



SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES

Determinación de cuencas de respuesta rápida, con base en el estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas

Ángel Bautista Tadeo

Dirección de Investigación

Subdirección de Riesgos por Inundación



CONTENIDO

Contenido	2
Listado de figuras.....	3
Listado de Tablas	5
CAPÍTULO 1. Introducción.....	6
1.1 Generalidades.....	6
CAPÍTULO 2. Objetivo.....	7
CAPÍTULO 3. Insumos hidrológicos a partir del proyecto de avenidas máximas	8
3.1 Productos del proyecto para regionalizar avenidas máximas	11
3.1.1 Isoyetas	12
3.1.2 Funciones para la estimación de gatos máximo por periodo de retorno Tr	15
3.2 Selección de zonas expuestas a inundaciones súbitas	18
3.2.1 Clasificación de las inundaciones.....	18
3.2.2 Selección de cuencas de respuesta rápida.....	18
CAPÍTULO 4. Análisis de avenidas en cauces urbanos.....	21
4.1 Casos de estudio.....	21
4.1.1 Huixtla	21
4.1.2 Tecate	38
CAPÍTULO 5. Conclusiones.....	52
CAPÍTULO 6. Bibliografía	54



Listado de figuras

Figura 3.1.- Sistema de de información y visualización de estaciones climatológicas automáticas, fuente SMN.....	8
Figura 3.2.-Disponibilidad y ubicación de estaciones climatológicas operadas por SMN. (fuente: CONAGUA, 2018).....	9
Figura 3.3.- Ubicación de las estaciones hidrométricas del BANDAS de la CONAGUA. (fuente CONABIO, 2016).....	10
Figura 3.4.-Regiones de precipitación homogénea en México obtenidas en el estudio de Avenidas Máximas. (Domínguez et al, 20017)	11
Figura 3.5.-Distribución de las medias de las precipitaciones máximas anuales. (fuente: Domínguez et al ,20017)	12
Figura 3.6.-Isoyetas del promedio de las precipitaciones diarias máximas (fuente: Domínguez et al ,2017)	13
Figura 3.7.-Altura de precipitación máxima diaria, asociada a un periodo de retorno de 100 años. (fuente Domínguez et al, 20017)	13
Figura 3.8.-Isoyetas y delimitación de regiones homogéneas de lluvia en el ANR.....	14
Figura 3.9.- Estaciones hidrométricas, con sus correspondientes cuencas hidrográficas analizadas dentro del proyecto de Avenidas Máximas.....	15
Figura 3.10.- Características de las cuencas regionales del proyecto de Avenidas máximas.....	16
Figura 3.11.- Vista en el ANR, de la información disponible para las estaciones hidrométricas analizadas en el proyecto de Avenidas Máximas.....	17
Figura 3.12.- Cuenca del río Huixtla y visualización de sus parámetros en Atlas Nacional de Riesgos.....	19
<i>Figura 3.13.- Cuenca regional a la que pertenece la zona urbana de Tecate.....</i>	<i>20</i>
Figura 4.1.-Ubicación de la zona Urbana de Huixtla respecto a su cuenca de escurrimientos.....	22
Figura 4.2.-Isoyetas y superficies de precipitación para los periodos de retorno en análisis.	23
Figura 4.3.-Procesamiento del MDE para obtener subcuencas de escurrimiento en la cuenca del río Huixtla	24



Figura 4.4.-a) Uso de suelo y vegetación; b) Tipo de suelo (Edafología); c) Número de curva	25
Figura 4.5.-Interfaz del software Hec-HMS, con los elementos del proyecto para la cuenca del río Huixtla	26
Figura 4.6.-Resultados del modelado hidrológico para un periodo de retorno de 5 años.....	26
Figura 4.7.- Áreas determinadas para la modelación hidráulica del río Huixtla.....	27
Figura 4.8.- Hidrogramas por periodo de retorno obtenidos por medio del software Hec-HMS.	28
Figura 4.9.- Cobertura del modelo digital de terreno en la subcuenca a analizar.....	29
Figura 4.10.-Vista de los bordes de protección en el río Huixtla, en MDE.	29
Figura 4.11.- Profundidades en el río Huixtla asociadas a un Tr de 5 años.	30
Figura 4.12.- Profundidades en el río Huixtla asociadas a un Tr de 10 años	31
Figura 4.13.- Profundidades en el río Huixtla asociadas a un Tr de 20 años	31
Figura 4.14.- Profundidades en el río Huixtla asociadas a un Tr de 50 años.....	32
Figura 4.15.- Ubicación de los puntos de control sobre el río Huixtla.	33
Figura 4.16.- Higromas para la comparación del tiempo pico para Tr 5.	33
Figura 4.17.- Higromas para la comparación del tiempo pico para Tr 10.	35
Figura 4.18.-Higromas para la comparación del tiempo pico para Tr 20.	36
Figura 4.19.-Higromas para la comparación del tiempo pico para Tr 50.....	37
Figura 4.20.- Mapa de las regiones hidrológicas Administrativas de la CONAGUA, donde se resaltan de la 1-3, península de Baja California (fuente: Domínguez et al, 2017).....	38
Figura 4.21.-Características de la cuenca regional a la que pertenece la zona urbana de Tecate.....	39
Figura 4.22.- Cuenca que contiene a la ciudad de Tecate, junto con sus áreas de influencia.	40
Figura 4.23.- Error porcentual entre los gastos calculados y medidos con el modelo 2; (Domínguez et al, 2017).....	41
Figura 4.24.-Error porcentual entre los gastos calculados y medidos con el modelo 19; (Domínguez et al, 2017).....	41



Figura 4.25.- Hidrogramas para la cuenca 1.....	43
Figura 4.26.- Hidrogramas para la cuenca 2.....	43
Figura 4.27.-Modelo digital de elevaciones sobre el cual se realizó la modelación hidráulica.	44
Figura 4.28.-Profundidades en el río Tecate asociadas a un Tr 5.	45
Figura 4.29.- Profundidades en el río Tecate asociadas a un Tr 10.....	45
Figura 4.30.-Profundidades en el río Tecate asociadas a un Tr 20.	46
Figura 4.31.-Profundidades en el río Tecate asociadas a un Tr 50.....	46
Figura 4.32.-Imagen de la ubicación de los puntos de análisis a lo largo del cauce.	47
Figura 4.33.- Hidrogramas de los puntos de análisis en el río Tecate para el Tr 5.	48
Figura 4.34.- Hidrogramas de los puntos de análisis en el río Tecate para el Tr 10....	49
Figura 4.35.- Hidrogramas de los puntos de análisis en el río Tecate para el Tr 20. ..	50
Figura 4.36.- Hidrogramas de los puntos de análisis en el río Tecate para el Tr 50.	51

Listado de Tablas

Tabla 4-1.- Tiempos de arribo o picos presentados para el Tr 5 años.....	34
Tabla 4-2.-Tiempos de arribo o picos presentados para el Tr 10 años.....	35
Tabla 4-3.-Tiempos de arribo o picos presentados para el Tr 20 años.	36
Tabla 4-4.-Tiempos de arribo o picos presentados para el Tr 50 años.....	37
Tabla 4-5.- Gastos y características de las cuencas para la elaboración de hidrogramas.	42
Tabla 4-6.- Tiempos de arribo en los puntos de análisis Tr 5.....	48
Tabla 4-7.- Tiempos de arribo en los puntos de análisis Tr 10.....	49
Tabla 4-8.- Tiempos de arribo en los puntos de análisis Tr 20.....	50
Tabla 4-9.- Tiempos de arribo en los puntos de análisis Tr 50.....	51



CAPÍTULO 1. Introducción

El presente trabajo contiene el análisis de cuencas, con ríos que, en relación con su área de aportación y tiempo de concentración, se puede considerar que presentan avenidas súbitas o de respuesta rápida; el estudio de dichas cuencas permite la prevención y oportuna acción en puntos de interés o comunidades donde la ocurrencia de un evento de precipitación que produzca escurrimientos, genere afectaciones o pérdidas como, económicas, ambientales, entre otras.

El trabajo utiliza los productos obtenidos en el *Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República Mexicana* (Domínguez **et al**, 2017), el cual ayuda a la simplificación de los análisis hidrológicos necesarios para el estudio de crecientes en ríos, así pues, el presente documento es un ejemplo que muestra las múltiples maneras de aprovechar los resultados de dicho proyecto.

Se describe el desarrollo de las actividades para el análisis de la creciente de dos ríos en eventos asociados a probabilidades de excedencia (periodos de retorno), considerados de respuesta rápida en dos asentamientos urbanos de diferentes regiones del país, uno en Chiapas y otro en Baja California.

1.1 Generalidades

La presencia de eventos de precipitación que generan escenarios de inundación es cada vez más frecuente, el porqué del aumento de dicha ocurrencia, no será tema de estudio por esta ocasión; se trabajó con el tránsito o evolución de los volúmenes de agua en los ríos, buscando conocer los tiempos en los que el gasto máximo llega a ciertos puntos de interés en todo el cauce.

Primero, se realizó la transformación de las alturas de precipitación, su ocurrencia y posterior escurrimiento, principalmente con los tiempos en que el gasto o volumen máximo de escurrimiento tarda en llegar desde su origen, a partir de un escenario de lluvia, los modelos de transformación de lluvia en escurrimiento, es un tema ampliamente estudiado, que según las deducciones pueden ser de parámetros concentrados o distribuidos; los primeros simplifican las características físicas tales como, área, pendiente, dirección de flujo, coeficientes de infiltración entre otros; los segundos son capaces de representar dichas medidas en alguna unidad de superficie irregular (cuencas o subcuencas) o regulares(celdas) que representan la zona de estudio.

Otra manera de análisis fue por medio de ecuaciones regionales, que mediante el gasto medio en una región homogénea de escurrimientos y las características fisiográficas de las subcuencas o regiones de estudio, se pueden obtener gastos para diversos periodos de retorno, lo cual simplifica el trabajo, primero por la búsqueda de información hidrométrica y su procesamiento o de la transformación



de alturas precipitación, asociadas a probabilidades de excedencia y su transformación en escurrimiento directo.

CAPÍTULO 2. Objetivo

El objetivo principal es establecer un procedimiento base para obtener tiempos de respuesta clave, ante una inundación súbita, provocada por la avenida rápida de un cauce, y por un evento de precipitación determinada. En el presente trabajo se utilizaron periodos de retorno de precipitación y caudal, esto no es limitante para el análisis. No obstante, es importante mencionar que el interés principal es contar con un esquema que permita identificar puntos estratégicos durante un evento hidrológico, ya no a partir de un análisis estadístico tradicional, sino mediante registros en tiempo real de lluvia, gasto y niveles en ríos, pronósticos meteorológicos, imágenes de radar y las múltiples herramientas que se tiene día con día.

Otra intención es ejemplificar de manera rápida y breve, una forma de utilizar las ecuaciones regionales para la obtención de gastos por periodo de retorno, a partir de las características fisiográficas de las cuencas y las isoyetas obtenidas a través de la regionalización hidrológica. Esto como base para la elaboración del tránsito hidráulico de un río en una zona urbana y su posterior análisis de tiempos de arribo, que permitan plantear los tiempos de evacuación óptimos para sitios con peligro de inundación en zonas urbanas.

CAPÍTULO 3. Insumos hidrológicos a partir del proyecto de avenidas máximas

La mayoría de modelos lluvia-escurrimiento han sido construidos en función de la calidad, cantidad y disponibilidad de la información, de ahí la variación en complejidad de las metodologías y de su aplicación. Las variables hidrológicas de mayor utilización y, por ende, las más medidas son: la precipitación, ya sea como intensidad o altura y los gastos medios, máximos o instantáneos, éstos son utilizados como insumos para el cálculo de tránsitos de ríos, presas, canales y cualquier tipo de obra que tenga un peso importante en los escurrimientos producidos por un evento hidrológico.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), administra una red de estaciones climatológicas tradicionales en las que no solo mide la precipitación diaria, también monitorea temperatura y otras variables climatológicas de interés. Esta red no es la única ya que el SMN y otros organismos cuentan con redes de monitoreo con estaciones de medición automáticas o semiautomáticas, capaces de registrar datos con un intervalo de tiempo menor, como la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Secretaría de Marina (SEMAR), la red del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitaria (PEMBU), entre otras.



Figura 3.1.- Sistema de información y visualización de estaciones climatológicas automáticas, fuente SMN.

Sin embargo, siguen siendo de vital importancia las estaciones climatológicas tradicionales, por su largo periodo de registro, y a que pueden ser empatadas mediante un análisis espacial con la base de datos de escurrimientos del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) de la CONAGUA, el cual es obtenido mediante las estaciones hidrométricas en ríos y presas de toda la República Mexicana.

Cuando una cuenca o zona de estudio posee el equipo de medición mencionado (estaciones climatológicas e hidrométricas), el trabajo siguiente es revisar, seleccionar y dar el tratamiento adecuado para el análisis en cuestión. Por lo anterior, contar con toda la información es un trabajo difícil y largo, ya que se complica cuando se carece de datos necesarios, ya sea por cantidad de estaciones, ubicación, periodo de registro e incluso la calidad de los mismos. Es por ello, que existen estudios que agrupan cuencas o zonas en función de las características estadísticas de sus registros de precipitación o escurrimiento en regiones homogéneas, lo cual permite obtener información de éstas a pesar de la falta de medición de alturas de precipitación o de gastos producto de escurrimientos.

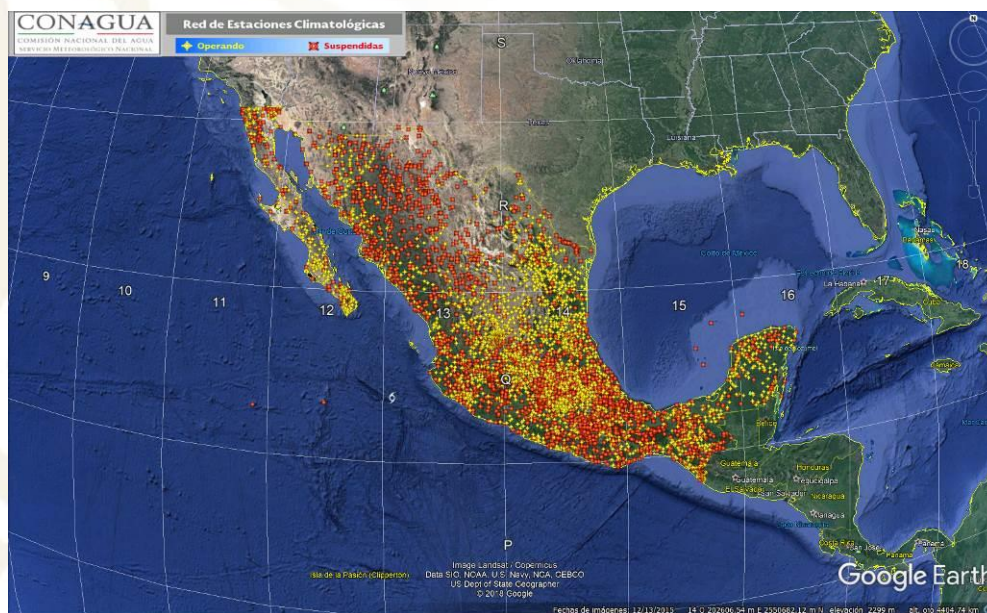


Figura 3.2.-Disponibilidad y ubicación de estaciones climatológicas operadas por SMN. (Fuente: CONAGUA, 2018)

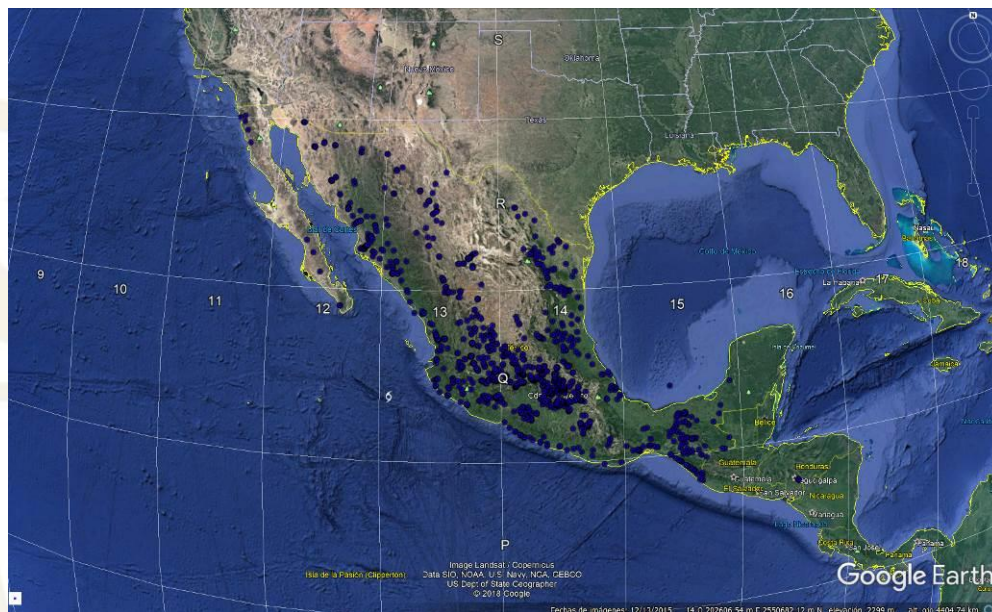


Figura 3.3.- Ubicación de las estaciones hidrométricas del BANDAS de la CONAGUA. (Fuente CONABIO, 2016)

Es por eso que algunos investigadores han dedicado sus esfuerzos, para desarrollar técnicas mediante las cuales se puedan obtener variables hidrológicas, en áreas donde no existe medición o la información es deficiente, a partir del monitoreo existe en zonas cercanas, y determinar la correlación de características fisiográficas o estadísticas, con ello se definen regiones homogéneas de escurrimiento y precipitación.

3.1 Productos del proyecto para regionalizar avenidas máximas

Para la regionalización de caudales o precipitaciones se utilizaron los datos de las estaciones climatológicas o hidrométricas, en el país, que se consideran con la calidad o cantidad suficiente, los cuales se modulan de manera estadística, para poder ser ajustados en conjunto a una función de probabilidad, con el fin de obtener los periodos de retorno de interés.

Con base en el Estudio Para Regionalizar los Gastos Generados por Avenidas Máximas (EPRGGAV) o estudio de Avenidas Máximas de aquí en adelante, en su capítulo dedicado a las lluvias se revisó un total de 5,492 estaciones de la base de datos del CLICOM (Climate Computing), operadas por el CICESE al 2016 y modificadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, de las cuales se ocuparon 2,381 para el análisis, que tuvieran como condición al menos veinte años de registros, las cuales se depuraron a partir de sus parámetros estadísticos individuales y se verificaron los datos que parecieran extraños.

Las regiones homogéneas se forman a partir de las precipitaciones máximas anuales y sus correspondientes coeficientes de variación, las cuales se verifican mediante pruebas estadísticas como la de Fisher. Dichas regiones permiten contar con mejores ajustes para funciones de probabilidad más robustas y confiables, en comparación con las obtenidas solo con los datos de una estación.

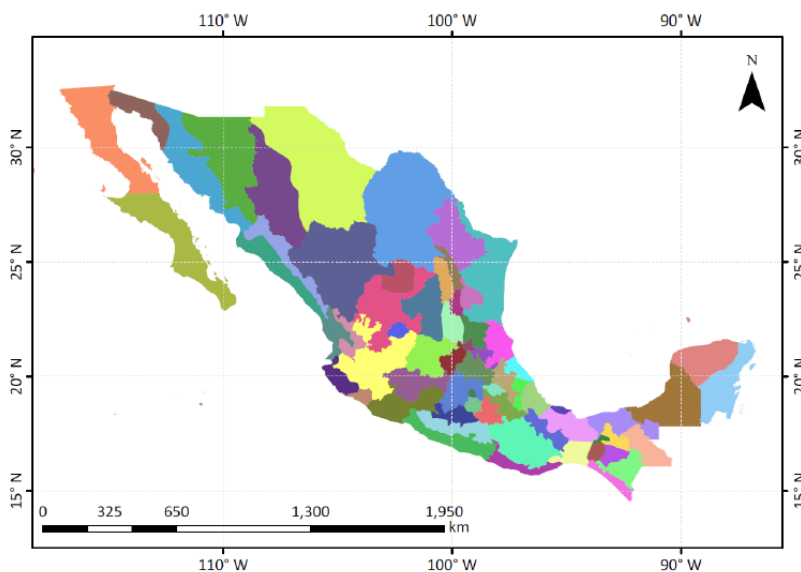


Figura 3.4.-Regiones de precipitación homogénea en México obtenidas en el estudio de Avenidas Máximas. (Domínguez et al, 2017)

En cada una de las 66 regiones se obtuvieron funciones de probabilidad por medio de los ajustes de las muestras extendidas e identificadas para cada zona, el estudio solo toma en cuenta las funciones Gumbel y doble Gumbel, de valores extremos, que se ajustan bastante bien a las precipitaciones medidas en México, finalmente con éstos se obtienen factores en cada región, para la estimación de lluvia por periodo de retorno.

3.1.1 Isoyetas

Las líneas de igual precipitación se construyen a partir de las medias en toda la superficie nacional. Se obtiene por medio de una metodología que otorga un valor de precipitación entre los valores puntuales de las estaciones, y se le da mayor peso a las cifras que se encuentre a menor distancia de los datos medidos. Con esta superficie resultan las curvas de igual altura de precipitación en México, figura 3.7.

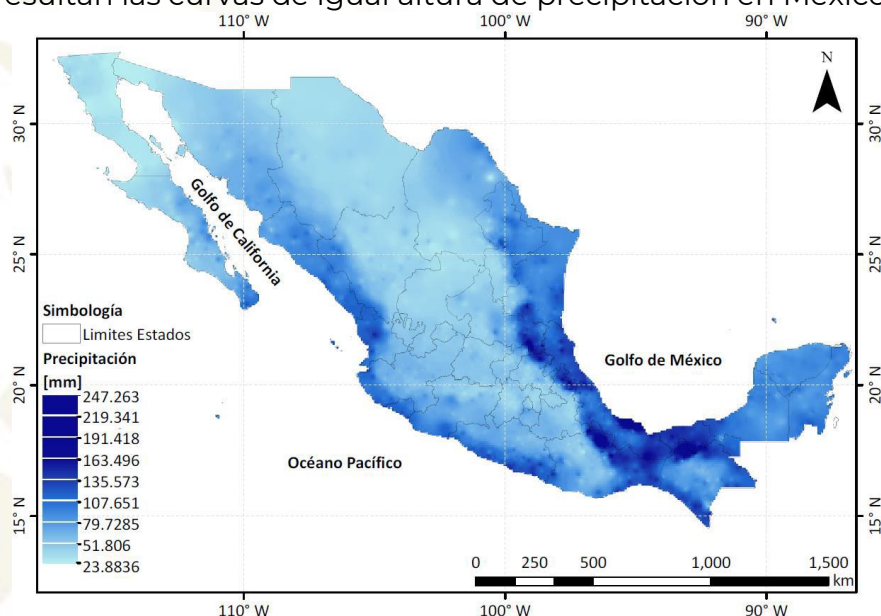


Figura 3.5.-Distribución de las medias de las precipitaciones máximas anuales.
(Fuente: Domínguez et al ,2017)

Con la distribución de las medias de las precipitaciones máximas anuales y los factores obtenidos, para cada región y por periodo de retorno, se pueden calcular tanto las curvas como las superficies de lluvia en cualquiera estado o sitio de interés, en la República Mexicana, por ejemplo, en la figura 3.7 se muestran las alturas de precipitación para un periodo de retorno de 100 en años en todo el país

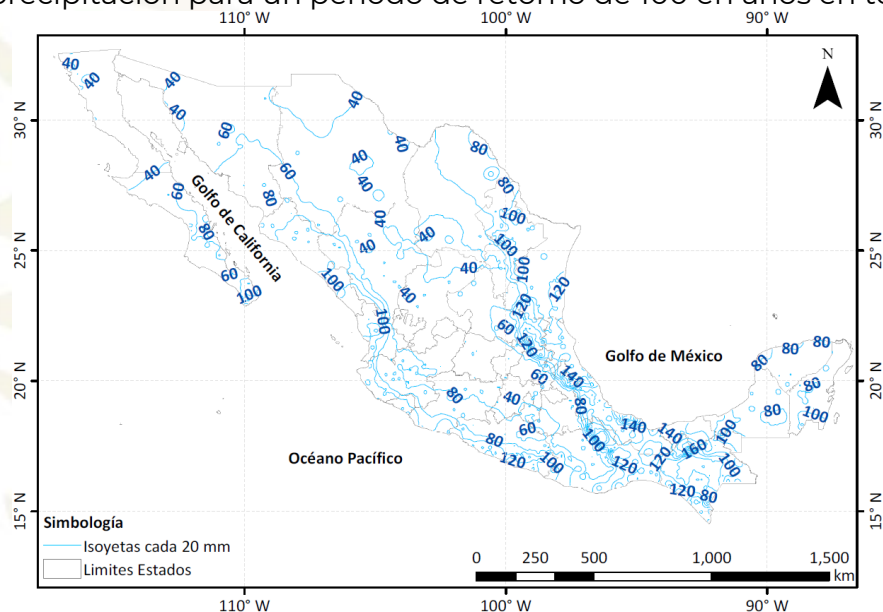


Figura 3.6.-Isoyetas del promedio de las precipitaciones diarias máximas (Fuente: Domínguez et al, 2017)

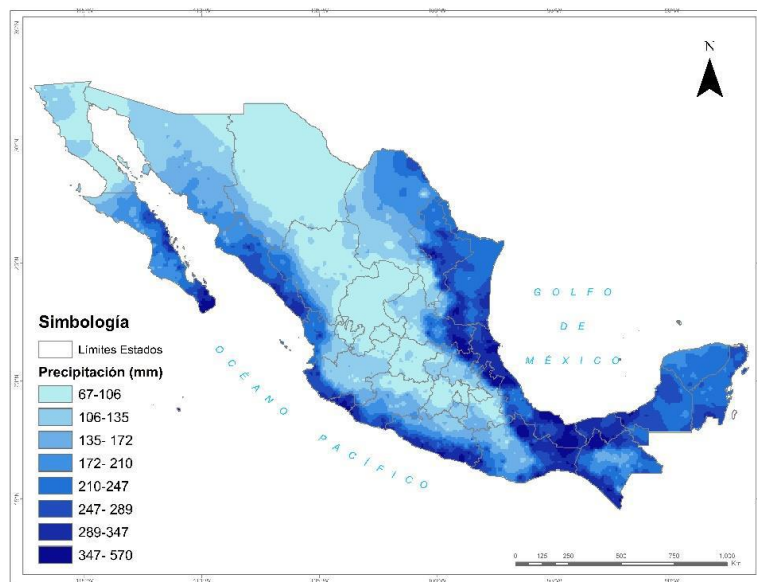


Figura 3.7.-Altura de precipitación máxima diaria, asociada a un periodo de retorno de 100 años. (Fuente Domínguez et al, 2017)

Los resultados de dicho proyecto fueron publicados a manera de isoyetas en el ANR, para distintos los periodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años, con duraciones de un día y 24 horas, es importante referir que dichas isolíneas fueron construidas con las muestras normalizadas y depuradas de registros aceptables en cuanto a calidad y extensión, añadiendo la información más reciente, en la figura 3.8 se observa la interfaz del Atlas.



Figura 3.8.-Isoyetas y delimitación de regiones homogéneas de lluvia en el ANR.

3.1.2 Funciones para la estimación de gastos máximos por periodo de retorno T_r

Como se mencionó con anterioridad, la medición e información climatológica es insuficiente para las condiciones hídricas del país, pero en una situación inferior se encuentra el monitoreo de caudales en los escurrimientos de México, ya sea por el descuido de las estaciones de medición, por falta de mantenimiento o ausencia de éstas, debido a lo costoso que resultan. Esto a pesar de la gran utilidad e importancia de la hidrometría en el diseño y operación de obras de aprovechamiento y protección. Sin embargo, se han desarrollado modelos de regionalización que permiten obtener registros amplios y confiables en sitios con poca o nula medición en ríos.

La regionalización de gastos en ríos es similar a la de precipitaciones, se agrupan los datos de sitios que posean estadísticas similares, reciben un tratamiento, y después se ajustan a funciones de distribución de probabilidad; en el estudio de Avenidas Máximas, en particular se analizan las medias de los gastos máximos anuales, obteniendo como resultado expresiones que permiten estimar gastos asociado a diversos periodos de retorno en función de algunas características fisiográficas de cuencas regionales, en los sitios donde existe medición de caudales. Del mismo trabajo surgen factores que multiplicados por la media del gasto máximo anual, resultan los gastos de la extrapolación de las series probabilistas de tiempo para cada estación hidrométrica.



Figura 3.9.- Estaciones hidrométricas, con sus correspondientes cuencas hidrográficas analizadas dentro del proyecto de Avenidas Máximas.

La figura 3.9, se presentan las cuencas con estaciones hidrométricas, con las cuales se realizó una regionalización, y se pueden consultar algunas características fisiográficas de las cuencas, los factores para estimación de gastos por periodo de retorno e información de la región homogénea de escurrimientos, y conocer la región hidrográfica que se desea trabajar, el estudio de *Avenidas Máximas* en su apartado número tres, denominado, *Estimación regional de la función de distribución de probabilidades de los gastos máximos anuales*, muestra el procedimiento y resultado de la búsqueda de las expresiones matemáticas lineales o potenciales y de las características fisiográficas que mejor representan un conjunto de datos regionales.

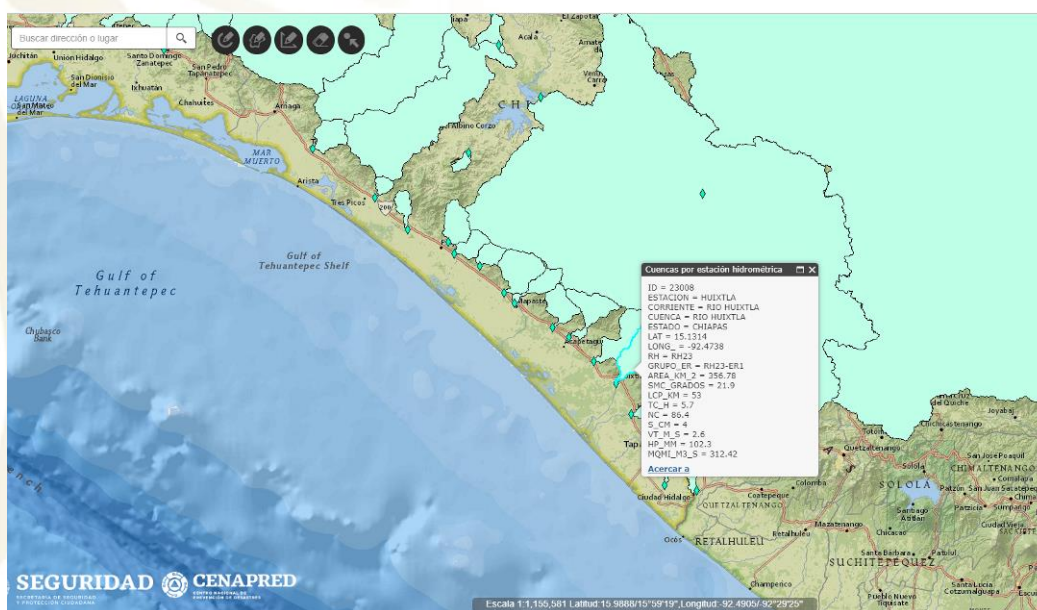


Figura 3.10.- Características de las cuencas regionales del proyecto de Avenidas máximas.

Las figuras 3.10 y 3.11 muestran la información disponible y descargable del conjunto de datos de las estaciones hidrométricas y cuencas regionales.

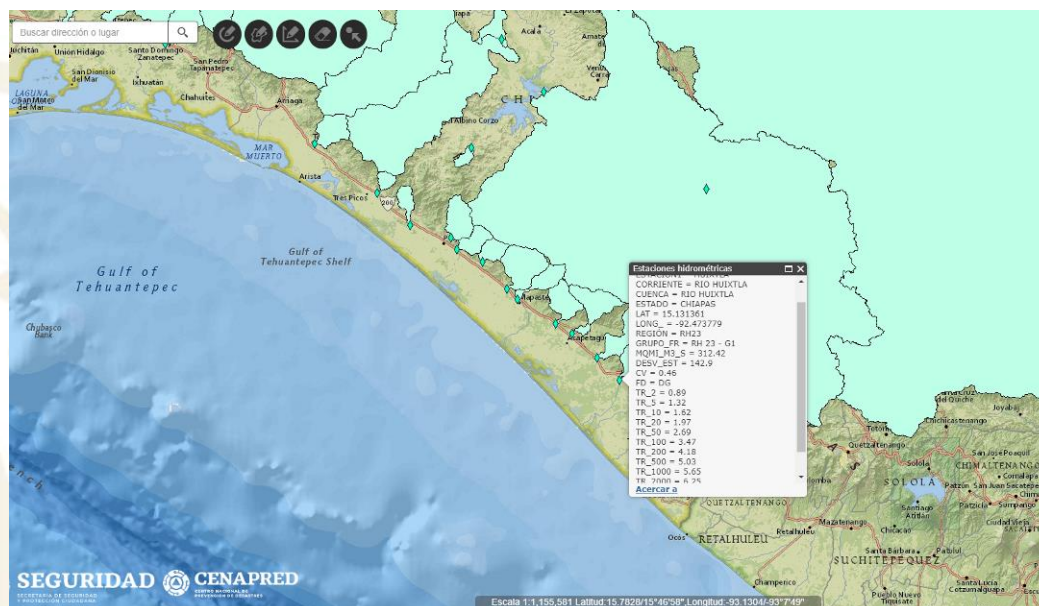


Figura 3.11.- Vista en el ANR, de la información disponible para las estaciones hidrométricas analizadas en el proyecto de Avenidas Máximas.

Es importante resaltar el gran valor y utilidad de los resultados obtenidos, ya que con éstos se simplifica y depura la información hídrica existente en México, lo que facilita el trabajo de cualquier estudio hidrológico, como ya se ha comentado son de vital importancia en el diseño de obras hidráulicas, operación de las mismas, planeación urbana y para el estudio, prevención y diseño de obras de mitigación contra inundaciones. Una virtud que se irá perdiendo posteriormente es la vigencia y extensión de la base de datos utilizada, algunas de éstas hasta 2016 o 2017, es por eso que se requiere continuar con la medición y verificación de las variables hídricas en las cuencas de la República Mexicana, y con ello actualizar y afinar los modelos de regionalización como el que se muestra en este documento.



3.2 Selección de zonas expuestas a inundaciones súbitas

3.2.1 Clasificación de las inundaciones

En su fascículo dedicado a las inundaciones, el CENAPRED identifica a éstas según su origen y tiempo de respuesta de la cuenca, la clasificación hidrológica está en función del tiempo de concentración y las cuencas pueden ser de respuesta rápida o lenta. Las inundaciones de respuesta rápida son también llamadas inundaciones súbitas y suelen provocar grandes afectaciones debido al poco tiempo de reacción que permiten.

En México no existe una clasificación única, en la que se puedan identificar las cuencas o sitios que son propensos a inundaciones súbitas, algunos autores mantienen como parámetro de identificación el tiempo de concentración en un valor no mayor a cuatro horas, recordando el concepto de éste, como el lapso temporal que inicia desde que precipita una gota de lluvia hasta su salida en la cuenca, éste será tomado como primer criterio para la selección de los casos de estudio, para los que se realizó un análisis para identificar los tiempos en qué se desarrolla la avenida súbita, esencialmente se le llama tiempo de arribo.

3.2.2 Selección de cuencas de respuesta rápida

La identificación de las cuencas como avenidas súbitas se puede realizar en una primera instancia a partir de las cotas del terreno, visibles en imágenes satelitales, o modelos digitales de elevación, aunque si se cuenta con el último se obtienen las pendientes en la cuenca o área de análisis, para estos casos se consideran los escurrimientos de características rápidas, si existen terrenos escarpados o con cambios bruscos de pendientes.

Un parámetro bastante común en los estudios hidrológicos es el tiempo de concentración, que como ya se mencionó ayuda a relacionar el inicio de eventos de lluvia con su escurrimiento. En la *Guía Básica para la Elaboración de atlas Estatales y Municipios de Peligros y riesgos* (2006), se indica que, para valores menores a cuatro horas, las avenidas presentadas pueden considerarse como súbitas, las cuales suelen ser las más destructivas y catastróficas, debido a que no permiten mayor rango de acción o alertamiento.

Para los casos de estudio se realizó una revisión de las cuencas del estudio de Avenidas Máximas, por su ubicación y tiempo de concentración, en relación con su área de escurrimiento, se considera como de escurrimiento veloz

Una de las ciudades seleccionadas fue Huixtla, en Chiapas, debido a su ubicación geográfica cuenta con cambios bruscos de pendiente, comenzando en tierras altas y terminando en una zona de planicie, posee una estación dentro del análisis de regionalización; su tiempo de concentración es de cerca de seis horas, pero al contar con un área de 356 km², es lo bastante grande como para considerarla como de respuesta rápida. En la figura 3.12 se muestra la cuenca del río que pasa por la ciudad, ambos con el mismo nombre.

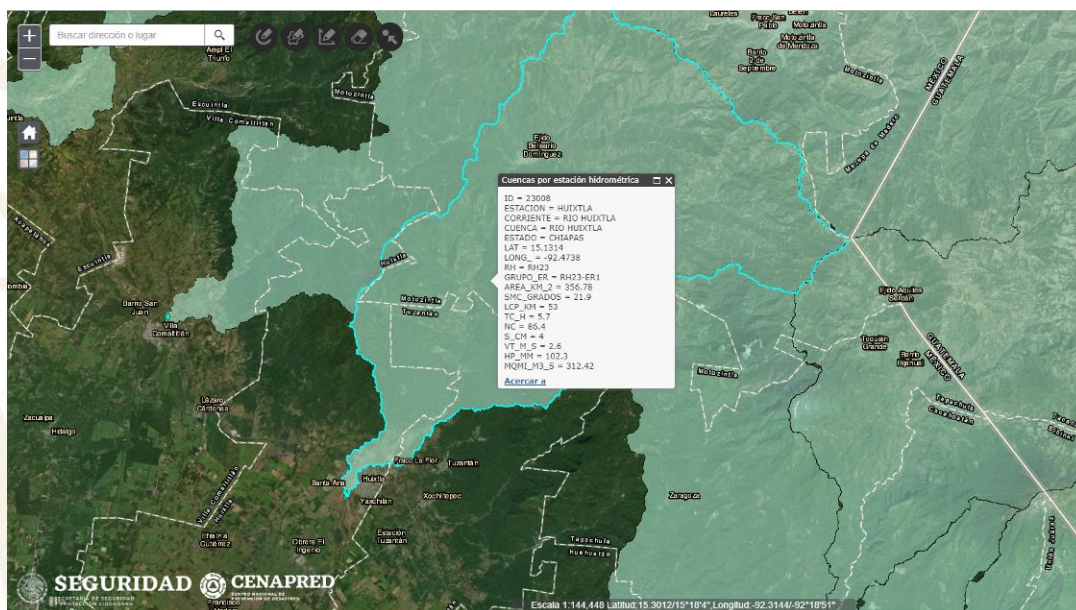


Figura 3.12.- Cuenca del río Huixtla y visualización de sus parámetros en Atlas Nacional de Riesgos.

Dentro de la búsqueda de ciudades con probabilidad a presentar avenidas súbitas, se seleccionó la ciudad de Tecate en Baja California, inmersa entre montañas con grandes cambios de pendientes, y en una cuenca regional de 1344 km². En el análisis de la ciudad solo se obtendrán los parámetros fisiográficos, para la cuenca de influencia del cauce que cruza dicha zona urbana. En la figura 3.13 se observa la ubicación de la ciudad de Tecate dentro de la región homogénea de escurrimientos que también abarca territorio de los Estados Unidos Americanos de Norteamérica.



Figura 3.13.- Cuenca regional a la que pertenece la zona urbana de Tecate.

La utilización de los insumos del proyecto de Avenidas Máximas ayudaron a ejemplificar en el siguiente capítulo, la diferencia de ubicación geográfica de las dos ciudades seleccionadas permite ver la valía y simplicidad de los productos descritos para la elaboración de análisis hidrológicos.



CAPÍTULO 4. Análisis de avenidas en cauces urbanos

Se aplicaron de diferentes manera los resultados obtenidos a través de la regionalización de datos de lluvia y escurrimiento como insumos, para el análisis de las avenidas súbitas como generadores de inundaciones, enfocándose en el tiempo de arribo del caudal máximo a las zonas urbanas o puntos de control, este lapso de tiempo asociado a los volúmenes de escurrimiento, permitieron establecer el tiempo en que podrán operar obras hidráulicas, emitir acciones de alertamiento o de evacuación.

Se trabajó con dos ciudades, una fue Huixtla, en Chiapas, seleccionada porque se encuentra en el inicio de una planicie, en la transición del río de montaña hacia su descarga en el mar, por lo que las precipitaciones se reflejan en poco tiempo como escurrimientos. La otra es Tecate en Baja California, inmersa en una cuenca con escurrimientos provenientes de zonas montañosas con influencia de escurrimientos provenientes de los Estados Unidos de Norteamérica.

4.1 Casos de estudio

4.1.1 Huixtla

La ciudad de Huixtla se encuentra prácticamente a la salida de la cuenca regional, por lo que no es posible utilizar los factores de escurrimiento para la obtención de los caudales en el río por periodo de retorno, debido a que esta área de escurrimiento carece de influencia de otras, se realizó un análisis hidrológico por medio de isoyetas y se obtuvieron los volúmenes de escurrimiento por subcuencas, así pues, se analizó la zona urbana por completo. La figura 4.1 muestra la ubicación de Huixtla en la cuenca de escurrimientos del río homónimo, se observa como ésta termina justo en la ciudad, teniendo la estación hidrométrica como salida, por lo que los datos de escurrimiento regional, para esta cuenca en específico no son útiles en el análisis, ya que comienzan fuera de la zona de interés.

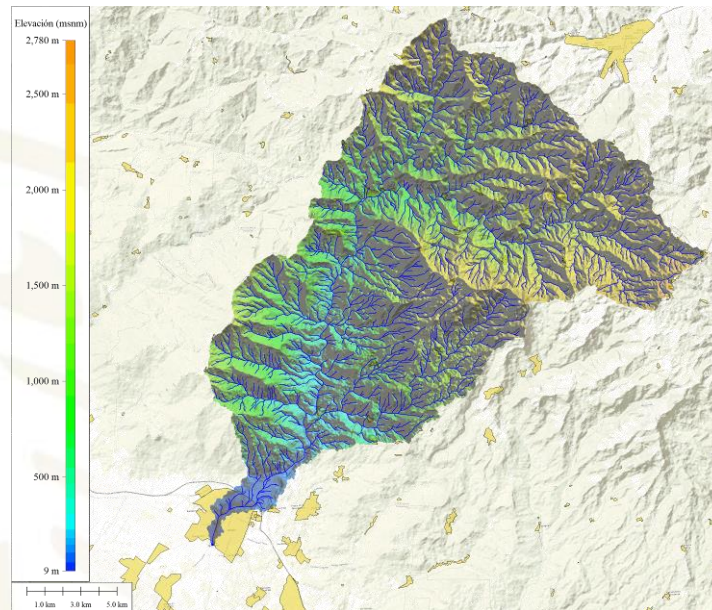


Figura 4.1.-Ubicación de la zona urbana de Huixtla respecto a su cuenca de escurrimientos (Fuente: elaboración propia)

Los periodos de retorno (Tr 's) seleccionados para el análisis fueron 5, 10, 20 y 50 años, ya que se considera que éstos con sus respectivas probabilidades de excedencia y volúmenes pueden generar afectaciones con mayor recurrencia, que valores de escurrimiento o precipitación asociados a Tr 's más grandes, aunque estos últimos pueden representar eventos extraordinarios como el impacto de un ciclón tropical o el desfogue o falla de alguna obra hidráulica, como presas o bordos de protección. La figura 4.2 muestra las isoyetas y la superficie vectorial obtenida de éstas para los periodos de retorno mencionados y área de la cuenca.

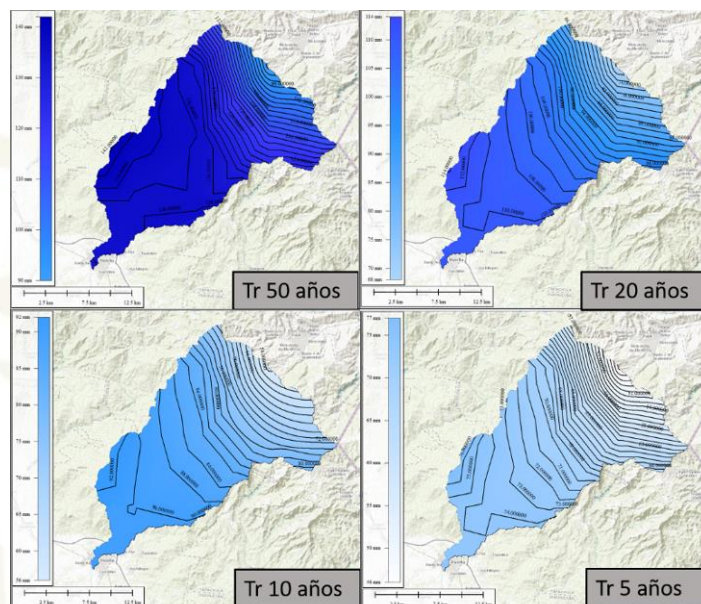


Figura 4.2.-Isoyetas y superficies de precipitación para los periodos de retorno en análisis.

La transformación de lluvia a escurrimiento se hace a partir de las isoyetas, con base en herramientas informáticas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las aplicaciones HEC-HMS y HEC-GeoHMS desarrollados por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de Norteamérica, US Army Corps of Engineers, mediante la utilización de ArcMap y el acoplamiento al mismo de HEC-GeoHMS. Se procedió a la obtención de subcuencas y escurrimientos dentro de la cuenca de Huixtla, a partir del modelo digital de elevaciones (MDE) del INEGI, con resolución de 15 metros, dado que para la escala del área de la cuenca y el tipo de análisis no es necesario contar con un MDE más refinado, la figura 4.3 muestra algunas fases por las que pasa el procesamiento del modelo de elevaciones para la obtención de los escurrimientos por subcuenca, algunas de éstas son las direcciones y acumulación del flujo y pendientes.

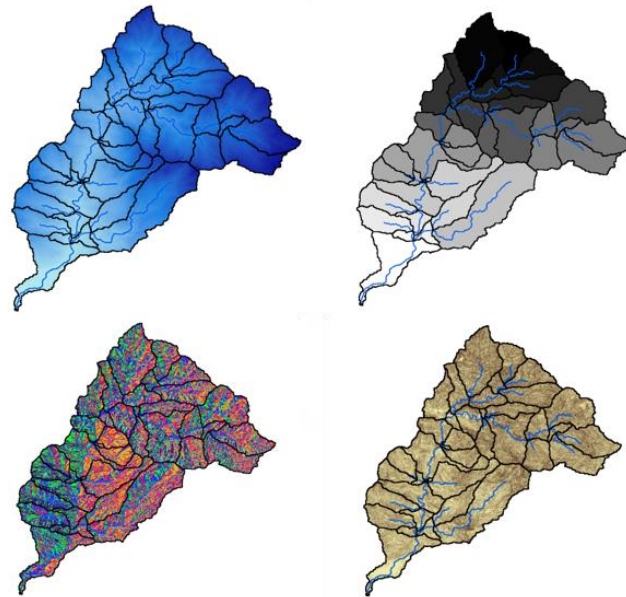


Figura 4.3.-Procesamiento del MDE para obtener subcuencas de escurrimiento en la cuenca del río Huixtla

Dentro del mismo proyecto de ArcMap se generaron, bases de datos con las características fisiográficas necesarias para la elaboración del modelo lluvia-escurrimiento. Además, se configuró de manera geoespacial el proyecto para la obtención de hidrogramas en el modelo HEC-HMS. Parte importante de esta información y, en general, de los análisis hidrológicos es la verificación de la lluvia efectiva, es decir, el agua que escurrirá directamente por el terreno o cauces, por esto se revisaron las condiciones de uso de suelo y vegetación, en conjunto con los tipos de suelo contenidos dentro del área de estudio, el cruce de los datos permitió estimar el porcentaje de lluvia que se infiltra o no genera escurrimiento.

Un método muy utilizado y aceptado, por sus resultados para conocer el porcentaje del volumen de lluvia que se vuelve escurrimiento, es el conocido como *Número de Curva*, desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), que con base en el estado hidrológico del suelo, condiciones de uso, naturaleza y pendientes, permite conocer la relación de la precipitación con sus pérdidas, dato fundamental para la elaboración de hidrogramas en el río, éstos se obtendrán por medio de la metodología subsecuente del SCS. La figura 4.4 contiene la información de uso de suelo y vegetación, tipos de suelo y número de curva.

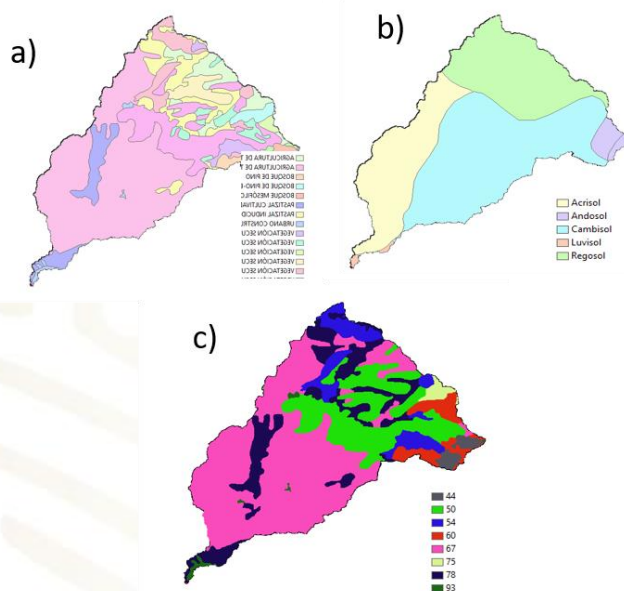


Figura 4.4.-a) Uso de suelo y vegetación; b) Tipo de suelo (Edafología); c) Número de curva

Una vez compilados los insumos necesarios, se exporta el proyecto de ArcMap a Hec-HMS, para la conversión de altura de precipitación en volumen de escurrimiento, mediante el método del hidrograma unitario del SCS, uno de los varios con los que cuenta dicho software, éste se seleccionó por ser congruente con el modelo de pérdidas utilizado, además es de las metodologías más aprobadas. La figura 4.5 muestra la interfaz en el modelo, del proyecto de la cuenca Huixtla en la cual se observan los elementos utilizados, como son las subcuencas y sus respectivas conexiones, cauces, y las características necesarias para la obtención de los hidrogramas, tales como el área y número de curva para las subcuencas y pendiente, longitud e interconexiones para los ríos.

Estos análisis resultan útiles ya que se pueden obtener los hidrogramas, para cada una de las áreas que componen la cuenca, así se analizó cualquier punto que se encuentra dentro de ella. Por lo anterior, se obtuvo un hidrograma de entrada al río en una subcuenca antes de que éste atravesara la ciudad.

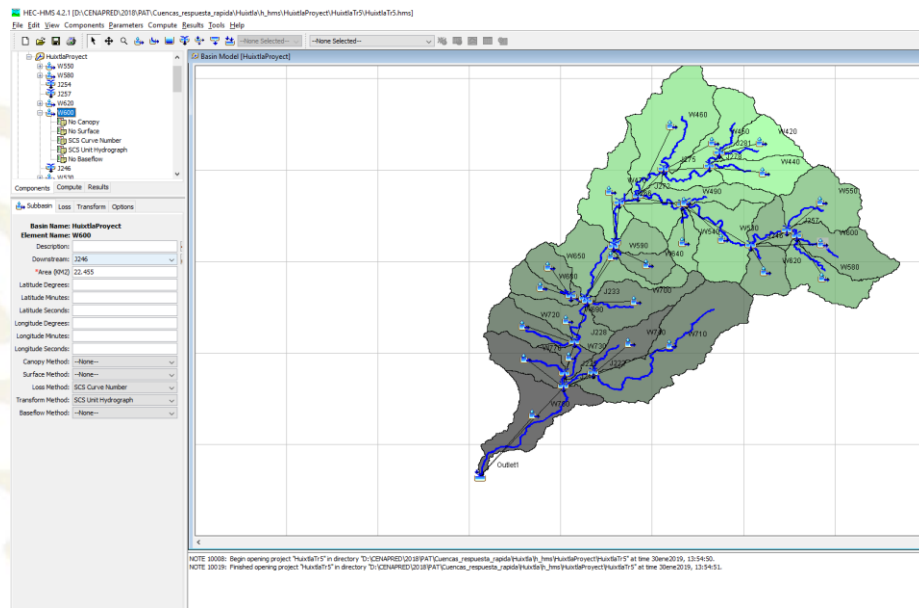


Figura 4.5.-Interfaz del software Hec-HMS, con los elementos del proyecto para la cuenca del río Huixtla

El análisis de la avenida se obtuvo con base en el hidrograma antes de ser transitado por la última subcuenca en la salida, el resultado de las sumatorias y circulaciones de las relaciones lluvia escurrimiento para las cuencas que conforman la superficie de análisis, dicho proceso se realizó para las superficies de precipitación de los periodos de retorno en estudio, 5, 10, 20 y 50 años; la figura 4.6 muestra la interfaz por la cual se obtienen los resultado del modelado hidrológico.

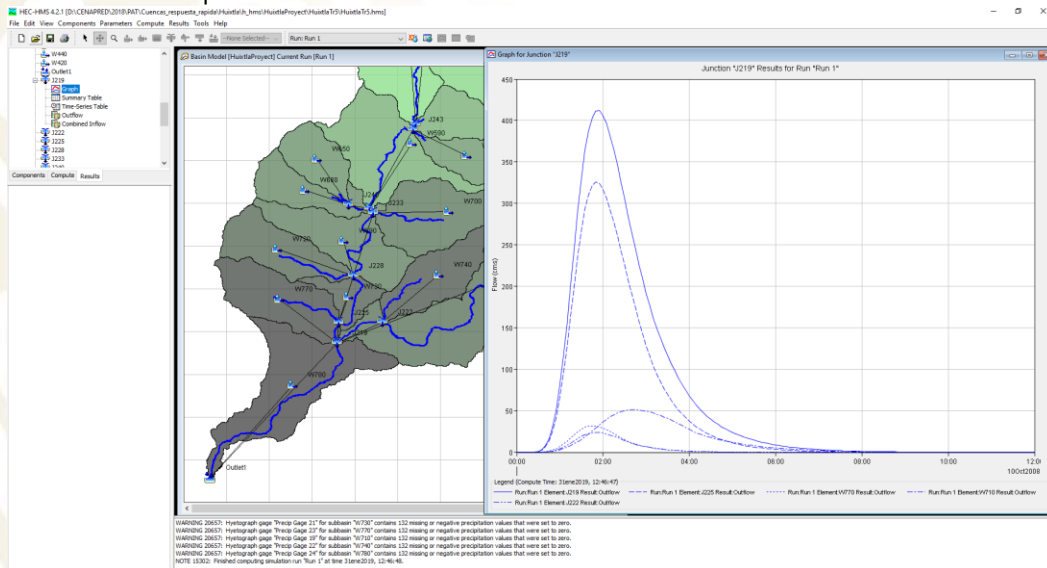


Figura 4.6.-Resultados del modelado hidrológico para un periodo de retorno de 5 años

Se realiza el tránsito de los hidrogramas a través del modelo de Iber 2.4, que resuelve en dos dimensiones las ecuaciones de aguas someras, aunque los modelos unidimensionales suelen ser más eficientes para este tipo de estudios, en este caso no se considera una opción, debido a la información disponible de los modelos digitales de elevación (MDE). Cabe mencionar que para la fecha de publicación del MDE, se detectó que éste no cuenta con obras de protección (bordos) en el cauce, los cuales se adecuaron en el modelo de terreno con el que se realizó el tránsito de la venida. La figura 4.7 indica la cuenca del río Huixtla delimitada en su salida por una estación hidrométrica, junto con la subcuenca que se encuentra en la zona urbana.

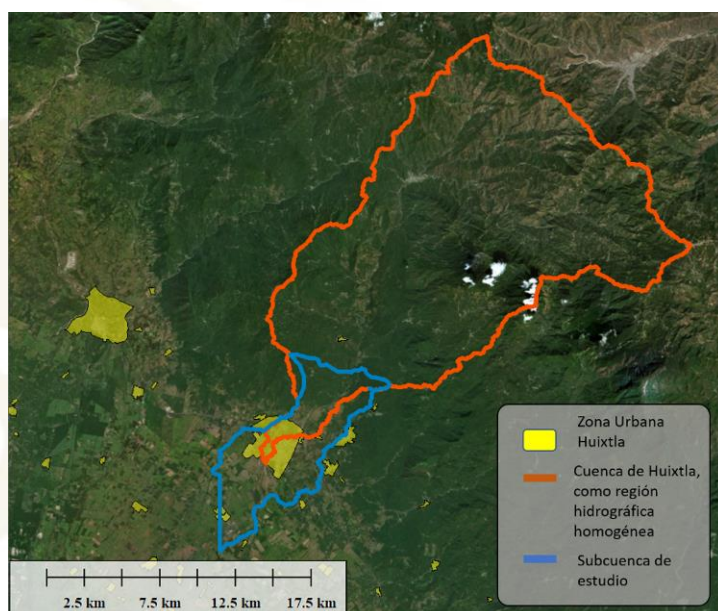


Figura 4.7.- Áreas determinadas para la modelación hidráulica del río Huixtla

La figura 4.8 muestra los hidrogramas que serán introducidos en Iber para ser transitados, éstos son importantes desde el momento que comienza una precipitación con duración de una hora, así pues se verificaron los tiempos de los volúmenes críticos a puntos importantes, ya sea dentro de la misma ciudad o algún lugar de referencia que permita realizar actividades preventivas.

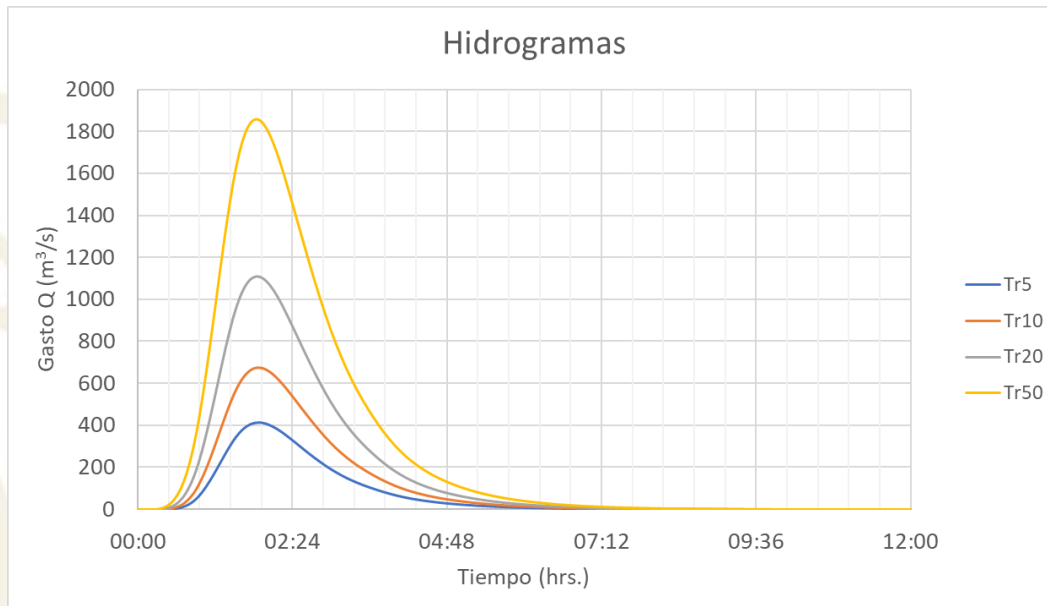


Figura 4.8.- Hidrogramas por periodo de retorno obtenidos por medio del software Hec-HMS.

Las figuras 4.9 y 4.10 muestran el modelo digital de terreno, que incluyen las adecuaciones de los bordos, dichas estructuras fueron levantadas mediante un registro visual con apoyo de Google Earth, por lo que pueden diferir con las existentes o variar según las condiciones de mantenimiento de los mismos. Sin embargo, se consideró importante que fueran incluidas en el análisis, por su influencia en la mitigación del peligro de inundación y las alteraciones que producen sobre el comportamiento del caudal en el río.

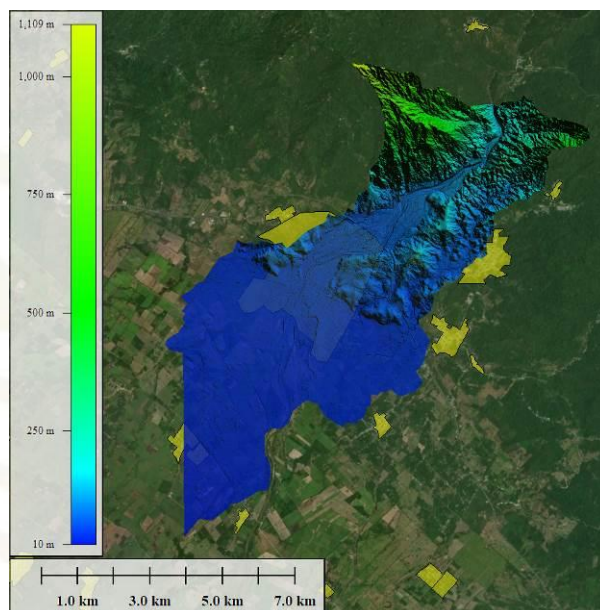


Figura 4.9.- Cobertura del modelo digital de terreno en la subcuenca a analiza.

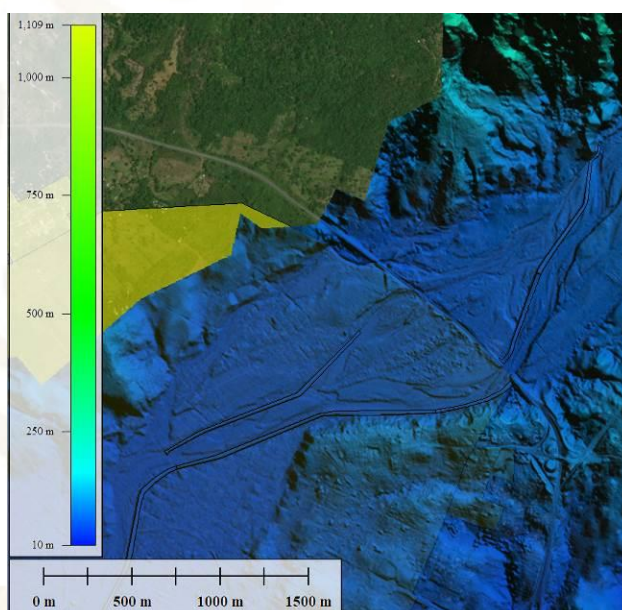


Figura 4.10.-Vista de los bordes de protección en el río Huixtla, en MDE

Se presentan las profundidades obtenidas para cada uno de los periodos de retorno, estos escenarios de peligro por inundación son analizados posteriormente, con base en los tiempos de arribo que el volumen máximo de agua tarda al llegar en algunos sitios, dichos escenarios están asociados a una probabilidad de excedencia, los cuales podrían ser mapas de peligro y severidad, pero el objetivo de este estudio es identificar la rapidez con que suceden las inundaciones en los centros urbanos, debido a la presencia de avenidas súbitas, suponiendo que éstas se presentaron por la ocurrencia de una precipitación de cierta intensidad con duración de una hora, bajo el supuesto que en la cuenca de influencia no existen otros efectos que influyan en los escurrimientos.



Figura 4.11.- Profundidades en el río Huixtla asociadas a un Tr de 5 años con bordos

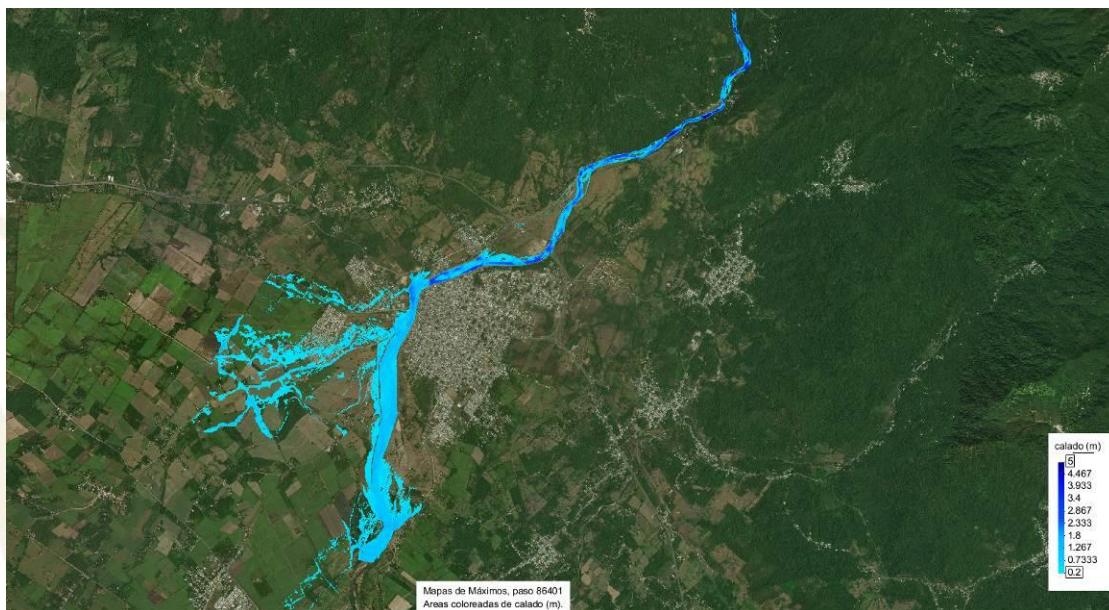


Figura 4.12.- Profundidades en el río Huixtla asociadas a un Tr de 10 años con bordos

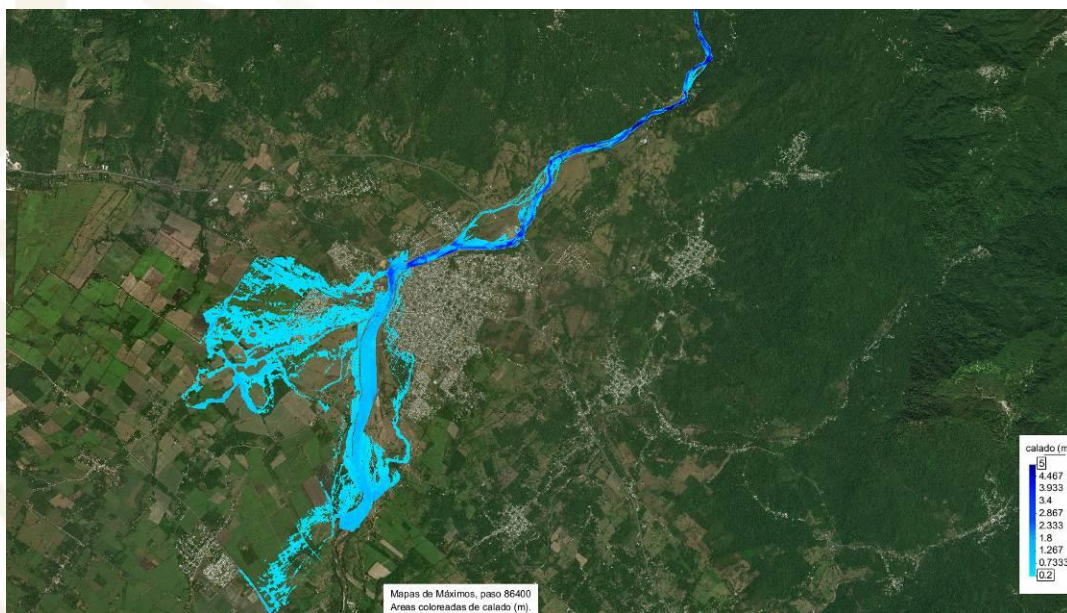


Figura 4.13.- Profundidades en el río Huixtla asociadas a un Tr de 20 años con bordos



Figura 4.14.- Profundidades en el río Huixtla asociadas a un Tr de 50 años con bordos.

Para el análisis del tiempo de arribo se obtuvieron hidrogramas en dos puntos de control sobre el río, se observó que en general para todos los periodos de retorno no existe una pérdida considerable de volumen, ya que, aunque el cauce desbordó se indica que el caudal perdido logra incorporarse más adelante durante su recorrido, por lo que no se analizó el volumen de agua o la forma que éste brinda en los hidrogramas, tampoco espacial, ni temporalmente. Se precisó sólo en el tiempo de recorrido del gasto pico en los nodos de análisis.

La figura 4.5 muestra los puntos de control en los que por medio de una sección transversal se obtuvieron los higromas y así conocer el tiempo de arribo del gasto máximo. Se ubicaron de manera intencional, el Punto 1, justo al comenzar la zona urbana, todavía con poca densidad de viviendas y después de que la cubeta principal del río atraviesa un puente; el Punto 2 fue colocado antes de un punto donde se observa el desbordamiento del cauce por ambas márgenes.

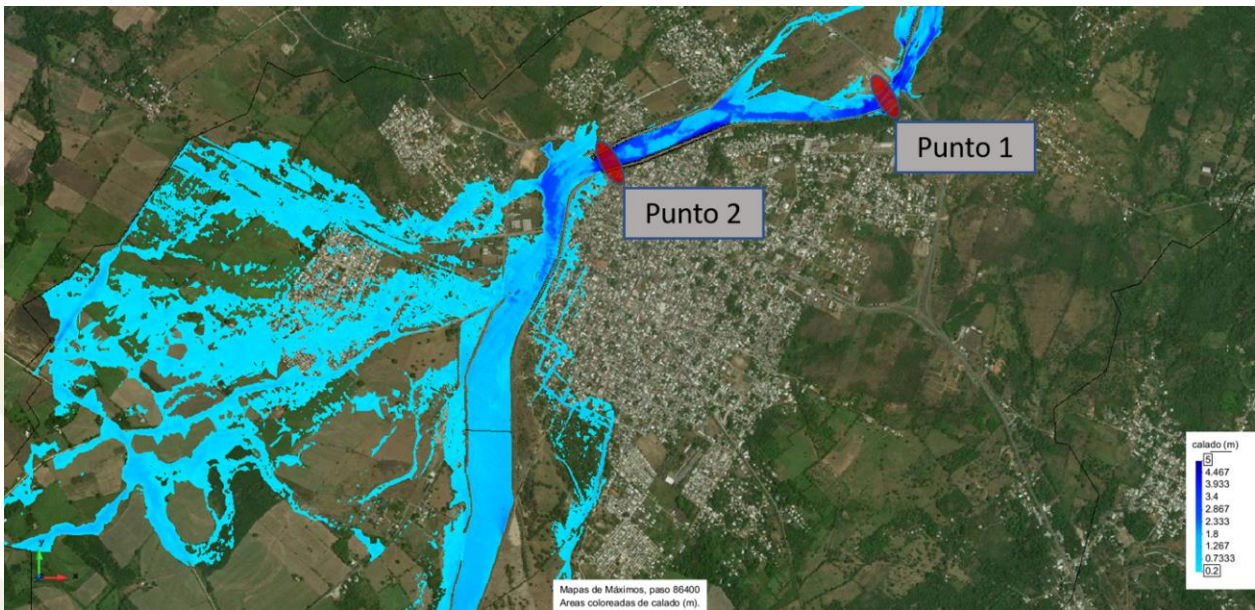


Figura 4.15.- Ubicación de los puntos de control sobre el río Huixtla

Las siguientes gráficas muestran los hidrogramas obtenidos en los puntos de control, en comparación con los de entrada y salida al modelo, para todos los periodos de retorno, el hidrograma de entrada en esta subcuenca de análisis fue considerado como una avenida súbita, ya que los gastos picos van de cero a 400 m^3/s , para el menor periodo de retorno analizado y de cero a más de 1800 m^3/s , para el Tr de 50 años, en un tiempo pico menor a dos horas.

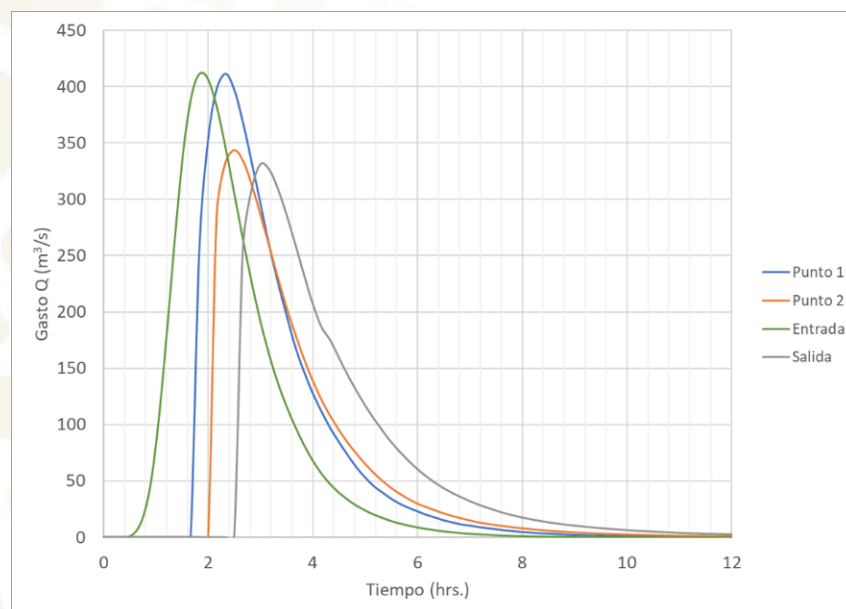


Figura 4.16.- Higromas para la comparación del tiempo pico para Tr 5



En los hidrogramas se observa que el tiempo que transcurre entre la entrada del gasto pico al modelo y llegar al primer punto de control es de tan sólo 30 minutos, entre éste y el segundo punto de 10 minutos. Por lo anterior, se toma en cuenta el tiempo de concentración en toda la cuenca hasta el punto de entrada al modelo de 3.92 h., se tiene un tiempo de arribo del gasto pico (tiempo pico) de 6.42 horas en una superficie de 356.7 km², y una longitud de cauce de más 53 km, lapso pequeño si se considera que no existen estaciones de medición o sistemas de alertamiento.

Tabla 41.- Tiempos de arribo o picos presentados para el Tr 5 años

Tr 5			
	Tiempo (s)	Tiempo (hrs)	Diferencia (hrs)
Entrada	6600	1.833	-
P1	8400	2.333	0.500
P2	9000	2.500	0.667
Salida	10200	2.833	1.000

La tabla 4.1, muestra los tiempos de arribo de los gastos picos en los puntos de control, a la entrada y salida de la subcuenca de modelación, también se indican las diferencias con respecto al tiempo pico del hidrograma de entrada, las cuales si se adiciona el tiempo de concentración de la cuenca general hasta ese punto (3.92 horas), se pueden estimar los tiempos en que llegaría el caudal máximo a partir del inicio de la precipitación en general de la cuenca.

Se recomienda realizar un análisis similar para los demás periodos de retorno y apoyarse en los mapas de profundidades elaborados con las herramientas necesarias para obtener la ubicación ideal de las estaciones de medición, con el fin de tener un alertamiento u operación y diseño de alguna obra de protección como canales de alivio o lagunas de regulación.

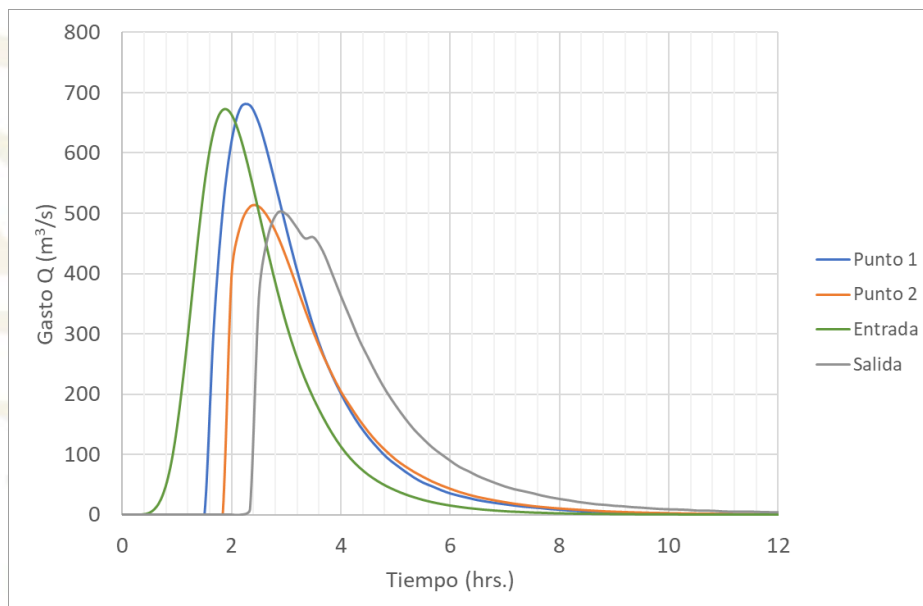


Figura 4.17.- Higromas para la comparación del tiempo pico para Tr 10

Tabla 4-2.-Tiempos de arribo o picos presentados para el Tr 10 años

Tr 10			
	Tiempo (s)	Tiempo (h)	Diferencia (h)
Entrada	6900	1.917	-
Punto 1	8400	2.333	0.417
Punto 2	9000	2.500	0.583
Salida	10200	2.833	0.917

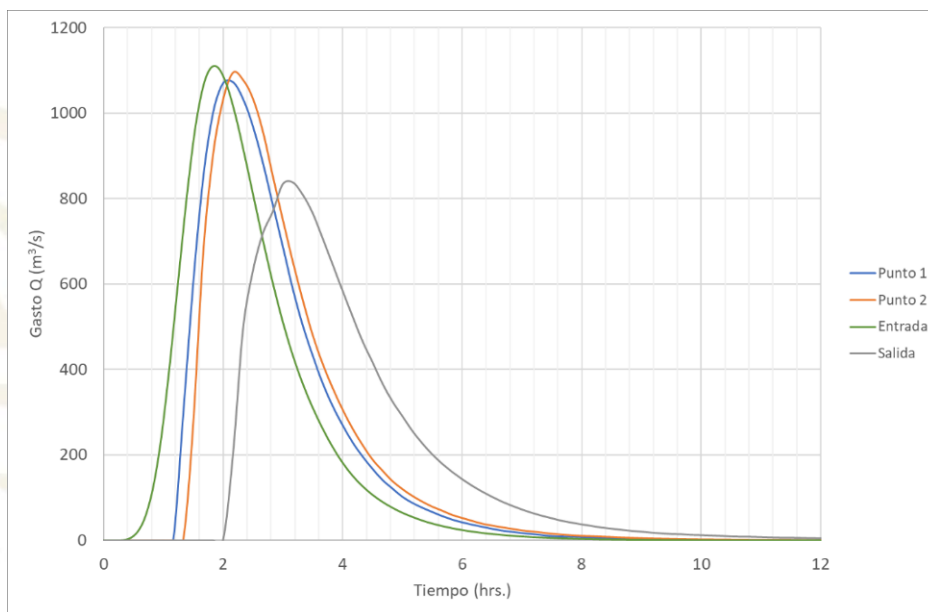


Figura 4.18.-Higromas para la comparación del tiempo pico para Tr 20

Tabla 4-3.-Tiempos de arribo o picos presentados para el Tr 20 años

Tr 20			
	Tiempo (s)	Tiempo (hrs)	Diferencia (hrs)
Entrada	6600	1.833	-
Punto 1	7800	2.167	0.333
Punto 2	7800	2.167	0.333
Salida	11400	3.167	1.333

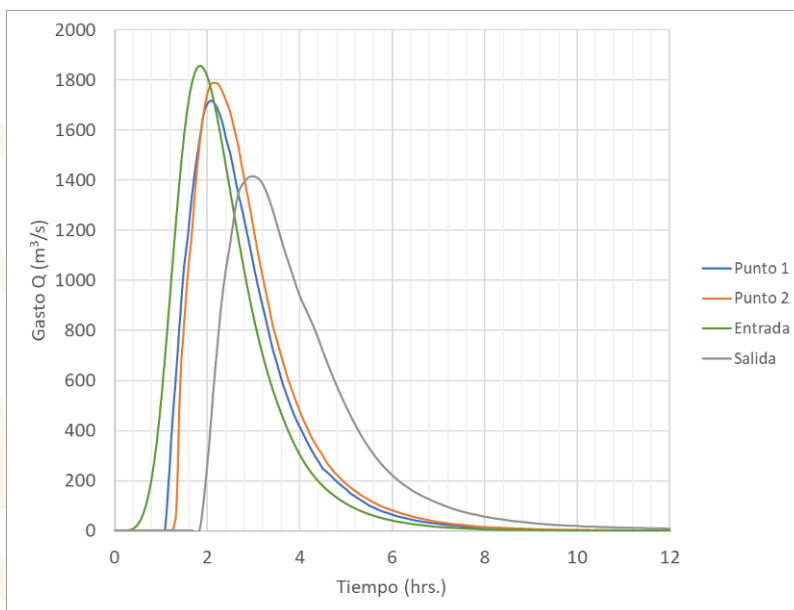


Figura 4.19.-Higromas para la comparación del tiempo pico para Tr 50

Tabla 4-4.-Tiempos de arribo o picos presentados para el Tr 50 años

Tr 50			
	Tiempo (s)	Tiempo (hrs)	Diferencia (hrs)
Entrada	6600	1.833	
Punto 1	7500	2.083	0.250
Punto 2	7800	2.167	0.333
Salida	10800	3.000	1.167

Es importante mencionar que la disminución del tiempo de arribo del caudal pico al Punto 1, se incrementó conforme al volumen del mismo, debido al periodo de retorno analizado, que llegó a ser de hasta sólo 15 minutos para el Tr 50 años, dando un tiempo total de acción desde el punto más alejado de la cuenca a este nodo de control de 4.42 h., lo que disminuye el margen de acciones ante eventos catastróficos, pero con menor probabilidad de excedencia (menos frecuentes). De manera general, las grandes obras de manejo y mitigación de inundaciones se diseñaban con periodos de retorno entre 20 y 50 años, debido al análisis costo-beneficio, pero en la actualidad y a los múltiples cambios que presenta el entorno, es necesario modificar dicho valor.

4.1.2 Tecate

Para el análisis de la zona urbana de Tecate en Baja California, se realizó primero la consulta de la clasificación hidrológico administrativa de la CONAGUA, dicha entidad se encuentra en la Región Hidrológica número 1 y, en el municipio de Tecate, pertenece a la cuenca del río Tijuana-A, de Maneadero, según la clasificación del proyecto de *Avenidas Máximas*, el cual se utilizó por medio de las expresiones de estimación de caudales para diversos periodos de retorno, en función de las características fisiográficas de las subcuencas de estudio.

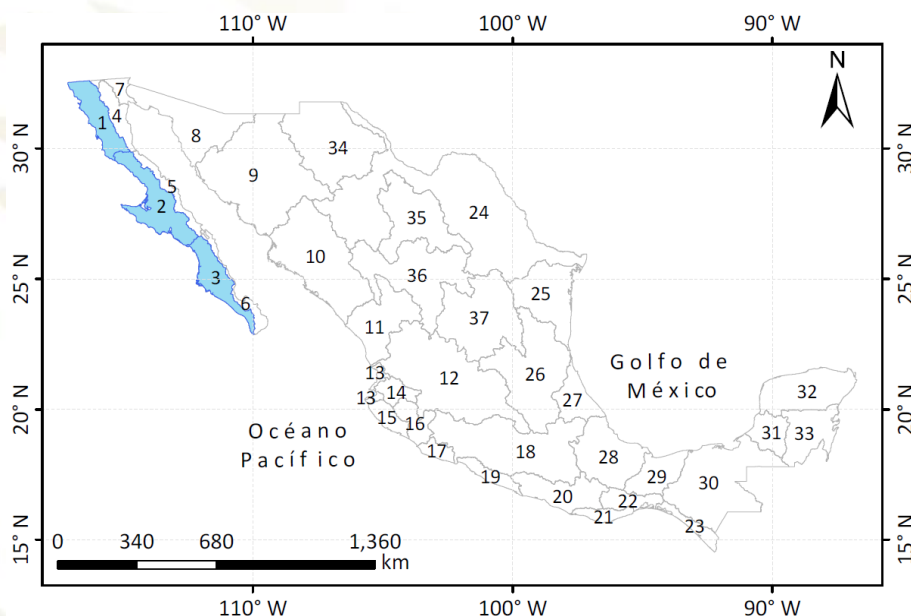


Figura 4.20.- Mapa de las regiones hidrológicas Administrativas de la CONAGUA, donde se resaltan de la 1-3, península de Baja California (Fuente: Domínguez et al, 2017)

Las características fisiográficas de las cuencas de influencia y del río que atraviesa la zona conurbada de Tecate, tales como: área, pendiente media de la cuenca, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce principal para la cuenca y subcuencas, se obtuvieron por medio del software ArcGis y con un MDE de tecnología LiDAR para la obtención de los datos de relieve, y con apoyo de la extensión HEC-GeoHMS en la versión 10.3 de ArcGis, se delimitaron tres subcuencas hidrológicas y sus correspondientes redes de drenaje; la primera contiene completamente la zona urbana; la segunda de influencia a la primera y la última que abarcó las dos cuencas anteriores.

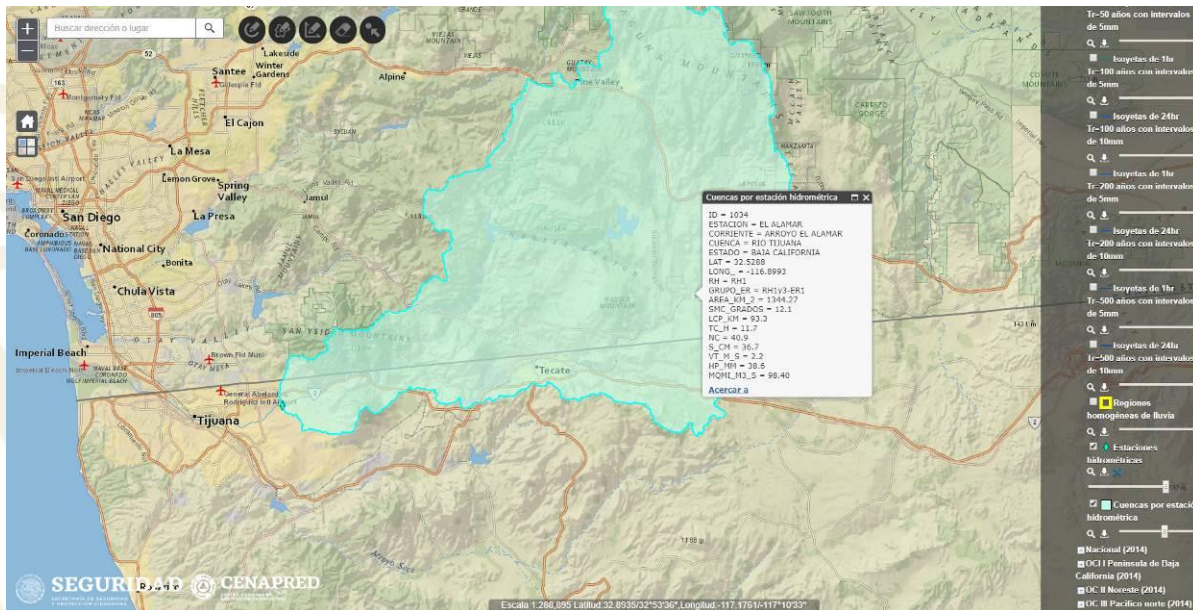


Figura 4.21.-Características de la cuenca regional a la que pertenece la zona urbana de Tecate

La figura 4.21 muestra la cuenca regional con la que se realizó el análisis de los escurrimientos de la ciudad de Tecate, dicha superficie cuenta con un área de 1344.27 Km² y cubre parte del territorio de USA, el cauce principal posee una longitud de 93.3 km y un tiempo de concentración de más 11 horas, dicho parámetro indica que en esa región no se presentan avenidas súbitas. Sin embargo, se observa lo contrario, una vez analizadas las subcuencas. La precipitación media de la cuenca se obtuvo con base en los mapas de isoyetas para los periodos de retorno, disponibles en el ANR, aunque en esta ocasión no se utilizaron los modelos lluvia escurrimiento.

En la figura 4.22, se observan las cuencas de influencia en el río Tecate, para las cuales se obtuvieron hidrogramas; y se realizó la modelación hidráulica, analizándose los tiempos de arribo de los volúmenes pico a puntos estratégicos, para el alertamiento, ubicación de obras de control de avenidas o establecimiento de tiempos en protocolos de evacuación y alertamiento. Dichas cuencas aparecen en color rosa y amarillo (en la versión digital), la cuenca que comprende a la ciudad de Tecate está en tonalidad verde.

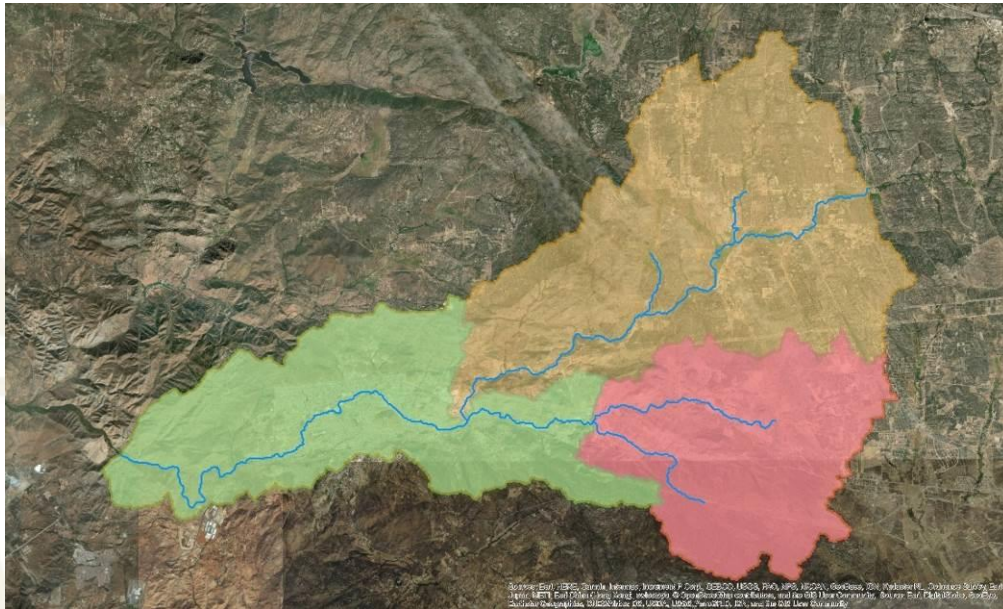


Figura 4.22.- Cuenca que contiene a la ciudad de Tecate, junto con sus áreas de influencia

Para la generación de los caudales de entrada en la modelación hidráulica, se utilizó la metodología del Hidrograma Unitario Adimensional, en la cual se estimaron los gastos máximos instantáneos, que se obtuvieron por medio de las *Ecuaciones Regionales de la Media del Gasto Máximo instantáneo en Función de las Características Fisiográficas*, tomo IV del estudio de *Avenidas Máximas*.

Esta zona homogénea pertenece a la región administrativa número 1, la estación hidrométrica que la delimita es *El Alamar*, para la corriente del mismo nombre en la cuenca del río Tijuana y se utilizaron las ecuaciones potenciales recomendadas por Domínguez (2017), debido a que son las que mejores resultados arrojan en correlación con la base de datos que tratan de representar, las dos ecuaciones son las número 2 y 19 de las múltiples que se probaron:

Ecuación del modelo dos para una variable

$$Mqmi = 0.4227 * A^{0.7273}$$

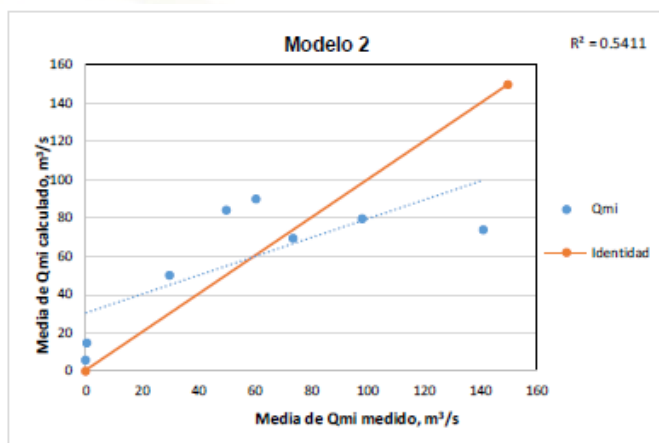


Figura 4.23.- Error porcentual entre los gastos calculados y medidos con el modelo 2; (Domínguez et al, 2017)

Ecuación del modelo 19 para dos variables

$$Mqmi = 0.4227 * V^{1.5175} VT^{4.1977}$$

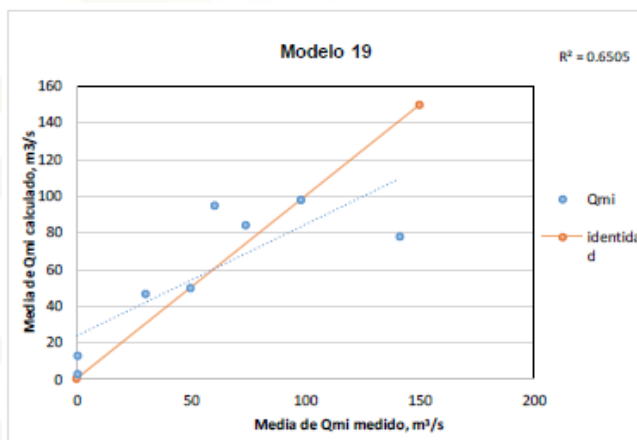


Figura 4.24.-Error porcentual entre los gastos calculados y medidos con el modelo 19; (Domínguez et al, 2017)



Donde:

M_{qmi} = Gasto máximo instantáneo en m^3/s .

A = Área de la cuenca en Km^2 .

V = Volumen de la cuenca, estimado con la precipitación media anual en hm^3 .

VT = Velocidad de tránsito en m^3/s

Para el cálculo de los caudales se decidió por la ecuación de gasto máximo instantáneo que sólo utiliza una variable, debido a que los resultados que arrojó fueron más adecuados con respecto a los de la ecuación del modelo 19, una vez obtenidos estos gastos, se multiplicó por los factores regionales de los periodos de retorno a utilizar, finalmente, se construyeron los hidrogramas asociados a los correspondientes periodos de retorno en análisis.

La tabla 4.5, muestra los gastos máximos instantáneos y algunas características importantes para la elaboración de los hidrogramas, en las cuales se observaron tiempos de concentración menores a una hora, dato que nos indica la velocidad con la que se presentan las avenidas en los cauces de dichas cuencas.

Tabla 4-5.- Gastos y características de las cuencas para la elaboración de hidrogramas

	Tiempo de concentración (h)	VT (m/s)	HP (mm)	Vol. (hm^3)	$M_{qmi} \cdot 1v$ (m^3/s)
Cuenca 1	0.29	9.13	38.00	2.98	10.08
Cuenca 2	0.99	13.05	40.00	12.79	28.04

Las figuras 4.25 y 4.26, muestran los hidrogramas para las cuencas 1 y 2 respectivamente, solo para los periodos de retorno que se encuentran en análisis.

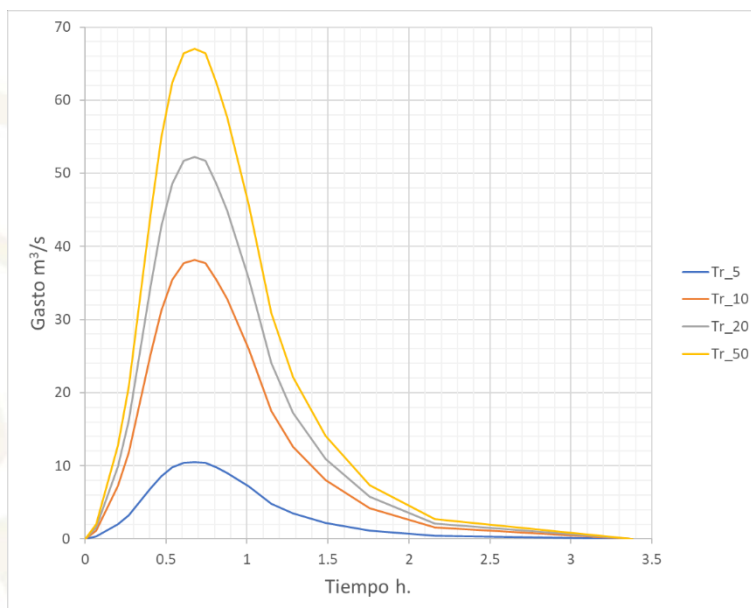


Figura 4.25.- Hidrogramas para la cuenca 1

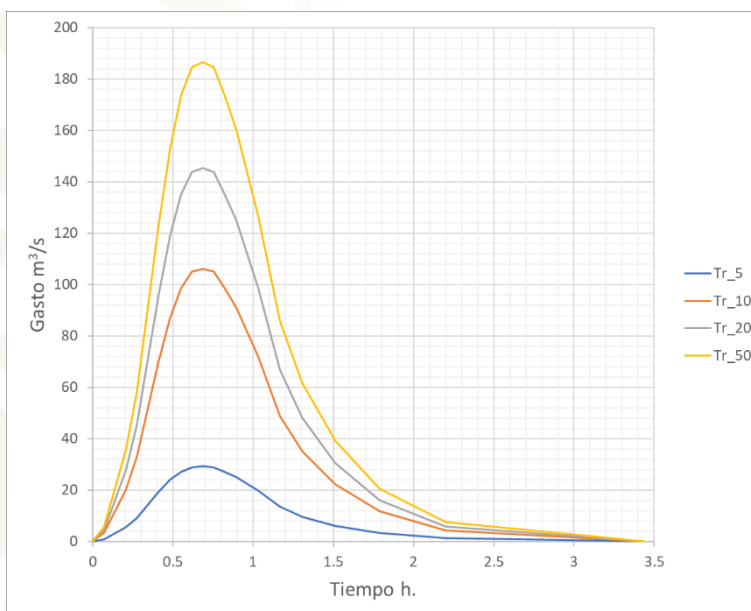


Figura 4.26.- Hidrogramas para la cuenca 2

Para Tecate se utilizó un MDE LiDAR como base topográfica para la modelación, debido a la longitud de la ciudad, se discretiza el terreno en una malla con elementos de distinto tamaño, de 5 metros en la zona urbana y de 25 metros donde no existen estructuras de gran definición. Además, se realizó un trabajo de limpieza del modelo de terreno, con ayuda del Software Global Mapper para realizar modificaciones de la cuenca que contiene la zona urbana, ya que se alcanzaron a detectar obstrucciones o infraestructura urbana que no pueden considerarse como parte de elevaciones propias del terreno, para que éstas no impidan el libre tránsito de las corrientes en la modelación hidráulica.

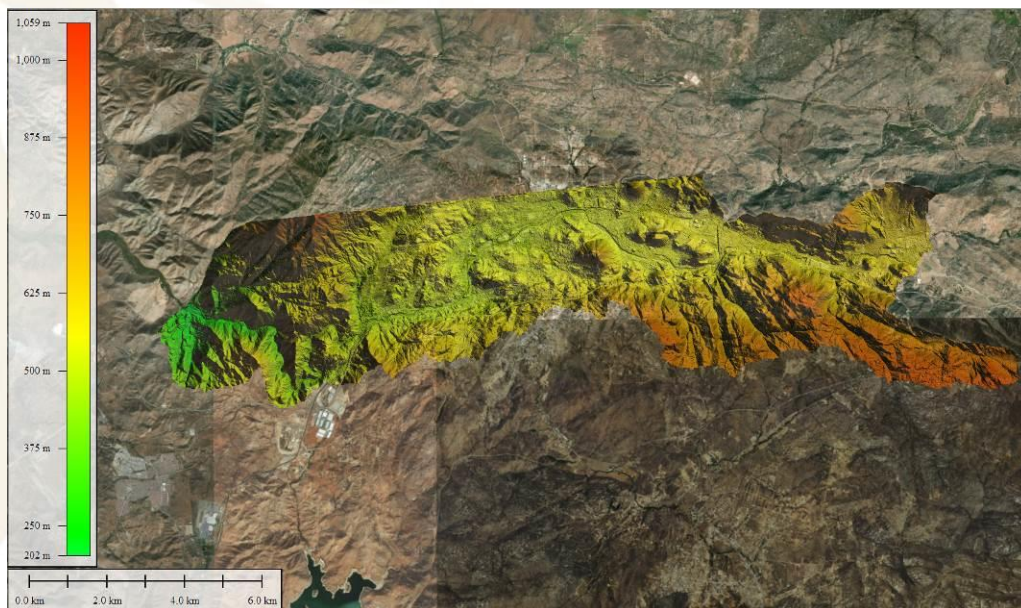


Figura 4.27.-Modelo digital de elevaciones sobre el cual se realizó la modelación hidráulica

La figura 4.27, muestra la superficie sobre la cual se desarrolló el tránsito de las corrientes que atraviesan Tecate, como se mencionó anteriormente no tiene sentido obtener secciones transversales de un cauce, cuando se tiene un modelo de superficie, además con un análisis de este tipo se puede observar los desbordamientos y como éstos inundaron alrededor del cauce.

Las figuras 4.28 a 4.31, indican las profundidades del río y de sus desbordamientos en la zona urbana de Tecate, a pesar de estar asociadas a un periodo de retorno, no se pueden considerar como un mapa de peligro, ya que en una ciudad de ese tamaño, se requiere contar con otro tipo de escurrimientos, el drenaje urbano y la simultaneidad de eventos de precipitación y escurrimiento, sólo ayudan a conocer y a dimensionar cómo suceden las inundaciones en un sitio tan complejo.

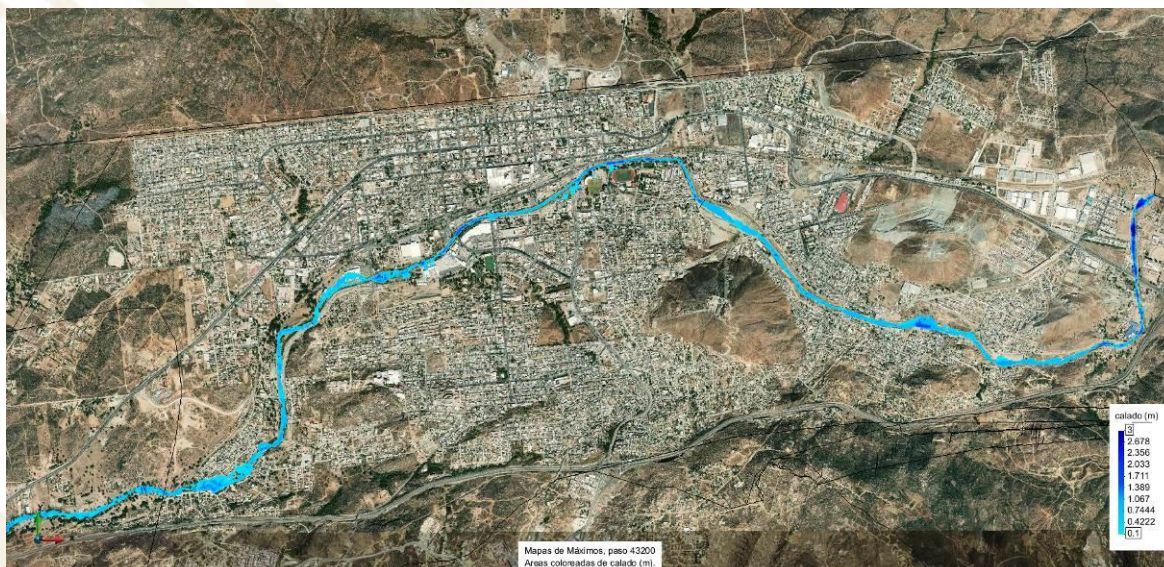


Figura 4.28.-Profundidades en el río Tecate asociadas a un Tr 5

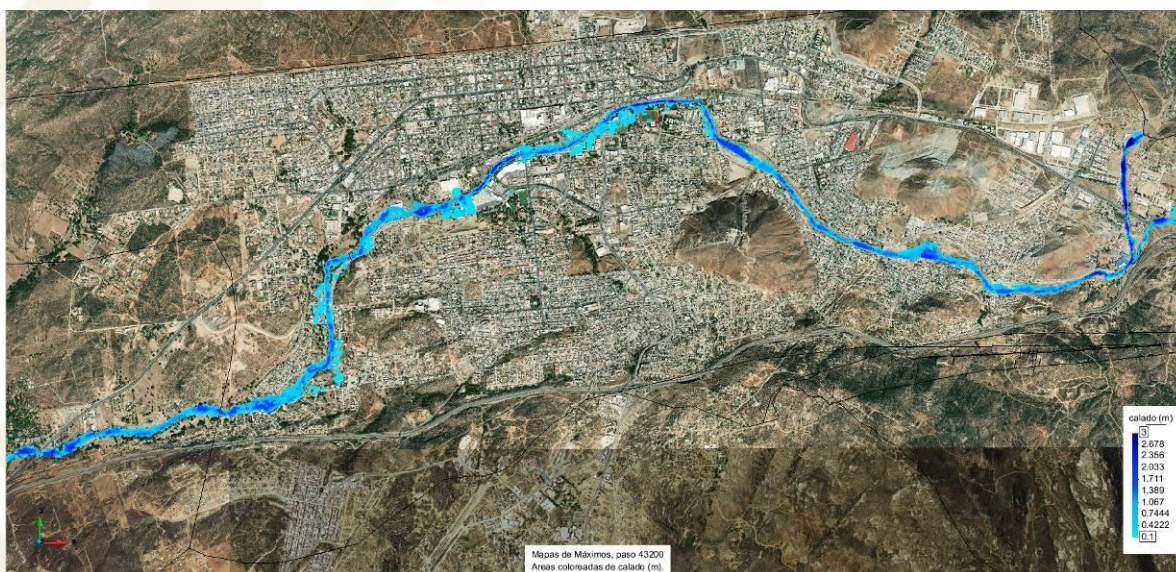


Figura 4.29.- Profundidades en el río Tecate asociadas a un Tr 10

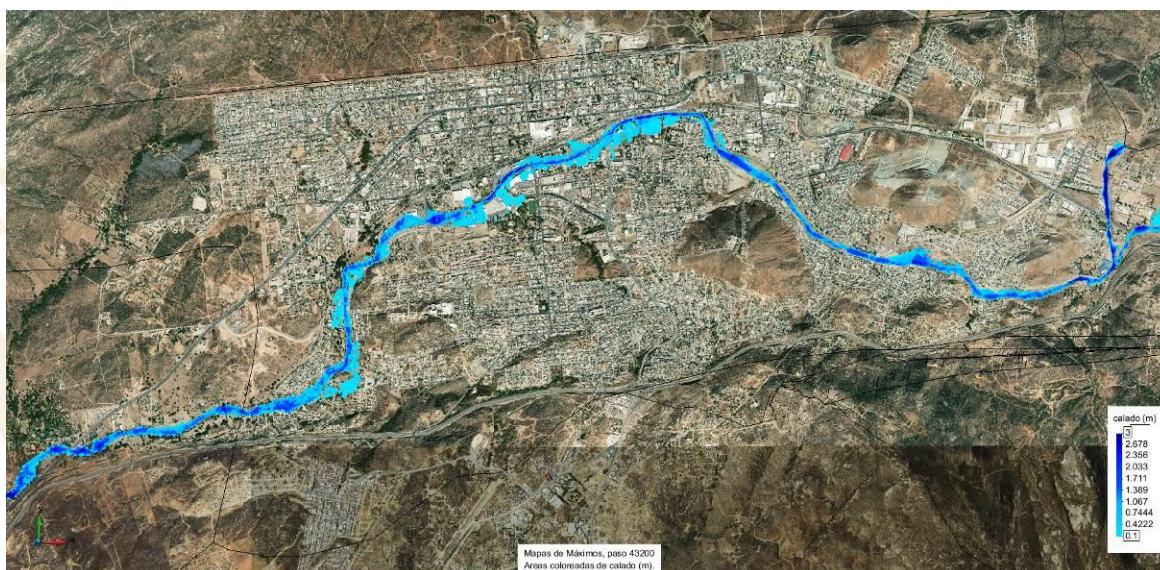


Figura 4.30.-Profundidades en el río Tecate asociadas a un Tr 20.

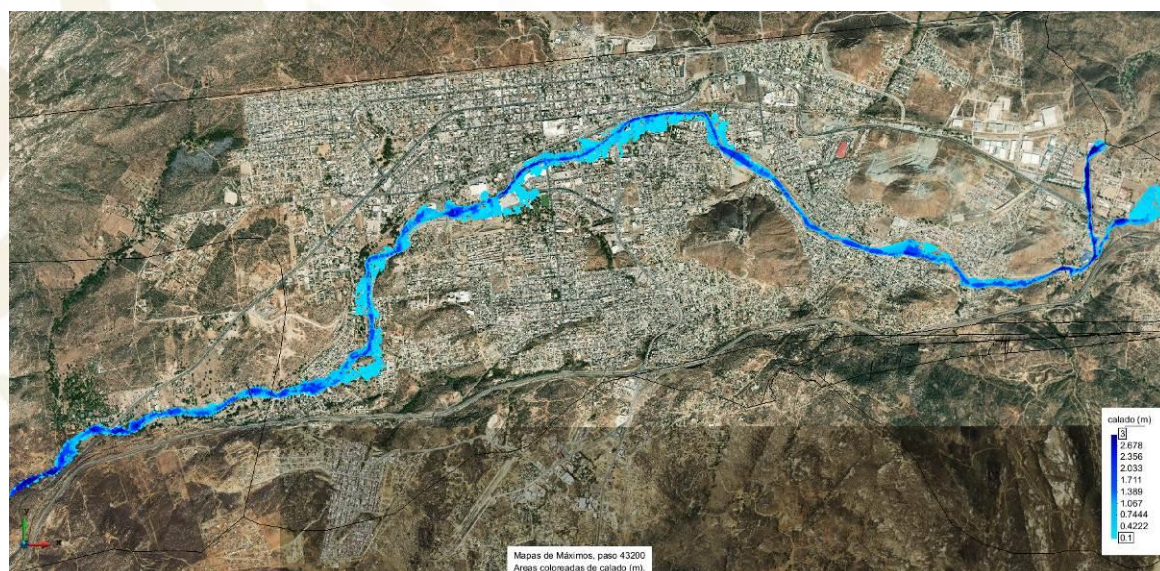


Figura 4.31.-Profundidades en el río Tecate asociadas a un Tr 50.

Para el análisis del río Tecate se establecieron cuatro puntos de análisis en los cuales se extrajeron sus hidrogramas, para la estimación del tiempo de arribo de los volúmenes máximos transitados en el cauce y, en el caso de este río, se recomienda establecer los tiempos de trabajo a partir del primer punto de control que es donde confluyen las dos cuencas de aportación, de lo contrario sería necesario contar con un complejo sistema de monitoreo que permita saber en qué parte está lloviendo, para tratar de establecer un sistema de pronóstico en tiempo real, de ahí la importancia de los datos hidrométricos. La figura 4.32 muestra los puntos donde se extrajo información de los resultados de las modelaciones.



Figura 4.32.-Imagen de la ubicación de los puntos de análisis a lo largo del cauce

Las siguientes figuras representan los tiempos de pico o de arribo, las cuales se presentan en las tablas como los lapsos en que el caudal máximo llega a cada punto, junto con las diferencias respecto al punto anterior, para el caso del río Tecate el mayor volumen siempre se encuentra en el primer punto, tarda en acumular 72 minutos siendo éste de 42 m³, esto para el periodo de retorno de 5 años y con tiempo promedio de 44 minutos entre los mismos puntos; un análisis similar para el periodo de retorno de 50 años con un volumen de 234.71 m³, casi 5 veces mayor, tarda 68 minutos y entre los demás puntos del recorrido un promedio de 19 minutos, trasladándose un caudal mayor en menos tiempo, siendo el escenario más catastrófico.

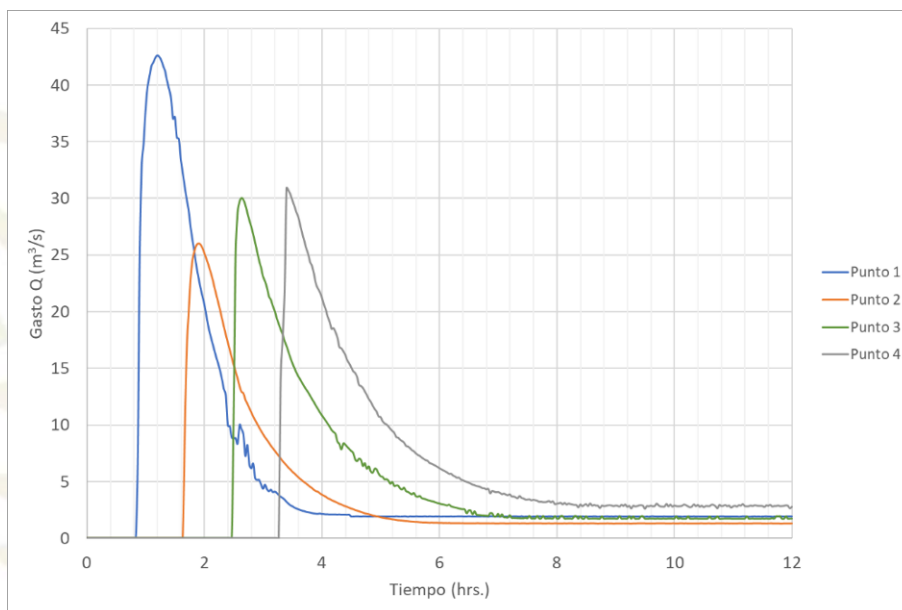


Figura 4.33.- Hidrogramas de los puntos de análisis en el río Tecate para el Tr 5

Tabla 4-6.- Tiempos de arribo en los puntos de análisis Tr 5

Tr 5			
	Tiempo (s)	Tiempo (hrs)	Diferencia (hrs)
Punto 1	4320	1.20	
Punto2	6840	1.90	0.70
Punto 3	9480	2.63	0.73
Punto 4	12240	3.40	0.77

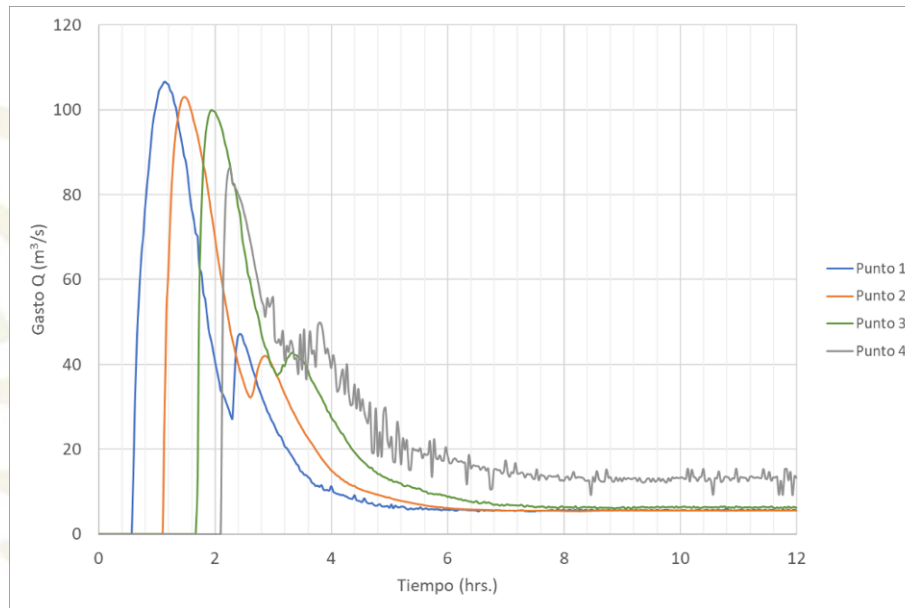


Figura 4.34.- Hidrogramas de los puntos de análisis en el río Tecate para el Tr 10

Tabla 4-7.- Tiempos de arribo en los puntos de análisis Tr 10

Tr 10			
	Tiempo (s)	Tiempo (hrs)	Diferencia (hrs)
Punto 1	4200	1.17	
Punto2	5400	1.50	0.33
Punto 3	6960	1.93	0.43
Punto 4	8160	2.27	0.33

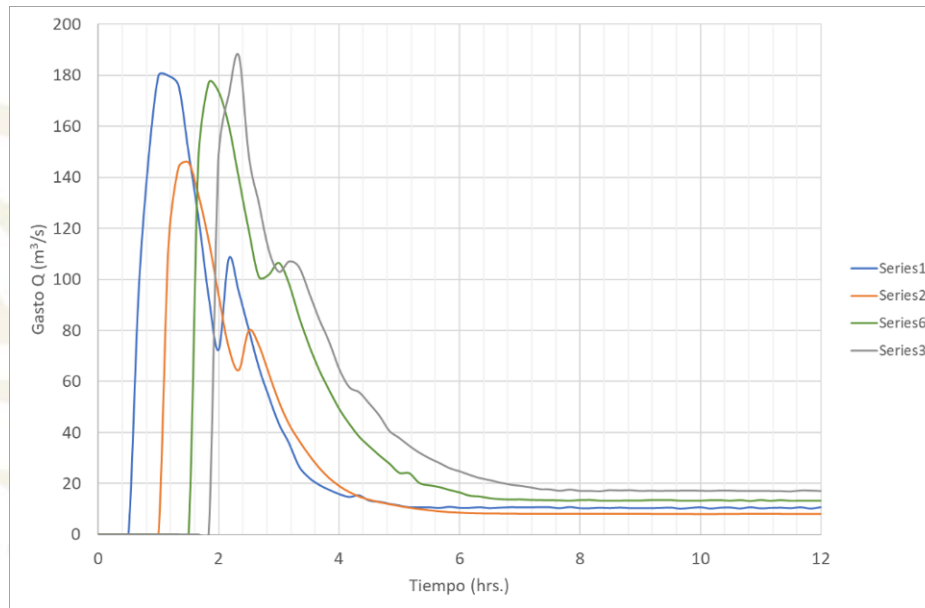


Figura 4.35.- Hidrogramas de los puntos de análisis en el río Tecate para el Tr 20

Tabla 4-8.- Tiempos de arribo en los puntos de análisis Tr 20

Tr 20			
	Tiempo (s)	Tiempo (hrs)	Diferencia (hrs)
Punto 1	3600	1.00	
Punto 2	5400	1.50	0.50
Punto 3	6600	1.83	0.33
Punto 4	8400	2.33	0.50

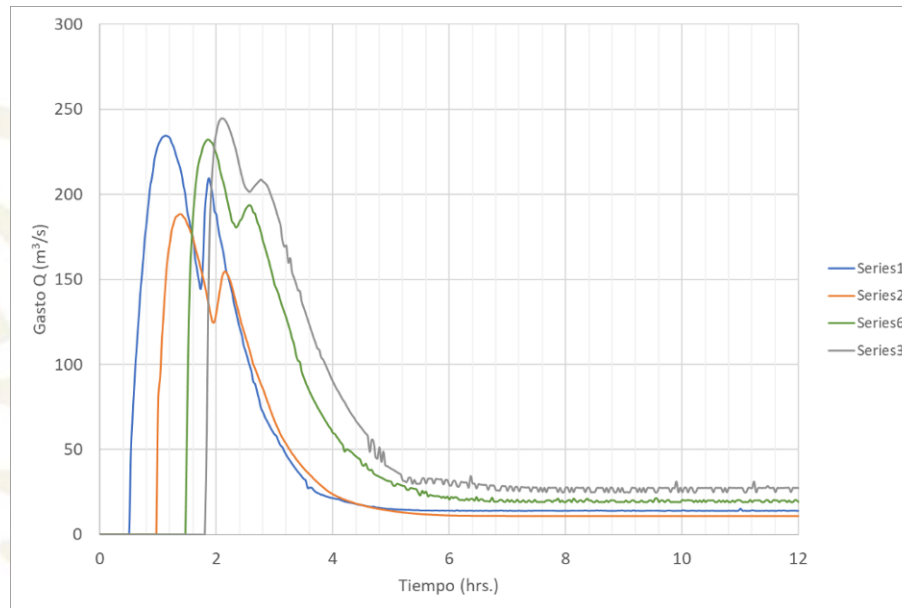


Figura 4.36.- Hidrogramas de los puntos de análisis en el río Tecate para el Tr 50

Tabla 4-9.- Tiempos de arribo en los puntos de análisis Tr 50

Tr 50			
	Tiempo (s)	Tiempo (hrs)	Diferencia (hrs)
Punto 1	4080	1.13	
Punto2	4920	1.37	0.23
Punto 3	6720	1.87	0.50
Punto 4	7560	2.10	0.23

Se observa que el río Tijuana cuenta con gran dinamismo para los volúmenes mayores al asociado al periodo de retorno de cinco años, esto se refleja en los tiempos que tarda en llegar los caudales máximos entre los puntos de análisis, desde los 13 minutos a la media hora y cuya distancia entre ellos, es en promedio de 4 kilómetros, tomando en cuenta que inicialmente la ubicación de éstos se hizo sólo en función de las curvas del cauce y su lugar dentro de la zona urbana, lo que es necesario destacar, la necesidad de tener mejores mediciones de caudales, en cuencas de gran tamaño como ésta, debido a lo complejo de las relaciones lluvia-escurrimiento.



CAPÍTULO 5. Conclusiones

El trabajo de Avenidas Máximas, simplifica la compilación y trabajo con las bases de datos hidrométricas y climatológicas, que como resultado nos brinda herramientas de fácil utilización, con métodos robustos y confiables, que acortan tiempos en los análisis hidrológicos, pero ante sitios más complejos deben de hacerse los estudios a detalle. Sin embargo, dicha herramienta permite generar los insumos necesarios para el análisis fluvial, hidráulico e hidrológico. Las funciones regionales de gastos medios proporcionan los caudales asociados a diversos periodos de retorno y en combinación con las isoyetas, los modelos lluvia-escorrentía, es posible realizar estudios de peligro por inundación. Por lo anterior, se ahorra tiempo en la compilación de información, algo importante ante la presencia de un inminente escenario de inundación.

Los análisis desarrollados para las zonas urbanas se realizaron de manera básica con base en la interpretación de resultados, sólo se contemplaron datos que pueden ser de más fácil de aplicar en la prevención de desastres, gasto máximo transitado y su tiempo pico (tiempo de arribo), que como se sugiere forma parte importante en el desarrollo de planes de contingencia, estableciéndose a partir de éstos los tiempos de alertamiento, evacuación, diseño y operación de obras de control. Se hace mención que el tránsito de avenidas puede arrojar resultados más abstractos en el estudio de un río a cerca de su comportamiento hidráulico, como son los números de Froude, Shields o el concepto de celeridad en flujos.

Otra manera práctica de la modelación numérica de las avenidas en ríos, es ubicar eficientemente los puntos críticos de los ríos, es decir, dónde desbordan, con qué condición de caudal lo hacen y para la verificación del funcionamiento y ubicación de infraestructura de control o monitoreo. Esto es de vital importancia ante el tipo de inundaciones o de avenidas que se presentan en estos dos sitios, clasificadas como súbitas o rápidas, que por sus características en cuanto a su volumen de agua y tiempo en el que suceden, son las más catastróficas.

Por último, las características fisiográficas de una cuenca son buenos parámetros iniciales para clasificar un evento de inundación como súbita o rápida, aunque éstos no sean concluyentes, ya que la escala o ubicación de la cuenca pueden influenciar en un mal análisis, por lo que se recomienda hacerlo por medio de parámetros hidrológicos o hidráulicos, llevando la zona de estudio a una escala menor, manejable y siempre delimitándolos con las metodologías adecuadas; un indicador con buenos resultados y el más utilizado es el tiempo de concentración



que ayuda abstraer en qué tiempo puede presentarse un escurrimiento después de haberse presentado una lluvia. En este trabajo se propuso el tiempo de arribo o tiempo de pico, como parámetro de identificación, ya que al conocer el tiempo de la presencia del caudal máximo en diversos puntos a lo largo del cauce permite construir una mejor idea del tipo de avenida, obteniéndose por medio de hidrogramas, que no sólo nos brindan los tiempos de arribo, sino también la magnitud del caudal

La información obtenida permitirá, en colaboración con un grupo multidisciplinario, los planes de contingencia, estableciendo para éstos los tiempos adecuados o límites en los que se deberá de ejecutar determinada acción, ya sea evacuación, alertamiento u operación de obras. Además, se deja abierta la línea de investigación para realizar estudios similares en las cuencas o ciudades, por parte de autoridades locales, con la evidencia suficiente de la presencia de inundaciones o avenidas súbitas, posteriormente establecer las medidas de acción, con apoyo de estudios hidrológicos e hidráulicos que permitan establecer las mejores soluciones ante la amenaza constante de las inundaciones.



CAPÍTULO 6. Bibliografía

Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos de Fenómenos Hidrometeorológicos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006.

Fundamentos de Hidrología de Superficie. APARICIO, M.F. Limusa, México, Desastres.

Hidrología Aplicada, Chow Ven Te, Mc Graw Hill. 2000.

Hidráulica de Canales Abiertos, Chow Ven Te, Mc Graw Hill. 2000.

Servicio meteorológico nacional. CONAGUA. Estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) <http://smn.cna.gob.mx/emas/>.

Inundaciones. Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. CENAPRED 2004.

Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República Mexicana, Domínguez et al, 2017.

Introducción a la Hidrología Urbana, Campos, 2015.

Análisis y Evaluación de Riesgos de Inundación: Estimación del Impacto de Medidas Estructurales y no Estructurales, Escuder, Matheu, Castillo, 2015.

Modelamiento Hidrológico Geoespacial Usando HEC-GeoHMS, Aplicación a la Cuenca del Río Chilca, Ingol, 2016