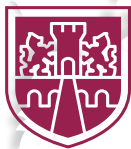




ANÁLISIS HIDRÁULICO EN SAN JUAN IXTAYOPAN, ALCALDÍA TLÁHUAC, CIUDAD DE MÉXICO

Fenómenos Naturales
y Antropogénicos
Agosto, 2023.





**GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO**
CAPITAL DE LA TRANSFORMACIÓN



SGIRPC

**SECRETARÍA DE GESTIÓN INTEGRAL
DE RIESGOS Y PROTECCIÓN CIVIL
DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

Arq. Myriam Urzúa Venegas

Secretaria de Gestión Integral de Riesgos
y Protección Civil

Lic. Luz Elena Rivera Cano

Secretaria Particular de la Secretaría de Gestión
Integral de Riesgos y Protección Civil

Mtro. Jorge Antonio Ortiz Torres

Asesor de la Secretaria

Lic. Iccen Leticia Salas Pichardo

Directora Ejecutiva de Asuntos Jurídicos

Mtra. Gloria Luz Ortiz Espejel

Directora General de Vinculación y Capacitación

Mtro. Norlang Marcel García Arróliga

Director General de Resiliencia

Lic. Rafael Humberto Marín Cambranis

Director General de Análisis de Riesgos

Mtro. Pedro Martínez Cornejo

Director General de Táctico Operativa

Mtra. Erika Alejandra Barba Luna

Directora Ejecutiva de Administración y Finanzas

Lic. Jonathan Pascual Capote Romero

Director de Difusión de Prevención de Riesgos

ESTUDIO REALIZADO POR:

**DIANA LAURA DIAZ CRUZ
ROMÁN VALVERDE DELGADO**

**FENÓMENOS NATURALES
Y ANTROPOGÉNICOS
DIRECCIÓN GENERAL
DE ANÁLISIS DE RIESGOS**

AÑO 2023

Diseño: Justino Hernández Cortez

Inscrito a la Dirección de Difusión
de Prevención de Riesgos



ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	7
2 OBJETIVO	8
3 FLUJO EN UN CANAL.....	8
4 TIPOS DE FLUJO.....	9
4.1 Flujo Permanente y No Permanente	9
4.2 Flujo Uniforme	9
4.2.1 Flujo uniforme permanente	9
4.2.2 Flujo uniforme no permanente	10
4.3 Flujo Variado	10
4.3.1 Flujo gradualmente variado.....	10
4.3.2 Flujo rápidamente variado	10
4.3.3 Flujo espacialmente variado	10
4.4 Flujo Laminar, Transicional y Turbulento.....	11
5 REGÍMENES DE FLUJO	12
6 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.....	13
6.1 Sección Transversal	13
6.2 Sección Longitudinal	14
7 AFORO	15
7.1 Aforos Directos	15
7.1.1 Estimación aproximada con flotadores	15
7.1.2 Molinete	16
7.1.3 Aforos químicos	16
7.2 Aforos Indirectos.....	16
7.2.1 Escalas limnimétricas.....	17
7.2.2 Limnígrafos.....	17
7.2.3 Curva de gastos (Rating Curve).....	17
7.2.4 Aforadores de vertederos (Weirs)	17
8 ECUACIONES DE SAINT-VENANT EN 1D	18
8.1 Ecuación de Continuidad	18
8.2 Ecuación de Momentum	18

9 FACTORES DE FRICCIÓN	19
9.1 Velocidad en Flujo Uniforme	19
9.2 Ecuación de Chézy	19
9.2.1 Ecuación de G. K	20
9.2.2 Ecuación de Kutter	20
9.2.3 Ecuación de Bazin	20
9.2.4 Ecuación de Kozeny.....	20
9.2.5 Ecuación de Manning.....	21
9.3 Ecuación de Manning.....	21
10 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING	21
11 SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....	23
11.1 Generación de Escenarios de Peligro	23
11.2 HEC-RAS.....	23
11.3 Preparación de Archivos en ArcGIS	23
11.4 Creación del Proyecto en HEC-RAS	25
11.4.1 Importación de datos geométricos	25
11.4.2 Llenado de la información.....	26
11.4.3 Condiciones de frontera.....	28
11.4.4 Ejecución del programa e interpretación de resultados	29
11.4.5 Verificación y exportación de resultados	31
12 INUNDACIONES	33
13 CONCLUSIONES	36
14 BIBLIOGRAFÍA.....	37

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad impera la necesidad de desarrollar diferentes proyectos de recursos hidráulicos y trabajos de ingeniería hidráulica, debido a esto ha ido a la alza la necesidad de adquirir conocimientos en hidráulica de superficie libre.

El conjunto entre un estudio hidrológico y un hidráulico nos permite conocer las características de escurrimiento de agua pluvial en zonas de interés, así como sus periodos de retorno, volúmenes de precipitación y áreas de escurrimiento, esto con el objetivo de proponer, planificar, diseñar y ejecutar obras de captación, a fin de evitar inundaciones y daños en las obras proyectadas.

Los modelos matemáticos han sido utilizados desde la antigüedad en el área de planificación y diseño de obras, sin embargo es necesario que dichos modelos estén continuamente actualizados, de modo que tengan la capacidad de representar su comportamiento en cualquier instante, ya sea pasado, presente o futuro.

La simulación hidráulica se traduce como la interrelación entre la topografía del cauce, los volúmenes de agua y sedimentos transportados, así como la manera en que influyen las obstrucciones u obras hidráulicas existentes en el área de estudio. De esta manera, la simulación resulta ser una herramienta muy útil para dar solución a problemas relacionados con el manejo de cauces naturales.

2 OBJETIVO

Realizar el análisis hidráulico unidimensional para un sistema natural en San Juan Ixtayopan, en la subcuenca RH26Dp, en la alcaldía Tláhuac, Ciudad de México; mediante el uso del programa HEC-RAS.

3 FLUJO EN UN CANAL

El flujo de agua en conductos puede clasificarse como flujo en canal abierto o como flujo en tubería, ambas clasificaciones son similares, sin embargo el flujo en canal abierto debe poseer una superficie libre sometida a la presión atmosférica, mientras que el flujo en tubería debe ser conducido a tubo lleno, siendo afectado por la presión hidráulica, aunado a esto, un conducto cerrado no es necesariamente un flujo en tubería, ya que si existe una superficie libre, puede clasificarse como flujo en canal abierto.

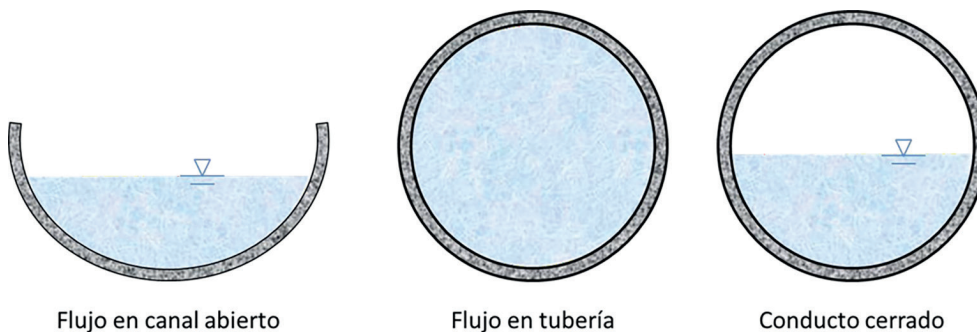


Imagen 1.
Representación de un flujo en un canal abierto y flujo en tubería y conducto cerrado
Fuente: Elaboración propia

En comparación con los flujos en tubería, trabajar con flujos en canales abiertos representa una mayor complicación debido a que las condiciones físicas de los canales abiertos varían mucho, por lo cual, la superficie libre puede cambiar con el tiempo y el espacio, además de que el caudal, la pendiente del canal y la profundidad a la que se encuentra el flujo tienen una dependencia recíproca.

Los canales pueden ser naturales o artificiales, esto de acuerdo a su origen. Los naturales son creados por los ecosistemas y tienen la capacidad de drenar el agua de la tierra y los encontramos en forma de arroyos, ríos, estuarios, etc. Los canales artificiales son aquellos que ha construido el hombre con la finalidad de beneficiar prácticas de riego, drenaje, navegación, etc.

En este trabajo se realizará el análisis hidráulico en un flujo a canal abierto, en un canal natural.

4 TIPOS DE FLUJO

En canales abiertos pueden existir diferentes clasificaciones. Considerando que, en todos los casos, se trata de un flujo unidimensional, se enlistan los siguientes tipos de flujo:

4.1 Flujo Permanente y No Permanente

Para esta clasificación se utiliza el tiempo como criterio.

Se dice que el flujo es permanente cuando este mantiene sus características hidráulicas constantes con respecto al tiempo, tales como su tirante, el caudal, o su velocidad media.

Por ejemplo, si la profundidad del flujo con respecto al tiempo no cambia o esta se puede suponer constante para cierto intervalo de tiempo, se considera flujo permanente, por el contrario, si el tirante se encuentra cambiante a lo largo del tiempo, se considera como flujo no permanente o impermanente.

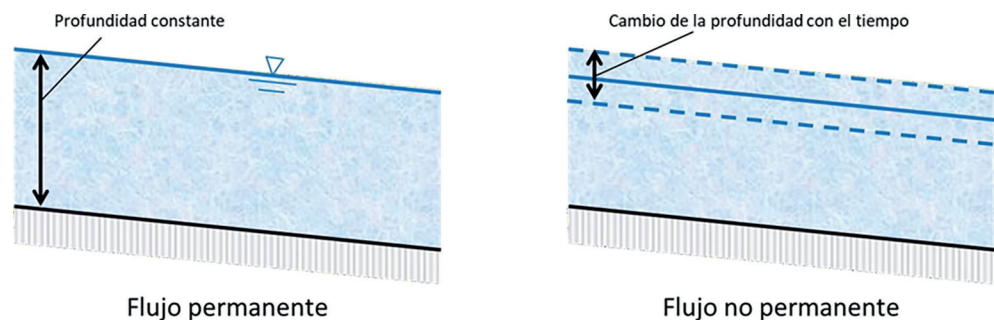


Imagen 2.
Representación de un flujo permanente y no permanente
Fuente: Elaboración propia

4.2 Flujo Uniforme

Esta clasificación utiliza el espacio como criterio.

Un flujo uniforme surge a partir de que este mantiene constante su velocidad media en cualquier sección del canal y por lo tanto no presenta cambio en su área hidráulica, ni en su tirante.

Un flujo uniforme puede ser permanente o no permanente, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo.

4.2.1 Flujo uniforme permanente

Este flujo es el que se considera en la hidráulica de canales abiertos y en él, la profundidad del flujo no cambia en el intervalo de tiempo.

4.2.2 Flujo uniforme no permanente

Este tipo de flujo se presenta si la superficie del agua fluctúa de un tiempo a otro mientras permanece paralelo al fondo del canal.

4.3 Flujo Variado

El flujo variado es totalmente contrario al flujo uniforme, ya que este se presenta cuando la velocidad media cambia a lo largo del canal, al producirse este cambio en la velocidad provoca que existan variaciones en la sección, esto debido a un cambio en la pendiente o debido a la existencia de estructuras hidráulicas.

Asimismo, el flujo variado se puede clasificar en gradualmente variado, rápidamente variado y espacialmente variado.

4.3.1 Flujo gradualmente variado

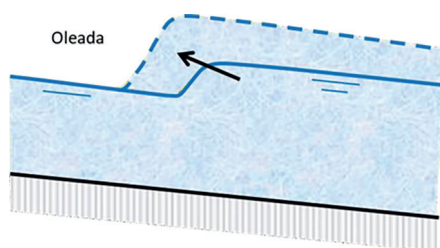
Para que se presente un flujo gradualmente variado, el tirante debe cambiar gradualmente a lo largo del canal.

4.3.2 Flujo rápidamente variado

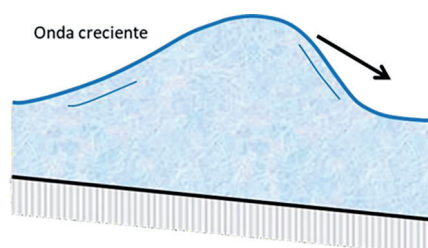
Esta condición se presenta cuando el tirante cambia de manera abrupta en distancias cortas.

4.3.3 Flujo espacialmente variado

En este se presentan cambios en el gasto, ya sea en un mismo tramo o a lo largo de todo el canal.



Flujo rápidamente variado



Flujo gradualmente variado

Imagen 3.
Representación de un flujo
rápidamente variado y
gradualmente variado Fuente:
Elaboración propia

4.4 Flujo Laminar, Transicional y Turbulento

En canales abiertos, el comportamiento del agua está regido por los efectos de la viscosidad y de la gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo, debido a esto, el flujo puede presentar un comportamiento laminar, transicional o turbulento.

Un flujo es laminar cuando las partículas de agua se mueven en trayectorias suaves, con movimientos perfectamente ordenados, definiendo líneas de corriente, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas entre sí. Esto ocurre a velocidades relativamente bajas o en condiciones donde la viscosidad es alta.

Flujo Laminar

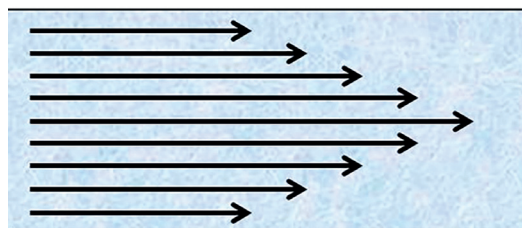


Imagen 4.
Representación de un flujo laminar Fuente: Elaboración propia

El flujo turbulento se presenta cuando las partículas del agua se mueven en trayectorias irregulares, con movimientos desordenados, pero que en conjunto aún presentan un movimiento hacia delante de la corriente. Este flujo ocurre a velocidades altas o cuando en el cauce hay presencia de obstáculos, además de que las fuerzas viscosas son débiles.

Flujo turbulento

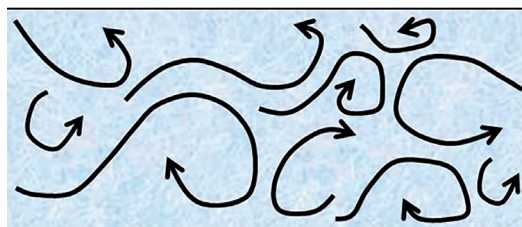


Imagen 5.
Representación de un flujo turbulento Fuente: Elaboración propia

A su vez, entre el estado de flujo laminar y turbulento, existe el estado mixto o transitorio o transicional.

Flujo transicional

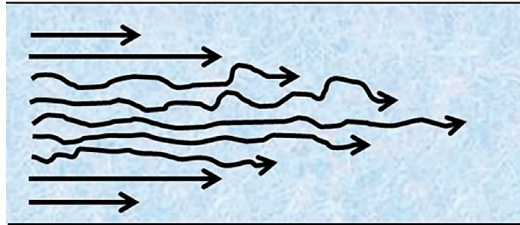


Imagen 6.
Representación de un
flujo transicional Fuente:
Elaboración propia

El efecto de la viscosidad en relación con la inercia puede representarse mediante el número de Reynolds, el cual se define como se muestra a continuación:

$$R = \frac{VL}{\vartheta}$$

donde R es el número de Reynolds, V es la velocidad del fluido; L es la longitud; y ϑ la viscosidad cinemática del agua.

5 REGÍMENES DE FLUJO

En un canal abierto se pueden producir regímenes de flujo subcrítico, flujo crítico o flujo supercrítico. Para definir el régimen de un fluido, es necesario emplear el número de Froude, siendo este un principio fundamental en la hidráulica de canales.

El número de Froude expresa la relación entre el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido, ambas por unidad de masa. Este número adimensional se define de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD_H}}$$

donde Fr es el número de Froude, g es la aceleración de la gravedad, v es la velocidad media de la sección del canal, D_H la profundidad hidráulica.

siendo

$$D_H = \frac{A}{T}$$

donde A es el área de la sección transversal y T es el ancho de la lámina libre.

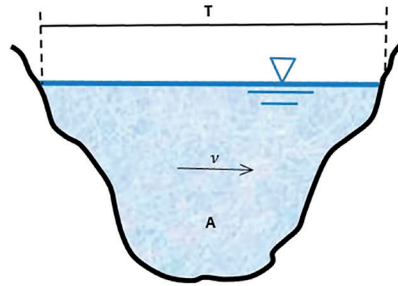


Imagen 7.
Representación de una
sección transversal de un
canal Fuente: Elaboración
propia

Un flujo se denomina crítico cuando $Fr = 1$ e indica que las fuerzas viscosas que actúan sobre un fluido y las fuerzas de gravedad son iguales; para un régimen subcrítico $Fr < 1$, esto significa que las fuerzas viscosas son menores que las gravitacionales, este fenómeno se presenta cuando las velocidades son pequeñas; no obstante, frente a grandes velocidades es posible observar un régimen supercrítico, donde $Fr > 1$, aquí las fuerzas viscosas son mayores que las gravitacionales.

6 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES

En los canales, como por ejemplo un río, se presenta una superficie libre, puede tener cambios de forma en cada sección, posee cierta rugosidad en sus paredes, un gasto y corrientes secundarias, pudiendo esto afectar a la distribución de velocidades en las secciones del canal. Para el estudio de la distribución de las velocidades se consideran dos tipos de secciones, las cuales se describen a continuación:

6.1 Sección Transversal

La fricción a lo largo de las paredes y fondo del canal crean una resistencia, provocando que la velocidad del agua se reduzca. Aunado a esto, la superficie libre, por igual, genera una resistencia, ocasionada por la presencia de la presión atmosférica y el viento, influyendo también sobre la velocidad.

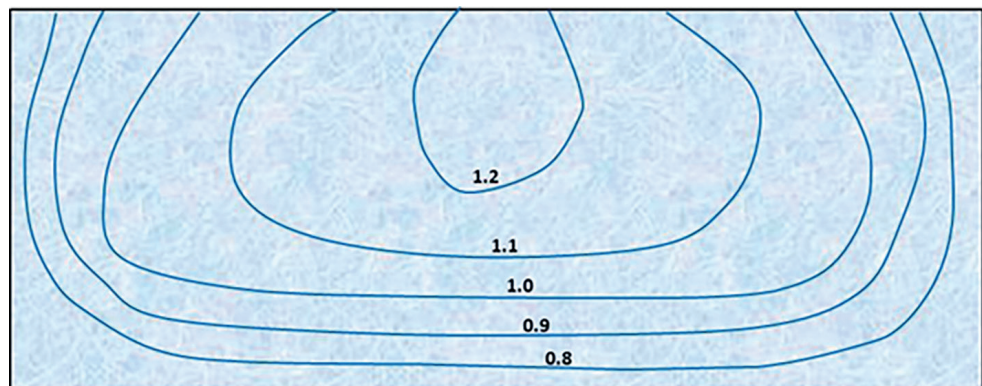


Imagen 8.
Representación de la variación
de las velocidades en una
sección transversal Fuente:
Elaboración propia

6.2 Sección Longitudinal

En la Imagen 9 se muestra la distribución de velocidad en las verticales.

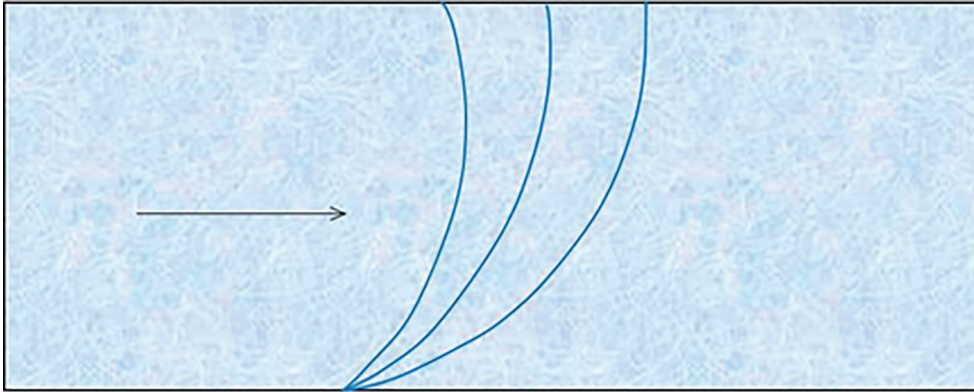


Imagen 9.
Representación de la variación de las velocidades en la vertical Fuente: Elaboración propia

A partir de estas variaciones de velocidad se puede generar un diagrama con respecto a la profundidad, tal como se muestra a continuación:

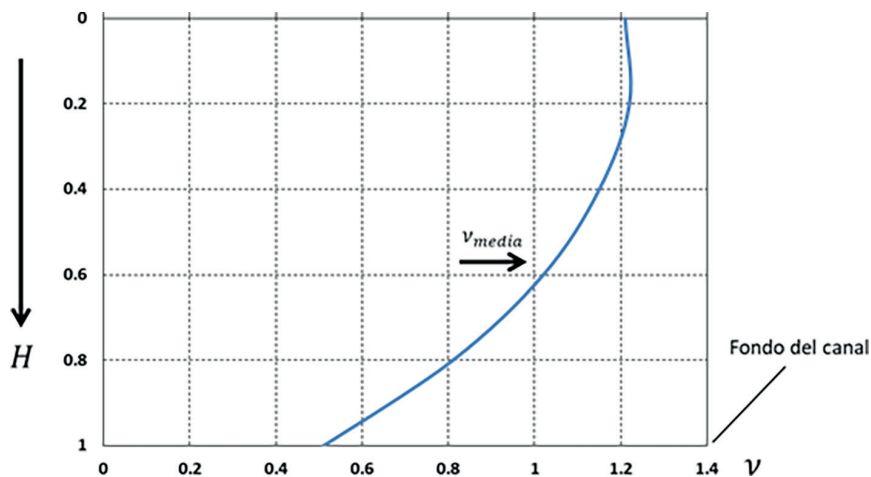
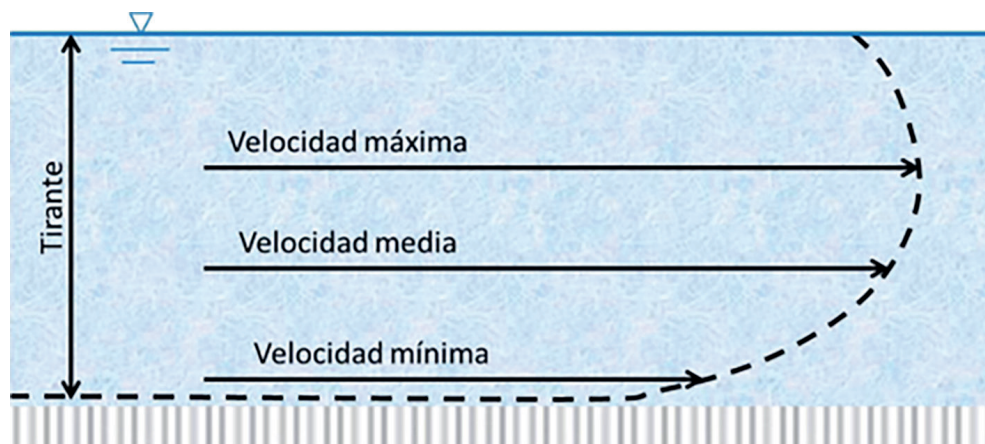


Imagen 10.
Representación de la variación de la velocidad con respecto a la profundidad Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar, la velocidad máxima ocurre en la proximidad a la superficie libre, a una distancia entre 0.05 y 0.25 de la profundidad, mientras que la velocidad mínima se presenta en la proximidad de las paredes y el fondo del canal.

Imagen 11.
Representación de
velocidades en un cauce
Fuente: Elaboración propia



Los valores de las velocidades se obtienen a partir del aforo del canal.

7 AFORO

Aforar un cauce consiste en emplear un método para determinar la cantidad de agua que atraviesa una sección transversal en un instante de tiempo dado, para lo cual se mide el volumen y la velocidad con la que transita el agua.

El aforo nos permite conocer la disponibilidad hídrica, tiempos de viaje, la calibración de los modelos hidráulicos e hidrológicos e, incluso, la prevención de desastres para zonas localizadas aguas abajo de la sección de aforo.

Existen varios métodos para aforar corrientes de agua, esto varía según la fuente que se desea medir y el caudal que circula sobre este. Para realizar un aforo, se debe realizar un levantamiento de la sección transversal para posteriormente obtener, por medio de una relación matemática simple (velocidad por área), el valor de caudal de agua.

7.1 Aforos Directos

Se llama aforo directo a aquel que requiere de algún aparato o procedimiento para realizar la medición del caudal. A continuación se enlistan algunos de estos:

7.1.1 Estimación aproximada con flotadores

Para esta técnica, se requiere arrojar un objeto que flote en el agua y medir la velocidad con la que este viaja, mientras que el área de la sección se estima por aproximación (anchura media por profundidad).

El resultado del caudal debe ser multiplicado por un factor de entre 0.7 y 0.8, debido a que con los flotadores se mide preferentemente la velocidad en la parte central del cauce, y no considerando las partes próximas a las orillas.

7.1.2 Molinete

A través del empleo de un molinete se realiza la medición de la velocidad de una corriente a distintas profundidades en varias verticales de la sección transversal. El área de la sección se calcula a partir de la profundidad de cada vertical y de la anchura del cauce.

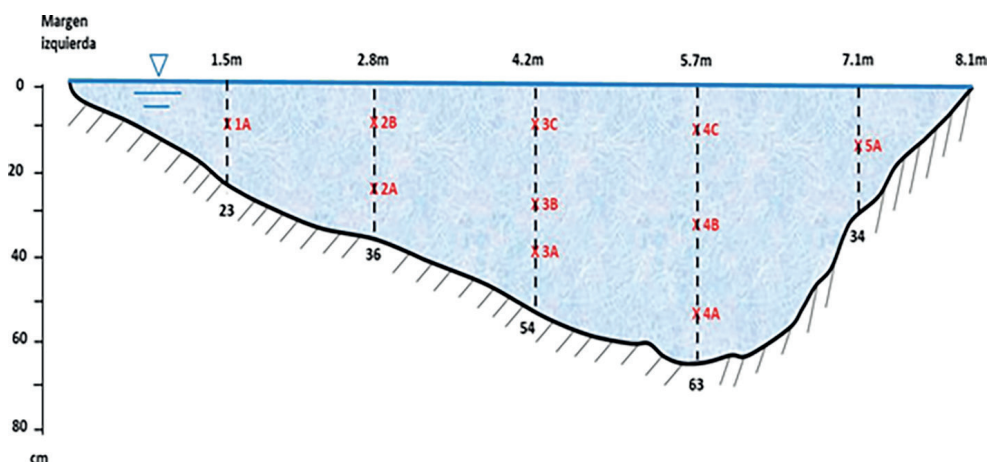


Imagen 12.
Representación de la medición de la velocidad de una corriente, con molinete Fuente: Elaboración propia

7.1.3 Aforos químicos

Este método consiste en agregar una sustancia de concentración conocida en el cuerpo de agua, en su trayectoria esta sustancia se irá diluyendo y al llegar aguas abajo se tomará una muestra. La aplicación de este método se puede ejecutar a través de un procedimiento de aforo de vertido constante, en el cual se añade un pequeño caudal continuo con una concentración conocida; la otra aplicación se genera a partir de un aforo de vertido único o de integración, esta técnica generalmente se aplica en flujos turbulentos, para asegurar la mezcla del vertido de la sustancia concentrada con todo el caudal que circule hasta el punto donde se tomará la muestra.

7.2 Aforos Indirectos

El aforo indirecto o también conocido como aforo continuo, es aquel en el que se mide el nivel del agua y a partir de este se estima el caudal.

7.2.1 Escalas limnimétricas

Este tipo de aforo emplea escalas graduadas sujetas al suelo o adosadas al pilar de un puente.

Para medir el caudal, se requiere que un operario registre diariamente cuál es la altura del agua.

7.2.2 Limnígrafos

Los limnígrafos son dispositivos que registran de manera gráfica o digital el nivel del agua a lo largo del tiempo. Dicho grafico se denomina limnigrama.

7.2.3 Curva de gastos (Rating Curve)

Para convertir los niveles de agua en caudal se requiere de una ecuación y para ello se emplea una curva de gastos, que relaciona la altura del agua con el caudal. Esta relación se logra a partir de la medición de varios aforos directos.

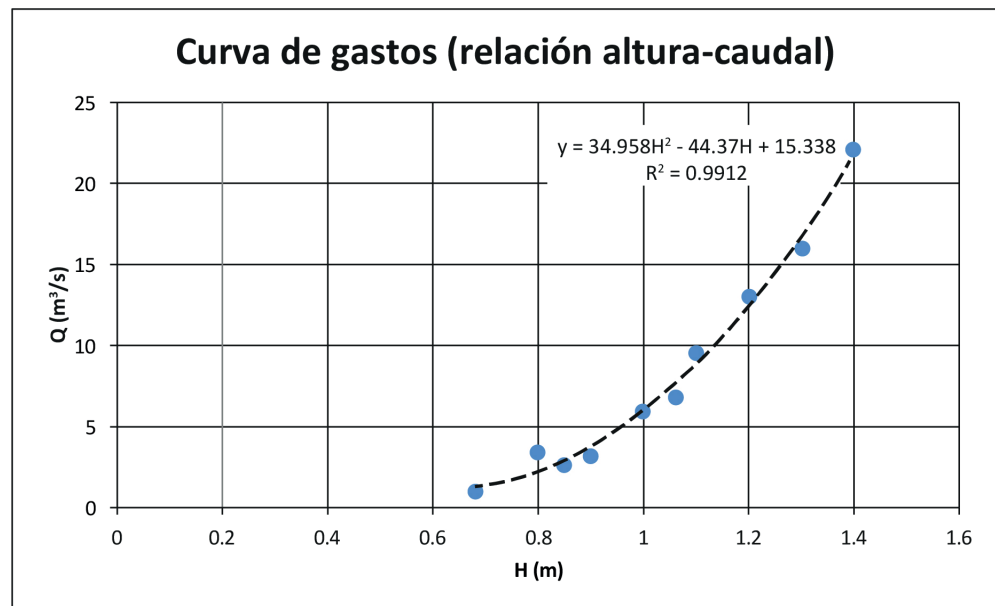


Imagen 13.
Representación de una curva de gastos Fuente: Elaboración propia

7.2.4 Aforadores de vertederos (Weirs)

Un vertedero es una estructura transversal a la corriente que eleva el nivel aguas arriba y que permite la circulación del agua a través de una abertura, la cual puede tener diferentes formas y terminaciones. El caudal se calcula de diferentes formas, esto dependiendo del tipo de vertedor que se emplee.

8 ECUACIONES DE SAINT-VENANT EN 1D

Para canales abiertos o tuberías con superficie libre, con un flujo no permanente, el matemático e ingeniero francés Saint-Venant desarrollo un conjunto de ecuaciones diferenciales, que modelan los cambios de caudal y nivel de un líquido a lo largo del espacio unidimensional.

A partir de las ecuaciones, altamente utilizadas, de Navier-Stokes es posible deducir las ecuaciones de Saint-Venant, realizando un proceso de integración en dos dimensiones.

Para desarrollar las ecuaciones de Saint-Venant se requiere suponer que tanto la velocidad como la profundidad del flujo solamente varían longitudinalmente; la variación de profundidad y velocidad se presenta de manera gradual; el canal es aproximadamente lineal; cuenta con una pendiente pequeña; el lecho no presenta erosión ni acumulación de material; el fluido es incompresible y tiene una densidad constante.

El sistema de ecuaciones de Saint-Venant está compuesto por la ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento o momentum.

8.1 Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad es un resultado matemático de la ley de conservación de la materia que se puede aplicar cuando se tiene un fluido ideal.

Su forma conservativa se presenta en términos del caudal (Q) y del área (A).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

Mientras que en su forma no conservativa se representa en términos de la velocidad media longitudinal (v) y la profundidad (y).

$$v \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

8.2 Ecuación de Momentum

La cantidad de movimiento o momentum es una magnitud física de tipo vectorial que describe el movimiento. Esta ecuación surge al igualar las fuerzas externas aplicadas al volumen de control.

Su forma conservativa se da en términos del caudal (Q), el área (A), la profundidad (y), la pendiente del canal (S_0), pendiente de fricción (S_f) y de la gravedad (g).

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

O de manera no conservativa, en términos de la velocidad media longitudinal (v).

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

La solución a estas ecuaciones en 1D se realiza a través de métodos numéricos o por diferencias finitas y han sido implementadas en varios software comunes tales como HEC-HMS, HEC-RAS, MIKE 11, EPASWMM, entre otros.

Para el caso de estudio en la cuenca seleccionada de San Juan Ixtayopan, se hará uso de HEC-RAS. El desarrollo se muestra más adelante.

9 FACTORES DE FRICCIÓN

En los canales se encuentra que las características físicas del agua se ven alteradas debido a las condiciones y materiales del que esté hecho el canal. Determinar la velocidad o caudal del flujo contenido en estos canales requiere del uso de ecuaciones empíricas-prácticas.

9.1 Velocidad en Flujo Uniforme

Para calcular la velocidad media en canales abiertos con flujos uniformes turbulentos, suele emplearse la llamada ecuación de flujo uniforme.

$$v = CR^x S^y$$

donde v es la velocidad media, R es el radio hidráulico, S es la pendiente de energía, x y y son exponentes, y C es un factor de resistencia al flujo, el cual varía con la velocidad media, el radio hidráulico, la rugosidad del canal, la viscosidad, entre otros factores (Chow, 1994).

9.2 Ecuación de Chézy

Antoine Chézy desarrolló la ecuación de flujo uniforme, mayormente conocida como la ecuación de Chézy.

$$v = C\sqrt{RS}$$

donde v es la velocidad media, R es el radio hidráulico, S es la pendiente de la línea de energía y C es un factor de resistencia al flujo, conocida como C de Chézy (Chow, 1994).

Diferentes autores han propuesto ecuaciones para el cálculo del factor de resistencia (C de Chézy), algunos de ellos se mencionan a continuación:

9.2.1 Ecuación de G. K.

El ingeniero Ganguillet y el ingeniero Kutter publicaron una ecuación que expresa el factor de resistencia en términos de la pendiente S , el radio hidráulico R y el coeficiente de rugosidad n .

$$C = \frac{41.65 + \frac{0.00281}{S} + \frac{1.811}{n}}{1 + \left(41.65 + \frac{0.00281}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

El coeficiente n en esta ecuación se conoce como n de Kutter (Chow, 1994).

9.2.2 Ecuación de Kutter

Esta ecuación es una versión simplificada de la ecuación de G. K.

$$C = \frac{100 \sqrt{R}}{m + \sqrt{R}}$$

donde m es un coeficiente de rugosidad (Sotelo Ávila, 2002).

9.2.3 Ecuación de Bazin

El ingeniero hidráulico francés H. Bazin propuso una ecuación de acuerdo con la cual la C de Chézy se considera como una función de R y no de S .

$$C = \frac{157.6}{1 + m\sqrt{R}}$$

donde m es un coeficiente de rugosidad propuestos por Bazin (Chow, 1994).

9.2.4 Ecuación de Kozeny

Esta ecuación fue obtenida con base en los resultados experimentales de von Misses y Bazin.

$$C = 20 \log \frac{A}{T} + N_K$$

donde T es el ancho de la lámina libre y N_K es un coeficiente de rugosidad (Sotelo Ávila, 2002).

9.2.5 Ecuación de Manning

Esta ecuación fue obtenida a partir de seis ecuaciones diferentes basadas en ensayos de Bazin y posteriormente verificadas por observaciones (Sotelo Ávila, 2002).

$$C = \frac{1.49 R^{1/6}}{n}$$

Esta ecuación da una relación importante entre la C de Chézy y la n de Manning (Chow, 1994).

9.3 Ecuación de Manning

Asimismo Manning desarrollo en 1889 la conocida ecuación de Manning para calcular la velocidad media en el cauce.

$$v = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

donde v es la velocidad media, R es el radio hidráulico, S es la pendiente de la línea de energía y n es el coeficiente de rugosidad, específicamente conocido como n de Manning (Chow, 1994).

10 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING

Horton presentó una muy conocida tabla con valores de rugosidad, realizada con base en los mejores experimentos disponibles en su tiempo, sin embargo, en el libro de "Hidráulica de canales abiertos", elaborado por Ven Te Chow, muestra una tabla con diferentes valores de n para canales de diferentes clases (Chow, 1994).

Aunado a esto, HEC-RAS nos ofrece a través de su manual "HEC-RAS, River Analysis System, Hydraulic Reference Manual" un listado de valores de rugosidad a considerar utilizar en nuestra simulación, dicho listado está basado en la misma propuesta que expone el autor Ven Te Chow, donde para cada tipo de canal se muestran los valores mínimos, normal y máximo de n .

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
A. Arroyos naturales			
1. Canales principales			
a. Limpio, recto, lleno, sin grietas ni charcos profundos	0.025	0.030	0.033
b. Igual que el anterior, pero con más piedras y maleza	0.030	0.035	0.040
c. Limpio, sinuoso, algunos charcos y bajos	0.033	0.040	0.045
d. Igual que arriba, pero algunas hierbas y piedras	0.035	0.045	0.050
e. Igual que arriba, etapas más bajas, pendientes más ineficaces y secciones	0.040	0.048	0.055
f. Igual que "d" pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
g. Tramos lentos, con maleza. charcos profundos	0.050	0.070	0.080

Tabla 1.
Valores de n de Manning
(Brunner, 2016)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
h. Tramos con mucha maleza, estanques profundos o cauces de inundación con rodales densos de madera y maleza	0.070	0.100	0.150
2. Llanuras aluviales			
a. Pasto sin maleza			
1. Hierba corta	0.025	0.030	0.035
2. Hierba alta	0.030	0.035	0.050
b. Zonas cultivadas			
1. Ningún cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en hilera maduros	0.025	0.035	0.045
3. Cultivos maduros	0.030	0.040	0.050
c. Cepillo			
1. Matorral disperso, maleza espesa	0.035	0.050	0.070
2. Matorral ligero y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Matorral ligero y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorral medio a denso, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorral medio a denso, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Terreno despejado con tocones de árboles, sin brotes	0.030	0.040	0.050
2. Igual que el anterior, pero brotes pesados	0.050	0.060	0.080
3. Arbolado denso, pocos árboles caídos, poca maleza, flujo por debajo de las ramas.	0.080	0.100	0.120
4. Igual que arriba, pero con flujo hacia las ramas	0.100	0.120	0.160
5. Sauces densos, verano, rectos	0.110	0.150	0.200
3. Arroyos de montaña, sin vegetación en el cauce, orillas generalmente empinadas, con árboles y maleza en las orillas sumergidos			
a. Fondo: gravas, guijarros y pocos cantos rodados.	0.030	0.040	0.050
b. Fondo: adoquines con grandes cantos rodados	0.040	0.050	0.070
B. Canales revestidos o construidos			
1. Hormigón			
a. Acabado con llana	0.011	0.013	0.015
b. Acabado del flotador	0.013	0.015	0.016
c. Acabado, con fondo de grava	0.015	0.017	0.020
d. Sin terminar	0.014	0.017	0.020
e. Gunita, buena sección	0.016	0.019	0.023
f. Gunita, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
g. En buena roca excavada	0.017	0.020	
h. En roca excavada irregular	0.022	0.027	

Tabla 1.
(Continuación) Valores de n de Manning
(Brunner, 2016)

Tabla 1.
(Continuación) Valores de n de
Manning (Brunner, 2016)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
4. Cortes de roca			
4. Cortes de roca			
a. Suave y uniforme	0.025	0.035	0.040
b. Dentado e irregular	0.035	0.040	0.050
5. Canales sin mantener, maleza y matorrales			
a. Limpiar el fondo, cepillar los lados	0.040	0.050	0.080
b. Igual que el anterior, etapa de mayor caudal	0.045	0.070	0.110
c. Maleza densa, alta como profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120

11 SIMULACIÓN HIDRÁULICA

La simulación hidráulica nos permite llevar escenarios reales a un modelo para poder conocer su comportamiento pasado, presente y futuro.

11.1 Generación de Escenarios de Peligro

Para conocer los cambios que ocurren sobre una corriente o una planicie de inundación (profundidad de agua, velocidad de la corriente, zona inundada, etc.) durante el paso de una crecida, se debe llevar a cabo el tránsito de la avenida.

El programa empleado para este análisis ha sido seleccionado debido a su fácil acceso y, aunque es software libre cuenta con un buen soporte técnico. El modelo hidráulico utilizado es HEC-RAS, el cual fue construido por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, 2002).

11.2 HEC-RAS

HEC-RAS es un programa informático que permite realizar cálculos hidráulicos fluviales unidimensionales de flujo estacionario y no estacionario.

Este software fue diseñado para su uso interactivo en un entorno de red multi-tarea y multiusuario. El sistema consta de una interfaz gráfica de usuario (GUI), componentes de análisis hidráulicos independientes, capacidades de almacenamiento y gestión de datos, gráficos e informes (Brunner, 2016).

11.3 Preparación de Archivos en ArcGIS

Para comenzar la simulación, es necesario que a través del Sistema de Información Geográfica, ArcGIS, se creen las capas siguientes:

- La trayectoria del río (Stream Centerlines)

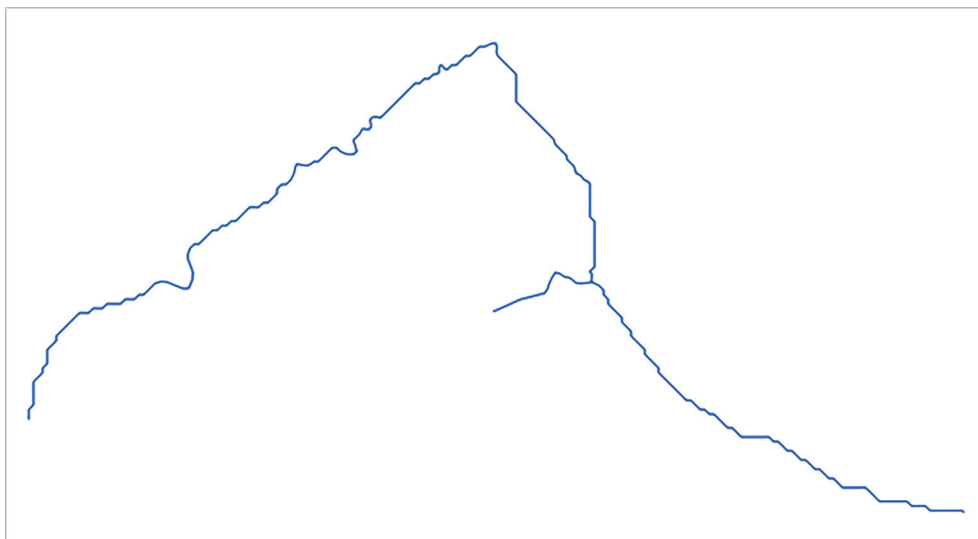


Imagen 14.
Trayectoria del río (Stream Centerlines) Fuente:
Elaboración propia, con base
en ArcGIS

- Los hombros del cauce (Bank Lines)

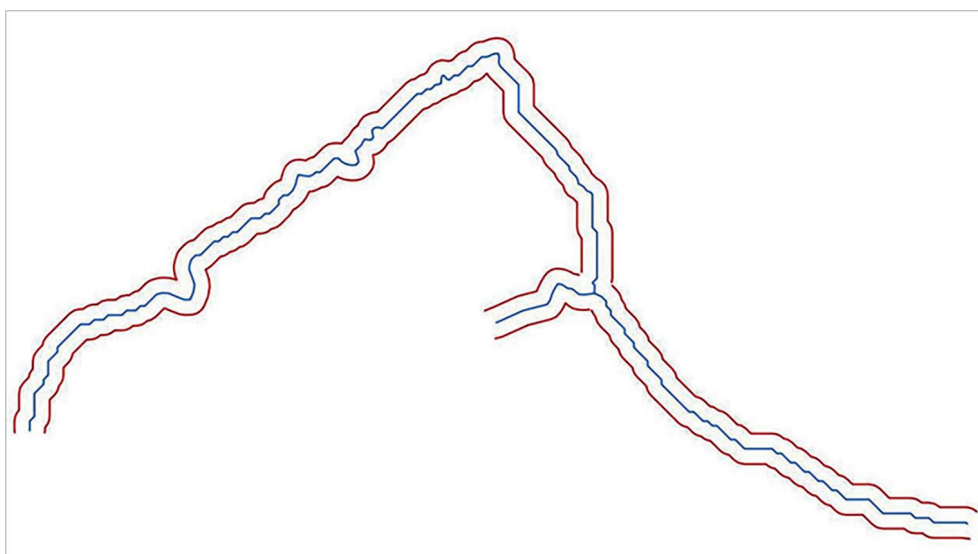


Imagen 15.
Hombros del cauce (Bank Lines) Fuente: Elaboración
propia, con base en ArcGIS

- La ubicación y geometría de las secciones transversales (XS CutLines)

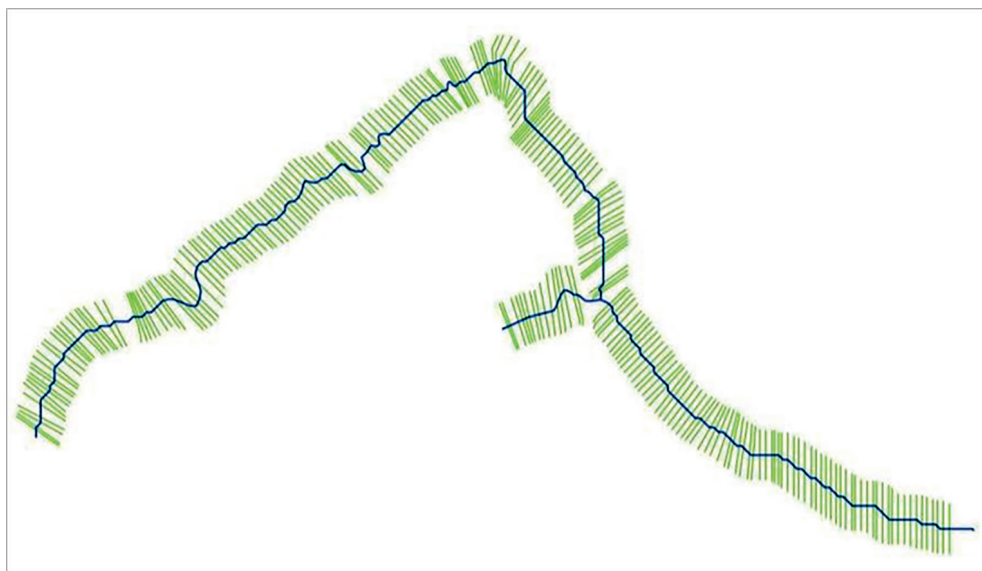


Imagen 16.
Secciones transversales (XS CutLines) Fuente: Elaboración propia, con base en ArcGIS

Estas tres capas aportan la información mínima necesaria para usar HEC-RAS.

11.4 Creación del Proyecto en HEC-RAS

La simulación del paso de las avenidas a lo largo de un río, también conocido como tránsito de avenidas, y la exportación de los resultados hacia ArcGIS, se lleva a cabo en las etapas que se describen a continuación.

11.4.1 Importación de datos geométricos

Las capas previas, creadas en ArcGIS, ahora deben ser importadas a HEC-RAS. Estas capas contienen la información geométrica necesaria para poder comenzar la simulación.



Imagen 17.
Geometría del cauce a simular Fuente: Elaboración propia, con base en HEC-RAS

11.4.2 Llenado de la información

Dentro de HEC-RAS se deben de completar ciertos datos, a fin de que el programa tenga la información suficiente para reconocer las condiciones en las que se encuentra el proyecto.

En la simulación hidráulica, generada a través de HEC-RAS, se deben de ingresar los valores de rugosidad en cada sección que compone al canal de estudio. Este valor puede variar en cada margen, en el centro del cauce o inclusive puede ser diferente en cada sección transversal.

Tomando en cuenta las características del cauce estudiado, se decidió trabajar con un valor de $n = 0.027$ para los hombros ya que se considera que está sobre roca irregularmente excavada y $n = 0.04$ para el centro del canal, considerando que se trata de un fondo en cantos rodados y lados limpios, esto en todas las secciones.

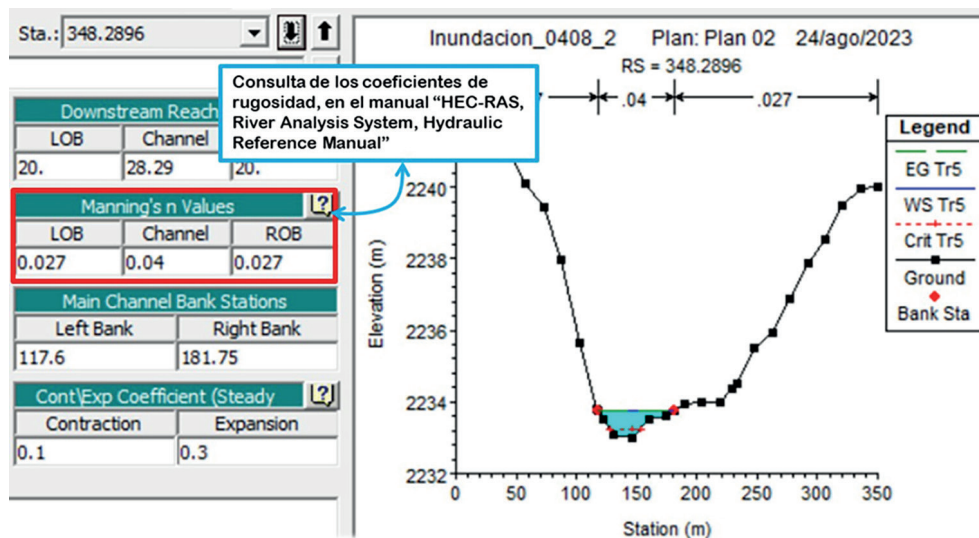


Imagen 18.
Coeficiente de rugosidad, n , en HEC-RAS Fuente: Elaboración propia, con base en HEC-RAS

Los siguientes datos a indicar son los gastos de diseño asociados a diferentes periodos de retorno, los cuales fueron estimados previamente con el método racional, para cada subcuenca en cuestión, de los cuales se expone el desarrollo en el informe "Análisis Hidrológico en San Juan Ixtayopan, desde el volcán Teuhtli hasta calle Lirios, alcaldía Tláhuac, Ciudad de México". Los resultados se muestran en la siguiente tabla resumen:

Tabla 2.
Gastos de diseño para
diferentes períodos de retorno
en cada subcuenca

Tr (años)	GASTOS DE DISEÑO (m3/s)			
Área (km2)	5.72	2.85	2.22	1.78
	Cuenca "A"	Subcuenca 2	Subcuenca 3	Subcuenca 4
2	2.081	1.587	0.635	0.4
5	5.565	4.58	2.079	1.609
10	8.917	7.52	3.543	2.917
20	12.562	10.789	5.197	4.418
50	18.487	16.116	7.924	6.962
100	23.665	20.797	10.353	9.256

Recordando que las cuencas asociadas a cada escurrimiento de interés se definieron, tal como se muestra a continuación:

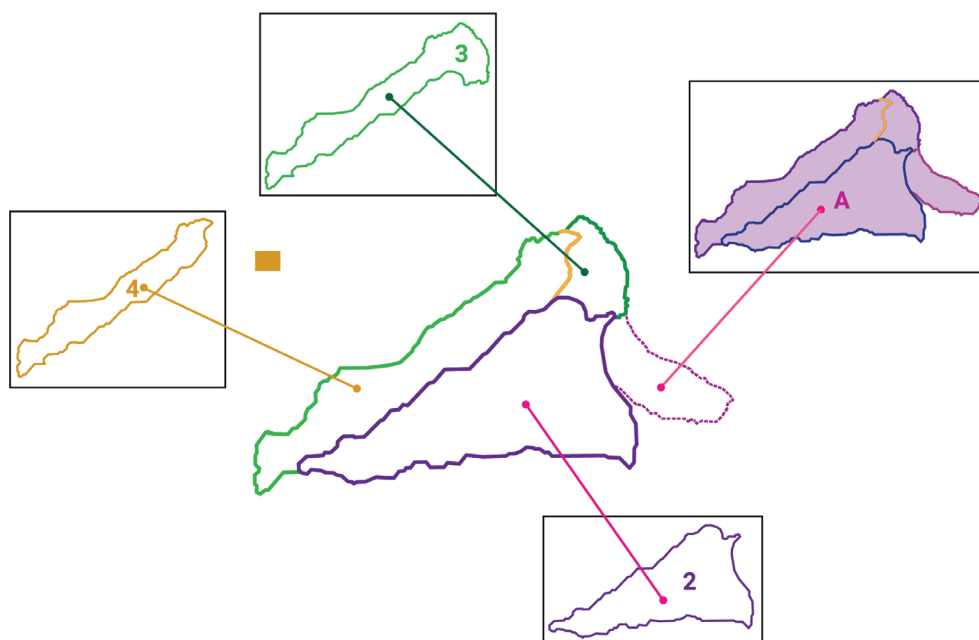


Imagen 19.
Subcuencas asociadas a
cada escurrimiento de interés
Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que dependiendo del tipo de simulación que se pretenda realizar, la información de los caudales puede darse de dos maneras:

- Como un gasto constante (simulación en flujo permanente)
- Como un hidrograma (simulación en flujo no permanente)

Para este ejemplo sólo se empleará el primer caso. Si se desea indagar en el segundo caso, se recomienda consultar el manual de usuario de HEC-RAS.

Al ingresar a la opción Steady Flow Data  aparecerá el registro de las secciones transversales y es donde se asignará la información correspondiente a cada caudal para los diferentes periodos de retorno.

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max): Reach Boundary Conditions ...

Locations of Flow Data Changes

River: Add Multiple...

Reach: River Sta.: Add A Flow Change Location

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rat						
River	Reach	RS	Tr2	Tr5	Tr10	Tr20	Tr50	Tr100	
1	1	1549.678	2.081	5.565	8.917	12.562	18.487	23.665	
77	2	288.516	1.587	4.58	7.52	10.789	16.116	20.797	
93	3	2985.348	0.4	1.609	2.917	4.418	6.962	9.256	
201	3	802.570	0.635	2.079	3.543	5.197	7.924	10.353	

Imagen 20.
Número de perfiles a simular
Fuente: Elaboración propia,
con base en HEC-RAS

11.4.3 Condiciones de frontera

Aún dentro de la opción Steady Flow Data, se ingresa a las condiciones de frontera las cuales deben establecerse en todos los extremos de la red de drenaje.

Steady Flow Boundary Conditions

☒ Set boundary for all profiles ☐ Set boundary for one profile at a time

Available External Boundary Condition Types

Selected Boundary Condition Locations and Types

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
1	1	all	Junction=1	Critical Depth
2	2	all	Critical Depth	Junction=1
3	3	all	Critical Depth	Junction=1

Steady Flow Reach-Storage Area Optimization ...

Imagen 21.
Condiciones de frontera
Fuente: Elaboración propia,
con base en HEC-RAS

Las condiciones de frontera que pueden ser ingresadas en HEC-RAS son:

- Nivel de agua conocido (Know W.S.), la cual se emplea cuando se conoce un nivel en alguna sección transversal.
- Calado crítico (Critical Depth), en este caso solo se selecciona la opción y no hay necesidad de ingresar más información adicional, esta condición es ideal cuando existe alguna sección de control.
- Calado normal (Normal Depth), esta condición se usa cuando el flujo se aproxima a ser uniforme y requiere de la pendiente del tramo de influencia.
- Curva de gasto (Rating Curve), se sugiere usar cuando existe alguna sección de control con una relación entre el calado y el caudal.

Un río puede tener varios tributarios y en cada uno de ellos se debe definir la condición de frontera aguas arriba y aguas abajo.

11.4.4 Ejecución del programa e interpretación de resultados

Una vez cargados los datos geométricos y los datos del flujo ya es posible empezar a ejecutar la simulación en HEC-RAS.

El proyecto se puede correr en cuatro diferentes escenarios:

- Flujo permanente (Perform a steady flow simulation) 
- Flujo no permanente (Perform an unsteady flow simulation) 
- Transporte de sedimentos (Perform a sediment transport simulation) 
- Transporte de componentes de temperatura y calidad del agua (Perform a water quality simulation) 

Estos cuatro componentes de análisis hidráulico unidimensional utilizan una representación común de datos geométricos y rutinas comunes de cálculo geométrico e hidráulico. Además de estos componentes de análisis hidráulico, el sistema contiene varias funciones de diseño hidráulico que pueden invocarse una vez que la superficie básica del agua calcule los perfiles (Brunner, 2016).

Este proyecto se ejecutará como flujo permanente.

Al seleccionar "perform a steady flow simulation", aparece una ventana en la que se puede introducir un identificador (Short ID), así como seleccionar el régimen (subcritical, supercritical o mixed).

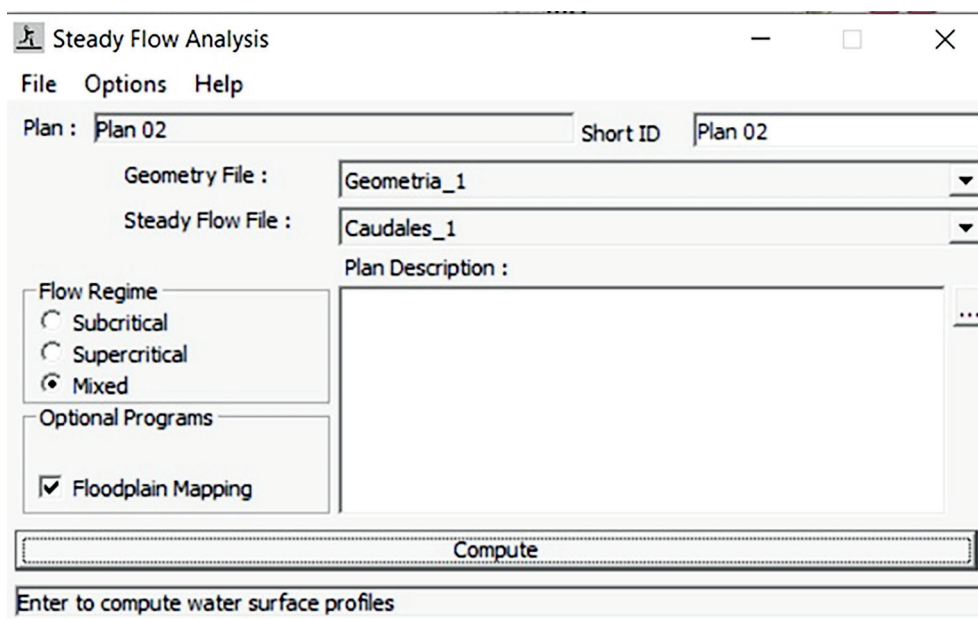


Imagen 22.
Ejecución en flujo permanente
Fuente: Elaboración propia,
con base en HEC-RAS

Una vez completada correctamente la simulación, aparecerá la siguiente pantalla:

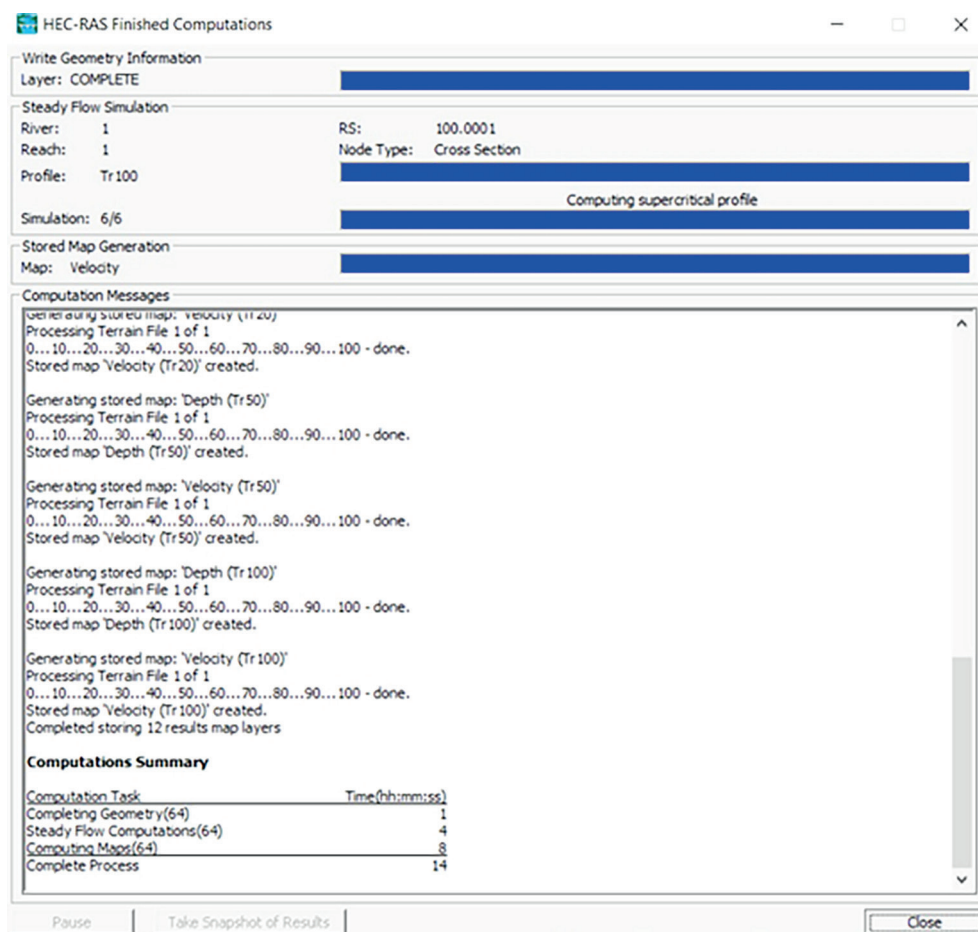


Imagen 23.
Ejecución completada
correctamente Fuente:
Elaboración propia, con base
en HEC-RAS

11.4.5 Verificación y exportación de resultados

Después de simular el paso de las avenidas, es posible usar las herramientas gráficas y tablas disponibles en HEC-RAS.

Previo a exportar el nivel que alcanza el agua con cada gasto, es conveniente revisar el polígono que delimita el área de inundación.

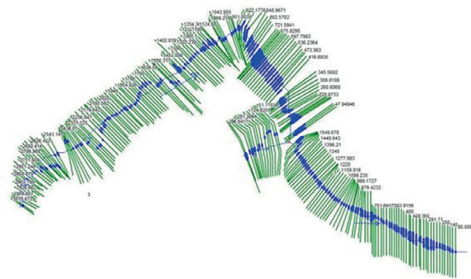


Gráfico de la simulación, Tr2

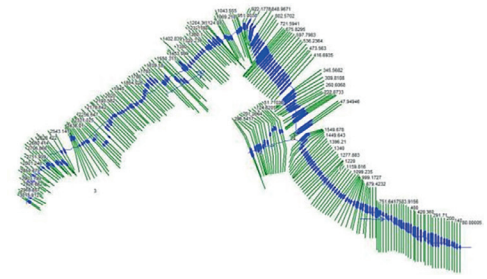


Gráfico de la simulación, Tr5

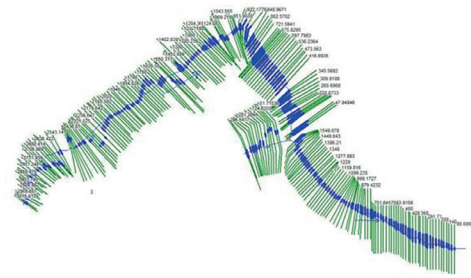


Gráfico de la simulación, Tr10

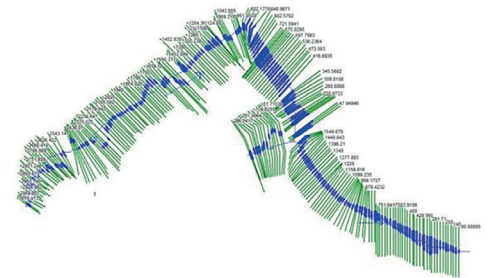


Gráfico de la simulación, Tr20

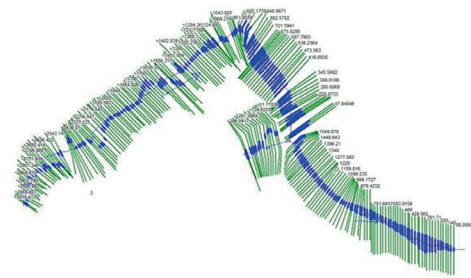


Gráfico de la simulación, Tr50

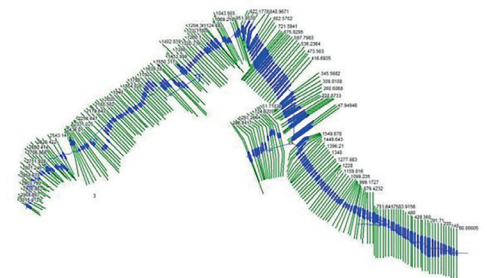


Gráfico de la simulación, Tr100

Imagen 24.
Gráfico de la simulación para los diferentes periodos de retorno Fuente: Elaboración propia, con base en HEC-RAS

Una vez verificados los polígonos e identificadas las secciones que requieren de la colocación de un levee (diques que restringir el flujo hacia el canal), ahora es posible realizar la exportación de los resultados de la simulación, para ser procesados en ArcGIS, a través de la extensión HecGeoRAS.



Resultado de la simulación,Tr2



Resultado de la simulación,Tr5



Resultado de la simulación,Tr10



Resultado de la simulación,Tr20



Resultado de la simulación,Tr50



Resultado de la simulación,Tr100

Imagen 25.
Resultados de la simulación
para los diferentes periodos
de retorno Fuente: Elaboración
propia, con base en ArcGIS

12 INUNDACIONES

México está expuesto cotidianamente a eventos hidrometeorológicos severos, como huracanes, ciclones y precipitaciones intensas que, si bien contribuyen de manera positiva a incrementar el almacenamiento de agua de las presas y lagos, también provoca daños a la población, a la infraestructura, a los servicios y a los sistemas de producción (IMTA, 2013).

De acuerdo al Atlas Nacional de Riesgos, a través del Sistema Nacional de Información sobre Riesgos, donde el sistema integra todos los mapas del Atlas Nacional de Riesgos, de peligro, exposición, vulnerabilidad y riesgo, clasificados según el tema para su visualización y análisis (Atlas Nacional de Riesgos, 2023), es posible observar que la alcaldía Tláhuac y por lo tanto nuestra área de estudio tiene un registro histórico continuo de inundaciones desde el año 1960 hasta 2010.

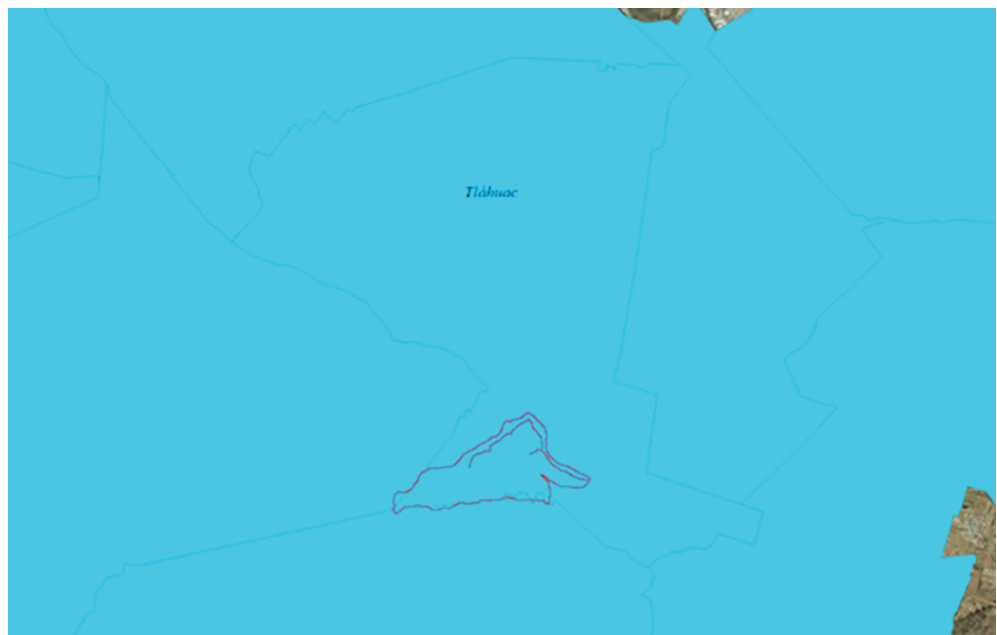


Imagen 26.
Inundaciones históricas de
1960 a 2010 Fuente: Atlas
Nacional de Riesgos, con base
en el PRONACCH

Aunado a esto, dentro del catálogo de inundaciones, se presenta un conteo de eventos de inundación por alcaldía, los cuales se exponen por color, tal como se muestra en la siguiente imagen:



Imagen 27.
Eventos de inundación por
alcaldía Fuente: Atlas Nacional
de Riesgos, con base en el
CENAPRED

En general, la alcaldía Tláhuac, se encuentran dentro de la escala de color amarilla, indicando que ha presentado entre 5 y 8 eventos de inundación, y en la zona media de la cuenca de estudio se identifican una pequeña área con presencia de 2 a 4 eventos de inundación, identificada con color verde.

Así mismo, de acuerdo a los indicadores de inundación, se encuentra el índice de vulnerabilidad de inundación, y a través de este podemos notar que nuestra zona analizada, se encuentra con una vulnerabilidad media, más una pequeña área con una vulnerabilidad alta.

Imagen 28.
Índice de vulnerabilidad de inundación Fuente: Atlas Nacional de Riesgos, con base en el CENAPRED



Finalmente encontramos el índice de peligro por inundación, y para este caso, nuestra cuenca objeto de estudio se encuentra en peligro muy alto, representado por la tonalidad roja, mientras que un poco porcentaje se encuentra en tonalidad verde, representando un peligro bajo.

Imagen 29.
Índice de peligro por inundación Fuente: Atlas Nacional de Riesgos, con base en el CENAPRED



13 CONCLUSIONES

La modelación nos ha permitido tener un amplio panorama, y con ello, obtener grandes avances en los estudios de las cuencas hidrográficas.

La utilización de HEC-RAS presenta muy buenas aproximaciones en la modelación, por lo que se considera un recurso viable para determinar el comportamiento hidrológico e hidráulico de una cuenca. De acuerdo a esto, se consideró necesario realizar el análisis hidráulico unidimensional para un sistema natural en San Juan Ixtayopan, en la subcuenca RH26Dp, mediante el uso del programa HEC-RAS.

Los resultados obtenidos mediante la metodología aquí presentada, como son los ráster producto de la simulación hidráulica, nos proporcionan mayor información al obtener tirantes asociados a escenarios de inundación, la cual sirve de insumo para evaluar la vulnerabilidad física y posteriormente el riesgo por inundación.

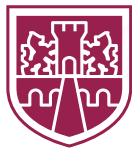
Como podemos observar en los gráficos del resultado de la simulación para los diferentes periodos de retorno, el agua en condiciones naturales comienza a inundar zona urbana, debido a esto, es importante estar al pendiente de boletines meteorológicos, a los pronósticos de lluvia acumulada y a la acumulación de lluvia registrada. Estos registros los encontramos en páginas web de la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México (SGIRPC), Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), y Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), entre otras, y su consulta tiene la finalidad de mitigar o prevenir peligros por inundación.

Asimismo, la información obtenida a través del Atlas Nacional de Riesgos nos muestra que la zona de estudio es propensa a inundaciones, tiene un índice de vulnerabilidad de inundación medio y un índice de peligro por inundación muy alto.

Para la obtención de un análisis más riguroso, es preciso disponer de mayor y mejor calidad de información como información batimétrica del cauce, la visita al sitio para recopilar información adicional sobre las condiciones del terreno, de un modelo digital del terreno de mayor resolución, sin embargo, el utilizado permitió caracterizar la zona de estudio.

14 BIBLIOGRAFÍA

- Atlas Nacional de Riesgos. (2023). *Sistema Nacional de Información sobre Riesgos*. Recuperado el 28 de 08 de 2023, de <http://www.atlasnacionalde-riesgos.gob.mx/>
- Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. México : Universidad Autónoma Metropolitana
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Washington, DC.: US ARMY CORPS OF ENGINEERS HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC).
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.
- García Villanueva, N. H. (2016). *Hidráulica de canales. Principios básicos*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Riego y Drenaje.
- IMTA. (2013). *Programa Nacional Contra Contingencias Hidráulicas*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Sánchez San Román, F. J. (2013). *Medida de caudales*. España: Dpto. Geología Universidad de Salamanca.
- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Torralba, A., & Oller, P. (2020). Saint Venant's equations for dense-snow avalanche modelling . *Ingeniería del agua*, 65-79.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. México: UNAM, Facultad de Ingeniería.



**GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO**
CAPITAL DE LA TRANSFORMACIÓN



SGIRPC