zona urbana, estos son:

- 1.-El Modelo Digital del Terreno (MDT), no considera la traza urbana.
- 2.-El MDT, considera la traza urbana con una elevación $Z=10$ metros, en las manzanas.
- 3.-El MDT, considera la traza urbana a través de un H.U.S.T., en las manzanas.

El preproceso consistió en generar la geometría, discretizando la cuenca en cauce, superficies de aportación y áreas de influencia (Figura 28), con la finalidad de imponer coeficientes de fricción, lluvia, forma y tamaño de malla adecuada.

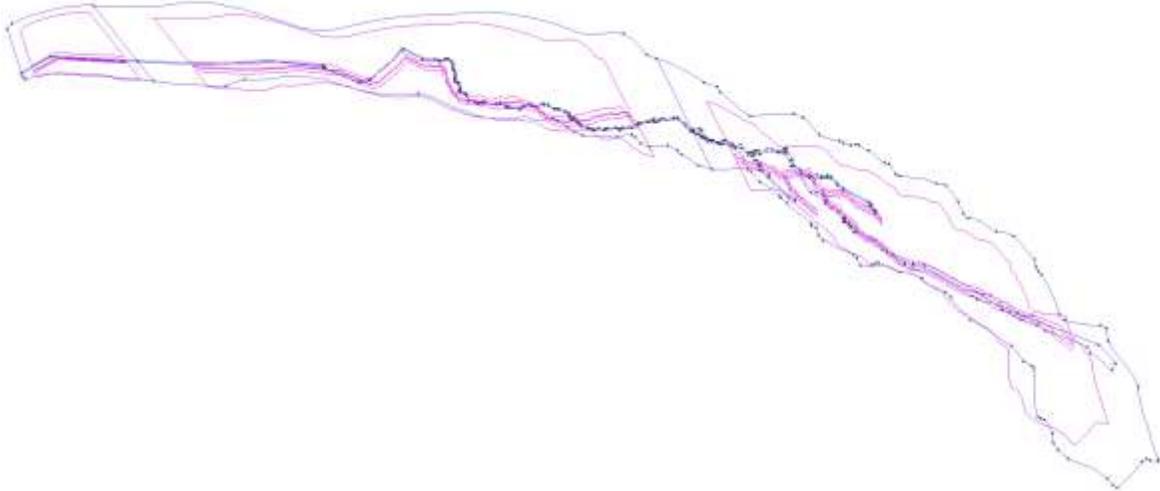


Figura 28. Geometría de la zona de estudio

Como condición inicial se impuso una lámina de agua de 1 mm, una condición de contorno tipo vertedor en el extremo aguas abajo y de entrada los hietogramas de intensidades (Figura 29). Además, en cada área de influencia se le asignó el número de escurrimiento (N) correspondiente con la finalidad de determinar la infiltración, mediante el método propuesto por el SCS (Figura 30).

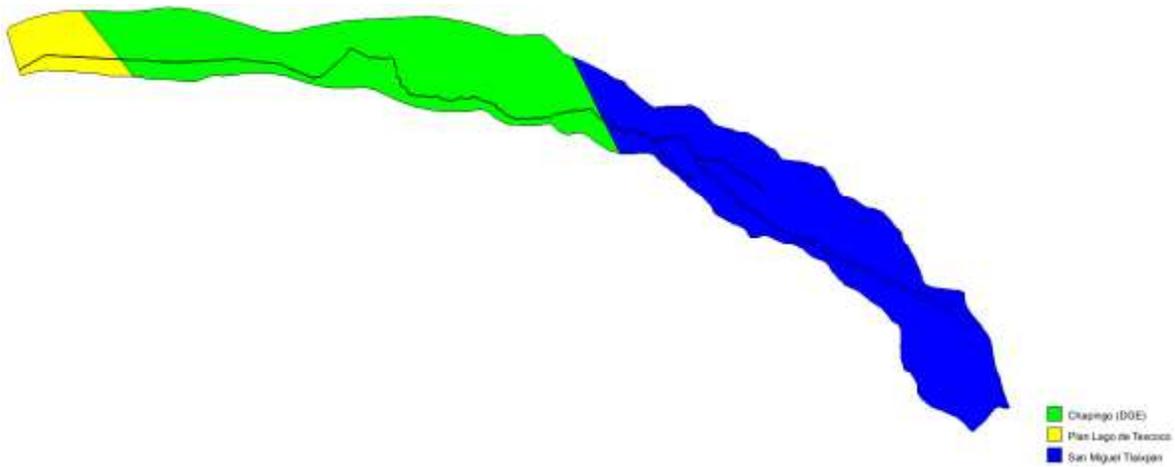


Figura 29. Hietograma de intensidades

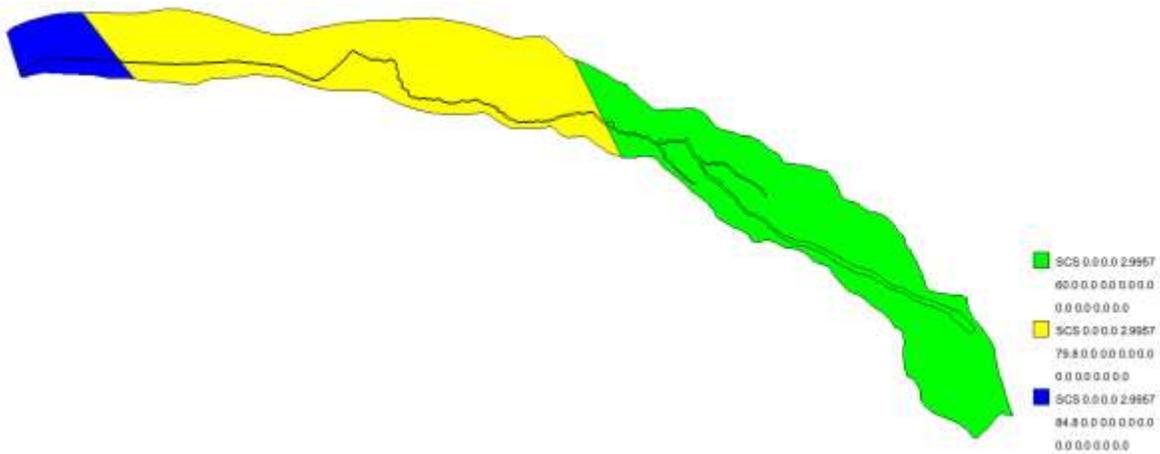


Figura 30. Número de curva

Para realizar los cálculos, la geometría se discretizó en una malla, para la opción 1 está formada por elementos con un tamaño en promedio de 5 m en el cauce y para el resto del dominio de 50 m (Figura 31). Para la opción 2, una malla de 5 m en el cauce, 5 m en la traza urbana y 50 m para el resto del dominio (Figura 32). Para la opción 3, una malla de 5 m en el cauce y 50 m para el resto del dominio (Figura 33). Resultado de ello, se obtuvo una malla de 155,990 elementos para la opción 1, 1'298, 931 elementos para la opción 2 y 183,331 elementos para la opción 3.

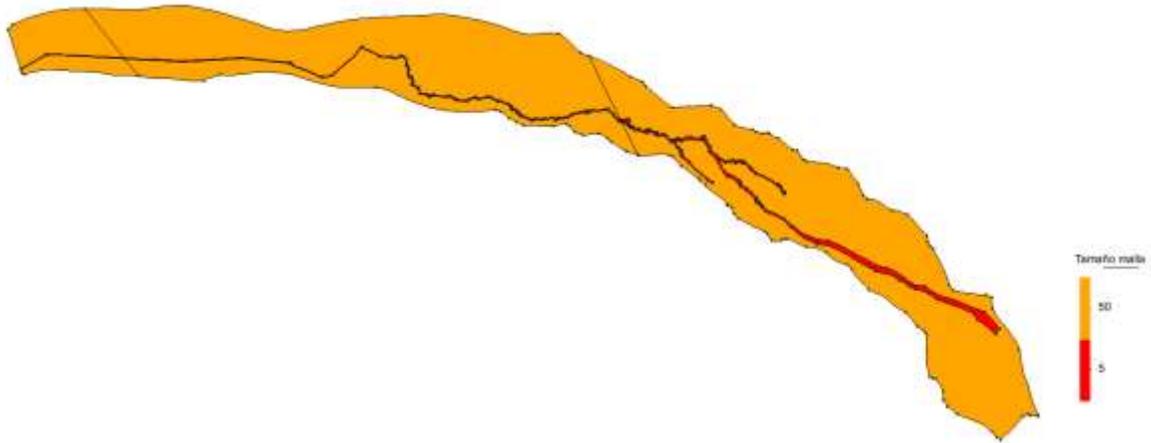


Figura 31. Mallado opción 1

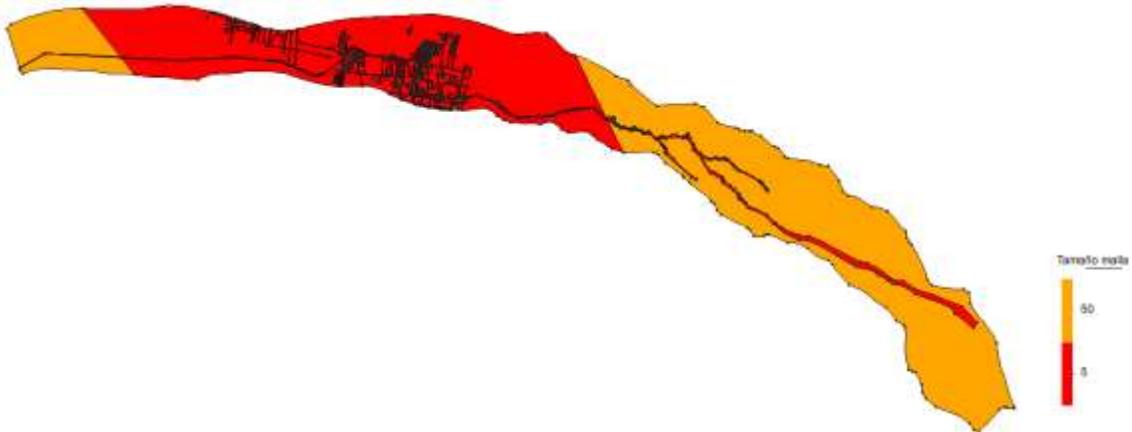


Figura 32. Mallado opción 2

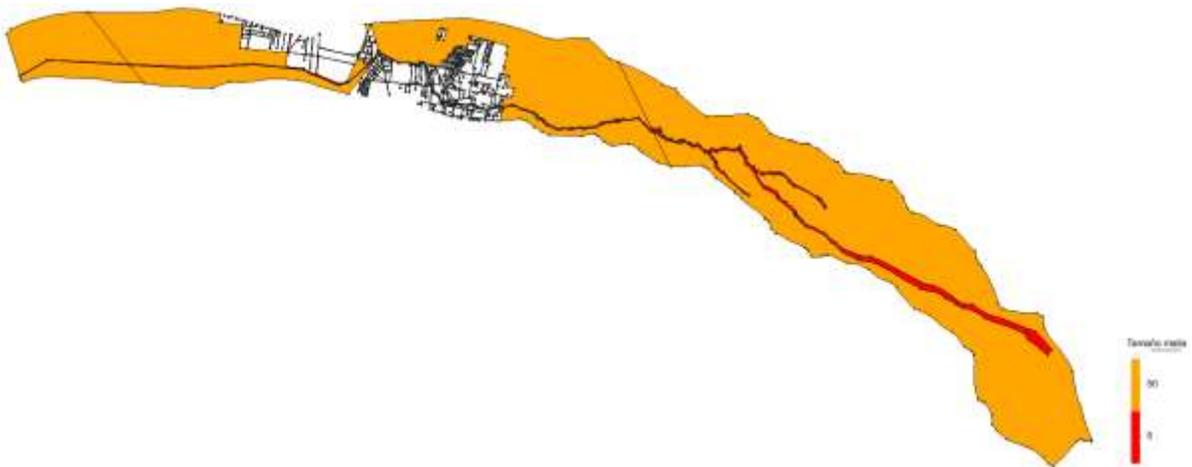


Figura 33. Mallado opción 3

Se asignó el coeficiente de fricción de Manning, en función del uso de suelo, para la zona de cauce un valor de 0.03, agricultura un valor de 0.05, pastizal un valor de 0.04 y urbano un valor de 0.08, (Figura 34).

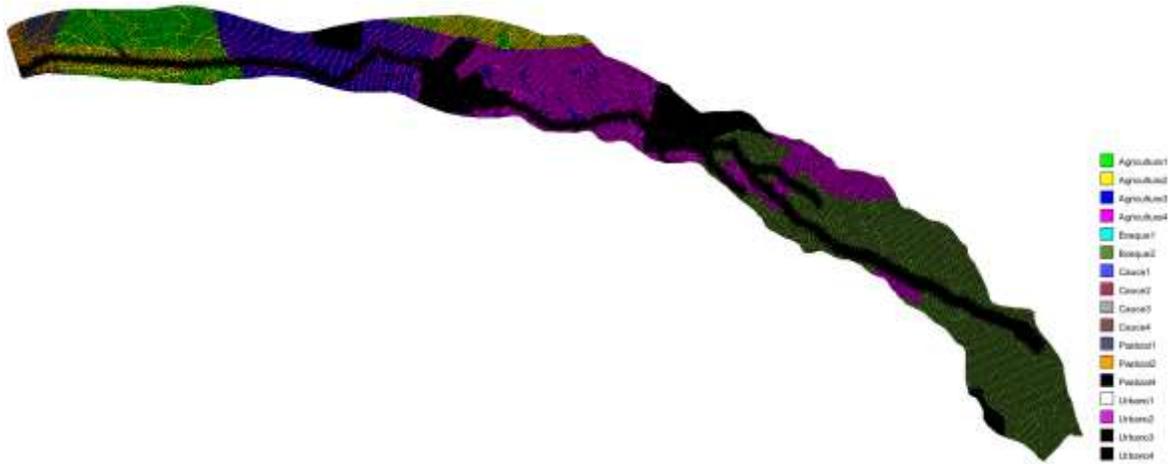


Figura 34. Coeficiente de fricción de Manning

Las Figura 35, Figura 36 y Figura 37, muestran una vista en perspectiva de los modelos digitales para cada opción.

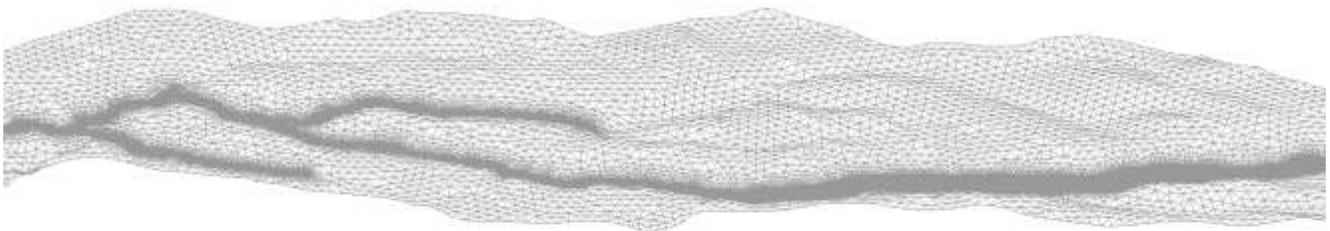


Figura 35. Topografía. Opción 1

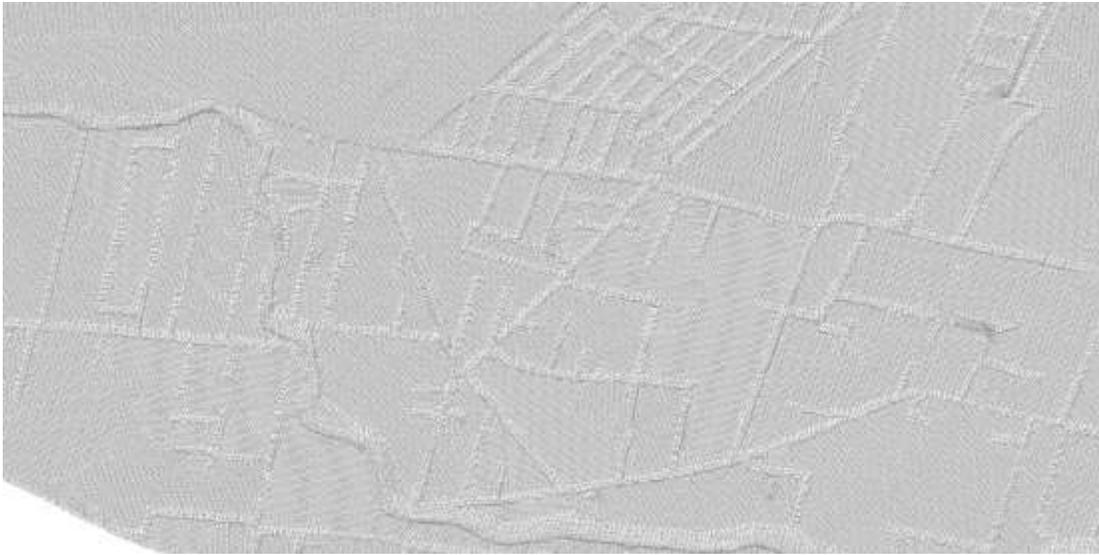


Figura 36. Topografía. Opción 2



Figura 37. Topografía. Opción 3

3.6 RESULTADOS

3.6.1 Comparación de gastos pico

Para hacer un buen uso del modelo implementado, primero se realizó un proceso de calibración a través de coeficientes de fricción de Manning y en cierta medida con el tamaño de celda. Por lo tanto para validar los resultados de la modelación hidrológica distribuida se determinaron los hidrogramas calculados para los diferentes periodos de retorno de la opción 1 (Figura 38), en la sección transversal donde se ubica la estación hidrométrica y se

compararon los gastos pico con los valores de gastos picos extrapolados de la estación hidrométrica, los resultados son satisfactorios.

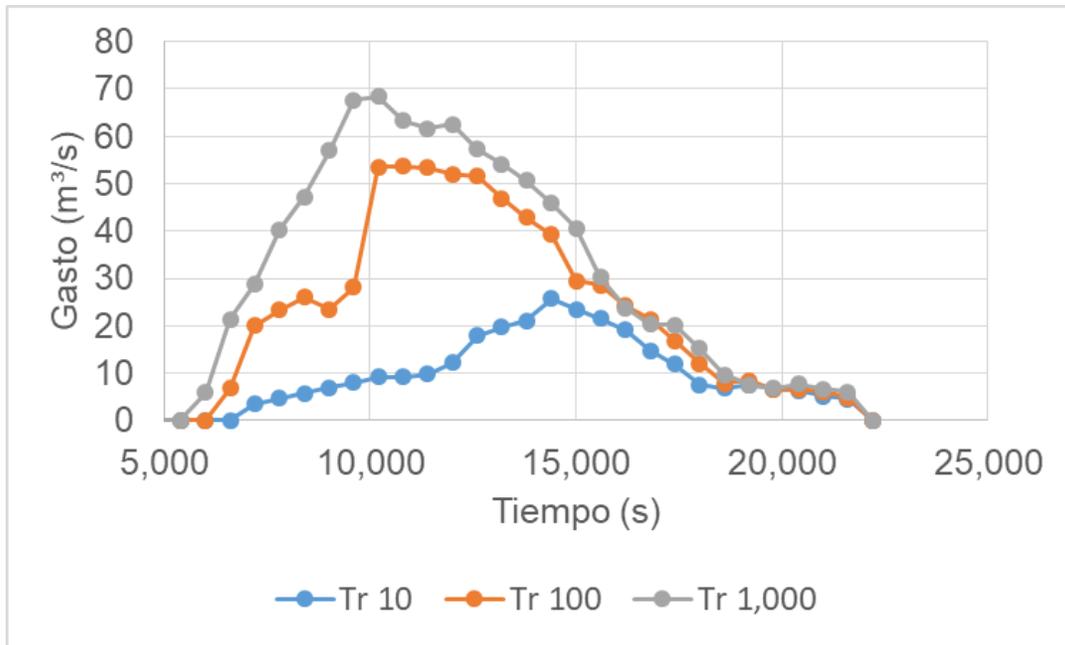


Figura 38. Hidrograma calculado. Opción 1 para distintos periodos de retorno

La Tabla 23, muestra la comparativa de los gastos del hidrograma del modelo contra los ajustados, se puede observar que para los periodos de retorno de 10 y 100 años, los gastos son muy similares, para el periodo de retorno de 1,000 años, existe una diferencia de 15.09 m³/s, equivalente a una diferencia de 18 %. Por lo tanto, se consideró que el modelo está calibrado.

Tabla 23 Comparación de gastos pico (m³/s)

	Tr 10	Tr 100	Tr 1,000
Gasto extrapolado	26.47	55	83.53
Gasto calculado	25.81	53.72	68.44

3.6.2 Mapa de inundaciones

Se analizaron los mapas de tirantes, velocidades y peligro por inundación para cada periodo de retorno, con la finalidad de ver el comportamiento del modelo en las distintas zonas de interés. Se analizaron tres opciones, la primera en condiciones naturales del terreno, la segunda con traza urbana asignándole una elevación promedio a las manzanas de 10 m, y la tercera asignando a cada lado de la manzana un hidrograma de escurrimiento directo producto de la lluvia que cae en las azoteas de las manzanas.

3.6.3 Mapas de profundidades y velocidades máximas

A continuación se describen los resultados para los diferentes periodos de retorno (10, 100 y 1,000 años) para la opción 1. Posteriormente con la finalidad de comparar las diferentes opciones (2 y 3), solamente se describen los resultados para el periodo de retorno de 1,000 años.

Opción 1. $T_r=10$ años

En la parte alta de la cuenca se presentan tirantes de hasta 1.71 m en el cauce, debido a la configuración topográfica del mismo, en el área de minas, se acumula el agua y tiene tirantes de hasta 0.7 m. No obstante el cauce logra contener el gasto del escurrimiento. En la parte media de la cuenca, existen zonas de inundación debido a que la zona es plana, por lo tanto donde se presentan desbordamientos sobre la margen derecha y tirantes de hasta 0.39 m. En el área urbana se presentan desbordamiento en ambas márgenes, pero con bajas profundidades de hasta 0.35 m, y algunos encharcamientos de hasta 0.16 m producto de la configuración del terreno (Figura 39).

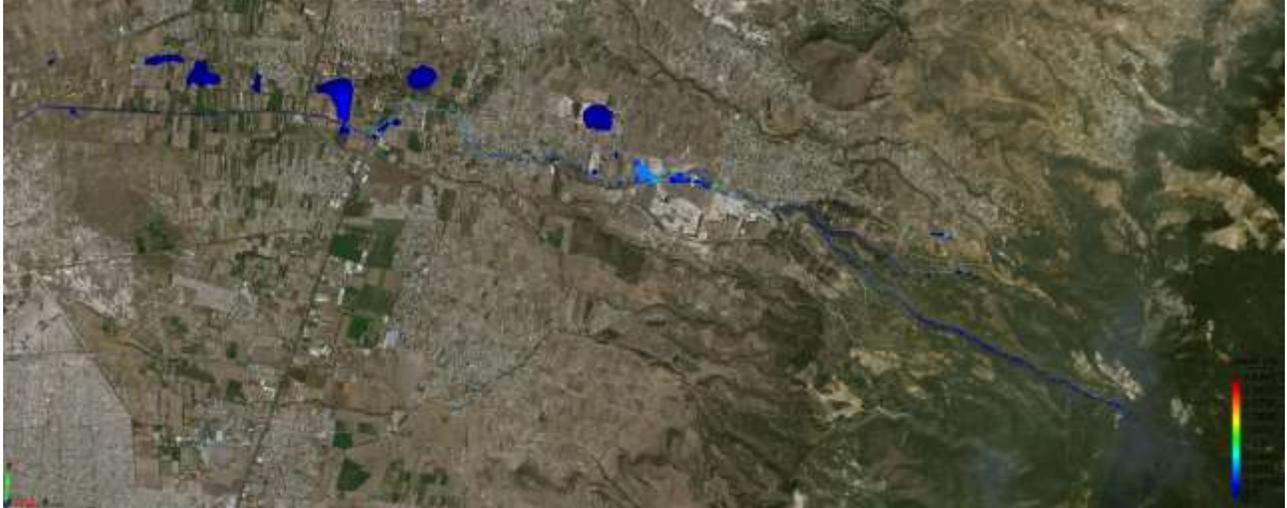


Figura 39. Tirantes máximos para $T_r=10$ años. Opción 1

En el mapa de velocidades, se puede destacar que en la parte alta de la cuenca las velocidades alcanzan 4.08 m/s, sobre el cauce. En la parte media de la cuenca de hasta 4.22 m/s en el cauce. Y en el área urbana se presentan tirantes de hasta 0.30 m (Figura 40).



Figura 40. Velocidades para $T_r=10$ años. Opción 1

Opción 1. $Tr=100$ años

Aguas arriba no hay problema de desbordamientos, se presentan tirantes de hasta 3.11 m sobre el cauce, en la cuenca media donde se encuentra las zonas de minas hay desbordamientos en ambas márgenes, con tirantes de hasta 1.10 m (Figura 41). En la parte del área urbana, se desborda en ambas márgenes muy similar al Tr 10, pero con tirantes de hasta 0.67 m, en el área de los cultivos se presentan inundaciones debido al mal drenaje de la cuenca, producto de una topografía plana, presentando tirantes de hasta 0.27 m.



Figura 41. Tirantes máximos para $Tr=100$ años. Opción 1

En el mapa de velocidades, se puede destacar que en la parte alta de la cuenca las velocidades llegan a presentar a 4.89 m/s, sobre el cauce. En la parte media de la cuenca en el área de minas hay inundaciones con tirantes de hasta 1.77 m/s. Y en la zona urbana se presentan velocidades de hasta 0.41 m/s en el área de inundación (Figura 42).



Figura 42. Velocidades para $Tr=100$ años. Opción 1

Opción 1. $Tr=1,000$ años

En la parte alta de la cuenca los desbordamientos no invaden la zona urbana, debido a que el cauce es lo suficientemente amplio como para contener el gasto (Figura 43), sin embargo, en el área de minas se presenta tirantes de hasta 2.02 m. En la zona urbana, se presentan tres desbordamientos, el primero por la margen izquierda con tirantes de hasta 0.65 m aproximadamente, el segundo por ambos márgenes con tirantes de hasta 0.42 m aproximadamente debido a que el área hidráulica es insuficiente, el tercer desbordamiento ocurre en ambas márgenes y presenta desbordamientos de hasta 0.91 metros. En la parte de cultivos existe desbordamientos por la margen derecha con tirantes de hasta 0.40 m.



Figura 43. Tirantes máximos para $Tr=100$ años. Opción 1

En el mapa de velocidades se puede destacar que en la parte alta de la cuenca las velocidades alcanzan 8.56 m/s, sobre el cauce. En la parte media de la cuenca en el área de minas se presentan velocidades de hasta 1.56 m/s. Y en el área urbana hay velocidades de hasta 0.85 m/s (Figura 44).



Figura 44. Velocidades para $Tr=1,000$. Opción 1

Opción 2. $Tr=1,000$ años

Se observaron tirantes de hasta 1.92 m y velocidades de hasta 0.92 m/s en la zona urbana. La configuración de la zona de inundación fue distinta a la Opción 1, debido a que las manzanas obstaculizan el movimiento del flujo y el agua tiene que encontrar salida por las calles, (Figura 45 y Figura 46).



Figura 45. Tirantes máximos para $Tr=1,000$ años. Opción 2



Figura 46. Velocidades para $Tr=1,000$ años. Opción 2

Opción 3. $Tr=1,000$ años

Se observaron tirantes de hasta 3.56 m y velocidades de hasta 1.35 m/s en la zona urbana. La configuración de la zona de inundación fue distinta a la opción 1, no obstante es similar a la opción 2, sin embargo presenta mayores tirantes debido al gasto que ingresa de las azoteas de las manzanas, (Figura 47 y Figura 48).



Figura 47. Tirantes máximos para $Tr=1,000$ años opción 3



Figura 48. Velocidades para $Tr=1,000$ años opción 3

3.6.4 Mapas de peligro por inundación

El criterio de peligro por inundación incluido en Iber fue propuesto por la Agencia Catalana del Agua (ACA). De forma general, se presentó peligro elevado en los cauces y áreas de desbordamientos (color rojo; $v_y > 1.25$), peligro medio en calles (color verde y amarillo; $0.28 \leq v_y \leq 1.25$) y peligro nulo en áreas de planicie (color azul; $v_y < 0.25$). Los resultados se muestran en las (Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52 y Figura 53).



Figura 49. Peligro por inundación para $Tr=10$ años. Opción 1



Figura 50. Peligro por inundación para $Tr=100$ años. Opción 1

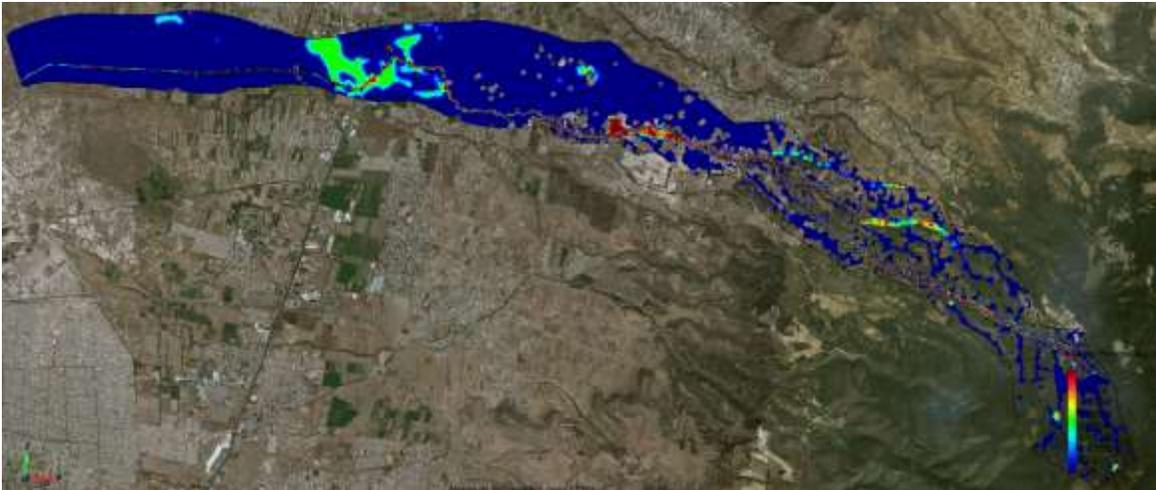


Figura 51. Peligro por inundación para $T_r=1,000$ años. Opción 1

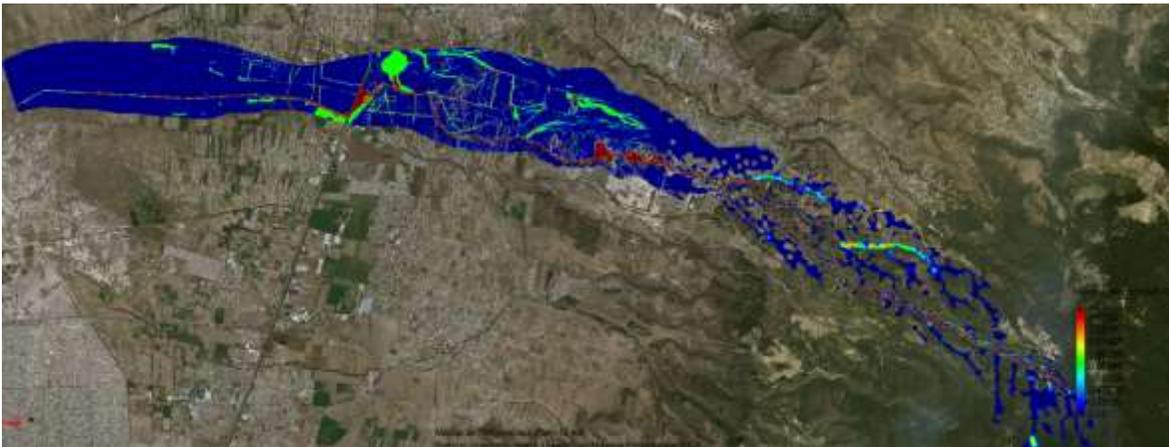


Figura 52. Peligro por inundación para $T_r=1,000$ años. Opción 2



Figura 53. Peligro por inundación para $T_r=1,000$ años. Opción 3

3.6.5 Comparación de resultados

Los hidrogramas calculados para los periodos de retorno de 1,000 años de cada opción se compararon entre sí (Figura 54 y Tabla 24). Los tres son muy similares, la diferencia entre la Opción 2 y 3 con respecto a la opción 1 son 12 % y 17 % respectivamente.

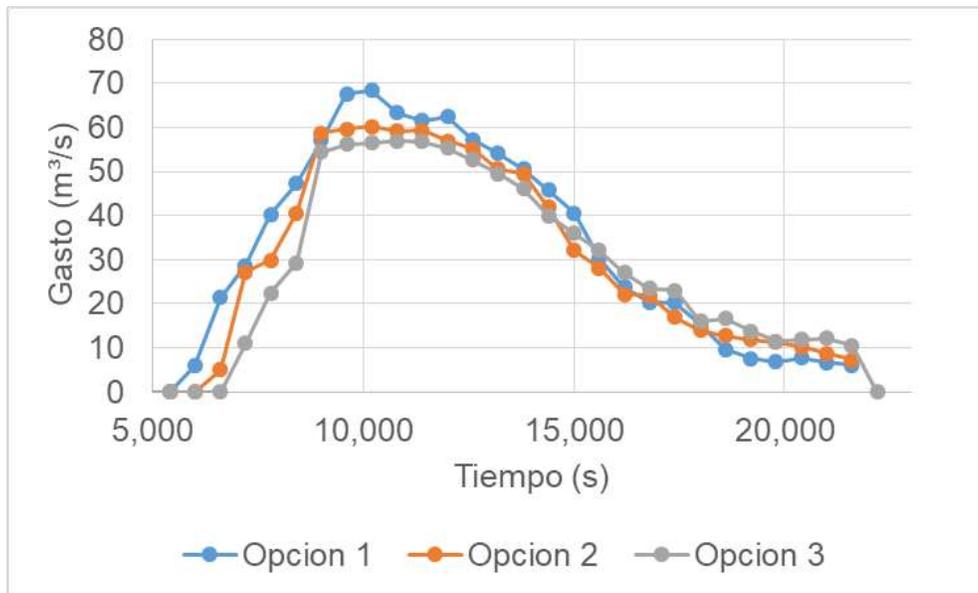


Figura 54. Comparación de hidrogramas. $T_r=1,000$ años

Tabla 24 Comparación de hidrogramas de salidas para el T_r 1,000 de las tres opciones

Opción	Gasto (m^3/s)
1	68.44
2	60.28
3	56.97

Además los tiempos de cálculo de la computadora para cada opción son (Tabla 25):

Tabla 25 Tiempo de simulación

Opción	Tiempo (Hrs.)
1	4.5
2	30
3	13.5

4 CONCLUSIONES

Mediante este estudio de modelación hidrológica distribuida en cuencas urbanas, se analizaron tres opciones:

- 1.-Condiciones naturales
- 2.-Con traza urbana, elevando la altura de las manzanas 10 metros
- 3.-Con traza urbana, agregando hidrogramas a las manzanas

Con la Opción 1, se calibró el modelo con la rugosidad, mallados, al comparar los gastos ajustados a una función de distribución de probabilidad contra los gastos picos de los hidrogramas donde se encuentra la estación hidrométrica Chapingo; los resultados obtenidos son muy similares para periodos de retorno de 10 y 100 años, el periodo de retorno de 1,000 años, existe una diferencia de 18 %, la cual se puede considerar aceptable.

Al analizar las zonas de inundación se puede observar que para el periodo de retorno de 1,000 años, el área hidráulica resulta insuficiente por lo que llega a desbordarse el río Chapingo en ambas márgenes, presentándose tirantes de hasta 0.91 m y velocidades de hasta 0.85 m/s.

En la Opción 2 para un periodo de retorno de 1,000 años, se observa que en las calles se llegan a presentar tirantes de hasta 1.92 m y velocidades de hasta 0.92 m/s.

En la Opción 3 para un periodo de retorno de 1,000 años, en las calles se presentaron tirantes de hasta 3.56 m y velocidades de hasta 1.35 m/s.

Al comparar los mapas de peligro de las tres opciones, la Opción 3 presenta más áreas con un peligro moderado en la zona urbana, por lo que resulta indispensable crear infraestructura

hidráulica que proteja a la población, además de un sistema que desaloje el agua, para evitar pérdidas humanas y económicas.

Además se compararon los gastos picos de los hidrogramas en donde se encuentra la hidrométrica, con lo cual se puede ver que son similares, y existe una diferencia de la Opción 2 y 3, de 12 % y 17 % respecto a la Opción 1. Esto se debe a que al existir los obstáculos como lo son las manzanas muy cerca de los cauces, cambian la dirección del flujo provocando que cambien las velocidades y por ende los gastos.

Al comparar los hidrogramas de la Opción 2 y 3, la diferencia entre ellos es de 5 %, debido a que la contemplación de la traza urbana resultan ser las condiciones similares para ambos modelos.

Una de las ventajas de usar un modelo hidrológico distribuido es que evalúa la respuesta de las subcuencas del área de estudio, con lo que se puede obtener resultados en cualquier punto de la misma. Al hacer más fina la malla se obtiene mejores resultados sin embargo, el tiempo de simulación aumentan de horas a días, por lo que se necesitan procesadores rápidos.

El proceso de calibración resulta tardado ya que influyen los parámetros del tamaño de malla y los coeficientes de rugosidad para obtenerlo. Sin embargo un modelo bidimensional resulta ideal para simular zonas de inundación ya que contempla el flujo en dos dimensiones, por lo que un unidimensional tendría problemas.

Bibliografía

- [1] La Jornada, 2011. [En línea]. Available: <http://www.jornada.unam.mx/2011/07/27/estados/035n2est>. [Último acceso: 24 04 2018].
- [2] USGS, «Servicio Geológico de Estados Unidos de América,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.usgs.gov/>. [Último acceso: 24 04 2018].
- [3] F. J. Aparicio, «Fundamentos de Hidrología de Superficie,» Mexico, Limusa, 2006, p. 237.
- [4] CONAGUA, «Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS),» 13 Julio 2007. [En línea]. Available: <ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/planos>. [Último acceso: 24 04 2018].
- [5] V. T. Chow, Fundamentos de Hidrología, EUA: MacGrawHill, 1964.
- [6] V. M. Ponce, Engineering hydrology. Principles and Practices, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989.
- [7] M. L. Orduña, «Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas,» Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid , E. T.S. I. Caminos , Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- [8] R. J. C. Bunash, «The NWS river forecast system – Catchment modeling. En V.P. Singh Computers Models Waterhed Hydrology Water Resource Publication, Highlands Ranch,» 1995.
- [9] L. Garnote y R. . L. Bras, «A distributed model for a real-tme forescasting using digital,» *Journal of Hydrology*, pp. 279-306, 1995.
- [10] Beven, K. J. Lamb, P. Quinn, R. Romanowicz y J. Freer, «TOPMODEL. En V. P. Singh: Computers Models of watershed Hydrology Water Resource Publications,» *Highlands Ranch*, pp. 219-23, 1995.
- [11] DHI, «Software “Mike SHE User Guide” y “Mike SHE Reference Manual”,» 2003.
- [12] Iberaula, 9 Enero 2018. [En línea]. Available: <http://iberaula.es/web/index.php>. [Último acceso: 24 04 2018].
- [13] E. Bladé, L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, M. Vázquez-Cendón, J. Dolz y A. Coll, «Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, p. 1-10, 2014.
- [14] J. F. Gómez, J. Aparicio y C. Patiño, «Manual de análisis de frecuencias en hidrología,» Progreso, Jiutepec, Morelos, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2010, pp. 36-97.
- [15] D. . F. Campos, «Introducción a la Hidrología Urbana,» San Luis Potosí, campos_aranda@hotmail.com, 2010, pp. 61-63.
- [16] A. F. Breña Puyol y M. A. Jacobo Villa, *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*, Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2006.

- [17] V. Mockus, Use of storm and watershed characteristics in syntetic unit hidrograph analysis and application, U.S. Soil Conservation Service, 1957.
- [18] D. F. Campos, «Procesos del Ciclo Hidrológico,» Segunda Reinpresión ed., San Luis Potosi, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1992, pp. 2-5.
- [19] CENAPRED, «Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos,» CENAPRED, Ed., Ciudad de México, 2004, p. 25.
- [20] CONAGUA, «Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México,» Ciudad de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012, p. 227.
- [21] CONAGUA, «Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS),» 22 Abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>. [Último acceso: 24 04 2018].