



**UNIVERSIDAD MICHOCANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS
MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO,
PERIBÁN”**

TESIS PROFESIONAL

PRESENTA:

DULCE LILIANA FLORES PATIÑO

**Para obtener el título de
INGENIERO CIVIL**

DIRECTORA DE TESIS:

SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

DOCTORA EN INGENIERÍA DE RÍOS, CANALES Y PUERTOS

Morelia, Michoacán, Julio 2019



AGRADECIMIENTOS

El amor recibido, la dedicación y la paciencia por la que cada día se preocupaban mis padres por el avance y desarrollo de esta tesis, es simplemente único y se refleja en la vida de un hijo.

Gracias a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí, gracias a mi madre María Leonor Patiño Teodores por su apoyo incondicional todos estos años, porque eres una guerrera y eso me has enseñado a ser, a ver siempre lo bueno de las cosas, sin importar que tan malas sean, sé que siempre estarás para mí cuando más te necesite, eres mi heroína y mi orgullo más grande madre. Gracias a mi padre, Donaciano Flores Gómez por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida gracias por cada consejo y por guiarme siempre por el buen camino, siempre has trabajado duro y sin importar tu cansancio siempre lo has hecho para que nunca me haga falta nada, te admiro y respeto por lo que eres y seguirás siendo siempre, mi héroe, mi orgullo y mi padre. No puedo darles más vida para que sean eternos y poder pagar todo lo que han hecho por mí, pero hasta que dios y la vida lo permitan, siempre serán mi prioridad.

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por apoyarme y aconsejarme en cada decisión, gracias a la vida porque cada día me demuestra lo hermosa que es y lo justa que puede llegar a ser; gracias a mi familia por permitirme cumplir con excelencia en el desarrollo de esta tesis. Gracias por creer en mí y gracias a dios por permitirme vivir y disfrutar cada día.

A mis hermanos, Brenda, Eva Catalina, Santiago, Donald y Diego, gracias por todo su amor, cariño y paciencia que me han brindado, por cuidar siempre de mí como su hermana más pequeña, los admiro y respeto por eso y más los amo.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a sus aportes, a su amor, a su inmensa bondad y apoyo, lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos. Les agradezco, y hago presente mi gran afecto hacia ustedes, mi hermosa familia.

A mi asesora de tesis, la doctora Sonia Tatiana Sánchez Quispe por creer en mí y abrirme las puertas del laboratorio de hidráulica, gracias por todo el apoyo, por los consejos y por la paciencia que tuvo hacia mí para terminar satisfactoriamente esta investigación. Gracias por ser una excelente docente, por impulsar a todos a ser cada día mejor.

Gracias al doctor Constantino Domínguez Sánchez por su apoyo y colaboración en esta investigación y por ser el padrino de nuestra generación.

Al ingeniero Israel Alejandro García Ledesma, por fungir como co-asesor en mi tesis, por todo el apoyo como docente y como amigo, gracias por ser una excelente persona, por los consejos y ánimos cuando me desesperaba. Gracias al ingeniero Sergio Eduardo Cázares Rodríguez también por el apoyo en la realización de esta investigación.

A mis amigos, quienes siempre han estado conmigo en las buenas y malas, en las convivencias y en las penas. Gracias por todo su apoyo, cariño y aprecio que me han demostrado. A Regina, Diana, Alma Cristina, Eduardo, Leonardo, Enrique, Juan D, Rodrigo, Adrián, Nahum, gracias por su amistad y apoyo durante la carrera, por cuidar de mí y estar ahí cuando los necesito. A las personas que amo. Mil gracias.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	8
2. ANTECEDENTES.....	9
2.1. ZONA DE ESTUDIO	9
2.2. UBICACIÓN.....	9
2.3. OROGRAFÍA.....	10
2.4. HIDROGRAFÍA.....	10
2.5. CLIMA.....	12
2.6. EDAFOLOGÍA.....	13
3. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	14
3.1. HIDROLOGÍA	15
3.1.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA	16
3.1.2 CUENCA HIDROLÓGICA.....	16
3.1.3 CARACTERÍSTICA DE LA CUENCA Y DEL CAUSE	16
3.1.4 PARTEAGUAS	18
3.1.5 PENDIENTE DEL CAUSE PRINCIPAL	19
3.1.6 PRECIPITACIÓN	21
3.1.7 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL.....	33
3.1.8 TORMENTA DE DISEÑO	37
3.1.9 MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE LA TORMENTA DE DISEÑO	37
3.1.10 CURVAS DE INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO (idt)	43
3.1.11 HIETOGRAMAS.....	45
3.1.12 GASTO DE DISEÑO	51
4. MODELACIÓN HIDRÁULICA	64
4.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	65
4.2. MODELO MATEMÁTICO	67
4.3. MODELACIÓN EN CONDICIONES NATURALES	68
4.4. MODELACIÓN CON PUENTES EXISTENTES	70
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	76



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, PERIBÁN MICHOACÁN.....	10
FIGURA 2-2 MAPA DE CORRIENTES Y CUERPOS DE AGUA EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	11
FIGURA 2-3 MAPA DE CUBIERTAS DE SUELO DE LA ZONA EN ESTUDIO.....	13
FIGURA 2-4 COLONIA AFECTADA POR LA INUNDACIÓN DEL 23 DE SEPTIEMBRE DEL 2018, TIRINDITAS.....	14
FIGURA 3-1 ÁREA DE LA CUENCA EN ESTUDIO	18
FIGURA 3-2 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL	19
FIGURA 3-3 ESQUEMA DE UN PLUVIÓMETRO (ARANDA D. F., 2010).....	22
FIGURA 3-4 PLUVIÓGRAFO UTILIZADO EN LA REPÚBLICA MEXICANA (ARANDA D. F., 2010)	23
FIGURA 3-5 MAPA DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS.....	24
FIGURA 3-6 MAPA DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DE LA PRIMERA SELECCIÓN.....	25
FIGURA 3-7 ESTACIÓN PRINCIPAL 16088 (PERIBÁN).....	26
FIGURA 3-8 GRÁFICO DEL RK Y LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR (PERIBÁN).....	30
FIGURA 3-9 GRÁFICO DEL RK Y LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR (ACAHUATO).....	31
FIGURA 3-10 DETERMINACIÓN DE POLÍGONOS DE THIESSEN (APARICIO MIJARES, 1992).....	34
FIGURA 3-11 PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA POR POLÍGONOS DE THIESSEN	35
FIGURA 3-12 PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA POR ISOYETAS.....	36
FIGURA 3-13 SERIE DE DATOS DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS CON SU DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD QUE MEJOR AJUSTA.....	42
FIGURA 3-14 GRAFICA DE LAS CURVAS IDT CON HIDROESTA	44
FIGURA 3-15 HIETOGRAMA PARA T= 2 AÑOS (HEC-HMS).....	46
FIGURA 3-16 HIETOGRAMA PARA T= 5 AÑOS (HEC-HMS).....	46
FIGURA 3-17 HIETOGRAMA PARA T= 25 AÑOS (HEC-HMS).....	47
FIGURA 3-18 HIETOGRAMA PARA T= 10 AÑOS (HEC-HMS).....	47
FIGURA 3-19 HIETOGRAMA PARA T= 100 AÑOS (HEC-HMS).....	48
FIGURA 3-20 HIETOGRAMA PARA T= 50 AÑOS (HEC-HMS).....	48
FIGURA 3-21 HIETOGRAMA PARA T= 200 AÑOS (HEC-HMS).....	49
FIGURA 3-22 HIETOGRAMA PARA T= 500 AÑOS (HEC-HMS).....	49
FIGURA 3-23 HIETOGRAMA PARA T= 10000 AÑOS (HEC-HMS).....	50
FIGURA 3-24 HIETOGRAMA PARA T= 5000 AÑOS (HEC-HMS).....	50
FIGURA 3-25 HIETOGRAMA PARA T= 1000 AÑOS (HEC-HMS).....	50
FIGURA 3-26 MAPA DEL COEFICIENTE K EN FUNCIÓN DEL USO Y TIPO DE SUELO. NOM-011-2015	55
FIGURA 3-27 HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR	59
FIGURA 3-28 MAPA DEL COEFICIENTE N, (ARCMAP).....	61
FIGURA 3-29 CUENCA RIO CUTIO CON HEC-HMS	62
FIGURA 3-30 HUTSCS PARA UN TR = 50 AÑOS	63
FIGURA 3-31 TABLA DE RESULTADOS POR LOS DIFERENTES MÉTODOS	63
FIGURA 4-1 MDE Y TOPOGRAFÍA DE LA ZONA DELIMITADA POR EL RIO	65
FIGURA 4-2 MAPA DE LA SUPERFICIE TIN, ARCMAP.	66
FIGURA 4-3 MAPA DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CAUCE.....	66
FIGURA 4-4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y TOPOGRÁFICAS DEL CAUSE EN HEC-RAS.....	67
FIGURA 4-5 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RIO CUTIO EN CONDICIONES NATURALES	69
FIGURA 4-6 PERFIL LONGITUDINAL DEL RIO CUTIO EN CONDICIONES NATURALES.....	69
FIGURA 4-7 MODELO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #1	70
FIGURA 4-8 FOTOGRAFÍA REAL, SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #1.....	70
FIGURA 4-9 FOTOGRAFÍA REAL, SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #2 DESPUÉS DE LA INUNDACIÓN.	71
FIGURA 4-10 MODELO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #2	71
FIGURA 4-11 MODELO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #3	72
FIGURA 4-12 FOTOGRAFÍA REAL, SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #3 DESPUÉS DE LA INUNDACIÓN.	72
FIGURA 4-13 FOTOGRAFÍA REAL, SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #4 DESPUÉS DE LA INUNDACIÓN.	73
FIGURA 4-14 MODELO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #4	73
FIGURA 4-15 FOTOS DE LA INSPECCIÓN REALIZADA AL ÁREA DE ESTUDIO EL PASADO 13/MARZO/2019 CON EL OBJETIVO DE OBSERVAR LOS DAÑOS DEJADOS POR LA INUNDACIÓN PRODUCIDA POR LA AVENIDA DEL 23/SEPTIEMBRE/2018.	73



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3-1 CLASIFICACIÓN DE CUENCAS SEGÚN SU TAMAÑO (INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA, 2004)	18
TABLA 3-2 DATOS GENERALES DE LA CUENCA EN ESTUDIO	20
TABLA 3-3 LISTADO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA CUENCA	26
TABLA 3-4 DATOS DE LAS ESTACIONES, PRINCIPAL (PERIBÁN) Y ESTACIÓN SECUNDARIA (ACAHUATO).	26
TABLA 3-5 TABLA DE CUANTILES DE LA DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT	28
TABLA 3-6 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD ACAHUATO.....	28
TABLA 3-7 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD PERIBÁN.....	28
TABLA 3-8 TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE HOMOGENEIDAD (T STUDENT).....	29
TABLA 3-9 CORRELOGRAMA DE LA MUESTRA DE LA ESTACIÓN PERIBÁN	30
TABLA 3-10 RESULTADOS DE INDEPENDENCIA, LIMITES DE ANDERSON. PERIBÁN.....	30
TABLA 3-11 CORRELOGRAMA DE LA MUESTRA DE LA ESTACIÓN ACAHUATO	31
TABLA 3-12 RESULTADOS DE INDEPENDENCIA, LIMITES DE ANDERSON. ACAHUATO	31
TABLA 3-13 VALORES DE I MAX, PARA DIFERENTES D=10, 20, ... 120 EN MIN, Y PARA T = 5, 10, 20, Y 50 AÑOS	44
TABLA 3-14 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=5 AÑOS.....	46
TABLA 3-15 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=2 AÑOS.....	46
TABLA 3-16 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=25 AÑOS	47
TABLA 3-17 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=10 AÑOS	47
TABLA 3-18 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=100 AÑOS	48
TABLA 3-19 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=50 AÑOS	48
TABLA 3-20 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=200 AÑOS	49
TABLA 3-21 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=500 AÑOS	49
TABLA 3-22 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=5000 AÑOS	50
TABLA 3-23 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=1000 AÑOS	50
TABLA 3-24 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=10000 AÑOS	50
TABLA 3-25 VALORES DE K, EN FUNCIÓN DEL TIPO Y USO DE SUELO	54
TABLA 3-26 CALCULO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO.	56
TABLA 3-27 SELECCIÓN DE N (APARICIO MIJARES, 1992)	60



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



RESUMEN

El estudio realizado en la presente investigación se localiza en el municipio de Peribán de los Ramos, a 180 kilómetros de la capital del Estado, su principal actividad Económica es la Agricultura con cultivo de aguacate, zarzamora y durazno son los cultivos principales y el comercio de sus cultivos. Cuenta con un número de habitantes de 13, 614.

Las principales problemáticas ambientales que se tienen en el Municipio de Peribán, se ven enfocadas a la pérdida de diversidad biológicas, deforestación y fragmentación del medio, contaminación de suelos y ríos, degradación y erosión de los suelos, invasión de especies y cambios globales del medio ambiente.

En los últimos meses el municipio de Peribán, Michoacán se vio afectado de manera significativa por el desbordamiento del Rio Cutio. La problemática se debió a las fuertes lluvias, resultado de una zona de inestabilidad que produjo la formación de nubes de tormenta de corta duración, lo que provocó una precipitación que alcanzó los 58 litros por metro cuadrado en solamente dos horas, señaló la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

La presente investigación consiste en realizar la modelación de las máximas avenidas producidas en la cuenca del río Cutio, del municipio de Peribán de los Ramos, Michoacán. Primeramente, se realizará el estudio hidrológico, en donde se establecerá el tramo del río a analizar, posteriormente se delimitará la cuenca en estudio y se obtendrán sus características geomorfológicas, utilizando modelos digitales de elevaciones procesados en el Sistema de Información Geográfica ArgGIS. Se seleccionarán estaciones climatológicas dentro o muy cercanas a la zona de estudio, de esta manera se obtendrán las series de los datos de precipitación de cada estación climatológica para analizarlos y validarlos. Finalmente obtendremos la tormenta de diseño mediante hietogramas y con ayuda del software HEC-HMS se obtendrá el gasto de diseño.

La modelación hidráulica se realizará con el gasto de diseño, y con ayuda del software HEC-RAS 2D se realizará dicha modelación en dos escenarios diferentes, en condiciones naturales del cauce y con las estructuras existentes que es el caso de los puentes. La simulación de cada escenario se realizará para los distintos periodos de retornos, al ser los más comunes 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000, y 10000 años respectivamente. El periodo de retorno de 50 años es el que se analizará con más detalle en esta investigación, debido a que el gasto en este periodo es semejante al de la máxima avenida que provocó fuertes inundaciones en la localidad de Peribán, establecido y comunicado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

PALABRAS CLAVE: (INUNDACIÓN, DESBORDAMIENTO, MODELACIÓN, HEC-HMS, HEC-RAS).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



ABSTRACT

The study conducted in the present investigation is located in the municipality of Peribán de los Ramos, 180 kilometers from the state capital, its main economic activity is agriculture with avocado, blackberry and peach cultivation are the main crops and the trade of your crops. It has a number of inhabitants of 13, 614.

The main environmental problems that have in the Municipality of Peribán, are focused on the loss of biological diversity, deforestation and environmental fragmentation, soil and river pollution, soil degradation and erosion, species invasion and global changes in the environment ambient.

In recent months the municipality of Peribán, Michoacán was significantly affected by the overflow of the Cutio River. The problem was due to heavy rains, the result of an area of instability that produced the formation of storm clouds of short duration, which caused a rainfall that reached 58 liters per square meter in only two hours, said the National Commission of the Water (CONAGUA).

The present investigation consists of carrying out the modeling of the maximum avenues produced in the Cutio river basin, in the municipality of Peribán de los Ramos, Michoacán. Firstly, the hydrological study will be carried out, where the river section to be analyzed will be established, then the basin under study will be delimited and its geomorphological characteristics will be obtained, using digital elevation models processed in the ArgGIS Geographic Information System. Climatological stations will be selected within or very close to the study area, in this way the series of precipitation data of each climatological station will be obtained to analyze and validate them. Finally we will obtain the storm of design by means of hietograms and with the help of the HEC-HMS software the design expense will be obtained.

The hydraulic modeling will be carried out with the design expense, and with the help of the HEC-RAS 2D software, this modeling will be carried out in two different scenarios, under natural conditions of the channel and with the existing structures, as in the case of bridges. The simulation of each scenario will be done for the different periods of returns, being the most common 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 200, 500, 1000, 5000, and 10000 years respectively. The return period of 50 years is the one that will be analyzed in more detail in this investigation, because the expenditure in this period is similar to that of the maximum avenue that caused heavy flooding in the town of Peribán, established and communicated by the Commission National Water (CONAGUA).

KEYWORDS: (FLOODING, OVERFLOW, MODELING, HEC-HMS, HEC-RAS).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



OBJETIVO

GENERAL

Realizar la modelación y estudio hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Cutio, utilizando el software de simulación HEC-HMS para los hietogramas e hidrogramas, así como HEC-RAS 2D, para la modelación hidráulica, considerando las características físicas del cauce, así como el gasto de diseño. Así mismo, encontrar la problemática principal y proponer soluciones de acuerdo a los resultados y la implementación de estructuras que ayuden a mitigar dicho fenómeno.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Delimitar la zona de interés o de estudio, obtener las características geomorfológicas e identificar las estaciones meteorológicas cercanas a ellas para analizar y validar los datos de las series de precipitación de la estación principal y de una secundaria.
- Realizar el estudio hidrológico para obtener la tormenta de diseño y el gasto máximo de la cuenca en estudio para proponer un sistema de alerta temprana contra inundaciones, así como predimensionar las estructuras necesarias para la problemática (puentes, alcantarillas, sistema de drenaje, etc.), en caso de ser requeridas.
- Realizar el estudio hidráulico para obtener un modelo que represente con buena aproximación las condiciones reales y naturales del comportamiento del flujo de agua a lo largo del río Cutio, mismo que permita establecer el rango natural de los desniveles generados en el cauce.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



1. INTRODUCCIÓN

El agua es la sustancia más abundante de la tierra, es el principal constituyente de todos los seres vivos y es una fuerza importante que constantemente está cambiando la superficie terrestre. También es un factor clave en la climatización de nuestro planeta para la existencia humana y en la influencia para el progreso de la civilización. La hidrología que cubre todas las fases del agua de la tierra es una materia de gran importancia para el ser humano y su ambiente. Aplicaciones prácticas de la hidrología se encuentran en labores tales como el diseño, operación de estructuras hidráulicas, abastecimiento de agua, tratamiento y disposición de aguas residuales, irrigación, drenaje, generación hidroeléctrica, control de inundaciones, navegación, erosión, control de sedimentos, etc. El papel de la hidrología es ayudar a analizar los problemas relacionados con estas labores y promover una guía para el planteamiento y manejo de los recursos hídricos (Ven Te Chow, 1994).

En el estado de Michoacán, la región de la Tierra Caliente requiere de forma significativa, el desarrollo de infraestructura hidráulica que permite un crecimiento económico de los que habitan la zona.

El estudios hidrológico e hidráulico que aquí se desarrollen, se realizaran partiendo de la localización de la obra de almacenamiento a construir o en su defecto a proponer en la corriente principal, el cual permitirá delimitar la cuenca y esta a su vez ser caracterizada y analizada; inmediatamente se procede a localizar las estaciones meteorológicas e hidrométricas dentro y fuera de la cuenca, con la finalidad de obtener sus datos medidos, e identificar si los estudios hidrológicos se realizaran con métodos directos o indirectos. Con los datos medidos sea precipitación o escurrimiento se requieren estudios hidrológicos para determinar el gasto de diseño, la disponibilidad hídrica, etc.,

1.1 JUSTIFICACIÓN

El municipio de Peribán sufrió el pasado 23 de septiembre del 2018 una lamentable inundación que afectó en gran parte a las comunidades de la Tirinditas y Rio Negro, misma provocada por las fuertes precipitaciones en la zona y el desbordamiento del rio Cutio. Es necesario identificar la problemática más allá de lo establecido por las autoridades y evaluar las medidas de prevención ante un suceso de esa magnitud.

En esta investigación modelaremos las máximas avenidas en la cuenca del rio Cutio para visualizar el comportamiento del flujo a lo largo del cauce, en condiciones naturales y con los puentes existentes, de esta manera se propondrán medidas de prevención necesarias para evitar estas inundaciones tan repentinas.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



2. ANTECEDENTES

2.1. ZONA DE ESTUDIO

La presente investigación se centraliza en la parte occidental del estado de Michoacán, del municipio llamado Peribán, que hace unos meses sufrió uno de los sucesos más lamentables y no antes ocurridos durante 30 años.

2.2. UBICACIÓN

Al estado de Michoacán lo conforman dos grandes regiones montañosas o provincias fisiográficas, que son: la Sierra Madre del Sur y el Sistema Volcánico Transversal y Valles Intermontañosos (Cordillera Neovolcánica o Tarasco - Náhuatl).

La Sierra Madre del Sur cruza al Estado en aproximadamente 200 kilómetros en la zona Suroeste (entre los municipios de Chinicuila y Arteaga). Se le considera como la continuación de la Sierra Madre Occidental y de otras Sierras de América del Norte (Sierra Nevada, Montañas Rocallosas). Presenta una dirección de Noroeste a Sureste, extendiéndose a lo largo de la costa del océano Pacífico y muy próxima a él: tiene una anchura de casi 100 km., una altitud más o menos constante en sus partes altas de más de 2,900 m. y una superficie de 13,126.5 km².

La otra región montañosa del Estado, la constituye el Sistema Volcánico Transversal (o Cordillera Neovolcánica) se localiza al sur de la altiplanicie mexicana y se formó como consecuencia de la aparición de numerosos volcanes.

En este Sistema, hay una región orográfica que queda representada por la Sierra de Tancítaro, que se conecta en el Noroeste con la de **Peribán** y se enlaza con las Sierras de San Ángel y Tarécuaro, y por el Este con las de Paracho y Carapan (en esta zona se ubica la Meseta Tarasca donde se localiza el Volcán Parícutín).

La zona urbana de Peribán está creciendo sobre roca ígnea extrusiva del Plioceno-Cuaternario, en sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados; sobre áreas donde originalmente había suelo denominado Andosol; tiene clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad y está creciendo sobre terrenos previamente ocupados por agricultura.

El municipio de Peribán se encuentra situado en la parte occidental del estado mexicano de Michoacán. El municipio tiene una superficie de 331,87 kilómetros cuadrados (0,57% de la superficie del estado). Limita al norte con el municipio de Los Reyes, al este con Uruapan, al sureste con Tancítaro, al sur con Buenavista, y al oeste con el estado de Jalisco. El municipio tenía una población de 25.296 habitantes según el censo de 2010. Su cabecera municipal es la ciudad de **Peribán de Ramos**. (Figura 2-1)

Ocupa el 0.57% de la superficie del estado. Cuenta con 77 localidades y una población total de 20 965 habitantes (INEGI 2009).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

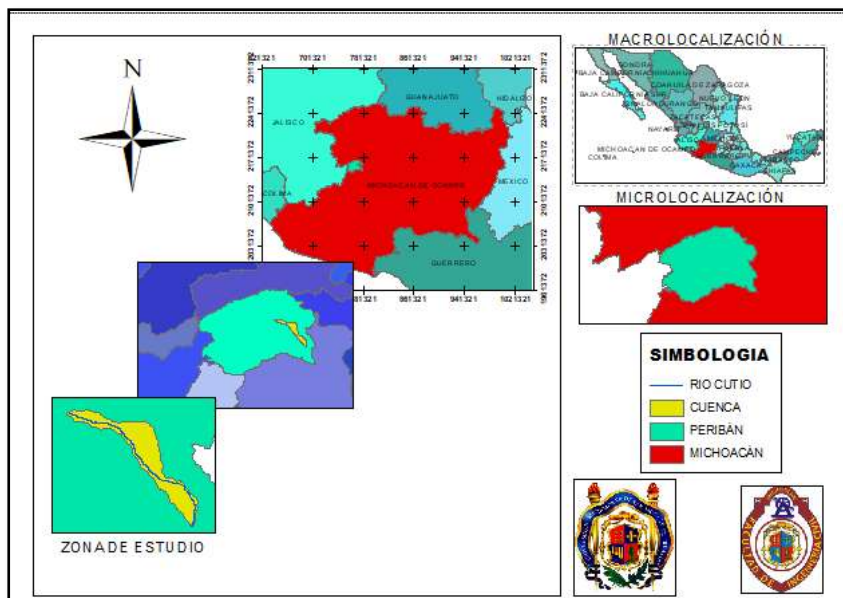


FIGURA 2-1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, PERIBÁN MICHOACÁN.

2.3. OROGRAFÍA

Su relieve lo constituyen el sistema volcánico transversal se encuentra dentro del Eje Neovolcánico (99.70%) y Sierra Madre del Sur (0.30%) Neovolcánica Tarasca (63.82%), Escarpa Limítrofe del Sur (35.88%), Depresión del Tepalcatepec (Discontinuidad) (0.22%) y Cordillera Costera del Sur (0.08%) Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados (46.44%), Meseta basáltica con sierras (35.88%), Llanura aluvial con cañadas (13.11%), Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados con llanuras (4.11%), Llanura con cañadas de piso rocoso o cementado (0.22%), Escudo volcanes (0.16%) y Sierra alta compleja (0.08%).

2.4. HIDROGRAFÍA

Peribán se ubica en la región hidrológica número 18, Balsas (CONAGUA 2009). La Región Hidrológica número 18 Balsas se localiza entre los paralelos 17° 13' y 20° 04' de latitud Norte y los meridianos 97° 25' y 103° 20' de longitud Oeste. Cuenta con una superficie hidrológica de 117,405 kilómetros cuadrados, equivalente al 6% del territorio nacional.

La región hidrológica, está limitada por las Sierras Madre del Sur y la de Juárez, así como por el eje Neovolcánico, tiene la forma de una depresión muy alargada con valles muy angostos, cuyo territorio está formado en su mayor parte por elevaciones con fuertes pendientes y un arreglo geológico poco propicio para el control y almacenamiento de los grandes escurrimientos que se presentan en la región hidrológica, ya que cuenta con un potencial importante de escurrimientos consistentes en más de 900 milímetros al año.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



La Cuenca Hidrológica Río Tepalcatepec comprende desde donde nacen los escurrimientos del Río Quitupan en el cerro de la Tinaja hasta la estación hidrométrica Los Panches, localizada en las coordenadas geográficas $102^{\circ} 13' 37''$ de longitud Oeste y $18^{\circ} 53' 10''$ de latitud Norte. Tiene una superficie de aportación de 11,718.72 kilómetros cuadrados, y se encuentra delimitada por las siguientes regiones y cuencas hidrológicas: al Norte por la Región Hidrológica número 12 Lerma-Santiago; al Sur por la Región Hidrológica número 17 Costa de Michoacán; al Este por la cuenca hidrológica Río Cupatitzio; y al Oeste por la Región Hidrológica número 16 Armería-Coahuayana.

Cuenca Hidrológica Río Bajo Balsas comprende desde las estaciones hidrométricas La Caimanera, La Pastoría, Los Pinzanes y Los Panches hasta su desembocadura al Océano Pacífico en el Municipio de Lázaro Cárdenas, Michoacán, localizada en las coordenadas geográficas $100^{\circ} 31' 12''$ de longitud Oeste y $18^{\circ} 16' 48''$ de latitud Norte. Tiene una superficie de aportación de 13,949.96 kilómetros cuadrados, y se encuentra delimitada por las siguientes regiones y cuencas hidrológicas: al Norte por las cuencas hidrológicas Río Cupatitzio y Río Tacámbaro; al Sur por la Región Hidrológica número 19 Costa Grande de Guerrero; al Oeste por la cuenca hidrológica Río Tepalcatepec; y al Este por la cuenca hidrológica Río Medio Balsas.

Cuenta también con corrientes de agua perennes, las cuales son: Apupataro, Itzícuaro y El Carrizalillo Intermitentes. (Figura 2-2).

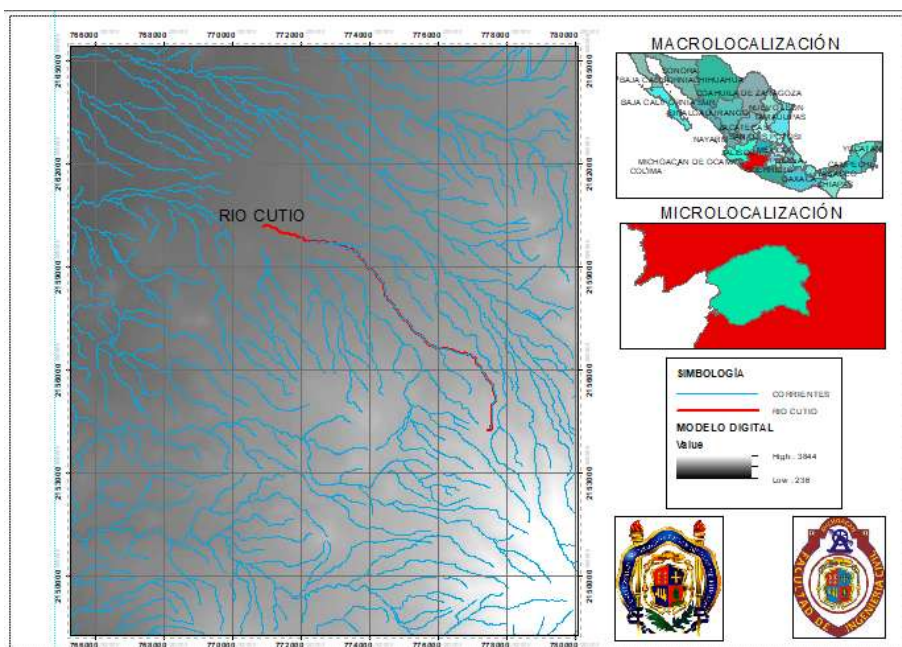


FIGURA 2-2 MAPA DE CORRIENTES Y CUERPOS DE AGUA EN LA ZONA DE ESTUDIO.



2.5. CLIMA

El clima se define como el estado promedio o más frecuente de la atmósfera y como tal es relativamente estable en el tiempo, no obstante, varía en su dimensión espacial de un continente a otro y de una región a otra. En este sentido el clima es de naturaleza estadística y espacial.

A escala planetaria el clima está determinado principalmente por la coexistencia de las cuencas oceánicas y continentales por las que se mueve la atmósfera. Mientras se conserve la actual distribución espacial de los océanos y continentes el clima será relativamente estable. Sin embargo, durante la historia geológica de la Tierra (4500 millones de años) y por la tectónica de placas, actualmente se sabe que la distribución de océanos y continentes se mueve cuantitativamente (gradualmente) hasta culminar en cambios cualitativos revolucionarios que alteran radicalmente la distribución de océanos y continentes; y con ello, el clima también ha cambiado cualitativamente de manera natural a largo plazo.

Debido a que no se cuenta con datos extensos en cuanto a la climatología en Peribán, proporcionaré en esta investigación datos de los municipios vecinos, con la finalidad de aproximarnos a los datos verídicos que deberían existir pero que lamentablemente no se encuentra disponible.

Su clima es tropical, templado con lluvias en verano. Tiene una precipitación pluvial anual de 1,300 milímetros, con temperaturas que oscilan de 13.7 a 28. 4º centígrados (Ayuntamiento de Peribán, Michoacán, Plan Municipal de Desarrollo, 2018-2021).

En los Reyes, Michoacán, siendo pueblo vecino al norte de Peribán, Michoacán tiene un clima templado y en algunas partes tropical con lluvias en verano. Tiene una precipitación pluvial anual de 900 milímetros y temperaturas que oscilan de 15.6 a 31.6 ° centígrados. (CONAGUA, 2015)

Hacia al este de Peribán tenemos a Uruapan, el clima es uno de los más variados del estado de Michoacán pues se ve influenciado por las diferentes de altitud en el terreno, existen cinco tipos diferentes de clima. La zona norte tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, en la zona central del municipio, la más elevada, tiene un clima templado húmedo con abundantes lluvias en verano, en la misma zona central otro sector tiene clima Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano, hacia el sur otra zona registra clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano y finalmente en el extremo sur del municipio el clima es clasificado como cálido subhúmedo con lluvias en verano. (CONAGUA, 2015).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



2.6. EDAFOLOGÍA

De acuerdo a los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017), el tipo de suelo se clasifica de la siguiente manera: Andosol (45.17%), Vertisol (32.80%), Regosol (16.40%), Luvisol (2.29%). De la misma manera, el uso del suelo es de una Vegetación Agricultura (57.40%) y Zona urbana (1.59%) Bosque (18.20%), Pastizal (15.37%) y Selva (7.44%).

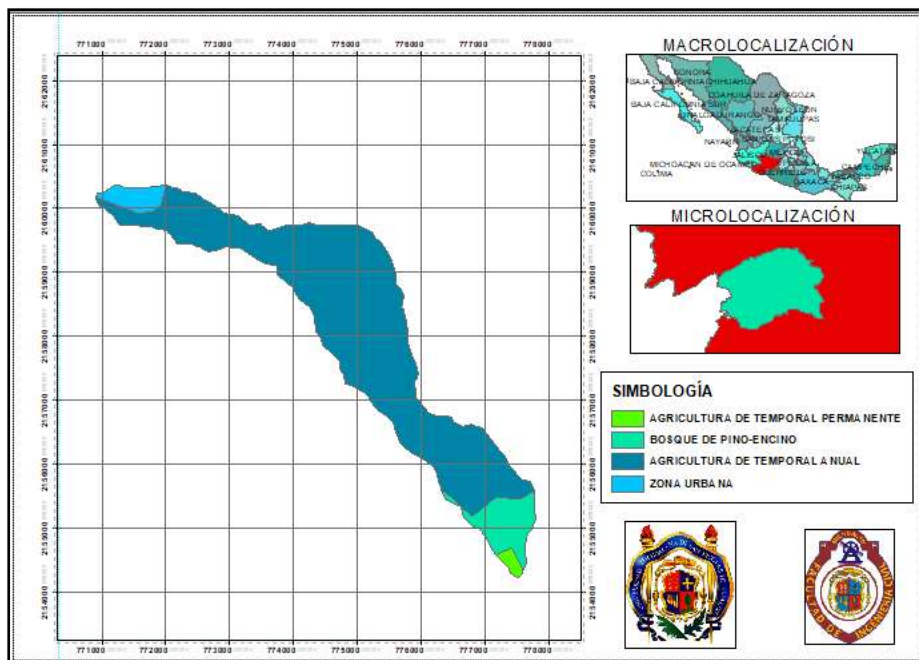


FIGURA 2-3 MAPA DE CUBIERTAS DE SUELO DE LA ZONA EN ESTUDIO

Durante los últimos treinta años, en Peribán, Michoacán, no se habían presentado desastres naturales como lo ocurrido el 23 de septiembre del 2018, hubo un desbordamiento de uno de los ríos muy cercanos al poblado, causando inundaciones y severos daños a la población.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) explicó que el desbordamiento del río Cutio en Peribán, Michoacán, que dejó al menos siete muertos, se debió a que la lluvia alcanzó 58 litros por metro cuadrado en dos horas, como resultado de una zona de inestabilidad que produjo la formación de nubes de tormenta de corta duración.

En un comunicado de prensa, destacó que la fuerte pendiente del afluente, que tiene un desnivel de mil 40 metros en tan solo 13 kilómetros, origina que los escurrimientos de las lluvias alcancen velocidades elevadas que llegan hasta los siete metros por segundo, es decir 25.2 kilómetros por hora.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



La Conagua agregó que el río Cutio también registró obstrucciones en su cauce, ubicadas en dos puentes y cuatro vados, lo que obstaculizó el flujo natural del agua, además de que hay cuatro sitios en donde las viviendas invaden los cauces del río y la zona federal.

Es importante mencionar que no existen grandes presas administradas por la Conagua en el sitio, ni tan poco pequeñas represas en la cuenca alta, como se ha mencionado.



FIGURA 2-4 COLONIA AFECTADA POR LA INUNDACIÓN DEL 23 DE SEPTIEMBRE DEL 2018, TIRINDITAS.

3. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

El presente estudio tiene como objetivos la determinación de la disponibilidad hídrica natural superficial de la cuenca del río Cutio, así como la determinación del gasto de diseño para las posibles obras a considerar. Para ambos estudios existen tres etapas muy bien definidas: la Cuenca, las Precipitaciones y los modelos que permitan determinar la disponibilidad hídrica o gasto de diseño. El estudio de la cuenca se centraliza en el entendimiento de las características geomorfológicas y su relación con su capacidad de almacenar, así como la velocidad de respuesta de la cuenca.

Dentro de las características esenciales para el uso como insumo posterior, es el área de la cuenca, pendiente de la corriente principal, Número de escurrimiento, Parámetro y tiempo de concentración.

El estudio de las precipitaciones está orientado además de determinar las curvas IDT (Intensidad, Duración, Periodo de retorno), en el entendimiento temporal y espacial de la precipitación.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



El estudio de las precipitaciones consta de varias etapas como son: la gestión de datos, el traslado de la precipitación diaria a horaria asociada a diferentes periodos de retornos, análisis espacial y temporal del régimen de lluvias. En la gestión de las precipitaciones se identifican tres pasos diferenciados: selección de las estaciones principales y secundarias, evaluación de la consistencia de las series de precipitaciones que puede ser básica y específica, llenado de los datos faltantes en las series de precipitación. En el traslado de la precipitación a horaria existe en la bibliografía diversos métodos, todos muy diferentes, con cierta complejidad. Luego de haber sido pasada la precipitación a horaria, es posible construir las curvas IDT (Intensidad, Duración, Periodo de retorno) útiles para elaborar la tormenta de diseño, así como posteriormente el gasto de diseño.

Dentro de los modelos que permiten determinar la disponibilidad, se hará uso de la Norma Mexicana para la obtención del coeficiente de escurrimiento y este a su vez permite el volumen de escurrimiento de la cuenca. Para la determinación del gasto de diseño se evalúan 4 modelos de lluvia escurrimiento, método Racional, método de Chow, Hidrograma Unitario Triangular y HEC-HMS.

3.1. HIDROLOGÍA

La hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas, físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos (Aparicio Mijares, 1992).

Aceptando esta definición, es necesario limitar la parte de la hidrología que se estudia en la ingeniería a una rama que comúnmente se llama ingeniería hidrológica o hidrología aplicada, que incluye aquellas partes del campo de la hidrología que atañen al diseño y operación de proyectos de ingeniería para el control y el aprovechamiento del agua.

El ingeniero que se ocupa de proyectar, construir o supervisar el funcionamiento de instalaciones hidráulicas debe resolver numerosos problemas prácticos de muy variado carácter. Por ejemplo, se encuentra con la necesidad de diseñar puentes, estructuras para el control de avenidas, presas, vertedores, sistemas de drenaje para poblaciones, carreteras y aeropistas y sistemas de abastecimiento de agua. Sin excepción, estos diseños requieren de análisis hidrológicos cuantitativos para la selección del evento necesario.

El objetivo de la hidrología aplicada es la determinación de esos eventos, que son análogos a las cargas de diseño en el análisis estructural por poner un ejemplo de la ingeniería civil.

Así mismo, la estabilidad de muros y terraplenes depende de los estudios hidrológicos e hidráulicos que definen los niveles probables de agua, así como la duración y cambios en el tiempo de dichos niveles. La hidrología juega también un papel importante en la operación efectiva de estructuras hidráulicas, especialmente aquellas que se destinan a la generación de energía y control de avenidas.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



3.1.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA

Los inicios de la hidrología se vinculan, por una parte, a las primeras obras de ingeniería de la antigüedad que servían para abastecer de agua a las ciudades o para regar campos de cultivo y, por otra parte, a los intentos de eminentes eruditos por comprender el medio físico que rodea al hombre.

Aunque existen algunas referencias en la literatura más antigua, aparentemente le correspondió a Pierre Perrault el gran mérito de demostrar con evaluaciones cuantitativas en su libro *De L'origine des fontaines*, publicado en 1674, que las precipitaciones y las nevadas son la causa del flujo en los ríos, con lo cual marcó la pauta para el reconocimiento universal del ciclo hidrológico en su interpretación moderna. Lo anterior justificó la decisión de aceptar la obra de Pierre Perrault como principio de la hidrología científica y de celebrar su tricentenario en 1974 (Aparicio Mijares, 1992).

3.1.2 CUENCA HIDROLÓGICA

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial. De ahí la aclaración de que la definición es válida si la superficie fuera impermeable (Aparicio Mijares, 1992).

Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas:

Endorreica: el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca.

Exorreica: el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar.

3.1.3 CARACTERÍSTICA DE LA CUENCA Y DEL CAUCE

Dichas características se clasifican en dos tipos, según la manera en que controlan los fenómenos mencionados: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendientes de la cuenca y los cauces, etc. A continuación, se describen las características de la cuenca y los cauces de mayor importancia por sus efectos en la relación precipitación-escurrimiento.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Parteaguas: es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas.

Área de la cuenca: se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas.

Corriente principal: es la corriente que pasa por la salida de la misma (definición válida solo para las cuencas exorreicas). Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y solo una corriente principal.

La cuenca en estudio se encuentra ubicada al sur del municipio de Peribán, Michoacán. La cual cuenta con la corriente principal Cutio, misma que se analiza más adelante.

Para la determinación de las características de la cuenca es necesario primero generar la cuenca en el punto de estudio, esto es trazar el parteaguas al punto indicado, que en este caso le llamamos punto de salida, éste ubicado en la parte más baja de la topografía y salida de la corriente principal de la cuenca en estudio.

Para la delimitación de la cuenca se utilizó el programa de ArcGIS, el cual permite trabajar con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y facilita su interpretación al poder presentarlos en mapas y resultados.

Para utilizar y delimitar con este software fue necesario principalmente obtener el modelo digital de elevaciones (MDE) el cual, es un mapa que contiene la información topográfica de la zona de interés. Este a su vez se obtuvo de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



3.1.4 PARTEAGUAS

Como ya se mencionó en el subcapítulo 3.1.3, el parteaguas es una línea imaginaria que divide cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento producido por la precipitación. Éste también nos define el área de la cuenca, la cual es una proyección en planta de la superficie que abarca el parteaguas, con este parámetro podemos clasificar las cuentas según su área en diferentes tamaños (TABLA 3-1).

TABLA 3-1 CLASIFICACIÓN DE CUENCAS SEGÚN SU TAMAÑO (INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA, 2004)

Tamaño de la cuenca (km2) Clasificación	
<25	Muy pequeña
25-250	Pequeña
250-500	Intermedia pequeña
500-2,500	Intermedia grande
2,500-5,000	Grande
>5,000	Muy grande

La cuenca del río Cutio en estudio cuenta con un área de 8.46 kilómetros cuadrados, lo que de acuerdo a la tabla 3-1 se clasifica en una cuenca muy pequeña pero que genera muchos problemas a pesar de su área (Figura 3-1).

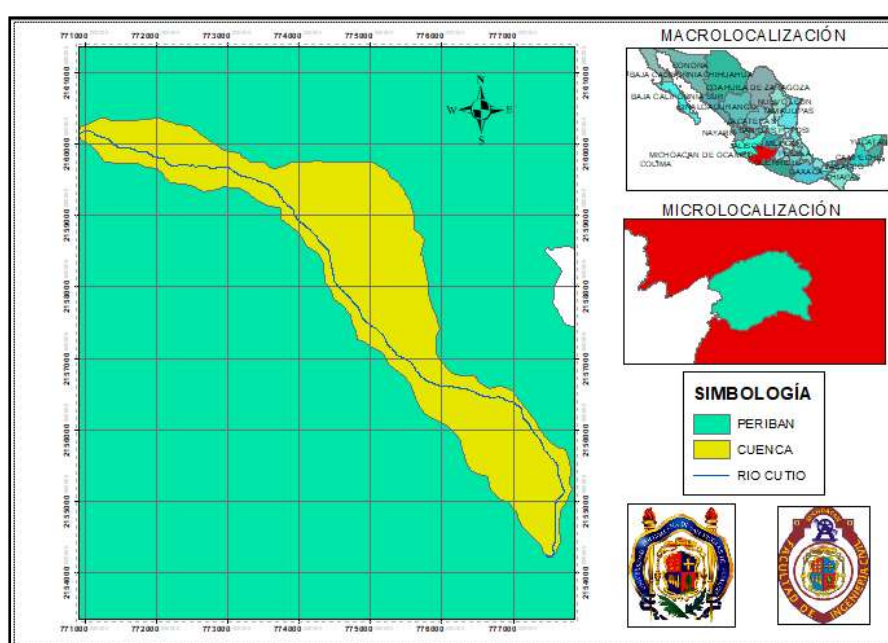


FIGURA 3-1 ÁREA DE LA CUENCA EN ESTUDIO



3.1.5 PENDIENTE DEL CAUSE PRINCIPAL

La pendiente del cauce, es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una tormenta. Dado que la pendiente varía a lo largo del cauce, es necesario definir una pendiente media; para ello existen varios métodos de los cuales se hicieron uso de los dos siguientes:

3.1.2.1 PENDIENTE MEDIA

Existen diversos criterios para determinar la pendiente de un cauce, de entre ellos el más simple es el de la pendiente media. Es igual al desnivel entre los extremos de la corriente, dividido entre la longitud del cauce.

$$S = \frac{H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}}}{L_c}$$

Ecuación 1

Donde $H_{\text{máx}}$ y $H_{\text{mín}}$ son elevaciones máximas y mínimas respectivamente del cauce principal y L_c es la longitud total del mismo.

3.1.2.2 PENDIENTE DE TAYLOR Y SCHWARTZ

El criterio más aceptado es la ecuación de “Taylor y Schwarz”, en el cual se propone calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme que tenga una longitud y tiempo de recorrido equivalentes a la del cauce. Para esto se divide el perfil del cauce en tramos iguales como se muestra en la figura siguiente: (APARICIO MIJARES, 1992).

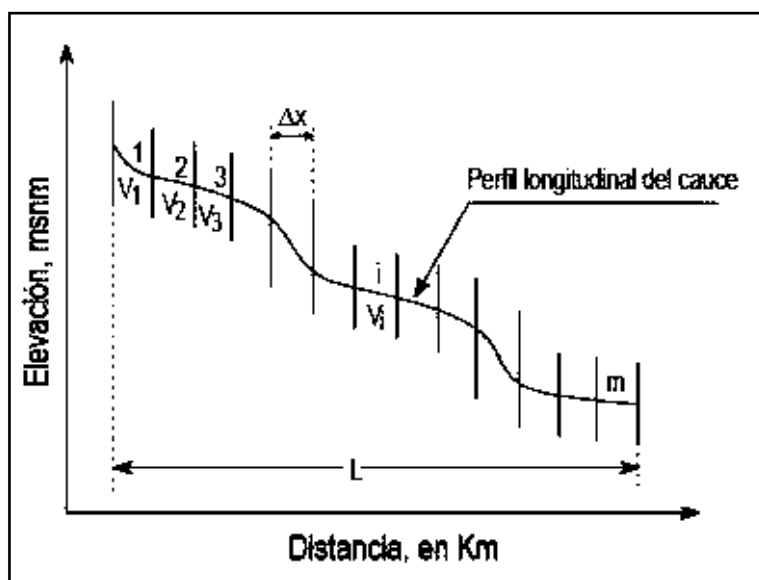


FIGURA 3-2 PENDIENTE DEL CAUSE PRINCIPAL



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



De acuerdo a un procedimiento detallado de distintas fórmulas y despejando S (pendiente) se llega a una ecuación final:

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_1}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_{m1}}}} \right]^2$$

Ecuación 2

Donde:

S = pendiente del cauce.

Si = pendiente del tramo i del cauce.

m = número de tramos en que se subdivide el cauce.

Se consideró utilizar este método para calcular la pendiente media del cauce, ya que es el más preciso, obteniendo así los siguientes resultados:

Tabla 3-2 DATOS GENERALES DE LA CUENCA EN ESTUDIO

PROPIEDADES GEOGEOMORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS		
PARAMETRO	VALOR	
ÁREA (km ²)	8.46	
PERÍMETRO (km)	21.37	
Elevación máxima (msnm)	2540.00	
Elevación mínima (msnm)	1598.00	
Pendiente del cauce	0.06	
Longitud del cauce (km)	10.92	
Centroide de la cuenca	x	y
	775017.78	2157882.00



3.1.6 PRECIPITACIÓN

La precipitación es un fenómeno físico que consiste en la transferencia de volúmenes de agua, en sus diferentes formas (lluvia, nieve, granizo, etc.) de la atmósfera a la superficie terrestre. El proceso de generación de la precipitación involucra la humedad en la atmósfera la cual es influenciada por factores climáticos tales como el viento, la temperatura y la presión atmosférica. La humedad de la atmósfera es necesaria pero la precipitación no ocurre si no se tiene la suficiente condensación.

Las masas de aire continental por lo general contienen muy poca humedad, por lo que la mayoría de la precipitación proviene de corrientes de aire húmedo que se genera sobre los océanos (APARICIO MIJARES 1992).

3.1.2.1 Tipos de Precipitación

Los principales tipos de precipitación son:

1. **Llovizna:** es un riego tenue compuesto exclusivamente de pequeñas gotas de agua de tamaños bastante uniforme. Las gotas son tan pequeñas que parecen flotar en el aire y siguen las evoluciones del movimiento de éste. Además, deben cumplir el requisito de que sean muy numerosas y encontrarse muy próximas unas de otras.
2. **Lluvia:** es una precipitación de agua líquida en la que las gotas son más grandes que las de la llovizna. Cuando hay viento en superficie puede apreciarse que la trayectoria de caída de las gotas sufre una inclinación en la dirección de éste.
3. **Nieve:** es precipitación de agua en estado sólido en forma de cristales de hielo, en su mayor parte ramificados. Aún a temperaturas inferiores a las de congelación, estos cristales están rodeados de una delgada capa líquida, y cuando chocan unos contra otros quedan soldados constituyendo grandes copos.
4. **Aguanieve** mezcla de nieve y lluvia.
5. **Lluvia congelante:** cuando la humedad ambiente ya condensada se precipita en forma líquida, a través del aire frío. Al chocar contra el suelo o la superficie de los objetos expuestos a la intemperie (con temperaturas inferiores a 0°C), el agua se congela dando como resultado la formación de una capa de hielo glaseado.



6. **Granizo:** cuando se presentan nubes de tormenta de gran desarrollo vertical, la gota de lluvia generada dentro de la nube es arrastrada hacia niveles superiores donde las temperaturas son inferiores a 0°C y se congela. Al caer se va fundiendo, pero en su camino puede chocar nuevamente con las corrientes ascendentes que la llevarán a zonas de congelación, aumentando su tamaño repetidas veces hasta que por su propio peso caerán a superficie. Por el gran tamaño que adquirieron, en su reiterado proceso de congelación, no alcanzarán a fundirse por completo al llegar al suelo y por lo tanto se presentarán en estado sólido con la dureza del hielo. Son comúnmente llamadas piedras de granizo o pedrisco.

3.1.2.2 MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

Debido a que la precipitación ocurre en un espacio geográfico, resulta más conveniente expresarla en términos de una altura de lámina de agua, en mm. Sin embargo, es necesario suponer que se distribuye uniformemente sobre un área unitaria. Esto no es necesariamente cierto, ya que es común, aún en eventos de poca extensión, notar diferencias en la cantidad de agua precipitada. Pero, para fines prácticos y con el objeto de facilitar el análisis, se asume el principio de uniformidad (APARICIO MIJARES, 1992).

Los aparatos más usuales en México para medir la precipitación son los pluviómetros y los pluviógrafos.

Los pluviómetros están formados por un recipiente cilíndrico graduado de área transversal a al que descarga un embudo que capta el agua de lluvia, y cuya área de captación es A (Figura 3-3). Se acostumbra colocar en el embudo un par de mallas para evitar la entrada de basura u otros objetos. El área de captación A es normalmente diez veces mayor que el área del recipiente a , con el objeto de que, por cada milímetro de lluvia, se deposite un centímetro en el recipiente. En México se acostumbra a tomar lecturas de los pluviómetros diariamente a las 8 de la mañana.

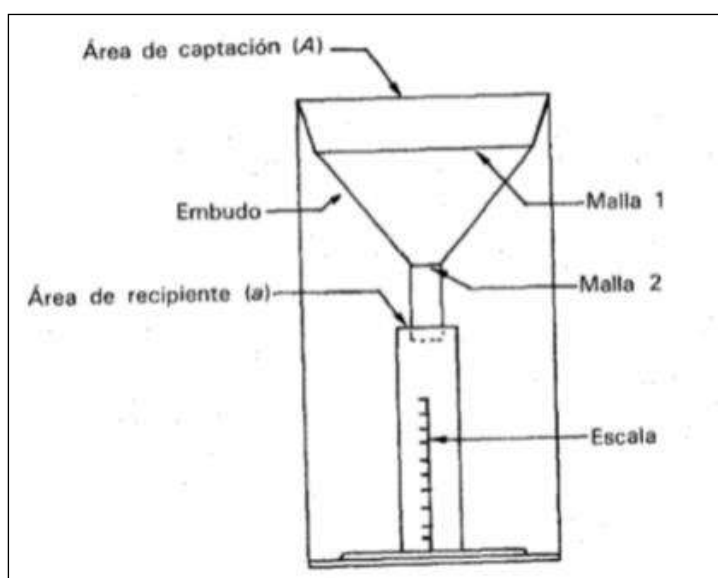


FIGURA 3-3 ESQUEMA DE UN PLUVIÓMETRO (ARANDA D. F., 2010)



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Los pluviógrafos son semejantes a los pluviómetros, con la referencia que tienen un mecanismo para producir un registro continuo de precipitación.

Este mecanismo está formado por un tambor que gira a la velocidad constante sobre el que se coloca un papel graduado especialmente. En el recipiente se coloca un flotador que se une mediante un juego de varillas a una plumilla que marca las alturas de precipitación en el papel (FIGURA 3-4). El recipiente normalmente tiene una capacidad de 10 mm de lluvia y, al alcanzarse esta capacidad, se vacía automáticamente mediante un sifón (Figura 3-4).

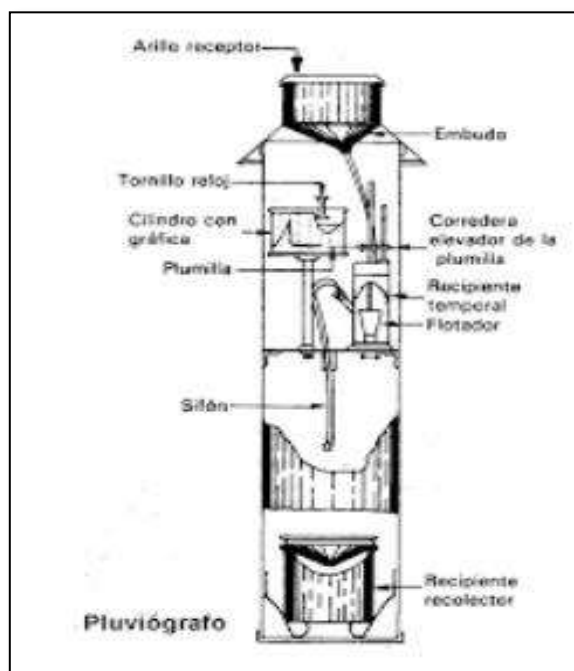


FIGURA 3-4 PLUVIÓGRAFO UTILIZADO EN LA REPÚBLICA MEXICANA (ARANDA D. F., 2010)

El pluviógrafo antes descrito es el de uso más común en México, aunque existen otros tipos en el mundo (APARICIO MIJARES, 1992).

Para el análisis estadístico de la precipitación es importante verificar la independencia, homogeneidad, aleatoriedad y estacionalidad. Así como un criterio de selección basado en un porcentaje de vacíos encontrado en el registro de datos de un pluviómetro (Base de Datos CLICOM). A demás de revisar ciertos parámetros que también son importantes para la validación de datos.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



3.1.2.3 SELECCIÓN DE ESTACIONES

La identificación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas útiles para el desarrollo del estudio en la cuenca del río Cutio, no es sencillo, requiere un análisis espacio temporal de la información básica de todas las estaciones meteorológicas e hidrométricas dentro y cercanas a la cuenca.

Para obtener esta información se consultó la base de datos CLICOM (Clima Computarizado) (CLICOM, 2017) la cual utiliza la base de datos de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), obteniendo de esta manera datos de precipitación diarias para su posterior análisis estadístico y de correcciones. Estas series de precipitación se procesaron para determinar las tablas de lluvias totales mensuales y lluvias máximas mensuales.

La cuenca de Cutio no cuenta con estaciones dentro de la cuenca, cuenta con estaciones fuera de la cuenca (muy cercana) con información en el tiempo; se preseleccionaron 10 estaciones y finalmente se seleccionaron 2 estaciones como estaciones principales. Estas estaciones son evaluadas a escala anual en su consistencia. Luego de evaluar la consistencia se completó las series llenando los vacíos de las series totales mensuales, esto con la finalidad de llenar los vacíos de las series mensuales máximas. Finalmente se validó el llenado de las estaciones principales.

Por otro lado, también es necesario evaluar el régimen de lluvias, esto es identificar las épocas lluviosas y de sequía; para finalmente realizar un análisis probabilístico de las lluvias máximas con el fin determinar la tormenta de diseño.

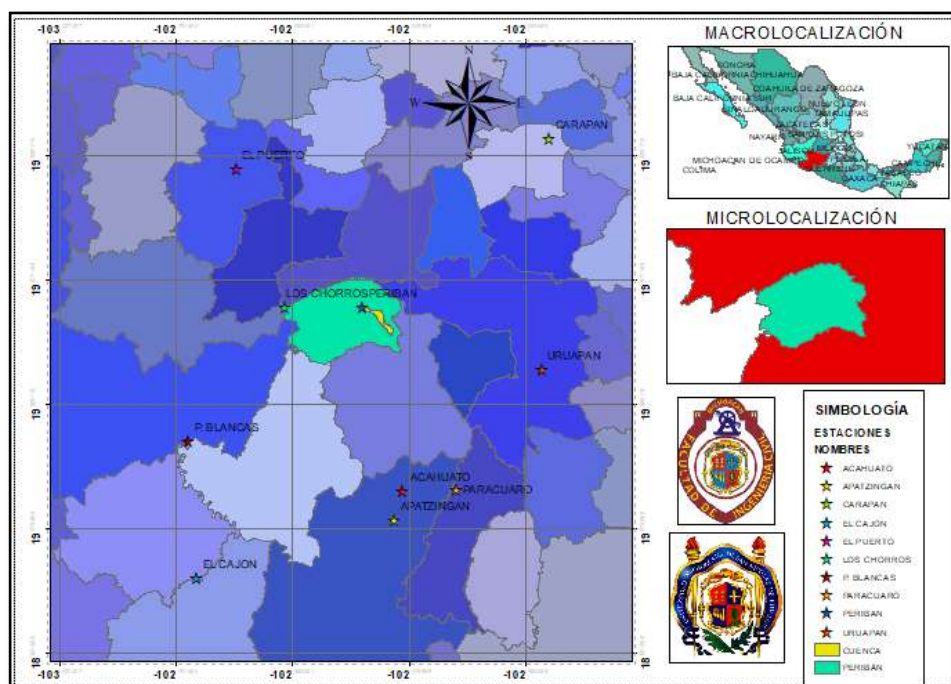


FIGURA 3-5 MAPA DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Las 10 estaciones meteorológicas de la (Tabla 3-3) son las que se encuentran alrededor de la cuenca (FIGURA 3-6). De todas las estaciones hay que seleccionar al menos una estación que sea utilizada como estación principal y sea representativa de la cuenca. Esta selección no es sencilla por lo que se recurre a procedimientos que permitan eliminar estaciones. La información de precipitación diaria de las 10 estaciones, se organizó en dos tipos de tablas, precipitación total mensual y precipitación máxima diaria mensual.

Primero se evaluó temporalmente los datos de precipitación de la estación meteorológica, en base a variables básicas como: el número de años con información, porcentaje de vacíos, periodo de información, y la distancia al centro de gravedad de la cuenca (esta última variable es un inicio del análisis espacial). De esta primera selección basada en el análisis temporal, se obtuvieron cuatro probables estaciones principales: 16088, 16228, 16072, 16165.

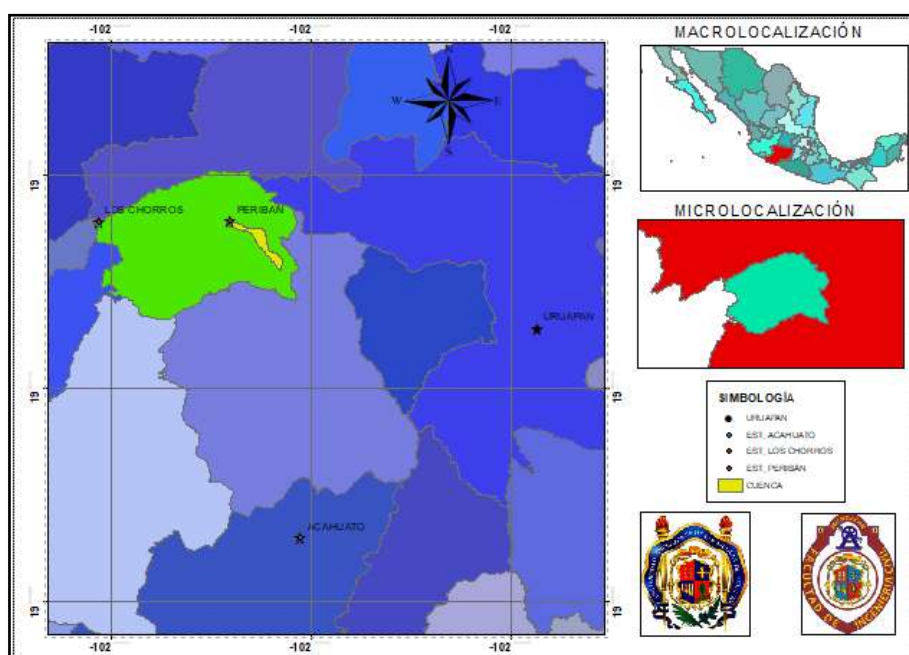


FIGURA 3-6 MAPA DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DE LA PRIMERA SELECCIÓN.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Tabla 3-3 LISTADO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA CUENCA

CLAVE	NOMBRE	UBICACIÓN COORDENADAS UTM			% DE VACIOS	AÑOS CON INFORMACIÓN	DISTANCIA AL CENTRO DE CUENCA	PERIODO DE REGISTRO
		X	Y	Z				
16088	PERIBÁN	771284.8234	2160533.566	1640	8.3	29	4.58	1969-1998
16228	ACAHUATO	780585.3755	2119324.811	227	1.5	34	38.96	1981-2015
16085	PARACUARO	791895.9195	2119744.863	597	23.7	45	41.7	1970-2015
16007	APATZINGAN	778758.7244	2112739.505	320	2.8	89	45.29	1926-2015
16072	LOS CORROS	754980.5857	2160173.162	930	9.5	29	20.17	1965-1994
16090	PIEDRAS BLANCAS (CFE)	734584.6085	2129631.139	400	12.7	38	49.32	1964-2002
16165	URUAPAN	809654.9483	2147181.419	1611	6.7	36	36.25	1963-1999
16015	CARAPAN	810303.9635	2198749.571	1940	28.2	58	53.99	1949-2007
16043	EL PUERTO	744055.5998	2191152.756	1640	11.6	69	45.45	1943-2012
16158	EL CAJON	736901.8825	2099109.248	296	30.3	63	70.05	1952-2015

De las cuatro estaciones previamente seleccionadas y cercanas a la cuenca, solo se trabajará con dos de ellas, la principal o de estudio 16088 (Peribán), que es la más cercana a la cuenca. La secundaria 16228 (Acahuato) que, al ser evaluada temporalmente, cuenta con todas las características a favor para hacer un análisis y consistencia de datos de dichas estaciones, así como la deducción de datos faltantes de la estación principal (Figura 3-7).



FIGURA 3-7 ESTACIÓN PRINCIPAL 16088 (PERIBÁN)

TABLA 3-4 DATOS DE LAS ESTACIONES, PRINCIPAL (PERIBÁN) Y ESTACIÓN SECUNDARIA (ACAHUATO).

CLAVE	NOMBRE	UBICACIÓN COORDENADAS UTM			% DE VACIOS	AÑOS CON INFORMACIÓN	DISTANCIA AL CENTRO DE CUENCA	PERIODO DE REGISTRO
		X	Y	Z				
16088	PERIBÁN	771284.8234	2160533.57	1640	8.3	29	4.58	1969-1998
16228	ACAHUATO	780585.3755	2119324.81	227	1.5	34	38.96	1981-2015



3.1.2.1.3 HOMOGENEIDAD DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN

Las características estadísticas de una serie hidrológica (media, desviación estándar, etc.) pueden sufrir pérdida de homogeneidad, lo cual es producido por actividades humanas y procesos naturales dentro de la cuenca, tales como: deforestación, rectificación de cauces, construcción de embalses, incendios forestales, erupciones volcánicas. Existen pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos, las cuales presentan una hipótesis nula y una regla para ser aceptada o rechazada. A continuación, se describe una de ellas, utilizada en esta investigación.

Prueba estadística t de Student

Cuando la causa probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, esta prueba es muy útil. Si se considera una serie Q_i^j para $i=1, 2, \dots, n_j$, del sitio j, la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$, entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

$\bar{x}_1, s_1^2$ son la media y varianza de la primera parte del registro de tamaño n.

$\bar{x}_2, s_2^2$ son la media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño n.

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas, y con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$.

Sí y solo si, el valor absoluto de t_d es mayor que aquel de la distribución t de Student (Tabla 5-5), se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie Q_i^j se considera no homogénea.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Tabla 3-5 Tabla de cuantiles de la distribución t de

gl	ÁREA DE DOS COLAS						
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001	0,0001
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619	6366,198
2	1,886	2,920	4,303	6,695	9,925	31,598	99,992
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924	28,000
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610	15,544
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869	11,178
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959	9,082
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408	7,885
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041	7,120
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,721	6,594
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,507	6,211
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437	5,921
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318	5,694
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221	5,513
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140	5,363
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073	5,239
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015	5,134
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965	5,044
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922	4,966
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883	4,897
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850	4,837
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819	4,784
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792	4,736
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767	4,693
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745	4,654
25	1,316	1,709	2,060	2,485	2,787	3,725	4,619
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707	4,587
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690	4,558
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674	4,530
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659	4,506
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646	4,482
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551	4,321
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460	4,169
100	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	3,390	4,053
140	1,288	1,656	1,977	2,353	2,611	3,361	4,006
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291	3,891

Tal como se manifestó anteriormente se debe comprobar la homogeneidad de la cuenca en estudio, para establecer si ha sufrido algún cambio en su fisiografía que pueda haber alterado su respuesta a los impulsos hidrológicos en el transcurso del tiempo o, si en los eventos hidrológicos de la muestra, hay más de una población (debido a precipitaciones de diversos orígenes: orográfico, ciclónico, etc.). Aplicando la prueba de t Student, tenemos los siguientes resultados.

Tabla 3-7 Pruebas de Homogeneidad Peribán

PERIBAN	
1057.8	1254
1469.2	1244.5
1511.4	1168.2
1340.3	1421.5
1547.3	1289.5
863.2	1618
1185.5	1683
999.3	1635.5
1271.9	2197
1650.1	2346
	1423.3
MEDIA	1289.60
DESV.EST	260.63

Tabla 3-6 Pruebas de Homogeneidad Acahuato

ACAHUATO	
1116.6	1006.00
924	1106.50
1028.8	898.80
1135.4	917.70
1171.6	976.00
962.3	1142.00
1213.3	977.00
1180	952.00
685.5	814.00
913.5	1109.00
699	1288.70
1257	616.00
755	1441.00
726	1063.40
1368.8	705.10
766.5	1367.00
MEDIA	993.96
DESV.EST	221.42



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



TABLA 3-8 TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE HOMOGENEIDAD (T STUDENT).

	td	g	Área de dos C. (5%)	
PERIBAN	1.8373	19	2.093	HOMOGENEA
ACAHUATO	0.3680	30	2.042	

Se concluye de esta manera que las dos muestras en estudio Peribán y Acahuato son homogéneas.

3.1.2.1.4 PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE EVENTOS

Para que se pueda llevar a cabo el análisis de frecuencias se requiere que la muestra Q_i^j de la serie j para $i=1, 2, \dots, n_j$, esté compuesta por variables aleatorias. Para probarlo se aplica la prueba de independencia de los Límites de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k^j para diferentes tiempos de retraso k . Si se analiza un solo registro, entonces $j=1$.

La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación serial de retraso k es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)(Q_{i+k}^j - \bar{Q}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para $r_0^j = 1$ y $k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3}$

Donde

$$\bar{Q}^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} Q_i^j}{n_j} \quad \text{Ecuación 5}$$

Además, los límites al 95% de confianza para r_k^j se pueden obtener como:

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k} \quad \text{Ecuación 6}$$

La gráfica de los valores estimados para r_k^j (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra. Si y solo si, el 10% de los valores r_k^j sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie Q_i^j es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



De acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 3.1.2.1.4, la condición indispensable para que las muestras puedan ser modeladas mediante análisis de frecuencia, es que estén formadas por variables aleatorias. Aplicando la prueba de independencia de los Límites de Anderson, se tienen para las dos muestras, los siguientes resultados:

TABLA 3-9 CORRELOGRAMA DE LA MUESTRA DE LA ESTACIÓN PERIBÁN

AÑO	P	Pk1	Pk2	Pk3	Pk4
1982	999.3	1271.9	1650.1	1254	1244.5
1983	1271.9	1650.1	1254	1244.5	811.3
1984	1650.1	1254	1244.5	811.3	1168.2
1985	1254	1244.5	811.3	1168.2	811.3
1986	1244.5	811.3	1168.2	811.3	1421.5
1987	811.3	1168.2	811.3	1421.5	1289.5
1988	1168.2	811.3	1421.5	1289.5	1618
1989	811.3	1421.5	1289.5	1618	1683
1990	1421.5	1289.5	1618	1683	1635.5
1991	1289.5	1618	1683	1635.5	2197
1992	1618	1683	1635.5	2197	2346
1993	1683	1635.5	2197	2346	1423.3
1994	1635.5	2197	2346	1423.3	
1995	2197	2346	1423.3		
1996	2346	1423.3			
1997	1423.3				

TABLA 3-10 RESULTADOS DE INDEPENDENCIA, LÍMITES DE ANDERSON. PERIBÁN

	X	Y	X*Y	X^2	β	σ_x	σ_y	ρ	Lk	
1	21401.10	21825.10	32539540.43	33280833.73	0.510	442.96	426.98	0.53	0.433	-0.576
2	19055.10	20553.20	28911506.02	27777117.73	0.509	376.38	439.97	0.44	0.458	-0.625
3	16858.10	18903.10	24953886.68	22950308.73	0.405	301.26	454.67	0.27	0.488	-0.688
4	15222.60	17649.10	22640468.59	20275448.48	0.261	296.16	470.72	0.16	0.523	-0.773

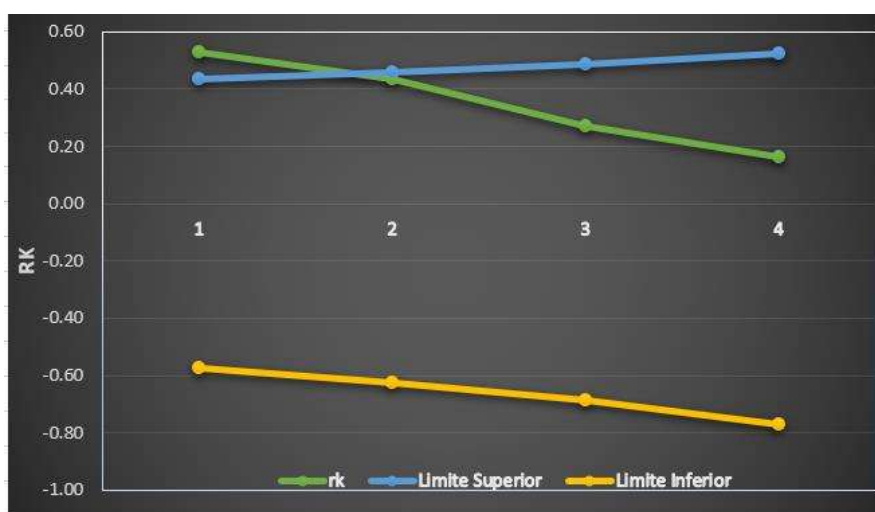


FIGURA 3-8 GRÁFICO DEL RK Y LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR (PERIBÁN).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



TABLA 3-11 CORRELOGRAMA DE LA MUESTRA DE LA ESTACIÓN ACAHUATO

AÑO	P	Pk1	Pk2	Pk3	Pk4
1998	1006	1106.5	898.8	917.7	976
1999	1106.5	898.8	917.7	976	1142
2000	898.8	917.7	976	1142	977
2001	917.7	976	1142	977	952
2002	976	1142	977	952	814
2003	1142	977	952	814	1109
2004	977	952	814	1109	1288.7
2005	952	814	1109	1288.7	616
2006	814	1109	1288.7	616	1441
2007	1109	1288.7	616	1441	1063.4
2008	1288.7	616	1441	1063.4	705.1
2009	616	1441	1063.4	705.1	1367
2010	1441	1063.4	705.1	1367	881.5
2011	1063.4	705.1	1367	881.5	838.8
2012	705.1	1367	881.5	838.8	
2013	1367	881.5	838.8		
2014	881.5	838.8			
2015	838.8				

Tabla 3-12 Resultados de independencia, Límites de Anderson. Acahuato

	X	Y	X*Y	X^2	β	σ_x	σ_y	ρ	Lk	
1	17261.70	17094.50	16967359.80	18286844.49	-0.514	217.86	222.05	-0.5043	0.412	-0.537
2	16380.20	15988.00	16218771.10	17509802.24	-0.201	222.17	227.75	-0.1965	0.433	-0.576
3	15013.20	15089.20	15498158.26	15641113.24	0.644	209.54	234.11	0.5761	0.458	-0.625
4	14308.10	14171.50	14168931.29	15143947.23	-0.604	200.19	241.62	-0.5001	0.488	-0.688

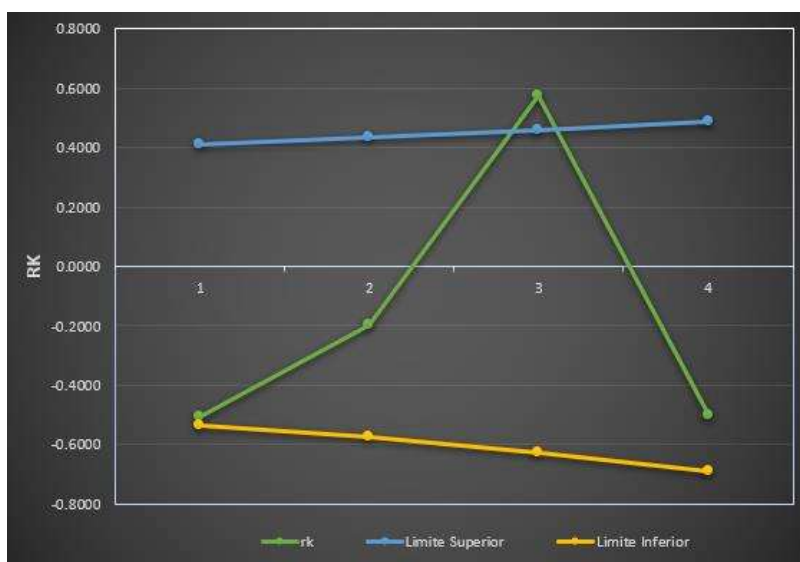


FIGURA 3-9 GRÁFICO DEL RK Y LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR (ACAHUATO).

De esta manera se concluye que las dos muestras en estudio la principal, Peribán y la secundaria, Acahuato, son independientes, por lo tanto, se les puede aplicar el análisis de frecuencia.



3.1.2.4 LLENADO DE DATOS FALTANTES PRECIPITACIÓN

Es muy común que los registros están incompletos, faltando uno o varios meses seguidos, en uno o más años incompletos. Siempre es conveniente estimar los valores ausentes; sin embargo, el alcance o nivel de estudio nos llevará o no a un llenado de datos faltantes.

Luego de decidir la deducción de datos faltantes los principales factores que influye en el procedimiento de deducción de tales datos son los siguientes: número de datos faltantes y su distribución, disponibilidad de los datos faltantes en la estación principal y secundaria, tipo de análisis estadístico en que será utilizado el registro incompleto.

La disponibilidad de los datos faltantes es suficiente, al contar con un número suficiente de estaciones secundarias, llegando en el peor de los casos a contar sólo con una estación, como es en este caso, con la que se realizará la correlación espacial para el llenado.

El tipo de análisis para el que se requiere es para determinar la disponibilidad hídrica media anual y mensual y la tormenta de diseño. Para la disponibilidad hídrica se requiere la estimación de los datos faltantes de las series totales mensuales; y para la tormenta de diseño se requiere la estimación de los datos faltantes de las series máximas diarias.

El llenado de datos faltantes es necesario para completar los vacíos que tienen las dos estaciones, la principal y la secundaria. Este llenado se realiza para las series de la precipitación totales mensuales y series máximas diarias.

El procedimiento del llenado de datos, se llevó a cabo con el método de correlación espacial, el cual se escribe a continuación:

3.1.2.1.5 REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Uno de los modelos más simples y comunes en la hidrología está basado en la suposición de que dos variables se relacionan en forma lineal. En general el objetivo de un modelo de esta naturaleza es poder estimar el valor de una variable, que se denomina variable dependiente, a partir del valor de la otra, que se llama variable independiente (APARICIO MIJARES, 1992).

- Primero se debe encontrar la ecuación de regresión lineal simple, sustituyendo valores de las precipitaciones mensuales y máximas diarias.

$$y = \alpha + \beta x$$

Ecuación 7

Donde

$$\alpha = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$\beta = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

Alfa y beta se denominan ecuaciones normales y parámetros a calcular.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



- Una vez encontrada la ecuación de regresión lineal simple, hacer el llenado de datos faltantes, siempre y cuando se cumpla lo siguiente: si solo son dos o menos datos (para el llenado mensual o para el llenado de máximas diarias) en el que hace falta dato, se llena con la ecuación de regresión lineal simple. Si hacen falta tres o más datos, simplemente se descarta todo el año.

3.1.7 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

En general, la altura de lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos. Los apartados descritos en el subcapítulo 5.4.2 registra la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en el que está instalado el aparato y, para los cálculos ingenieriles, es necesario conocer la *lluvia media* en una zona dada, como puede ser una cuenca (APARICIO MIJARES, 1992).

Para calcular la lluvia media de una tormenta dada, existen tres métodos de uso generalizado:

a) MÉTODO ARITMÉTICO

Consiste simplemente en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usada en el análisis:

$$Pm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Pm_i$$

Ecuación 8

Donde

Pm es la altura de precipitación media.

Pm_i es la altura de precipitación registrada en la estación i .

n es el numero de estaciones bajo análisis.

b) POLÍGONOS DE THIESSEN

Este método asigna pasos a cada medición de acuerdo al área que cada pluviómetro representa dentro de la cuenca. Este criterio es adecuado cuando los efectos orográficos de la precipitación son despreciables y la red de pluviómetros no está distribuida uniformemente.

Este método consiste en lo siguiente:

1. Unir, mediante líneas rectas dibujadas en un plano de la cuenca, las estaciones más próximas entre sí (líneas discontinuas en la Figura 3-10). Con ello se forman triángulos en cuyos vértices están las estaciones pluviométricas.
2. Trazar líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos (líneas rectas continuas en la Figura 3-10). Por geometría elemental, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto.
3. Cada estación pluviométrica quedará rodeada por las líneas rectas del paso del paso 2, que forman los llamados polígonos de Thiessen (Figura 3-10), y en algunos casos, en parte por el parteaguas de la cuenca (Figura 3-10).

El área encerrada por los polígonos de Thiessen y el parteaguas será el *área de influencia* de la estación correspondiente.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



4. La lluvia media se calcula entonces con un promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente:

$$Pm = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i Pm_i$$

Ecuación 9

Donde A_i es el área de influencia de la estación i y A_T es el área total de la cuenca.

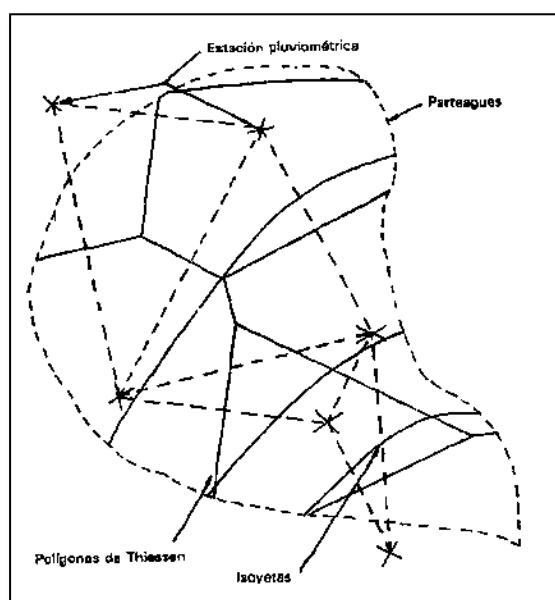


FIGURA 3-10 DETERMINACIÓN DE POLÍGONOS DE THIESSEN (APARICIO MIJARES, 1992).

Para la cuenca se obtuvieron los polígonos de Thiessen con apoyo de extensiones en el entorno de ArcMap, los resultados espaciales se representan en el mapa de la Figura 3-11.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

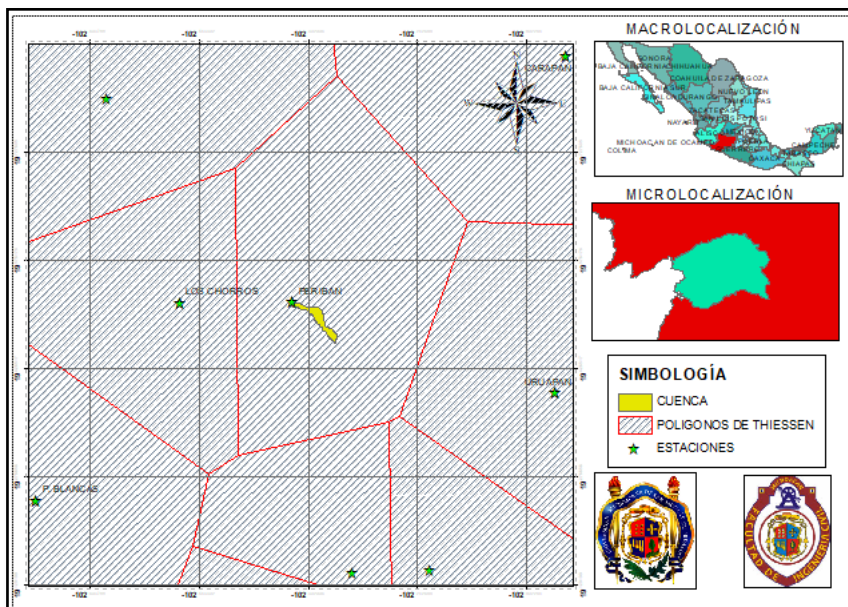


FIGURA 3-11 PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA POR POLÍGONOS DE THIESSEN

c) MÉTODO DE LAS ISOYETAS

Con base a las mediciones de precipitaciones se trazan líneas continuas de igual magnitud, (isoyetas) y entonces la ponderación que se asigna al valor de la precipitación entre isoyetas es el área entre tales curvas y la divisoria de la cuenca. El método es adecuado para grandes cuencas, especialmente aquella con efectos orográficos importantes. Este método es muy laborioso, pero con extensiones de interpolación en ArcMap se simplifica el trabajo.

Este método consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación llamadas *isoyetas*, de modo semejante a como se trazan las curvas de nivel en topografía.

La precipitación media se calcula en forma similar a la ecuación 9, pero ahora el peso es el área A'_i entre cada dos isoyetas y el parteaguas de la cuenca y la cantidad que se pesa es la altura de precipitación promedio entre dos isoyetas, Pm_i (Aparicio Mijares, 1992):

$$Pm = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} (Pm_i A'_i) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde n' es el número de áreas A'_i consideradas.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

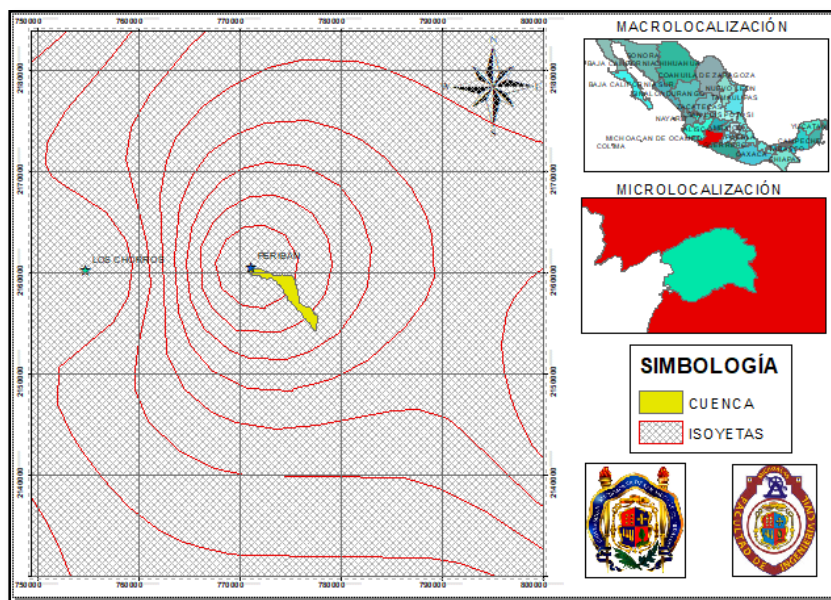


FIGURA 3-12 PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA POR ISOYETAS

El método aritmético es el más simple de todos, pero no toma en cuenta la distribución de las estaciones en la cuenca ni la manera en que se distribuye la lluvia en el espacio, pues les asigna el mismo peso a todas las alturas de precipitación registradas; por ello, es útil únicamente en zonas con topografía muy suaves y condiciones atmosféricas muy uniformes, o bien para tener solo una idea aproximada de la altura de precipitación media.

Por el contrario, el método de los polígonos de Thiessen sí toma en cuenta la distribución de las estaciones en el área de la cuenca, pero no los factores topográficos y de otro tipo que afectan a la distribución de la lluvia; este método es, sin embargo, más conveniente que el de las isoyetas desde el punto de vista práctico, particularmente para cálculos repetitivos, como cuando se analiza una gran cantidad de tormentas, pues los polígonos no cambian a menos que se agreguen o se eliminan estaciones.

El más preciso de todos es el método de las isoyetas si éstas se dibujan de manera que tomen en cuenta los efectos topográficos en la distribución de la lluvia, para lo que es necesario tener cierta experiencia. Por otra parte, es el método más laborioso de los tres, pues cada tormenta tiene un plano de isoyetas diferente. Si las isoyetas se trazan indiscretamente, por ejemplo, suponiendo una variación lineal de la altura de precipitación entre las estaciones, su presencia no es mayor que la de los polígonos de Thiessen.

La altura de precipitación media calculada depende, en general, del número de estaciones pluviométricas o pluviográficas que se usan en el análisis; entre menor sea el número de estaciones, mayor será el error cometido en la estimación de la precipitación media (Aparicio Mijares, 1992).



3.1.8 TORMENTA DE DISEÑO

Se tiene la necesidad de contar con una tormenta de diseño porque los métodos estadísticos tienen la desventaja de que únicamente permiten estimar el pico de la avenida de diseño lo cual es muy poco confiable dado que los registros históricos rara vez son mayores de 50 años y al asignar un período de retorno a la avenida de diseño se deja siempre una probabilidad de falla la cual resulta inadmisibles para los proyectos de obras hidráulicas. En sustitución de estos métodos no confiables tenemos los métodos hidrometeorológicos, aquellos que primero se determina una tormenta de diseño a partir de la cual, mediante un modelo precipitación-escorrentía, se obtiene la avenida de diseño. Tiene la ventaja de que ellos pueden tomarse en cuenta las características de la cuenca y el efecto de regulación de las obras que se construyan en ella, lo que es muy importante en el caso de presas construidas en serie sobre el mismo río.

3.1.9 MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE LA TORMENTA DE DISEÑO

La determinación de la tormenta de diseño se realiza según los pasos que a continuación se mencionan:

- a) Con base a la información existente en la zona relativa a duraciones de tormenta, se seleccionan las duraciones críticas para el proyecto en estudio.
- b) Se analiza la información histórica de grandes tormentas ocurridas en la cuenca a fin de determinar las características típicas de las que puedan presentarse en la zona. Aun cuando no es regla general, se pueden clasificar como grandes, las 10 mayores tormentas ocurridas en la cuenca.
- c) Se recopila información histórica de grandes tormentas ocurridas en cualquier sitio, pero con las características típicas de las que pudieran presentarse en la zona.
- d) Identificar los tres parámetros de una tormenta, magnitud, duración y la recurrencia con la que se repite un evento igual también conocido como periodo de retorno.
- e) Cada tipo de obra hidráulica cuenta con un periodo de retorno para su diseño, quien depende del tamaño e importancia de la obra para lo cual los periodos más usuales son: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000 y 10000 años.
- f) Se obtienen las curvas IDT (Intensidad, Duración, Periodo de retorno). tomando en cuenta la información histórica de las tormentas registradas de la cuenca en estudio.
- g) Se transforman las curvas (IDT) en hietogramas, tomando en cuenta la forma típica de éstos, en la cuenca en estudio.
- h) Si las condiciones del proyecto indican la necesidad de utilizar una secuencia de tormentas, se establece la separación entre ellas.
- i) La secuencia de hietogramas seleccionados constituye la tormenta de diseño.

Una vez que asigna un periodo de retorno al gasto de diseño de la obra en cuestión, generalmente es necesario, para conocer dicho gasto de diseño, hacer extrapolaciones a partir de los gastos máximos anuales registradas, pues rara vez este periodo es menor al periodo de datos.

Por ejemplo, puede ser necesario determinar un gasto de diseño con periodo de retorno de 1000 años a partir de 25 años de registro. Si los gastos máximos anuales registrados se dibujan contra sus respectivos periodos de retorno, generalmente se observa alguna tendencia más o menos definida. El problema radica en cómo extender esta tendencia hasta el periodo de retorno deseado.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Una posibilidad es extrapolar los datos a ojo, es decir, gráficamente. Aunque ese método puede dar muy buenos resultados si se aplica por una persona con experiencia, tiene la desventaja de la subjetividad.

Para eliminar esta subjetividad, se debe buscar entre las distintas funciones de distribución de probabilidad teóricas la que se ajuste mejor a los datos medidos, y usar esta función para la extrapolación.

En la estadística existen decenas de funciones de distribución de probabilidad teóricas; de hecho, existen tantas como se quiera, y obviamente no es posible probarlas todas para un problema particular. Por lo tanto, es necesario escoger, de esas funciones, las que se adapten mejor al problema bajo análisis (APARICIO MIJARES, 1992).

Entre las funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología, se estudiarán las siguientes:

- a) Normal.
- b) Lognormal.
- c) Pearson III.
- d) Gumbel.
- e) Funciones para dos poblaciones.

Las funciones anteriores, aun cuando son las más comúnmente usadas en la hidrología aplicada, no son todas, pues el enfoque de este texto no es exhaustivo. No obstante, se presentan las bases necesarias para estudiar cualquier función de distribución de probabilidad.

Las funciones normal y lognormal son generalmente apropiadas para variables aleatorias que cubren todo el rango de valores de los resultados posibles del experimento bajo análisis, como por ejemplo los volúmenes de escurrimiento mensual en un río. Las funciones Gumbel se desarrollaron para el análisis de los valores extremos de dichos resultados, como los gastos máximos o mínimos anuales. La función Pearson III ocupa un lugar intermedio.

3.1.2.1 DISTRIBUCIÓN NORMAL

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

donde μ y σ son los parámetros de la distribución. Estos parámetros determinan la forma de la función $f(x)$ y su posición en el eje x .

Es posible demostrar que μ y σ son, respectivamente, la media y la desviación estándar de los datos. De acuerdo con $F(X) = \int_{-\infty}^x f(x)dx$, la función de distribución de probabilidad normal es:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad \text{Ecuación 12}$$



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Hoy en día, no se conoce analíticamente la integral de la expresión anterior, por lo que es necesario recurrir a métodos numéricos para evaluarla. Sin embargo, para hacer esto se requeriría una tabla para cada valor de μ y σ , por lo que se ha definido la variable estandarizada:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \text{Ecuación 13}$$

que está normalmente distribuida con media cero y desviación estándar unitaria. Así, la función de distribución se puede escribir como:

$$F(x) = F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad \text{Ecuación 14}$$

La función $F(z)$ se ha calculado numéricamente y se han publicado tablas de ella. Debido a que la función $F(z)$ es simétrica, se encuentran únicamente valores tabulados de:

$$F(x) = F(z) = \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad \text{Ecuación 15}$$

con lo que es posible calcular $F(z)$ para cualquier valor de z .

3.1.2.2 DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL

En esta función los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen normalmente. La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\frac{x}{\beta}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta} \right)^2} dx \quad \text{Ecuación 16}$$

donde α y β son los parámetros de la distribución. Si se compara la ecuación anterior con la ecuación de distribución Normal, se deduce que α y β son respectivamente la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria. Los valores de α y β se estiman a partir de n observaciones x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, como:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i)}{n} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln(x_i) - \alpha)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 18}$$

De acuerdo con:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad \text{Ecuación 19}$$



la función de probabilidad es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} dx$$

Ecuación 20

Los valores de la función de distribución de probabilidad anterior, se obtienen de forma tabular o si la variable estandarizada se define como: $Z = \frac{\ln(x) - \alpha}{\beta}$, se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{cases} F(z) = H(z), z > 0 \\ F(z) = 1 - H(z), z < 0 \end{cases}$$

3.1.2.3 DISTRIBUCIÓN PEARSON III O GAMMA DE TRES PARÁMETROS

La función de densidad de probabilidad Pearson III se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \left\{ \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1 - 1} e^{-\frac{x - \delta_1}{\alpha_1}}$$

Ecuación 21

donde α_1 , β_1 y δ_1 son los parámetros de la función y $\Gamma(\beta_1)$ es la función Gamma.

$$X_i, i = 1, 2, \dots, n$$

Los parámetros α_1 , β_1 y δ_1 se evalúan, a partir de n datos medidos, mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\bar{x} = \alpha_1 \beta_1 + \delta_1$$

Ecuación 22

$$S^2 = \alpha_1^2 \beta_1$$

Ecuación 23

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta_1}}$$

Ecuación 24

Donde $\bar{x}$ es la media de los datos S^2 su variancia y γ su coeficiente de sesgo, que se define como:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{S^3}$$

Ecuación 25



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta_1}{\delta_1}\right)} \left(\frac{x-\delta_1}{\delta_1}\right)^{\beta_1-1} dx$$

Ecuación 26

Sustituyendo:

$$y = \frac{x-\delta_1}{\alpha_1}$$

Ecuación 27

tenemos que:

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(\beta_1)} \int_0^y e^{-y} y^{\beta_1-1} dy$$

Ecuación 28

La cual es una función de distribución *ji* cuadrada con $2\beta_1$ grados de libertad y $x^2 = 2y$:

$$F(y) = F(\chi^2|\nu) = F_{\chi^2}(2y|2\beta_1)$$

Ecuación 29

Esta manera de usar la función de distribución Pearson III es estrictamente válida cuando $\beta_1 = n/2$, donde n es un entero positivo cualquiera. Si, como es común, 2β es no entero, puede tomarse como el entero más próximo o bien interpolar en la tabla 3 del apéndice A (Aparicio Mijares, 1992). Cuando $\beta < 0.3$, será necesario acudir a tablas de la función de distribución Gamma de un parámetro. Por otra parte, es también común que los valores calculados de δ con las ecuaciones anteriores resulten absurdos (muy grandes o negativos). En estos casos, es recomendable fijar el valor de δ a ojo, como la ordenada al origen en una gráfica de gasto contra periodo de retorno.

Otra manera muy común de usar esta función de distribución de probabilidad es tomando logaritmos de la variable aleatoria y suponiendo que éstos se comportan según dicha función. A esta manera de usarla se le denomina “función de distribución de probabilidad Log-Pearson III”.

Este trabajo de investigación se orientó a la elaboración de una herramienta computacional bajo el título **Hidroesta 2**, software para cálculos hidrológicos, utilizando Visual Basic, el cual pretende ser una aplicación que permita facilitar y simplificar los cálculos laboriosos que se deben realizar en los estudios hidrológicos.

El software permite el cálculo de los parámetros estadísticos, cálculos de regresión lineal, no lineal, simple y múltiple, así como regresión polinomial, evaluar si una serie de datos se ajustan a una serie de distribuciones, calcular a partir de la curva de variación estacional o la curva de duración, eventos de diseño con determinada probabilidad de ocurrencia, realizar el análisis de una tormenta y calcular intensidades máximas, a partir de datos de pluviogramas, los cálculos de aforos realizados con correntómetros o molinetes, el cálculo de caudales máximos, con métodos empíricos y estadísticos, cálculos de la evapotranspiración y cálculo del balance hídrico.

El producto del trabajo proporciona al ingeniero civil, agrícola, agrónomo, hidrólogos y otros especialistas que trabajen en este campo, una herramienta que permite realizar cálculos, simulaciones rápidas, y determinar los caudales o precipitaciones de diseño.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Los resultados computacionales obtenidos con la aplicación son, en todos los casos, más aproximados que los obtenidos con los nomogramas. **Hidroesta 2** representa una contribución para simplificar los estudios hidrológicos. Es importante porque:

- Proporciona una herramienta novedosa y fácil de utilizar para el ingeniero civil, ingeniero agrícola, ingeniero agrónomo y otros especialistas que trabajen en el campo de los estudios hidrológicos.
- Permite, simplificar el proceso de la abundante información y los cálculos laboriosos.
- Permite a partir de la información proporcionada, simular los parámetros de diseño de las estructuras por construir.
- Reduce enormemente el tiempo de cálculo.
- Permite obtener un diseño óptimo y económico.

Hidroesta 2 también permite evaluar si una serie de datos se ajustan a una serie de distribuciones, como son:

Normal, log-normal, con 2 y 3 parámetros, gamma con 2 y 3 parámetros log-Pearson tipo III, Gumbel y log-Gumbel, tanto con momentos ordinarios como con momentos lineales. Si la serie de datos se ajusta a una distribución, permite calcular por ejemplo caudales o precipitaciones de diseño, con un periodo de retorno dado o con una determinada probabilidad de ocurrencia.

Una vez que ingresamos los datos de las precipitaciones máximas diarias de nuestra estación en estudio, la función de probabilidad que mejor ajusta es la de **Gumbel** (Figura 3-13). Una vez conociendo el método de probabilidad de mejor ajuste de una serie de datos climatológicos es posible determinar la precipitación en cualquier tiempo y momento, en este caso se obtuvo la precipitación de 24 horas para los distintos periodos de retorno.

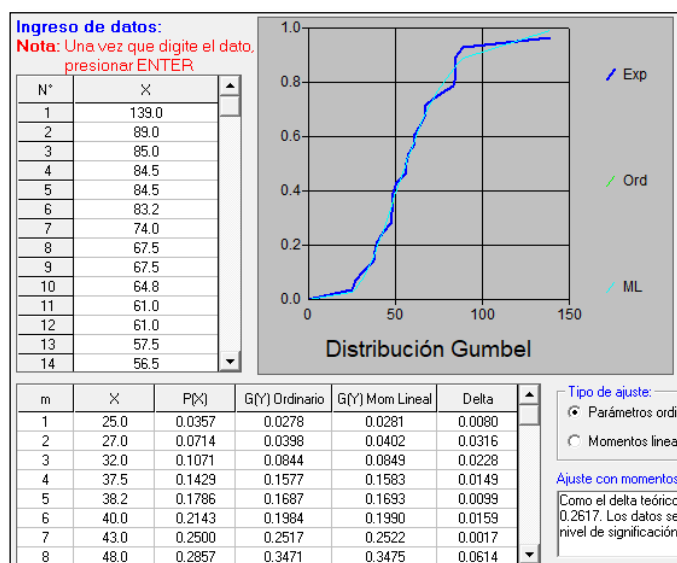


FIGURA 3-13 SERIE DE DATOS DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS CON SU DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD QUE MEJOR AJUSTA.



3.1.10 CURVAS DE INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO (IDT)

La obtención de estas curvas nos permite tener un conocimiento de la variación de las características de la intensidad de la lluvia con respecto a su frecuencia (período de retorno) y su duración. Al relacionar estas tres características será necesario contar con un buen registro de las precipitaciones máximas anuales donde aparezca tanto la intensidad como la duración. Estas curvas se utilizan principalmente en modelos de relación lluvia-escorrentía, subtema que se tratará más adelante.

Existen dos métodos principales para la elaboración de estas curvas, en uno de ellos el cálculo se realiza para valores correspondientes a una sola duración, o sea, relacionar la intensidad de la lluvia con el período de retorno y en el otro se hace un ajuste simultáneo de los valores de las tres variables por el método de análisis de regresión lineal múltiple. A continuación, solo se explicará y mostrará resultados del primer método, ya que, para el cálculo de la intensidad máxima, utilizaremos el criterio de Federich Bell, mismo utilizado en el programa **Hidroesta 2**.

a) Método de intensidad de lluvia-período de retorno.

El análisis se realiza para cada duración, ajustando a los valores máximos anuales en función de distribución de probabilidad; a continuación, se describe el proceso de cálculo:

1. Se selecciona una duración de interés.
2. De cada tormenta registrada se obtiene la intensidad de lluvia máxima para la duración seleccionada.
3. De cada año de registro se obtiene la máxima de los valores encontrados en el paso N° 2.
4. A las intensidades máximas anuales, para la duración seleccionada, se les ajusta una función de distribución de valores extremos (generalmente una función del tipo Gumbel) con la cual se logra relacionar la magnitud de la intensidad con el período de retorno correspondiente.

El proceso se repite desde el paso N.º 2, para considerar otras duraciones de interés (VEN T. CHOW).

Con los pasos anteriores y con ayuda del programa **Hidroesta 2**, se obtuvo la ecuación de las Intensidades-Duración-Período de retorno (IDT).

$$I_{\text{máx}} = 274.2319 * T^{0.2040} * D^{-0.5535}$$

Ecuación 30



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



TABLA 3-13 VALORES DE I MAX, PARA DIFERENTES D=10, 20, ...120 EN MIN, Y PARA T = 5, 10, 20, Y 50 AÑOS

Duración D	T = 5	T = 10	T = 20	T = 50
10	106.46	122.63	141.25	170.28
20	72.54	83.55	96.24	116.02
30	57.96	66.76	76.90	92.70
40	49.42	56.93	65.58	79.05
50	43.68	50.32	57.96	69.87
60	39.49	45.49	52.39	63.16
70	36.26	41.77	48.11	58.00
80	33.68	38.79	44.68	53.86
90	31.55	36.34	41.86	50.46
100	29.76	34.28	39.49	47.61
110	28.23	32.52	37.46	45.16
120	26.91	30.99	35.70	43.04

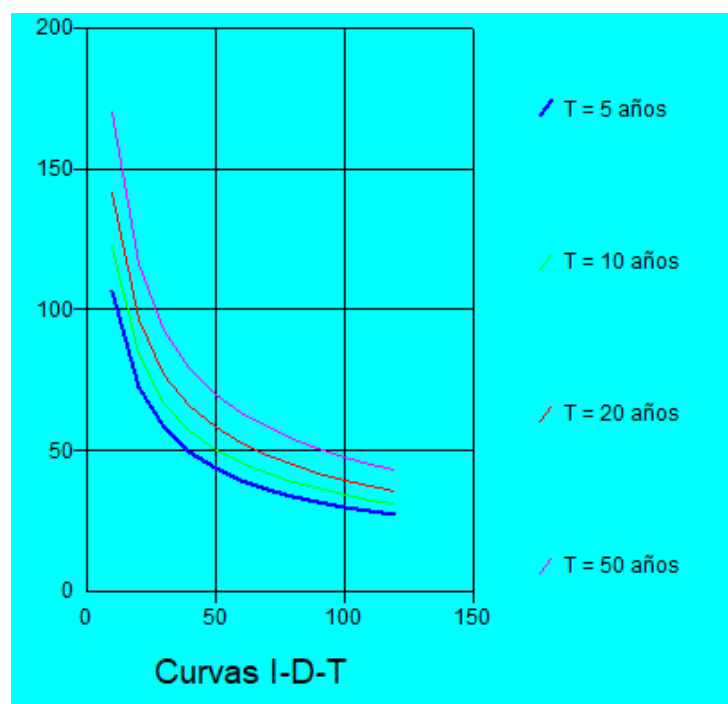


FIGURA 3-14 GRAFICA DE LAS CURVAS IDT CON HIDROESTA.



3.1.11 HIETOGRAMAS

Un hietograma no es más que la distribución temporal de la intensidad o de la profundidad de una precipitación a lo largo de la duración del episodio tormentoso. Y es que con los modelos hidrológicos existentes en la actualidad no es suficiente conocer la precipitación máxima de una tormenta de 5 horas, sino que se precisa saber cómo evoluciona esa precipitación a lo largo de esas cinco horas.

Para ello se requiere poder distribuir a lo largo del tiempo de duración de la precipitación sus diferentes intensidades o profundidades. Cuando se habla de intensidad se refiere a mm de precipitación por hora, y cuando se habla de profundidad se refiere a cantidad o volumen precipitado en milímetros.

Maneras y métodos para obtenerlos hay más de uno, pero el que explicaré sirve para obtener hietogramas a partir de curvas IDT y se denomina método de los bloques alternos. La ventaja que tiene este método es que su resultado se aprovecha como dato de precipitación en programas de modelos hidrológicos como HEC-HMS.

3.1.2.1 BLOQUES ALTERNOS PARA OBTENER HIETOGRAMAS A PARTIR DE CURVAS IDT

El método de los bloques alternos permite ir más allá con ese resultado final y obtener hietogramas a partir de curvas IDT con la que poder representar la distribución de la precipitación en una serie de intervalos temporales a lo largo del tiempo en el que dura la lluvia. La duración de la lluvia de diseño depende de lo que caracterice mejor la cuenca a estudiar, ya que a veces las inundaciones se producen porque está lloviendo días enteros, pero sin mucha intensidad. Pero como muchas veces no se dispone de información suficiente al respecto, lo que se suele tomar como tiempo de duración de la tormenta de diseño es el tiempo de concentración de la cuenca.

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración es el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio, equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca.

Naturalmente, el tiempo de concentración t_c depende de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y de la velocidad que adquiere, en promedio, dentro de la misma. Esta velocidad está en función de las pendientes del terreno y de los cauces, y de la rugosidad de la superficie de los mismos. El tiempo de concentración se calcula mediante la ecuación de Kirprich (APARICIO MIJARES, 1992).

$$t_c = 0.000325 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde t_c es el tiempo de concentración en horas, L es la longitud del cauce principal de la cuenca en metros.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



A continuación, se presentan las tablas de datos utilizados en el programa HEC-HMS para la realización de los hietogramas, así como para los hidrogramas correspondientes, para un tiempo de concentración de 1.21 horas.

**TABLA 3-15 HIETOGRAMA
PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=2**

T	2		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	24.04	24.04	2.78
1	32.76	8.72	3.09
1.5	39.26	6.50	3.52
2	44.64	5.38	4.18
2.5	49.32	4.68	5.38
3	53.50	4.18	8.72
3.5	57.31	3.81	24.04
4	60.83	3.52	6.50
4.5	64.12	3.28	4.68
5	67.21	3.09	3.81
5.5	70.13	2.92	3.28
6	72.91	2.78	2.92

**TABLA 3-14 HIETOGRAMA
PRECIPITACIÓN, MÉTODO HUTSCS, TR=5**

T	5		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	28.98	28.98	3.35
1	39.49	10.51	3.72
1.5	47.33	7.84	4.24
2	53.82	6.49	5.04
2.5	59.45	5.64	6.49
3	64.50	5.04	10.51
3.5	69.09	4.60	28.98
4	73.34	4.24	7.84
4.5	77.30	3.96	5.64
5	81.02	3.72	4.60
5.5	84.54	3.52	3.96
6	87.89	3.35	3.52

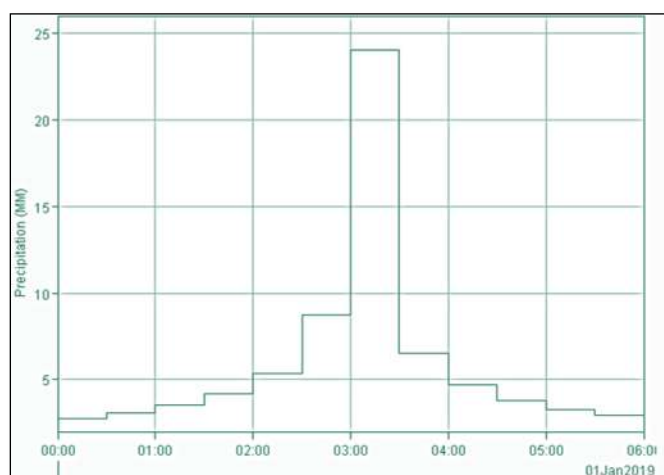


FIGURA 3-15 HIETOGRAMA PARA T= 2 AÑOS (HEC-HMS)

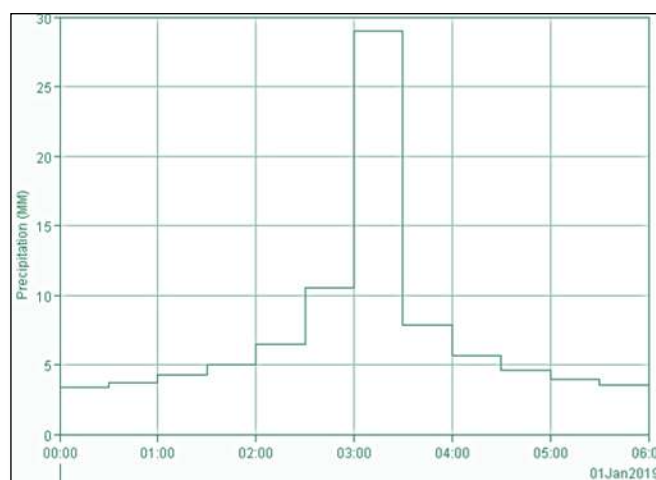


FIGURA 3-16 HIETOGRAMA PARA T= 5 AÑOS (HEC-HMS)



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



**TABLA 3-17 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN,
MÉTODO HUTSCS, TR=10 AÑOS**

T	10		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	33.38	33.38	3.86
1	45.49	12.11	4.29
1.5	54.52	9.03	4.89
2	61.99	7.47	5.81
2.5	68.48	6.49	7.47
3	74.29	5.81	12.11
3.5	79.59	5.29	33.38
4	84.48	4.89	9.03
4.5	89.04	4.56	6.49
5	93.33	4.29	5.29
5.5	97.38	4.06	4.56
6	101.24	3.86	4.06

**TABLA 3-16 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN,
MÉTODO HUTSCS, TR=25 AÑOS**

T	25		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	40.24	40.24	4.65
1	54.84	14.60	5.17
1.5	65.72	10.88	5.89
2	74.73	9.01	7.00
2.5	82.56	7.83	9.01
3	89.56	7.00	14.60
3.5	95.94	6.38	40.24
4	101.84	5.89	10.88
4.5	107.34	5.50	7.83
5	112.51	5.17	6.38
5.5	117.40	4.89	5.50
6	122.05	4.65	4.89

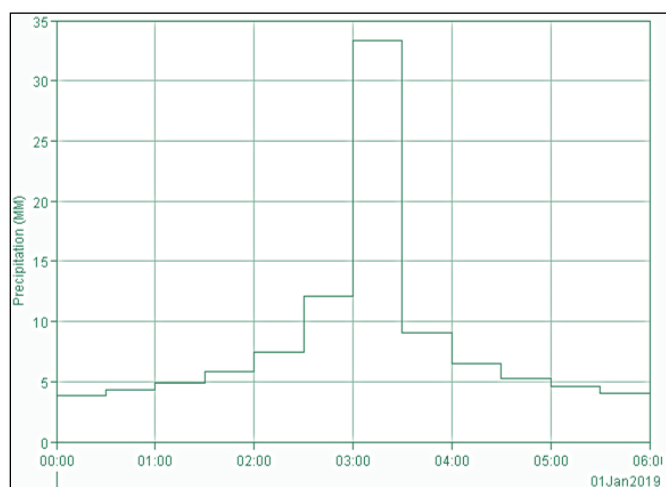


FIGURA 3-18 HIETOGRAMA PARA T= 10 AÑOS (HEC-HMS).

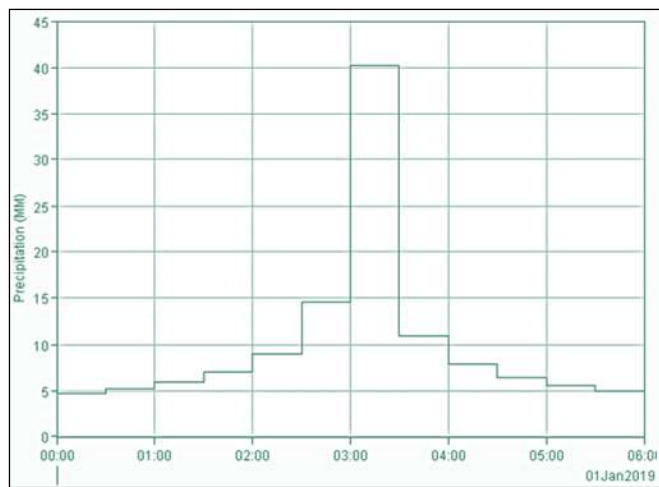


FIGURA 3-17 HIETOGRAMA PARA T= 25 AÑOS (HEC-HMS)



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



**TABLA 3-19 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN,
MÉTODO HUTSCS, TR=50 AÑOS**

T	50		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	46.35	46.35	5.36
1	63.17	16.81	5.96
1.5	75.71	12.54	6.79
2	86.08	10.38	8.07
2.5	95.10	9.02	10.38
3	103.17	8.07	16.81
3.5	110.52	7.35	46.35
4	117.31	6.79	12.54
4.5	123.64	6.33	9.02
5	129.60	5.96	7.35
5.5	135.23	5.63	6.33
6	140.59	5.36	5.36

**TABLA 3-18 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN,
MÉTODO HUTSCS, TR=100 AÑOS**

T	100		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	53.40	53.40	6.17
1	72.76	19.37	6.86
1.5	87.20	14.44	7.82
2	99.16	11.95	9.29
2.5	109.54	10.39	11.95
3	118.84	9.29	19.37
3.5	127.30	8.47	53.40
4	135.12	7.82	14.44
4.5	142.42	7.30	10.39
5	149.28	6.86	8.47
5.5	155.77	6.49	7.30
6	161.94	6.17	6.49

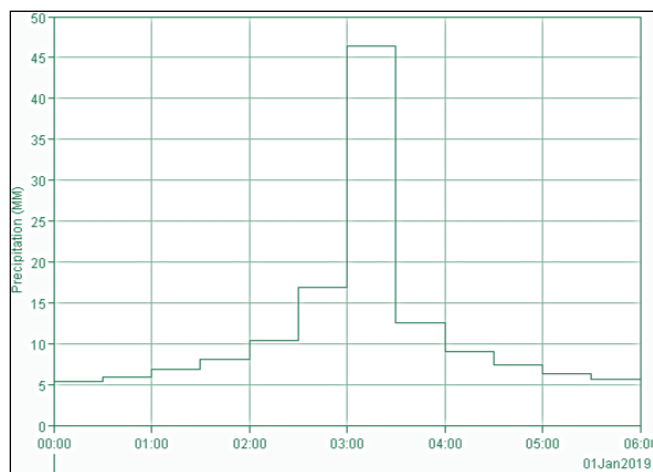


FIGURA 3-20 HIETOGRAMA PARA T= 50 AÑOS (HEC-HMS).

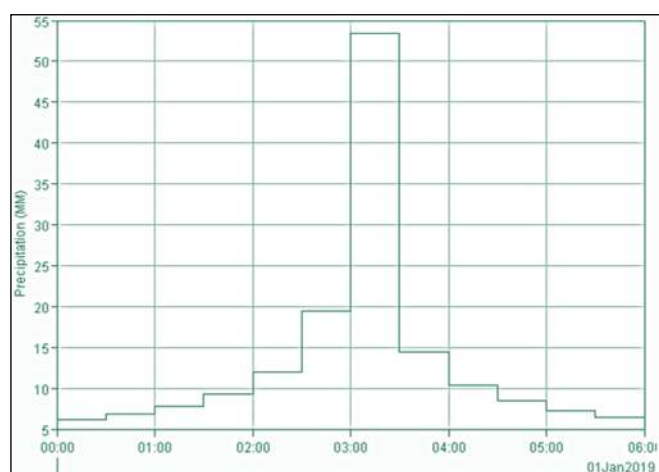


FIGURA 3-19 HIETOGRAMA PARA T= 100 AÑOS (HEC-HMS).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



**TABLA 3-20 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN,
MÉTODO HUTSCS, TR=200 AÑOS**

T	200		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	61.51	61.51	7.11
1	83.81	22.31	7.90
1.5	100.45	16.63	9.01
2	114.22	13.77	10.70
2.5	126.18	11.97	13.77
3	136.89	10.70	22.31
3.5	146.64	9.75	61.51
4	155.65	9.01	16.63
4.5	164.05	8.40	11.97
5	171.95	7.90	9.75
5.5	179.43	7.48	8.40
6	186.54	7.11	7.48

**TABLA 3-21 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN,
MÉTODO HUTSCS, TR=500 AÑOS**

T	500		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	74.15	74.15	8.57
1	101.04	26.90	9.53
1.5	121.09	20.05	10.86
2	137.69	16.60	12.90
2.5	152.12	14.43	16.60
3	165.02	12.90	26.90
3.5	176.78	11.76	74.15
4	187.64	10.86	20.05
4.5	197.77	10.13	14.43
5	207.30	9.53	11.76
5.5	216.31	9.01	10.13
6	224.88	8.57	9.01

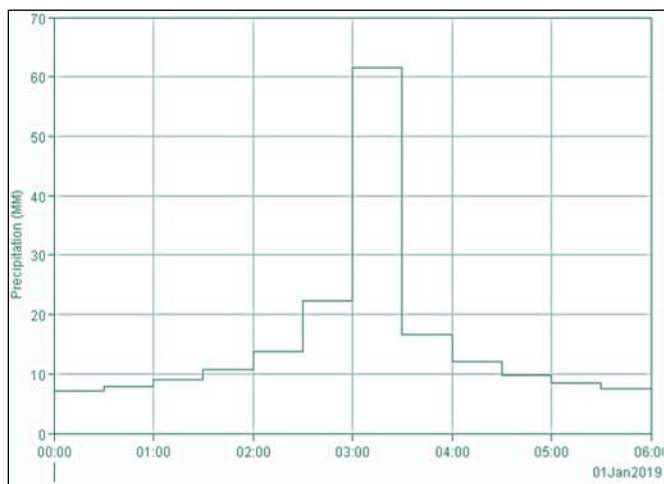


FIGURA 3-21 HIETOGRAMA PARA T= 200 AÑOS (HEC-HMS).

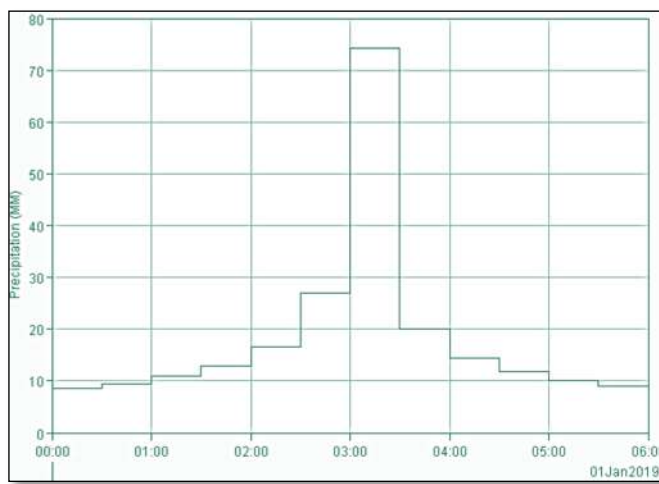


FIGURA 3-22 HIETOGRAMA PARA T= 500 AÑOS (HEC-HMS).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



**TABLA 3-23 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN,
MÉTODO HUTSCS, TR=1000 AÑOS**

T	1000		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	85.41	85.41	9.87
1	116.39	30.98	10.97
1.5	139.49	23.10	12.51
2	158.61	19.12	14.86
2.5	175.22	16.62	19.12
3	190.08	14.86	30.98
3.5	203.63	13.54	85.41
4	216.14	12.51	23.10
4.5	227.81	11.67	16.62
5	238.78	10.97	13.54
5.5	249.16	10.38	11.67
6	259.03	9.87	10.38

**TABLA 3-22 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN,
MÉTODO HUTSCS, TR=5000 AÑOS**

T	5000		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	118.60	118.60	13.71
1	161.62	43.02	15.24
1.5	193.70	32.08	17.37
2	220.25	26.55	20.64
2.5	243.32	23.07	26.55
3	263.96	20.64	43.02
3.5	282.77	18.81	118.60
4	300.14	17.37	32.08
4.5	316.34	16.21	23.07
5	331.58	15.24	18.81
5.5	346.00	14.42	16.21
6	359.70	13.71	14.42

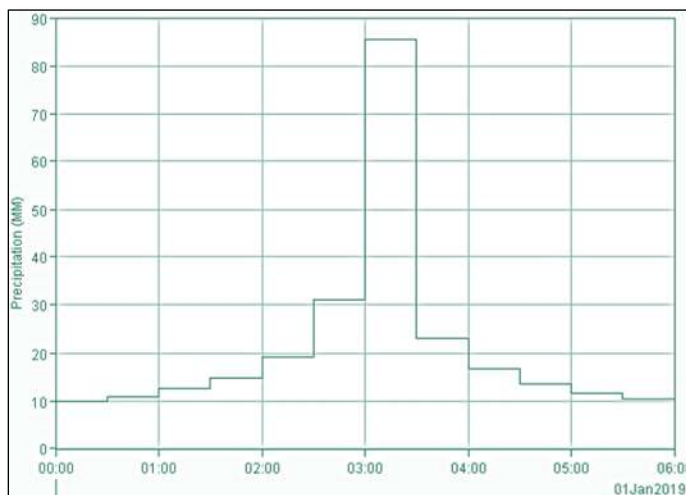


FIGURA 3-25 HIETOGRAMA PARA T= 1000 AÑOS (HEC-HMS).

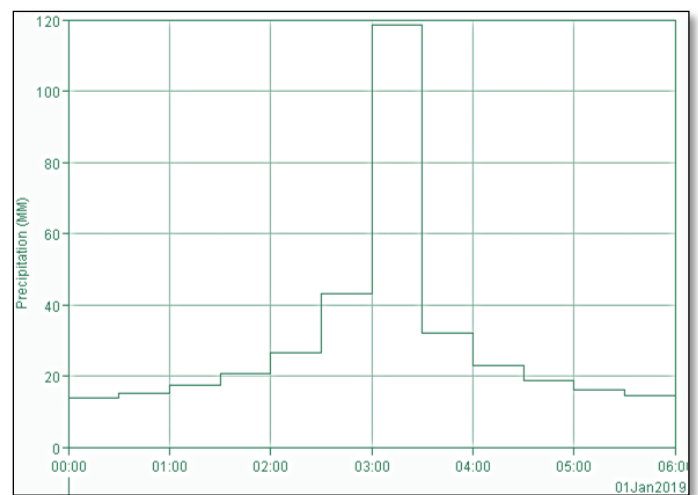


FIGURA 3-24 HIETOGRAMA PARA T= 5000 AÑOS (HEC-HMS).

**TABLA 3-24 HIETOGRAMA PRECIPITACIÓN,
MÉTODO HUTSCS, TR=10000 AÑOS**

T	10000		
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	136.62	136.62	15.79
1	186.17	49.55	17.55
1.5	223.12	36.95	20.01
2	253.70	30.58	23.77
2.5	280.28	26.58	30.58
3	304.05	23.77	49.55
3.5	325.71	21.66	136.62
4	345.73	20.01	36.95
4.5	364.39	18.67	26.58
5	381.95	17.55	21.66
5.5	398.55	16.60	18.67
6	414.34	15.79	16.60

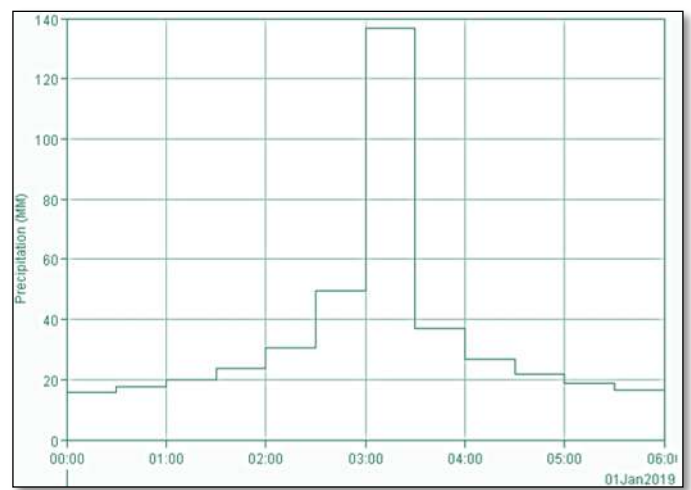


FIGURA 3-23 HIETOGRAMA PARA T= 10000 AÑOS (HEC-HMS).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



3.1.12 GASTO DE DISEÑO

En general la aplicación de la Hidrología Superficial en el diseño, construcción y operación de una obra hidráulica, se puede resumir en encontrar la solución a las siguientes tres cuestiones:

- a) De qué cantidad de agua se dispone en la corriente y cuáles son sus propiedades físicas.
- b) Cuánto volumen de material sólido transporta la corriente.
- c)Cuál es la magnitud de las avenidas o crecidas en la corriente y cuándo se presentan.

Es la tercera pregunta la más difícil de contestar, la que mayor información requiere para ser evaluada y quizá, la más importante, sobre todo en obras o estructuras hidráulicas cuyo fin sea dar paso o controlar el agua proveniente de tales avenidas. Son ejemplos de dichas estructuras: las obras de excedencias (vertedores), en las presas de almacenamiento, control o derivación, los puentes y alcantarillas, los diques de encauzamiento, los bordos de defensa, los sistemas de drenaje urbano, agrícola y de aeropuertos, rectificación de cauces, etc. Las citadas estructuras son comúnmente muy costosas y su falla por mal proyecto causaría graves daños materiales, interrupción de los servicios públicos y quizá, la pérdida de vidas humanas.

Por otra parte, los terrenos de las horillas de los ríos, generalmente fértiles, han marcado una tendencia a cultivarlos y a construir viviendas e industrias en ellos, ignorando o despreciando el riesgo de inundación y destrucción por las avenidas poco frecuentes o máximas del río. A este respecto sería conveniente realizar la rigurosa delimitación de los cauces de avenida y la construcción de obras de defensa que eviten los daños.

Además, conviene considerar que aunado al potencial de daños propio de las avenidas originadas por los ciclones, se tiene la edificación en cauces y la invasión de llanuras de inundación que restan capacidad de conducción y almacenamiento a los ríos, originando remansos que aumentan las pérdidas por inundación y, por otra parte, en el diseño de puentes, bordos de protección y represas no se han considerado en el pasado los efectos de estas obras en las avenidas. De lo anterior, se deduce la gran importancia de un estudio amplio y racional de las avenidas máximas probables de un río, en especial el cálculo y evolución de las avenidas de proyecto en un embalse, en lo que respecta a la seguridad de la obra y al efecto sobre la avenida, atenuándola.

Los gastos de diseño o máximas avenidas se determinan para los periodos de retorno T_r de 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000 años, los cuales son los T_r más comúnmente recomendados para el diseño de obras hidráulicas.

Los métodos usados para el cálculo de gastos o caudales se clasifican en directos e indirectos. Dado que en nuestro caso no se cuenta con información hidrométrica se utilizaron métodos indirectos, los cuales se basan en modelos lluvia-escurrimiento. Por lo tanto, es necesario definir previamente las lluvias de diseño.



RELACIÓN LLUVIA-ESCURRIMIENTO

Es sumamente común que no se cuente con registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de las obras hidráulicas. En general, los registros de precipitación son más abundantes que los escurrimientos, y, además, no se afectan por cambios en la cuenca, como construcciones de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por ello, es necesario contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación. Las características de la cuenca se conocen por medio de planos topográficos y por uso de suelo, y la precipitación a través de mediciones directas en el caso de predicción de avenidas frecuentes (APARICIO MIJARES, 1992).

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

- a) Área de la cuenca.
- b) Altura total de precipitación.
- c) Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.).
- d) Distribución de la lluvia en el tiempo.
- e) Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca.

Debido a que, por un lado, la cantidad y calidad de la información disponible varían grandemente de un problema a otro y a que, por otro, no siempre se requiere la misma precisión en los resultados, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para realizar la relación lluvia-escurrimiento. Dichos métodos van desde simples fórmulas empíricas, hasta modelos extremadamente detallados basados en principios de la física.

MODELOS EMPÍRICOS DE LA RELACIÓN LLUVIA-ESCURRIMIENTO

Este tipo de modelos se han desarrollado con base a los datos particulares de la región en estudio, por lo que su aplicación muchas veces se restringe a ella; sin embargo, son de utilidad cuando no se tiene información de gastos y sólo se conocen características físicas promedio de la cuenca y registros de precipitación.

MÉTODO RACIONAL

La fórmula racional es posiblemente el modelo más antiguo de la relación lluvia-escurrimiento. Su origen se remonta a 1851 o 1889, de acuerdo con diversos autores (APARICIO MIJARES, 1992).

En este método se incorporan las características medias de la lluvia y, a través del coeficiente de escurrimiento y del tiempo de concentración, algunas características de la cuenca además de su área.

La experiencia ha demostrado que el método racional sólo debe ser aplicado a cuencas menores de 13 kilómetros cuadrados (5 millas cuadradas), en las que además existe un desfase pequeño entre lluvias y gasto máximo.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



El método parte de la idea de que, si la duración de la lluvia efectiva es mayor que el tiempo de concentración de la cuenca, se alcanzará un estado de equilibrio, tal que el volumen de lluvia efectiva que se precipita en la cuenca en un instante dado es igual al que escurre a la salida de la cuenca en el mismo instante; por lo que en ese instante el gasto pico será:

$$Q_p = 0.278 * C * i * A$$

Ecuación 32

Donde:

Q_p = Gasto a la salida de la cuenca cuando alcanza el equilibrio, gasto máximo o de pico, en m³/seg.

C = Coeficiente de escurrimiento, el cual se puede determinar por dos métodos (vistos en el inciso 2.3 de estos apuntes).

i = Intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, en mm/h.

A = Área de la cuenca, en km².

El coeficiente de escurrimiento se determina a partir del siguiente procedimiento:

- En función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual, de la cuenca en estudio.

A falta de información específica, con apoyo en los servicios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, en tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables), y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la Tabla 3-25 y al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtiene el valor del parámetro K (véase Plan Nacional de Obras de Riego para el Desarrollo Rural "Pequeños Almacénamientos". Secretaría de Recursos Hidráulicos, adaptación del Libro: Small Dams).

Con la información de uso y tipo de suelo (Tabla 3-25) de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 y con la ayuda de la extensión ArcMap de ArcGis que es el lugar donde visualiza y explora los dataset SIG de su área de estudio, donde asigna símbolos y donde crea los diseños de mapas, se calculó el parámetro K, obteniendo de esta manera el mapa de uso y tipo de suelo para la zona en estudio (Figura 3-26).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



TABLA 3-25 VALORES DE K, EN FUNCIÓN DEL TIPO Y USO DE SUELO

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos.		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hilería	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo	0,14	0,20	0,28
Más del 75% - Poco -	0,20	0,24	0,30
Del 50 al 75% - Regular -	0,24	0,28	0,30
Menos del 50% - Excesivo -	0,07	0,16	0,24
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 50 al 75%	0,17	0,26	0,28
Cubierto del 25 al 50%	0,22	0,28	0,30
Cubierto menos del 25%	0,26	0,29	0,32
Zonas urbanas	0,27	0,30	0,33
Caminos	0,18	0,24	0,30
Pradera permanente			



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

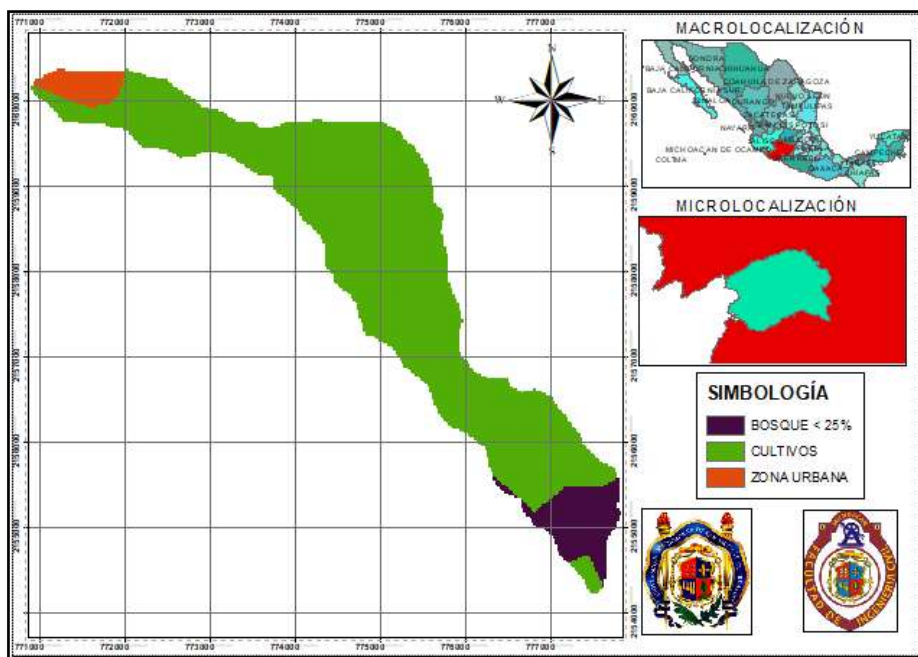


FIGURA 3-26 MAPA DEL COEFICIENTE K EN FUNCIÓN DEL USO Y TIPO DE SUELO. NOM-011-2015

Una vez obtenido el valor de K, el coeficiente de escurrimiento anual (C_e), se calcula mediante las fórmulas siguientes:

K: PARÁMETRO QUE DEPENDE DEL TIPO Y USO DE SUELO	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO ANUAL (C_e)
Si K resulta menor o igual que 0,15	$C_e = K (P-250) / 2000$
Si K es mayor que 0,15	$C_e = K (P-250) / 2000 + (K-0,15) / 1.5$

P= Precipitación anual, en milímetros (mm).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



TABLA 3-26 CALCULO DEL COEFICIENTE DE

AÑO	PM (mm)	ÁREA (m ²)	Ce
1969	1057.80	8460939	0.189
1970	823.50	8460939	0.157
1971	1469.20	8460939	0.245
1972	1511.40	8460939	0.250
1973	1340.30	8460939	0.227
1974	1547.30	8460939	0.255
1975	1660.40	8460939	0.270
1978	863.20	8460939	0.163
1980	1185.50	8460939	0.206
1981	1381.04	8460939	0.233
1982	999.30	8460939	0.181
1983	1271.90	8460939	0.218
1984	1650.10	8460939	0.269
1985	1254.00	8460939	0.215
1986	1244.50	8460939	0.214
1987	1441.32	8460939	0.241
1988	1168.20	8460939	0.204
1989	1183.07	8460939	0.206
1990	1421.50	8460939	0.238
1991	1289.50	8460939	0.220
1992	1618.00	8460939	0.265
1993	1683.00	8460939	0.273
1994	1635.50	8460939	0.267
1995	2197.00	8460939	0.343
1996	2346.00	8460939	0.363
1997	1423.30	8460939	0.238
			0.237

MODELOS HIDROLÓGICOS

Los Modelos Hidrológicos o de caja negra, generalmente, son los más adecuados a las condiciones de información común en las cuencas de México, sobre todo para los sitios donde se construirán presas ya sea para almacenamiento de agua o para generar energía eléctrica, ya que en estos sitios o cerca de ellos existen estaciones climatológicas y de aforo en las que se han registrado algunas avenidas importantes y sus respectivos hietogramas. Lo que se pretende con esos modelos es encontrar una función de transformación de lluvias a escurrimientos, con la cual se puedan reproducir aproximadamente los valores simultáneos de dichas variables. Para establecer esta función de transformación no se toman en cuenta explícitamente todas las características de la cuenca, lo que justifica denominar los modelos de caja negra.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Estos métodos tienen como objetivo la reconstrucción matemática del proceso o fenómeno de la formación de la avenida, es decir, se supone una lluvia de duración y período de retorno determinado, dentro de lo probable y se calcula el escurrimiento que genera en un punto de la corriente estudiada, hasta llegar a dibujar el probable hidrograma de la avenida que se calcula. Tienen la ventaja de permitir reproducir aceptablemente el fenómeno, con base a la estimación de diversos parámetros, como son las lluvias máximas y algunas de las características físicas de la cuenca.

Lo anterior, también es la principal desventaja de estos métodos en los casos en que se tiene que extrapolar alguna de sus variables, ya que los errores debidos a la irregularidad de las lluvias en la cuenca (sobre todo en cuencas montañosas), la indeterminación de la parte de lluvia que absorbe el suelo, son, por ejemplo, factores que podría distorsionar la estimación de la determinación de las avenidas a partir de las lluvias. Sin embargo, en cuencas pequeñas, poco pobladas y sin datos hidrométricos, la determinación de los posibles hidrogramas de avenidas a partir de precipitaciones probables, es en general, el mejor procedimiento a utilizar. Dentro de los métodos hidrológicos se tienen:

- A) Método de Chow.
- B) Método del Hidrograma Unitario Triangular.

MÉTODO DE CHOW

Chow desarrolló un método para el cálculo del gasto de pico de hidrogramas de diseño de alcantarillas y otras estructuras de drenaje pequeñas. Este método proporciona el gasto de pico y es aplicable a cuencas no urbanas con un área menor de 25 km².

El gasto de pico Q_p de un hidrograma de escurrimiento directo puede expresarse como el producto de la altura de precipitación efectiva P_e por el gasto de pico de un hidrograma unitario q_p .

$$Q_p = q_p P_e \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

Q_p , gasto pico en m³/s; q_p , gasto unitario pico m³/s/mm, de acuerdo a la ecuación 34.

$$q_p = \frac{0.278A}{d} Z \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde:

A, Superficie de la cuenca en Km²; d, duración en exceso o efectiva de la tormenta en horas; Z, factor de reducción del pico, adimensional, mismo que se muestra en la ecuación 35.

$$Z = 9.046411 * 10^{-4} + 0.7623037 * \left(\frac{d}{tr}\right) + 0.09239033 * \left(\frac{d}{tr}\right)^2 - 0.2785835 * \left(\frac{d}{tr}\right)^3 + 0.08334881 * \left(\frac{d}{tr}\right)^4$$

Ecuación 35



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Donde:

t_r , tiempo de retraso en horas:

$$t_r = 0.005 \left[\frac{L}{S} \right]^{0.64}$$

Ecuación 36

Donde:

L, longitud del cauce principal, en m; S, pendiente del cauce principal, en %; P_e , precipitación en exceso, en cm.

$$\sum P_e = \frac{\left[\sum P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{\sum P + \frac{2032}{N} - 20.32}$$

Ecuación 37

Donde:

P, Precipitación acumulada para el instante considerado, en centímetros (cm); N, Numero N de escurrimiento.

MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR

Este método fue propuesto por Mockus y es el método con el cual se realizó el cálculo para la determinación del hidrograma ya que este es el método que involucra un mayor número de parámetros que lo hace aún el método más completo.

Si se cuenta con poca información y no se requiere precisar la forma del hidrograma de escurrimiento, se puede utilizar el hidrograma unitario triangular. El método simplifica al hidrograma unitario real, suponiéndole forma triangular y definiéndolo a partir de su altura y base por medio del gasto de pico (q_p), y el tiempo base (T_b). Este método es muy aplicable, fundamentalmente a cuencas no aforadas y para definirlo únicamente se requiere conocer las características físicas o hidrológicas de la cuenca. El gasto de pico (Q_p) del hidrograma unitario triangular (HUT) se puede calcular con base a la fórmula siguiente:

$$q_p = 0.208 * \frac{A}{T_b}$$

Ecuación 38

Donde

q_p = Gasto de pico del hidrograma unitario, en m³/seg-mm.

A = Área de la cuenca en km²

T_b = Tiempo de pico, igual al tiempo entre el inicio y el máximo del escurrimiento directo, en hrs., que se calcula con la ecuación:

$$T_b = 0.5d + T_r$$

Ecuación 39



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Siendo:

d = Duración efectiva de la tormenta, en hrs.

Tr = Tiempo de retraso, en hrs., definido como el tiempo en horas entre el centro de masa de la tormenta y la hora del gasto máximo, calculando su valor por medio de la ecuación siguiente:

$$T_r = 0.6 * T_c$$

Ecuación 40

Donde:

Tc = Tiempo de concentración, en hrs., que se puede calcular con la fórmula de la Ecuación 31.

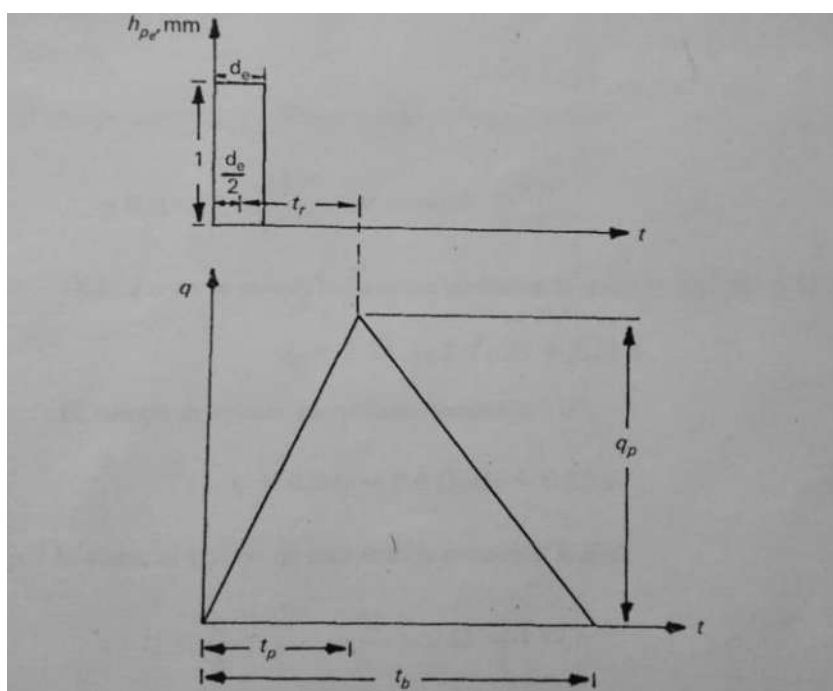


FIGURA 3-27 HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR

La suma de T_p y T_r , se le denomina tiempo base (T_b) del hidrograma y con base al análisis de un gran número de hidrogramas reales se adoptó como valor medio el siguiente, para cuencas sin aforar:

$$T_b = 2.67 * T_p$$

Ecuación 41

Finalmente, el gasto máximo utilizando el HUT, se obtiene al multiplicar el gasto pico obtenido con la Ecuación 38, por la precipitación en exceso, es decir:

$$Q_p = q_p * P_e$$

Ecuación 42



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Se calcularon las siguientes características físicas de la cuenca:

A = área de cuenca en km^2 .

T_c = tiempo de concentración en horas,

N = número de la curva de escurrimiento para la condición media de humedad en la cuenca adimensional.

Para la obtención del número de escurrimiento, fue necesario utilizar el método propuesto por U.S. Soil Conservation Service, este método establece una metodología basada en el tipo de suelo y el uso que tiene para determinar un coeficiente (N) que permite obtener la precipitación que escurre, tal y como se muestra en la ecuación 37 (APARICIO MIJARES, 1992).

El coeficiente N se determinó a partir de la siguiente tabla (Tabla 3-27).

TABLA 3-27 SELECCIÓN DE N (APARICIO MIJARES, 1992)

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	-	77	86	91	94
Cultivo en surcos	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Contorneo	>1	70	79	84	88
	Contorneo	<1	65	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	87	89
	_____	<1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	35	70	79



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Pradera permanente	_____	<1	30	58	71	78
Bosques naturales	_____					
Muy raro	_____	-	56	75	86	97
Raro	_____	-	46	68	78	84
Normal	_____	-	36	60	70	77
Espeso	_____	-	26	52	62	69
Muy espeso	_____	-	15	44	54	61
Caminos	_____					
De terracería	_____	-	72	82	87	89
Con superficie dura	_____	-	74	84	90	92

Debido a que la zona en estudio cuenta con distintos tipos y usos de suelo es necesario obtener un coeficiente N promedio para la cuenca en estudio, para esto se realizó una media ponderada de los distintos tipos y usos de suelo obtenidos con sistemas de información geográficos (SIG), en este caso se utilizó la herramienta ArcMap. (Figura 3-28).

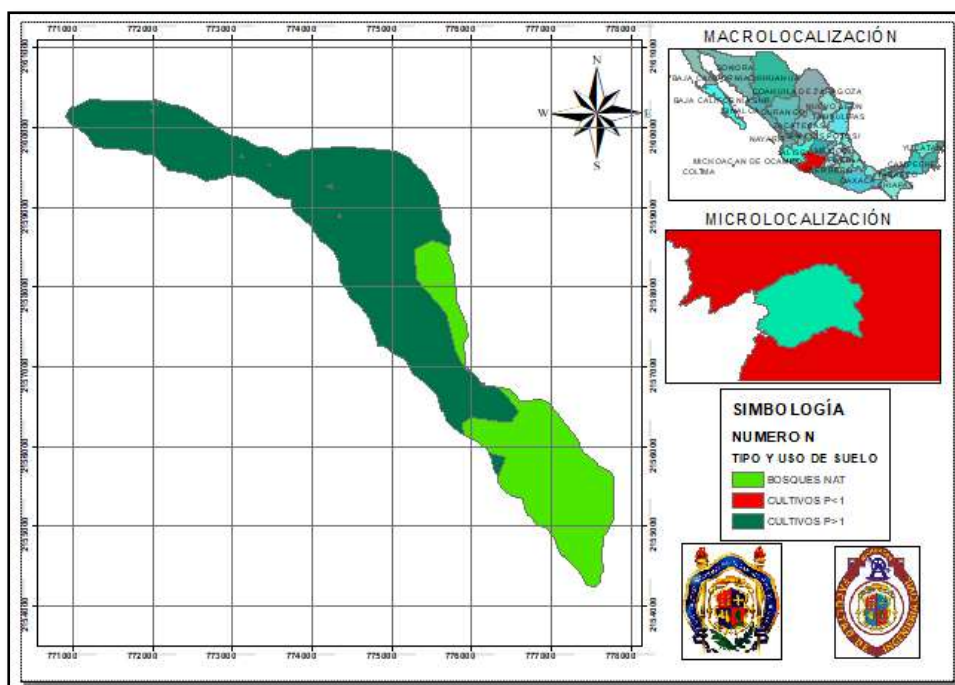


FIGURA 3-28 MAPA DEL COEFICIENTE N, (ARCMAP).

CUENCA	COEFICIENTE N
CUTIO	76.30



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL DEL U. S. SOIL CONSERVATION SERVICE.

El hidrograma unitario adimensional propuesto por el Soil Conservation Service permite definir con mayor detalle la forma del hidrograma. El cálculo de las máximas avenidas o gastos máximos se realizó con el modelo HEC-HMS, es un modelo lluvia-escorrentía, que está diseñado para simular los hidrogramas de escorrentía que se produce en determinados puntos de la red fluvial como consecuencia de eventos de lluvia. La funcionalidad de este modelo facilita el tratamiento de la información hidrológica gracias a que incluyen procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y presentación de datos georreferenciados.

El modelo HEC-HMS trabaja directamente con ArcGis y, más estrechamente con su extensión llamada HEC-GeoHMS.

Para aplicar el método se necesitan los siguientes datos:

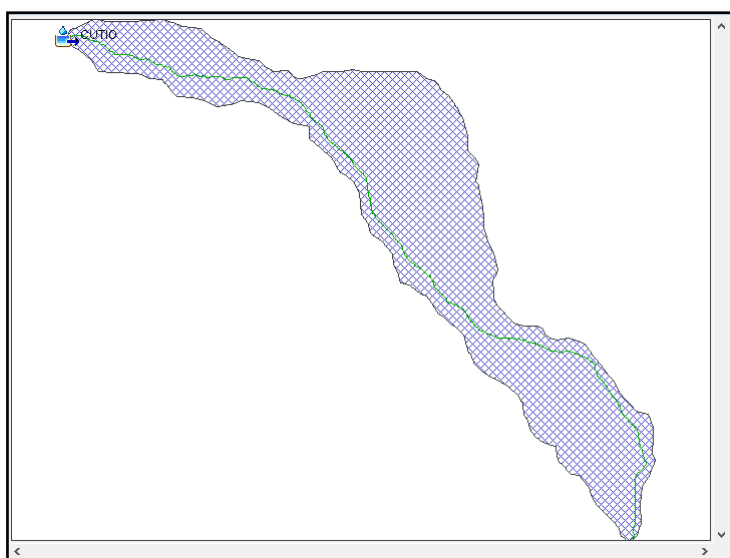


FIGURA 3-29 CUENCA RIO CUTIO CON HEC-HMS

	TR	50	
Tiempo (hrs)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0.5	46.35	46.35	5.36
1	63.17	16.81	5.96
1.5	75.71	12.54	6.79
2	86.08	10.38	8.07
2.5	95.10	9.02	10.38
3	103.17	8.07	16.81
3.5	110.52	7.35	46.35
4	117.31	6.79	12.54
4.5	123.64	6.33	9.02
5	129.60	5.96	7.35
5.5	135.23	5.63	6.33
6	140.59	5.36	5.63



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

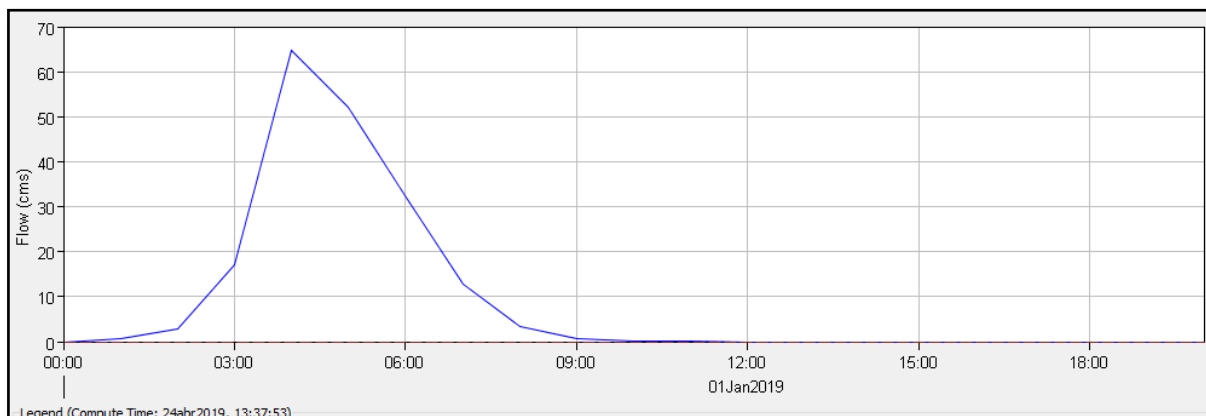


FIGURA 3-30 HUTSCS PARA UN TR = 50 AÑOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los cuatro métodos para la obtención de las máximas avenidas o gastos de diseño:

	RACIONAL	CHOW	HUT	HUTSCS
TR	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)
2	16.40	8.03	18.95	20.50
5	19.77	13.01	33.51	29.50
10	22.78	18.07	37.24	38.00
25	27.46	26.90	40.79	51.90
50	31.63	35.52	53.95	64.80
100	36.43	46.12	70.17	80.10
200	41.97	59.04	89.95	98.00
500	50.59	80.29	122.54	126.50
1000	58.28	100.08	118.85	152.00
5000	80.92	161.29	181.79	227.80
10000	93.21	195.68	215.94	268.90

FIGURA 3-31 TABLA DE RESULTADOS POR LOS DIFERENTES MÉTODOS

Los gastos de diseño que se utilizaron para el diseño hidráulico fue el del hidrograma unitario triangular propuesto por el Soil Conservation Service, utilizado en el programa HEC-HMS, por contar con el mayor número de parámetros considerados para el cálculo y al ser más exacto.



4. MODELACIÓN HIDRÁULICA

El diseño hidrológico para el control de aguas está relacionado con la mitigación de los efectos adversos causados por caudales altos o crecientes. Se considera que una creciente es cualquier caudal alto que desborde los terraplenes ya sean artificiales o naturales a lo largo de la corriente. Las magnitudes de las crecientes están descritas por sus caudales, sus elevaciones y sus volúmenes. Cada uno de estos factores es importante en el diseño hidrológico de diferentes tipos de estructuras para el control de flujo.

El desarrollo de esta investigación se relaciona con el estudio del caudal de diseño o la creciente de diseño para estructuras de regulación (embalses de detención, embalses para el control de crecientes, etc.) y para estructuras de conducción (alcantarillados de aguas lluvias, canales de drenaje, diques de crecientes, estructuras de derivación, etc.) El propósito de las estructuras de regulación de crecientes es atenuar los caudales picos, haciendo decrecer de esta manera los picos de elevación de la creciente aguas abajo, y el propósito de las estructuras de conducción es llevar en forma segura el flujo hacia puntos localizados aguas abajo donde los efectos adversos de las crecientes sean controlados o se minimicen.

El modelo HEC-HMS es un modelo lluvia-escorrentía, que está diseñado para simular los hidrogramas de escorrentía que se produce en determinados puntos de la red fluvial como consecuencia de eventos de lluvia. La funcionalidad de este modelo facilita el tratamiento de la información hidrológica gracias a que incluyen procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y presentación de datos georreferenciados. El modelo HEC-HMS trabaja directamente con ArcGis y, más estrechamente con su extensión llamada HEC-GeoHMS.

La modelación hidráulica se realizó mediante el modelo HEC-RAS 2D, debido a que la versión bidimensional, es útil cuando se modelan ríos, como es el caso del río Cutio.

Con el uso de la extensión HEC-GeoRAS, a partir del levantamiento topográfico a detalle realizado entre el cadenamiento 0+000 y 1+700, se generó el modelo digital de elevaciones (MDE). La Figura 6-8, muestra el Modelo Digital de Elevaciones y las curvas de nivel, mismos que determinaron las secciones transversales (Figura 6-3) para realizar la simulación hidráulica bidimensional, para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000 y 10000 años, respectivamente.

En este capítulo se hace uso de toda la información obtenida en campo con la finalidad de realizar la modelación hidráulica del río en estudio, Cutio.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



4.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

Para dar inicio con el modelado, se hizo uso de las curvas de nivel que fueron proporcionadas por la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP) del estado de Michoacán, levantamiento que se realizó meses después de la inundación ocurrida el 23 de septiembre del 2018 en el municipio de Peribán, Michoacán.

Una vez teniendo en archivo tipo dwg de AutoCAD las curvas de nivel y el Modelo Digital de Elevaciones que es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo, se procedió a exportar dicho formato al programa ArcMap con la finalidad de crear la zona de trabajo, en la cual requerimos convertir nuestro formato en tipo Shape y georreferenciarlo en la zona en la que se encuentra localizado el municipio de Peribán respecto al hemisferio norte, WGS_1984_UTM_Zone_13N (Figura 4-1).

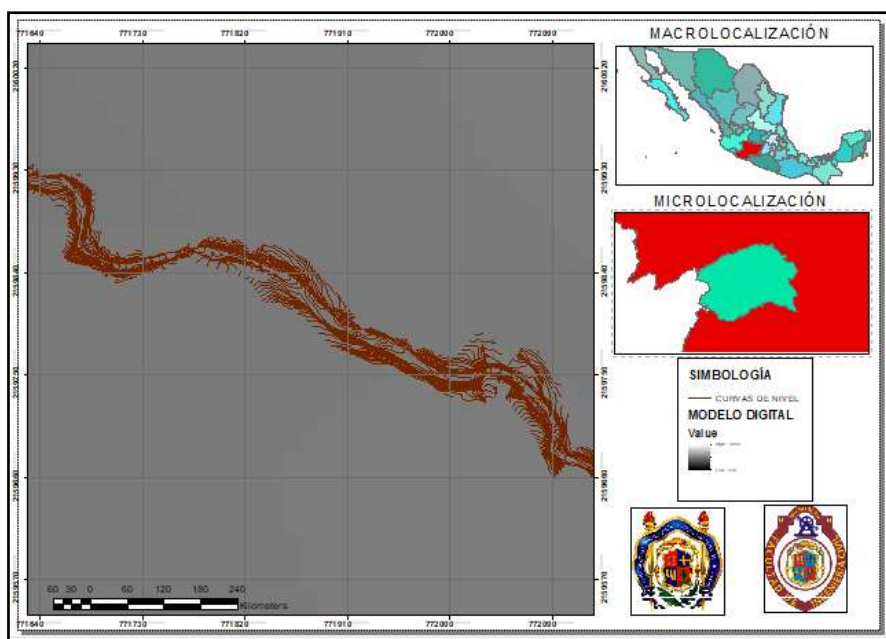


FIGURA 4-1 MDE Y TOPOGRAFÍA DE LA ZONA DELIMITADA POR EL RIO

Como siguiente paso, teniendo el archivo tipo Shape listo para trabajar, creamos una superficie TIN, Las cuales son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos. Existen diversos métodos de interpolación para formar estos triángulos, como la triangulación de Delaunay o el orden de distancias.

Las entidades de entrada utilizadas para crear un TIN permanecen en la misma posición que los nodos o las aristas del TIN. Esto permite a un TIN conservar toda la precisión de los datos de entrada al mismo tiempo que modela los valores entre los puntos conocidos. Puede incluir entidades localizadas con precisión en una superficie, como picos de montañas, carreteras y arroyos, utilizándolos como entidades de entrada a los nodos del TIN.

ArcGIS es compatible con el método de triangulación de Delaunay, con esto se tiene una mejor precisión para realizar cálculos de área planimétrica, área de superficie y volumen. A continuación, se muestra la superficie TIN creada en ArcMap (Figura 4-2).



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

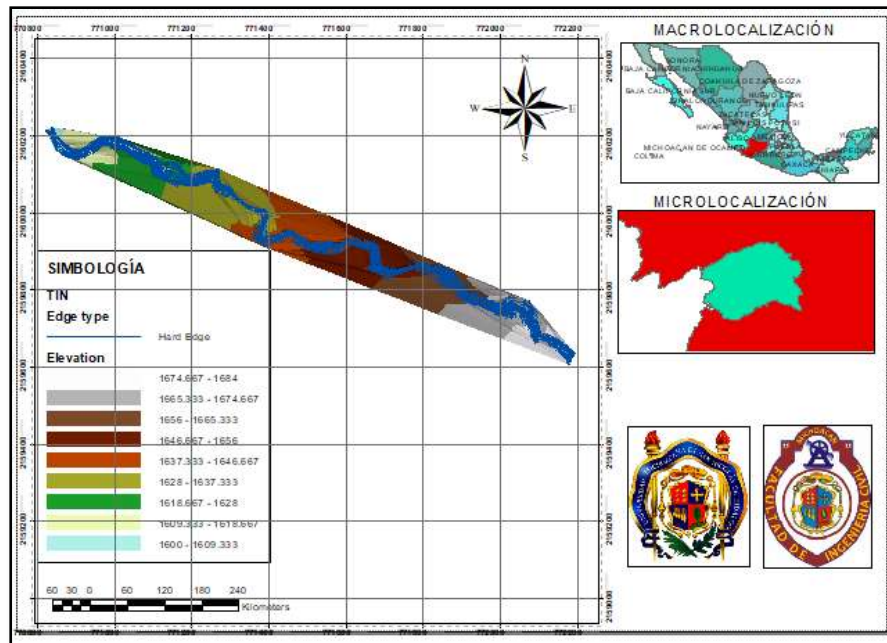


FIGURA 4-2 MAPA DE LA SUPERFICIE TIN, ARCMAP.

Una vez creado el TIN, se procedió a la elaboración y delimitación del centro del río, hombros o márgenes del río (en base a la delimitación de la topografía y a la previa visita de campo que se realizó), secciones transversales y sentido del flujo. Las márgenes se delimitaron tomando en cuenta la dirección del flujo, de aguas arriba hacia aguas abajo y de izquierda a derecha.

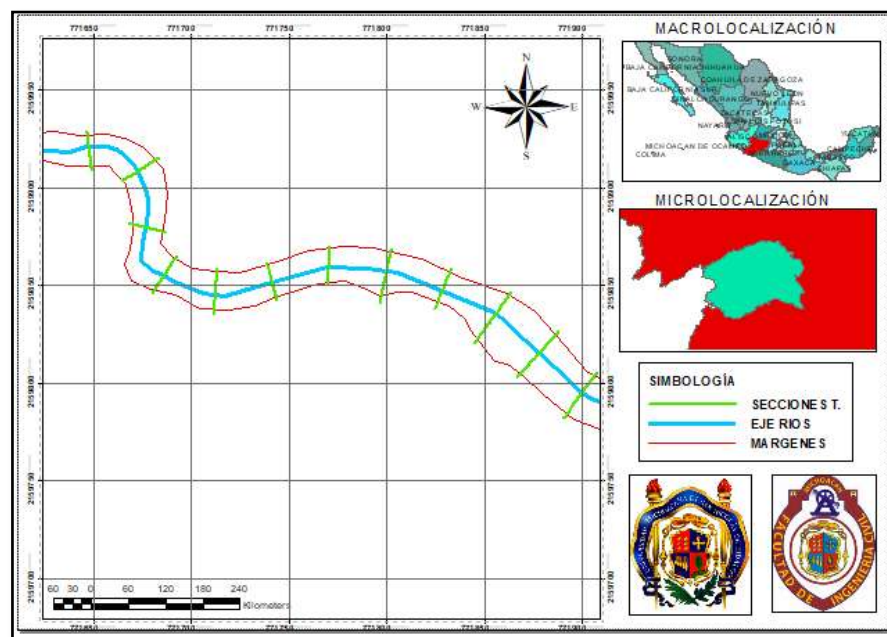


FIGURA 4-3 MAPA DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CAUCE



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Una vez realizado esto, se exportan estos datos con ayuda de la extensión HecGeoRAS al programa HEC-RAS, con el que se trabajó el siguiente capítulo y mismo con el que se observaron resultados y se concluyó.

4.2. MODELO MATEMÁTICO

En este apartado se hace uso de la información, cálculos y resultados obtenidos durante toda la investigación para hacer el modelado final, mismo que describe en tres pasos:

- I. Como primer paso se exportan los datos topográficos (características físicas del cauce) obtenidos en el subcapítulo anterior del programa ArcGis con la herramienta HecGeoRAS hacia el programa HEC-RAS (Figura 4-3).

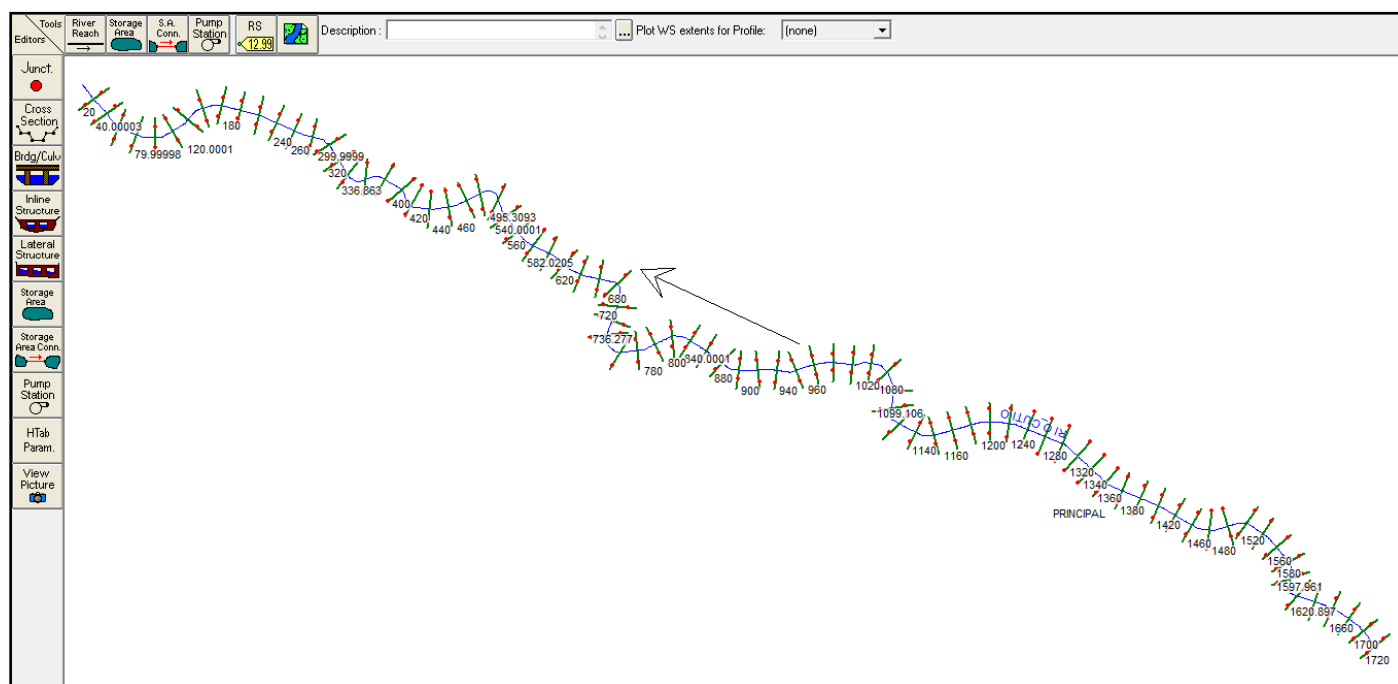


FIGURA 4-4 Características físicas y topográficas del cauce en HEC-RAS

- II. Ya una vez en el área de trabajo del programa HEC-RAS, dentro de las opciones del programa (Tables) asignamos un coeficiente de rugosidad (Coeficiente de Manning) mismo que depende de factores como: vegetación, irregularidades del cauce, alineamiento del canal, depósitos y socavaciones, obstrucciones, tamaño y forma del canal, nivel y caudal, cambio estacional, material suspendido y transporte del fondo.

Para estimar el valor de la rugosidad n hay cinco caminos:

1. Comprender los factores que afectan el valor de n y así adquirir un conocimiento básico del problema y reducir el ancho campo de suposiciones.
2. Consultar un cuadro de valores típicos de n para canales de varios tipos.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



3. Examinar y hacerse familiar con la aparición de algunos canales típicos cuyos coeficientes de rugosidad son conocidos y están registrados en fotos, por ejemplo.
4. Determinar el valor de n a través de un procedimiento analítico basado en la distribución teórica de la velocidad en la sección transversal de un canal y sobre los datos de medidas de velocidad o de rugosidad.
5. Uso de ecuaciones empíricas.

Para este caso hicimos uso del paso 2, usando tablas de los Valores del coeficiente de rugosidad n . Estableciendo que el río es una corriente natural, con un ancho superior al nivel de crecida < 100 ft., con tramos sucios, con pastos y pozos profundos. De esta manera se asigna un coeficiente de rugosidad n de 0.005 para las márgenes y 0.007 para el centro del río (Chow, 1959).

- III. Por último, se asignan los valores de los gastos de diseño para la modelación, con los cuales se realizó el análisis y la simulación del funcionamiento hidráulico de la zona en estudio. En esta etapa se plantearon dos escenarios:
 - a. En condiciones Naturales: sin contemplar estructuras que modifiquen el paso del flujo.
 - b. Con puentes: estas estructuras son las que originalmente se encuentran en el río.

4.3. MODELACIÓN EN CONDICIONES NATURALES

El análisis de la modelación se puede hacer en cuatro escenarios diferentes: Modelización de flujo en régimen permanente, Modelización de flujo en régimen no permanente, Modelización del transporte de sedimentos y Análisis de calidad de aguas, esto depende directamente de las necesidades que se tengan. De esta manera se pueden simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar la altura del nivel de aguas de las fuertes crecidas que últimamente están afectando al poblado.

En base a lo anterior, la modelación se realizó considerando un flujo en régimen permanente con la finalidad de obtener el volumen excedente y así poder proponer las estructuras que se requerirán para solucionar dicho problema y tener un funcionamiento óptimo del sistema.

A continuación, se muestran los perfiles de las secciones representativas donde ocurrieron las inundaciones, considerando un gasto de diseño de $64.80 \text{ m}^3/\text{s}$ el cual pertenece a un periodo de retorno de 50 años, esto debido a que de acuerdo a lo informado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) el pasado 23 de septiembre del 2018, la inundación y los daños provocados fue a causa de una fuerte tormenta que alcanzó los 58 l/m^2 en dos horas.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

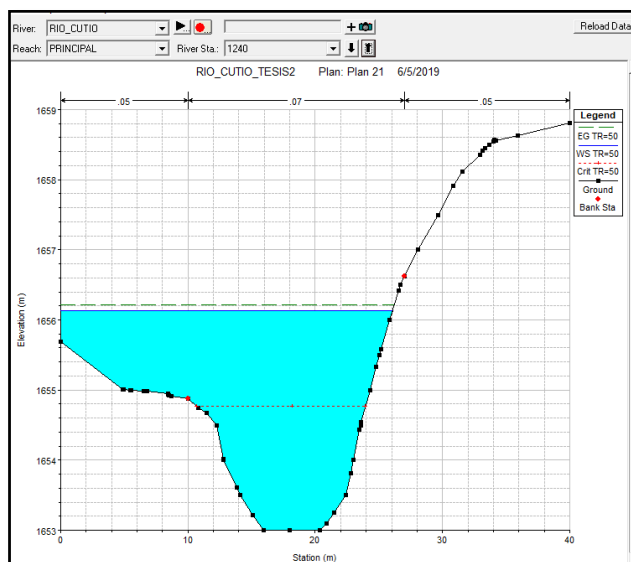


FIGURA 4-5 Sección transversal del rio Cutio en condiciones naturales

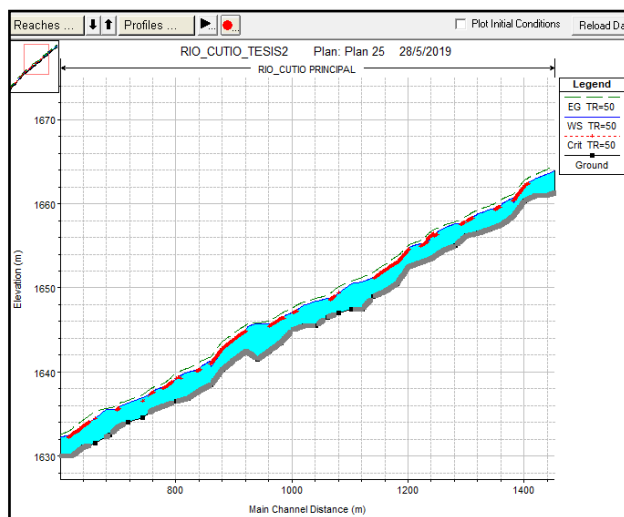
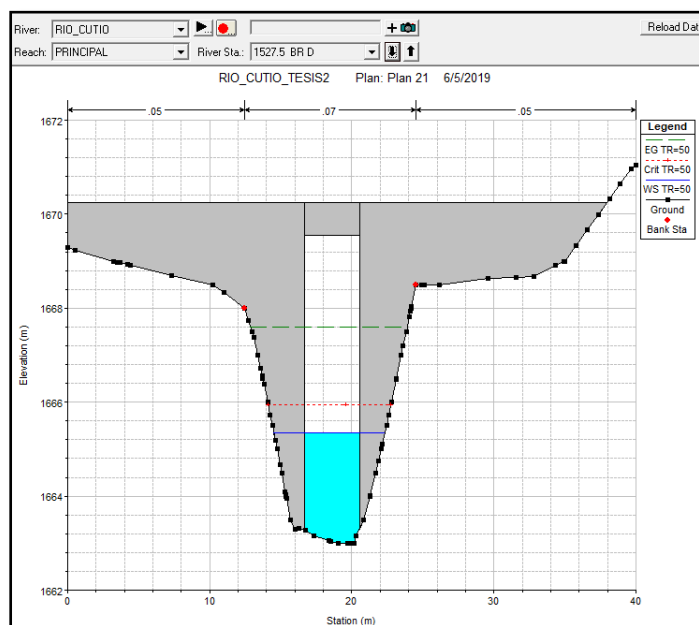


FIGURA 4-6 Perfil longitudinal del rio Cutio en condiciones naturales.

Se observa (Figura 4-5) como es que el rio para dicho gasto trabaja en su máxima capacidad hídrica, y existe un ligero desbordamiento en la margen izquierda, esto de igual forma genera muchos problemas debido al asentamiento urbano en los límites federales respecto de las márgenes del mismo, lo que provoca graves problemas de inundación.

4.4. MODELACIÓN CON PUENTES EXISTENTES

En este apartado se hizo la modelación con los puentes que existen a lo largo del río. Los datos de dichos puentes fueron obtenidos en una visita de campo, tales como la profundidad, ancho, largo y espesores, así como también las condiciones físicas en las que se encontraban después de la inundación. En la zona se identificaron cuatro puentes, mismos que no tienen un funcionamiento adecuado como tal.



**FIGURA 4-7 MODELO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL
PUENTE #1**



**FIGURA 4-8 FOTOGRAFÍA REAL, SECCIÓN
TRANSVERSAL DEL PUENTE #1**

El puente #1 ubicado en la localidad de el Calvario, es el primer puente que se encuentra en el río Cutio, considerando que se empezó el conteo de los puentes de aguas arriba hacia aguas abajo. Es uno de los puentes en mejor estado y mejor construido, en esta zona no ocurrieron afectaciones a causa de la inundación ocurrida antes mencionada, ya que el puente cuenta con una profundidad de 6.30 m desde el terreno natural hacia la losa.

De acuerdo a la Figura 4-7 se observa que el puente es capaz de soportar el gasto por el cual fue simulado, incluso si se duplica este gasto, no tendría problema alguno. La infraestructura del puente consta de una losa de concreto con un espesor de 75 cm apoyada en dos estribos que conectan con los accesos del camino, que de igual forma son parte de las márgenes del río (Figura 4-8).

El problema de este y de todos los puentes de esta localidad radica principalmente en el cambio de sección (reducción y ampliación bruscas) del cauce del río. Provocando de esta manera el aumento instantáneo de la elevación del tirante.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

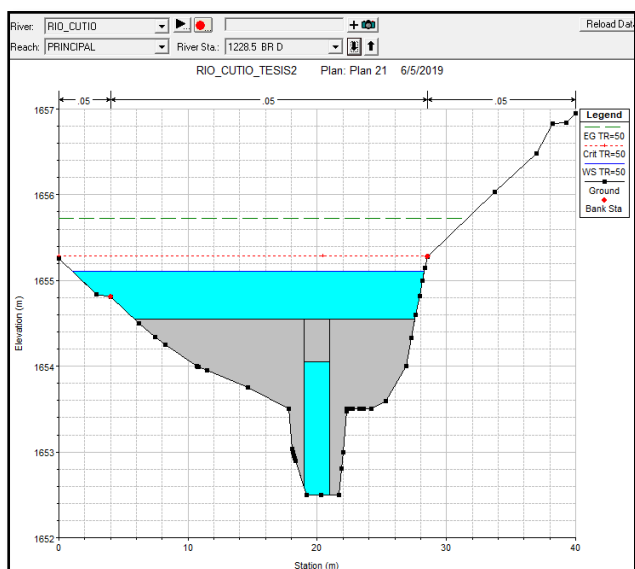


FIGURA 4-10 MODELO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #2



FIGURA 4-9 FOTOGRAFÍA REAL, SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #2 DESPUÉS DE LA INUNDACIÓN.

El puente #2 ubicado en la calle Juan de la Barrera, colonia las Tirinditas. Fue la zona más afectada por la fuerte creciente del pasado 23 de septiembre del 2018. En la Figura 6-9 se puede apreciar la simulación de dicho puente para el mismo gasto que en el apartado anterior ($Q = 64.80 \text{ m}^3/\text{s}$), observándose que el nivel de agua rebasa la capacidad del puente, alcanzando un tirante aproximado de un metro, a esto se suma la fuerte pendiente del cauce y la velocidad elevada de 4 m/s , lo que provocó el arrastre de sedimentos debido a la velocidad del flujo, causando de esta manera severas afectaciones a las viviendas y pérdidas humanas en esta localidad.

Por otra parte, cabe mencionar que la infraestructura de este puente no cuenta con un óptimo diseño estructural, ya que es solo una losa de rodamiento, con estribos provisionarles de roca que conectan los accesos del camino, mismos que no cuentan con la capacidad ni la funcionalidad de unos estribos bien diseñados y construidos (Figura 4-9). No hubo un colapso total del puente debido a que el agua se dispersó por diferentes lugares, y aunque éste no haya colapsado, no está en óptimas condiciones para su funcionamiento, aunque hasta el momento se siga circulado en el.

Es claro que las deficiencias en el diseño estructural y un óptimo mantenimiento en el puente son los factores principales del mal funcionamiento del mismo. Aunado a esto, se tiene el mismo problema que en el puente anterior, hay una reducción y ampliación brusca que genera la elevación de todos los tirantes, creando un remanso del flujo aguas arriba del puente, lo que hace aun peor el problema.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

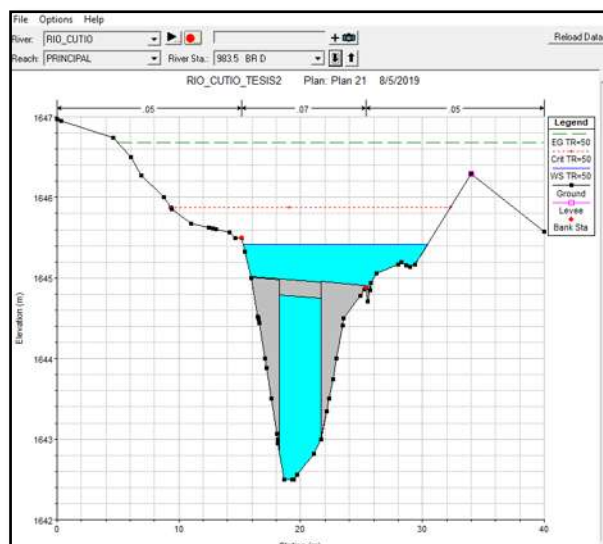


FIGURA 4-11 MODELO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #3



FIGURA 4-12 FOTOGRAFÍA REAL, SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #3 DESPUÉS DE LA INUNDACIÓN.

El puente #3 está ubicado en la calle Montes de Oca, en la localidad de Peribán. Esta zona también fue afectada por la inundación, como puede observarse (Figura 4-11) el nivel de aguas máximas supera la elevación del puente, lo que aunado a la fuerte velocidad y al arrastre de sedimentos, hizo que la inundación fuera inevitable, así como las pérdidas, humanas y materiales.

Una vez más el mismo problema se repite, las deficiencias en la infraestructura se hacen notar (Figura 4-12). Las condiciones en las que se encuentra el puente después de la inundación no son aptas para transitar en el, ya que no cuenta con protecciones laterales para el peatón o los vehículos, señalan los habitantes de la zona.

El puente lo conforma una losa ligeramente apoyada en dos muros de mampostería, conectando de esta manera los accesos del camino, la cual es de espesor muy pequeño para el tránsito de vehículos y peatón. El peligro del colapso es evidente, ya que en las conexiones no hay acero de sujeción o alguna forma para que éste se mantenga en un funcionamiento correcto. Además de no contar con la elevación suficiente para la circulación adecuada del flujo, lo que provoca de igual forma que los anteriores los remansos o embotellamientos.

Por otra parte, es importante señalar que la limpieza de las márgenes y en el fondo del río es un factor muy importante para el funcionamiento y la circulación correcta del flujo. Como puede observarse (Figura 4-12) a lo largo de todo el río, la maleza se encuentra muy presente y con alturas muy altas, así como también la basura y las aguas residuales que ahí se desaloja por la comunidad, es lo que provoca serios problemas. La problemática originada por la gestión inadecuada de los residuos sólidos se está agravando con el diario vivir. En la mayoría de los casos el servicio de recolección y disposición de los residuos sólidos es deficiente. Esto da origen a una serie de problemas de salud pública graves.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN

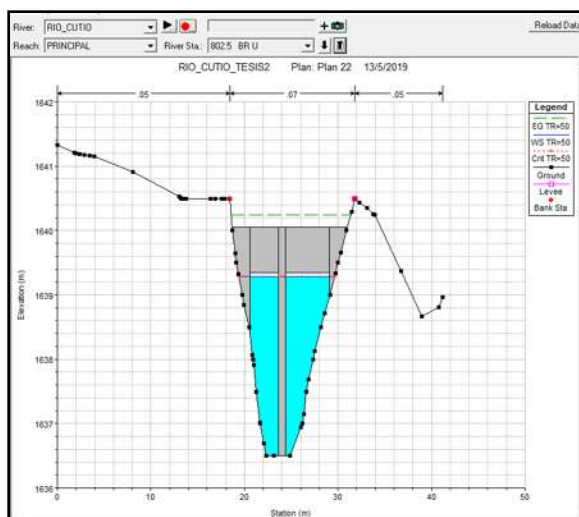


FIGURA 4-13 MODELO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #4



FIGURA 4-14 FOTOGRAFÍA REAL, SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE #4 DESPUÉS DE LA INUNDACIÓN.

El puente #4 y último, ubicado en la calle Javier Mina Sur, en la colonia Barrio Negro también sufrió severas afectaciones, como se ha mencionado con anterioridad los mismos problemas se repiten en cada uno de los puentes, la mala planeación, el diseño estructural del puente, así como las condiciones en las que se encuentra el propio cauce fueron factores principales de la inundación ocurrida el 23 de septiembre del 2018. A esto le sumamos la mala planeación urbana y la falta de cooperación de la población y de las autoridades municipales para el manejo de los permisos en la construcción de viviendas dentro del límite federal respecto a las márgenes del río.



FIGURA 4-15 FOTOS DE LA INSPECCIÓN REALIZADA AL ÁREA DE ESTUDIO EL PASADO 13/MARZO/2019 CON EL OBJETIVO DE OBSERVAR LOS DAÑOS DEJADOS POR LA INUNDACIÓN PRODUCIDA POR LA AVENIDA DEL 23/SEPTIEMBRE/2018.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio hidrológico o balance hídrico superficial que aquí se presentó es un estudio parcial de solo aguas superficiales, ya que solo se está estudiando la cuenca. El balance hídrico superficial es una sumatoria de las entradas menos la sumatoria de las salidas. Esto es, las entradas como la precipitación, escurrimiento superficial que entra, escurrimiento superficial que sale, flujo subterráneo que sale a la superficie en forma de manantial; se le resta las salidas como el escurrimiento superficial que sale del sistema, escurrimiento superficial extraído, evaporación, transpiración e infiltración.

Cabe mencionar que la cuenca del río Cutio es una cuenca de cabecera, al ser de esta manera, la entrada por escurrimiento que entra a la cuenca no existe, al igual que el escurrimiento superficial importado. El flujo de aguas residuales que llega al cauce del río existe, pero no está medido. Por lo que la única entrada a considerar es la precipitación.

Por tanto, la disponibilidad hídrica natural, es el resultado de la diferencia de la precipitación media anual y las pérdidas como la evaporación, transpiración e infiltración. Al no contar con datos ni mediciones de las variables de pérdidas se recurre a obtener la disponibilidad hídrica haciendo uso del coeficiente de escurrimiento, para obtener los volúmenes de escurrimiento superficial natural.

La determinación de la tormenta de diseño y de la máxima avenida, ha sido el resultado de un trabajo exhaustivo con el único insumo que permite determinarlo, esto es la precipitación. Para la precipitación se ha realizado un trabajo riguroso de selección de estaciones principales, una evaluación estadística básica y específica de la consistencia de datos, así como un llenado de datos mensuales de la precipitación total mensual y precipitación máxima diaria. Estos datos de precipitación totales mensuales permitieron realizar el cálculo de la disponibilidad hídrica natural superficial, así como la determinación y modelación del gasto de diseño o de la máxima avenida en la cuenca del río Cutio.

Identificadas las estaciones principales se ha seguido una metodología propuesta por Francisco J. Aparicio Mijares, para la determinación de las curvas IDT, útil para proponer las tormentas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno.

Con la tormenta de diseño se utilizaron diversos modelos lluvia-escurrimiento que nos permitieron obtener el gasto de diseño o gasto máximo, siendo el método de HUTSCS seleccionado.

Finalmente se realizó la modelación de las máximas avenidas en la cuenca del río Cutio mediante el modelo HEC-HMS y la modelación hidráulica del tramo de estudio mediante el modelo HEC-RAS 2D, para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000, 10000 años respectivamente.

Considerando la magnitud del área de inundación y de afectaciones generadas por el evento de la máxima avenida producida el 23 de septiembre del 2018, y de acuerdo a las modelaciones realizadas del flujo con el programa HEC-RAS, se puede mencionar que por lo menos corresponde a un periodo de retorno de 50 años como mínimo.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



Al realizar la modelación en condiciones naturales con un gasto igual a 64.80 m³/s, se observa que el río Cutio trabaja en su máxima capacidad hídrica y en algunas zonas esta capacidad es superada por los niveles de agua. A esto le sumamos la modelación con las estructuras existentes (puentes), mismos que hacen aun peor el problema, ya que los niveles de agua son notoriamente incrementados en las secciones donde están ubicados dichos puentes. El cambio climático, el cambio de uso de suelo, las reducciones en las secciones, la construcción de puentes sin una planeación estructural y la falta de mantenimiento en el cauce, provocaron remansos en la circulación del flujo, así como el arrastre de sedimentos y la velocidad que estos en su camino generaron, provocando de esta manera la inundación en el municipio de Peribán, cobrando de igual forma pérdidas humanas, materiales, económicas etc.

A continuación, se hace un pequeño listado de las recomendaciones que en base a los resultados obtenidos y a la visita de campo que se realizó en la zona de estudio después de las inundaciones, son necesarias realizar:

- Realizar brigadas de limpieza y desazolve al largo del río para garantizar de esta manera no perder la capacidad de almacenamiento hidráulico, así mismo evitar la obstrucción del flujo y los remansos por la acumulación del arrastre de sedimentos.
- Rediseñar los puentes para que cuenten con la capacidad hídrica en caso de presentar un evento de mayor magnitud al ocurrido el 23 de septiembre del 2018.
- Demoler los puentes #2 y #3 ya que no se encuentran en condiciones de tránsito seguro, así como son un problema para el tránsito del flujo de agua en las máximas avenidas.
- Colocar protecciones laterales en los puentes #1 y #4, con la finalidad de proporcionar seguridad al tránsito vehicular y peatonal.
- Evitar hacer reducciones y ampliaciones bruscas en las secciones, ya que con ello provocan los taponamientos y remansos en los puentes.
- Ampliación en las secciones a lo largo de todo el río, con la finalidad de hacer la circulación del flujo de agua sin problemas de obstrucción, reducción y ampliaciones bruscas.
- Respetar el Plan de Urbanismo, Desarrollo y Construcción del estado de Michoacán, mismo que establece no construir dentro de los límites federales que corresponden al área que pertenece al cauce del río.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS EN LA CUENCA DEL RIO CUTIO, PERIBÁN



BIBLIOGRAFÍA

Aparicio Mijares, F. J. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa.

Francisco Daniel, Procesos del Ciclo Hidrológico, Campos Aranda.

Ven T. Chow y L. W. Mays; Hidrología Aplicada; Ed. McGraw Hill. 1977

Oscar A Fuentes Miralles, Estudio Hidrológico para Obras de Protección, enero 1999

Rolando Springall; Análisis estadístico y probabilística de datos hidrológicos; Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Chow, V. T. (1964). Handbook of Applied Hydrology. Mc Graw-Hill.

US Army Corps of Engineers (2017). River Analysis System (HEC-RAS). Estados Unidos.

CLICOM, S. O. (2017). México. <http://clicom-mex.cicese.mx>.

<http://metodo2013.blogspot.com/2015/02/cuenca-hidrografica-espacio-idoneo-para.html>

http://hidrologia.usal.es/practicas/correlacion/Correlacion_explicacion.pdf

INEGI, I. G. (2017). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado el 27 de enero de 2017, de: www.inegi.org.mx

https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/Congreso_libro/TC_TEMA_2.pdf

INEGI. Cartografía 1:200,000 y 1:50,000

INEGI. (Julio, 2018) información del uso y tipo de suelo: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/cartaedafologica.aspx>

INEGI. (Junio, 2017). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0): <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Preview.aspx>.

CONABIO. (septiembre, 2018). Clima en Michoacán: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no.