



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**“Metodología de evaluación para el riesgo de socavación de
puentes patrimoniales de arco mampostería”**

PRESENTA

Ing. Tania Guadalupe Díaz Saucedo

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL CON
ESPECIALIDAD EN CONSTRUCCIÓN**

COMITÉ TUTORIAL

**Dr. Miguel Ángel Soto Zamora
Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez
M. en I Juan Antonio Hernández Andrade**

Aguascalientes, Ags., 14 de junio de 2021

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

DR. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **TUTOR** designado de la estudiante **TANIA GUADALUPE DÍAZ SAUCEDO** con ID **87508** quien realizó la tesis titulado: **METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PARA EL RIESGO DE SOCAVACIÓN DE PUENTES PATRIMONIALES DE ARCO MAMPOSTERÍA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a día 14 de junio de 2021.



DR. MIGUEL ANGEL SOTO ZAMORA
Tutor de Tesis

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

DR. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **TUTOR** designado de la estudiante **TANIA GUADALUPE DÍAZ SAUCEDO** con ID **87508** quien realizó la tesis titulado: **METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PARA EL RIESGO DE SOCAVACIÓN DE PUENTES PATRIMONIALES DE ARCO MAMPOSTERÍA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a día 14 de junio de 2021.



DR. SERGIO IGNACIO MARTÍNEZ MARTÍNEZ
Tutor de Tesis

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

DR. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **ASESOR** designado de la estudiante **TANIA GUADALUPE DÍAZ SAUCEDO** con ID **87508** quien realizó la tesis titulado: **METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PARA EL RIESGO DE SOCAVACIÓN DE PUENTES PATRIMONIALES DE ARCO MAMPOSTERÍA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a día 14 de junio de 2021.

Juan Antonio Hernández
M. EN I JUAN ANTONIO HERNÁNDEZ ANDRADE
Asesor de Tesis

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 15/06/2021

NOMBRE: TANIA GUADALUPE DÍAZ SAUCEDO **ID** 87508

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL **LGAC (del posgrado):** ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PARA EL RIESGO DE SOCAVACIÓN DE PUENTES PATRIMONIALES DE ARCO MAMPOSTERÍA

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): ESTA TESIS APORTA AL ESTADO DEL CONOCIMIENTO AL EVALUAR UNA METODOLOGIA PARA LA DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE SOCAVACION EN PUENTES PATRIMONIALES

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>	
SI	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
NO	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>	
SI	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutoral, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI	Coincide con el título y objetivo registrado
SI	Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI	Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.	Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>	
N.A.	Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.	El estudiante es el primer autor
N.A.	El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.	La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

SI

No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Miguel Ángel Soto
DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Martin Hernández Mahín
DR. MARTÍN HERNÁNDEZ MAHÍN

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutoral, designado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Alejandro Acosta Collazo
DR. ALEJANDRO ACOSTA COLLAZO

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Dr. EN C. T. C. Héctor Homero Posada Ávila
Dr. EN C. T. C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico... Cuidar la eficiencia terminativa del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

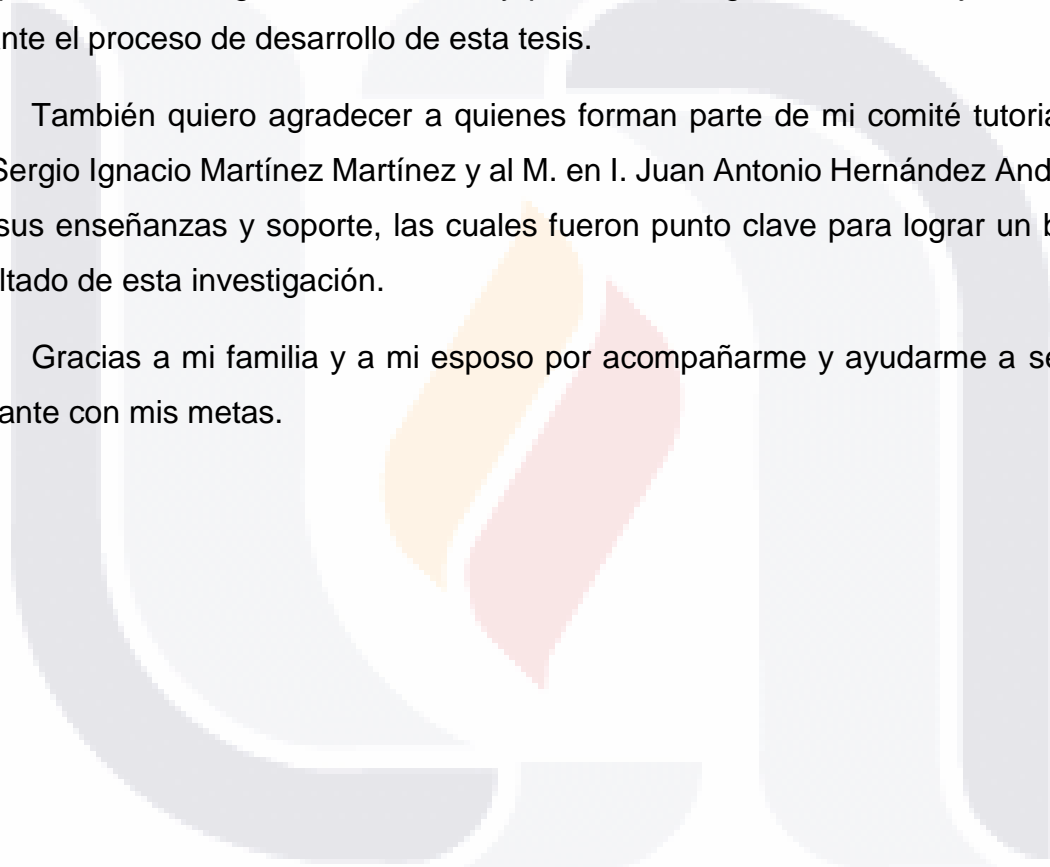
Agradecimientos

Quiero brindar un especial agradecimiento a CONACYT y a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por la oportunidad de haber formado parte de su programa de becas para Estudios de Posgrado, lo cual me permitió continuar con mi preparación académica y dar un paso más profesionalmente.

Gracias al Dr. Miguel Ángel Soto Zamora por su incondicional apoyo y comprensión a lo largo de la maestría y por haberme guiado de la mejor manera durante el proceso de desarrollo de esta tesis.

También quiero agradecer a quienes forman parte de mi comité tutorial, al Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez y al M. en I. Juan Antonio Hernández Andrade por sus enseñanzas y soporte, las cuales fueron punto clave para lograr un buen resultado de esta investigación.

Gracias a mi familia y a mi esposo por acompañarme y ayudarme a seguir adelante con mis metas.



Dedicatorias

A mi padre, Claudio Díaz Dueñas, quien me enseñó e impulsó a superarme día con día y a creer en mí y en mis sueños.

Te amo papi y gracias por todo.



Índice General

Índice General.....	1
Índice De Tablas	3
Índice De Figuras	4
Resumen.....	6
Abstract.....	7
Narrativa por capítulos.....	8
Capítulo I: Introducción	11
1.1 Prólogo	11
1.2 Objetivo General.....	13
1.3 Objetivos Particulares.....	13
1.4 Alcances	14
1.5 Justificación	14
1.6 Hipótesis.....	15
1.7 Metodología	15
Capitulo II: Estado Actual Del Conocimiento.....	17
2.1 Riesgo de socavación.....	17
2.2 Métodos para la prevención de socavación.....	23
2.3 El puente San Ignacio como caso de estudio	27
2.4 Puentes patrimoniales de arco mampostería.....	29
2.5 Evaluación de puentes patrimoniales de arco mampostería.....	33

Capítulo III: Marco Teórico 37

 3.1 Antecedentes de inundación en Aguascalientes 37

 3.2 Peligro de inundación 38

 3.3 Transporte de sedimentos 43

 3.4 Cálculo de socavación 45

 3.5 Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticas e Históricas del INAH..... 48

Capítulo IV: Desarrollo de análisis hidráulico y estudio hidrológico 51

 4.1 Obtención de avenidas máximas e hidrogramas unitarios..... 51

Capítulo V: Modelación de flujos e inundaciones por medio de software aplicados al puente San Ignacio para la medición de riesgo de socavación..... 62

 5.1 Modelación de flujos 62

Capítulo VI: Discusión de resultados y propuesta de metodología constructiva que permita evitar el riesgo de socavación en el puente San Ignacio..... 73

 6.1 Discusión de resultados..... 73

 6.2 Propuesta de metodología constructiva para riesgo de socavación 75

Capítulo VII: Conclusiones 82

 7.1. Conclusión General 82

 7.2 Conclusiones particulares..... 83

 7.3 Nicho de investigación 84

Referencias 85

Índice De Tablas

Tabla 1.- Datos de precipitaciones divididas en intervalos para aplicar el coeficiente de peso. 40

Tabla 2.- Datos de elevaciones divididas en intervalos para aplicar el coeficiente de peso. 40

Tabla 3.- Datos de uso de suelo de acuerdo con el coeficiente de peso asignado por potencial de peligro..... 40

Tabla 4.- Caracterización de la cuenca. (Soto Zamora, 2016)..... 51

Tabla 5.- Resultados método SCS..... 54

Tabla 6.- Datos para obtener diagrama adimensional SCS 55

Tabla 7.- Cálculo de datos para obtener hidrogramas unitarios SCS. 57

Tabla 8.- Precipitaciones efectivas para diferentes tiempos de retorno. (Soto Zamora, 2016)..... 58

Tabla 9.- Gastos para obtención de hidrograma efectivo a diferentes tiempos de retorno..... 59

Tabla 10.- Gastos máximos para diferentes tiempos de retorno..... 60

Tabla 11.- Tabla de evolución de la velocidad del caudal en el río. 65

Tabla 12.- Tabla de evolución del tirante del río..... 67

Tabla 13.- Factor de forma para pilas uniformes (Obras Fluviales) 73

Índice De Figuras

Figura 1.- Elementos constituyentes de los gaviones tipo caja. (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018).....	25
Figura 2.- Elementos constituyentes de los gaviones tipo saco. (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018).....	26
Figura3.- Sección transversal del cauce. (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018)	26
Figura 4.- Elementos del sistema Terramesh. (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018).....	27
Figura 5.- Esquema de estructura de tierra reforzada (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018).....	27
Figura 6.- Localización del puente San Ignacio.....	29
Figura 7.- Ubicación del área de estudio y elevaciones del estado de Aguascalientes	38
Figura 8.- Mapa de peligro de inundación por uso de suelo. (Elaboración propia)	41
Figura 10.- Mapa de peligro de inundación por precipitación. (Elaboración propia)	43
Figura 11.- Mapa de elevaciones y ubicación del Puente San Ignacio. (Soto Zamora, 2016)	51
Figura 12.- Mapa de delimitación de la cuenca. (Soto Zamora, 2016)	52
Figura 13.- Mapa de corrientes de agua de la cuenca para obtener Lc. (Soto Zamora, 2016)	52
Figura 14.- Hidrograma unitario sintético triangular (elaboración propia)	54
Figura 15.- Hidrograma unitario adimensional SCS (elaboración propia).....	56

Figura 16.- Hidrogramas Efectivos SCS para diferentes tiempos de retorno (elaboración propia)..... 60

Figura 17.- Mapa de elevaciones Rio San Pedro (elaboración propia) 62

Figura 18.- Levantamiento topográfico del rio San Pedro (elaboración propia) 63

Figura 19.- Línea de contorno en Iber (elaboración propia). 64

Figura 20.- Modelo de áreas de velocidad de flujo tomado 250 m aguas arriba y 250 m aguas debajo de la ubicación del puente (elaboración propia)..... 66

Figura 21.- Modelo de áreas de tirantes tomados 250 m aguas arriba y 250 m aguas debajo de la ubicación del puente (elaboración propia) 68

Figura 22.- Graficas de evolución de la velocidad y tirante del caudal en el rio (elaboración propia)..... 68

Figura 23.- Proyección del puente San Ignacio en Rio San Pedro. 69

Figura 24.- Perfil longitudinal hidráulico tomado 250m aguas arriba y 250 m aguas abajo..... 70

Figura 25.- Sección hidráulica en donde se localiza el puente San Ignacio..... 70

Figura 26.- Sección hidráulica de comparación de N.A.M.E registrado y N.A.M.E obtenido. 71

Figura 27.- Proyección de nivel de área inundable en perfil del Puente San Ignacio. (Soto Zamora, 2016)..... 71

Figura 28.- Protección con enrocados. (Álvarez, 2016) 77

Figura 29.- Protección con Gaviones. (Álvarez, 2016)..... 78

Figura 30.- Comportamiento del enrocado como protección en pilas. (Álvarez, 2016)..... 78

Resumen

La socavación se presenta cuando existe erosión en el suelo causada por el arrastre de sedimentos, lo que perjudica principalmente a los puentes, siendo esta una de las principales causas de colapsos y fallas en estas estructuras.

Dadas las características principales de este problema, se propone realizar un estudio de análisis del peligro que puede ocasionar la socavación para el implemento de una metodología constructiva que permita la conservación de los mismos.

Los puentes patrimoniales en México se construyeron en su mayoría de mampostería y cabe mencionar que son construcciones con más de doscientos años de existencia, las cuales no cuentan con un análisis de diseño basados en algún tipo de normatividad, misma que en la época en que se fundaron no existía, por lo que en la actualidad se ha estado trabajando para la mejora de diseño de puentes, así como con la conservación de los ya existentes.

Para conseguir que se apruebe un método constructivo de conservación es importante considerar los lineamientos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), así como los tratados internacionales en la materia y tener conocimiento de que tipo de materiales se pueden implementar que sean compatibles con los mismos y la consideración de los análisis realizados, precisando la prevención de los tipos de daños que pueda haber en el puente, tomando en cuenta principalmente las corrientes de flujo que se presentan ante esta construcción.

De esta manera con la obtención de datos por medio de estudios hidrológicos, hidráulicos y modelaciones se realizó la propuesta constructiva que permita evitar daños estructurales en los puentes patrimoniales.

Palabras clave: socavación, puentes patrimoniales, arco mampostería, evaluación.

Abstract

The scour occurs when there is erosion in the soil caused by sediment entrainment, which mainly harms bridges, this being one of the main causes of collapses and failures in these structures.

Given the main characteristics of this problem, it is proposed to carry out a study of analysis of the danger that can cause the scour for the implementation of a constructive methodology that allows the conservation of the same.

The heritage bridges in Mexico were built mostly of masonry and it is worth mentioning that they are constructions with more than two hundred years of existence, which do not have a design analysis based on some type of normativity, same that at the time in which they were founded did not exist, so that currently has been working for the improvement of bridge design , as well as with the conservation of existing ones.

To get a constructive method of conservation approved, it is important to consider the guidelines of the National Institute of Anthropology and History (INAH), as well as the international treaties on the subject and have knowledge of what type of materials can be implemented that are compatible with them and the consideration of the analyses carried out, specifying the prevention of the types of damage that may be in the bridge, taking into account mainly the flow currents that are presented before this construction.

In this way, with the obtaining of data by means of hydrological, hydraulic and modeling studies, the constructive proposal was made to avoid structural damage to the heritage bridges.

Keywords: scour, heritage bridges, arch masonry, evaluation.

Narrativa por capítulos

Capítulo I: Introducción

En este capítulo se presentan a detalle los elementos necesarios para el desarrollo del caso de estudio, tomando en cuenta las necesidades, guías de estudio, cuestionamientos, así como recursos y alcances de este.

Capítulo II: Estado actual del conocimiento

En este capítulo se narra en general la información que se tiene acerca del tema a desarrollar, siendo a partir de esta información y con las bases que se tienen hasta el momento que se realizarán los estudios establecidos para este trabajo de investigación.

Capítulo III: Marco teórico

Este capítulo se compone de la información básica y necesaria que se requiere para la elaboración general de los procesos para obtención de resultados, es decir la teoría en la que se puede apoyar el trabajo práctico.

Capítulo IV: Desarrollo de análisis hidráulico y estudio hidrológico

En este capítulo se describe de manera práctica el impacto hidrológico e hidráulico, se compone de los resultados de gastos máximos e hidrogramas que se tomaron como datos para proceder a la obtención de datos hidráulicos.

Capítulo V: Modelación de flujos de inundaciones por medio de software aplicados al puente San Ignacio para la medición de riesgo de socavación

Este capítulo presenta los modelos que se obtuvieron como resultado de riesgo de socavación con los datos obtenidos del estudio hidrológico.

Capítulo VI: Discusión de resultados y propuesta de metodología constructiva que permita evitar el riesgo de socavación en el puente San Ignacio

Con base en los modelos y los resultados arrojados se incluye en este capítulo la propuesta de la metodología constructiva para la conservación de puentes patrimoniales que sufran riesgo de socavación, tomando como modelo principal el puente de San Ignacio.

Capítulo VII: Conclusiones

Se presentan las conclusiones generales del estudio de socavación y metodología constructiva propuesta para puentes patrimoniales con riesgo de socavación.





CAPÍTULO

I

INTRODUCCIÓN

Capítulo I: Introducción

1.1 Prólogo

La socavación es un fenómeno que se presenta debido a la erosión del suelo producida por el transporte de sedimentos lo cual afecta principalmente a los puentes, siendo esta una de las principales causas de colapsos y fallas en estas estructuras. Para obtener el valor de la socavación se debe llevar a cabo una serie de estudios geomorfológicos entre los puntos de control de la estructura. (Arancibia, 2009).

Dadas las características principales de este problema, es necesario realizar un estudio de análisis del riesgo de socavación para evaluar las afectaciones que puede ocasionar en los puentes patrimoniales ya que se pretende implementar una metodología constructiva que ayude a la conservación de estos en caso de que puedan llegar a sufrir daños causados por este efecto.

Estas estructuras se encuentran principalmente construidas de mampostería y cabe mencionar que son construcciones con más de doscientos años de existencia, lo que las convierte en patrimonio de la humanidad. Debido a esto, los investigadores y científicos han tomado parte para realizar estudios y trabajos que permitan la preservación de dichos monumentos, ya que, por el paso del tiempo pueden presentar afectaciones que puedan ocasionar la pérdida de estos.

Los daños que se presentan debido a la falla de un puente suelen afectar tanto social como económicamente. Es por esto por lo que entre las preocupaciones que se tienen para la mejora de diseño de puentes se encuentran la fiabilidad y estabilidad, dando paso a que se realicen investigaciones para obtener datos precisos que permitan crear un diseño estructural para prevenir daños que a su vez impliquen costos de construcción y mantenimiento.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Tomando en cuenta las consideraciones para el diseño de puentes se considera como que la principal función que deben cumplir los pilares de un puente es la transmisión de cargas, así como brindar apoyo del lado del parapeto, sin embargo, si el puente está construido sobre un área fluvial, los pilares deben también resguardar el terraplén del desgaste que este pueda sufrir ya que estos elementos son la causa principal del colapso de un puente, esto sucede cuando el volumen de tráfico tiene una mayor demanda afectando la capacidad de carga y a su vez se presenta el efecto de erosión por el paso del flujo del agua provocando el efecto de socavación. (Ghazvinei, Ariffin, Abdullah, & Mohamed, 2014).

Es importante tomar en cuenta que se debe seguir una clase de métodos constructivos aprobados por los lineamientos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), así como tener conocimiento de que tipo de materiales se pueden implementar que sean compatibles con los mismos.

Es por ello por lo que este trabajo se inclina al caso de estudio específico del puente San Ignacio, localizado en la ciudad de Aguascalientes, tomando como base las especificaciones y estado actual del mismo para que, dependiendo de las características y problemáticas que nos arrojen los diferentes análisis a realizar se pueda presentar un planteamiento de una metodología constructiva que nos permita evitar el riesgo de socavación, tomando como base las pilas de cimentación de este. Precisando de esta manera si existe la posibilidad de que se presentes algunos tipos de daño en el puente, determinando los valores de velocidad y altura del tirante de las corrientes de flujo que se presentan ante esta construcción.

El puente San Ignacio se inició a construir en el año 1743, este era un proyecto formado por nueve arcos, los cuales son los que actualmente existen, tiene una longitud de alrededor de los 85 m con un ancho de 3.85 m. Cuenta con tres arcos principales que son los que se localizan en el centro de la estructura con casi 5 metros de claro cada uno y los seis arcos restantes tienen aproximadamente longitudes de entre los 3 y los 3.5 m. Pero fue hasta catorce

años después del inicio de su construcción, cuando el proyecto estaría por concluir que este fue derrumbado por una creciente del río San Pedro, retomando su construcción hasta el año 1780. (Loyola, 2018)

“En 2010, la UNESCO otorgó la distinción de Patrimonio Mundial a la ruta histórica de 2,600 kilómetros, que parte de la zona central de México y llega hasta Texas y Nuevo México, en Estados Unidos; en ella se integraron cuatro espacios históricos de Aguascalientes como parte del antiguo camino también llamado Ruta de la Plata” (INAH, 2018).

Con el temor de que se presente el riesgo de socavación en alguno de los elementos de la cimentación se busca la manera de crear una técnica que ayude a evitar daños estructurales en este tipo de estructuras. Dados los motivos de conservación del monumento, surgió la necesidad de realizar una investigación que nos dé la opción prevenir la presencia de socavación en alguna de sus pilas, basada en el desarrollo de estudios hidrológicos, así como simulación de flujos con apoyo de programas que nos arrojen los datos que se utilizaran como indicio para concluir con el método de conservación de los puentes patrimoniales.

1.2 Objetivo General

Determinar los periodos de retorno de eventos hidrometeorológicos que pudieran superar la capacidad de drenaje del puente que puedan ocasionar el riesgo de socavación en las pilas del puente y el área inundable en caso de una oclusión total del drenaje de este, para establecer una metodología de conservación del puente.

1.3 Objetivos Particulares

A) Realizar estudios hidrológico e hidráulico utilizando software libre para el puente de San Ignacio.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- B) Desarrollar un modelo de simulación que permita medir velocidades de flujo y área afectada en caso de inundación.
 - C) Proponer y evaluar un método para contrarrestar los efectos del agua en el puente, determinando mecanismos y métodos constructivos utilizando materiales que sean compatibles con construcciones patrimoniales.

1.4 Alcances

- A) Definir la manera de cómo prevenir el riesgo de socavación en alguna de las pilas del puente San Ignacio.
- B) Desarrollo de estudios hidrológicos y análisis hidráulicos.
- C) Simulación de flujos mediante el uso de software libre (Iber y MapWindowGis).

1.5 Justificación

Con base en el desarrollo de análisis hidrológicos e hidráulicos, así como la realización de un modelo para la medición de las fuerzas aplicadas, movimientos permisibles y corrientes de flujo, se pretende identificar si existe el riesgo de socavación en las pilas del puente San Ignacio, considerando la importancia de prevenir este efecto y los daños futuros que pueda causar en la estructura con la intención de que este perdure y no llegue a sufrir algún deterioro estructural provocando averías en el mismo, tomando en cuenta la afectación social y económica que esto sobrelleva. Esto debido a que dicha construcción se considera parte de las edificaciones patrimoniales del estado, mismo que presenta la teoría de que en algún momento se dio el daño por socavación lo cual produjo el colapso en algún punto del puente, esto con el argumento de que dos de las pilas principales presentan una ligera rotación por lo que se reconoce que los materiales de este pueden llegar a socavarse.

Lo anterior conlleva a la propuesta de un método constructivo que sea compatible con este tipo de construcciones con el fin de hacer prevalecer el valor histórico que este tiene.

1.6 Hipótesis

Por medio de la evaluación del riesgo de socavación con base en los análisis hidráulicos y estudio hidrológico se podrá determinar una metodología constructiva para contrarrestar los daños que puedan sufrir los puentes de arco mampostería a causa de este fenómeno, teniendo en cuenta los lineamientos de conservación del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

1.7 Metodología

Mediante el uso del software se pretende realizar una simulación de flujos, para la obtención del modelo de inundaciones, tomando como caso de estudio el puente San Ignacio, localizado en la ciudad de Aguascalientes, examinando los resultados obtenidos para lograr saber si existe el peligro, mismo que pueda llegar a afectar al puente, esto se logrará realizando análisis y estudios basados en la hidrología del lugar, para de esta manera obtener una evaluación concisa del grado en que se pueda presentar el problema de socavación en la construcción ya mencionada.

Los datos obtenidos durante el desarrollo de la investigación serán recolectados en la base de datos del programa, así como en las tablas de desarrollo de los estudios hidrológicos e hidráulicos, considerando la elaboración de trabajos en campo, según sean requeridos, tales como inspecciones generales de la zona, así como la propuesta de un modelo a escala del puente para pruebas.

De esta manera al finalizar los trabajos antes mencionados se determinará el método constructivo que sea aplicable en puentes patrimoniales y que permita mantener la conservación de estos monumentos.



CAPÍTULO

II

**ESTADO ACTUAL DEL
CONOCIMIENTO**

Capítulo II: Estado Actual Del Conocimiento

2.1 Riesgo de socavación

En este proyecto se pretende obtener la evaluación del efecto de socavación, el cual que se presenta generalmente en puentes, afectando principalmente las pilas que forman parte de su cimentación, lo que puede llegar a generar daños estructurales que resulten de gran importancia para la estabilidad de la construcción y se presenta cuando el movimiento de la corriente que va alrededor de las pilas de un puente produce el movimiento de sedimentos, principalmente arenas y rocas, lo que provoca la formación de un hueco en el área de apoyo de la pila.

Por lo que es necesario adquirir las bases del conocimiento para poder desarrollar un método constructivo que ayude a evitar este riesgo.

Barbhuiya (2004), arguye que una de las causas por las cuales puede llegar a fallar un puente se presenta cuando la cimentación de esta muestra desgaste, el cual se produce debido a la erosión, es por lo que a estos efectos se atribuyen más fallas a la cimentación que al resto de la estructura. En diferentes estudios realizados se puede definir el grado de daño de la erosión, esto con base en la medición de socavación. Este es uno de los problemas que afectan principalmente a los puentes, los cuales son un medio de transporte indispensable para el cruce de redes viales y ríos, la construcción de estos elementos ocasiona obstrucción al paso de la corriente de agua en caso de que este se ubique en un río, siendo una de las primordiales complicaciones que ocasionan que los puentes fallen o lleguen a colapsar.

Trujillo & Bejarano (2013) realizaron estudios e investigaciones mediante la aplicación de fórmulas y métodos para la obtención de la socavación, para lo cual es importante conocer los valores del caudal para la obtención de periodos los de retorno, así como la profundidad y la velocidad del flujo de agua ya que de estas variables hidráulicas depende directamente el valor de socavación.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Cabe mencionar que otro factor importante para determinar si podría existir el efecto de socavación en un puente, es el tipo de suelo, para lo cual es importante conocer las características principales de la estratigrafía del lugar en donde se sitúa el puente. Se considera que el mayor porcentaje de fallas en puentes se da debido a los efectos de la hidráulica fluvial.

Los estudios estadísticos de Carrasco, Trujillo, Ramos, Zuloeta, & Nunura,(2017) prueban a nivel mundial que los puentes que presentan deterioro en su cimentación provocando fallas surge cuando se presenta socavación, siendo este fenómeno uno de los principales factores responsables del deterioro de puentes, presentando así un fenómeno secundario conocido como acorazamiento el cual se da cuando los materiales gruesos que se encuentran en el fondo del río se acomodan por encima de los finos, moviendo el material ubicado en la base y alrededor de las pilas lo que ocasiona que la socavación aumente. Por lo que es importante tomarse en cuenta para la obtención de la socavación ya que con el paso del tiempo se presenta resistencia al flujo generando que el movimiento de materiales aumente. Para llevar a cabo la investigación de estos fenómenos es necesario considerar un estudio hidrológico basado en las precipitaciones máximas, analizando los valores extremos para poder realizar observaciones de los diferentes años de retorno.

Dado la presencia de este se han propuesto diferentes métodos de estudio y fórmulas para la obtención del valor, tomando en cuenta diversas condiciones hidráulicas, una de ellas se basa en la relación que tienen las fuerzas de arrastre y las de gravitación que se encuentran depositadas en las pilas de los puentes siendo aplicado para casos transporte de sólidos y suspensión de materiales, otro método utilizado se basa en la determinación de la socavación bajo régimen permanente, también se utiliza un método que se basa en el flujo de agua en movimiento el cual es el que produce el movimiento y asimismo el transporte de los sedimentos ubicados en la cimentación del puente. Para lo que se debe tomar en cuenta las relaciones que existen entre la

profundidad de la socavación y la erosión del suelo. (Pizarro, Manfreda, & Link, 2016).

Existen diversos puntos que deben de considerarse para el estudio principalmente en pilas de cimentación para un ambiente homogéneo, estos puntos se representan como la profundidad de socavación dependiendo de las características del fluido, el flujo, el tipo de suelo y el tipo de puente, considerando para ello la viscosidad, densidad del agua, o según sea el caso, la velocidad, la profundidad, la aceleración gravitacional, características de los sedimentos tales como el diámetro de las partículas, la densidad de los materiales, el diámetro de las pilas de cimentación, el tiempo y la profundidad de socavación. Cabe mencionar que según Link, Henríquez, & Ettmer, (2018) para la aplicación de casos experimentales es recomendable utilizar datos de flujos inestables y constantes ya que esto hace que los valores del trabajo de flujo efectivo nos ayuden a determinar la intensidad del flujo.

En la actualidad es importante desarrollar un diseño adecuado de puentes, tomando en cuenta los aspectos necesarios para que soporten el fenómeno de inundación, para lo cual se debe considerar el uso de profundidad de socavación para resistir las fuerzas de erosión. Para esto se deben considerar las características que se requieren para llevar a cabo el proceso de obtención de socavación, como lo son la hidrología de cuencas hidrográficas, características del río, de los sedimentos, análisis de la sección transversal, así como las características del elemento. Este tipo de modelos permiten identificar el riesgo de falla. (Manfreda, Link, & Pizarro, 2018).

Este efecto se presenta en diferentes tipos de construcción, para lo que es importante relacionar el elemento a construir con las necesidades que este requiere. Medina, Muñoz, Tejedor, Gomez-Piña, & Fages, (2006) mencionan que para ejecutar un proyecto en un área en la que predominan las arenas (por ejemplo, una playa) se debe considerar que los asentamientos se van a presentar con valores por encima de los que se representan habitualmente lo cual hace que los procesos de socavación se den de manera más acelerada,

reduciendo esto, las densidades relativas y facilitando el movimiento de los sedimentos provocando la erosión correspondiente. Para esto es necesario diseñar elementos con características especiales que soporten este tipo de acciones.

La socavación ocurrida en puentes ubicados en ríos con dimensiones más pequeñas o arroyos es considerada de mayor preocupación que la que se pudiera dar en un río de mayor dimensión dado que en su mayoría se presenta un diseño y mantenimiento de su estructura inadecuado para las necesidades de este, lo cual aumenta el riesgo de que sufra socavación en las pilas que lo conforman. Presentando como principales dificultades la evaluación del flujo y del efecto de erosión, mismas que forman parte de las propiedades del tipo de suelo y los sedimentos, los que a su vez mezclan materiales cohesivos con no cohesivos, haciendo que se eleve la probabilidad de que la estructura llegue a sufrir un deterioro. (Ettema, Yoon, Nakato, & Muste, 2004).

La profundidad que alcance en una pila afecta directamente a la resistencia de este elemento, originando una pérdida total de esta, así como al soporte que brinda el suelo ya que disminuye la presión lateral que este aporta a las pilas. Sin embargo, si existe la presencia de suelos cohesivos alrededor de los cimientos, el tiempo de desgaste o movimiento de sedimentos será mucho mayor al que tardaría si los materiales que se encuentran son no cohesivos. (Jia, 2018).

Existen diferentes métodos para la obtención del valor de socavación presentada como afectación en las pilas de los puentes, de los cuales se tomaron dos métodos de autores diferentes para llevar a cabo la práctica para la solución de este tipo de problemas. El primer método que se tomó como base, fue el implementado por el mexicano J.A. Maza Álvarez el cual se basa principalmente en la igualación de las velocidades del flujo con la velocidad crítica de movimiento para asumir que pueda ocurrir erosión en el suelo, lo cual quiere decir que el proceso de socavación se da cuando la velocidad del flujo es igual a la velocidad crítica. El segundo caso, el cual fue propuesto por Del

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Campo Ordóñez se basa en el análisis de las variaciones de intensidad que surgen en el fondo de los ríos, lo que relaciona directamente la carga de los sólidos y de los líquidos que corren por estos, lo que hace recomendable el uso de este método para zonas en donde predominen gravas y arenas, lo cual es recurrente que se presente en cauces de tipo aluvial. (Aldana & Ordóñez, 2018).

En los estudios más actuales realizados por Dias, Fael, & Núñez-González, (2019) se puede acceder a información para la determinación de la evaluación de la socavación en puentes, así como para determinar el diseño para proteger los elementos que lo conforma. Pero existe una problemática que se presenta ante esta situación y que muchas de las veces no se considera o no se toma en cuenta, siendo que debido a su importancia debería de ser un factor de estudio como parte del problema, esto se refiere el transporte de escombros que corren por un río tomando en cuenta que la acumulación de estos influyen directamente en el desgaste de la profundidad, provocando una disminución de dicha profundidad de socavación.

Se han estudiado tres tipos de socavación para los puentes que cuentan con un tipo de cimentación de pilas complejas. En el caso uno el nivel de la cimentación se encuentra debajo del nivel de la profundidad de socavación, lo que indica que el nivel de la cimentación no tiene efecto en el nivel de socavación, en el caso dos se presenta el nivel de la cimentación dentro del efecto de socavación, al igual que sucede en el caso tres, esto indica que este efecto se presenta a menor cantidad que en el caso uno, provocando que la profundidad de la socavación dependa del nivel en que se encuentra la cimentación, así como de las dimensiones de estas. Debido a esto se puede determinar que puede ocurrir un tiempo de retraso del efecto de socavación el cual va a depender de los factores del tamaño y el nivel de la cimentación. (Mohammadpour, Ghani, Sabzevari, & Mohamad, 2019). Influenciada también por una serie de medidas las cuales se clasifican en el flujo de aproximación, el cual indica la profundidad, la fuerza y la velocidad del flujo así como la

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

rugosidad que presenta el suelo; la medida de los sedimentos de la base, esto se refiere a la distribución del tamaño de las partículas, la densidad, el ángulo de reposo y la forma de estas; los parámetros de la cimentación tales como la forma, la longitud, la separación entre los elementos, la cantidad de pilas y la posición con respecto a la dirección del flujo; y por último las características del agua, la viscosidad, la aceleración gravitacional y la densidad. (Khassaf, 2019).

De acuerdo con los resultados obtenidos en la realización de diferentes experimentos basados en socavación local ocurrido en las pilas de puentes se han tomado en cuenta diferentes consideraciones como la alineación del puente, la profundidad socavada, dado que este tipo de estudios se concentra básicamente en la atribución de la geometría de los puentes, ya que depende del diseño estructural que este tenga es como va a actuar en relación con el desgaste que sufran sus elementos. Dado que es probable que un puente con cimentaciones complejas tenga la probabilidad de reducir los valores de socavación que un puente de estructura simple. (Moreno, Birjukova, Grimaldi, & Cardoso, 2017).

Con base en la investigación de las características del desgaste de socavación local se obtuvieron resultados que muestran que el agujero formado por este efecto puede llegar a conservarse durante un proceso de lavado. Por lo que se desarrolló un análisis mediante el que se pueden representar los procesos de variación de la profundidad del agujero, así como el tiempo de variación y la ubicación y longitud que este llegue a alcanzar, obteniendo que estos parámetros se relacionan directamente con la velocidad de fricción que presentan los sedimentos. Esto refleja que un agujero de socavación local generalmente se forma de manera gradual, desarrollando una capa límite a lo largo de la cama de sedimentos teniendo como consecuencia que estos sean arrastrados a lo largo del río, provocando socavación en las pilas. De esta manera Li, (2015) concluye que la profundidad máxima de socavación, así como su longitud van aumentando conforme al tiempo, lo que afecta directamente al desgaste.

También Wang, Melville, Guan, & Whittaker (2018) tomando en cuenta las pendientes de inclinación, realizaron pruebas con arenas finas y arenas gruesas obteniendo como resultado que la profundidad que alcance en sentido ascendente resulta independiente de la posición del elemento en que se presenta por lo que en ninguno de los casos de tipo de arena la pendiente de la posición de los elementos contractivos no afecta la profundidad de socavación cuando esta es descendente.

2.2 Métodos para la prevención de socavación

Existen diversos métodos constructivos que se utilizan actualmente como medidas preventivas de daños causados por socavación, estas sirven como apoyo para el control y monitoreo de eventos de inestabilidad en los cuses del río o bien, en la misma estructura.

Para la selección del procedimiento se deben considerar inicialmente los aspectos que pudieran causar socavación considerando los estudios hidrológicos e hidráulicos, la topografía del área de estudio, así como el análisis estructural y de tipo de suelo.

En el libro Socavación en Puentes (Álvarez, 2016) se menciona que las principales medidas de mitigación de socavación en puentes se dividen en tres tipos:

1. Hidráulicas

Las medidas hidráulicas se caracterizan por reducir el riesgo de socavación por medio de la alteración de la corriente y el refuerzo de los taludes del cauce previniendo que se presente erosión en el suelo.

Algunos tipos de medidas hidráulicas serían las siguientes:

a) Estructuras de control de los ríos.

Este tipo de estructuras se construyen de manera longitudinal o transversal, siendo ubicadas sobre los bordes del cauce del río o perpendiculares al flujo.

Las principales obras de mitigación aplicadas de manera longitudinal son los revestimientos del talud o bien la construcción de muros y de modo transversal se emplea técnicas como vertederos sumergidos, contrafuertes o vigas de fondo. O bien se puede implementar la combinación de ambos métodos para garantizar mejores resultados en caso de que el riesgo de socavación sea alto.

b) Protección de pilas y estribos del puente.

Estos métodos de protección contra el peligro de socavación se utilizan como un tipo de refuerzo extra que cubra los pilares o los estribos de los puentes, normalmente se implementan trabajos como revestimientos de pilas con rocas, el uso de bolsas rellenas de arena, construcción de gaviones, revestimiento con colchacretos, la construcción de pilas auxiliares o de rompeolas.

2. Estructurales

Este tipo de medidas brinda principalmente asegurar la prevención de que exista socavación mejorando la calidad de las pilas del puente para evitar colapsos o fallas causadas por este efecto.

Estas se aplican cuando ya existe un daño y la cimentación se encuentra sin apoyo y se debe considerar que son métodos constructivos que por su elaboración modifican el diseño original de las pilas de cimentación.

Dentro de la lista de medidas estructurales las más usuales son:

a) Refuerzo de la cimentación del puente.

Para ejecutar este tipo de trabajos es importante que se considere un diseño acorde a las pilas existentes, considerando que para la ejecución de los trabajos se debe construir previamente una obra de desviación del flujo de agua, brindando las condiciones para que los elementos estructurales cuenten con el apoyo requerido para soportar las cargas.

b) Modificaciones del puente. .

Las modificaciones estructurales se realizan básicamente en las pilas de los puentes tomando como factor principal de diseño la reducción o traslado de socavación, evitando que los daños atenúen en esta zona.

3. Reemplazo de puente

El reemplazo del puente en su totalidad se emplea como última opción cuando la solución al problema de socavación no se encuentra en las medidas prevención hidráulicas o estructurales, considerando que ninguna de estas es económicamente viables, tomando la misma ubicación y haciendo mejoras en el diseño que garanticen que la estructura perdure.

Como parte de las obras más utilizadas para la mitigación para el problema de socavación se encuentran los gaviones, los cuales se incluyen en las medidas hidráulicas más usadas, consideradas como obras fáciles de ejecutar y a la vez resistentes para su función.

Para su diseño se deben tomar en cuenta el peso específico del suelo en el que se deberán colocar los gaviones así como el peso específico del gavión, además es necesario considerar el ángulo de fricción interna y la capacidad de carga del suelo. (Hernández, 2018).

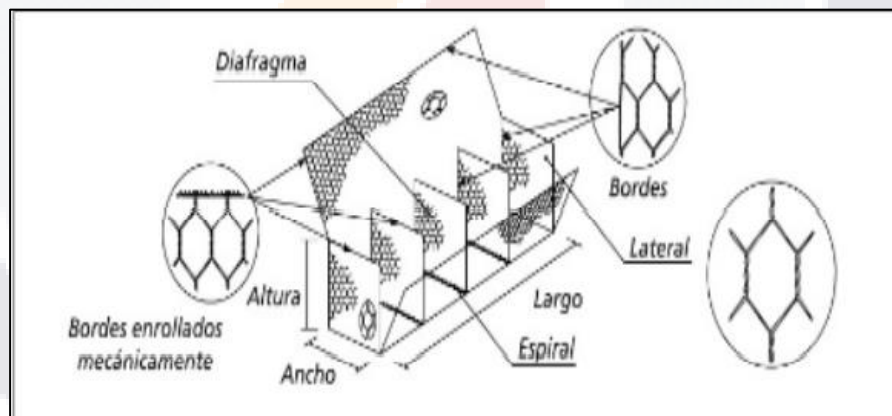


Figura 1.- Elementos constituyentes de los gaviones tipo caja. (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018)

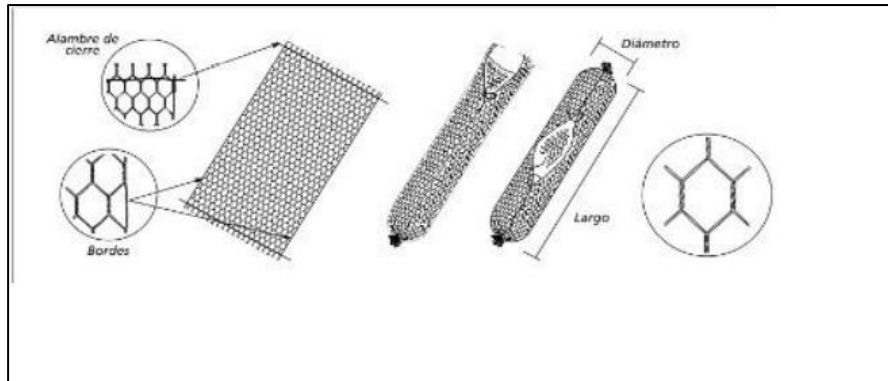


Figura 2.- Elementos constituyentes de los gaviones tipo saco. (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018)

Otro tipo de obras también aplicables son la construcción de muros de mampostería, los cuales se pueden montar con piedras que se encuentren en la zona y concretos de baja resistencia, resultando un método económico y funcional debido a la capacidad de aguante de las mismas piedras garantizando estabilidad y un alto valor en cuanto a impermeabilidad.

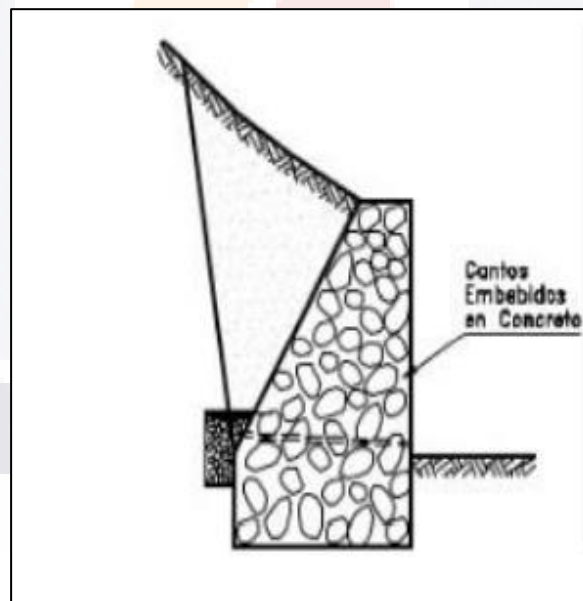


Figura3.- Sección transversal del cauce. (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018)

El sistema de refuerzo con malla o sistema terramesh es un sistema parecido al de los gaviones, este se conforma de una geo malla de acero la que ayuda a evitar la salida del material fino que conforma el relleno de la

estructura, debido a que este relleno es a base de material con calidad y valores altos de fricción y densidad (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018).

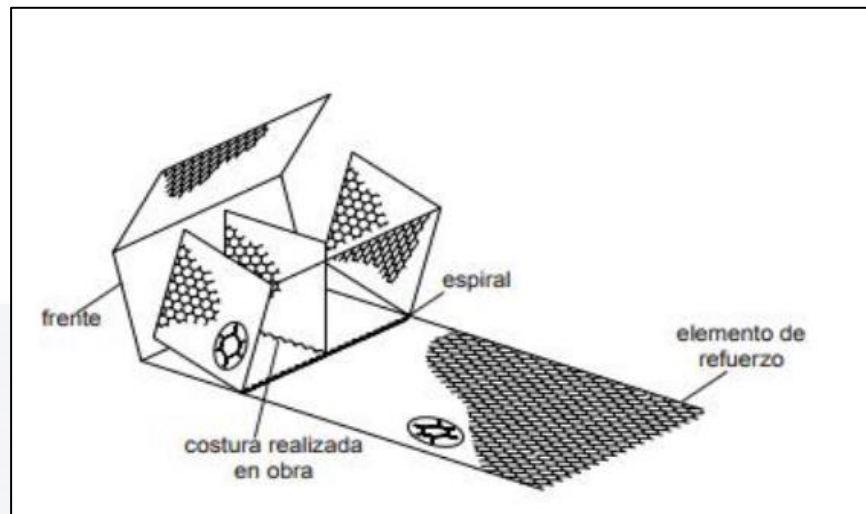


Figura 4.- Elementos del sistema Terramesh. (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018)

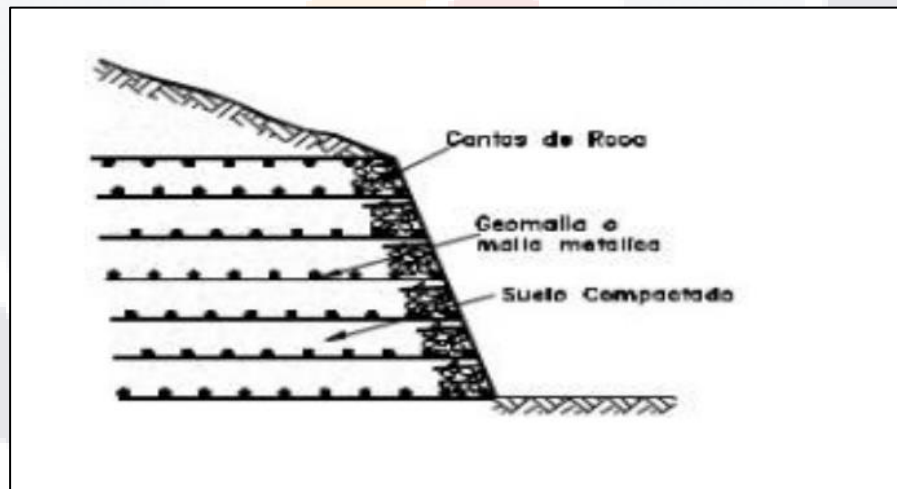


Figura 5.- Esquema de estructura de tierra reforzada (Vilchez Cerna & Toledo Mejía, 2018)

2.3 El puente San Ignacio como caso de estudio

Debido a la antigüedad del puente San Ignacio, este se encuentra en un estado de desgaste avanzado por lo que es necesario tomar en cuenta las diferentes características y necesidades para poder implementar un método constructivo que implique cualquier tipo de reparación. Para esto es importante

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

tomar en cuenta las normativas que se tienen como base para la conservación de construcciones patrimoniales. Se tienen antecedentes de que la calzada del puente está actualmente construida a base de un material llamado “piedra grasa” el cual se conforma básicamente de los residuos de la fundición de metales, ya que con este se hacían bloques, los cuales eran utilizados para fines constructivos. Al tener esta información se analizan los materiales y procesos que indica el INAH, siendo estos no destructivos y que tengan semejanza con los instalados originalmente. (Ramírez, 2016).

Se han realizado estudios para determinar las características de los materiales con los que fue construido el puente, teniendo como base que este está hecho de mampostería de piedra con un mortero hecho a base de cal, el conocimiento de estas características permite proponer el método requerido para su rehabilitación. (Enciso, 2014).

En su mayoría, la zona en la que se localiza el puente San Ignacio se caracteriza por haber sido utilizada como área de cultivo, la geología muestra, además, que esta zona es apta para soportar cargas. Según los estudios en dicha zona, se sabe que la topografía se conforma de una pendiente inclinada al poniente de esta, además se tiene el conocimiento de que con base en la hidrología del lugar la corriente de agua corre del poniente al oriente de dicha zona por lo que esta desemboca directamente en el río San Pedro y el río Morcinique, lo que induce que dicho escurrimiento se conforme de aguas claras, sin embargo, a través del río San Pedro corren aguas negras, las que provienen de la zona urbanizada que se encuentra alrededor de este. (Collazo, 2011).

Los últimos trabajos de rehabilitación del puente que se tienen registrados datan de hace más de cuarenta años, por lo que se considera necesario que se atiendan las patologías de este para poder evitar que llegue a fallar y esto provoque el colapso del monumento, respetando el valor histórico del inmueble y considerando que se le debe de brindar un método especial para que este siga siendo considerado patrimonio. A lo largo de los ochenta metros

de longitud que lo conforman, este se construyó con piedra proveniente de la Hacienda Jesuita la cual se localiza a 37 km del suroeste de la ciudad de Aguascalientes y fue adquirida por los frailes de la orden de Jesús en el año de 1615. Pero después de haber sufrido un colapso a causa de una crecida del río San Pedro, este fue reconstruido con cantera rosa acarreada de Jesús María. (Hermosillo, 2015).

2.4 Puentes patrimoniales de arco mampostería

Se sabe que en su mayoría los puentes considerados como patrimoniales fueron contruidos de piedra y mortero a base de cal, es necesario entender la funcionalidad de estos, así como conocer los métodos que se han implementado para la reparación de daños que estos puedan presentar.



Figura 6.- Localización del puente San Ignacio

La evaluación de un puente permite determinar las condiciones de este, debido a las cargas que se les aplique. Al obtener los resultados de la evaluación se pueden determinar las metodologías constructivas que se puedan

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

aplicar a la construcción para preservar la vida útil del elemento, analizando las circunstancias en las que se encuentra y tomando en cuenta las generalidades que lo caractericen, para de esta manera poder determinar qué tan susceptibles se encuentran sus elementos.

Las construcciones de mampostería se componen principalmente de piezas de tabique, block o en algunos casos de piedra, los cuales se combinan con mezcla de materiales constructivos que pueden ser arcilla cocida, cemento y arena, jal y cemento. En México se utiliza la mampostería en alrededor de un 90% de la totalidad de construcción en general, variando el tipo de esta como mampostería confinada, mampostería con refuerzo interior o mampostería mixta. (Tizapa, 2013).

Hace varias décadas no se consideraba importante dar mantenimiento las construcciones históricas como puentes por lo que estos terminaban por ser destruidos y se tomaba la alternativa de construir nuevos y modernos pasos para compensar el uso de estos. En la actualidad evaluar y rehabilitar un puente que sea considerado como patrimonio histórico representa un gran reto debido a las características de conservación que estos deben de cumplir.

Las afectaciones que presente el puente dependen de una serie de factores los cuales son los que se van a identificar mediante la evaluación de la estructura determinando el origen del daño de este.

Se presentan dos tipos de daños principales los cuales se entienden como el daño que no afecta el comportamiento estructural del elemento, como pueden ser el crecimiento de vegetación, ya que este puede provocar acciones mecánicas como la penetración en grietas y juntas estructurales lo que ocasiona averías en los materiales y en el puente en general, otro tipo de afectación se presenta debido a la infiltración de agua dando paso al crecimiento de vegetación, propiciando también deterioro en el mortero y la mampostería de piedra lo que a su vez afecta el comportamiento mecánico de los elementos que lo conforman, y el daño que si puede afectar dicho comportamiento, en los que se presenta la aparición de grietas transversales y

longitudinales causadas por asentamientos de la cimentación, cargas dinámicas y la presión en las paredes que lo conforman, también se da el caso de erosión y pérdida de material en el suelo lo que puede generar también deslizamientos de la estructura, para este tipo de daño se pueden aplicar técnicas de refuerzo de la cimentación o del suelo . (Rodrigues, Ramos, & Branco, 2008).

Una de las razones principales por la cual se da la falla de una estructura construida de mampostería es generada por la presencia elevada de fracturas que se presentan en las juntas de mortero, y depende del nivel de compresión que se presente en la estructura es si la falla se manifiesta solamente en las juntas o también rinde efecto en las piezas de mampostería. Debido a que el mortero tiende a ser el primer elemento en fallar se produce un roce de las piezas de mampostería (piedras) cuando el mortero se desgastó por completo, lo que genera una acumulación de tensiones, provocando fallas en la estructura. (Rougiera & Luccionib, 2007).

En datos tomados del estudio realizado por Olmos, Jara, Martínez, & López, (2017) se tiene que las ciudades registradas por la UNESCO como patrimonio de la humanidad poseen como característica principal, el contar con construcciones antiguas como iglesias, edificios coloniales y puentes de las cuales los puentes son los que menos importancia para su conservación han recibido, sin tomar en cuenta que las patologías de estos elementos de mampostería pueden producir una situación de falla. Normalmente los puentes de mampostería cuentan con gran rigidez, sin embargo, es posible obtener datos de estudio mediante tres métodos, uno de ellos es con base en su frecuencia el cual muestra las densidades que son identificadas por frecuencias de vibración, otro caso es considerando la dirección transversal y el tercero con base en desplazamientos verticales.

La diferencia que existe entre las construcciones modernas y las construcciones históricas es que las históricas forman parte del valor de la humanidad a lo largo del tiempo, es por esta razón que actualmente se tiene más interés por la preservación de este tipo de construcciones, además de que

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

los métodos constructivos y los materiales utilizados en la actualidad son variantes así como el diseño, el cual también se va desarrollando de acuerdo a las necesidades y el crecimiento de la ciudad en donde se vaya a construir un puente.

Existen varios puentes construidos de mampostería, que forman parte de las construcciones históricas para los que se han desarrollado varios estudios de análisis con base a su comportamiento estructural en donde se muestra que la geometría del puente es un punto importante, sobre todo para la evaluación de los arcos de los cuales también va a influir directamente el ancho que estos tengan, ya que conforme se presenta el aumento de cargas este puede presentar fallas ya sea directamente o en las restauraciones. (Altunışık, 2015).

Actualmente se realizan reparaciones en puentes de mampostería empleando morteros a base de cemento, ya que este cuenta con la resistencia que necesitan los puentes. No obstante, la mayoría de los puentes históricos fueron construidos con morteros a base de cal hidráulica, y debido a las características de la cal el cemento resulta un material incompatible para el uso de restauraciones de estos puentes. Los principales daños de estos puentes se deben a la disolución del mortero, una mala ejecución de la unión o la existencia de sal. Es por eso por lo que se han realizado estudios para el diseño de morteros que sean compatibles con los materiales utilizados, estos deben de cumplir con las mismas propiedades y composiciones, además de ser permeables y elásticos, para de esta manera poder establecer los parámetros del diseño de morteros para reparaciones los cuales deben asegurar durabilidad y calidad. Se tiene el antecedente de que los morteros a base de cal resultan sumamente compatibles con las rocas de carbonato y silicato. Para el diseño de un mortero se deben tener en cuenta las propiedades físicas y la estructura del tipo de mampostería aplicada. Para este tipo de reparaciones se recomienda el uso de cal aérea. (Pavía, 2006).

Los principales daños que presenta una estructura de mampostería se deben a la existencia de corrosión ocasionando la presencia de piedra

expuesta, esto debido al deterioro por el paso del tiempo, donde una de las causas principales es la presencia de vegetación en las uniones de estas, así como la existencia de grietas causadas por la sobrecarga que se le da a la construcción.

Es importante entender las propiedades de los materiales que se van a utilizar para el diseño de un mortero ya que depende de estas la funcionalidad que tenga al aplicarse, es decir, si al ser preparado la cantidad de agua no corresponde a la establecida, la mezcla puede presentar menos resistencia a la compresión o si se excede de la cantidad de cal, este aumentara su resistencia a la compresión, pero será menos flexible y permeable. Debido a esto es importante tener las bases necesarias para el uso de cal en morteros, tomando en cuenta que esta debe resistir a las condiciones a las que sea expuesta. (Rodrigo, 2015).

2.5 Evaluación de puentes patrimoniales de arco mampostería

Para la realización de los estudios y análisis requeridos para la obtención de resultados, se implementará el uso de software que servirá de apoyo para la simulación de los modelos de inundación y para el desarrollo del estudio hidrológico e hidráulico requerido.

Un estudio hidrológico se basa principalmente en implementar datos que permitan, en el caso aplicado a la ingeniería civil, llevar a cabo el diseño, la planeación y la construcción de obras que se vean afectadas por el flujo variante de las corrientes de agua. Cabe mencionar que para llevar a cabo la correcta ejecución del desarrollo de un estudio hidrológico es necesario conocer los aspectos geomorfológicos de la cuenca, el manejo de avenidas extremas, las condiciones meteorológicas de la zona de estudio, así como el daño causado por la acción en el uso de suelo y la explotación del agua de la cuenca.

Como parte del ciclo hidrológico se encuentra el escurrimiento, el cual se define como el transporte de agua que queda de la precipitación, la cual se

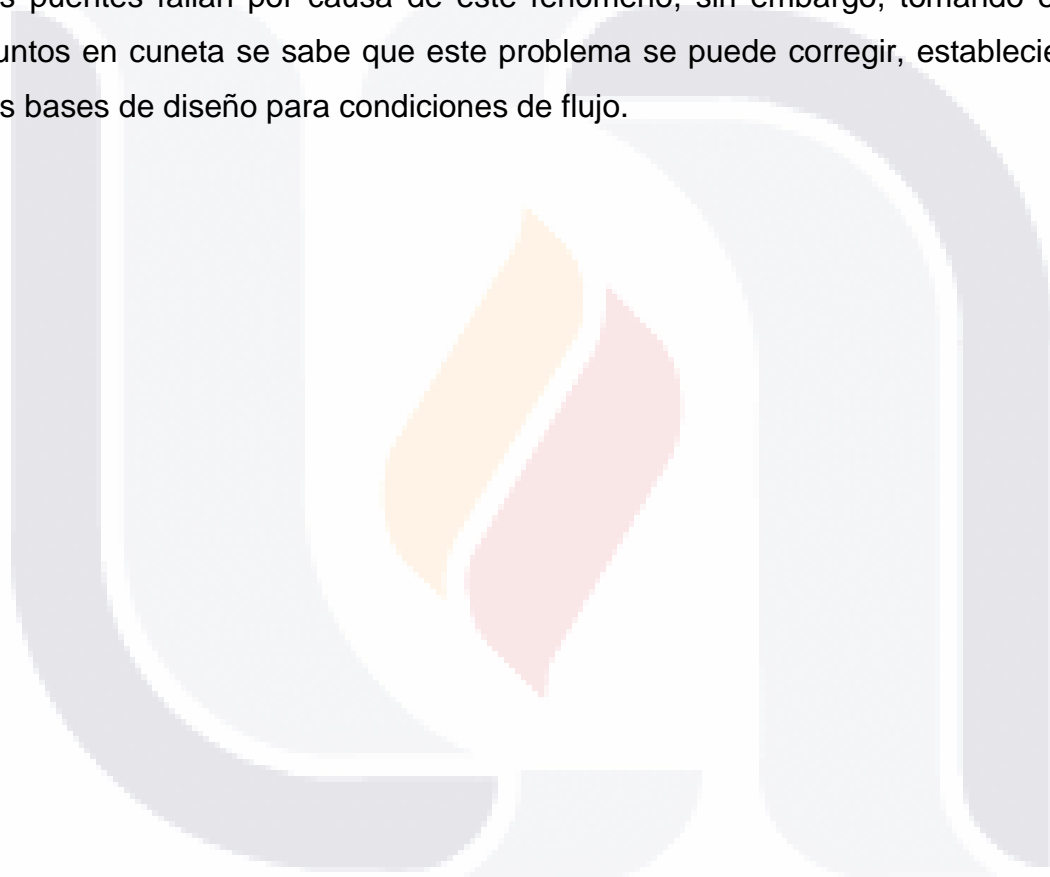
dirige hasta la salida de la cuenca. Dado el proceso de escurrimiento se presenta un transporte de sedimentos, los cuales tienen efectos de erosión, este proceso a su vez se presenta en cuatro fases, iniciando por el desprendimiento de partículas del suelo por efecto de la lluvia, el efecto de socavación y flujo superficial, erosión en cárcava, esta se muestra cuando el flujo superficial presenta suficiente fuerza ocasionando que se remuevan las partículas que se localizan en el fondo, y por último se tiene el movimiento de masas el cual dependiendo de su velocidad se le denomina arrastre o deslizamiento, siendo un movimiento lento el efecto de arrastre y si se presenta de manera rápida es el deslizamiento. Existe una serie de factores que pueden intervenir en la erosión del suelo, estos son en base a la precipitación, la vegetación, el tipo de suelo y la pendiente en la que se encuentra la zona de estudio (Martínez, 2017). Para la evaluación de las condiciones hidráulicas e hidrológicas requeridas para la propuesta de un modelo de puente es necesario llevar a cabo una serie de trabajos, los cuales consisten básicamente en un análisis hidrológico y la obtención de los caudales tomando en cuenta diversos tiempos de retorno, un análisis hidráulico del cauce del río, así como la determinación de la profundidad de socavación. (Velásquez, 2013).

Para la correcta evaluación del estado de un puente es necesario tener una base de datos que correspondan a las propiedades actuales. Sin embargo existen casos en los que no se tiene dicha información, o ya sea que existen deterioros o fallas no ubicadas, por lo que es necesario complementar estos datos realizando estudios de los materiales y del diseño del puente, tomando en cuenta que dichos estudios sean no destructivos, es decir, es necesario mantener la integridad de la estructura, especialmente en puentes de mampostería. (Gutermann, 2003).

El uso del software es principalmente para realizar modelado de inundaciones bidimensionales, aplicada en tiempo real lo cual resulta de bastante ayuda ya que se pueden llegar a tomar decisiones en base a las inundaciones presentadas ya que estas han mostrado grandes afectaciones a

la sociedad. Bladé, y otros, (2014) muestra que este programa desarrolla el flujo de sedimentos, la calidad del agua, simulaciones de flujos, evaluación de áreas de inundación, estabilidad de sedimentos, así como casos de sedimentación y erosión causados por el transporte de materiales.

Según Rafael, Fernando, & Pether, (2008) existen diversos factores que afectan la estabilidad de un puente y que aumentan el deterioro de estos, entre los cuales se encuentra el efecto de socavación, probando que gran parte de los puentes fallan por causa de este fenómeno, sin embargo, tomando estos puntos en cuenta se sabe que este problema se puede corregir, estableciendo las bases de diseño para condiciones de flujo.





CAPÍTULO



MARCO TEÓRICO

Capítulo III: Marco Teórico

3.1 Antecedentes de inundación en Aguascalientes

El estado Aguascalientes se encuentra localizado en el centro de México, colindando con los estados de Jalisco y Zacatecas. Abarca un área de 5,589 km², está conformado por cinco acuíferos, siendo el principal el del Valle de Aguascalientes, el cual proporciona aproximadamente el 80% del agua que se consume en la ciudad.

Esta cuenta con un clima semiseco templado, registrando un promedio de precipitación máxima de entre 500 y 600 mm y mínima de 5 cm por año, la vegetación que lo caracteriza es de zonas áridas y semiáridas, compuesta por arbustos como matorrales y pastizales. Con base en su geología se determina que predominan rocas de la Era Cenozoica, Periodo Terciario y Cuaternario, pero también existe la presencia de rocas sedimentarias de origen continental, areniscas y conglomerados del Periodo Terciario, rocas ígneas extrusivas ácidas como riolita y presencia de depósitos del Periodo Cuaternario (SEPLADE, 2006), por su parte, la ciudad se localiza sobre el Graben de Aguascalientes que se ubica en los límites de la sierra fría con 3 mil metros sobre el nivel del mar y la planicie de Los Llanos que cuenta con más de 2 mil metros de altitud, mismo que la divide en dos partes, cruzando de norte a sur el estado, lo que forma el Valle de Aguascalientes, que es una depresión topográfica de aproximadamente 20 kilómetros de ancho en los extremos y 10 kilómetros en el centro de esta. Este Graben se forma por 3 fallas, una al oriente, al centro y otra en el occidente, siendo la falla central la que da trayectoria al río San Pedro el cual cruza por el centro del valle (Contreras, 2003). Y en el cual se localiza el puente de San Ignacio, mismo que se utiliza como caso de estudio.

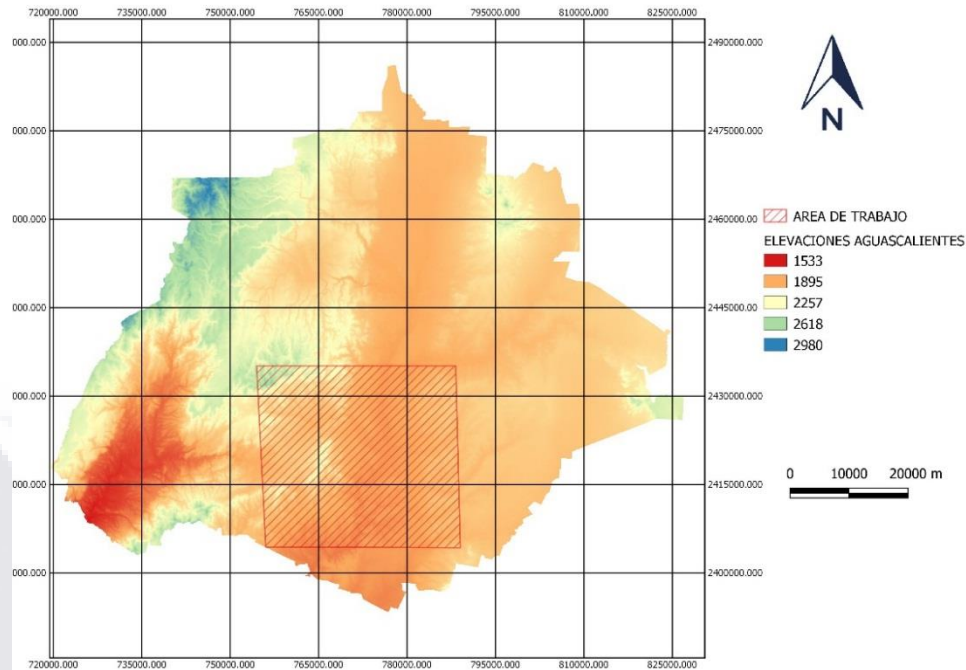


Figura 7.- Ubicación del área de estudio y elevaciones del estado de Aguascalientes. (Elaboración Propia).

El 3 de julio de 1958 se presentó la mayor inundación en la historia del estado con 94 mm de precipitación (no se cuenta con el dato de duración de la precipitación) ocasionando daños como bloqueos de carreteras, afectaciones en estructuras, se registraron alrededor de 116 casas completamente destruidas, 99 parcialmente destruidas y 37 inundadas, en algunas colonial el nivel del fluido llego a los 4 metros de altura, la mayoría de la población se quedó sin el suministro de agua potable, hubo 3 muertos, miles de personas damnificadas y pérdidas económicas de millones de pesos (IMPLAN, 2012).

3.2 Peligro de inundación

El peligro se puede definir como la posibilidad de que ocurra un fenómeno natural, que logre perturbar de gran manera una zona o una comunidad debido a la intensidad con que este ocurra, así como al tiempo en que se presente. El peligro de inundación se presenta cuando existe un aumento de nivel en el agua que puede afectar la vulnerabilidad de la zona en donde se presente.

Las inundaciones han tenido un acrecentamiento sumamente rápido, debido a que con el crecimiento de la población se ven alterados los entornos, estas alteraciones se dan cuando se practica la deforestación, efectos de erosión, así como el tipo de uso de suelo, descomponiendo el ciclo natural del agua. En general se puede establecer que la presencia de agua que rebasa las alturas principalmente de la zona libre de los cauces ocurre a causa de la precipitación, ocasionando que este fluido logre penetrarse en los lugares en los cuales no está presente normalmente, provocando deterioros económicos y sociales.

La precipitación se mide con base a la altura que alcance de la presencia de agua en el suelo y depende de la intensidad de esta y el tiempo de ocurrencia, el grado de afectación que se pueda presentar, producido por la saturación del suelo y la acumulación de agua. Cuando la inundación se da por este motivo, se dice que es pluvial, en cambio se presenta una inundación fluvial cuando se desborda un río.

Para la evaluación del peligro de inundación es importante considerar la probabilidad de que ocurra dicho fenómeno, tomando en cuenta el periodo de tiempo en que este se presente, estos datos se pueden obtener con los registros de las estaciones climatológicas, las cuales nos muestran los valores de precipitación promedio y en base a estos datos se puede generar un mapa de peligro, es decir, una representación gráfica de las zonas más vulnerables ante la presencia de una inundación.

A continuación, se muestra un análisis de peligro de inundación basado en obtención de mapas tomando como principales indicadores, la precipitación, la topografía y el uso de suelo del área en donde se localiza el puente San Ignacio.

En las tablas 1, 2 y 3 se muestran los datos de precipitación, elevaciones y uso de suelo, tomados de archivos del INEGI (INEGI) para la generación de datos, con la asignación de coeficiente del grado de peso de peligro, considerando este valor como la probabilidad de que se presente dicho riesgo

en cada intervalo de valores máximos y mínimos respectivamente, tomando como valor mayor de peligro el 0.50 y como mínimo el 0.04.

Tabla 1.- Datos de precipitaciones divididas en intervalos para aplicar el coeficiente de peso.

PRECIPITACION		
MIN	MAX	COEFICIENTE DE PESO
463.13	479.05	0.04
479.05	494.97	0.07
494.97	510.89	0.14
510.89	526.81	0.26
526.81	542.73	0.50

Tabla 2.- Datos de elevaciones divididas en intervalos para aplicar el coeficiente de peso.

TOPOGRAFÍA			
MIN	MAX	COEFICIENTE DE PESO	DE
1787.00	1970.40	0.50	
1970.40	2153.80	0.26	
2153.80	2337.20	0.14	
2337.20	2520.60	0.07	
2520.60	2704.00	0.04	

Tabla 3.- Datos de uso de suelo de acuerdo con el coeficiente de peso asignado por potencial de peligro.

FACTORES PARA USO DE SUELO		
	DESCRIPCIÓN	COEFICIENTE DE PESO
6	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	0.07
9	AGUA	0.36
10	BOSQUE DE ENCINO	0.04
12	MATORRAL CRASICAULE	0.13
13	PASTIZAL CULTIVADO	0.09
14	PASTIZAL INDUCIDO	0.09
15	PASTIZAL NATURAL	0.09
16	URBANO CONSTRUIDO	0.26
18	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	0.05
2	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	0.07
19	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL CRASICAULE	0.05
3	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	0.07
20	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL	0.05
21	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	0.05

Se puede observar de acuerdo con la revisión de los mapas de peligro de inundación y analizando en las figuras 8, 9 y 10, las cuales se obtuvieron con el programa Qgis, con la vinculación de los datos indicados en las tablas anteriores, que en la zona estudiada existe una mayor posibilidad de inundación a causa del uso de suelo marcado en la figura 8 , esto debido a que la zona del caso de estudio se encuentra ubicada en su mayor parte, dentro del Valle de Aguascalientes, es decir es un área con presencia de agua y al mismo tiempo se caracteriza por ser zona urbana construida.

La combinación de estos tipos de uso hace que el valor de peligro forme parte del rango más alto de la clasificación ya que observando los datos de factores, la zona con presencia de agua tiene un peso de 0.36 y la zona urbana construida tiene un valor asignado de 0.26, es decir las amenazas naturales más importantes se encuentran en los centros urbanos.

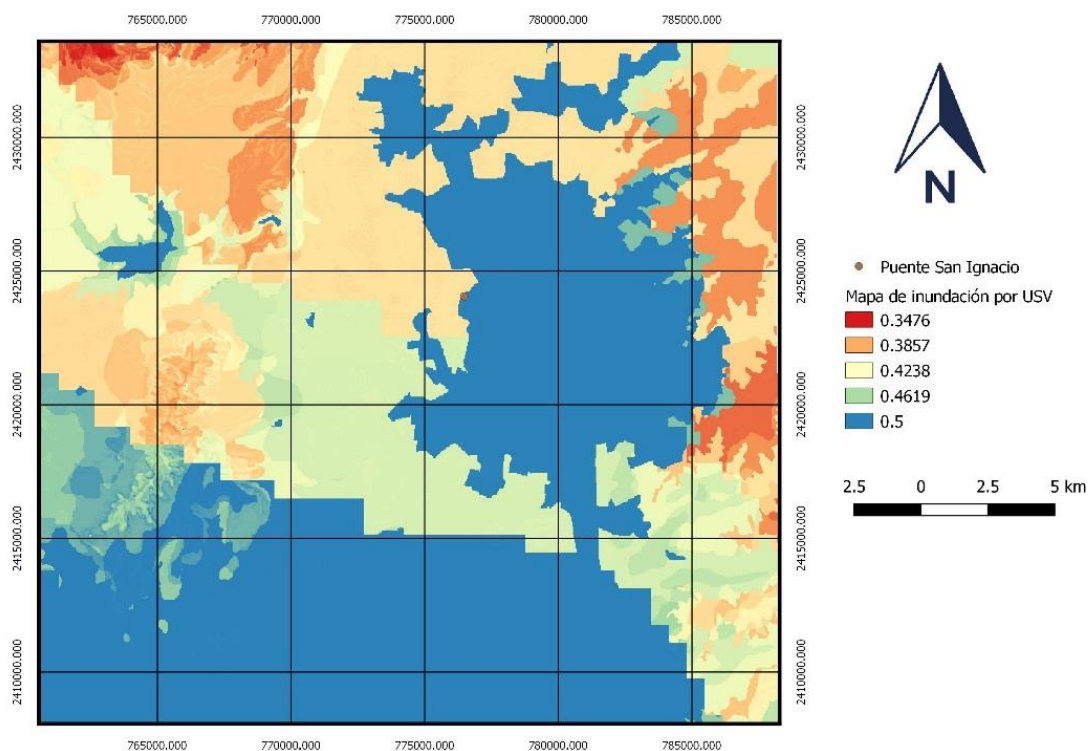


Figura 8.- Mapa de peligro de inundación por uso de suelo. (Elaboración propia)

Al analizar la figura 9 se determina según la escala utilizada en la cual se señalan los valores de coeficiente de peso, el máximo señalado va hasta el valor máximo de 0.39, indicando este un menor riesgo por inundación a causa de la conformación topográfica del área en comparación con el riesgo por el uso de suelo.

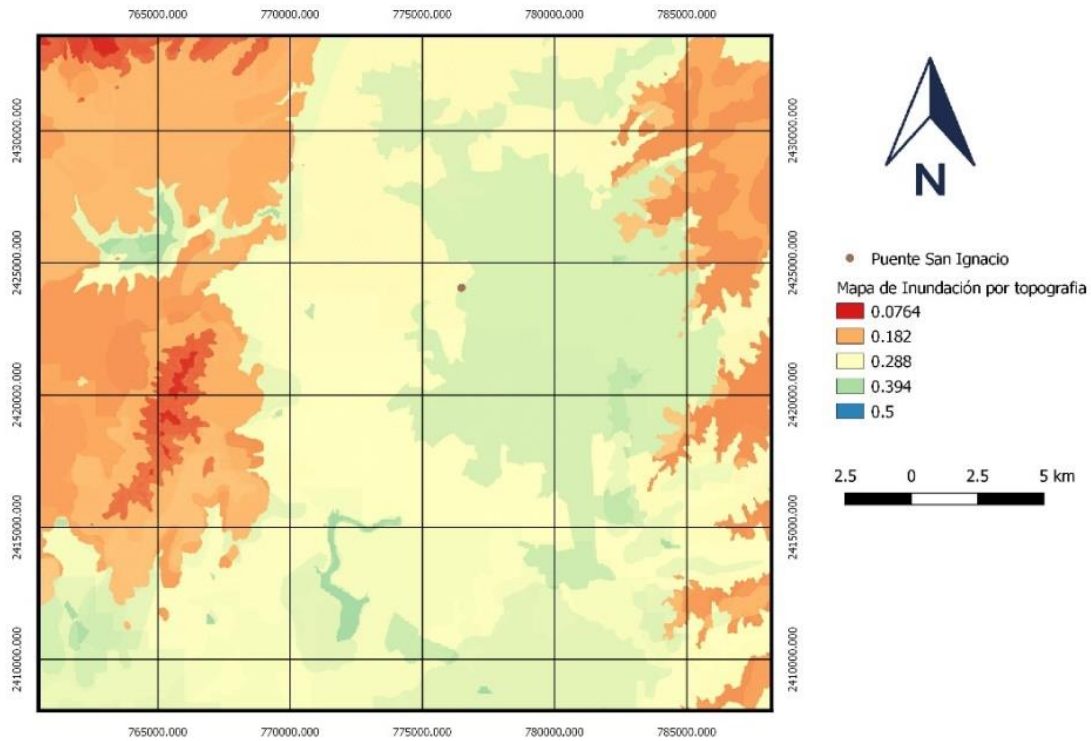


Figura 9.- Mapa de peligro de inundación topografía. (Elaboración propia)

Así mismo, la figura 10 nos presenta un resultado de la escala de valores tomados por el coeficiente de peso establecido como intervalos en el cual se puede observar que el peligro de inundación a causa de la precipitación es en esta zona es el que menos afecta, debido a que se encuentra dentro de los rangos más bajos de entre el 0.061 y el 0.28.

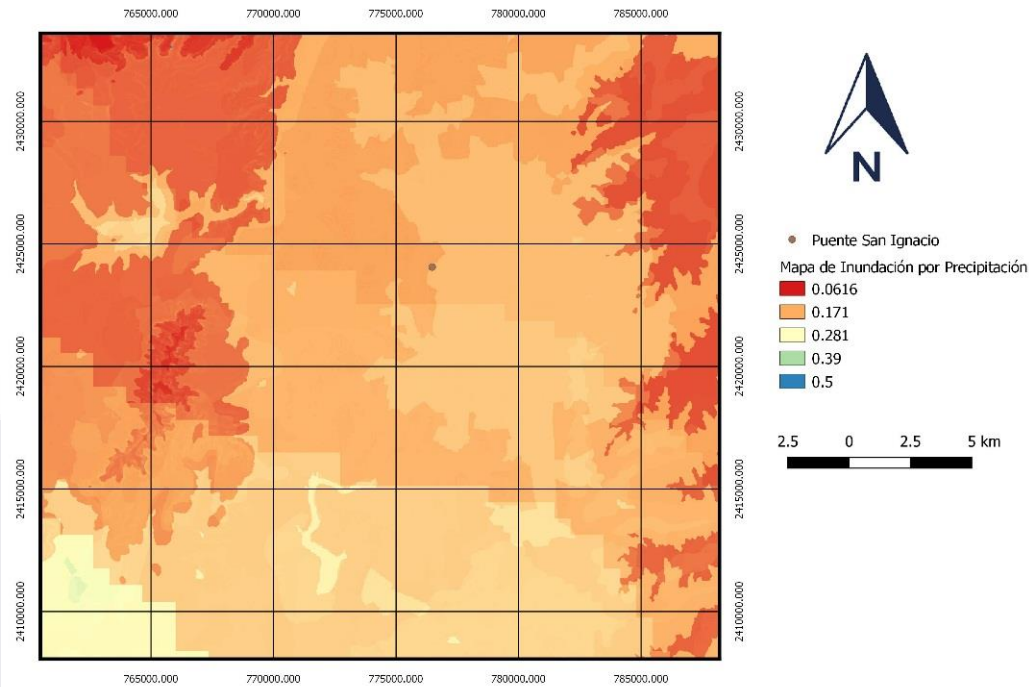


Figura 10.- Mapa de peligro de inundación por precipitación. (Elaboración propia)

3.3 Transporte de sedimentos

Proceso de sedimentación

La sedimentación se presenta cuando el suelo se mueve repetidamente de la superficie y se traslada aguas abajo por la corriente de los ríos hasta llegar a lagos y océanos. (Martínez, 2017).

Proceso de erosión

La erosión que se produce por los fluidos en el suelo se caracteriza en las cuatro fases siguientes:

- a) el desprendimiento del suelo arenoso por causa de las lluvias.
- b) Presencia de lujos superficiales y socavación a causa de la erosión de capas delgadas la cual se da de una forma análoga sobre la superficie del suelo.

La erosión del suelo se puede representar de una forma proporcional a d^3v^2 donde:

d = diámetro de las gotas de la lluvia que va de entre 0.5 y 6.0 mm

v = es la velocidad de impacto de la lluvia que va desde 2 a 9 m/s

Existe una relación entre la erosión del suelo que provoca una gota pequeña y la que provoca una gota grande de $(6/0.5)^3 (9/2)^2 = 35\ 000$ por lo que se sabe que las tormentas fuertes son las que provocan mayor erosión en una cuenca. (Martínez, 2017).

- c) Se dice que si el flujo que se presenta en la superficie tiene demasiada fuerza como para producir un efecto de socavación y a su vez se presenta la expulsión de partículas depositadas en el fondo se da una el efecto de erosión en cárcava.
- d) Existe el movimiento de masas, el cual se puede dividir en dos tipos; si este se presenta de forma lenta se le llama arrastre de suelo, en cambio si se presenta de una forma rápida, tipo colapso se le llama deslizamiento de suelo.

Transporte de Materiales

El movimiento que tienen las partículas que se despegan del fondo del cauce se presentan como un efecto de saltación, es decir, las partículas son arrastradas por la fuerza del flujo flotando y provocando el transporte de estos, cuando la fuerza disminuye, las partículas si van al fondo del cauce. Otro tipo de traslado sucede cuando las partículas son tan pequeñas que flotan en el agua conocidos como sedimento en suspensión. Cuando las partículas se mueven a lo largo del cauce se conoce como carga o acarreo de fondo. (Martínez, 2017).

3.4 Cálculo de socavación

Para realizar el cálculo de socavación es importante saber y tener bien identificado el escenario en las que se encuentra el puente que se utilizará como prueba, ya que no existe un método específico para cada caso determinado.

Las metodologías que se utilizan suelen tomar datos muy generales y que se obtuvieron en laboratorio, por lo que no se puede decir que el resultado de la socavación sea del todo puntual.

A continuación, se mencionan tres diferentes métodos que según las características de cada uno se podrían aplicar para la obtención de la socavación del puente de caso de estudio:

- *Laursen y Toch.*

La ecuación que se utiliza para este método es:

$$d_s = k_f k_g k_\phi a \quad (\text{Formula 1})$$

En donde:

d_s = profundidad de socavación en metros

k_f = coeficiente que se define con la forma de la pila

k_g = coeficiente que se define de la relación $\frac{hs}{a}$ en donde hs representa el tirante del agua después de sufrir un efecto de socavación por contracción medida en metros y a equivaler al ancho de la pila.

k_ϕ = coeficiente del Angulo del golpe del flujo.

a = ancho de la pila medida en metros.

Este método se utiliza principalmente para superficies de arena principalmente, evitando los boleos y los suelos altamente cohesivos y no se consideran datos geotécnicos del material que se ubica en el fondo, utilizando solamente la geometría, el tirante del agua y el ángulo como medidas principales. (Rodriguez & Bustillos, 2015)

- *Larras*

Para este método se utiliza la siguiente ecuación:

$$d_s = 1.05 k_f k_\phi a^{0.75} \quad (\text{Formula 2})$$

En donde:

d_s = profundidad de socavación en metros

k_f = coeficiente que se define con la forma de la pila

k_ϕ = coeficiente del Angulo del golpe del flujo.

a = ancho de la pila medida en metros.

Esta ecuación se utiliza considerando solamente las características de las pilas y se aplica cuando el agua alcanza una altura de 30 a 40 veces el diámetro de los depósitos. (Rodriguez & Bustillos, 2015)

- *Breusers, Nicollet y Shen*

La ecuación para este método es:

$$d_s = a f_1 \left(\frac{V}{V_c}\right) f_2 \left(\frac{h}{a}\right) f_3 (\text{forma}) f_4 \left(k_\phi \frac{l}{a}\right) \quad (\text{Formula 3})$$

En donde:

d_s = profundidad de socavación en metro

f_1 = medida que depende de la velocidad media del flujo del agua y la velocidad crítica el movimiento inicial de los sedimentos.

V = velocidad media del flujo del agua

V_c = velocidad critica del movimiento inicial de los sedimentos del fondo.

f_2 = medida de la correlación entre el tirante del flujo y el ancho de la pila

f_3 = Medida que se asigna según la forma de la pila

f_4 = dato que se da en función del ángulo de golpe del flujo y la dependencia entre la longitud y el ancho de la pila

l = longitud total de la pila

h = profundidad del agua

k_ϕ = coeficiente del ángulo del golpe del flujo.

α = ancho de la pila medida en metros.

Este método toma como datos principales los hidráulicos y los geométricos, sin considerar las características geotécnicas del suelo, lo que da la posibilidad de que se pueda aplicar para cualquier tipo de materiales. (Rodríguez & Bustillos, 2015).

Cabe mencionar que el uso de cualquier método que se elija para la obtención de un valor de socavación puede arrojar resultados que se consideren como inciertos, esto debido a que cada uno de estos toma características o valores diferentes los cuales van de acuerdo a cada caso específico, o bien, por lo que es posible que los datos varíen de acuerdo a la fórmula. Considerándose como una desventaja al momento de obtener y comparar los resultados.

Debido a esto es recomendable contar con un patrón físico el cual permita analizar el movimiento del flujo del canal y así obtener un valor aproximado del efecto de socavación que pudiera presentarse en las pilas del puente.

Se puede decir que dentro de las ventajas de la aplicación de fórmulas con el implemento de dicho modelo es que la representación de las velocidades es más acertada, aunque no se pudo definir un rango aproximado del arrastre de sedimentos debido a que obtener una escala de dichas características resulta complicado. De acuerdo al tema de socavación como tal es importante considerar que la dimensión de esta se da directamente en función del flujo lo que da entrada a que este problema se pudiera contrarrestar con la posibilidad de alterar la remoción del suelo variando las velocidades de este.

Esto nos da salida a que la aplicación de este tipo de métodos no permite analizar de manera certera un valor real, sin embargo se puede trabajar en soluciones para la disminución de socavación, considerando obras auxiliares como tanques de disminución de flujo, construcción de muros guía en el

conducto o el uso de barras transversales que disminuyan la velocidad del flujo, entre otra. (Castañeda, 2005)

3.5 Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticas e Históricas del INAH

Es importante considerar los puntos más importantes de la ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticas e históricas del INAH, ya que con base en estos se determinarían las especificaciones del método constructivo propuesto para la conservación de puentes patrimoniales que sufran daños por socavación.

Dentro de los más relevantes y los cuales se pueden aplicar a este trabajo se encuentran los siguientes:

El artículo 5º y el artículo 35º son aplicables ya que establece las consideraciones principales para determinar si la construcción que se está usando como caso de estudio forma parte del patrimonio y qué grado de impacto tiene como tal en la nación.

“ARTICULO 5o.- Son monumentos arqueológicos, artísticos, históricos y zonas de monumentos los determinados expresamente en esta Ley y los que sean declarados como tales, de oficio o a petición de parte (...). (Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticos e Históricos, 1972).

“ARTICULO 35.- Son monumentos históricos los bienes vinculados con la historia de la nación, a partir del establecimiento de la cultura hispánica en el país, en los términos de la declaratoria respectiva o por determinación de la Ley.” (Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticos e Históricos, 1972)

Los artículos 9º, 10º y 32º son de los más importantes a tomar en cuenta, debido a que es necesario que se proporcione la supervisión de la

entidad para garantizar que los trabajos propuestos para la conservación sean los aprobados por su parte y correctamente ejecutados.

“ARTICULO 9o.- El Instituto competente proporcionará asesoría profesional en la conservación y restauración de los bienes inmuebles declarados monumentos.” (Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticos e Históricos, 1972)

“ARTICULO 10.- El Instituto competente procederá a efectuar las obras de conservación y restauración de un bien inmueble declarado monumento histórico o artístico, cuando el propietario, habiendo sido requerido para ello, no la realice. La Tesorería de la Federación hará efectivo el importe de las obras.”

“ARTICULO 32.- El Instituto Nacional de Antropología e Historia suspenderá los trabajos que se ejecuten en monumentos arqueológicos sin autorización, que violen la concedida o en los que haya sustracción de materiales arqueológicos. En su caso, procederá a la ocupación del lugar, a la revocación de la autorización y a la aplicación de las sanciones correspondientes.” (Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticos e Históricos, 1972)



CAPÍTULO

IV

DESARROLLO DE ANÁLISIS HIDRÁULICO Y ESTUDIO HIDROLÓGICO

Capítulo IV: Desarrollo de análisis hidráulico y estudio hidrológico

4.1 Obtención de avenidas máximas e hidrogramas unitarios

Los datos generales de la cuenca se obtuvieron con base al desarrollo de modelos para determinar el área de elevaciones y el punto más bajo georeferenciado, utilizando el continuo de elevaciones del obtenido de la página oficial del INEGI (INEGI) en este caso se tomó el puente San Ignacio, (Soto Zamora, 2016) los mapas resultantes se utilizaron para generar el modelo de delimitación de la cuenca con el software MapWindowGIS (C:\... \MapWindow\), utilizando el plugin DACHydro (C:\... \MapWindow\Plugins).

Datos generales:

Tabla 4.- Caracterización de la cuenca. (Soto Zamora, 2016)

CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	
LOCALIZACIÓN DEL PUENTE	21.899051°, -102.323840°
AREA DE LA CUENCA	5636.125 KM2
LC	124.235 KM
PENDIENTE	0.26%

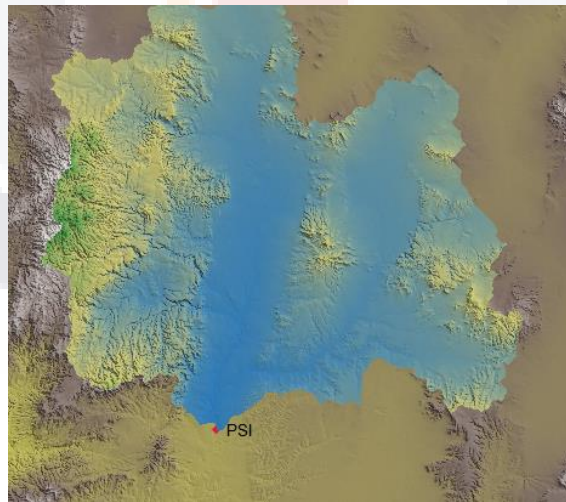


Figura 11.- Mapa de elevaciones y ubicación del Puente San Ignacio. (Soto Zamora, 2016)

Habiendo desarrollado el mapa de elevaciones con la ubicación del punto mas bajo de la cuenca (fig. 11) se procede a elaborar el mapa de flujos superficiales del área en estudio.

Y continuando con el proceso del programa se realiza la delimitación de la cuenca. (Fig.12)



Figura 12.- Mapa de delimitación de la cuenca. (Soto Zamora, 2016)

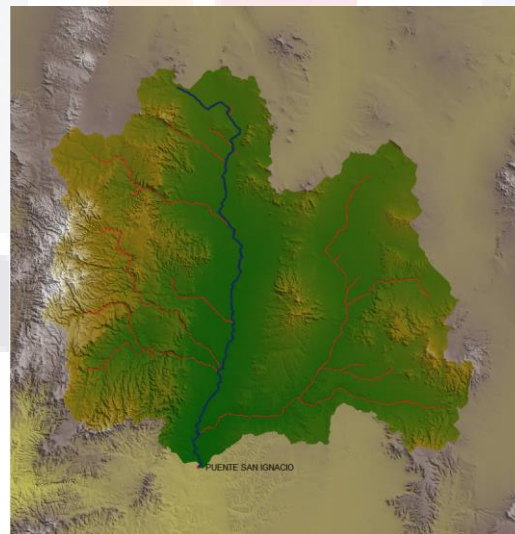


Figura 13.- Mapa de corrientes de agua de la cuenca para obtener Lc. (Soto Zamora, 2016)

Para realizar el modelo de socavación es necesario realizar un estudio hidrológico basado en el control de avenidas hasta la obtención de los hidrogramas para diferentes tiempos de retorno.

Utilizando el método SCS se obtienen los siguientes datos:

Hidrograma unitario

Se obtiene el tiempo de concentración (T_c) que se refiere al tiempo que tarda una gota de agua en trasladarse del punto más alejado hasta el punto más bajo (Campos, 2016), en este caso el indicado como el puente San Ignacio.

Utilizando la fórmula de Kirpich:

$$T_c = 0.000325 \frac{L_c^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (\text{Formula 4})$$

Dónde:

L_c = longitud del cauce principal en metros

S = pendiente

Con tiempo de concentración se obtiene el tiempo de retardo (T_r) el cual es el tiempo de equilibrio que se necesita para formar un movimiento estacionario teniendo lluvia uniforme (Campos, 2016) utilizando la fórmula:

$$T_r = 0.6T_c \quad (\text{Formula 5})$$

La duración de la lluvia está dada, para una cuenca grande, por:

$$d_e: 2\sqrt{T_c} \quad (\text{Formula 6})$$

$$\text{Mejor } \rightarrow d_e = 2\sqrt{T_c}$$

El tiempo pico se calcula con:

$$T_p = \frac{d_e}{2} + T_r \quad (\text{Formula 7})$$

El tiempo base se da con:

$$Tb = \frac{8}{3}Tp = 2.67 Tp \quad (\text{Formula 8})$$

Teniendo estos datos se obtiene el caudal pico en metros cúbicos por segundo por milímetros con la fórmula:

$$Qp = 0.208 \frac{Ac}{Tp} \quad (\text{Formula 9})$$

En donde Ac es el área de la cuenca.

Tablas de resultados:

Tabla 5.- Resultados método SCS

RESULTADO DE LOS CALCULOS		
TIEMPO DE CONCENTRACION (TC)=	26.90	h
TIEMPO DE RETARDO (TR)=	16.14	h
DURACION DE LA LLUVIA (dc)=	10.37	h
TIEMPO PICO (Tp)=	21.31	h
TIEMPO BASE (Tb)=	56.82	h
Qpico	55.02	m ³ /s/mm

Con estos datos se obtiene el hidrograma unitario sintético triangular SCS

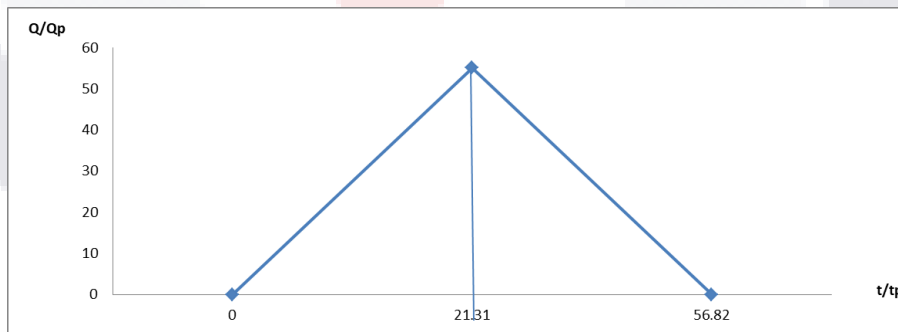


Figura 14.- Hidrograma unitario sintético triangular (elaboración propia)

Utilizando la tabla de valores del diagrama unitario SCS se puede obtener el hidrograma unitario adimensional.

Tabla 6.- Datos para obtener diagrama adimensional SCS

T/TP	Q/QP
0	0
0.100	0.030
0.200	0.100
0.300	0.190
0.400	0.310
0.500	0.470
0.600	0.660
0.700	0.820
0.800	0.930
0.900	0.990
1.000	1.000
1.100	0.990
1.200	0.930
1.300	0.860
1.400	0.780
1.500	0.680
1.600	0.560
1.700	0.460
1.800	0.390
1.900	0.330
2.000	0.280
2.200	0.207
2.400	0.147
2.600	0.107
2.800	0.077
3.000	0.055
3.200	0.040
3.400	0.029
3.600	0.021
3.800	0.014
4.000	0.011
4.500	0.005
5.000	0.000

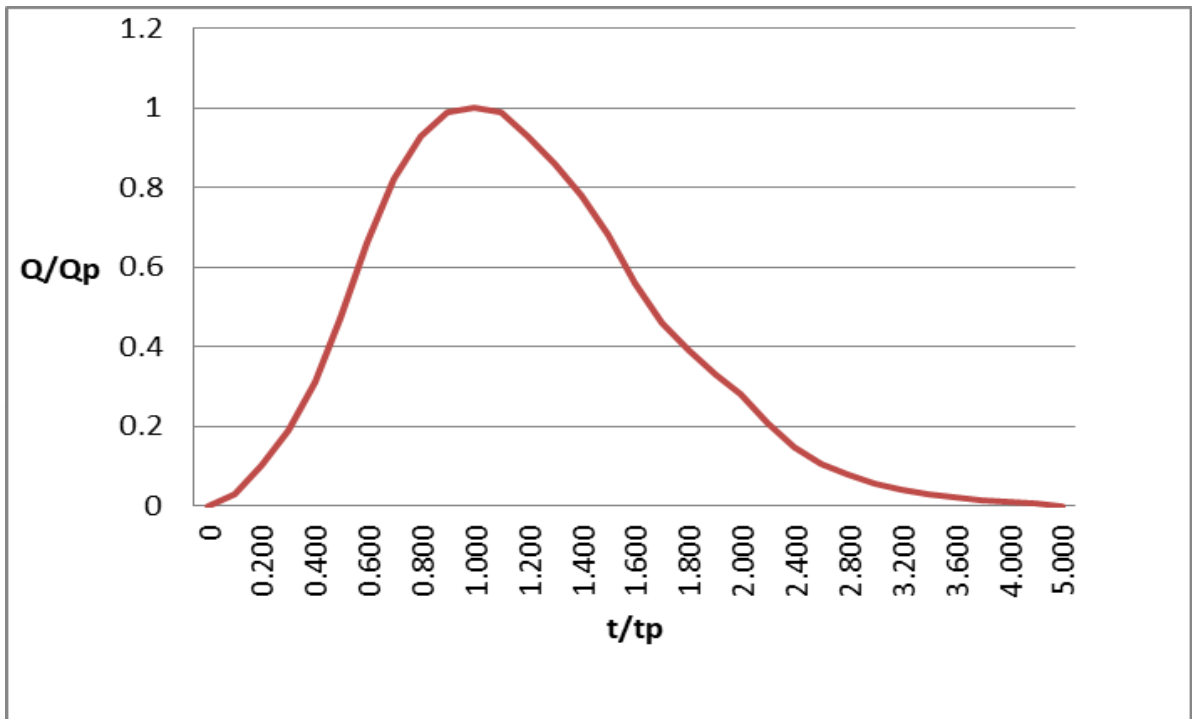


Figura 15.- Hidrograma unitario adimensional SCS (elaboración propia)

Para la obtención de los hidrogramas unifilares del método SCS se toma como base la tabla 7. y se multiplican los valores del tiempo y el caudal pico resultando la siguiente tabla de valores:

Tabla 7.- Cálculo de datos para obtener hidrogramas unitarios SCS.

T (HORAS)	T (SEG)	Q (m3/s/mm)
0.000	0.000	0.000
2.131	7670.786	1.651
4.262	15341.572	5.502
6.392	23012.358	10.453
8.523	30683.144	17.056
10.654	38353.929	25.859
12.785	46024.715	36.312
14.915	53695.501	45.115
17.046	61366.287	51.167
19.177	69037.073	54.468
21.308	76707.859	55.018
23.439	84378.645	54.468
25.569	92049.431	51.167
27.700	99720.216	47.316
29.831	107391.002	42.914
31.962	115061.788	37.412
34.092	122732.574	30.810
36.223	130403.360	25.308
38.354	138074.146	21.457
40.485	145744.932	18.156
42.615	153415.718	15.405
46.877	168757.289	11.389
51.139	184098.861	8.088
55.400	199440.433	5.887
59.662	214782.005	4.236
63.923	230123.576	3.026
68.185	245465.148	2.201
72.446	260806.720	1.596
76.708	276148.292	1.155
80.969	291489.863	0.770
85.231	306831.435	0.605
95.885	345185.364	0.275
106.539	383539.294	0.000

a) Precipitación efectiva

De acuerdo con el estudio de (Soto Zamora, 2016) los datos de precipitación efectiva dados para diferentes tiempos de retorno que se muestran en la tabla 8:

Tabla 8.- Precipitaciones efectivas para diferentes tiempos de retorno. (Soto Zamora, 2016)

Periodo de Retorno	Pe (mm)	QMAX
Tr=5 años	5.1	278.00
Tr=10 años	8.6	474.93
Tr=25 años	13.5	741.71
Tr=50 años	18.3	1009.04
Tr=100 años	23.5	1294.12
Tr=500 años	37.4	2058.80
Tr=1000 años	44.3	2438.32

b) Hidrograma efectivo

Con los datos obtenidos para el diagrama unitario en la tabla 9. se obtienen los hidrogramas efectivos, multiplicando cada uno de los valores por la precipitación efectiva para cada tiempo de retorno, obteniendo así el gasto máximo de cada uno.

Tabla 9.- Gastos para obtención de hidrograma efectivo a diferentes tiempos de retorno.

5 AÑOS	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años	1000
Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8.3	14.2	22.3	30.3	38.8	61.8	73.1
27.8	47.5	74.2	100.9	129.4	205.9	243.8
52.8	90.2	140.9	191.7	245.9	391.2	463.3
86.2	147.2	229.9	312.8	401.2	638.2	755.9
130.7	223.2	348.6	474.2	608.2	967.6	1146.0
183.5	313.5	489.5	666.0	854.1	1358.8	1609.3
228.0	389.4	608.2	827.4	1061.2	1688.2	1999.4
258.5	441.7	689.8	938.4	1203.5	1914.7	2267.6
275.2	470.2	734.3	998.9	1281.2	2038.2	2413.9
278.0	474.9	741.7	1009.0	1294.1	2058.8	2438.3
275.2	470.2	734.3	998.9	1281.2	2038.2	2413.9
258.5	441.7	689.8	938.4	1203.5	1914.7	2267.6
239.1	408.4	637.9	867.8	1112.9	1770.6	2097.0
216.8	370.4	578.5	787.1	1009.4	1605.9	1901.9
189.0	322.9	504.4	686.1	880.0	1400.0	1658.1
155.7	266.0	415.4	565.1	724.7	1152.9	1365.5
127.9	218.5	341.2	464.2	595.3	947.0	1121.6
108.4	185.2	289.3	393.5	504.7	802.9	950.9
91.7	156.7	244.8	333.0	427.1	679.4	804.6
77.8	133.0	207.7	282.5	362.4	576.5	682.7
57.5	98.3	153.5	208.9	267.9	426.2	504.7
40.9	69.8	109.0	148.3	190.2	302.6	358.4
29.7	50.8	79.4	108.0	138.5	220.3	260.9
21.4	36.6	57.1	77.7	99.6	158.5	187.8
15.3	26.1	40.8	55.5	71.2	113.2	134.1
11.1	19.0	29.7	40.4	51.8	82.4	97.5
8.1	13.8	21.5	29.3	37.5	59.7	70.7
5.8	10.0	15.6	21.2	27.2	43.2	51.2
3.9	6.6	10.4	14.1	18.1	28.8	34.1
3.1	5.2	8.2	11.1	14.2	22.6	26.8
1.4	2.4	3.7	5.0	6.5	10.3	12.2
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

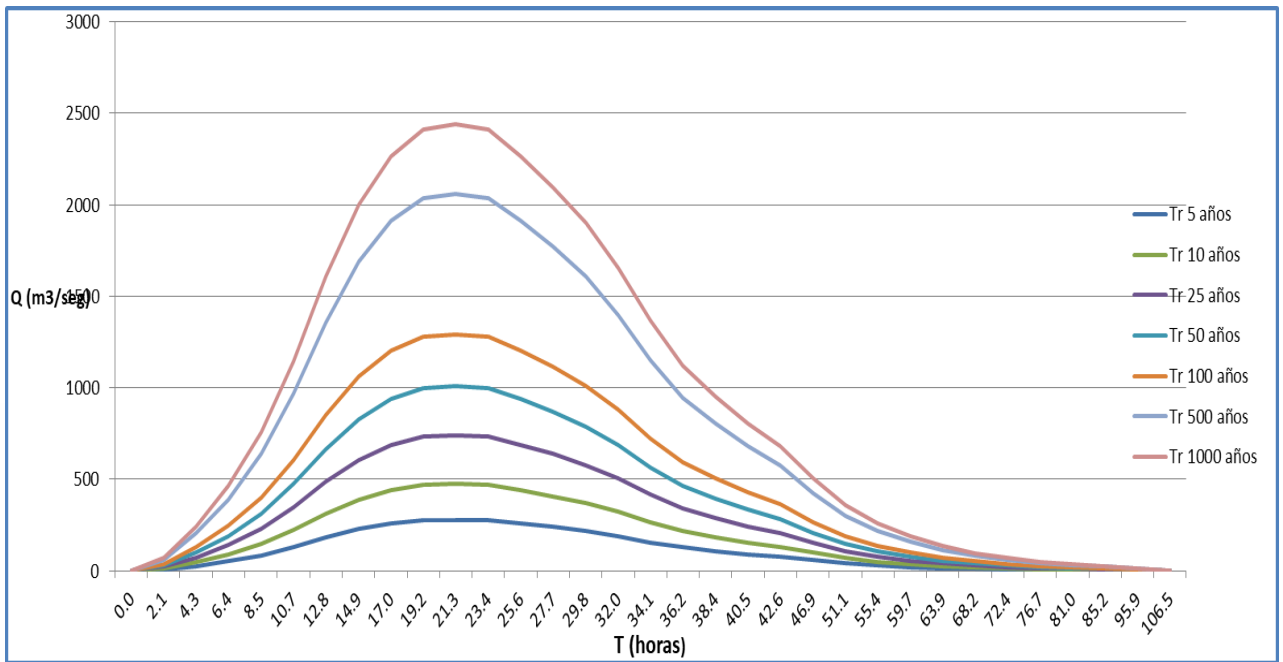


Figura 16.- Hidrogramas Efectivos SCS para diferentes tiempos de retorno (elaboración propia)

Considerando los hidrogramas efectivos se obtuvieron los siguientes gastos máximos:

Tabla 10.- Gastos máximos para diferentes tiempos de retorno.

Periodo de Retorno	QMAX
Tr=5 años	278.00
Tr=10 años	474.93
Tr=25 años	741.71
Tr=50 años	1009.04
Tr=100 años	1294.12
Tr=500 años	2058.80
Tr=1000 años	2438.32

CAPÍTULO

V

**MODELACIÓN DE FLUJOS E INUNDACIONES POR MEDIO DE SOFTWARE
APLICADOS AL PUENTE SAN IGNACIO PARA LA MEDICIÓN DE RIESGO
DE SOCAVACIÓN**

Capítulo V: Modelación de flujos e inundaciones por medio de software aplicados al puente San Ignacio para la medición de riesgo de socavación

5.1 Modelación de flujos

Para la obtención de los modelos de flujos se requirió contar con el mapa de elevaciones del cual se especificaría la topografía del San Pedro.

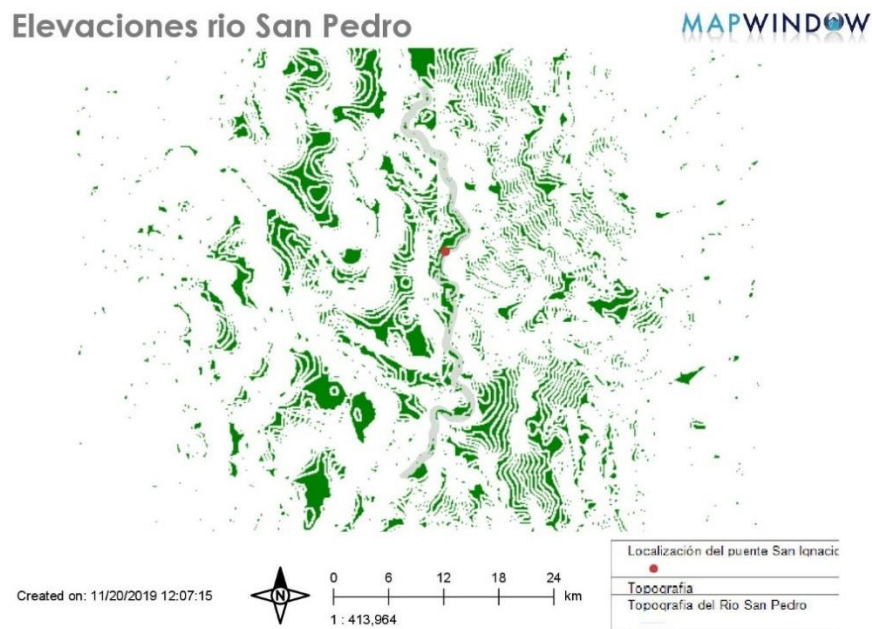


Figura 17.- Mapa de elevaciones Rio San Pedro (elaboración propia)

Se ubicó el punto de localización del puente San Ignacio (21.899051°, -102.323840°), para tomar como referencia un área de curvas de nivel que abarcara por lo menos 250 m aguas arriba y 250 m aguas abajo del punto.

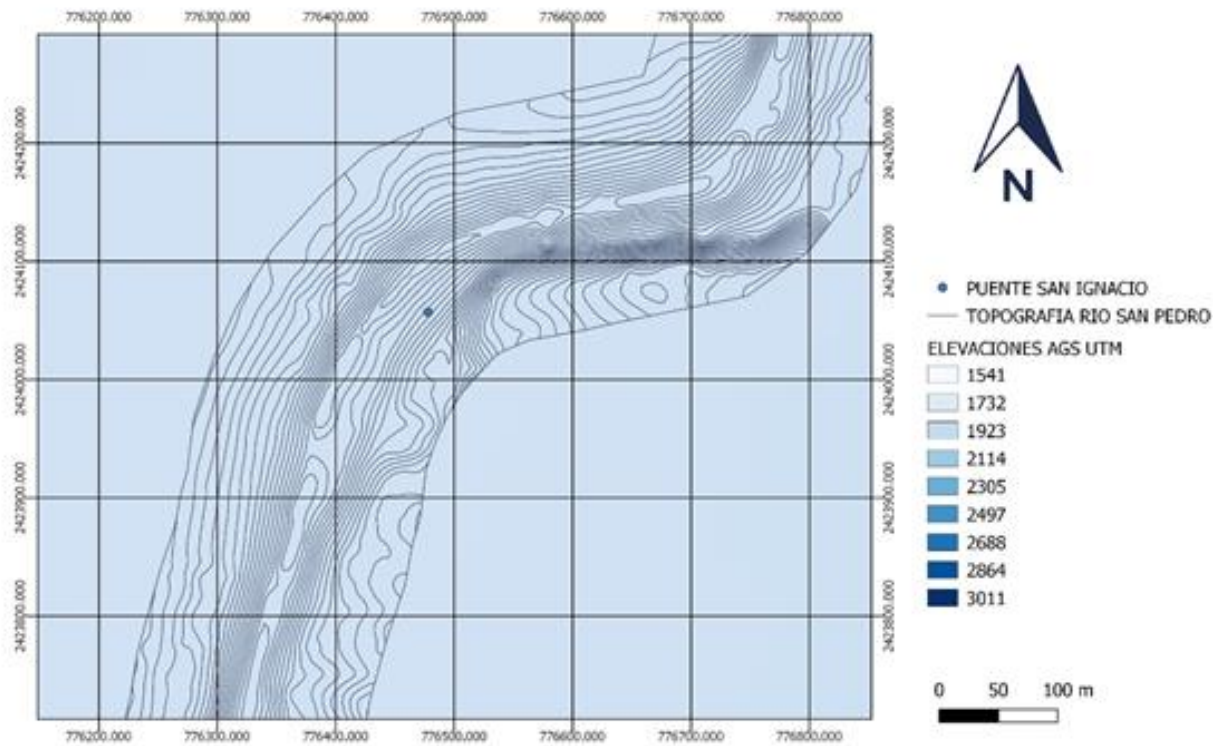


Figura 18.- Levantamiento topográfico del rio San Pedro (elaboración propia)

Adquiridos estos datos se aplicó el procedimiento para la modelación de flujo superficial en el programa Iber.

Como primer paso se importa el contorno del área que se va a trabajar, luego de elige la opción colapsar, esto se usa para depurar el elemento, haciéndolo hasta obtener valores cero en puntos, líneas, volumen y superficie.

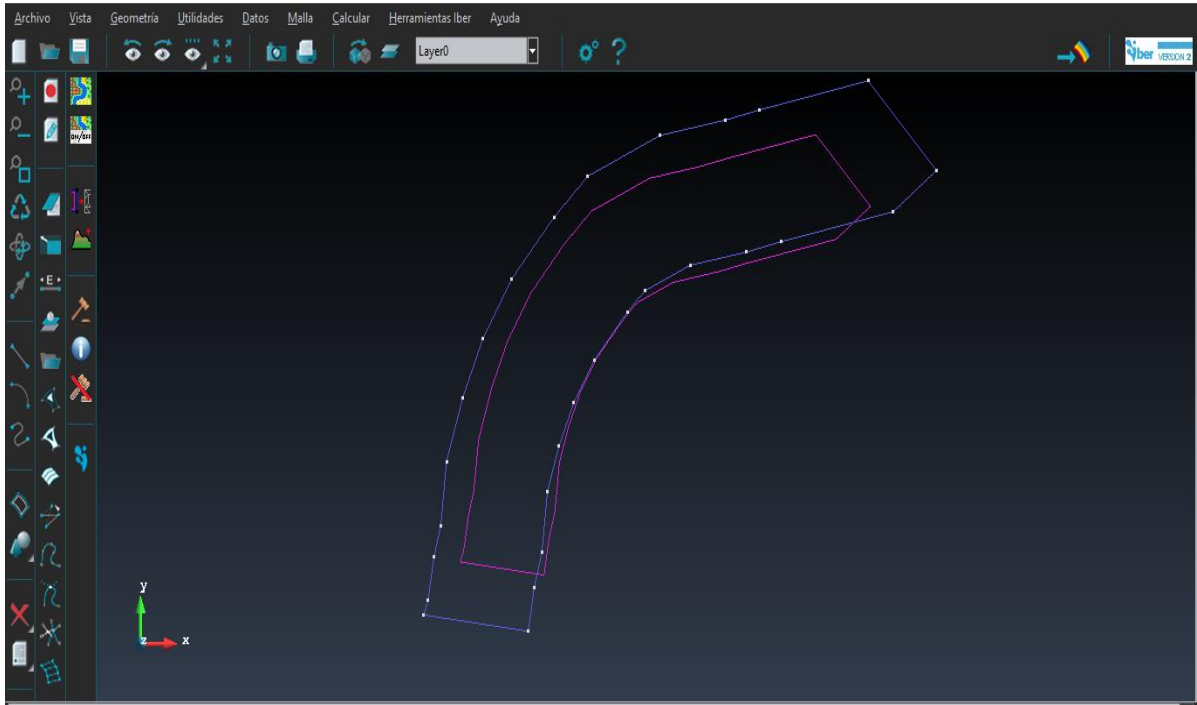


Figura 19.- Línea de contorno en Iber (elaboración propia).

Se debe crear un mallado con la opción Generar malla, este debe incluir una elevación Z, el cual se genera por medio de un MDE que se cargó previamente en formato .asc, para en seguida integrar las especificaciones y se puede correr el modelo, estableciendo previamente las circunstancias para la simulación.

Cuando el programa finalice el cálculo se obtiene la tabla de datos en la que se especifican los valores representados en el modelo, el cual se debe general como último paso.

Estas tablas nos presentan la evolución del punto en el que se localiza el puente analizando la velocidad y el tirante del agua con respecto al tiempo en segundos, marcados en la columna con el título de Hidráulica como se muestra en las tablas 11 y 12.

Tabla 11.- Tabla de evolución de la velocidad del caudal en el río.

Evolución Velocidad (m/s)		Evolución Velocidad (m/s)		Evolución Velocidad (m/s)	
Hidráulica	Velocity (m/s)	Hidráulica	Velocity (m/s)	Hidráulica	Velocity (m/s)
0	0.00	184000	5.94	360000	2.59
4000	1.66	188000	5.89	364000	2.46
8000	2.37	192000	5.84	368000	2.31
12000	2.91	196000	5.79	372000	2.16
16000	3.36	200000	5.74	376000	2.00
20000	3.75	204000	5.68	380000	1.82
24000	4.11	208000	5.63	384000	1.63
28000	4.44	212000	5.57	388000	1.41
32000	4.75	216000	5.52	392000	1.14
36000	5.03	220000	5.46	396000	0.81
40000	5.29	224000	5.40	400000	0.20
44000	5.54	228000	5.34		
48000	5.77	232000	5.28		
52000	5.98	236000	5.22		
56000	6.18	240000	5.16		
60000	6.37	244000	5.10		
64000	6.55	248000	5.04		
68000	6.72	252000	4.97		
72000	6.89	256000	4.91		
76000	7.05	260000	4.84		
80000	7.05	264000	4.77		
84000	7.01	268000	4.70		
88000	6.97	272000	4.63		
92000	6.94	276000	4.56		
96000	6.90	280000	4.48		
100000	6.86	284000	4.41		
104000	6.82	288000	4.33		
108000	6.78	292000	4.25		
112000	6.73	296000	4.17		
116000	6.69	300000	4.09		
120000	6.65	304000	4.00		
124000	6.61	308000	3.92		
128000	6.57	312000	3.83		
132000	6.53	316000	3.75		
136000	6.49	320000	3.66		
140000	6.45	324000	3.57		
144000	6.40	328000	3.47		
148000	6.36	332000	3.37		
152000	6.32	336000	3.27		
156000	6.27	340000	3.17		
160000	6.23	344000	3.06		
164000	6.18	348000	2.95		
168000	6.14	352000	2.84		
172000	6.09	356000	2.71		



Figura 20.- Modelo de áreas de velocidad de flujo tomado 250 m aguas arriba y 250 m aguas debajo de la ubicación del puente (elaboración propia)

Tabla 12.- Tabla de evolución del tirante del río.

Evolución Calado (m)		Evolución Calado (m)		Evolución Calado (m)	
Hidráulica	Calado (m)	Hidráulica	Calado (m)	Hidráulica	Calado (m)
0	1				
4000	1.63234	132000	7.3626	264000	5.04123
8000	2.37114	136000	7.29813	268000	4.96073
12000	2.94892	140000	7.2334	272000	4.87943
16000	3.44517	144000	7.16835	276000	4.79721
20000	3.89189	148000	7.10296	280000	4.71377
24000	4.29424	152000	7.03729	284000	4.62917
28000	4.6636	156000	6.97139	288000	4.54332
32000	5.01105	160000	6.90527	292000	4.45613
36000	5.34575	164000	6.8389	296000	4.36748
40000	5.6677	168000	6.77229	300000	4.27727
44000	5.97138	172000	6.70572	304000	4.18539
48000	6.26536	176000	6.63879	308000	4.09172
52000	6.55234	180000	6.57158	312000	3.99436
56000	6.83446	184000	6.50415	316000	3.89486
60000	7.11283	188000	6.43642	320000	3.79233
64000	7.38619	192000	6.36838	324000	3.68806
68000	7.64861	196000	6.29999	328000	3.58171
72000	7.89966	200000	6.23123	332000	3.473
76000	8.1483	204000	6.16205	336000	3.36163
80000	8.14731	208000	6.09243	340000	3.24728
84000	8.08618	212000	6.02234	344000	3.12964
88000	8.02769	216000	5.95174	348000	3.00832
92000	7.96974	220000	5.8806	352000	2.88289
96000	7.91164	224000	5.80888	356000	2.75283
100000	7.85295	228000	5.73653	360000	2.61748
104000	7.79372	232000	5.66333	364000	2.47608
108000	7.73407	236000	5.5893	368000	2.3276
112000	7.67394	240000	5.51426	372000	2.17072
116000	7.61393	244000	5.43636	376000	2.00361
120000	7.55379	248000	5.35792	380000	1.82369
124000	7.49055	252000	5.2793	384000	1.62701
128000	7.42674	256000	5.20038	388000	1.40704
		260000	5.12107	392000	1.15138
				396000	0.82998
				400000	0.31058

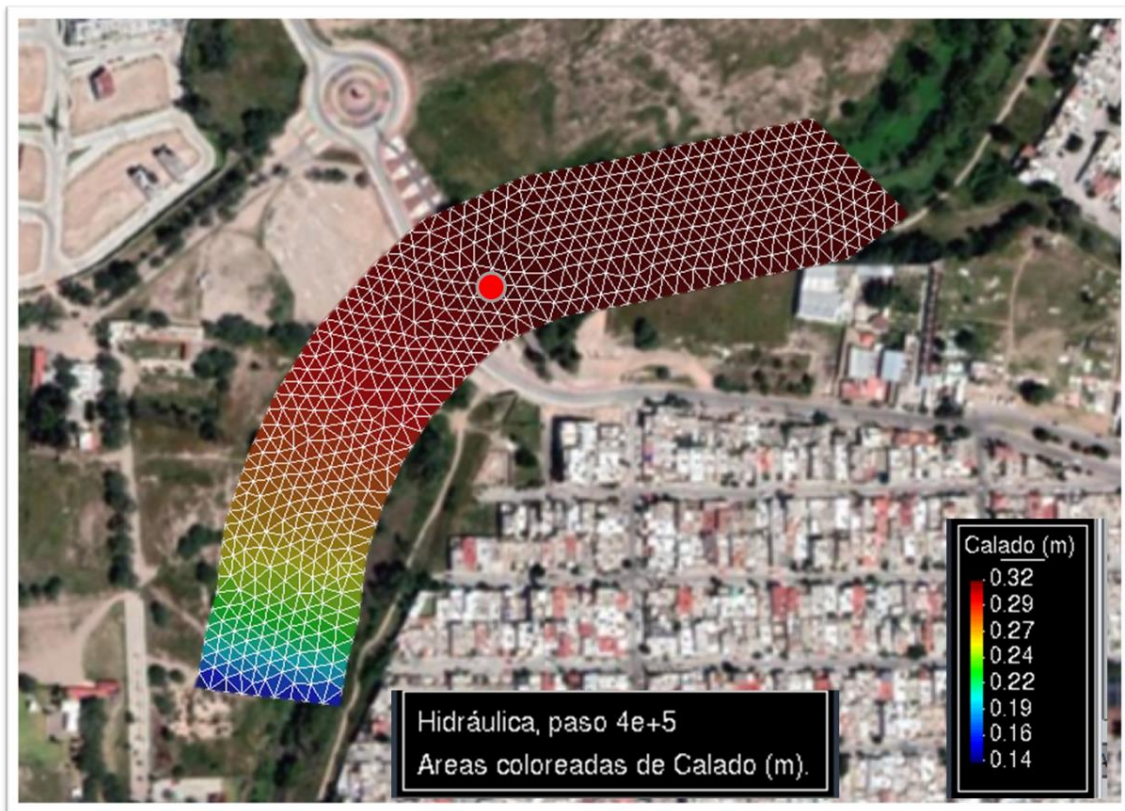


Figura 21.- Modelo de áreas de tirantes tomados 250 m aguas arriba y 250 m aguas debajo de la ubicación del puente (elaboración propia)

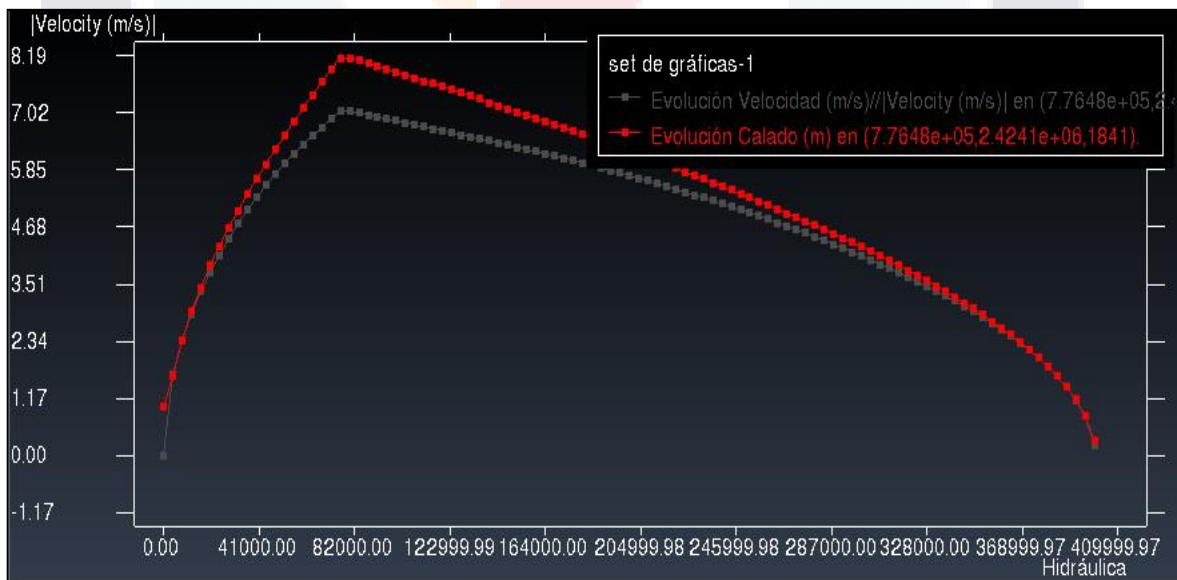


Figura 22.- Gráficas de evolución de la velocidad y tirante del caudal en el río (elaboración propia).

Los valores que nos muestra la tabla de 12 nos ayuda a distinguir la variación que tendría el caudal, obteniendo un valor máximo de 8.15 m, de este valor se podría analizar el área inundable del puente considerando este como el valor crítico que alcanzaría el agua en una crecida de avenida.

Como se muestra en las figuras siguientes:

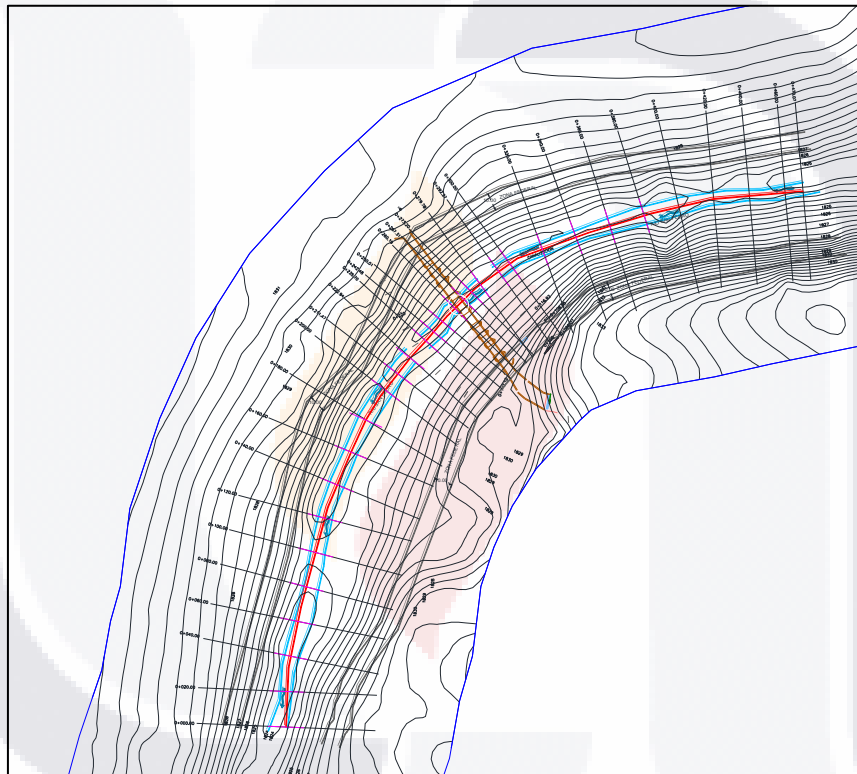


Figura 23.- Proyección del puente San Ignacio en Rio San Pedro.

Las figuras 23 y 24 nos muestran la proyección del puente de San Ignacio y el perfil hidráulico del rio San Pedro el cual se obtuvo tomando en consideración cadenamamientos que van de los 250m aguas arriba y 250 m aguas abajo, en la figura 23 se puede observar que el punto más bajo del nivel de piso terminado es precisamente en la zona en donde se localiza el puente.

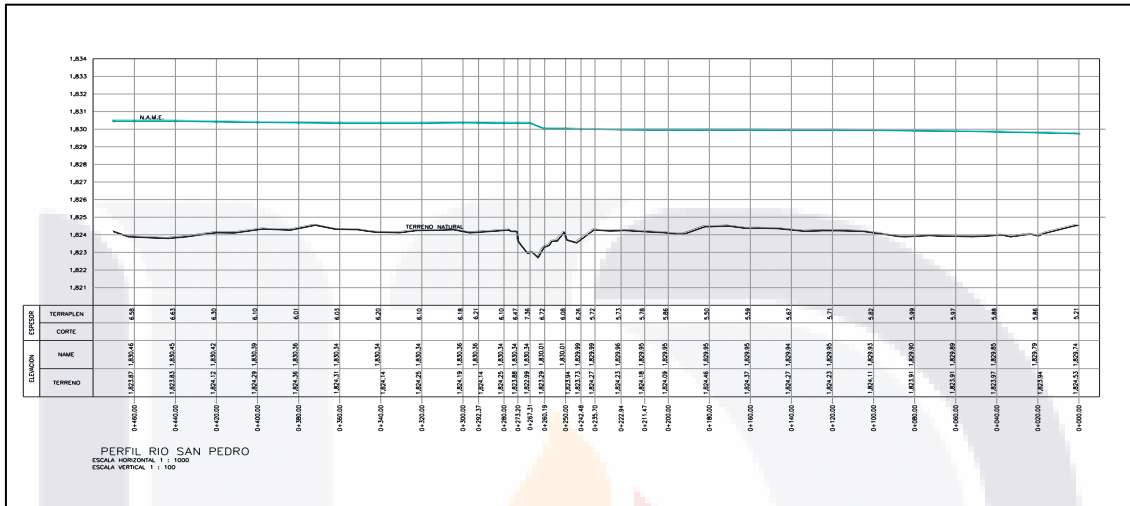


Figura 24.- Perfil longitudinal hidráulico tomado 250m aguas arriba y 250 m aguas abajo

En la figura 25 se muestra la sección hidráulica obtenida del levantamiento topográfico del rio san pedro, en donde se ubica el puente San Ignacio. En donde se establece un nivel de terreno natural de 1822.99 y un N.A.M.E de 1830.33, lo que indica que la altura de inundación registrada es de 7.34m.

En la figura 26 se hace una comparación en la misma sección, del nivel máximo registrado que son 7.34 m y la altura máxima obtenida de caudal que es de 8.15m.

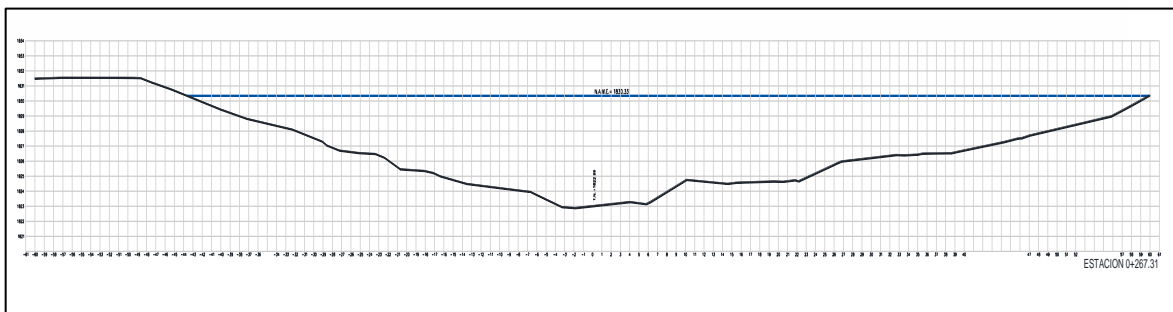


Figura 25.- Sección hidráulica en donde se localiza el puente San Ignacio.

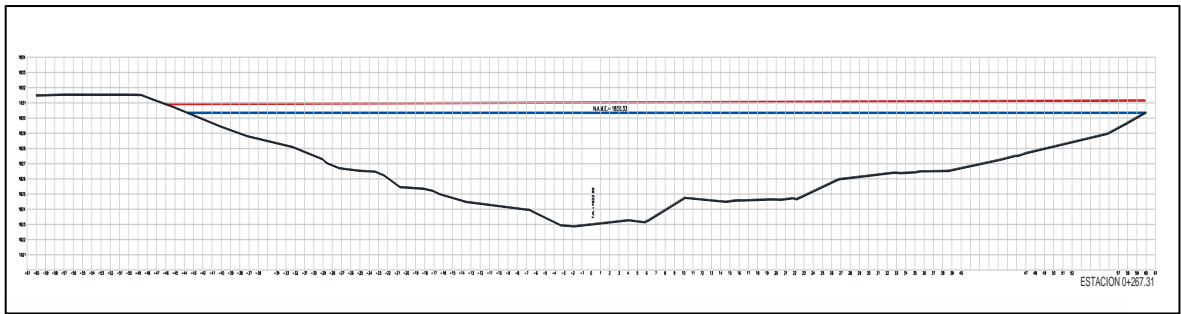


Figura 26.- Sección hidráulica de comparación de N.A.M.E registrado y N.A.M.E obtenido.

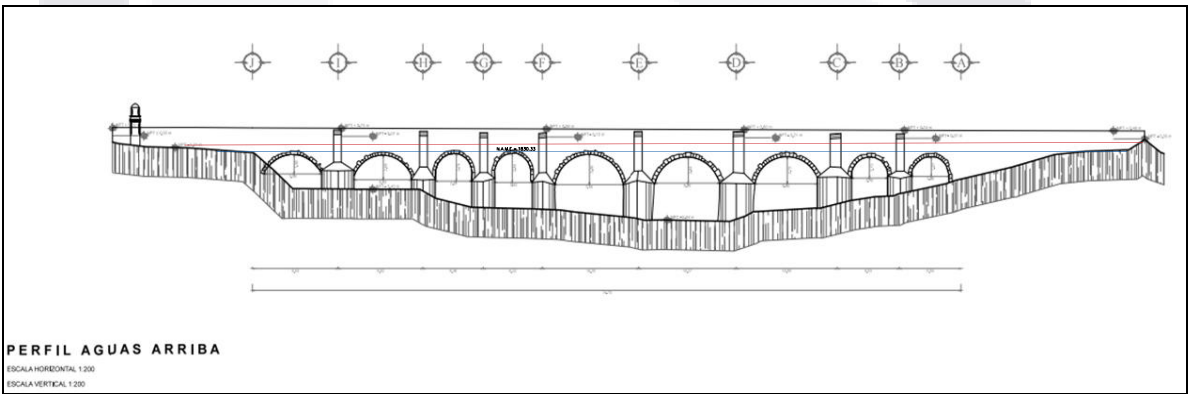


Figura 27.- Proyección de nivel de área inundable en perfil del Puente San Ignacio. (Soto Zamora, 2016)

CAPÍTULO

VI

**DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE METODOLOGÍA
CONSTRUCTIVA QUE PERMITA EVITAR EL RIESGO DE SOCAVACIÓN EN
EL PUENTE SAN IGNACIO**

Capítulo VI: Discusión de resultados y propuesta de metodología constructiva que permita evitar el riesgo de socavación en el puente San Ignacio

6.1 Discusión de resultados

Aplicando la fórmula propuesta por Richardson en 1995:

$$h_s = 2 \cdot K \cdot b^{0.65} \cdot h_1^{0.35} \cdot Fr_1^{0.43} \quad \text{(Formula 9)}$$

En donde:

h_s = profundidad de socavación (m)

K = coeficiente dependiendo del tipo de pila (tabla 13)

Tabla 13.- Factor de forma para pilas uniformes (Obras Fluviales)

Forma	K
Circular	1.0
Nariz redondeada	1.0
Nariz cuadrada	1.1
Nariz triangular	0.9

b = ancho de la pila (m)

h = tirante

Fr = número de Froude

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gDh}} \quad \text{(Formula 10)}$$

Dónde:

V = velocidad media

g = gravedad

Dh = tirante

$$Fr = \frac{4.79 \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 * 8.15\text{m}}}$$

Fr= 0.56

Por lo tanto:

hs= profundidad de socavación (m)

K= 0.9

b= 3.80 m

h= 8.15 m

Fr= 0.56

$$hs = 2 * 0.9 * 3.8^{0.65} * 8.15^{0.35} * Fr^{0.43} = 6.69 \text{ m}$$

Se observa un valor de profundidad de socavación de 6.69m, en caso de inundación total, considerando el tirante máximo de 8.15m que se obtuvo del modelo de flujos y las velocidades de los mismos, lo que, considerando que los resultados obtenidos por medio formulas no son tan asertivos por la poca cantidad de datos que se toman en cuenta, se podría decir que este valor se torna alto con respecto a la altura del puente, por lo que un daño por socavación terminaría afectando sumamente a la estructura.

Según los registros históricos basados en la inundación que se presentó en la ciudad de Aguascalientes en los años cincuenta, que se registró de al menos cuatro metros sobre el nivel de suelo, y la teoría de que el puente de San Ignacio ya presento daños por socavación debido al movimiento que presentan algunas de sus pilas, se puede hacer una comparación sobre los niveles topográficos presentados, fundamentando que si el nivel del terreno natural en la zona del puente considerando el punto más bajo es 1825 y el nivel más alto se encuentra en 1835, se toma el valor critico obtenido del análisis de flujo, obteniendo una cota de nivel aguas arriba de 1833.15, lo que se podía

decir que está por debajo de la cota más alta, pero si se considera una crecida extraordinaria tomando el valor de inundación registrado, el nivel aguas arriba se elevaría hasta un promedio de 1837, generando una inundación total de dicha estructura.

El hecho de que se presente este fenómeno nos indica que las pilas del puente pudieran sufrir en efecto daños por socavación debido a que conforme aumenta el tirante del agua, aumenta la velocidad y esto produce un mayor arrastre de sedimentos del suelo.

6.2 Propuesta de metodología constructiva para riesgo de socavación

Dado que el puente de San Ignacio podría presentar riesgo de socavación, se procede a la implementación de un método que ayude a prevenir daños, cabe mencionar que la propuesta de la metodología constructiva se está aplicando de manera general a la conservación de puentes patrimoniales de arco mampostería.

En este caso, puesto que las especificaciones del INAH implementan que se realicen trabajos que no afecten con el diseño y los materiales originales de las estructuras es recomendable optar por llevar a cabo la ejecución de un método que incluya obras como medidas de mitigación del tipo hidráulico, las cuales aseguran la estructura por medio de la modificación del cauce, la protección de los elementos originales que componen el puente o bien el refuerzo de los taludes del río.

Considerando la forma del río San Pedro, la cual no va en línea recta, más bien se desarrolla a base de curvas, se podría tomar en cuenta la posibilidad de proteger las orillas por la parte exterior para lo cual es necesario que se establezca la pendiente y se trabaje en la conformación de dichas orillas.

También es importante que se realicen obras extras de drenaje que reduzcan la filtración y la saturación, así como considerar materiales para revestir que sean resistentes ante la presencia de erosión.

Debido a que la parte exterior de la orilla del río es la parte que tiende a sufrir más impacto por velocidades altas, así como la variación del nivel del caudal que va desde el punto máximo (N.A.M.E) hasta el nivel medio bajo (N.A.M.B), siendo esto, la causa principal del arrastre de finos.

De los diferentes métodos de mitigación de socavación que se mencionan en (Álvarez, 2016), se puede determinar que para obtener la protección de taludes, se deben aplicar revestimientos desde la orilla y hasta el fondo del río, cuidando que dicho revestimiento se construya con materiales los cuales normalmente se usan enrocados, ya que deben ser materiales que soporten el arrastre de la corriente, además es importante colocar un filtro que evite la salida de finos que se pudiera presentar a causa de turbulencia y cambio de niveles e presencia de una avenida.

Para el diseño de obras de protección de este tipo se deben tomar en cuenta distintos aspectos como la pendiente del talud, misma que debe asegurar la firmeza de los materiales, la porosidad, la cual se considera para como drenaje evitando que se generen presiones extraordinarias que dañen los elementos.

También se debe de aplicar una capa que funcione como filtro, principalmente en las zonas en donde sea posible que genere expulsión de material ocasionado por una crecida de avenida y generalmente se aplican capas de material granular o geotextiles, asegurando la permeabilidad del suelo y estabilidad en el mismo.

Es importante que, si el riesgo de socavación se presenta de manera que genere gran afectación, entonces este tipo de medida se debe aplicar desde el fondo del cauce.

1.- Protección con enrocados

Una de las principales consideraciones que se deben de tomar en cuenta para la construcción de un enrocado es el tipo de suelo, ya que depende de las

características que este cumpla será el tipo y tamaño de piedra que se emplee, la velocidad y el tipo del flujo, así como el tirante del agua.

Para seleccionar el tamaño de la piedra, se utilizan diversos métodos, en los que se define el tamaño y el peso, estas pueden tomarse de los alrededores de la zona si estos cumplen con las especificaciones y en caso de que no lo hagan se puede adicionar algún tipo de mortero para unirlos dejando el drenaje necesario o bien se puede emplear el uso de materiales prefabricados.

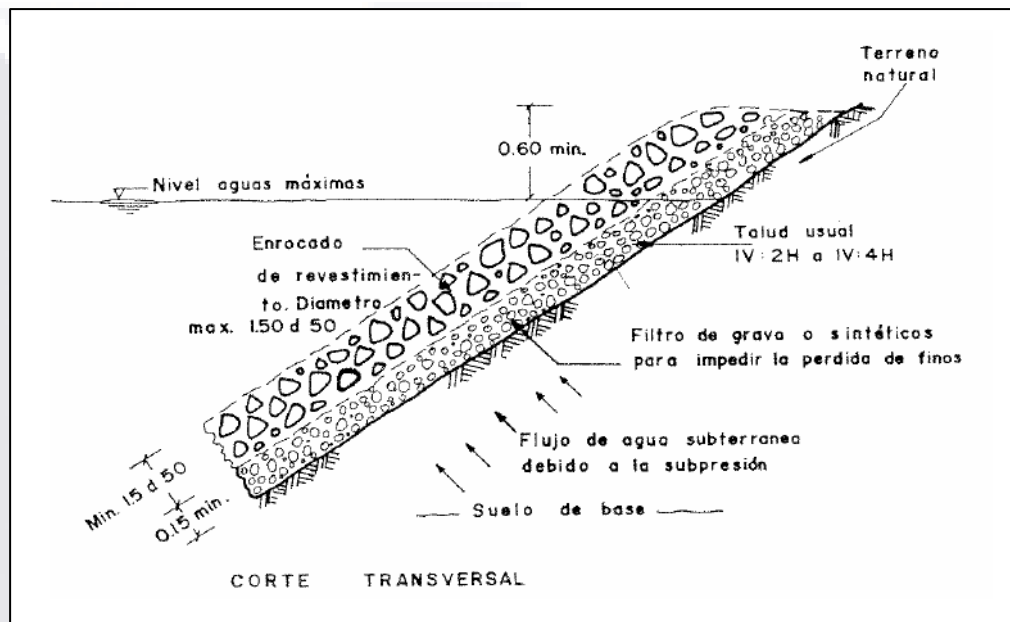


Figura 28.- Protección con enrocados. (Álvarez, 2016)

2.-Protección con gaviones

Este método de protección se basa en una serie de cajas de malla de medida variable que van desde 4x1m² a 4x4 m² en los que se coloca la piedra con tamaño mínimo de 10cm , rellenándolas en su totalidad, considerando que su tamaño no puede ser menos a 1.5 veces el espacio del alambre, siendo este de 5 cm hasta 14 cm. (Álvarez, 2016)

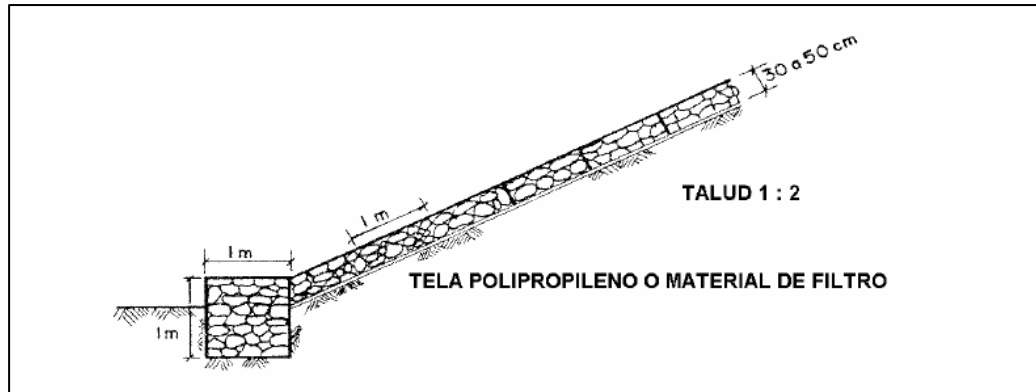


Figura 29.- Protección con Gaviones. (Álvarez, 2016)

3.- Protección en pilas

Otro método aplicable en este caso es la protección de las pilas del puente con piedras alrededor de estas, tomando en cuenta que el tamaño de las piedras que se usan en este método desde ser mayor que el tamaño del enrocado utilizado en el cauce.

Se deben colocar por lo menos tres capas de piedra alrededor de la pila para asegurar la protección del elemento, en caso de que se presente socavación antes se colocar la protección con enrocado se recomienda que se coloque hasta la altura que alcance la socavación.

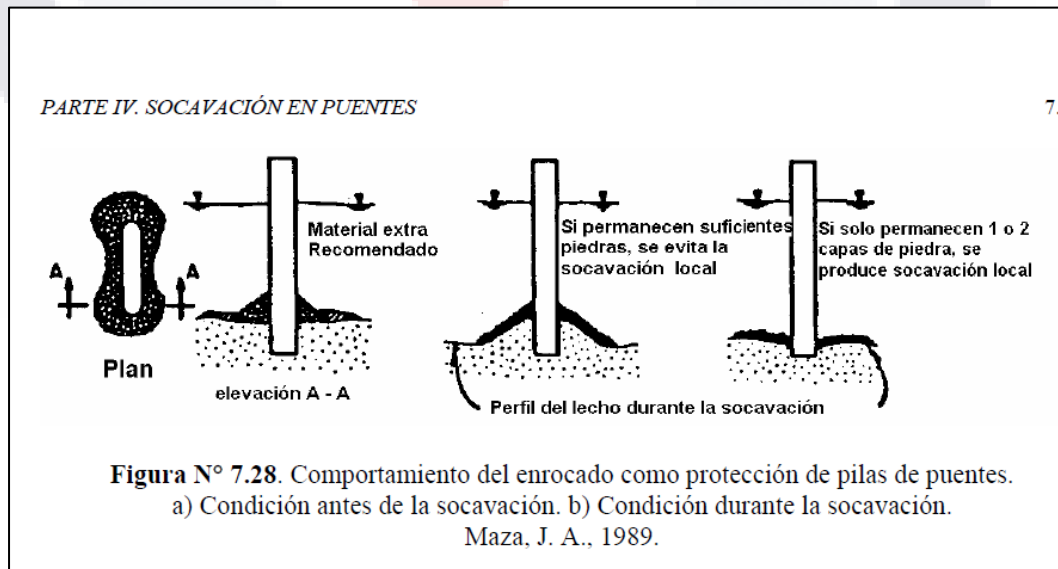


Figura 30.- Comportamiento del enrocado como protección en pilas. (Álvarez, 2016)

También se enlistan una serie de procedimientos constructivos que pudieran ayudar para la reparación de puentes en caso de que no se haya considerado la prevención del efecto de socavación.

1.- Como primera propuesta se tiene que para asegurar la conservación de la estructura como tal, se podrá implementar un procedimiento de reparación de juntas de mortero, esto asegurara que las uniones brinden la resistencia debida a los elementos. Se deberá considerar como tal las especificaciones que dictamine y apruebe el INAH, considerando que los materiales que se utilicen sean compatibles con los aplicados originalmente, en su caso sería cal y agua.

Este procedimiento se puede realizar mediante la reparación de juntas, que consiste en eliminar todo el material suelto o imperfecto (normalmente se considera una profundidad máxima de una pulgada de material retirado) y agregar mortero nuevo, asegurándose de que el trabajo cumpla con las especificaciones dadas, con la calidad, cerciorarse que solo se remuevan las juntas dañadas, así como cumplir con las pruebas de aprobación del nuevo mortero y evitando que se presenten daños físicos mayores en la estructura.

2.- Otro procedimiento de reparación que se pudiera aplicar para la conservación y estabilidad de la estructura de arco mampostería sería la inyección de lechada de mortero, esto aplicaría en caso de que existan grietas en las piedras del muro de mampostería, consiste primariamente en rellenar dichas grietas con un material que sea aprobado por el INAH y compatible con los materiales aplicados el cual permita la adherencia de las piezas de mampostería, en este caso se podría usar una lechada de concreto ya que las grietas que se repararían serían las existentes en la piezas de la mampostería, no en las juntas de mortero. .

Esto se lleva a cabo iniciando con el retiro de material en las grietas a rellenar, estas deben de lavarse con agua y pre hidratarse con mortero para entonces aplicar la inyección de lechada, con un equipo especial de bombeo, se

debe considerar que si existen piezas sueltas estas se deben retirar y colocar nuevamente con el mortero previamente analizado y aprobado.

Este proceso se debe aplicar exclusivamente con personal calificado y se debe cuidar la calidad de materiales, las cantidades de inyección y el acabado final del área a reparar.

Cabe destacar que este procedimiento es aceptable para grietas que van de 0.01cm a 1.9 cm. Y se debe considerar que este tipo de reparaciones no rehabilita en su mayoría la compresión en la estructura de mampostería (AIS, 2001).

3.- En caso de que se tenga el registro de avenidas máximas extraordinarias se podría realizar la construcción de obras de drenaje sencillas extras para asegurar que el fluido tenga una salida y evitar que se presenten daños por erosión.

Se propone la colocación de tubos que sean de un diámetro mayor a 1.20 m para que esto permita la salida de sólidos garantizando que el agua corra sin dificultad. (SCT, 2014)



Capítulo VII: Conclusiones

7.1. Conclusión General

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre la evaluación del riesgo de socavación que pudiera presentarse en las pilas de los puentes, el cual se muestra debido al movimiento de sedimentos que se conforman en la base de las cimentaciones, generando la formación de agujeros sobre este y que provocan la desestabilidad de la estructura, causando que estas colapsen, se puede enfatizar en la importancia que tiene el hecho de implementar algún tipo de metodología constructiva para asegurar la conservación de los puentes construidos de arco mampostería y en su caso, puentes que se construyeron años atrás y que se encuentran enlistados como patrimonio de la humanidad en México.

En la ciudad de Aguascalientes, debido a las investigaciones que se tienen sobre la inundación, se determina que el riesgo de que se presente el efecto de socavación en las pilas de un puente, en este caso el Puente San Ignacio, podría causar daños estructurales, ya que las avenidas registradas, así como los valores obtenidos en los estudios de este proyecto, son estimables para implementar un método constructivo de prevención ante este daño.

Según la propuesta de los métodos utilizados para obtener la socavación, se determina que su mayoría se consideran características genéricas, tomando valores unidimensionales de la altura y la velocidad del flujo y las condiciones del suelo se registran como un suelo recto, lo cual puede hacer que los resultados obtenidos no sea del todo aceptables, sin embargo haciendo comparaciones de la modelación, los registros históricos y el valor obtenido con la fórmula aplicada se puede lograr una visión más acertada sobre el riesgo de presencia de socavación.

Entonces, se piensa importante que se lleve a cabo la ejecución de algún procedimiento aplicable en general a la prevención del daño de socavación en los puentes patrimoniales de arco mampostería, lo cual de acuerdo al

cumplimiento de las leyes dadas por el Instituto de Antropología e Historia, estos conserven su esencia y diseño.

7.2 Conclusiones particulares

A) Con los resultados obtenidos en los análisis hidrológicos e hidráulicos, estos a basa del uso de software especializado (IBER), se logró el modelo de inundación que podría presentar el puente de San Ignacio, estimando que tanto podría afectar en caso de presentarse socavación en las pilas del mismo. Pudiendo determinar de esta manera el método aplicable para la conservación de puentes patrimoniales.

B) Tomando en cuenta la variación en los niveles presentados como resultados, en los cuales se obtiene un valor de nivel de aguas arriba máximo doce metros por encima del nivel más bajo del terreno natural, se puede certificar que la estructura presentaría inundación total en caso de darse una crecida de avenida como la registrada en los años cincuenta, provocando naturalmente el movimiento del suelo conformado en la base de las pilas, inducido por el aumento de velocidad del flujo.

C) Se puede considerar como mejor opción realizar la construcción de una obra hidráulica, en la que se modifique el flujo del agua y no el diseño de la estructura, tomando como puntos trascendentes el hecho de dividir el flujo, logrando minimizar la velocidad del mismo y el valor de la altura de socavación y al mismo tiempo se controla la turbulencia en el paso del puente, logrando así obtener un flujo moderado en el cauce del río y de esta manera evitar el riesgo de fallas por socavación.

7.3 Nicho de investigación

Conforme a las derivaciones obtenidas sobre el riesgo de socavación y sabiendo que esta se presenta y varía de acuerdo a la fuerza del flujo del agua directamente, se confirma que se podría equilibrar el daño induciendo las velocidades del mismo, sin embargo se comprueba que la aplicación de métodos empíricos no brinda un resultado real ya que se consideran variantes generales y cada uno de estos toma especificaciones diferentes para cada caso de aplicación, aunque se puede emplear para la propuesta de soluciones para mitigar la socavación, es recomendable realizar otro tipo de análisis que resulte más eficaz, como podría ser el uso de software que estipulen un valor definido de socavación.

Tomando en cuenta estas consideraciones es recomendable realizar comparaciones de resultados utilizando modelos a escala que nos proporcionen una idea y valores más cercanos al caso real.

También se podría considerar como modo de conseguir una aproximación a un valor real sobre el funcionamiento de los métodos constructivos propuestos creando modelos a escala y de esta manera evidenciar cómo se comportaría cada uno y que tan viable sería su aplicación y de esta manera elegir el más indicado para el caso de estudio a analizar.

Referencias

- AIS. (febrero de 2001). Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sísmo resistente de mampostería . Colombia .
- Aldana, J., & Ordóñez, J. I. (2018). Comparación de fórmulas para calcular la socavación general.
- Altunışık, A. C. (2015). The effect of arch geometry on the structural behavior of masonry bridges. *SMART STRUCTURES AND SYSTEMS* , 1069-1089.
- Álvarez, M. E. (2016). *Socavación en Puentes* . Lemoine Editores y Editorial Universidad del Cauca .
- Arancibia, F. (Miércoles 16 de Diciembre de 2009). *Ingeniería y Construcción*. Obtenido de Ingeniería y Construcción: <http://facingyconst.blogspot.com/2009/12/socavacion-en-puente.html>
- Barbhuiya, A. K. (2004). Local scour at abutments: A review. *Sadhana*, 449-476.
- Bladé, G., C., E., C., Escolanoc, E., P., Vázquez-Cendón, y otros. (2014). Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 1-10.
- Campos, A. (2016). *Hidráulica e Hidrología para Ingeniería*. Recuperado el septiembre de 2020, de <https://es.scribd.com/document/359569377/A-Campos-Hidraulica-e-Hidrologia-Para-Ingenieria-2016>
- Carrasco, G. G., Trujillo, L. M., Ramos, J. d., Zuloeta, O. C., & Nunura, G. d. (2017). Influencia del proceso de acorazamiento en la socavación de los pilares del puente Reque.

- Castañeda, A. A. (Agosto de 2005). ESTUDIO DE SOCAVACIÓN EN LA DESCARGA DE UN CANAL.
- Collazo, A. A. (2011). La fábrica de San Ignacio: patrimonio industrial en abandono en Aguascalientes [México]. Análisis, paisaje agrícola y reuso. *Revista Labor & Engenho* , 1-18.
- Contreras, G. M. (2003). Causa y efectos de las grietas y fallas en el Valle de aguascalientes . *SIHGO*, 1-15.
- Coscarella, F. (2018). Local scour around long vertical wall abutments and the phenomenology of. *New Challenges in Hydraulic Research and Engineering* (págs. 263-264). Calabria, Italia: Aronne Armanini and Elena Nucci.
- Dias, A. J., Fael, F. C., & Núñez-González, F. (2019). Effect of Debris on the Local Scour at Bridge Piers. *Materials Science and Engineering* (págs. 1-11). IOP Publishing.
- Enciso, V. A. (2014). Caracterización estructural y modelación por elemento finito del puente San Ignacio en la ciudad de Aguascalientes. *4to. Congreso de Investigación posgrado 2014*. Aguascalientes.
- Ettema, R., Yoon, B., Nakato, T., & Muste, M. (2004). A Review of Scour Conditions and Scour-Estimation Difficulties. *Water Engineering*, 643-650.
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., & Cea, L. (2018). An Accelerated Tool for Flood Modelling. *Water*.
- Ghazvinei, P. T., Ariffin, J., Abdullah, J., & Mohamed, T. A. (2014). Assessment of Local Scour at Bridges Abutment. *Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 296-304.
- Gutermann, M. (2003). Experimental safety evaluation of concrete and masonry. *Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003 Conference*, (págs. 805-808). Berlin.

Hermosillo, H. (22 de Noviembre de 2015). En latente riesgo de colapsar, puente de San Ignacio: UAA. *La Jornada Aguascalientes*.

Hernández, Y. C. (Mayo de 2018). Medidas de mitigación al efecto de socavación que se presenta en el caño Buque, entre .

IMPLAN. (2012). *Actualización del atlas de riesgos para la ciudad de Aguascalientes* . Aguascalientes .

INAH. (2018). *INAH entrega cédula que acredita sitios históricos* . Aguascalientes.

INEGI. (s.f.). Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/>,

Jia, J. (2018). Scour for Pile Foundation. *Soil Dynamics and Foundation Modeling*, 589-600.

Khassaf, S. I. (2019). Study of the Local Scour Around L-Shape Groynes in Clear Water Conditions. *International Journal of Engineering & Technology*, 271-276.

Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticos e Históricos. (1972). *Ley federal sobre monumentos y zonas arqueológicas, artísticos e Históricos*.

Li, J. (2015). Local scour induced by upstream riverbed level lowering. *Natural Hazards*.

Link, O., Henríquez, S., & Ettmer, B. (2018). Physical scale modelling of scour around bridge. *Journal of Hydraulic Research*.

Loyola, A. B. (2018). El puente de San Ignacio. *Lider Empresarial* .

Manfreda, S., Link, O., & Pizarro, A. (2018). A Theoretically Derived Probability Distribution. *Water*.

Martínez, S. I. (2017). *Intriducción a la Hidrología Superficial (2ª edición)*. Aguascalientes : Txtos Universitarios.

- Medina, J. r., Muñoz, J. J., Tejedor, B., Gomez-Piña, G., & Fages, L. (2006). Actuacion experimental con diques modulares en Santa Maria del Mar. *Redes. Costas* , 301-323.
- Mohammadpour, R., Ghani, A. A., Sabzevari, T., & Mohamad. (2019). Local scour around complex abutments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*.
- Moreno, M., Birjukova, O., Grimaldi, C., & Cardoso, A. H. (2017). Experimental study on local scouring at pile-supported piers. *Acta Geophysica*.
- (s.f.). Obras Fluviales . En *Catedras de obras Hidraulicas*.
- Olmos, B. A., Jara, J. M., Martínez, G., & López, J. I. (2017). System identification of history Mexican masonry bridges. *Procedia Engineering*, 2220-2225.
- Palacios, M. F. (Julio de 2018). Aplicación del modelo de simulación IBER para determinar el potencial energético de ríos y estuarios: caso ría de avilés. Oviedo.
- Pavía, S. (2006). Repair mortars for masonry bridges. *Bridge and Infrastructure Research in Ireland: Symposium 2006.*, (págs. 183-190). Dublin.
- Pizarro, A., Manfreda, S., & Link, O. (2016). Socavación de puentes frente a diferentes condiciones hidráulicas. *XII Congreso Internacional sobre Patología y Recuperacion de Estructuras*. Porto, Potugal .
- Rafael, T., Fernando, S., & Pether, I. (2008). Evaluation and rehabilitation of bridges . *XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural*. Santiago,Chile: asaee.
- Ramírez, D. C. (17 de Mayo de 2016). Análisis técnico-económico de alternativas para la sustitución del embaldosado en el puente de San Ignacio. Aguascalientes, Aguascalientes, Mexico.

- Rodrigo, B. G. (2015). Rehabilitation of Historic Masonry Bridges: Lessons Learned from a Medieval Bridge in Northeast Spain. *Journal of Construction*, 9-14.
- Rodrigues, N., Ramos, A., & Branco, F. (2008). Rehabilitation of Historical Masonry Bridges. Portugal.
- Rodriguez, A. C., & Bustillos, F. A. (2015). Metodos para el calculo de la socavacion local en las pilas de puentes . *Tecnociencia Chihuahua* , 36-48.
- Rougiera, V. C., & Luccionib, B. M. (2007). Modelación numerica de mamposteria reforzada con materiales compuestos. *Mecanica Computacional*, 353-371.
- SCT. (Enero de 2014). Anexos de la guia para la atencion de emergencias en carreteras y puentes. . D.F. , Mexico.
- SEPLADE. (2006). *Atlas de peligros naturales de la ciudad Aguascalientes*. Aguascalientes: D.G. Mónica Altamira Esparza.
- Soto Zamora, M. A. (2016). Sistemas de Información Geográfica, aplicados a problemas de los Ámbitos Antrópicos (PARTE 1). Aguascalientes, Aguascalientes, Mexico.
- Tizapa, S. S. (2013). *Reglamentación sobre el diseño y construcción de estructuras de mampostería*. Guerrero.
- Trujillo, G. G., & Bejarano, L. M. (2013). Estudio de los metodos de analisis basados en la super posicion de los componenetes de socavacion para pilares complejos aplicados al puente Reque. *Tzhoecoen*, 177-198.
- Vargas, J., Rivera, L., Salazar, A., Robledo, V., & Chang, P. (2019). Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, IBER Y FLOW 3D en la simulación hidráulica de un meandro en Colombia: un caso de estudio en el rio Magdalena. *CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA*. Cubagua, Habana.

Velásquez, J. P. (2013). *Estudio Hidrológico- Hidráulico para el diseño del puente sobre la quebrada Padre José*. San Jose, Costa Rica.

Vilchez Cerna, J. H., & Toledo Mejía, W. L. (01 de Octubre de 2018). *Alternativas de solución para prevenir la*. Lima, Peru.

Wang, L., Melville, B. W., Guan, D., & Whittaker, C. N. (2018). Local Scour at Downstream Sloped Submerged Weirs. *Jurnal of Hydraulic Engineering* .





