



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN PUENTES

DISEÑO HIDRÁULICO DE PUENTES

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL

GRADO DE ESPECIALISTA

EN LA

ESPECIALIZACIÓN EN PUENTES

PRESENTA

PATROCINIO ARROYO HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL

ING. ANTONINO NOÉ ROBLES HERNÁNDEZ, FES Aragón

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, junio de 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DISEÑO HIDRÁULICO DE PUENTES

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

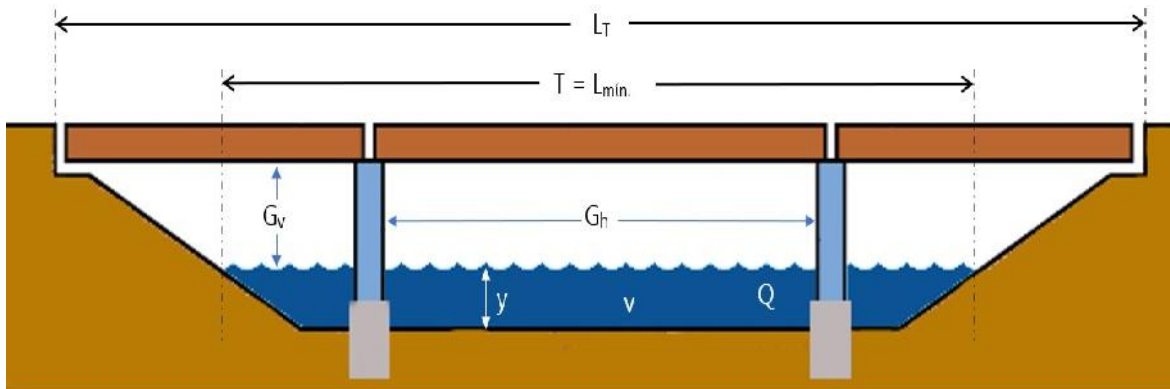
El propósito más relevante de un puente es su concepción como parte integrante del desarrollo de infraestructura para la comunicación e intercambio de toda actividad social, comercial y cultural entre lugares y poblaciones. Esta intención da paso a su construcción, pero previo a ella, se crea el proyecto, el cual tiene como punto de partida el dimensionamiento de este. Y dado que el puente irrumpe al río, sus dimensiones se rigen por su diseño hidráulico. Lo que crea la necesidad de tener un buen conocimiento de lo que conlleva el diseño hidráulico del puente, que lo hará seguro y barato, tanto para su emplazamiento como para el trazado de la vía.

Alcanzar el diseño hidráulico del puente o de cualquier obra hidráulica, es en México con la formación tan variada del Ingeniero Civil y para el Especialista en Puentes, una conjunción de diversos temas de áreas de distintas disciplinas como la geología, geotecnia, hidrología, hidráulica, estructuras y ambiental, intrínsecamente ligadas entre sí y cuyos conceptos debe conocer, analizar y aplicar con el fin de definir el tamaño del puente.

Pero el problema no es el descrito, sino que nadie dice como ligarlas. De tal manera que nos resulta difícil determinar la influencia y sopesar la intervención de cada una de estas áreas al momento de aportar algún criterio que permita simplificar, que ayude a interpretar la eficacia de los resultados, que discrimine si tal ecuación se aplica con cuales o no restricciones, que avale los cambios, entre otros. Incluso interpretar la Normativa es difícil por la característica de ser restrictiva y no explicativa.

Razón por la que el desarrollo de esta Tesina se encamina a explicar con claridad y de manera estructurada, el proceso para determinar las dimensiones de un puente, coadyuvando de esta manera a la generación de criterios técnicos y opiniones que sean útiles en el desarrollo de la actividad.

DISEÑO HIDRÁULICO DE PUENTES



- L_T = Longitud total del puente.
- G_v = Gálibo vertical.
- $T = L_{\min}$ = Longitud mínima del puente.
- G_h = Gálibo horizontal.
- Q = Gasto máximo extraordinario.
- y = Tirante.
- v = Velocidad de la corriente.

Características hidráulicas que definen el dimensionamiento de un puente. *Imagen tomada del sitio:*

<http://4.bp.blogspot.com/-l-9o4MxlocM/USuYzYgw4UI/AAAAAAAAIWw/oBTC49bTajY/s1600/puente+de+viga.png>

Fecha de actualización y edición: 19 de junio del 2020.

*“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor,
la electricidad y la energía atómica: la voluntad”*

Albert Einstein

A G R A D E C I M I E N T O

*Sigiloso en hora tranquila y en completa soledad,
con claridad mi mente recopila momentos, en que distingo
todas las veces que mi fragilidad me dejó sin aliento
y la única luz y fuerza en ese instante, ha sido el sentimiento
de amor incondicional de mi familia, que, con su delicadeza,
responsabilidad, valores y en silencio entendido sus acciones,
no han permitido que solo soporte todo.
Mi gratitud, mi amor y lealtad a mi familia.*

D E D I C A T O R I A

*Un día un libro conocí y no fue suficiente...
había tanto que leer que tuve que volver, hasta que elementos me dio para escapar.
Un día una idea me hizo pensar y no fue suficiente...
había tanto que imaginar, hasta que me mostro el camino para evolucionar.
Un día un conocimiento aprendí y no fue suficiente...
había tanto que conocer, hasta que mis pensamientos oriento.
Un día quise saber a dónde los sueños van, pero no fue suficiente...
había tanto que soñar, hasta que en un libro encontré un conocimiento que me dio la
idea de cómo no hacer de lado mis ilusiones, de cómo apretarlas para depositarlas en
el corazón, de cómo perseverar en la mente hasta que el sueño realidad es.*

*Un día te conocí, me enamoré de ti y no fue suficiente...
hasta que caminamos juntos y ahora eres mi hogar.*

Para ti Sara Hilda

*Un día llegó el amor y no fue suficiente...
hasta que se ilumino y tu luz brillo en mi corazón.*

Para ti Hilda Alejandra

*“No basta saber, se debe también aplicar.
No es suficiente querer, se debe también hacer”*

Johann Wolfgang Von Goethe

C O N T E N I D O

INTRODUCCIÓN

OBJETIVO

ALCANCES

I. CONSIDERACIONES GENERALES

- 1.1 Relación funcional cauce-corriente-puente y el diseño hidráulico del puente.
- 1.2 El río y sus procesos morfológicos ligados a su comportamiento y al puente.
- 1.3 Sistema hidrológico fluvial: Factores hidrológicos y su influencia en la cuenca y el puente.
- 1.4 Alteración del cauce y la corriente en la zona de cruce con el puente.
- 1.5 Daños en el puente por el cruce con el cauce y la corriente.
- 1.6 Sistema hidráulico fluvial: Análisis hidráulico de la interferencia del puente en el cauce y la respuesta de la corriente.
- 1.7 Comportamiento estructural del puente ante los efectos hidrológicos-hidráulicos.
- 1.8 Efectos del calentamiento global antrópico en el diseño hidráulico del puente.
- 1.9 Normativa para la infraestructura del transporte NIT- SCT.

II. METODOLOGÍA DE DISEÑO Y SUS MÉTODOS DE CÁLCULO

- 2.1 Metodología para determinar las dimensiones de un puente y sus obras auxiliares.
- 2.2 Métodos para obtener las características de la cuenca.
- 2.3 Métodos para definir la tormenta de diseño.
- 2.4 Métodos para evaluar los gastos con los que se precisa el de diseño.
- 2.5 Métodos para la transformación de los gastos en tirantes y velocidades.
- 2.6 Dimensiones del puente y sus obras auxiliares.

III. CASO DE ESTUDIO

- 3.1 Estudio Hidrológico de la microcuenca de drenaje de la corriente Río Limón.
- 3.2 Estudio Topohidráulico de la corriente Río Limón.

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

- A. Tabla para el cálculo de la elevación media de la microcuenca de drenaje de la corriente Río Limón.
- B. Tabla para el cálculo del perfil longitudinal de la corriente Río Limón.
- C. Tabla para el cálculo de la pendiente media de la corriente Río Limón.
- D. Codificación de las secciones transversales del cauce Río Limón, para HEC-RAS.
- E. Plano topográfico: Planta del cauce Río Limón.
- F. Plano topográfico: Perfil del cauce Río Limón.
- G. Plano topográfico: Secciones transversales del cauce Río Limón.

I N T R O D U C C I Ó N

La aplicación de la *Hidráulica a los puentes* es la responsable de precisar los parámetros que permiten evaluar la acción de la corriente sobre los elementos del puente, con la finalidad de dimensionarlo y de tomar las medidas necesarias para protegerlo de dicha acción. Este cometido lo logra mediante un diseño hidráulico integral que garantiza la estabilidad de los puentes en sus condiciones normales de operación y ante el funcionamiento hidráulico extraordinario de la corriente, brindando así la seguridad para que no se suscite afectación alguna a usuarios, zonas aledañas y a la estructura misma.

Esta situación implica siguiendo a García (en Alvarado, 2018), que la interferencia causada por los componentes del puente sobre el cauce del flujo desencadene la menor perturbación posible en el escurrimiento de la corriente del río que atraviesa, a la vez que la influencia dinámica y cambiante del movimiento del agua sobre ellos, induzca un reducido riesgo de falla o colapso.

Lo anterior es un proceso complejo que involucra una técnica y criterios específicos desde tres puntos de vista independientes pero complementarios, provenientes *del Análisis Hidrológico, la Hidráulica Fluvial (procesos morfológicos y transporte de sedimentos) y del Diseño Hidráulico* los cuales serán tratados en el desarrollo de este trabajo y que en conjunto sintetizan, proyectan y concretan una serie de aspectos que permiten finalmente cuantificar la magnitud de las cargas (empuje hidrodinámico y subpresión) que induce la corriente a la cimentación del puente, así como la alteración y reacomodo del sedimento en el fondo del cauce y alrededor de las apoyos (socavación total, Perozo 2015), ambos efectos responsables directos de la estabilidad estructural del puente, debido a que físicamente se manifiestan, el primero como esfuerzos agregados a la subestructura y el segundo como asentamiento, erosión y pérdida de empotramiento de la cimentación. Que de no ser tomados en cuenta causarían el desplome de la estructura.

Además, la estadística y la experiencia nacional y mundial acerca de las fallas ocurridas a los puentes indican de acuerdo con (Delgado 2010), que entre las causas más comunes se encuentran: los riesgos naturales (28%), errores de diseño (21%), impactos (18%), sobrecarga (10%), constructivos (10%), error humano (10%), deterioro (2%) y vandalismo (1%). Entre los eventos naturales se hallan el sismo, el viento, los huracanes, los tsunamis, el vulcanismo y las avenidas. De acuerdo con Delgado (2010) este último punto, es el riesgo que más frecuentemente afecta a los puentes, concluyendo que **la falla de la mayoría inicia por razones hidráulicas más que estructurales.**

Este pensamiento refuerza tácitamente la idea de que el origen de esas fallas se establece como una relación entre la extensión y la forma con la que el puente ocupa el río, sobre todo en aquellos en los que su dimensión es función de la capacidad hidráulica con la que drena la corriente y no de la rasante del camino.

De ahí la importancia de comprender adecuadamente los procesos del fenómeno y el mecanismo que ocurren en la **interacción río-puente**, para que, junto con una adecuada **metodología** de perspectiva incluyente, configuren la adaptabilidad de ambos a través del diseño hidráulico del puente.

En resumen, concediendo un tratamiento al río y al puente como independientes y luego conjuntando la manera en que mutuamente se interfieren, se expone en este texto, los principios del diseño hidráulico, que incluyen desde los requerimientos de información hasta el procedimiento para el análisis de los datos que permiten dimensionar el puente, ligado a la Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (NIT-SCT) Carreteras (Car) 2018 vigente en nuestro país.

Lo tratado en el documento, tiene una profundidad introductoria suficiente que permite la reflexión y contribuye a establecer parámetros para integrar un criterio que en la práctica profesional auxilie en la toma de decisiones, en la interpretación de resultados, en la elección de software y el empleo de este no de manera instintiva o mecánica, así como en el horizonte personal a profundizar o especializarse en estos tópicos.

O B J E T I V O S

General

Definir e integrar los aspectos que contribuyen al *diseño hidráulico* de un puente, asumiendo un riesgo de falla predefinido como consecuencia del carácter aleatorio de la crecida de un río asociada a la ocurrencia de una avenida.

Específicos

- Explicar con claridad y de manera sistemática desde el punto de vista hidráulico, el proceso mediante el cual se define las dimensiones de un puente.
- Elaborar un texto para definir el tamaño del puente en el contexto nacional con la filosofía de que el puente se convierta en un elemento acorde con el río.

ALCANCES

Se presenta el enfoque clásico del *diseño hidráulico de un puente* con una *filosofía de relación funcional*, en la que se pone de manifiesto una dependencia en las *afectaciones entre el binomio cauce-corriente (río) y el puente*. Se adhiere a la Normativa vigente para la Infraestructura del Transporte área Carreteras de nuestro país reglamentada por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) dependiente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Y circunscribe el escenario de las diferentes interacciones existentes entre el río (cauce-corriente) y el puente, para garantizar respecto al tiempo y en esas circunstancias, la permanencia y estabilidad de la estructura, así como la del tránsito sobre la misma.

Involucra aquellos problemas que ocasiona el atravesar los elementos del puente: terraplenes y apoyos, en la corriente del cauce con actividad fluvial impuesta por las condiciones que provoca una gran avenida. Y no examina el disturbio que se crea bajo la perspectiva de considerar la compleja dinámica generada por la acción antropogénica que viene condicionando los efectos del cambio climático sobre los procesos hidrológicos y morfológicos, la cobertura vegetal y el uso del suelo.

Proporciona para el ejercicio profesional una visión clara, distintiva y autónoma entre cauce, corriente y puente, reconociendo entre los dos primeros una estrecha relación de origen natural al momento en el que el tercero ajeno e impuesto, interactúa con ellos para tratar de alcanzar una relación eficaz deseable entre todos y que cumpla con los propósitos del puente.

Este documento sintetiza el aspecto Hidráulico que envuelve e impacta al análisis, diseño y construcción de un puente y dado lo amplio que resulta, contribuye a ser un punto de partida y guía para quienes se inician en el tema o para profundizar en investigaciones posteriores del espectro que aún no ha sido descifrado, estudiado o modificado referente a la *vulnerabilidad hidráulica del puente* que modifica tanto su desempeño estructural como el de operatividad.

Con la finalidad de alcanzar los objetivos señalados, esta tesina cubre lo necesario para conseguir la viabilidad de estos y para ello describe la técnica de lograr el diseño hidráulico integral de un puente, relacionándolo estrechamente con la normativa mexicana de cada uno de los aspectos que lo conforman. Esta información se organiza, trata y presenta en tres capítulos, los cuales se resumen a continuación.

En el **Capítulo I** denominado **“Consideraciones generales”**, primeramente, se analiza la correspondencia del conjunto cauce-corriente-puente para entender el efecto y la magnitud en la que se interfieren recíprocamente al pretender mantener, por un lado, el equilibrio dinámico del cauce y la corriente y por otro el equilibrio de fuerzas para el puente. Luego con base en lo anterior, se incorporan los parámetros que intervienen en el diseño hidráulico de la estructura propicios para el cauce y la corriente y convenientes para que el puente responda eficientemente a la intención que se pretende de él, ajustando y reacomodando los equilibrios mencionados. Lo que enseguida da lugar a exponer las características hidráulicas de independencia del cauce y la corriente, así como las singularidades que influyen y modifican el comportamiento de estos al momento de interactuar con la imposición del puente y las del puente cuando se interrelaciona con el cauce y la corriente.

Asimismo, se esbozan los efectos del cambio climático antrópico que no se contemplan en el actual diseño de puentes pero que se puede considerar en investigaciones futuras.

Además, se presenta y comenta acerca de la normativa de nuestro país aplicable al caso que nos ocupa y se especifican los estudios preliminares que sirven de base para el cálculo hidráulico.

En el **Capítulo II “Metodología de diseño y sus métodos de cálculo”** se mencionan las diversas técnicas que permiten estimar la cuantificación de los parámetros fluviales, hidrológicos e hidráulicos implicados en el objetivo de este documento, en correlación con la normativa vigente. Asociados a una guía estructurada con el procedimiento a emplear para lograr el diseño hidráulico del puente.

En el **Capítulo III “Caso de estudio”** se ilustra y aclara concretamente con el trazo del camino que une los poblados de La Unión y San Juan Bautista Atlatlahuca, en el estado de Oax., Méx. cómo aplicar lo señalado en las secciones anteriores, debido a que dicho trazo obliga a un cruce con el Río Limón y consecuentemente en ese punto se requiere proyectar un puente que dé continuidad al camino, facilitando la comunicación y permitiendo el desarrollo económico entre las comunidades.

Finalmente se concluye acerca de los métodos, las normas y el caso de estudio.

*“La mente que se abre a una nueva idea,
jamás volverá a su tamaño original”*

Albert Einstein

CAPÍTULO I

CONSIDERACIONES GENERALES



Puente Shinkyo en Nikko, Japón. Sobre la imagen se indica simbólicamente los procesos a considerar en el dimensionamiento hidráulico del puente. Imagen tomada del sitio:

https://c1.staticflickr.com/5/4020/4702920608_582b44a86c_b.jpg Fecha de actualización y edición: 06 de junio del 2020.

“Los ríos son dinámicos, tienen una organización de sus partes, se mueven y crean cambios. Parecen ostentar una tendencia inherente a muchas de las características de un organismo”

CAPÍTULO I

CONSIDERACIONES GENERALES

En todos los períodos de desarrollo de la humanidad un puente surge de la necesidad de comunicación e intercambio entre lugares y poblaciones, en cierta época eran sinónimo de dominio y poder ya que se construían sobre todo con fines de tipo bélico. En la sociedad moderna, además, son obras públicas icónicas con las que se presenta ante el mundo la infraestructura carretera de un país, simbolizan ideales y aspiraciones en el logro tecnológico al vencer un obstáculo conjuntando innovaciones en resistencia de materiales, en estética y métodos de análisis que han y siguen dando lugar con distintas soluciones a lo largo del tiempo, a el desarrollo de supremos puentes.

Su disposición implica en un aspecto, acuerdos de tipo legal porque afectan siempre a terrenos que gozan de figuras de protección o servidumbre y en otro, compromisos de administración de gasto público pues el costo del proyecto-construcción es relevante dentro de cualquier presupuesto.

Técnicamente representan la consecución de la destreza al conjuntar y aplicar para el mismo fin la ciencia de diversas ingenierías, entre ellas la:

- a) **De tránsito.** Define la geometría, el trazado y la rasante que debe asumir.
- b) **Ambiental.** Vigila que el emplazamiento y construcción no alteren fuertemente el medio donde se inserta.
- c) **Geotécnica.** Aprovecha la fuerza de compresión del suelo donde se asienta para soportar los esfuerzos que descarga.
- d) **Hidrológica.** Investiga y define la ocurrencia del volumen de agua que se espera atravesase por debajo.
- e) **Hidráulica.** Media la influencia de la dinámica fluvial de la sección del cauce necesaria para el paso del caudal sobre las pilas y entre los claros, y
- f) **Estructural.** Determina su estabilidad con el material adecuado para el equilibrio de un esquema de fuerzas permanentes o no.

El tema hidráulico de un puente es uno de los puntos de partida de una serie de fases que permiten concebirlo en su totalidad, cada una de ellas implica procesos específicos en los que resulta muy importante analizar lo referente a la **interacción del cauce y la corriente con el puente**, para que con base en ello, se alcance una sensibilidad para comprender su **vulnerabilidad hidráulica** y a través de ésta alcanzar un **diseño hidráulico** que garantice un funcionamiento seguro, adecuado y de costo razonable ante los embates debidos a la acción del agua.

Sin embargo, debido a la propia naturaleza de los cauces con su corriente y la de los puentes, no es posible contemplar todas las acciones recíprocas que se ejercen, principalmente porque los primeros son de diferentes tipos, esencialmente de gran movilidad fluvial y sujetos a la influencia humana y los segundos son tan variantes en su concepción¹. Y si todavía añadimos (Seaurz 2006) que lo que se ha avanzado en el conocimiento teórico-práctico sobre las propiedades y desarrollo de nuevos y mejores materiales, en métodos precisos sobre el comportamiento estructural, en técnicas computacionales avanzadas para el análisis estructural y en las cargas y procedimientos de construcción de los puentes, entre otros, es mucho más que lo conocido sobre los eventos externos que influyen en el curso de agua y que son particularmente peligrosos para los puentes, resulta pues, difícil lograrlo.

Entonces para alcanzar un diseño hidráulico del puente que altere lo menos posible al cauce natural y al flujo sobre éste o los compense permanente, a la vez que le permita al puente disminuir o tolerar satisfactoriamente el impacto que estos le provocan, es necesario comprender e interpretar los aspectos esenciales del **entorno físico**² y el **ambiente**³ donde interactúan los diversos mecanismos que modifican la magnitud de los parámetros hidráulicos de las variables con las que mutuamente se afectan, razón por la que se puntualizan enseguida.

Respecto a el **entorno físico**, este cambia continuamente en un proceso geológico tan sutil y a velocidad tan lenta que se precisan grandes intervalos de tiempo geológico para lograrlo. Provocando un **estado de equilibrio** que se mantiene **estable** para el tiempo a escala calendario de nuestra vida humana, en la que nos parece que el tiempo no le afecta y que no existen cambios, a un grado tal en el que subestimamos su importancia.

¹ Ubicación, tamaño, disposición de sus elementos y complejidad constructiva para cumplir con el trazado y geometría de la vía.

² Espacio físico.

³ Conjunto de elementos naturales (clima, agua, aire, suelo, fauna) y sociales (actividad humana) que rodean el espacio físico.

Ahora referente a las **modificaciones en el aspecto del entorno**, estas son la respuesta dinámica a un ambiente cambiante y consecuentemente cuando se perturba cualquiera de las variables ambientales, el entorno responde **con una alteración gradual de sus características** hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio.

En el caso de que el puente sea el promotor de un desequilibrio, podemos hallar para la zona de influencia que abarca en cualquier entorno físico y ambiente, el nuevo equilibrio **mediante la relación funcional $\psi = (\phi)$ de tres variables**, representada en la ecuación 1.

$$\psi = \phi (\varepsilon, \theta, \beta) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{cauce}} + \varepsilon_{\text{corriente}} \quad (2)$$

donde:

- ψ = Estabilidad del puente. Son los factores hidráulicos que definen el diseño hidráulico del puente.
- ϕ = Función que evalúa las variables del entorno físico y del ambiente.
- ε = Evalúa los parámetros del entorno físico.
- $\varepsilon_{\text{cauce}}$ = Estabilidad del cauce.
- $\varepsilon_{\text{corriente}}$ = Estabilidad de la corriente.
- θ = Evalúa los parámetros del ambiente.
- β = Evalúa la influencia del puente.

De acuerdo con lo señalado en los párrafos anteriores, una vez estimado adecuadamente ε en la zona de influencia del puente, este se considera constante y la relación funcional se reduce a dos variables.

$$\psi = \phi (\theta, \beta) \quad (3)$$

En general:

- ψ proporciona los elementos hidráulicos inherentes a la condición física del río, su entorno y ambiente para el predimensionamiento, dimensionamiento o redimensionamiento del puente.
- ε representa la estabilidad del río antes del emplazamiento del puente, se obtiene de sumar los efectos de *estabilidad del cauce* y los de *estabilidad de la corriente*. La primera se debe a las transformaciones del cauce por los procesos morfológicos que consiente con el tiempo y que le dan origen a su geoforma, a las características de la red hidrográfica y en general a la morfología de la cuenca, que para efectos prácticos

son estudiados y definidos por la **Hidráulica Fluvial y la Hidrología**. La segunda se debe a los procesos de movilidad del agua, a los patrones de flujo de la corriente y a las leyes de movimiento de los sedimentos y de configuración de fondo, todos estudiados por la **Mecánica de Ríos**.

- θ simboliza los procesos del ambiente de un modelo climático de circulación caracterizado por la **Hidrología**, cuyos *procesos hidrológicos* son considerados como estocásticos, determinísticos o una combinación de ambos, con un nivel de riesgo que implica una *amenaza*⁴ de los acontecimientos con consecuencias acordes a la fortaleza del puente, cuyo inverso es su **vulnerabilidad**⁵. Denotando que cada evento en su condición natural siempre reaccionará en forma equivalente ante impulsos semejantes y a la consecuencia de uno de sus elementos le corresponde un único evento de cada uno de los dos restantes.
- β Está vinculado a factores geométricos, de forma y espaciamiento de los apoyos del puente.

Otra respuesta al ambiente cambiante son los **procesos externos de la superficie terrestre**, responsables de los mecanismos que modifican los parámetros hidráulicos de las variables que intervienen en el diseño hidráulico del puente al transformar la roca sólida en sedimento. Estos son la *meteorización*, *los procesos gravitacionales* y *la erosión*.

La *meteorización* no es uniforme sino diferencial, se produce cuando la roca se rompe mecánicamente por fuerzas físicas⁶ en fragmentos o trozos cada vez más pequeños procedentes de uno grande y sin modificar su composición mineral, o bien, cuando químicamente⁷ es descompuesta en sus minerales inestables y con los estables genera o retiene aquellos con los que forma compuestos nuevos, o cuando ocurren ambas cosas. Conforme la meteorización separa las rocas, la erosión y los procesos gravitacionales retiran los derrubios desplazando los restos rocosos a zonas de menor elevación por efecto de la gravedad, para luego ser transportados por el agua, el viento o el hielo, desintegrando inexorablemente estos materiales. Durante esta transformación, la roca original se descompone en sustancias que son estables en el ambiente superficial. El resultado final es la transformación de la roca sólida en sedimento y la pigmentación del agua.

⁴ Se refiere exclusivamente a las consecuencias hidrometeorológicas e hidrológicas que, en cierto tiempo de recurrencia, ocasiona una creciente de determinada magnitud.

⁵ Susceptibilidad directamente vinculada a la amenaza.

⁶ Expansión térmica, gelifracción, descompresión y actividad biológica.

⁷ Disolución, oxidación e hidrólisis.

Se conoce como *proceso gravitacional* a la transferencia de roca y suelo pendiente abajo por influencia de la gravedad. Y como *erosión*, a la eliminación física de material por agentes dinámicos como el agua, el viento o el hielo.

Las *variables* que intervienen en el diseño hidráulico están vinculadas a factores inherentes a la condición física del río, a su entorno y al ambiente. En esencia son consecuencia directa de la respuesta hidrológica de la cuenca a los impulsos que recibe de los procesos de precipitación-escorrimento. Definidos para el primero por la intensidad, la frecuencia y la duración de la tormenta, mientras que, para el segundo, por el gasto de la creciente, el régimen de la corriente, el nivel de agua en el río, la velocidad media del flujo, el material sólido, el diámetro de las partículas arrastradas y la altura del nuevo nivel de fondo.

En las secciones siguientes se detalla de manera independiente cada uno de estos puntos, definidos e involucrados en la relación funcional $\square = (\phi)$ (ecuación 1), sin apartarse en ningún momento, del objetivo planteado al inicio.

1.1 RELACIÓN FUNCIONAL CAUCE-CORRIENTE-PUENTE Y EL DISEÑO HIDRÁULICO DEL PUENTE

En un medio físico como el de la Fig. 1, el subsistema natural de transformación llamado hidrosfera⁸ desde la atmósfera se precipita sobre la Tierra (**Hidrología**), esculpiendo y creando junto con la meteorización y la erosión muchos de los variados paisajes de nuestro planeta, entre ellos los cauces (**procesos morfológicos**), para regresar de nuevo el agua al océano, por medio de los ríos en un ciclo interminable.

En este entorno, las frecuentes tormentas, afectadas por las condiciones meteorológicas del modelo climático de una determinada región, provocan abundancia de agua sobre la superficie terrestre. La respuesta a esta situación de parte de los cursos de agua que integran la red de drenaje, es evacuarla hasta las zonas bajas para de ahí conducirla al mar. Para lograrlo, modifican en el trayecto su área hidráulica, tanto en sentido vertical (profundidad) como horizontal (anchura) y consecuentemente también la velocidad del agua, estimulando de esta manera la *crecida de los ríos* hasta que alcancen un nivel que se eleva por encima de su capacidad para contenerla, suscitando entonces que este desborde hacia la tierra plana adyacente para que con su paso inunde las zonas

⁸ Porción de agua en el planeta.

próximas al cauce, conocidas como llanuras de inundación, las cuales además de fertilizar los suelos representan áreas de alto riesgo para la actividad antrópica y el puente mismo.

Este irregular paso de caudales se conoce como **tránsito de avenidas**⁹, el cual modifica o cambia la morfología del cauce y el comportamiento de los ríos¹⁰, pero todo ello en un natural equilibrio dinámico.

Cuando por intervención humana en algún punto específico¹¹ del cauce de una corriente se emplazan en su sección transversal el terraplén y/o los apoyos de un puente, éstos ejercen sobre el río una influencia adicional que altera el equilibrio dinámico arriba descrito, *pues representan un obstáculo que entre otros modifica el régimen de la corriente e induce desbordamientos* y consecuentemente el río provoca sobre ellos *sobrecarga*¹² e *inestabilidad a la estructura al remover y modificar el suelo de la zona de desplante de dichos elementos*.

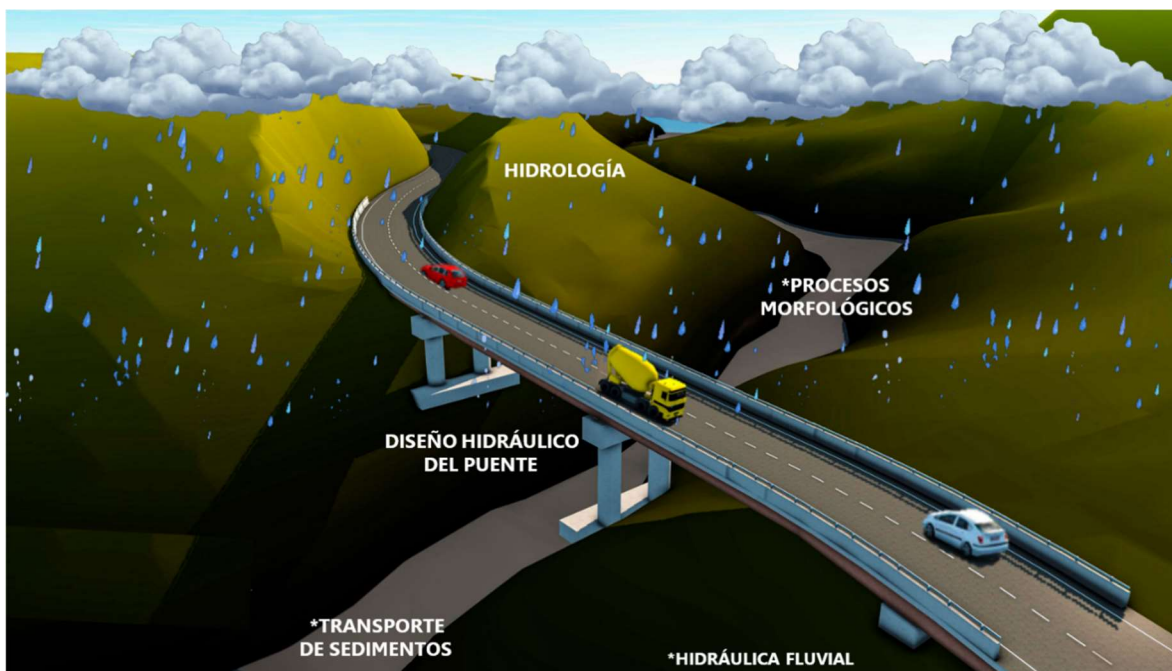


Fig. 1.- Relación funcional cauce-corriente-puente en equilibrio dinámico, después de alcanzar el nivel de base temporal dentro del medio físico. *Imagen editada tomada del sitio:*

<https://gallery.autodesk.com/civilinfrastucture/projects/10320/disen-de-carretera-y-puentes?searched=> *Fecha actualización y edición: 11 de julio de 2020.*

⁹ Agua adicional (escurrimiento directo) que se desplaza junto con la que siempre lleva el río (flujo base), en similitud a una onda. Se produce casi sin previo aviso, provoca un aumento rápido en el nivel de agua significativamente mayor que el flujo medio del río con velocidad de corriente devastadora.

¹⁰ Posición, forma y transporte de sólidos.

¹¹ Cruce con un camino.

¹² Al elevarse el nivel de agua, con el arrastre de sedimento depositado y acumulado al pie de las pilas y con el transporte de cuerpos flotantes retenidos por los apoyos.

Para atenuar las perturbaciones impuestas por los apoyos del puente al escurrimiento de la corriente con régimen hidráulico extraordinario y la *vulnerabilidad* de los mismos ante la influencia dinámica y cambiante del movimiento del agua, desde el punto de vista de la **Hidráulica, el puente se considera una estructura hidráulica**, cuyo **diseño hidráulico** pretende en las **nuevas condiciones funcionales**, restaurar el equilibrio dinámico del medio físico donde el puente cruza la corriente de una manera global e integral, proyectando de ser necesario, *obras hidráulicas complementarias de dirección del flujo y de protección* tanto para los apoyos del puente como para las márgenes y fondo del cauce.

El resultado final es la obtención de factores hidráulicos, bajo un esquema de seguridad o riesgo permitido y aceptado para la vida y las características de la estructura, que permiten definir del puente:

A. Por encima del río que cruza:

1. **Su ubicación óptima.** Seleccionada para reducir los problemas de erosión y evitar rectificar el curso de la corriente y el del empleo de obras hidráulicas adicionales.
2. **El galibo vertical o altura mínima** respecto de la parte inferior de la superestructura al nivel de la superficie libre del curso de agua, separada de esta última con un margen de seguridad para evitar la flotación y arrastre de la superestructura, además de permitir el paso de cuerpos flotantes y de ser el caso, el de embarcaciones.
3. **Su longitud total.** Debe ser *la menor posible por razones económicas*. Esta facilita el paso del caudal en la sección transversal del cauce bajo el puente, con la menor perturbación posible.

B. Sobre el cauce y la corriente, de acuerdo con la calidad del suelo o roca donde habrá de apoyarse:

4. **El galibo horizontal o espaciamiento entre paño de pilas**, es el ancho mínimo para el paso sin obstáculos de material de arrastre, flotante y de ser el caso el de embarcaciones. Ayuda a definir la forma de la pila.
5. **De ser el caso, la longitud de terraplén que invade el cauce.** Sobre todo, en zonas inundables, pero en ocasiones es una petición relacionada al costo de la estructura.
6. **La altura de socavación total** que modifica la configuración del fondo del cauce bajo el puente o al pie de los apoyos. Útil para definir la profundidad de desplante de la cimentación, de las pilas y su relación de esbeltez.

En la práctica profesional estos seis puntos definen el **diseño hidráulico del puente y concretan su dimensionamiento**.

Concebirlo es tarea conjunta de diversos especialistas, rigurosamente el *gálibo horizontal* debe ser aceptado de común acuerdo con el estructurista, en cuanto a que sea posible salvarlo con el *material, la técnica constructiva y que sea el mínimo de apoyo para los desplazamientos máximos de la estructura*, de lo contrario hay que sujetarse a las modificaciones que pertinentes que incluye la que señale la geotecnia y elaborar una revisión hidráulica, de tal manera que el primer cálculo se considera entonces como un predimensionamiento y después de la revisión se tendría el dimensionamiento definitivo.

También los puentes existentes con afectaciones hídras recurrentes por el paso de crecientes se redimensionan con los seis puntos señalados, lo que admite prolongar su vida útil a vida residual, o si esto fuera y se justifica, su vida operativa.

1.2 EL RÍO Y SUS PROCESOS MORFOLÓGICOS LIGADOS A SU COMPORTAMIENTO Y AL PUENTE

El río conformado por el cauce¹³ (lecho)¹⁴ y la corriente natural es considerado un *sistema continuo* sometido a todo tipo de gradientes desde su nacimiento hasta su entrega, con *variaciones en la transferencia de materia, energía y biótica* que condicionan relaciones significativas en su *longitud, en su ancho y profundidad*, las cuales se extienden a sus acuíferos, al valle y a la llanura de inundación y sus terrazas.

Su *comportamiento* se debe a un estado de equilibrio entre las fuerzas erosivas y las de resistencia alcanzado en condición de caudal variable, como respuesta a la influencia de las características y de los cambios del cauce y de la corriente originadas naturalmente¹⁵ por fenómenos¹⁶ geológicos, climáticos e hidrológicos.

Sin tomar en cuenta el cambio climático y el calentamiento global, el clima en los últimos miles de años ha caracterizado las variaciones de los caudales dentro del proceso aleatorio, en un rango de estado estacionario¹⁷, ocasionando por ejemplo que sin la influencia antrópica en los últimos cien años, los ríos se encuentren en un *estado* de erosión que puede considerarse *normal*, en el que conservan su pendiente, mantienen las dimensiones medias del lecho y transportan el mismo volumen de agua y de sedimento, lo que les da la categoría de estadísticamente *estables*.

¹³ Lugar físico por donde corren sus aguas.

¹⁴ Es la superficie de tierra que las aguas ocupan habitualmente.

¹⁵ Época de erosión intensiva y de formación del lecho primitivo.

¹⁶ Procesos dinámicos que generan geoformas.

¹⁷ En el que la particularidad estadística de las oscilaciones del caudal es de invariables.

Rigurosamente estas fluctuaciones de caudal a lo largo del cauce le generan un estado de **equilibrio dinámico**¹⁸ acompañado de un gran número de **desequilibrios**¹⁹ relativamente menores pero que tienen una gran influencia en los *procesos reversibles*²⁰ para que el río tienda a conservar el estado de equilibrio normal alcanzado, o logre uno nuevo en un rango de escalas temporal y espacial bastante grande y bajo la influencia de *procesos irreversible*, en los que el río ajusta el efecto de los cambio sobre el ancho del cauce, la profundidad del lecho y la velocidad de la corriente, aunque no de la misma manera pero si proporcionalmente, debido a que el ancho aumenta más rápido que la profundidad y la profundidad más rápido que la velocidad.

Esto último genero la idea para estudiar el comportamiento de los ríos en tres dimensiones: largo, ancho y profundo considerando el efecto del tiempo (cuarta dimensión) y diferenciándolo de los fenómenos reversibles de los irreversibles.

De acuerdo con todo lo anterior, el equilibrio del río se sostiene durante un período de años e implica el equilibrio del cauce y de la corriente natural. Físicamente significa que en ese tiempo ajusta su pendiente para que con su geometría sea capaz de evacuar tanto el caudal líquido como el sólido, a esto se le conoce como régimen del río. Es decir, con la magnitud del caudal líquido y las características del cauce proporciona la velocidad requerida para el transporte de la carga.

En esas condiciones, el estado actual de cualquier río se considera como un legado creado por estructuras heredadas, muy diferentes a las que se podrían obtener bajo la influencia de los fenómenos actuales.

Para entender el origen de los ríos y su respuesta ante los fenómenos derivados de procesos naturales y la intervención humana, la **Hidráulica fluvial** lo estudia sujeto al movimiento del agua, a la erosión del lecho, al movimiento de los sedimentos (transporte y acumulación de sólidos), a la influencia de la vegetación, y a las deformaciones del cauce sin incluir la vida acuática a la cual se dedica la biología y ramas afines.

El movimiento del agua comprende a la corriente respecto a los patrones de flujo que se pueden presentar, a el tránsito de las avenidas y la turbulencia responsable de buena parte de la resistencia hidráulica, de la distribución de la velocidad del flujo y del movimiento de los sólidos en suspensión y del fondo.

¹⁸ Proceso de cambio en el sistema, en el que fluctúa la relación de los factores formadores del cauce.

¹⁹ Proceso de cambio en el sistema, en el que se rompe el balance entre las relaciones de los factores formadores del cauce y que conduce a un nuevo estado de equilibrio con fondo morfológico igual o diferente al existente.

²⁰ Estabilidad vertical (agradación y degradación del lecho) y estabilidad horizontal (divagación lateral, ensanchamiento y estrechamiento).

El movimiento de los sedimentos transportados por el flujo está asociados a fenómenos de erosión y socavación y cuyo exceso o déficit definen los procesos de agradación o degradación (remoción) del lecho.

La vegetación presente en el cauce y las orillas participa activamente en la resistencia hidráulica, en las características de la corriente y del arrastre de sedimentos, así como en la estabilidad y deformación de los cauces.

La deformación del cauce mayormente enmarcada en los ríos aluviales²¹ como consecuencia de la interacción entre el flujo y los sedimentos de fondo, está condicionado además de los procesos morfológicos a los procesos aluviales²² que se presentan durante esas interacciones.

Como se advierte el análisis multitemporal de la tendencia del comportamiento de un río integra factores que pueden ser divididos en cuatro sistemas²³ particulares, a saber: el sistema morfológico fluvial (define la formación general del relieve con sus diferentes capacidades en distintos medios geográficos), el sistema hidrológico fluvial (pronostica el caudal), el sistema hidráulico fluvial (precisa el régimen hídrico, el grado de estabilidad del cauce y el régimen sedimentológico) y el sistema ecológico, de los cuales el segundo y el tercero se tratan en los apartados 1.3 y 1.6, respectivamente, el último no será tratado y el primero se atiende a continuación.

Los **procesos morfológicos** de un río son el conjunto de fenómenos que aparecen como resultado de la interacción del flujo y los sedimentos de un cauce, de la erosión hídrica del lecho, del transporte (remolinos de agua) y acumulación de sólidos que propician la aparición y desarrollo de formas de una corriente natural y su relieve, lo mismo que sus transformaciones, estacionales, multianuales y seculares.

Entonces, se conoce así a la sucesión de ajustes mutuos y variaciones entre la hidráulica de la corriente natural y las formas del cauce, con las que cada uno alcanza su estabilidad. Esta la logran mediante un transcurrir continuo de efectos íntimamente ligados en el que la causa se transforma en efecto y viceversa. Ya que el flujo longitudinal al interactuar con las formas generales del cauce crea un determinado relieve de la superficie del agua. Este relieve determina la magnitud y dirección de los flujos transversales en el fondo del río. Las corrientes de fondo condicionan determinados cambios en las formas del cauce y esto genera ciertas transformaciones en las corrientes principales. Debido a

²¹ Aquellos en el que el flujo transita por sus propios depósitos.

²² Describen el comportamiento general (desprendimiento, transporte y agradación) de las partículas sólidas que no tiene que ver con las del lecho, sino que son depósito de la corriente.

²³ Conjunto de componentes con una función común.

que los flujos de fondo, al alterar el estado de los materiales del lecho, desprenden un gran número de partículas y las trasladan a un nuevo sitio, produciendo cambios graduales y episódicos de manera permanente en las formas del cauce. Las características de este fenómeno dependen de la estructura hidráulica de cada tramo, pero esta resulta influenciada por el relieve del río. La erosión y el posterior depósito de sedimentos resuelven en buena medida la contradicción preexistente entre la estructura del flujo y la conformación del cauce y, al mismo tiempo, crean una nueva incongruencia entre la antigua estructura de la corriente y las nuevas formas del cauce.

Estos se ajustan a dieciséis (16) Principios de los cuales solo mencionaremos cinco:

- 1. Principio de interacción del flujo con el cauce.** Explica el fenómeno de autorregulación de los cauces naturales. Al deformar el suelo el flujo crea tales formas del cauce que corresponden a su campo de velocidades y estas formas, a su vez, determinan el campo de velocidades de la corriente. Cuando estos dos elementos no coinciden, se produce su mutua transformación. En este proceso juega un papel importante el intercambio de sedimentos cuyo desbalance conduce a las deformaciones unidireccionales del cauce. De esta manera el desprendimiento, el transporte y la deposición de sedimentos lo mismo que las deformaciones del río son procesos autorregulados en donde la capacidad de transporte es el agente regulador.
- 2. Principio de la nivelación automática de la capacidad de transporte.** Refleja el hecho de que cuando en un determinado tramo de la corriente no posee la suficiente capacidad de transportar la cantidad de sedimento que recibe, el fondo empieza a elevarse hasta el momento en que la pendiente longitudinal crece, por deposición de sólidos, y alcanza un valor suficiente para arrastrar el material. De la misma manera, aquellos tramos con déficit de sedimentos respecto a su capacidad de transporte se profundizan, disminuyendo su pendiente, pero aumentando la pendiente del tramo aguas arriba con el subsiguiente aumento del transporte de sedimentos en ese sitio.
- 3. Principio de las relaciones no lineales.** En los procesos de erosión-acumulación no existe proporcionalidad entre las variaciones cuantitativas de los factores activos por un lado y la intensidad de su aparición y la capacidad de transporte de las corrientes, por otro. Sino que más bien y de acuerdo con la expresión (4) una relación cuadrática o cúbica entre el caudal líquido y la capacidad de erosión y transporte del flujo que se puede expresar a través de la carga de sedimentos (R_{TR}), donde el exponente m es

$$R_{TR} = f(Q^m) \quad (4)$$

superior a la unidad y depende de la composición de los sedimentos sobre los cuales actúa la corriente. Entonces, la capacidad de erosión-transporte en un cauce se incrementa al aumentar la irregularidad de los caudales. Y en la confluencia de las corrientes generalmente está acompañada de un mayor aumento en la capacidad erosión-transporte del río, que de su caudal.

4. El factor tiempo. Un río sufre transformaciones notables a lo largo del tiempo.

El tiempo se puede considerar como la *duración de una acción, como inercia o como atraso, o bien como el de una respuesta en distensión o desfase*. Como ejemplos de la primera, se puede mencionar que las ondulaciones que forman los lechos de arena se acomodan a las condiciones cambiantes en el transcurso de días y meses. Que la forma de la sección transversal de un río se transforma a lo largo de pocos años. Que las transformaciones de las mesoformas de un cauce se producen en decenas y centenares de años y el perfil longitudinal de un río cambia en miles de años. Y que el cambio de la relación entre la capacidad de transporte y el ingreso de sedimentos a un determinado tramo origina una reacción rápida en la variación de los procesos morfológicos (de las mesoformas) pero se expresa de manera mucho más lenta en la transformación del perfil longitudinal del río. Y referente a la segunda, es frecuente encontrar que el relieve en un río está determinado por la presencia de formas que aparecieron con otras condiciones hidráulicas y otro régimen hidrológico, es decir, por formas heredadas que se han conservado por inercia. En este sentido, es importante establecer la fase de desarrollo de las formas del cauce y diferenciar la activa de la pasiva. El criterio fundamental para esta división es la tendencia de desarrollo de la forma. Existe una coherencia en la evolución de la estructura del flujo y del cauce en las formas activas y una incongruencia o histéresis en las pasivas.

Se han formado criterios que caracterizan la estabilidad de los ríos ante la intervención antrópica, en el que se han definido dos tiempos diferentes:

- El *tiempo de atraso*, que es el período desde el principio de la intervención sobre el cauce hasta la aparición de los primeros signos de reacción del río.
- El *tiempo de distensión* que es el período de restablecimiento del estado original de un tramo de río después de eliminar la intervención o el tiempo de adaptación a una carga constante, el cual depende del grado de alteración, del nivel de umbral y de la estabilidad del cauce.
- El *tiempo de desfase*, ocurre en la aparición de diferentes características hidrológicas o hidráulicas del cauce.

5. Condiciones iniciales. Procesos morfológicos preexistentes. En el pronóstico de las deformaciones del cauce se debe considerar la influencia de las formas del cauce preexistentes. Al respecto, es necesario conocer los valores absolutos de los parámetros del sistema antes y después de una acción externa, pero es aún más importante establecer la dirección (vector, grado) de la variación de los factores formadores del cauce, para tener indicativos acerca de las condiciones iniciales, las cuales se puede expresar de diferentes maneras en distintas condiciones de la corriente.

Los componentes fundamentales que interactúan entre sí en los procesos morfológicos (Fig. 2) son:

a) El *transporte de sedimentos* determina su esencia y la forma de su movimiento sirve de base para tipificarlo. Aquí se considera el ingreso de sedimentos al río, su capacidad de transporte, las limitaciones al desarrollo de las deformaciones del cauce y los diferentes factores que le imprimen resistencia a la erosión, a las bancas y la formación de cauces en ellas.



Fig. 2.- Componentes fundamentales que interactúan entre sí en los procesos morfológicos. Imagen tomada del sitio: <https://www.imta.gob.mx/potamologia/images/potamologia/CV-profesores-curso/DR.%20PEDRO%20ANTONIO%20GUIDO%20ALDANA.pdf>
 Fecha actualización: 25 de octubre de 2021.

b) Las *formas (geometría) del cauce*, en su expresión general se dividen en micro, meso y macroformas. Las **microformas** están compuestas por las *dunas, rizos, antidunas y las rápidas* y se interpretan como un mecanismo que poseen los cauces aluviales para incrementar su resistencia hidráulica, razón por las que se les conoce como resistencia o rugosidad por relieve. Las **mesoformas** son el resultado de la interacción del flujo con los sedimentos de fondo y en suspensión, dando origen a siete configuraciones bien definidas, que en realidad son los mismos procesos morfológicos: *las macrodunas, las barras laterales, los meandros confinados, los meandros libres, los meandros incipientes, el trenzamiento en el cauce y el trenzamiento en las bancas*. Las **macroformas** son el conjunto de mesoformas que contiene un río en un determinado tramo.

- c) La deformación de los cauces, relacionada principalmente por la pérdida del balance transversal de los sedimentos, que poseen un carácter de periódicos, por lo cual, a largo plazo, el ingreso y la salida de sedimentos en cada uno de los tramos resultan balanceados.

Esto explica *las causas y transformaciones de los cauces naturales*, los cuales deben ser complementados de manera integral con el estudio del **sistema cuenca-río** y caracterizar la cuenca aferente debido a que en ella se producen y trasladan los sedimentos que llegan al río, así como que los fenómenos de erosión-acumulación y procesos morfológicos no se pueden considerar de manera aislada del medio geográfico sin tomar en consideración las rasgos del terreno y de la ladera de la cuenca, esto incluyendo las particularidades estructurales de las redes hidrográficas, las peculiaridades hidrográficas del sistema fluvial, la morfología de las corrientes, la evolución de las formas y los factores geomórficos que afectan la estabilidad de los ríos.

La evaluación y diseño del camino con el cruce del río, empieza con una valoración cualitativa de la **estabilidad del cauce**²⁴, que implica la aplicación de conceptos geomorfológicos para identificar problemas potenciales y soluciones alternativas. Este análisis debe estar seguido de un estudio cuantitativo de la hidrología, hidráulica y del transporte de sedimentos relacionados con las crecientes históricas, de las condiciones hidráulicas del río y los análisis básicos del transporte de sedimentos.

La estabilidad de la corriente ayuda a entender la respuesta potencial del río respecto al impacto o cambio que tiene por la construcción del puente, en donde resultan importante sus condiciones hidráulicas básicas como la velocidad, la profundidad del flujo, el ancho de la superficie libre que responden a la evolución continua de los patrones de corrientes, a la geometría del cauce, a las formas de rugosidad del lecho, con cambios en el caudal y en la carga de sedimentos.

De acuerdo con el tipo de corriente se diferencian cruces de caminos en ríos de montaña, piedemonte, de llanuras y en embalses utilizando generalmente la presa y el vertedero en este último caso. Cada uno de estos cruces tiene sus propias características, determinadas por el carácter y el régimen del flujo.

Así en la sección transversal de un río de llanura, se distinguen de acuerdo con su morfología, el cauce principal relativamente profundo y la banca (vega y sobrevega) con la llanura de inundación de rasgos menos profunda y cubierta por el agua solo durante las

²⁴ Dada por la Estabilidad general = Estabilidad vertical + Estabilidad lateral.

crecientes. Razón por lo que los terraplenes de acceso se ubican sobre la banca y su longitud generalmente es considerable, mientras que el puente ocupa solamente una parte del ancho del agua y su longitud total puede ser tan pequeña como la quinta parte del ancho del río. Lo anterior se hace por economía, al considerar que la estructura es mucho más costosa por metro lineal que los terraplenes de acceso y que las obras de regulación.

En los tramos de pie de monte la banca generalmente no existe de manera definida, el cauce presenta una configuración trezada y arrastra una gran cantidad de sedimentos gruesos, especialmente en crecientes. Inmediatamente después de las crecientes, los sedimentos se depositan desordenadamente, el cauce es muy inestable y forma un gran número de brazos de configuración variable. Entonces cuando se emplaza un puente en un río trezado e inestable, es necesario garantizar el paso de un gran número de sedimentos bajo la estructura a lo largo de una sección contraída y más estrecha que las secciones ocupadas por los sedimentos en condiciones naturales, lo cual requiere de la construcción de obras de regulación y encauzamiento de gran longitud. Los accesos al puente y las obras de regulación deben ser protegidos fuertemente para prevenir deformaciones de todo tipo, las cuales pueden aparecer y desarrollarse con gran rapidez. En este caso los costos de los accesos y de las obras de regulación son bastantes considerables, por lo que frecuentemente resulta mejor ocupar con el puente toda la zona de divagación del río, reforzando y protegiendo solo las márgenes.

Los ríos de montaña, especialmente en las zonas altas, transitan en valles angostos con altas velocidades en crecientes y transportan materiales gruesos y bloques. Por lo que el estrechamiento de un río de montaña con los accesos, en la mayoría de los casos, no es recomendable debido al alto costo de las obras de protección requeridas y a los requerimientos de mantenimiento. Frecuentemente, en estos casos, se construye solo el puente sin accesos.

Ocasionalmente se sitúan puentes sobre embalses. En este caso, la profundidad del agua está controlada por la presa y el vertedero, la velocidad del flujo es muy baja, el transporte de sedimentos es mínimo y los terraplenes de los accesos poseen una altura considerable (incluso decenas de metros). Dado que la altura y la presión de las olas es grande, se requiere de robustas protecciones en los terraplenes, haciéndolos muy costosos. Por lo que resulta conveniente construir un puente largo con accesos cortos.

En la práctica profesional, todo este proceso esta confuso, revuelto y parece que no se le diera la importancia que tiene, sobre todo porque el cauce y la corriente son un legado de transformaciones históricas gradualmente lentas.

1.3 SISTEMA HIDROLÓGICO FLUVIAL: FACTORES HIDROLÓGICOS Y SU INFLUENCIA EN LA CUENCA Y EL PUENTE

La comprensión de las características físicas de la cuenca es esencial para analizar e interpretar la correspondencia que tiene con las variaciones temporales de caudal que se dan en un río durante o después de las tormentas. Estas variaciones de caudal se conocen como ***régimen hidrológico del río*** y representan la diversificación en el espacio del proceso de lluvia del ciclo hidrológico, que en la práctica empleamos para determinar indirectamente el volumen escurrido en secciones o sitios de interés. Entonces, los ríos tienen un régimen hidrológico expreso por las características físicas de la cuenca y de las precipitaciones sobre ella.

La precipitación es el mecanismo primario e inestable de transporte de agua desde la atmósfera hasta la superficie terrestre, su cantidad puede variar tanto espacial como temporalmente. Cuando el agua de lluvia o nieve llega a la superficie, una parte penetra hasta los niveles profundos para sumarse al agua subterránea y otra parte escurre conformando el agua superficial.

El escurrimiento superficial es el movimiento del agua sobre los suelos, principalmente hacia los cursos de agua para formar las aguas superficiales y consiste en las precipitaciones que no evaporaron, ni transpiraron, ni penetraron en el suelo para convertirse en agua subterránea. El caso que nos ocupa presupone implícito las características hidrológicas de los regímenes de avenidas máximas y extraordinarias que razonablemente debe esperarse transiten hasta la ubicación del puente.

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento están estrechamente ligados a las ***características físicas de la cuenca y a las de la precipitación*** y la manera en cómo se drena esa lluvia sobre la superficie terrestre, a las ***características físicas de la red hidrográfica de drenaje***.

Pero como el ***sistema de drenaje natural*** es una consecuencia de la estructura geológica y fisiográfica de la cuenca, es común considerarlo como parte de las características fisiográficas de la cuenca.

Se nombra ***cuenca hidrológica*** a la superficie de terreno donde el agua de lluvia que no infiltra ni evapora, se recolecta, fluye y drena a través de una red de cauces que convergen en la salida a una zona de interés principal o a un depósito natural o interno. Puede extenderse desde algunos kilómetros cuadrados hasta cientos o miles, abarcando una variabilidad de tipos de suelo y de vegetación. Si el suelo es impermeable, en la carta topográfica está delimitada y separada de áreas vecinas, por una línea poligonal imaginaria

conocida como parteaguas (Fig.3), formada por los puntos de mayor elevación entre laderas adyacentes, pero de exposición opuesta de una serie de cadenas montañosas de grandes dimensiones que van perdiendo altura a medida que se acercan al nivel del mar y que encierra a todos los cauces que contribuyen a conducir el agua hasta el punto de estudio. En ocasiones es necesario dividir una cuenca de gran tamaño en subcuencas, y éstas últimas a su vez en microcuencas, las cuales están delimitadas también por sus respectivos parteaguas.



Fig. 3.- El parteaguas deslinda la cuenca.
 Imagen tomada del sitio: http://3.bp.blogspot.com/-cQksByG0Zv0/VQyFRK9zu_I/AAAAAAAAACQ/Z92oWaPbpyl/s1600/cuenca2.jpg
 Fecha de actualización: 28 de junio del 2020.

Los parámetros geomorfológicos más importantes que definen el comportamiento y la respuesta de una cuenca y su red hidrográfica de drenaje, ante la manifestación de los procesos de precipitación y escurrimiento se enuncian en la Tabla 1. Pueden ser calculados fácilmente haciendo uso de sistemas de información geográfica (SIG).

Tabla 1.- Factores que rigen la manera o forma en que el agua superficial escurre.	
De la cuenca	Del cauce
1) Localización geográfica.	18) Longitud del cauce principal.
2) Ubicación.	19) Perfil longitudinal del cauce principal.
3) Orientación.	20) Pendiente del cauce principal.
4) Tipo de suelo.	21) Red de drenaje.
5) Uso de suelo.	22) Clasificación de la red de drenaje.
6) Perímetro.	23) Tipo de corriente.
7) Área.	24) Orden de la corriente.
8) Tamaño.	25) Relación de bifurcación.
9) Coeficiente de asimetría.	26) Longitud de tributarios.
10) Longitud.	27) Densidad de corrientes.
11) Ancho.	28) Densidad de drenaje.
12) Forma.	
13) Centro de gravedad.	
14) Pendiente media.	
15) Elevación media.	
16) Curva hipsométrica.	
17) Histograma de frecuencia altimétrica.	

La probabilidad de ocurrencia de la precipitación se estima a través de métodos estadísticos mediante el análisis de frecuencia de su serie de datos, esto nos permite determinar el **intervalo de tiempo promedio de retorno o recurrencia de una tormenta**, dentro del cual, esa lluvia de determinada magnitud puede ser igualada o excedida; sin que ello implique revelar el momento en que se puede producir, ni tampoco que sea cierto ya que el hecho es que las tormentas inusualmente grandes se producen a intervalos irregulares y pueden suceder cualquier año.

Una vez definido el **período de retorno (T_r)**, el análisis de la precipitación continua bajo dos enfoques: uno es de carácter espacial y el otro de regionalización físico-climática.

El primero evalúa la precipitación media anual, mensual o diaria de una tormenta distribuida sobre el área de interés o la cuenca y a partir de los datos de precipitación máxima y cierta metodología, se construyen las curvas **intensidad-duración período de retorno ($i-d-T_r$)**.

El segundo se puede hacer con superposición de mapas de cobertura vegetal, isoyetas, evapotranspiración potencial, etc., o bien, basado en el análisis estadístico de series de tiempo de precipitaciones que sólo es posible cuando existen buenos registros históricos de las variables a medir.

A partir de los datos físicos de la cuenca, de los de precipitación y de tipo y uso de suelo, el estudio hidrológico tiene como objetivo asociar eventos hidrológicos extraordinarios, que de acuerdo con la probabilidad ocurran dentro de cierto número de años²⁵ para producir hasta el sitio del puente y para los **hietogramas²⁶ generados los hidrogramas²⁷ de salida** y con ello precisar la magnitud del **caudal pico** y el volumen total de producción de la cuenca (Fig.4).

Para determinar el hidrograma se emplean diversos métodos clásicos, así como software de modelos de simulación hidrológica como el programa **HEC-HMS**, el cual es un modelo semi-distribuido desarrollado por el Hydraulic Engineering Center (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos). Otra manera de obtenerlos es a partir de las lecturas continuas de una serie de caudales medidos y registrados en una estación limnigráfica o hidrométrica cercana o de influencia

²⁵ Ligados a períodos de retorno de interés para el diseño geométrico y estructural del puente.

²⁶ Gráfica de lámina o intensidad de lluvia en función del tiempo (hp vs t), refleja la distribución en el tiempo que tiene la lluvia.

²⁷ Gráfica continua tiempo contra gasto (t vs Q) que proporciona el volumen/unidad de tiempo producido por una lluvia de cualquier magnitud para una duración específica. Por lo que se considera la huella digital de la cuenca al capturar la relación lluvia-escurrimiento, combinando entonces las condiciones meteorológicas, fisiográficas y de uso de suelo. Puede ser el resultado de un proceso de aforo en un río.

representativa al lugar donde se emplazará el puente y con un período considerable de años de registro como para efectuar el análisis de las avenidas extremas asociadas a diferentes períodos de retorno.

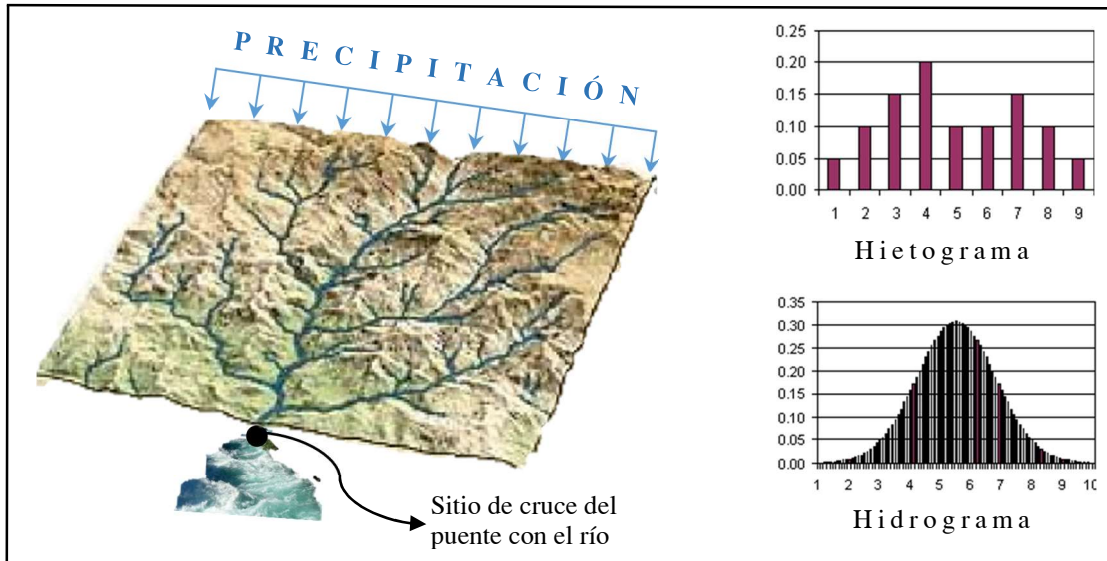


Fig. 4.- Respuesta de la cuenca ante la simulación de una tormenta.

En estas condiciones, el caudal pico es la *avenida en el río o gasto máximo extraordinario* que transitara hasta el lugar donde se colocara el puente y que es considerado para su localización, dimensionamiento y simulaciones hidrodinámicas como parte del diseño hidráulico del mismo. Y su tiempo de descarga es el tiempo de drenado. Las avenidas se calculan tanto para la época de abundancia, vinculada a la estabilidad fluvial y seguridad de la estructura, así como para la época de estiaje con fines constructivos.

Referente al puente, el lapso crítico (**período de retorno, T_r**) durante el cual se pone a prueba la resistencia y la estabilidad de todos sus elementos en el cauce, contra la acción del flujo, considera los requerimientos según la categoría de la vía (mientras mayor sea esta, más largo será el tiempo de servicio continuo del puente), así como las particularidades del río y corresponde al tiempo para el paso de crecientes definidas con cualquiera de los dos criterios siguientes:

- A. *Al disminuir el porcentaje de la probabilidad de excedencia de la creciente de diseño $[P_{exc}(Q) \ %]$ aumenta su período de retorno $[T_r, \text{años}]$ (ecuación 5, informativa), y consecuentemente aumenta el costo de construcción del puente $[C, \ \$]$ pero disminuyen su porcentaje de probabilidad de falla $[P(F) \ %]$ y los costos de mantenimiento $[M, \ \$]$ son menores (ecuación 6, informativa).*

$$[P_{exc}(Q) \%] < [T_r, \text{años}] \quad (5)$$

$$[C, \$] > [P(F) \%] \text{ y } [M, \$] \quad (6)$$

B. *Al aumentar el porcentaje de la probabilidad de excedencia de la creciente de diseño $[P_{exc}(Q) \%]$ disminuye su período de retorno $[T_r, \text{años}]$ (ecuación 7, informativa), y consecuentemente disminuye el costo de construcción del puente $[C, \$]$, pero aumenta sus probabilidades de falla $[P(F) \%]$ y los costos de mantenimiento $[M, \$]$ son mayores. (ecuación 8, informativa).*

$$[P_{exc}(Q) \%] > [T_r] \quad (7)$$

$$[C, \$] < [P(F) \%] \text{ y } [M, \$] \quad (8)$$

Razón por la que es de especial importancia una selección correcta del período de retorno de la creciente de diseño. Para lograrlo, lo ideal es disponer de un registro histórico de crecientes o de lluvias que las provocan, lo más extenso posible. Además de lo anterior, resultan valiosos los datos sobre caudales máximos observados en puentes existentes ya que a nivel mundial más del 90% de las grandes crecidas con resultados catastróficos se han asociado a períodos de retorno cercanos a los 100 años, lo cual indica que la creciente de diseño de un puente debe tener un período de retorno de 100 años o más. En puentes ferroviarios se deben utilizar crecientes con períodos de recurrencia más altos que en el caso de puentes vehiculares, debido a que en los primeros cualquier daño o interrupción en el paso es más crítico que en los segundos.

Respecto a los puentes construidos en la ciudad, generalmente los ríos se encuentran canalizados y muchas veces regulados, por lo cual no existe mayor problema con las crecientes y en ese caso todo el espejo de agua o ancho de superficie libre se cubre con el puente.

En México, al igual que en muchos países el criterio que rige es el B.

Además con fecha 19 de septiembre de 2018, la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) a través de su Subdirección General Técnica y en reunión de trabajo con los equipos técnicos de la Subsecretaría de Infraestructura dependiente de la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) acordó homogeneizar los criterios de diseño y normatividad de ambas Dependencias relativas al Diseño de Puentes principalmente en lo que se refiere a los períodos de retorno empleados por ambas para el diseño de estructuras viales que crucen cauces o zonas federales acordes al tipo de corriente, de vialidad y localización geográfica, las cuales se transcriben en la Tabla 2.

Resulta importante mencionar que los fenómenos atmosféricos extremos de larga

TABLA 2.- PERÍODOS DE RETORNO PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS VIALES QUE CRUZAN CAUCES O ZONAS FEDERALES.			
Alcantarillas para el paso de corrientes no visualizadas en el simulador de flujos de aguas de cuencas hidrográficas (SIATL).			
Estructura	Tipo de vialidad	Localización geográfica	Período de retorno T_r (años)
En caminos locales que comunican poblados de menos de 100 000 habitantes	Carretera Estatal o municipal	1	10
		2	25
En caminos regionales que comunican poblados de más de 100 000 habitantes y hasta 500 000 habitantes	Jurisdicción Federal ET, C, D	1	25
		2	50
En caminos primarios que comunican poblados de más de 500 000 habitantes	Jurisdicción Federal ET, A, B	1	50
		2	100
Puentes Carreteros para el paso de corrientes visualizadas en el simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL).			
Estructura	Tipo de vialidad	Localización geográfica	Período de retorno T_r (años)
En caminos locales que comunican poblados de menos de 100 000 habitantes	Carretera Estatal o municipal	1	25
		2	50
En caminos regionales que comunican poblados de más de 100 000 habitantes y hasta 500 000 habitantes	Jurisdicción Federal ET, C, D	1	50
		2	100
En caminos primarios que comunican poblados de más de 500 000 habitantes	Jurisdicción Federal ET, A, B	1	500
		2	1000
Cualquier tipo de camino localizado en una llanura de inundación en altiplanos o depresiones		1	100
		2	500
Cualquier tipo de camino localizado en una llanura de inundación costera		1	500
		2	1000
<p>Nomenclatura (clasificación conforme a la normativa SCT y que son de jurisdicción Federal):</p> <p>ET Ejes de transporte. Cuyas características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso.</p> <p>A Carreteras tipo A. Tránsito promedio diario anual de 1,500 a 3,000 vehículos, equivalente a un tránsito horario máximo anual de 180 a 360 vehículos. Se permite la operación de todos los vehículos, excepto aquellos que por sus dimensiones y peso solo se permitan en la carreteras tipo ET.</p> <p>B Carreteras tipo B, red primaria. Tránsito promedio diario anual de 500 a 1,500, equivalente a un tránsito horario máximo anual de 60 a 180 vehículos.</p> <p>C Carreteras tipo C, red secundaria. Tránsito promedio diario anual de 1,500 a 3,000 equivalente a un tránsito horario máximo anual de 180 a 360 vehículos.</p> <p>D Carreteras tipo D, red alimentadora. Tránsito promedio diario anual de 500 a 1,500 equivalente a un tránsito horario máximo anual de 60 a 180 vehículos.</p> <p>1 Zona de altiplano o zona deshabitada.</p> <p>2 Zona costera o zona habitada.</p>			

duración provocados por el cambio climático están vinculados a perturbaciones en la circulación atmosférica que abarca áreas bastante más extensas que la región particularmente afectada y que actualmente no se toman en cuenta en los procesos hidrológicos involucrados en el diseño hidráulico del puente.

1.4 ALTERACIÓN DEL CAUCE Y LA CORRIENTE EN LA ZONA DE CRUCE CON EL PUENTE

En un medio físico y en condiciones de funcionalidad normal, las fuerzas involucradas en **formar y mantener al cauce** están relacionadas con la corriente del fluido, debido a que éste al abrirse paso ejerce una fuerza erosiva mayor que la que mantiene unida a las partículas que forman el lecho y las orillas, lo que causa que se desprendan y sean arrastradas por la corriente, mediante deslizamiento (empuje), rodamiento y rebote (saltación) como una porción de escombros que se conoce como **carga de fondo** que solo está en movimiento de manera intermitente. Esta misma fuerza erosiva crea turbulencia y remolinos que arrastran algunas partículas de material y las arrojan a la masa principal del agua, donde la corriente las transporta como **carga en suspensión o disuelta** la cual está en constante movimiento.

Por lo que la corriente posee una **aptitud** para transportar partículas sólidas en dos facetas, una en cuanto a la carga máxima, denominada **capacidad** y otra en cuanto a el tamaño de grano máximo, conocida como **competencia**. Fig. 5.

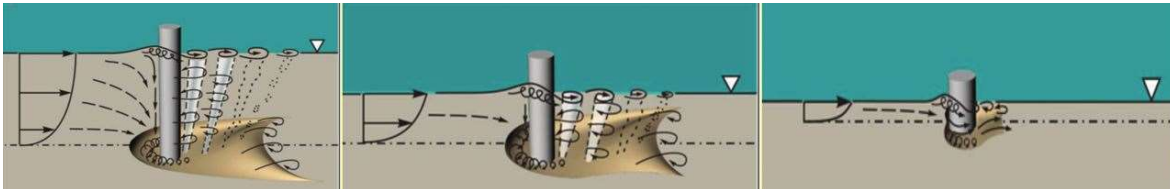


Fig. 5.- Se ilustra implícitamente las variables que intervienen en la aptitud de la corriente.
Imágenes tomadas de la Referencia Arneson pág. 3.11 (HEC-18).

Por un lado, la capacidad de la corriente para arrastrar el sedimento es mayor, cuanto mayor es el caudal. Y, por otro lado, cuanto más fuerte es la velocidad de la corriente, más grandes son los granos que puede transportar en suspensión y como carga de fondo. La regla general es: “*la competencia de una corriente aumenta en un valor igual al cuadrado de su velocidad y está restringida por la velocidad de sedimentación de cada grano*”.

Entonces, la dinámica natural de una corriente que se desplaza en su cauce tiene una cierta capacidad y competencia que a largo plazo transforman una sección transversal cualquiera del mismo. Físicamente es un fenómeno de proceso natural que se aprecia como una irregular disminución generalizada del perímetro hidráulico del cauce a todo lo largo del río, en el que siempre y constantemente hay aporte de material de arrastre sólido, por tal condición se considera a la *cuenca como productora de sedimentos* y al *río como conductor* de estos.

Particularmente, esta erosión del material en el fondo del cauce tiene un límite máximo del que no puede profundizar más, que es el nivel al cual la corriente desemboca, mientras lo que consigue es alcanzar un nivel de base local o temporal hasta alcanzar las capas de roca resistentes. Este hecho en la práctica de la Ingeniería Civil marcado por la pérdida del material del fondo del cauce técnicamente se conoce como **socavación general o normal en el lecho del cauce originada por la corriente** y que, dado nuestro tiempo no geológico de vida, representa para propósitos transitorios una estabilidad del cauce.

Todo el contexto arriba descrito es recurrente durante la temporada de lluvias, con dos singularidades durante el paso de avenidas extraordinarias:

- En la primera, con el caudal incrementado en una buena proporción, el nivel del agua es significativamente mayor y por lo tanto el área hidráulica del cauce de los ríos es insuficiente para contenerlo y crece hasta desbordar sus márgenes en forma de inundación, dando así balance al drenado del agua y ocupando zonas aledañas conocidas como llanuras de inundación o aluviales, en las que el movimiento de volumen sólido está constituido principalmente por flujo de lodos y material grueso.
- En la segunda, el acrecentamiento de caudal en una buena proporción se traduce en una mayor capacidad, en ascenso de la velocidad en la corriente que produce una mayor competencia, por lo tanto, la erosión y el transporte de sedimentos son más intensos. Sin embargo, la erosión de fondo como consecuencia de la capacidad de arrastre que el río adquiere en la creciente debido al incremento en la velocidad del flujo, finalmente es una cuestión de perturbación en el equilibrio entre el aporte sólido que pueda traer el agua a una cierta sección transversal del cauce y el material removido por ella en esa sección, pero en general se rellena cuando la corriente vuelve a su estado normal, no quedando huella aparente del fenómeno y alcanzando así su natural equilibrio con el nivel dinámico local o temporal logrado durante cientos o miles de años.

La socavación general consiste en una disminución extendida del nivel del fondo del cauce. En **estrechamientos** naturales del cauce, está influida por el incremento en la capacidad de arrastre de sólidos que adquiere la corriente cuando su velocidad aumenta por efecto de la reducción transversal del área hidráulica, la cual es compensada por un engrandecimiento en la profundidad hasta el punto en el cual se alcanza la capacidad necesaria en la sección.

En **trayectos curvos** del cauce la socavación se genera en el fondo cercano al lado cóncavo de la curva o talud exterior, debido al flujo helicoidal que se forma cuando el río

cambia de dirección y como consecuencia de la acción de la fuerza centrífuga sobre el nivel del agua, lo que físicamente se traduce en un incremento de la profundidad²⁸ al sobre elevar la superficie del agua y de la rapidez de las partículas del flujo, induciendo esto una de erosión y arrastre de sólidos mayor respecto a la parte del cauce interior a la curva. Mientras que en el intradós de la curva disminuye el tirante y la velocidad de las partículas, aumentando el depósito de material sólido, en esa zona.

La erosión que produce el paso del agua sobre los materiales térreos deleznales o solubles que forman las orillas del cauce, es causa de **divagación** de la corriente que ocasiona inestabilidad en los taludes de la propia margen.

Ahora bien, en un sitio particular de la corriente en donde existe una estructura hidráulica como un puente con terraplenes, pilas o estribos dentro del cauce, el tránsito de las crecientes sobre ellas modifica localmente las condiciones de escurrimiento, cambiando en consecuencia la capacidad de arrastre en la zona vecina a la obstrucción que representan estos elementos.

Cuando esta capacidad es mayor que la proporción con que la corriente alimenta a la sección del sitio con material sólido se producirá en esa zona una erosión adicional a la normal de la corriente denominada **socavación local**, en caso contrario ocurrirá un **depósito** (acumulación del material).

Entonces, la socavación total en ese tramo de la corriente y alrededor de los elementos del puente, es la suma de dos componentes, la general y la local, que se conoce como **socavación total**.

En este momento resulta claro que para el **diseño de la cimentación** de un puente, es determinante conocer la magnitud en la profundidad que puede alcanzar la socavación total, ya que en esa condición la profundidad de desplante de los apoyos quedada por arriba del nivel alcanzado por el efecto de esta erosión, provocando **asentamientos en la cimentaciones superficiales o poco profundas e inestabilidad por pérdida de empotramiento en el caso de las cimentaciones profundas al reformarse el suelo de la zona de desplante de los apoyos**. Ambas situaciones producen la falla de la estructura y la segunda el colapso. En caso contrario, se adoptarían profundidades antieconómicas y excesivas, que complican seriamente los procedimientos de construcción.

La socavación general es un fenómeno complejo cuyas bases no están bien definidas y depende de factores como la configuración geológica y topográfica del cauce, las

²⁸ Y consecuentemente del área hidráulica y del gasto.

características del material de arrastre, así como de las características hidrológicas e hidráulicas de la corriente. Su **cálculo** se basa en análisis cualitativo y en la aplicación de conceptos de mecánica de ríos²⁹ y trata de estimar la sección de máxima erosión correspondiente a una condición hidrológica conocida, de tal forma que al desplantar el puente éste no afecte al cauce ni sea afectado seriamente por él. Se consigue desde tres enfoques (Barbosa 2013), a partir de metodologías netamente empíricas como la teoría del régimen³⁰ entre las que destacan la de Lacey (1930) y Blench (1939), formulaciones semi-empíricas basadas en una condición de equilibrio entre la velocidad de flujo y la velocidad crítica para el material que conforma el lecho, entre estas se enfatizan las de Lischtvan & Lebediev (1959), Laursen (1963), Maza Álvarez (1973) y Neill (1980), o mediante modelos hidrodinámicos unidimensionales como HEC-RAS capaz de modelar cambios en el lecho, a partir de ecuaciones de transporte de sedimentos³¹, como la de Meyer-Peter & Muller (1948), Ackers & White (1973), Parker (1990) y Wilcock & Crowe (2003).

La razón de que la mayoría de los estudios hidráulicos de puentes se realizan suponiendo que el fondo permanece constante (lecho fijo)³² durante el evento, situación que pudiese ser lógica si se tienen ríos estables, se fundamenta en que una corriente se considera en equilibrio si tiene la pendiente correcta y otras características de cauce para mantener precisamente la velocidad necesaria para transportar el material que se le suministra, dado que un sistema en equilibrio no erosiona ni deposita el material, simplemente lo transporta. Y una vez que la corriente ha alcanzado este estado de equilibrio, se convierte en un sistema autorregulador en el cual un cambio de una característica produce un ajuste de las otras para contrarrestar el efecto.

En tal caso el método recomendado es el criterio de **Lischtvan & Lebediev**, aplicable tanto para suelos con distribución homogénea o heterogénea, el cual se basa en determinar la condición de equilibrio entre la velocidad media de la corriente y la velocidad media del flujo necesaria para erosionar el material que forma el cauce de diámetro y densidad conocidos, es decir, la posición de la máxima erosión se hace coincidir con la de

²⁹ En el estudio de los ríos no se ha identificado una ley general que explique físicamente los diferentes fenómenos mecánicos basados en el efecto de la fuerza tractiva sobre la carga de fondo.

³⁰ Cuando la sección y pendiente de un canal están en equilibrio para el caudal líquido y sólido transportado, de tal manera que aumentos o disminuciones de él, hacen que el ancho y la profundidad se modifiquen (Maza Flores & García Flores, 1996).

³¹ Balance de masa entre el sedimento transportado y la capacidad de transporte de una corriente.

³² Considerado cuando no hay transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba al sitio y por lo tanto no hay recarga del hueco socavado. En este caso, la socavación alcanza equilibrio cuando el esfuerzo cortante del agua en el lecho es menor que el requerido para el inicio del movimiento de las partículas, o sea cuando el flujo no puede remover más partículas del hueco formado.

equilibrio como si el transporte del sólido procedente de aguas arriba fuera nulo (agua clara). En esas circunstancias, el aumento de la sección debido al proceso erosivo y la consiguiente reducción de velocidad y de esfuerzos tangenciales han alcanzado un estado tal, que el agua es incapaz de mover las partículas del fondo y se detiene la socavación.

Sin embargo, en ríos de régimen mixto (altamente dinámicos), se evidencian no solo cambios en la superficie del agua sino también en el fondo del cauce, lo que hace necesario considerar el lecho móvil³³ para lograr un contexto amplio y real, mediante el empleo del software HEC-RAS.

Para calcular la profundidad afectada por la socavación local hay un sin número de expresiones con incertidumbre para representar la mejor condición real del río y del puente, sin embargo, los estudios de corrientes reales y de experimentos en modelos de laboratorio han arrojado resultados prácticos satisfactorios y señalan los parámetros que influyen en mayor o menor grado, los cuales se listan en la Tabla 3.

TABLA 3.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SOCAVACIÓN AL PIE DE LOS APOYOS DE UN PUENTE.	
PÁRAMETRO	VARIABLE
DEL PUENTE	Geometría de la Pila: <ul style="list-style-type: none"> • Ancho. • Relación largo-ancho. • Sección transversal.
DEL CAUCE	Morfología. <ul style="list-style-type: none"> • Contracción en la sección. • Radio de curvatura del tramo del río. • Obras de control de gasto construidas aguas arriba o aguas abajo. Material de fondo: <ul style="list-style-type: none"> • Diámetro de partículas. • Curva granulométrica. • Forma de los granos. • Grado de cohesión o cementación. • Peso específico sumergido. • Estratificación del subsuelo. • Tiempo requerido para remover material y alcanzar una condición estable.
HIDROLÓGICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Gasto de diseño. • Duración del pico de la avenida.
HIDRÁULICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad media de la corriente. • Tirante de la corriente. • Distribución de la velocidad del flujo. • Dirección de la corriente respecto al eje de la pila.

³³ Cuando hay transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba hasta el sitio y por lo tanto parte de este sedimento queda atrapado en el hueco de socavación. En este caso, la socavación alcanza equilibrio cuando la cantidad de material que es transportado iguala la cantidad de material que es removido. Se le conoce también como socavación en lecho vivo.

La socavación debe evaluarse considerando el estrechamiento del cauce provocado por los elementos del puente y si el número de Froude del flujo en la sección del cauce bajo el puente resulta mayor a la unidad, o en su defecto se sugiere aumentar el claro del puente para disminuir el estrechamiento causado, se debe recalcular hasta obtener un flujo subcrítico.

Se determina enseguida el perfil definitivo de socavación considerando la acción conjunta de todas las socavaciones que se producen (socavación total), para que con ello se defina la profundidad de desplante de las cimentaciones. Este cálculo hidráulico debe estar acompañado de un análisis de estabilidad lateral y vertical del cauce y un estudio sedimentológico general. Y esta caracterizado cuantitativamente por el coeficiente de socavación medio (δ_{sc}) definido como la relación entre el área en m^2 de la sección transversal del cauce A_p bajo el puente después de la socavación y el área en m^2 A_0 antes de la socavación, con el caudal de diseño, o bien mediante la relación de sus profundidades en m, de acuerdo con la ecuación 9:

$$\delta_{sc} = \frac{A_p}{A_0} = \frac{y_p}{y_0} \text{ [adimensional]} \quad (9)$$

En el diseño el aumento del coeficiente de socavación significa una disminución del claro del puente y también de los costos de las pilas y vigas, pero la profundidad de las cimentaciones aumenta, así como el de los accesos o aproches debido a su mayor longitud al disminuir el claro del puente y también por el incremento de la altura de los terraplenes, relacionado con la elevación del remanso. Esto condiciona también, en caso de requerirse, el costo de los muros direccionales en función de su longitud y sus protecciones. En este sentido, es importante tener en cuenta que no siempre resulta óptimo el puente de menor claro con socavaciones considerables.

Es importante señalar, que el coeficiente de socavación medio es un criterio de selección del claro del puente, si no existen otras consideraciones que influyan en esta selección. Y que la socavación concentrada en cualquier sitio de la sección disminuye la estabilidad de las estructuras del puente.

Lo anterior se resalta en las fotografías, Fig.6 y 7, donde se distingue el aspecto físico de la socavación general en la sección transversal del Río Tula bajo el puente, Río Rosas. Ubicado en el Km 72+500 de la autopista Libramiento Norte de la Ciudad de México (Arco Norte). Se tomaron en dos períodos diferentes y aunque se logra apreciar los esfuerzos realizados para detenerla con obras de protección en las pilas, esta continúa activa a consecuencia del cambio en el ángulo de ataque de la corriente sobre las pilas.



Fig. 6. - Izquierda. Fotografía tomada el 16 de junio de 2021 en la que claramente se distinguen los micropilotes de la cimentación del caballete 5, como consecuencia de la fuerte socavación activa y general del cauce sin lograrse distinguir depósito de sedimento de material de transporte. **Izquierda.** Fotografía tomada el 08 de agosto de 2021 en la que se observa el nivel que alcanza el agua del río bajo el caballete 5. Haciendo un comparativo de las fotografías, se señala que la socavación general continua activa, por dos razones: 1) No se nota por las características de la corriente material de transporte. 2) En zona cercana a la estructura aguas arriba existe una reducción natural del área hidráulica que favorece el cambio en el ángulo de ataque de la corriente sobre las pilas y el incremento de la velocidad con el que las partículas de agua impactan el fondo del cauce, lo que explica el intenso lavado del material bajo la cimentación de los caballetes 3 a 6. *Fotografías archivo del autor.*



Fig. 7. - Izquierda. Fotografía tomada el 16 de junio de 2021, en la que se distingue la fuerte socavación general del cauce que abarca desde el caballete 3 hasta el 6. Incluso se nota el lavado de material en derredor de la protección de enrocamiento del caballete 4 que se observa al frente de la imagen. **Derecha.** Acercamiento a la cimentación protegida con gaviones del caballete 3, para resaltar el lavado del material en derredor de ella. Esta situación se observó similar en las fechas del 16 de junio y 08 de agosto de 2021. *Fotografías archivo del autor.*

1.5 DAÑOS EN EL PUENTE POR EL CRUCE CON EL CAUCE Y LA CORRIENTE

Estrechamente ligados a problemas de erosión, flujo de lodos y material grueso arrastrado por avenidas extraordinarias, que esencialmente afectan la cimentación y los taludes del puente, por lo que a menudo son factores responsables de las fallas y/o colapso de éstos. En menor proporción se ha observado la flotación y arrastre de la superestructura.

Entre los factores que propician un comportamiento hidráulico inadecuado del puente podemos mencionar los siguientes:

- a. El grado de estrechamiento³⁴ que provoca la estructura al cauce, definido como la relación entre el ancho de la superficie libre con el gasto medio y el claro del puente. Si el grado de estrechamiento o contracción es considerable, se causa un remanso muy alto y desbordamientos más frecuentes que los naturales, se aumenta la velocidad bajo el puente y se incrementa la socavación.
- b. La contracción³⁵ del flujo que provoca en sí la forma de las pilas y estribos. Una forma suave y redondeada en la nariz de las pilas y en el extremo aguas arriba de los estribos la reducen e incrementan la capacidad hidráulica del puente pasando mayores caudales con el mismo nivel. Determinada por la relación entre el claro y su longitud. Si la relación está entre 0.15 y uno, la capacidad hidráulica se reduce hasta en un 15%.
- c. La excentricidad del claro respecto de las márgenes del cauce contribuye para propiciar o evitar chorros concentrados y comportamientos asimétricos del flujo.
- d. El ángulo de ataque del flujo sobre las pilas y estribos influye considerablemente en la magnitud de la socavación.
- e. El esviaje del puente condiciona una situación similar al cambio de dirección del flujo en el río.
- f. El material de las pilas modifica la rugosidad del cauce y consecuentemente influye alterando la capacidad hidráulica.
- g. Una altura de pila escasa, favorecer el arrastre y/o la flotación de los elementos de la superestructura.
- h. Mala ubicación, en aquellos emplazados en zona de curva natural del cauce.
- i. Desplante de la estructura, en corrientes divagantes.

³⁴ Obstrucción del área hidráulica.

³⁵ Insuficiencia hidráulica.

- j. El arrastre de cuerpos flotantes y depósito de sedimento abundante, ambos de gran tamaño.
- k. Accesos al puente con desarrollo en relleno y el talud externo hasta el curso de agua.
- l. Si la capacidad hidráulica del cauce restringido por el puente es inferior al caudal de diseño, el puente resulta sub diseñado y si la relación es contraria, la estructura puede resultar sobre diseñada o dimensionada con un elevado factor de seguridad.
- m. Si la capacidad hidráulica del cauce restringido por el claro del puente es superior a la capacidad del cauce principal, éste permanece intacto.
- n. Si la capacidad del cauce principal es inferior al caudal de diseño, se producen desbordamientos e inundaciones, aún sin la presencia del puente.

Los puentes fallan por las sobrecargas totales que genera el transporte de sedimentos y colapsan cuando la profundidad de desplante de las pilas ha quedado por arriba del nivel alcanzado por la socavación total, es decir, la socavación excede la profundidad de la cimentación ocasionando pérdida de empotramiento del apoyo, lo que causa el volteo.

De acuerdo con lo mencionado arriba, se ilustran de manera representativa de la Fig. 8 a la 21, algunos daños encontrados en los puentes de nuestro país.



Fig. 8.- Puente Río Márquez ubicado en el km. 171+300 de la autopista Nueva Italia – Lázaro Cárdenas, Mich., Méx. **Derecha.** Panorámica de la estructura tomada desde el hombro derecho. **Central e Izquierda.** Acercamiento a la cimentación de la pila 2, la cual se observa expuesta por socavación local. *Archivo del autor junio del 2009.*



Fig. 9.- Puente Arroyo Puerco ubicado en el km. 190+935 de la autopista Gutiérrez Zamora – Tihuatlán, Ver., Méx. **Derecha.** Panorámica de la estructura tomada desde el hombro derecho. **Central e Izquierda.** Acercamiento a la cimentación del caballete 7 para observarla expuesta por socavación local. *Archivo del autor junio del 2009.*



Fig. 10.- Puente Arroyo Talaxco ubicado en el km. 192+212 de la autopista Gutiérrez Zamora – Tihuatlán, Ver., Méx. **Derecha.** Panorámica de la estructura tomada desde el hombro derecho. **Central.** Aspecto del Caballete 2. **Izquierda.** Acercamiento a la cimentación del caballete 2 para resaltar la socavación total del cauce. Se notan las columnas desfasadas. *Archivo del autor junio del 2009.*



Fig. 11.- Puente Cazonces III ubicado en el km. 206+750 de la autopista Gutiérrez Zamora – Tihuatlán, Ver., Méx. **Derecha.** Panorámica de la estructura tomada desde el hombro derecho. **Central.** Aspecto de la socavación activa y general del cauce. A partir del caballete 3 se distingue ausencia de material sedimentario que sostenga el equilibrio dinámico en el cauce, por lo que la magnitud de la socavación es alta. **Izquierda.** Acercamiento a la cimentación de uno de los caballetes para hacer notar la deformación del fondo del cauce. *Archivo del autor junio del 2009.*



Fig. 12.- Puente El Descanso Cuerpo B ubicado en el km. 56+175 de la autopista Tijuana – Ensenada, Baja California, Méx. **Derecha.** Panorámica de la estructura tomada desde el hombro derecho. **Central.** Aspecto de la socavación activa y total del cauce. **Izquierda.** Se distingue la socavación total en los apoyos de ambos cuerpos del puente. *Archivo del autor noviembre del 2015.*



Fig. 13.- Puente Sin Nombre ubicado en el km. 194+500 del Libramiento de Magdalena de Kino, Son., Méx. **Derecha.** Panorámica de la estructura tomada desde el hombro derecho. **Central.** Aspecto de la losa de fondo por el hombro izquierdo de la estructura. **Izquierda.** Socavación general bajo la losa de fondo. *Archivo del autor julio del 2015.*



Fig. 14.- Antiguo Puente El Polulu ubicado en el km. 11+170 de la autopista Las Choapas – Raudales – Ocozacoautla, Ver., Méx. **Derecha.** Panorámica de la estructura tomada desde el hombro derecho. **Central.** Desplome de la pila 2 como consecuencia de la socavación total del tramo 1-2. **Izquierda.** Socavación total del tramo 1-2 que ha provocado el asentamiento del estribo 1 y la fractura de su alero izquierdo. *Archivo del autor mayo del 2012.*



Fig. 15.- Puente Jalapilla Cuerpo A ubicado en el km. 272+800 de la autopista Córdoba – Veracruz, Ver., Méx. **Derecha.** Vista frontal del alero derecho de estribo 1, en la que se observa en la cimentación de este, socavación local. **Central.** Protección del fondo y las márgenes del cauce para mitigar la socavación general. **Izquierda.** La sección transversal del cauce bajo el puente no cuenta con protección alguna para impedir que la socavación progrese. *Archivo del autor mayo del 2014.*



Fig. 16.- Camino a San Juan Bautista Atlatlahuca ubicado en la Sierra de Oax., Méx. que continúa con un Puente sobre el Río Chiquito. **Derecha.** Vista tomada desde el hombro izquierdo de la estructura y hacia aguas abajo del cauce. En la que se puede observar el tamaño del sedimento que transporta la corriente en condiciones de crecientes. **Central.** Con el paso de una avenida atípica el puente quedo completamente azolvado. **Izquierda.** Camino totalmente interrumpido por la pérdida del acceso de salida del puente. *Archivo del autor diciembre del 2012.*



Fig. 17.- Puente Ducto PEMEX ubicado en el km. 205+676 de la autopista Gutiérrez Zamora – Tihuatlán, Ver., Méx. **Derecha.** Panorámica de la estructura tomada por el hombro izquierdo. **Central.** Acercamiento al centro de la estructura para destacar que se encuentra casi por completo azolvada. **Izquierda.** Vista interior de la estructura tomada desde el hombro derecho, en la que se nota el escaso galibo vertical como consecuencia de la agradación del lecho. *Archivo del autor junio del 2009.*



Fig. 18.- Puente sobre el Río Las Vueltas ubicado en la Sierra de Oax., Méx. que comunica con el poblado de la Unión y San Juan Bautista Atlatlahuca. **Derecha.** Vista tomada desde el hombro derecho de la estructura y hacia aguas arriba del río. En la que se puede observar un cauce divagante muy ancho y que las avenidas provocan una elevada capacidad y competencia de gran diámetro que incluso ha invadido la superestructura y golpeado su parte baja (claros insuficientes y galibo vertical escaso para dar paso al sedimento). **Central.** Panorámica derecha de la estructura tomada desde aguas arriba del cauce. En la que se aprecia la Pila 4 asentada por efecto de la socavación y desplomada hacia el hombro derecho. Los terraplenes de los accesos se construyeron sobre el cauce y obstruyen fuertemente el área hidráulica de este. **Izquierda.** Se distingue el puente aguas abajo de la confluencia del Río Limón. *Archivo del autor enero del 2013.*



Fig. 19.- Puente sobre el Río Limón ubicado en la Sierra de Oax., Méx. que comunica el poblado de la Unión y San Juan Bautista Atlatlahuca. **Derecha.** Panorámica derecha de la estructura tomada desde aguas arriba del cauce. Su longitud es insuficiente y el galibo vertical escaso. Su emplazamiento provoca una contracción importante, de alta capacidad que incluye cuerpos flotantes y competencia de gran diámetro. **Central.** Vista tomada desde el hombro derecho de la estructura y hacia aguas arriba del cauce. Se aprecia un lecho muy ancho, la corriente divagante y trenzada. **Izquierda.** Otra vista del cauce en un tramo del río y hacia aguas arriba que permite justificar el empleo de obras hidráulicas adicionales que permitan encauzar y dirigir la corriente para cerrar brazos y concentrar el flujo y así generar una morfología estable. *Archivo del autor enero del 2013.*



Fig. 20.- Puente Sin Nombre ubicado en el km. 7+519 de la autopista Las Choapas – Raudales – Ocozacoautla, Ver., Méx. Las fotografías **derecha, central e izquierda** muestran distintos ángulos del colapso de la estructura por socavación. Nótese la superestructura flexionada, los estribos y su cimentación desplomados hacia el interior, la losa de fondo destruida y el apuntalamiento para contener los muros de la subestructura, flexionado y fallado. *Archivo del autor junio del 2009.*



Fig. 21.- Puente Río Presidio ubicado en el km. 242+880 de la autopista Libramiento Mazatlán, Sin., Méx. **Derecha.** Panorámica de la estructura tomada por el hombro izquierdo, se distingue la socavación general del cauce bajo los caballetes 13 al 15. **Central.** Acercamiento al caballete 13 para resaltar la magnitud de la socavación. **Izquierda.** Vista lateral izquierda del caballete 14 en la que se nota su cimentación descubierta como consecuencia de la deformación vertical del lecho. *Archivo del autor junio del 2021.*

1.6 SISTEMA HIDRÁULICO FLUVIAL: ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA INTERFERENCIA DEL PUENTE EN EL CAUCE Y LA RESPUESTA DE LA CORRIENTE

El sistema hidráulico fluvial precisa el régimen hídrico, el grado de estabilidad del cauce y el régimen sedimentológico, en el sitio de cruce del puente con el río. Por lo que resulta importante para la *concepción y seguridad (estabilidad) del puente* determinar los factores hidráulicos que caracterizan el flujo de la corriente en las condiciones del cauce y para el río también, pues no debe favorecer un comportamiento y respuesta indeseables de la corriente que vulnere los fines que se persiguen con en el funcionamiento y operación de la estructura.

Para definir los factores hidráulicos del emplazamiento del puente, esencialmente debe partirse de que se encuentra ubicado en una sección transversal del cauce con estabilidad fluvial, lo que en la práctica significa que el río no modifique su cauce con efectos adversos al puente. Y del conocimiento del régimen hidrológico, factor preponderante en las acciones de la corriente. Además de conocer el uso de la tierra en la llanura de inundación.

Para los eventos de procesos hidrológicos, la evaluación de las condiciones hidráulicas, como la velocidad, la profundidad de flujo y el ancho de la superficie libre, fundamentalmente se establecen con la filosofía del flujo uniforme en la que se asume flujo unidimensional con la ecuación de Manning.

Para asegurarnos con el cálculo hidráulico que el caudal de diseño pasa bajo el puente, primero se propone de los apoyos sobre el cauce: su número, su ubicación, sus características geométricas y la separación entre estos (ancho libre).

Luego para tomar en cuenta los fenómenos locales (remanso o carga sobre el puente) se requieren las secciones transversales del río tanto aguas abajo como aguas arriba del puente, con una longitud representativa transversal y longitudinalmente. Deben incluirse las secciones donde el puente se emplaza por sus dos caras, así como el valor del coeficiente de pérdida localizada (λ) por la contracción y expansión que causa el puente, que normalmente suelen ser mayores que los de estrechamiento y ensanchamiento de un cauce, 0.1 y 0.3, respectivamente, pues pueden valer 0.3 y 0.5 en términos medios. A este respecto, se menciona que al restar anchura moderadamente al claro, no necesariamente se resta capacidad de desagüe al puente. En régimen lento el agua se acelera para pasar por el claro (más estrecho), presentándose primero una depresión de la superficie libre, cuando se estrecha la vena y luego su recuperación cuando se ensancha esta, hasta el nivel determinado por las condiciones de contorno aguas abajo.

Como en otros problemas del flujo, la contracción de las líneas de corriente en el estrechamiento ocupa menos longitud (del orden de L , longitud del terraplén) que la expansión de las líneas en el ensanchamiento (del orden de $4L$). Entre esos extremos se puede hablar de un fenómeno local, donde por cierto la sección más contraída corresponde a la lámina más deprimida. El efecto global es una sobreelevación del nivel antes del puente ΔH (llamada también remanso producido por la estructura) con respecto al nivel aguas abajo, que afecta una cierta longitud aguas arriba, y que equivale a la pérdida de carga local de la sucesión de estrechamiento y ensanchamiento. El caudal pasa por igual bajo el puente, pero con un nivel mayor aguas arriba y en segundo lugar con una velocidad media mayor a través del claro.

Además del efecto de sobreelevación ligado al aumento de la velocidad por la reducción de la anchura, se produce una erosión del lecho en el área del puente.

Con lo anterior se efectúa un análisis en régimen permanente lento y gradualmente variado, cuyos resultados en cada sección transversal del cauce son la elevación de la superficie libre del agua (tirante), la velocidad media con la que transita el flujo y por supuesto el gasto. Este proceso técnicamente se conoce como conversión del caudal en nivel o tirante de agua.

Por supuesto que hay incertidumbre, en el valor de la rugosidad, en la ubicación de la sección de contorno³⁶ y de cambios inesperados en el lecho, lo que le da al nivel del agua la categoría de estimado más que exacto.

En el caso de régimen rápido, la sección de contorno se encontraría aguas arriba. Si el régimen del río es alternativamente rápido y lento, es común emplear el tirante conjugado del régimen rápido teórico.

Entonces, los resultados anteriores permiten finalmente definir el dimensionamiento hidráulico del puente, el cuál es función directa del **gasto** que transita bajo el mismo e indirecta del **tirante y la velocidad** que garantizan su desalojo. También permiten evaluar el depósito de sedimentos o la socavación.

El dimensionamiento del puente es en sí su diseño hidráulico, el cual define su ***longitud total por el ancho de la superficie libre, el gálibo horizontal por la separación entre pilas*** y el ***gálibo vertical por la altura libre entre la zona baja de la superestructura y el nivel del agua.***

³⁶ Sección lejana, en el que su nivel H no influye en el nivel de agua en el emplazamiento del puente.

Respecto a la altura desde la parte baja de la superestructura, ésta debe ser libre y tan grande como sea preciso para permitir el paso del agua, dejando una holgura (gálibo vertical) para permitir el paso de objetos flotantes (troncos) que lleve la corriente y el oleaje, así como si fuese el caso, para el paso de embarcaciones. Se mide no desde la superficie libre sino de la línea de energía, porque localmente el agua frenada puede alcanzar el nivel de la línea de energía.

De no existir tal holgura, el puente se inundaría y la superestructura estaría sometida a la acción hidrodinámica de arrastre de la corriente o en el caso de estar constituida por tableros huecos a la acción hidrostática de flotación.

Cabe señalar que es muy raro que un puente se proyecte como sumergible.

Una variante en la longitud del puente, la constituye el caso de ríos con cauce principal y llanura de inundación, en la que el puente resulta antieconómico si salva toda la llanura. Lo que hace inevitable la ocupación de parte de la llanura con el terraplén, procurando que esta solo tenga la función de un almacenamiento temporal del agua y el flujo pase por el cauce principal, pero queda claro que sí resta anchura a la sección del río.

De no ser posible lo anterior, se puede pensar en una estructura secundaria o de múltiples secciones menores de paso de agua bajo los terraplenes, cuyo diseño sigue los lineamientos descritos, respetando siempre el concepto de mejorar el desagüe de la llanura y no causar mayor impacto ambiental, ya que normalmente son tierras agrícolas.

En caso extremo se proyecta que los terraplenes sean sobrepasados por el agua o se destruyan (terraplenes fusibles) al considerar que su obra es barata y no es un grave daño su destrucción, aliviando así de estas maneras, a una gran llanura de inundación.

Además de permitir encontrar un razonamiento para el óptimo económico de la estructura, que se refiere a que cuanto mayor es la longitud del terraplén y menor la longitud de la estructura, la obra del puente es más barata, pero más caros son sus efectos relacionados con el remanso creado por el puente, con la profundidad de desplante de la cimentación, así como de las obras complementarias para defenderlo o protegerlo.

En ocasiones dada la inestabilidad del río, la construcción del puente lleva aparejadas obras complementarias de encauzamiento, a saber, mediante espigones en ríos trezados y defensa de márgenes en el caso de ríos meandriformes.

Para finalizar este apartado, se señala, que el problema del *transporte de sedimentos* no está ligado directamente al cálculo de puentes y obras similares.

1.7 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PUENTE ANTE LOS EFECTOS HIDROLÓGICOS-HIDRÁULICOS

Físicamente la manera en que los eventos de los procesos hidrológicos ya sean frecuentes, atípicos o extremos, impactan en todo momento al cuerpo de los terraplenes y las pilas del puente, quedan resumidos con el paso en el río del caudal bajo la estructura, el cual transporta un volumen de sedimento, modifica el perfil de distribución de la velocidad del agua, deforma el lecho del cauce, arrastra material y cuerpos flotantes y les ejerce presión.

La respuesta asociada a estos sucesos es la elevación de la superficie libre del agua y el desbordamiento del flujo, tanto aguas arriba como aguas abajo del cruce. Esto hidráulicamente se expresa en el cauce a través del tirante, la velocidad y socavación total alcanzados por el agua y durante la creciente (Fig. 22) y si fuera el caso por las trayectorias de los escurrimientos en la planicie inundada y el tiempo de drenado de la misma.

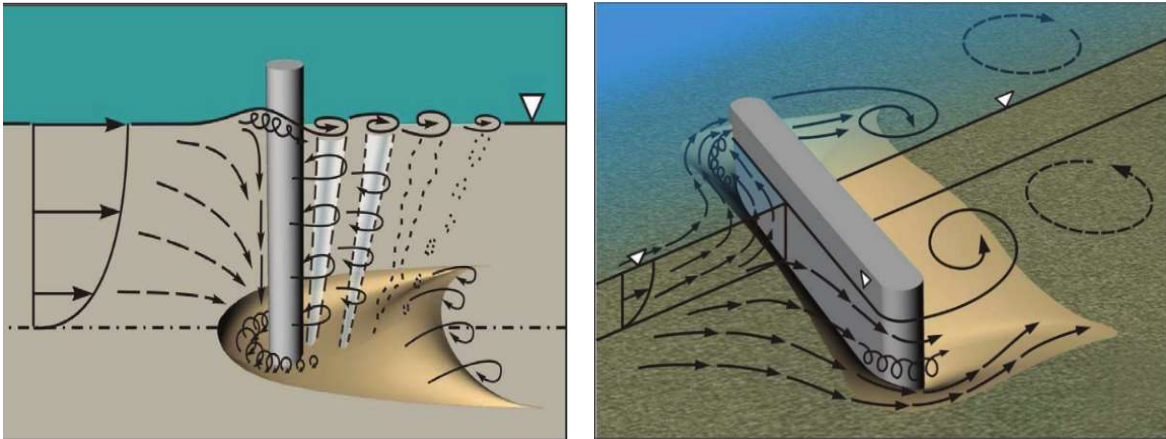


Fig. 22- Derecha. El paso de una avenida extraordinaria impacta a gran velocidad contra el frente perpendicular de la pila del puente que está en la dirección de la corriente, provoca un ligero remanso, flujo descendente con vórtice que al atravesarla desprende en su base el material del cauce y al ascender lo arrastra y transporta. Mientras evoluciona la socavación va dejando una huella en forma de herradura. **Izquierda.** Si la corriente incide sobre la pila en una orientación diferente al eje longitudinal de su planta, ocurre exactamente lo mismo, solo que en el área lateral. *Imágenes tomadas de la Referencia Arneson pág. 3.9 y 3.12 (HEC-18).*

La consecuencia estructural de la acción final del agua ante los esfuerzos que produce sobre el área de la pila donde actúa, son la falla o colapso del puente (Fig. 23).

La falla se alcanza cuando la cimentación cede al deslizarse como consecuencia de la fuerza de empuje que induce la corriente o al asentarse diferencialmente debido a la socavación total que también provoca pérdida en la capacidad de carga de la estructura al causar pandeo por el aumento de la relación de esbeltez, de la pila.

El colapso es por el vuelco de la pila, como consecuencia de la socavación total, que induce el incremento en el momento al pie de esta (donde se conecta con la cimentación) al retirar el suelo que la sostiene.

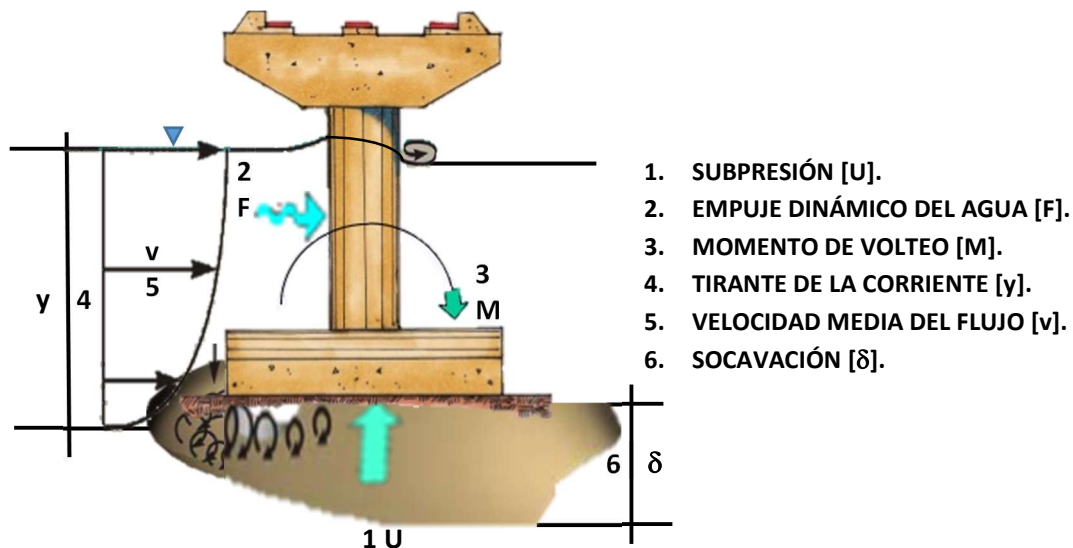


Fig. 23.- El efecto combinado que induce el choque de la corriente con el cuerpo de la Pila y su cimentación genera estructuralmente su inestabilidad al reducir los factores de seguridad de capacidad de carga y provocar un momento de vuelco. *Imágenes tomadas de los sitios:* <https://image.slidesharecdn.com/presentacinanalisideptes-140607034821-phpapp01/95/analisis-de-puentes-inggarcia-garcia-58-638.jpg?cb=1402112951> <https://image.slidesharecdn.com/presentacinanalisideptes-140607034821-phpapp01/95/analisis-de-puentes-inggarcia-garcia-56-638.jpg?cb=1402112951> De la Referencia Arneson pág. 3.9 (HEC-18). Fecha de actualización y edición: 20 de julio del 2020.

Como parte del diseño del puente el código mexicano NIT-SCT [N PRY CAR 6 01 003/01] Cargas y acciones, evalúa la actividad hidráulica considerándola como una carga eventual en tres rubros: empuje dinámico del agua, subpresión y oleaje.

Indica también como determinar la magnitud de cada una, incluyendo los casos:

- En los que se acumulen objetos arrastrados por la corriente sobre la pila.
- Cuando el nivel del agua rebasa el canto inferior de la superestructura (extradós).
- Si la corriente incide sobre la Pila en una orientación diferente al eje longitudinal de su planta.
- Si se prevé que la superestructura pueda quedar parcial o totalmente sumergida en forma temporal.
- El oleaje se considera en puentes flotantes o costeros. No señala nada al respecto de cómo evaluar la fuerza que producen sus acciones a lo largo del puente, solo remite a las recomendaciones para plataformas marinas de American Petroleum Institute o a el Manual de Protección de Costas del Ejército de U.S. En este sentido y dado el reducido número de puentes flotantes o costeros existentes, no se trata aquí el tema.

1.8 EFECTOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL ANTRÓPICO EN EL DISEÑO HIDRÁULICO DE PUENTES

Hasta mediados del siglo pasado, los problemas ambientales dentro de un ciclo climático³⁷ se adjudicaban a efectos naturales, debido a su relación con los cambios periódicos de la órbita terrestre respecto al Sol, pero a partir de entonces, se le atribuyen a la cada vez mayor influencia de la acción antrópica.

Actualmente enfrentamos diversos problemas ambientales por la alteración climática que impacta sobre la atmósfera, esto como consecuencia de la emisión de contaminantes originados por el uso de recursos energéticos. Entre estos se menciona la contaminación del aire urbano, la lluvia ácida y el **calentamiento global**.

El **efecto invernadero**³⁸ es el responsable del *calentamiento global*, debido al incremento principalmente de dióxido de carbono (CO₂)³⁹ en la atmósfera, resultado de la quema de cantidades crecientes de combustibles fósiles, que mantiene por períodos largos las capas inferiores de la atmósfera mucho más caliente de lo que estarían, influyendo por esta razón en el clima por décadas.

Algunas consecuencias son el aumento del nivel del mar, tormentas tropicales más fuertes, incremento de la frecuencia e intensidad de las olas de calor y las sequías, así como la modificación en la trayectoria de las tormentas ciclónicas a gran escala, las que, a su vez, afectan la distribución de la precipitación y la aparición de un clima severo.

Para el caso de los puentes, los procesos del ciclo hidrológico que más variabilidad presentan son aquellos que se producen en la atmósfera y los *eventos naturales extremos* que desde el punto de vista hidrológico le impactan, comprenden fenómenos que duran días como los frentes y ciclones.

En tal condición, el análisis hidrológico del puente bajo la idea de que debe existir para cada región un límite físico o umbral superior determina con métodos de maximización la extrapolación a largo plazo de la precipitación extrema que puede ocurrir, para evaluar con ella los caudales también extremos con los que el diseño hidráulico define las dimensiones del puente. Para ello dispone de serie de registro de datos de períodos cortos o extensos de eventos extremos que se midieron y definieron en espacio y tiempo, quizá

³⁷ Establece un cambio a gran escala determinado por causas geológicas y modificaciones del relieve terrestre, cuya duración es superior al millón de años.

³⁸ Proceso por el que la mayor parte de radiación del Sol no se refleja de vuelta al espacio, debido a que cuando la Tierra la emite de retorno, una parte la absorbe la atmósfera y nuevamente la regresa a la Tierra.

³⁹ Y otros gases traza como el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los clorofluorocarbonos (CFC) resultado de actividades industriales y agrícolas. El CO₂, además, se encuentra de forma natural en la atmósfera y es un gran absorbente calórico.

hasta con exactitud debido al uso de instrumentos de medición como los satélites o radares y que muestran la existencia de tendencias afectadas por causas naturales y artificiales en diferentes períodos.

Cabe señalar, que en esta filosofía en la que solo se examinan los eventos de procesos hidrológicos máximos extraordinarios estacionarios⁴⁰, los eventos atípicos, infrecuentes o extremos originados por el calentamiento global, no tienen cabida, porque crean inconsistencias y sobredimensionamiento con fuertes diferencias en el diseño hidráulico del puente, pues aunque se observen, se midan y registren, se descartan para el análisis hidrológico, debido a que se les considera que no son representativos del ambiente climático local, lo que les da la calidad de perturbados y por lo tanto no homogéneos con el comportamiento de la muestra.

Al respecto, en la práctica profesional se dice ante la acción de un evento atípico, infrecuente o extremos, con el que falla o se colapsa el puente, que se excedió la avenida de diseño y se alcanzó el nivel de seguridad aceptado en su vida útil.

Queda entendido, que con nuestra irresponsabilidad no se revierte el calentamiento global, que con el paso de las décadas el problema se acentúa y que los fenómenos atmosféricos de larga duración que están asociados con variaciones en la circulación atmosférica como las originadas por el cambio climático antrópico, inducen condiciones meteorológicas que abarcan áreas bastante más extensas que la región particularmente afectada⁴¹ las cuales provocan cambios **inusuales recurrentes** en los patrones de precipitación y temperatura que dan lugar a condiciones prolongadas que duran meses o años, **anormalmente** cálidos o fríos con déficit o excesos de precipitaciones, respectivamente y con consecuencias catastróficas.

Lo que es claro, es que este modelo climático de circulación produce eventos de procesos hidrológicos atípicos frecuentes extremos cuya influencia debe evitarse como respuesta gradual para alcanzar un nuevo equilibrio en el ambiente.

Mientras lo conseguimos y dadas las afectaciones a los puentes, esto nos obliga a admitir sus efectos en el diseño hidráulico del puente, incluyéndolos al modificar el pensamiento en el análisis hidrológico del mismo. Esto implica entonces considerar diversos cambios, que deben ser motivo de investigación y entre los que de manera enunciativa y no limitativa puedo mencionar los siguientes:

⁴⁰ Donde las características físicas y la tendencia local climática de la cuenca no cambian en el periodo de registros.

⁴¹ Ya que se presentan a escala planetaria.

1. Definir los parámetros con los que se observan, miden y registran los eventos de procesos hidrológicos atípicos frecuentes extremos, procurando emplear instrumentos y herramientas de alta precisión, para generar series de tiempo, aunque sean cortas.
2. Los eventos de procesos hidrológicos se consideran ahora no estacionarios, por lo que se debe contemplar la manera en cómo se tomara en cuenta la acción antrópica en la cuenca ya que introduce legalmente la urbanización y actividades de explotación de uso del suelo, sin mencionar las de carácter ilegal, que modifican de manera drástica las condiciones en las que el suelo infiltra, permea, evapora y escurre el agua de lluvia.
3. La acción natural con un arrastre o tendencia de las condiciones climáticas antecedentes que indiquen cambios permanentes y en progreso que sean significativos en la cobertura vegetal y en la producción de crecientes, mientras estás secuelas no se expresen en mapas o cartas destinadas para tal fin.
4. Definir otros criterios para cuando emplear adecuadamente el tiempo de recurrencia en las series de datos. Se emplean eventos con magnitudes considerables y alta frecuencia (período de retorno corto) o de baja frecuencia (alto período de retorno), en las expresiones de los métodos estadísticos.
5. Las condiciones críticas de precipitación se seleccionan después de comparar los resultados obtenidos, primero en el análisis hidrológico que evalúa las condiciones históricas de precipitación en la cuenca de drenaje como hasta ahora se realiza tomando en cuenta el punto anterior y segundo con la precipitación en condiciones de cambio climático tomada a partir de datos de modelos climáticos de circulación general⁴² escalados para la región de que se trate.
6. El paso anterior conduce a la inclusión de la generación de hidrogramas de creciente con los efectos del cambio climático en los regímenes de precipitación.
7. Por otro lado, para la obtención de la avenida de diseño si aún no se han desarrollado métodos de cálculo extremos para crecientes, se pueden emplear los métodos de maximización conocidos con un enfoque aplicado a la ocurrencia de eventos con muy baja frecuencia (altos períodos de retorno), pero con magnitudes considerables.

Dada la vulnerabilidad del puente ante los procesos hidrometeorológicos extremos recurrentes, urge más investigación que permita adaptar o generar los factores, consideraciones y métodos para incluirlos en el diseño hidráulico del puente con gran seguridad.

⁴² Como el aún en desarrollo de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, U.S. (NOOA).

1.9 NORMATIVA PARA LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE NIT- SCT

En cuanto a códigos se refiere, la relación funcional cauce-corriente-puente implica dos criterios diferentes con objetivos distintos, que parece no tienen nada en común pero que no tratan de interferirse. Uno involucra al sistema cauce-corriente o compactamente al río y el otro específicamente al puente. El primero se concibe como un sistema hídrico, regulado en nuestro país por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), mientras que el segundo se proyecta a través de las vías terrestres, reglamentadas en México por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Los preceptos a los que se hará mención son los que construyen la visión de las vías terrestres, dado que el puente es un elemento que forma parte del diseño de una carretera y específicamente resuelve el cruce del camino con un río o cuerpo de agua. Surgen con el propósito de estandarizar el empleo de metodologías comúnmente aceptadas por su amplio uso en la ingeniería y garantizar con ello en el proyecto carretero, la seguridad de la infraestructura.

Particularmente el diseño hidráulico del puente está contemplado en la Normativa para la Infraestructura del Transporte (NIT-SCT) en su versión 2018, en el rubro de los ***Estudios para Proyecto Parte 1 Título 06 en 006 Capítulos [N PRY CAR 1 06 006/18]*** y regula desde los trabajos en campo hasta su presentación, como se detalla abajo:

Proyecto (PRY)

Parte 1

Título 06 Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes

Capítulo 001 Ejecución de Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes

Capítulo 002 Trabajos de Campo

Capítulo 003 Procesamiento de Información

Capítulo 004 Análisis Hidrológico.

Capítulo 005 Análisis Hidráulico.

Capítulo 006 Presentación del Estudio Hidráulico-Hidrológico para Puentes

Estos lineamientos sólo establecen los requisitos mínimos que deben cumplir los estudios hidrológicos e hidráulicos, dejando al proyectista la decisión sobre el rigor técnico y su nivel de detalle, así como la libertad en el uso de software de modelación hidrológica e hidráulica y de técnicas de optimización.

En el contexto de una ampliación al camino, no propone una revisión hidráulica del cruce existente, nuevamente lo deja a criterio del proyectista.

Referente al estudio hidrológico, para el cálculo de los gastos de diseño recomienda el empleo de métodos empíricos, semiempíricos y estadísticos e independientemente de las restricciones particulares que tienen, para su empleo únicamente hace la distinción en función del tipo y la confiabilidad de la información disponible y no considera para su aplicación, el comportamiento del escurrimiento, el cual tiene una gran diferencia en la cuenca alta, en la media y la baja. Tampoco establece parámetros para el tratamiento de avenidas infrecuentes, atípicas o relacionadas con el cambio climático.

Respecto a los estudios hidráulicos, la normativa recomienda la aplicación del Método de Manning tomando en cuenta sus restricciones, pero si tales limitaciones no se cumplen, no proporciona claramente otra alternativa. Y el empleo de modelos unidimensionales como opción, recae a juicio del proyectista.

El análisis hidráulico plantea la aplicación de un método de cálculo único, de tal manera que se aplica de igual forma a una corriente dirigida (encañonada) que a una que tiene un río con llanura de inundación, en donde rotundamente existe una gran diferencia entre el comportamiento de los flujos.

Nada profundiza en la determinación del tipo, número, ubicación y funcionamiento de las obras auxiliares que aseguren el comportamiento satisfactorio del puente

La norma establece que el diseño hidráulico del puente define el diseño estructural del mismo y que efectuar el diseño hidráulico consiste en establecer las longitudes mínimas del puente y de sus claros, así como el espacio libre vertical mínimo que ha de dejarse entre el nivel de aguas de diseño (NADI) y el lecho inferior de la superestructura.

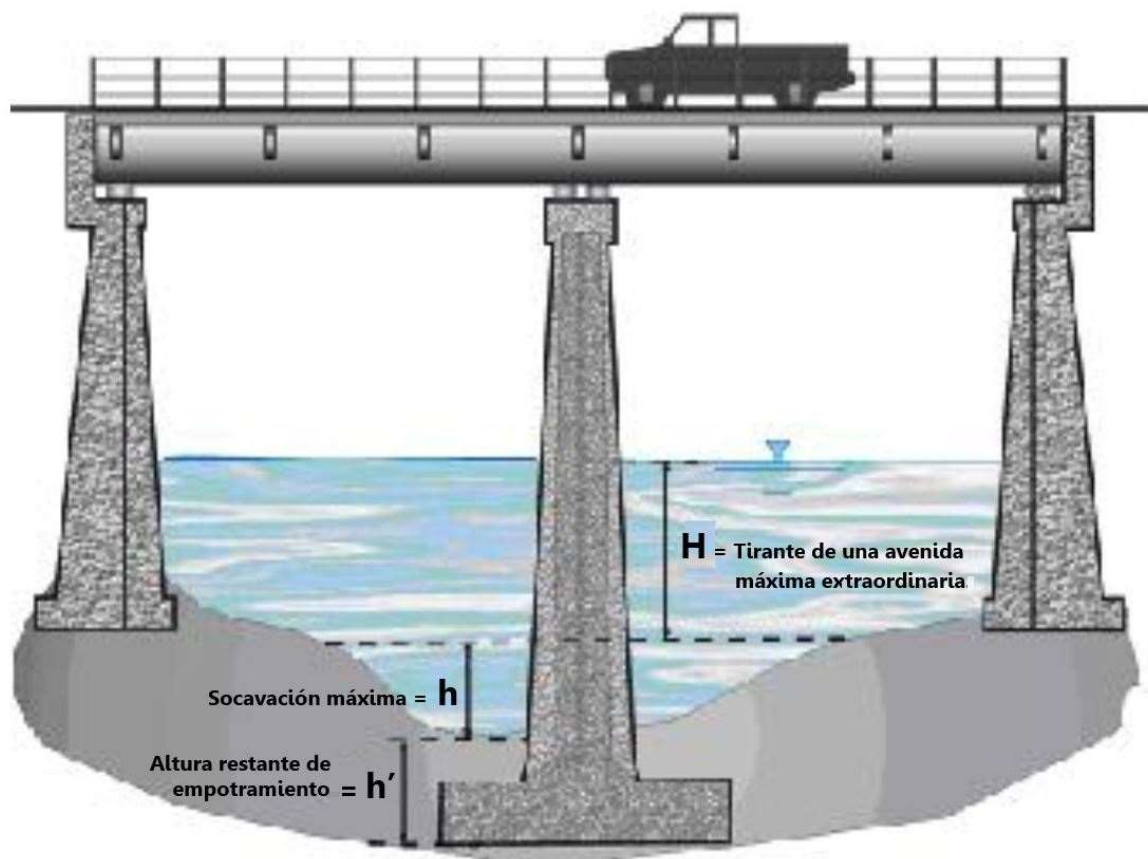
Y solo menciona en la obtención de datos de campo recabar información acerca de la tendencia del río a depositar o socavar en su fondo, pero no reglamenta nada acerca de su análisis, incluso ni en los estudios geotécnicos ni en los geológicos.

Por un lado, conocer la magnitud del depósito de sedimento, contribuye a definir el espacio libre vertical que puede modificar la rasante de la superficie de rodamiento en el proyecto geométrico. Y, por otro lado, el resultado de la socavación también es un valor esperado por el estructurista, pues le permite precisar el incremento en la profundidad de desplante de la cimentación y la altura para evaluar la relación de esbeltez de las pilas, parámetros útiles en el cálculo de la estabilidad del puente.

En la práctica profesional, el diseño hidráulico no entrega el cálculo de la socavación, este valor lo obtiene el encargado de la geotecnia.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA DE DISEÑO Y SUS MÉTODOS DE CÁLCULO



Se representa esquemáticamente las condiciones de operación de un puente. *Imagen editada para esta portada y tomada del sitio: https://1.bp.blogspot.com/_FJZh1gy3MuM/TLCNTIU6kZI/AAAAAAAAAGI/LJA-q1OxBXw/s1600/pte.JPG*
Fecha de actualización y edición: 29 de junio del 2020.

*“En la pugna entre el arroyo y la roca, siempre triunfa el arroyo...
no porque sea muy fuerte, sino porque persevera”*

H. Jackson Brown

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA DE DISEÑO Y SUS MÉTODOS DE CÁLCULO

La longitud mínima de la estructura y de sus claros, así como el espacio libre vertical mínimo que ha de dejarse entre el nivel de aguas de diseño (NADI) y el lecho inferior de la superestructura, son las dimensiones del puente establecidas con el diseño hidráulico.

Tal diseño hidráulico es la interpretación de la respuesta hidráulica a las acciones del tramo del río donde se emplaza el puente e involucra los parámetros geomorfológicos del cauce y la actividad de la corriente al considerar el régimen hidrológico del río vinculado a las características fisiográficas de la cuenca de drenaje, a través de procedimientos sistemáticos que transforman los efectos de las variables de los procesos anteriores, en magnitudes cuantificables útiles para el fin que se persigue.

Razón por la que, en los siguientes apartados, se describen los aspectos principales para seleccionar los Métodos de la Hidrología y de la Hidráulica que coadyuvan al propósito del dimensionamiento del puente.

No se pormenorizan debido a que su literatura se aborda con gran amplitud y detalle en las propias áreas de las que se derivan, además se explican claramente en los Manuales de la Norma (NIT-SCT): M·PRY·CAR·1·06·003_00, M·PRY·CAR·1·06·004_00 y M·PRY·CAR·1·06·005_00.

Se señala que no se incluye Método alguno de la Hidráulica fluvial, dado el carácter del río en estado de equilibrio y consecuentemente con su geoforma en congruencia con la tendencia que tiene la evolución de la forma heredada del cauce y la estructura del flujo en el tramo de la corriente en estudio. Este hecho de ninguna manera implica que no se tome en cuenta, sino todo lo contrario, pues de manera interpretativa, indirecta y complementaria se consigue de acuerdo como lo señala la Norma mexicana (NIT-SCT) con la ejecución de los Estudios Geotécnicos y los Estudios Geológicos, en el rubro de los

Estudios para Proyecto Parte 1 Título 02 en 05 Capítulos [N PRY CAR 1 02 001/19] y Título 03 en 03 Capítulos [N PRY CAR 03 001/19], respectivamente.

La idea anterior engloba también lo relacionado al aspecto del análisis de la socavación. La normativa la contempla, pero no ampara criterio alguno, método, técnica o procedimiento de cálculo, para estandarizar y proporcionar cierto grado de confianza en los resultados. Es un parámetro importante para definir el nivel de desplante de la cimentación cuya repercusión estructural puede ser el colapso.

Es muy clara su exclusión u omisión en el contexto del Diseño Hidráulico del puente, sin embargo, de la normativa se interpreta y sugiere su cálculo dentro de los Estudios Geológicos y Geotécnicos, subsanando así esta falta incongruente. Porque al ser la socavación un fenómeno que estudia la Hidráulica fluvial era de esperarse que se contemplara dentro del diseño hidráulico que nos ocupa.

Tampoco se introducen las Normas y Métodos para determinar, en caso de ser necesario, el tipo, número, ubicación y funcionamiento de las obras auxiliares que aseguren el comportamiento satisfactorio del puente, pues la normativa no le da seguimiento, existe una laguna y seguramente se debe a que son motivo de estudio de otra área de la ingeniería que complementa a la Ingeniería de Puentes, solo pide sea resuelto con la experiencia del proyectista.

2.1 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LAS DIMENSIONES DE UN PUENTE Y SUS OBRAS AUXILIARES

Basada en la Normativa para la Infraestructura del Transporte (NIT-SCT) 2018, **Estudios para Proyecto Parte 1 Título 06 en 006 Capítulos [N PRY CAR 1 06 006/18]** que regula desde los trabajos en campo hasta su presentación, (Fig. 24):

Proyecto (PRY)

Parte 1

Título 06 Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes

Capítulo 001 Ejecución de Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes

Capítulo 002 Trabajos de Campo

Capítulo 003 Procesamiento de Información

Capítulo 004 Análisis Hidrológico.

Capítulo 005 Análisis Hidráulico.

Capítulo 006 Presentación del Estudio Hidráulico-Hidrológico para Puentes

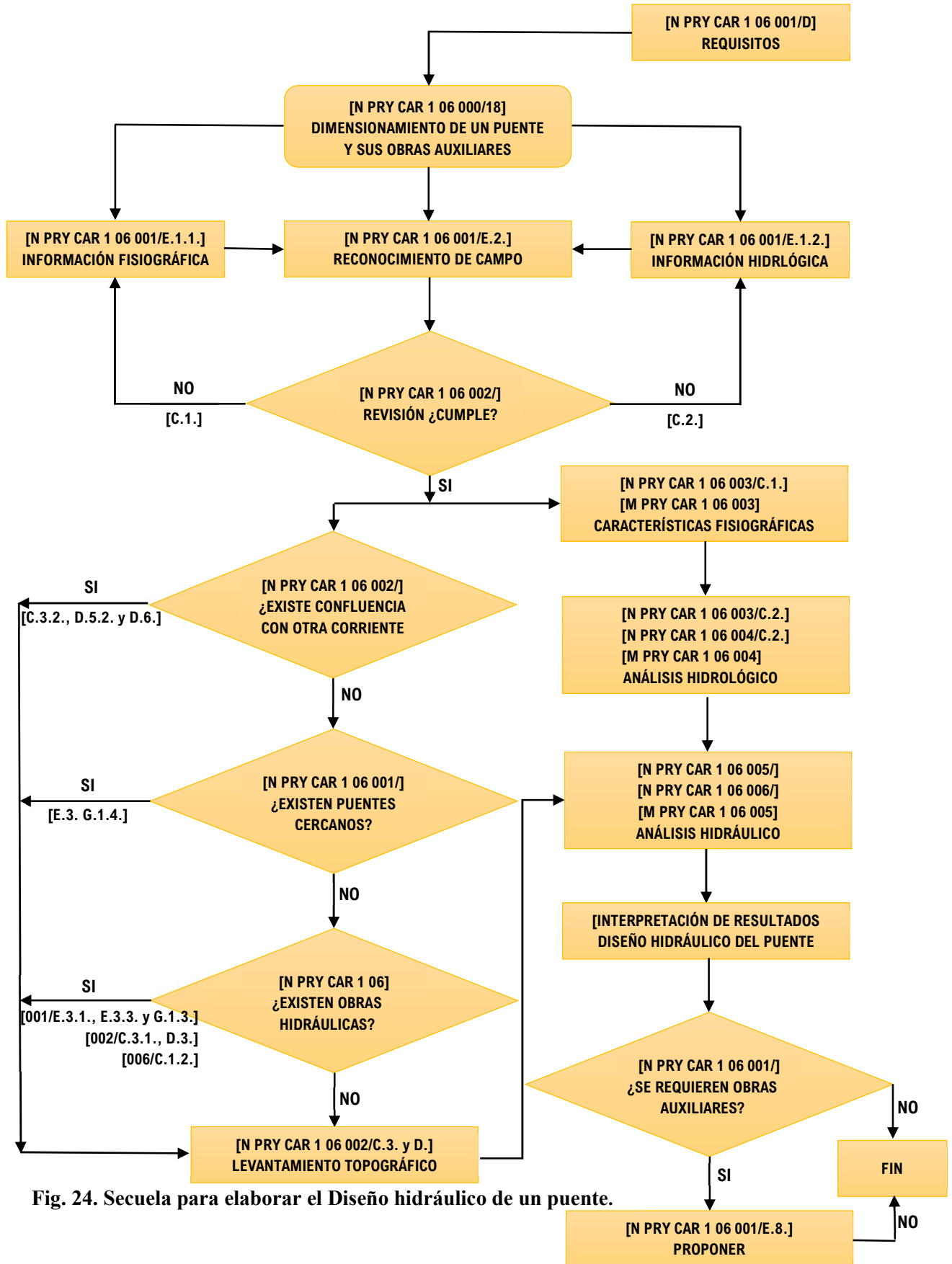


Fig. 24. Secuela para elaborar el Diseño hidráulico de un puente.

2.2 MÉTODOS PARA OBTENER LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

Se refiere a la fisiografía de la cuenca, en la que se enmarca su análisis regional dentro de un determinado contexto climático y la caracterización del terreno se realiza según la naturaleza de su material litológico más superficial, del que se derivan los suelos suprayacentes y atributos secundarios como las pendientes y el drenaje.

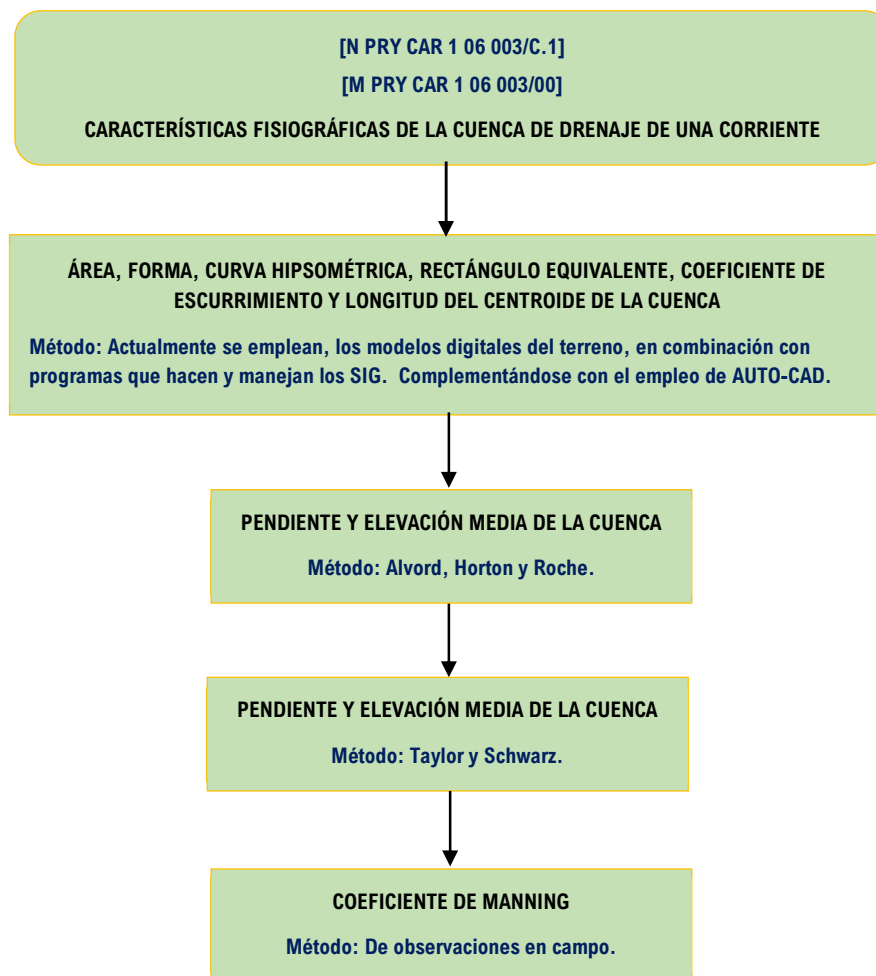


Fig. 25. Métodos para determinar la fisiografía de la cuenca.

2.3 MÉTODOS PARA DEFINIR LA TORMENTA DE DISEÑO

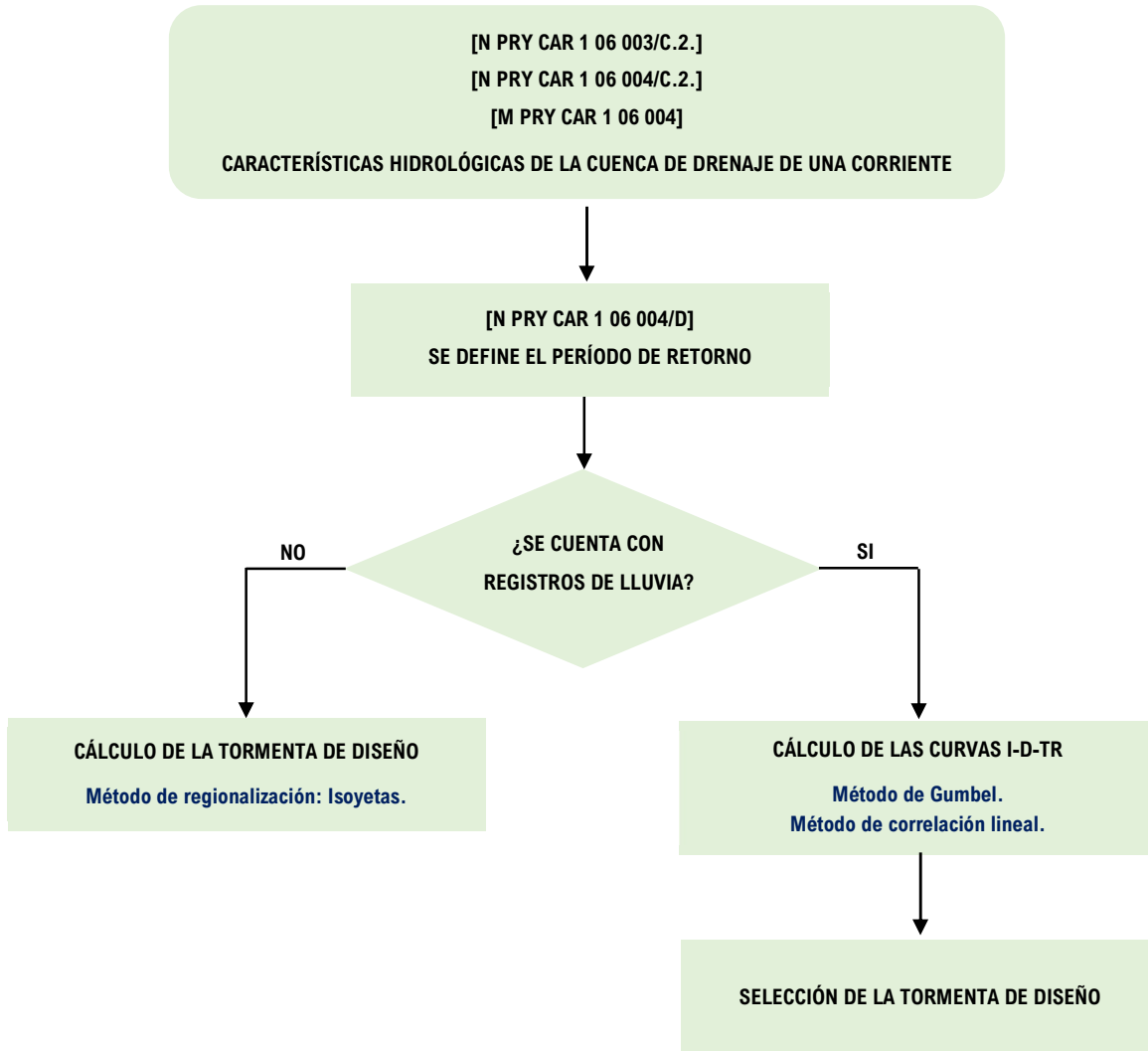


Fig. 26. Métodos para el análisis de la precipitación.

2.4 MÉTODOS PARA EVALUAR LOS GASTOS CON LOS QUE SE PRECISA EL DE DISEÑO

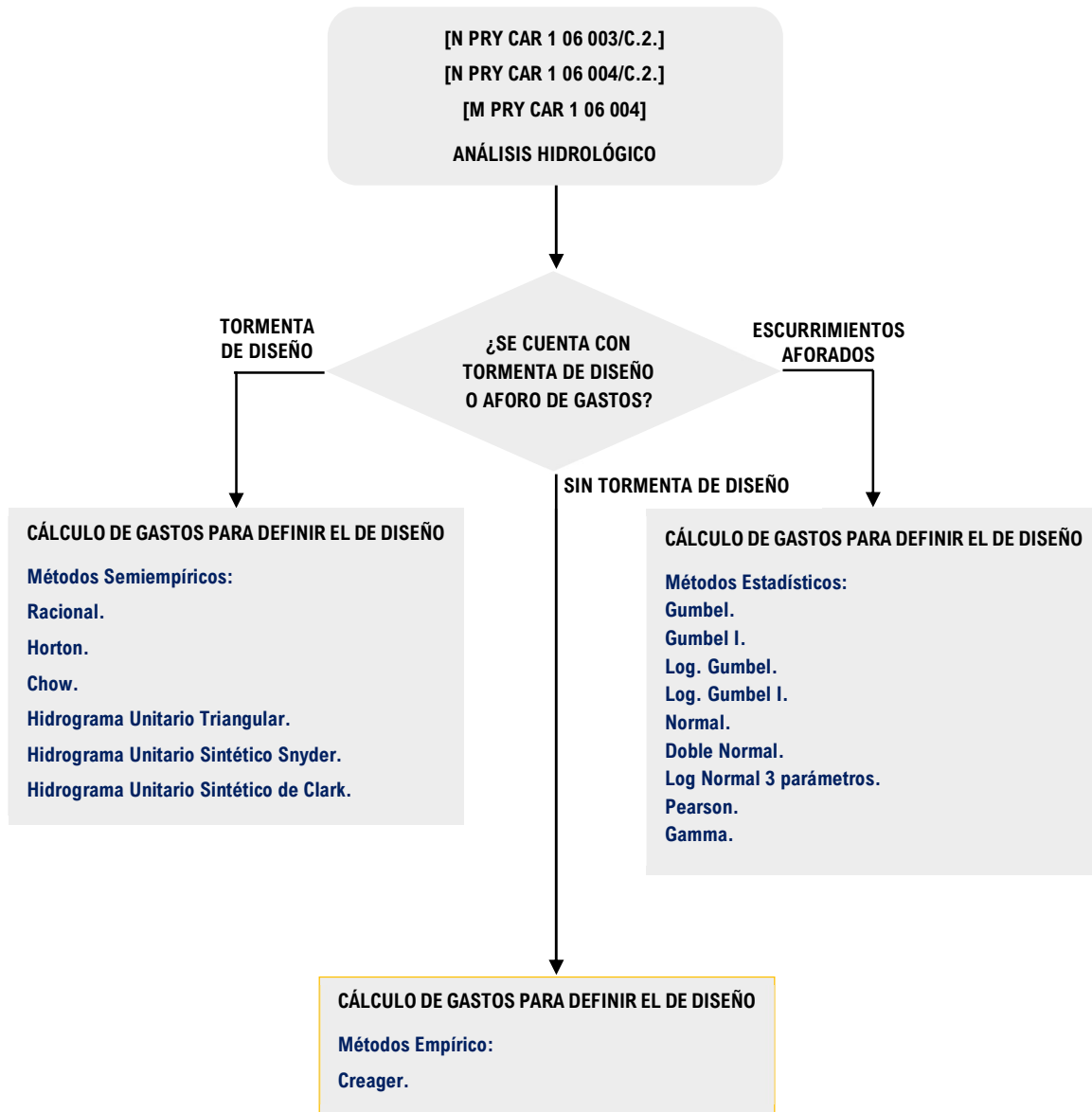


Fig. 27. Métodos para evaluar caudales.

2.5 MÉTODOS PARA LA TRANSFORMACIÓN DE LOS GASTOS EN TIRANTES Y VELOCIDADES

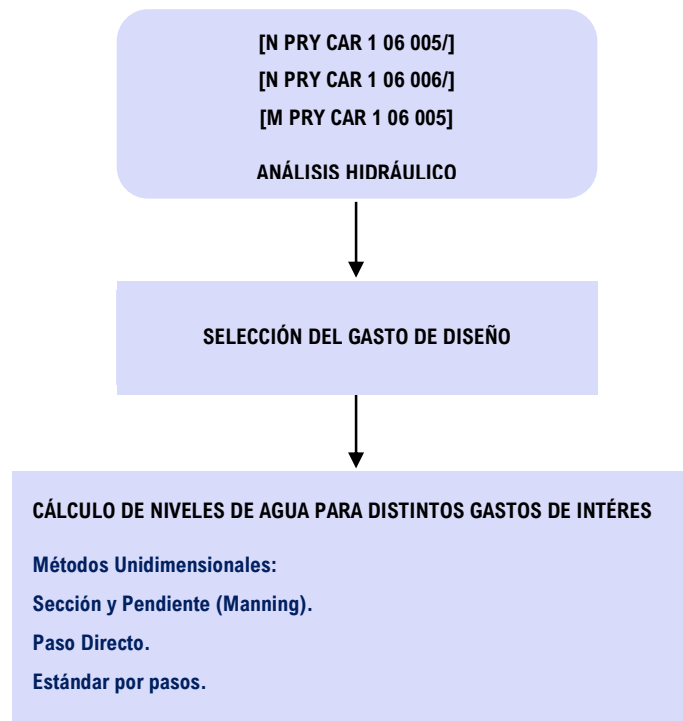


Fig. 28. Métodos hidráulicos.

2.6 DIMENSIONES DEL PUENTE Y SUS OBRAS AUXILIARES

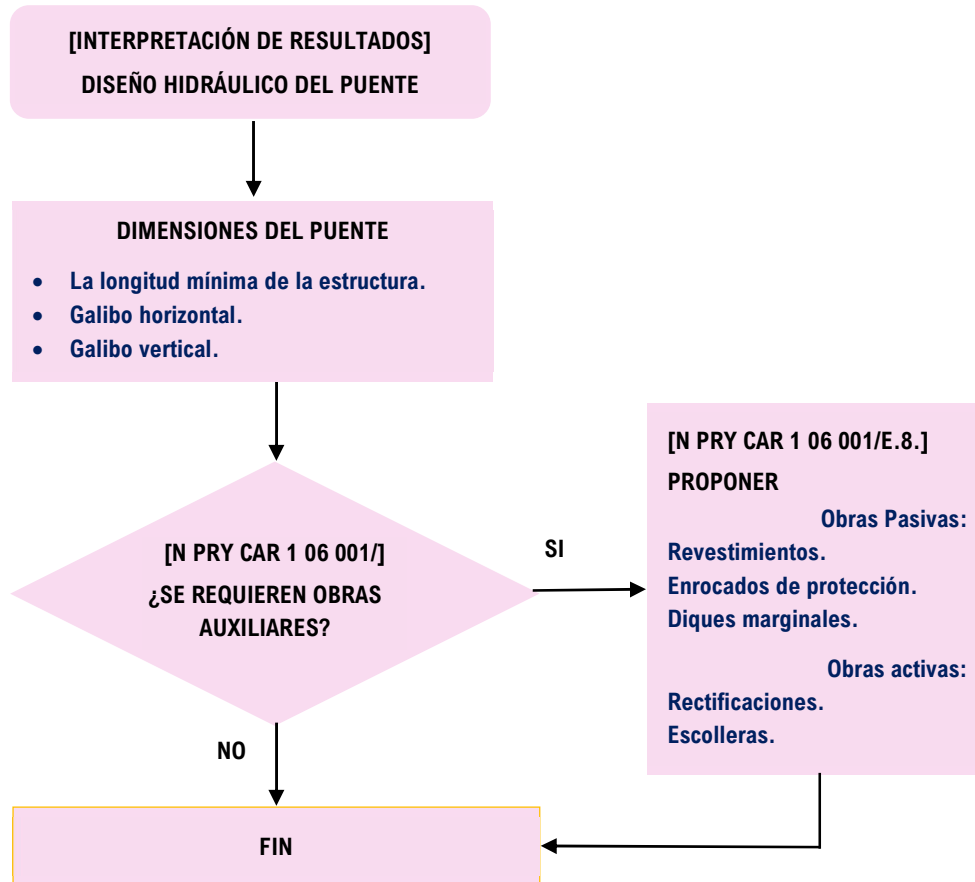


Fig. 29. Diseño hidráulico del puente y sus obras auxiliares.

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO

PUENTE RÍO LIMÓN



Puente Rojo de Nakabashi sobre el río Miyagawa, en Takayama, Japón. Imagen tomada del sitio: <https://thumbs.dreamstime.com/b/puente-rojo-de-nakabashi-en-takayama-jap%C3%B3n-77106635.jpg>
Fecha de actualización: 12 de julio del 2020.

*“Las grandes obras son hechas no con la fuerza,
sino con la perseverancia”*

Samuel Johnson

3.1 ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA MICROCUENCA DE DRENAJE DE LA CORRIENTE RÍO LIMÓN



Fig. 30.- Vista aguas abajo del cauce Río Limón, tomada desde la zona de cruce con el camino a La Unión.

ANTECEDENTES

El trazo del camino que une los poblados de La Unión y San Juan Bautista Atlatlahuca, en el Estado de Oaxaca, obliga a un cruce con el Río Limón. Por tal motivo, se requieren los estudios necesarios que tomen en cuenta las condiciones sociales, topográficas, hidrológicas e hidráulicas que prevalecen en la zona, para proyectar en el cruce del camino citado con el Río Limón, un puente que comunique y permita el desarrollo económico de las comunidades aledañas.

OBJETIVO

Determinar los parámetros climáticos y fisiográficos de la microcuenca de drenaje del Río Limón que se emplearan en las relaciones lluvia-escorrentamiento, mediante los cuales se inferirá el gasto de diseño que transitara en la zona del cruce del Río Limón con el trazo

del camino que une al poblado de La Unión con los de San José Aragón y San Juan Bautista Atlatlahuca.

Localización geográfica

La localidad rural de La Unión pertenece al Municipio de Santiago Nacaltepec (CVEMUN 20478 y superficie de 196.48 km²), en el Estado de Oaxaca. Está asentada en la Región Hidrológica No. 28A⁴³ que pertenece a la Cuenca del “Papaloapan”.

Las coordenadas geográficas del cruce del camino que une al poblado de La Unión con el de San Juan Bautista Atlatlahuca, con el Río Limón, se muestran de manera aproximada en la Tabla 4 y su ubicación se aprecia en la Figura 31.

Tabla 4.- Coordenadas geográficas del cruce en estudio.						
Latitud Norte			Longitud Oeste			Altitud
Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos	msnm*
17	30	01.67	96	50	15.16	1042

*msnm: metros sobre el nivel del mar.

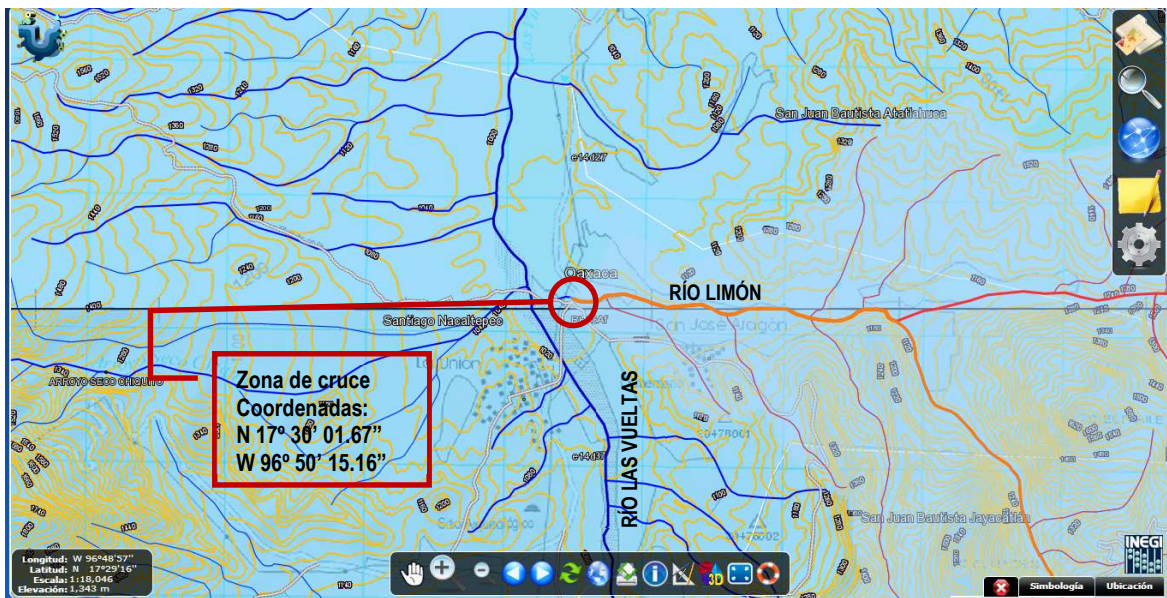


Fig.- 31.- Coordenadas geográficas del cruce del camino de La Unión a San Juan Bautista Atlatlahuca con el Río Limón.

⁴³ Según división hidrológica de la República Mexicana hecha por la extinta SARH.

Microcuenca de drenaje

Para definir la microcuenca de drenaje que Contribuye al escurrimiento sobre el Río Limón, así como sus características físicas, se empleará el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrológicas versión 2010 (Fig. 32) y la Carta topográfica E14D37 de San Francisco Telixtlahuaca, escala 1:50000 (Fig. 33), ambos editados por el INEGI.

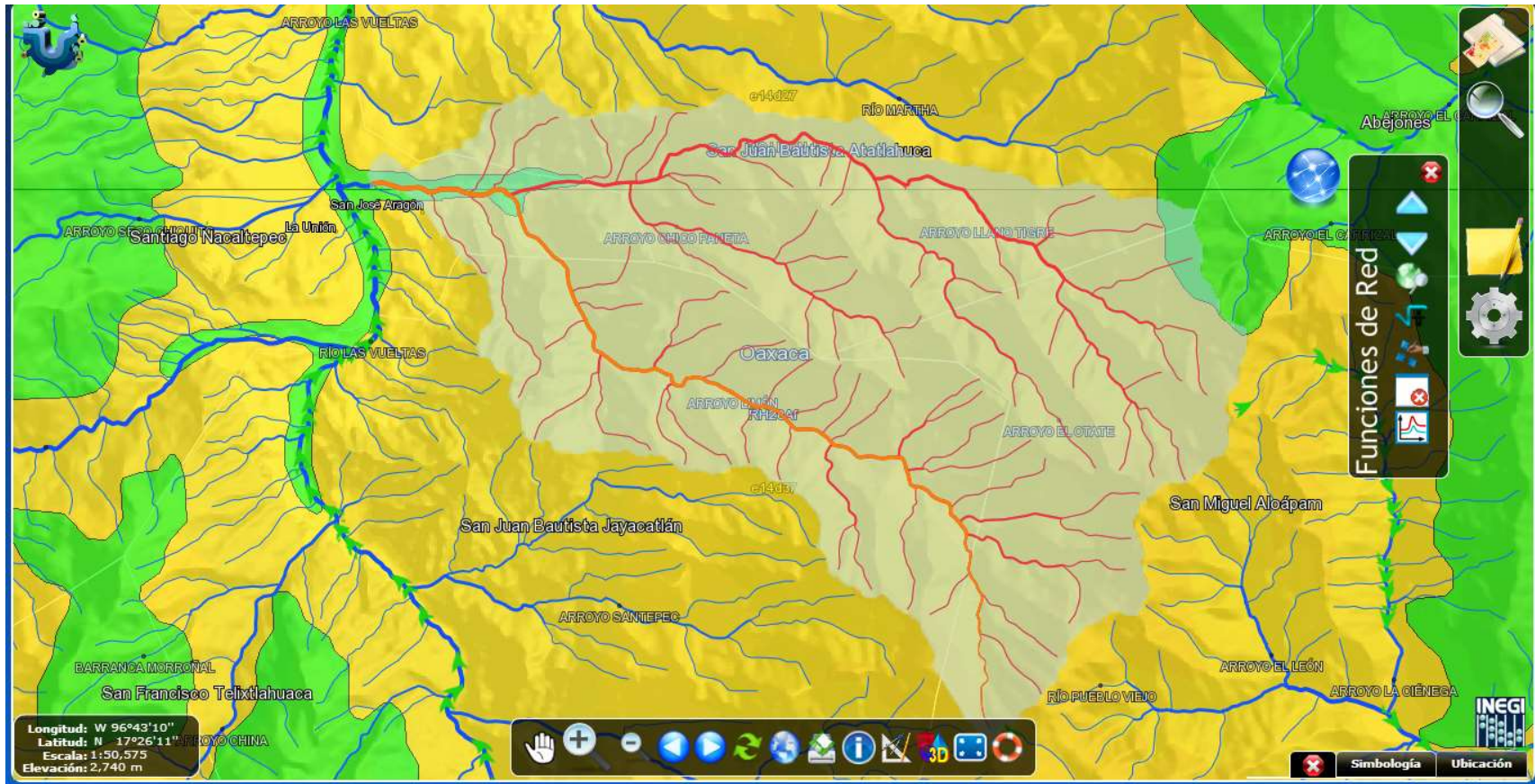


Fig. 32.- Microcuenca de drenaje cuya área aporta el flujo que escurre por el Río Limón.

A. CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS DE LA MICROCUENCA

Parteaguas. Su trazado es el que se muestra en la Figura 34.

Tipo de microcuenca. La descarga del flujo del Río Limón es al Río Las Vueltas, por lo que tenemos una **microcuenca exorreica**.

Perímetro de la microcuenca. Se realizó mediante el programa AutoCAD, tomando en cuenta la escala de la carta topográfica. El valor estimado es el siguiente: **P = 41.55 km**

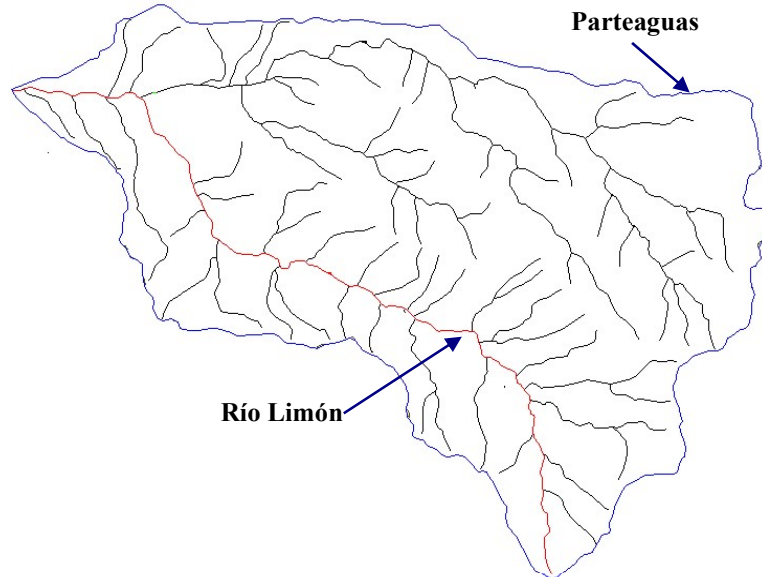


Fig. 34.- Microcuenca de drenaje correspondiente al Río Limón, en CAD.

Área de la microcuenca. Está definida por la proyección en planta que encierra el parteaguas, la cual se determinó tomando en cuenta la escala de la carta topográfica y mediante el empleo del programa AutoCAD, su valor resulto de: **A = 74.95 km**

Tabla 5. Clasificación de Chow.		
Tamaño de cuenca	Área (km ²)	
Muy pequeña	A	< 25
Pequeña	25	< 250
Intermedia - Pequeña	250	< 500
Intermedia - Grande	500	< 2500
Grande	2500	< 5000
Muy grande	A	> 5000

Tamaño de la microcuenca. De acuerdo con la Tabla 5. como el valor del área está comprendido en el rango de $250 < 74.95 < 500 \text{ Km}^2$ se tiene una **microcuenca pequeña**.

Pendiente media de la microcuenca. Se empleará el método de Horton, para lo cual se traza una malla de $1 \times 1 \text{ km}^2$ orientada en el sentido del escurrimiento principal con 77 intersecciones, Fig. 35. La pendiente media de la cuenca se determinará con las expresiones siguientes:

$$s_{sc} = N * \frac{D}{L} \tag{10}$$

donde: $L = L_x + L_y$ $N = N_x + N_y$ $D = 0.020 \text{ km}$

S_{sc} = Pendiente media de la microcuenca.

D = Desnivel constante entre curvas de nivel.

L = Longitud total de las líneas de la malla comprendidas dentro de la microcuenca.

N = Número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla con las curvas de nivel.

El resumen de cálculos se muestra en la Tabla 6.

$$\Rightarrow S_{sc} = \left(\frac{2631 * 0.02}{151.3325} \right)$$

$$\therefore S_{sc} = 0.34771$$

Tabla 6.- Método de Horton para la pendiente media de la microcuenca.				
No. de línea	Intersección		Longitud (km)	
	Nx	Ny	Lx	Ly
0	0	0	0.0000	0.0000
1	74	17	4.1192	2.6616
2	219	35	12.9676	2.9831
3	200	65	12.2102	4.4914
4	203	94	12.5794	5.9383
5	130	105	10.1446	6.8257
6	131	140	9.2952	6.4898
7	104	148	7.7134	6.3302
8	75	152	4.6358	6.1676
9	26	170	1.9298	6.9097
10	0	187	0.0000	8.1535
11	0	166	0.0000	7.7422
12	0	147	0.0000	7.2642
13	0	43	0.0000	3.7801
14	0	0	0.0000	0.0000
$\Sigma =$	1162	1469	75.5952	75.7374
$\Sigma_T =$	2631		151.3325	

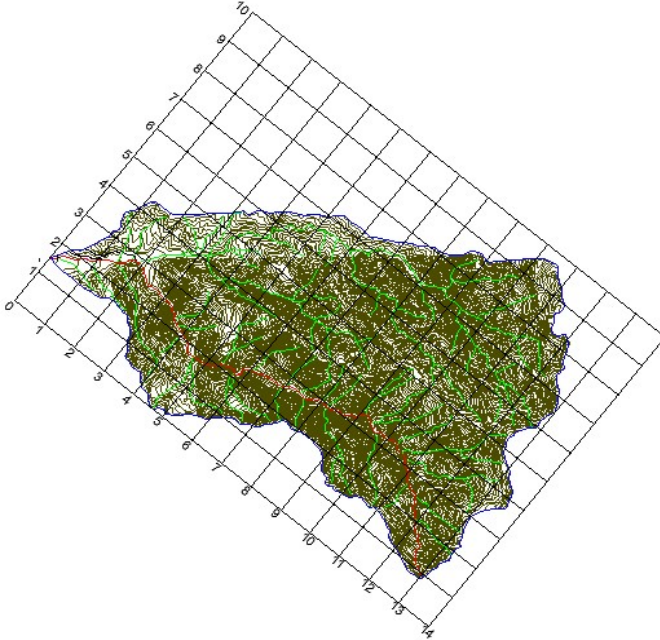


Figura 35.-Mallado para el Método de Horton sobre la microcuenca de drenaje del Río Limón.

Elevación media de la microcuenca. Utilizando la malla anterior se calculó la elevación media de la microcuenca y se obtuvo el valor siguiente:

$$\Rightarrow E_m = \left(\frac{159587}{76} \right)$$

$$\therefore E_M = 2099.83 \text{ msnm}$$

Forma de la microcuenca. Es precisamente la que tiene el parteaguas. Se determina con las relaciones siguientes.

a) Índice de forma (I_f):
$$I_f = \frac{A}{L^2} \quad (11)$$

Si $I_f < 0.7853$ la forma es alargada.

$I_f = 0.7853$ la forma es circular.

$I_f > 0.7853$ la forma es achatada.

b) Relación de enlongación (Re):
$$Re = 1.1284 * \frac{\sqrt{A}}{L} \quad (12)$$

Si $Re < 1.0$ la forma es alargada.

$Re = 1.0$ la forma es circular.

$Re > 1.0$ la forma es achatada.

c) Coeficiente de Compacidad (Cc):
$$Cc = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (13)$$

Si $Cc < 1.0$ la forma es achatada.

$Cc = 1.0$ la forma es circular.

$Cc > 1.0$ la forma es alargada.

d) Relación de circularidad (Rc):
$$Rc = 2.5663 * \frac{A}{P^2} \quad (14)$$

Si $Rc < 1.0$ la forma es alargada.

$Rc = 1.0$ la forma es circular.

$Rc > 1.0$ la forma es achatada.

donde:

Área de la cuenca A = 74.95 Km²
 Perímetro de la cuenca P = 41.55 km
 Longitud del Río Limón L = 15.88 km

Aplicando las expresiones anteriores, se tiene el siguiente resumen de cálculos:

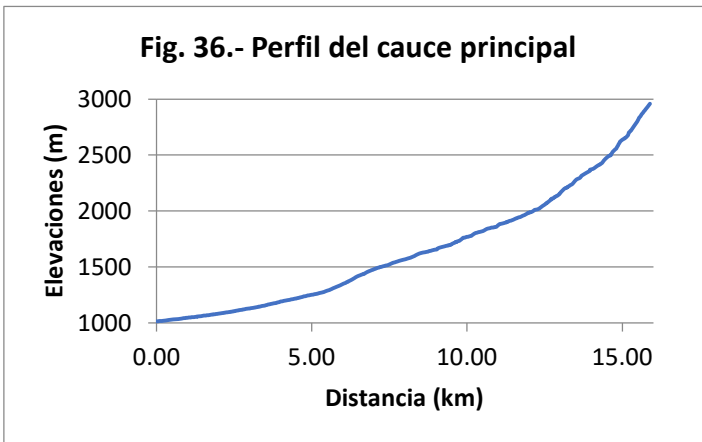
De acuerdo con los resultados de la Tabla 7. La **microcuenca tiene la forma alargada**

Tabla 7- Valores de las relaciones de forma para la microcuenca

Relación	Valor	Forma
De forma	0.29706	Alargada
Enlongación	0.61502	Alargada
Compacidad	1.35338	Alargada
Circularidad	0.11142	Alargada

Longitud del Río Limón. El valor de la longitud del escurrimiento principal se determinó con la polilínea y el empleo del programa AutoCAD y dio como resultado:

L = 15.88 km



Perfil longitudinal del Río Limón.

El perfil longitudinal del escurrimiento se obtuvo con ayuda de la carta topográfica y AutoCAD. Su gráfica se aprecia en la Fig.36.

Pendiente media del Río Limón. En este proyecto se

empleará el método de Taylor y Schwarz por considerarse más preciso.

$$s = \left[\frac{L}{l_1/\sqrt{s_1} + l_2/\sqrt{s_2} + \dots + l_m/\sqrt{s_m}} \right]^2 \tag{15}$$

donde:

m: Número de segmentos, en los cuales se subdivide el cauce principal.

s: Pendiente media del cauce.

s₁, s₂,..., s_m: Pendiente de cada segmento, que se obtiene por $\frac{dh}{dl}$

De esta forma el valor de la **Pendiente media del cauce**, resulto ser de: **s = 0.07023**.

RED DE DRENAJE

Orden de los escurrimientos. La extensión de la red de corrientes dentro de la microcuenca resulto ser de **orden 4**.

Tabla 8.-Orden y longitud de corriente		
Orden del escurrimiento	No. de corrientes	Longitud (km)
1	70	87.4123
2	15	22.8504
3	2	20.3379
4	1	2.4517
Σ =	88	133.0523

Longitud de escurrimientos tributarios. Para medir los tributarios se recurrió al programa AutoCAD. Tabla 8 Fig. 37,

Densidad de corriente. No. de escurrimientos por unidad de área.

$$D_s = \frac{N_s}{A} \tag{16}$$

entonces tenemos:

$$D_s = \frac{88.00}{74.95} \quad \therefore \quad D_s = 1.17$$

Densidad de drenaje. Longitud de escurrimientos por unidad de área.

$$D_d = \frac{L_s}{A} \tag{17}$$

lo que queda: $D_d = \frac{133.0523}{74.95}$

$\therefore \quad D_d = 1.78$

donde:



Figura 37.- Extensión y orden de la Red de drenaje del Río Limón.

- N_s Es la sumatoria de los números de corrientes en la microcuenca.
- A Es el área de la microcuenca en km^2 .
- L_s Es la sumatoria de la longitud de los tributarios en la microcuenca.
- A Es el área de la microcuenca en km^2 .

B. ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN

Tiempo de concentración (Tc)

La tormenta de diseño tiene una duración igual al tiempo de concentración; por lo que éste último puede ser evaluado mediante la expresión de Kirpich, que a continuación se detalla.

$$T_c = 0.01947 \left(\frac{L}{\sqrt{s}} \right)^{0.77} \quad (18)$$

donde:

Tiempo de concentración, en min. = Tc

Longitud de recorrido del escurrimiento superficial = L = 15883.9749 m

Pendiente media del cauce = s = 0.07023 m/m

Entonces aplicando los datos se obtiene:

$$T_c = 0.01947 \left(\frac{L}{\sqrt{s}} \right)^{0.77} = 0.01947 \left(\frac{15883.9749}{\sqrt{0.07023}} \right)^{0.77} = 92.94 \text{ min. } \therefore \quad T_c = 93 \text{ minutos}$$

Selección del período de retorno (Tr)

Dado que CONAGUA también revisa y autoriza, se tomará en cuenta para este análisis la homologación de fecha 19 de septiembre de 2018, que hace a través de su Subdirección General Técnica acerca de los criterios de diseño y normatividad relativos al Diseño de Puentes. Ya señalados en la **Tabla 2. Períodos de retorno para el diseño de estructuras viales que cruzan cauces o zonas federales** y de la cual es aplicable al caso que nos ocupa, lo indicado en la Tabla 9.

Tabla. 9.- Puentes Carreteros para el paso de corrientes visualizadas en el simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL).			
Estructura	Tipo de vialidad	Localización geográfica	Período de retorno Tr (años)
En caminos locales que comunican poblados de menos de 100 000 habitantes	Carretera Estatal o municipal	1	25
		2*	50

*Zona costera o zona habitada.

De acuerdo con la Norma N PRY CAR 1 06 004/18 los períodos de retorno que han de considerarse para determinar los gastos que se utilicen en el diseño del puente en sus diferentes etapas se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Tiempo probable en el que se igualan o exceden distintos gastos máximos extraordinarios para del diseño de P UENTE.

CLAÚSULA	GASTO	NOMENCLATURA	TR* (años)	OBSERVACIÓN
D.1	De construcción	Q_{CO}	5	NAC. - Nivel de aguas de construcción.
D.1			10	
D.2.1	Teórico de diseño	Q_{TDI}	50	NADI. - Nivel de agua de diseño, permite el dimensionamiento.
D.2.2			100	
D.3	Complementario	Q_{500}	500	Evaluar efectos en la superestructura y en la cimentación.
		Q_{1000}	1000	

*Norma N PRY CAR 1 06 004/18

Curvas i-d-Tr

Definidos los períodos de retorno en la Tabla 10, se prosigue a obtener para la zona en estudio y de los **Planos de Isoyetas de Intensidad de Lluvia 2015 (mm/hr)** publicados por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), los valores de intensidad obtenidos para las diferentes duraciones correspondientes a cada Tr. Los resultados se muestran en la Tabla 11 Fig. 38.

Y la creación de curvas para definir los gastos de construcción (Q_{CO}) en la Fig. 39, de diseño (Q_{TDI}) en la Fig. 40 y de complemento para evaluar los efectos en la superestructura (Q_{500}) y en la cimentación (Q_{1000}), en la Fig. 41.

Con la finalidad de establecer la intensidad de la tormenta para cada uno de los gastos mencionados, en cada una de las gráficas anteriores se incluye el valor leído de la intensidad al hacer igual el tiempo de concentración con la duración de la tormenta que interese establecer, es decir:

$$\text{Tiempo de concentración} = \text{Duración de la tormenta de diseño} \quad (19)$$

$$T_c = d = 93 \text{ minutos}$$

d (min)	Tabla 11.- Período de retorno [Tr] (años)					
	5	10	50	100	500	1000
	i (mm/hr)	i (mm/hr)	i (mm/hr)	i (mm/hr)	i (mm/hr)	i (mm/hr)
5	125	130	174	190	215	247
10	96	105	135	150	185	215
15	80	90	118	128	168	186
20	70	78	104	114	150	168
30	57	64	85	93	126	139
40	48	54	74	78	107	119
60	37	42	58	62	85	95
90	28	31	44	49	64	73
93	27.2	30.2	43	48	62.4	71.3
120	22	24	36	39	50	58
150	19	20	30	32	40	46
180	17	18	26	28	33	40
210	15	16	23	24	30	36
240	13	15	20	21	28	33

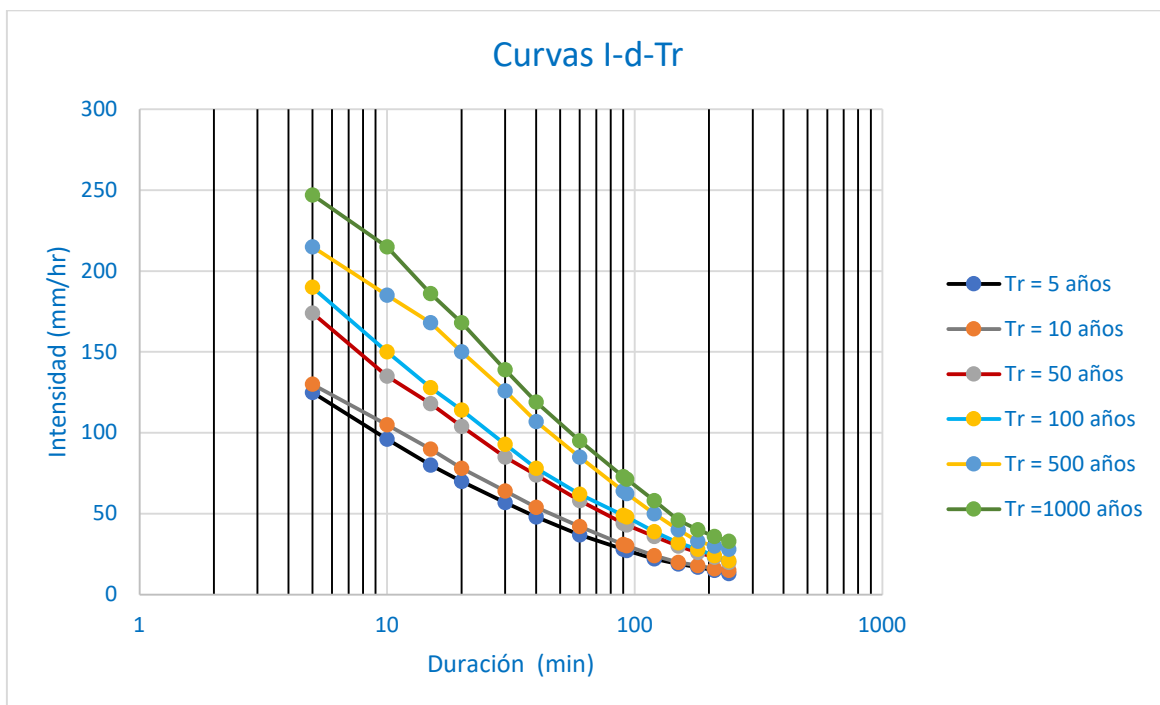


Fig. 38.- Resumen de las Curvas Intensidad-Duración-Período de retorno que intervienen en la zona de estudio.

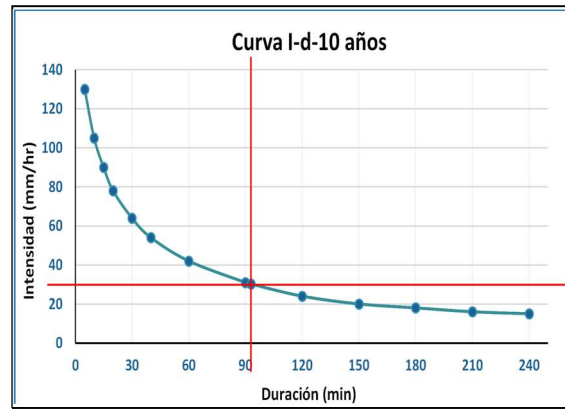
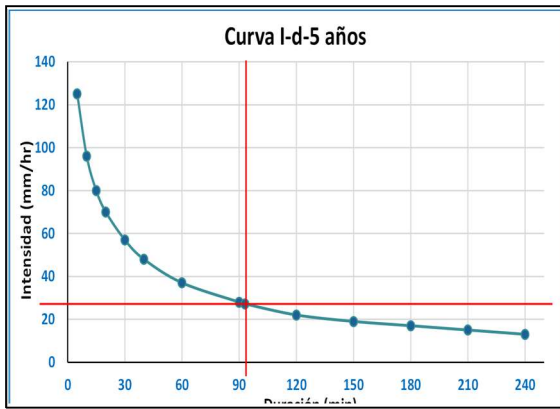


Fig. 39.- Con la intensidad que proporcione el gasto más desfavorable de una de estas dos curvas, se determinara el gasto de construcción (Q_{CO}).

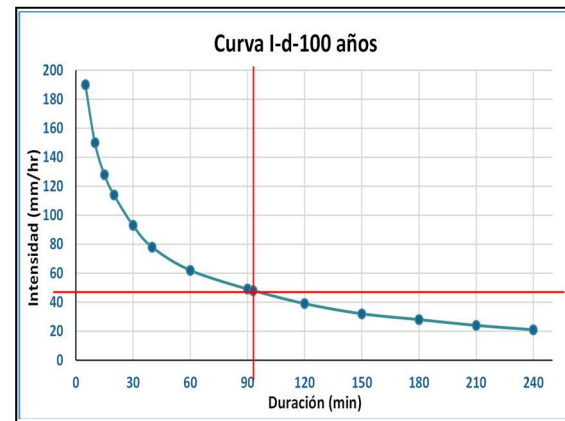
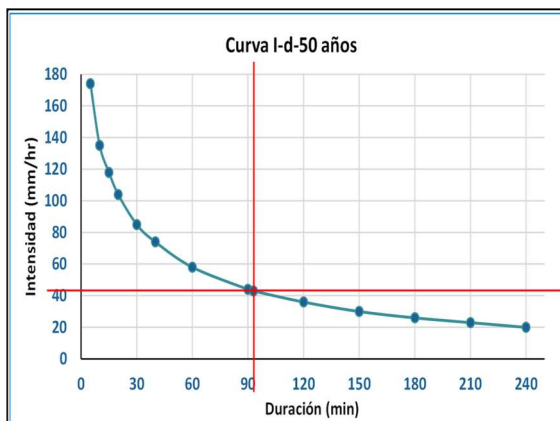


Fig. 40.- Con la intensidad que proporcione el gasto más desfavorable de una de estas dos curvas, se determinara el gasto teórico de diseño (Q_{TDI}).

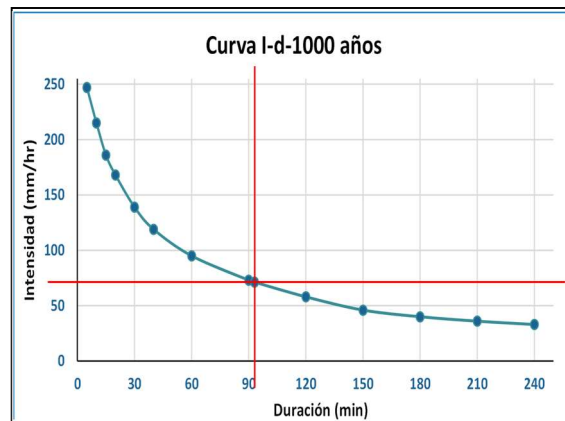
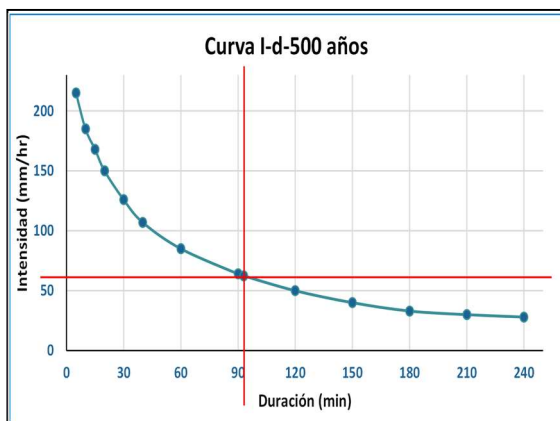


Fig. 41.- Con la intensidad de la curva de $Tr = 500$ años se obtendrá el gasto (Q_{500}) para evaluar la superestructura y con la de $Tr = 1000$ se determinará el gasto (Q_{1000}) para evaluar la cimentación.

C. AVENIDA MÁXIMA

Método Racional

N PRY CAR 1 06 004/18

Cláusula C.1.1

La expresión se ajusta para la información con la que se dispone, además de que toma en cuenta la contribución del escurrimiento de toda el área al evaluar el tiempo de recorrido del agua desde el punto hidráulicamente más alejado hasta el punto de salida.

$$Q = 0.278 C i A \tag{20}$$

donde:

Q = Gasto, en m³/s.

C = Coeficiente de escurrimiento, adimensional.

i = Intensidad de lluvia para una duración igual al Tc, en mm/hr.

A = Área drenada, en Km².

0.278 = Factor de homogeneidad de unidades.

El coeficiente C representa la relación entre el volumen escurrido y el llovido, depende del tipo de terreno o superficie de la cuenca en estudio. En caso de que la misma este compuesta por diferentes tipos de suelos, el coeficiente de escurrimiento global C se obtiene con la expresión siguiente:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{A} \tag{21}$$

donde:

C = Coeficiente de escurrimiento global, adimensional.

C_i = Coeficiente de cada área parcial. A_i = Área parcial, en Km².

n = Número de áreas parciales. A = Área total de la cuenca, en Km².

En la Tabla 12 se muestra el valor que se debe adoptar para dicho coeficiente.

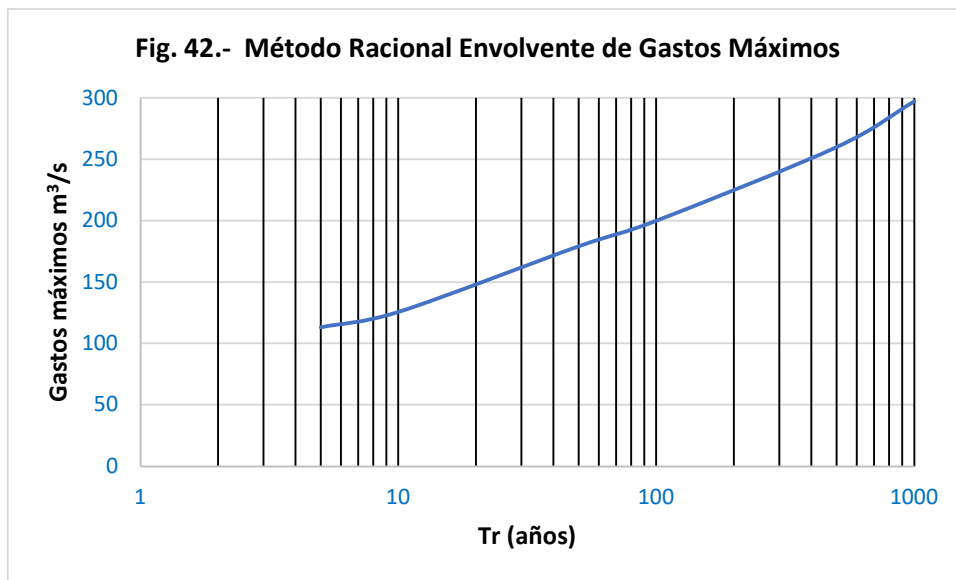
Para nuestro caso tenemos:

Tabla 12.- Valor del coeficiente C para el Río Limón.	
Tipo de área a drenar	Valor C
Pradera: Suelos arenosos escarpados (pendiente de 0.07 o más)	0.20

$$\therefore C = 0.20$$

El gasto calculado con la ecuación (19) y los datos de la Tabla 16 se aprecia en la Tabla 19.

Tabla 19.- Resumen de valores Método Racional				
C = 0.20		A = 74.95 km ²		
Tirante	Tr (años)	i (mm/hr)	Q (m ³ /s)	Gasto
NAC	5	27.20	113.35	Q _{CO}
	10	30.20	125.85	
NADI	50	43.00	179.19	Q _{TDI}
	100	48.00	200.03	
N _{REVISIÓN}	500	62.40	260.03	Q _{REVISIÓN}
	1000	71.30	297.12	



Método del hidrograma unitario triangular

N PRY CAR 1 06 004/18

Cláusula C.1.3

El método representa la comparación gráfica de los gastos de escurrimiento contra el tiempo necesario para que estos se presenten (Fig. 43) y la ecuación con la que se estima el gasto es la siguiente:

$$Q = q_p * P_e \tag{22}$$

donde:

Q = Gasto escurrido en la cuenca, en m³/s.

P_e = Precipitación en exceso (efectiva) en cm.

$$q_p = 0.208 * \frac{A}{t_p} \tag{23}$$

q_p = Caudal pico del hidrograma unitario, en $m^3/s-mm$.

0.208 = Factor de homogeneidad de unidades.

A = Área de la cuenca, en Km^2 .

$$t_p = 0.5 * \Delta t + t_l \tag{24}$$

t_p = Tiempo de ocurrencia del caudal pico, en hr.

$$t_l = 0.6 * t_c \tag{25}$$

t_l = Tiempo de retardo, medido desde el centro de gravedad del hietograma de precipitación efectiva hasta el pico del hidrograma de escurrimiento, en hr.

t_c = Tiempo de concentración, en hr.

$$\Delta t = 0.2 * t_c \tag{26}$$

Δt = Tiempo de duración de la precipitación efectiva, en hr.

$$t_b = t_p + t_r \tag{27}$$

t_b = Tiempo base del hidrograma triangular, en hr.

t_r = Tiempo de recesión, en hr.

$$t_r = 1.67 * t_p \tag{28}$$

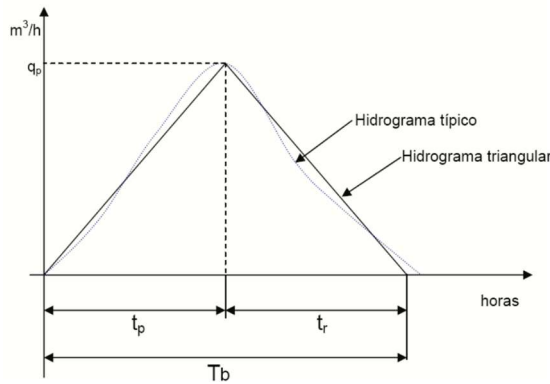


Figura 43.- Elementos del Hidrograma Unitario Triangular.

Precipitación efectiva (lluvia neta)

Es la parte de la lluvia total resultante de descontar las pérdidas por escurrimiento superficial, percolación profunda y evaporación de la lluvia interceptada por el follaje o que puede aprovechar la vegetación para suplir sus demandas. Se evalúa con la expresión americana del método del Servicio de

Conservación de Suelos (S.C.S.) de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$Pe = \frac{(P' - 0.2 * S^*)^2}{(P' + 0.8 * S^*)} \tag{29}$$

donde:

P' = Precipitación total corregida, en cm.

$$Si \quad A < 25 \text{ km}^2 \quad P' = P \tag{30}$$

$$Si \quad A > 25 \text{ km}^2 \quad P' = P * \left(1 - 0.1 * \text{Log} \frac{A}{25}\right) \tag{31}$$

P = Precipitación real total, obtenida de las curvas I-D-F, en cm.

A = Área de la cuenca hidrográfica, en Km².

S* = Máxima retención potencial, en cm. $S = \left(\frac{1000}{CN} - 10\right) * 2.54$ (32)

CN = Curva de escurrimiento, función del cultivo y de la infiltración del suelo (Tabla 20).

Tabla 20.- Valores de CN para los diferentes grupos de suelos						
Aprovechamiento del suelo y su cubierta	Método de cultivo	Infiltración	Grupo hidrológico del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	H		77	86	91	94
Cultivo de hilera	H	Mala	72	81	88	91
Cultivo de hilera	H	Buena	67	78	85	89
Cultivo de hilera	N	Mala	70	79	84	88
Cultivo de hilera	N	Buena	65	75	82	86
Cereales	H	Mala	65	76	84	88
Cereales	H	Buena	63	75	83	87
Legumbres tupidas	H	Mala	66	77	85	89
Legumbres tupidas	H	Buena	58	72	81	85
Pradera o pastizal	N	Mala	47	67	81	88
Pradera o pastizal	N	Regular	25	59	75	83
Pradera o pastizal	N	Buena	6	35	70	79
Bosques		Mala	45	66	77	83
Bosques		Regular	36	60	73	79
Bosques		Buena	25	55	70	77
Caminos revestidos			72	82	87	89
Caminos pavimentados			72	84	90	92

Los cálculos para la obtención del gasto de diseño se abrevian en las Tablas 21 y 22.

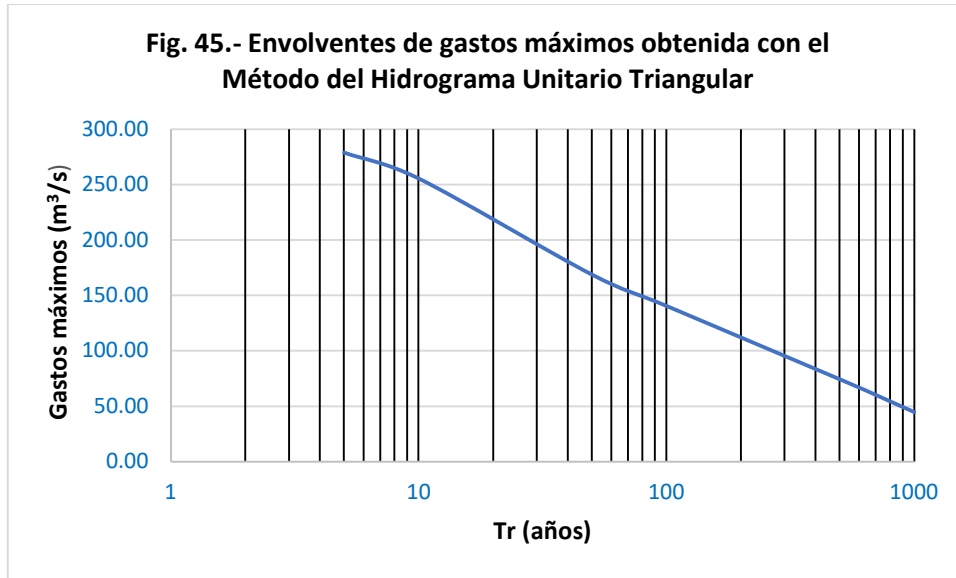
Tabla 21.- Datos base y parámetros generales para el cálculo de gastos por el Método del Hidrograma Unitario Triangular.

A	=	74.95	Km ²	Área de la cuenca.
L	=	15.88	km	Longitud del cauce.
s	=	0.07	m/m	Pendiente del río.
d	=	93.00	min.	Duración de la tormenta.
t_c	=	92.94	min.	Tiempo de concentración.
CN	=	25.00		Número de la curva de escurrimiento (de Tabla 20).
Suelo	=	A		
S*	=	76.20	cm	Retención potencial máxima, es decir, máxima P (precipitación) absorbida por la cuenca.
Δt	=	0.31	hr	Tiempo de duración de la precipitación efectiva.
t_i	=	0.93	hr	Tiempo de retardo.
t_p	=	1.08	hr	Tiempo de ocurrencia del caudal pico.
t_r	=	1.81	hr	Tiempo de recesión.
t_b	=	2.90	hr	Tiempo base del hidrograma triangular.

Tabla 22.- Cálculo de gastos por el Método del Hidrograma Unitario Triangular.

Tirante	Tr (años)	i (mm/hr)	P	P'	Pe	Q m³/s)	Gasto
NAC	5	27.20	4.22	4.01	1.94	278.82	Q_{CO}
	10	30.20	4.68	4.46	1.78	255.51	
NADI	50	43.00	6.67	6.35	1.17	168.93	Q_{TDI}
	100	48.00	7.44	7.09	0.98	140.51	
N_{REVISIÓN}	500	62.40	9.67	9.21	0.52	74.48	Q_{REVISIÓN}
	1000	71.30	11.05	10.52	0.31	44.72	

Fig. 45.- Envolventes de gastos máximos obtenida con el Método del Hidrograma Unitario Triangular



Método de Ven Te Chow

N PRY CAR 1 06 004/18
Cláusula C.1.2

El método de Ven Te Chow está basado principalmente en el concepto de hidrograma unitario; la expresión general es.

$$Q = 2.78 * A * X * Z \quad (33)$$

donde:

Q = Gasto máximo en m³/seg.

2.78 = Factor de homogeneidad de unidades.

A = Área de la cuenca en Km².

X = Factor de escurrimiento, en cm/hora.

$$X = \frac{Pe}{d} \quad (34)$$

d = Duración de la lluvia en exceso, en hr.

Pe = Altura de lluvia en exceso, en cm.

$$Pe = \frac{\left[P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{\left[P + \frac{2032}{N} - 20.32 \right]} \quad (35)$$

N = Número de escurrimiento, adimensional. (De la Tabla 20)

P = Altura de lluvia, en cm.

Z = Factor de reducción del pico, adimensional. De la Fig. 44, en donde:

$$t_p = 0.00505 \left[\frac{L}{\sqrt{s}} \right]^{0.64} \tag{36}$$

- t_p = Tiempo de retraso (tiempo de pico), en hr.
- L = Longitud del escurrimiento superficial, en m.
- s = Pendiente media del cauce, en por ciento.

Además, si:

$$\frac{d}{t_p} < 0.6 \Rightarrow Z = 0.7401 \left(\frac{d}{t_p} \right)^{0.9740} \tag{37}$$

$$\frac{d}{t_p} \geq 0.6 \Rightarrow Z = 0.6315 \left(\frac{d}{t_p} \right)^{0.6632} \tag{38}$$

$$\frac{d}{t_p} \geq 2 \Rightarrow Z = 1 \tag{39}$$

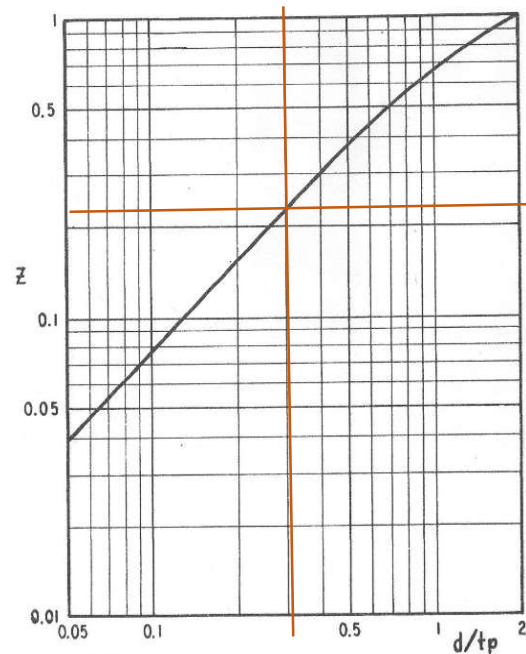
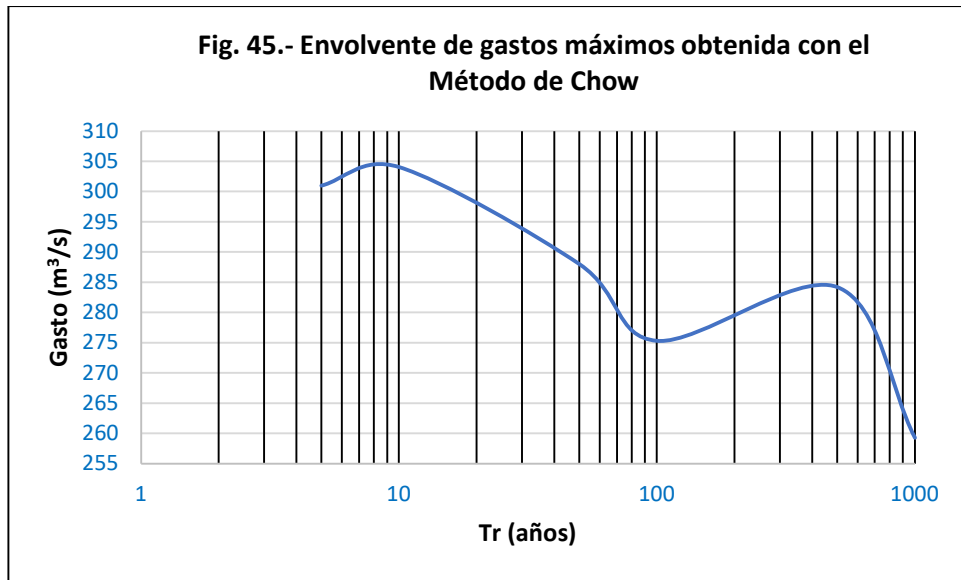


Fig. 44.- Gráfica de la relación entre z y d/t_p .

Los resultados obtenidos de la aplicación de este método se pueden apreciar en la Tabla 23. Considerando para este caso $N = 25$.

Tabla 23. Gastos máximos obtenidos con el Método de Chow				
Tirante	Tr (años)	i (mm/hr)	Q (m ³ /s)	Gasto
NAC	5.00	27.20	300.98	Q _{CO}
	10.00	30.20	304.05	
NADI	50.00	43.00	288.02	Q _{TDI}
	100.00	48.00	275.34	
N _{REVISIÓN}	500.00	62.40	284.20	Q _{REVISIÓN}
	1000.00	71.30	259.28	



Gasto de diseño

De acuerdo con los resultados obtenidos en los Métodos Racional, Hidrograma Unitario Triangular y de Ven Te Chow, al calcular los gastos máximos que permiten el diseño y la construcción del puente en sus distintas etapas, se seleccionan para estos los indicados en la Tabla 24.

Tabla 24. Gastos máximos para el diseño y construcción del Puente.

Tirante	Tr años)	Q (m³/s)	Gasto	Método
NAC	5	278.82	Q _{CO}	Hidrograma Unitario Triangular
NADI	50	288.02	Q _{TDI}	Ven Te Chow
Revisión Superestructura	500	284.20	Q _{REVISIÓN}	Ven Te Chow
Revisión Cimentación	1000	297.12	Q _{REVISIÓN}	Racional

Conclusiones

Tabla 25.- Resumen del Estudio Hidrológico del Río Limón.		
Concepto	Valor	Unidades
A. De la microcuenca.		
Tipo	Exorreica	
Perímetro	41.55	Km
Área	74.95	Km ²
Tamaño y forma	Pequeña alargada	
Pendiente media	0.34771	m/m
Elevación media	2099.83	m
B. De la corriente.		
Longitud	15.88	Km
Pendiente media	0.07023	m/m
Orden de escurrimientos	4	
Longitud de tributarios	133.05	km
Densidad de corrientes	1.17	
Densidad de drenaje	1.78	
Tiempo de concentración	93	min.
Intensidad de la precipitación NADI	43	mm/hr
Intensidad de la precipitación NAC	27.2	mm/hr
<i>Gasto de diseño NADI</i>	<i>288.02</i>	<i>m³/s</i>
<i>Gasto de diseño NAC</i>	<i>278.82</i>	<i>m³/s</i>

- I. La microcuenca es de tipo exorreica.
- II. De acuerdo con el valor del área, la microcuenca está catalogada como pequeña, su figura es alargada y en combinación con su pendiente, el escurrimiento tendrá mayor sensibilidad a lluvias de alta intensidad y corta duración registrando avenidas pronunciadas.
- III. El arreglo de los escurrimientos naturales dentro de ella da indicios de una razonable eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante.
- IV. El grado de bifurcación de los escurrimientos dentro de la microcuenca, es bueno.
- V. Por el número de tributarios, se puede considerar que la microcuenca está bien drenada y por lo tanto de buena respuesta ante las precipitaciones.
- VI. El valor del gasto de diseño que se recomienda emplear para el NADI es el que proporciona el Método de Ven Te Chow, debido a que es el valor más alto obtenido después de compararlo con los que proporcionan los otros métodos aplicados. Por lo tanto, se considera el más desfavorable para el caso que nos ocupa. Y es el que será empleado para el dimensionamiento del Puente. Como mención especial y particular en este caso, si así lo considera la experiencia del Ingeniero Proyectista y dado los resultados obtenidos este gasto puede emplearse para realizar la revisión de la superestructura y la cimentación. Estos cálculos no se presentan, debido a que quedan lejos de los alcances propuestos en los objetivos.
- VII. El valor del gasto de diseño que se recomienda emplear para el NAC es el que proporciona el Método del Hidrograma Unitario Triangular...

3.2 ESTUDIO TOPOHIDRÁULICO DE LA CORRIENTE RÍO LIMÓN



Fig. 45- Vista aguas abajo del cauce Río Limón, se resalta la protección con bordo para dirigir la corriente.

ANTECEDENTES

De la visita de campo se pudo observar que el Río Limón es un cauce ancho con gran capacidad de arrastre de sólidos y cuerpos flotantes, inestable y por lo tanto divagante, en el que la geometría de su sección, así como la dirección dominante de la corriente dependen del caudal circulante. Esto implica que con el paso de las avenidas su geometría cambia considerablemente, provocando que el brazo principal pueda encontrarse tan pronto en un lugar como en otro.

Por tal motivo, se solicitan los estudios necesarios que tomen en cuenta las condiciones sociales, topográficas, e hidrológicas que prevalecen en la zona, así como las hidráulicas de la corriente, que coadyuven a la solución apropiada de la estructura que permita salvar el Río Limón y dar continuidad al trazo del camino que une los poblados de La Unión y San Juan Bautista Atlatluca, con seguridad y sin que se vea afectada por las crecientes del mencionado cauce.

OBJETIVO

Transitar la avenida de diseño sobre las secciones del cauce Río Limón en la zona de cruce con el camino que comunica al poblado de la Unión con el de San Juan Bautista Atlatlahuca, para definir los niveles de agua y de esta manera determinar los parámetros necesarios para el Diseño Hidráulico del nuevo Puente que salvara el cauce mencionado.

Recopilación de información

- a. Del Estudio Hidrológico de la microcuenca de drenaje de la corriente Río Limón, se obtiene el gasto de diseño para el dimensionamiento del Puente (Tabla 25).

Gasto de diseño para el dimensionamiento del Puente.				
Método de Chow	288.02	m ³ /s	(Tr = 50 años)	NADI

- b. Para el Estudio Hidráulico de la corriente se realizó el levantamiento topográfico del Río Limón en la zona de cruce con el camino de la Unión a San Juan Bautista Atlatlahuca, lo que permitió definir la configuración de la planta topográfica general (Fig. 46), el perfil del cauce (Fig. 47) y las secciones transversales del mismo a cada 20 m. (Fig. 48 a51), los cuales se muestra en los Anexo A, B y C, respectivamente. Además, se agrega en el Anexo D la codificación para el HEC-RAS de las secciones transversales.
- c. Para la Modelación Hidráulica, se empleará el software HEC-RAS.

MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA CORRIENTE CON HEC-RAS

Hipótesis y límites de modelación

El software HEC-RAS determina el perfil hidráulico del flujo en la zona de estudio, considerando los efectos causados por la forma de las secciones transversales del cauce, así como el de los obstáculos a lo largo de su lecho.

El procedimiento de cálculo para obtener la elevación de la superficie del agua en la sección transversal se basa en la solución iterativa de las ecuaciones de Bernoulli y de pérdida de energía.

Las expresiones analíticas empleadas en el programa asumen de manera implícita las siguientes hipótesis:

- El flujo es permanente (estable).
- El flujo es gradualmente variado.
- El flujo es unidimensional (los componentes de la velocidad en direcciones distintas a la del flujo, no se toman en cuenta).
- Los canales de río tienen pendientes "pequeñas" (menor de 1 a 10 %).
- El programa no tiene la capacidad de trabajar con fronteras móviles (transporte de sedimentos).

SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL RÍO LIMÓN

A continuación, se incluye imágenes representativas, de la aplicación del software HEC-RAS a la modelación del Río Limón en la zona de estudio.

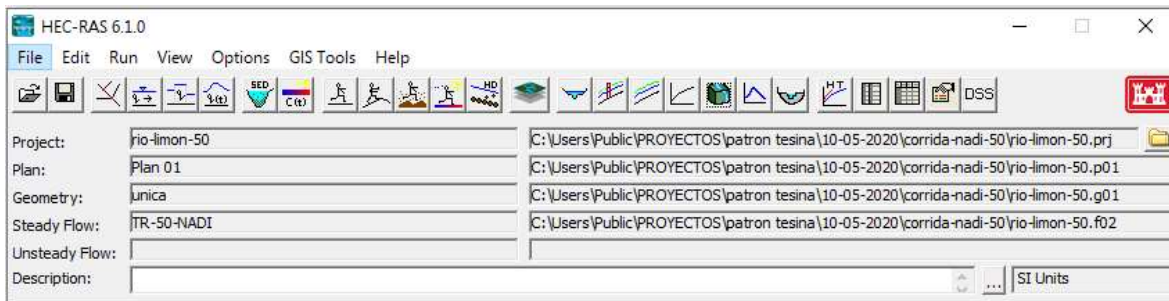


Figura 52.-Plataforma del software HEC-RAS, con la que se calcula el NADI.

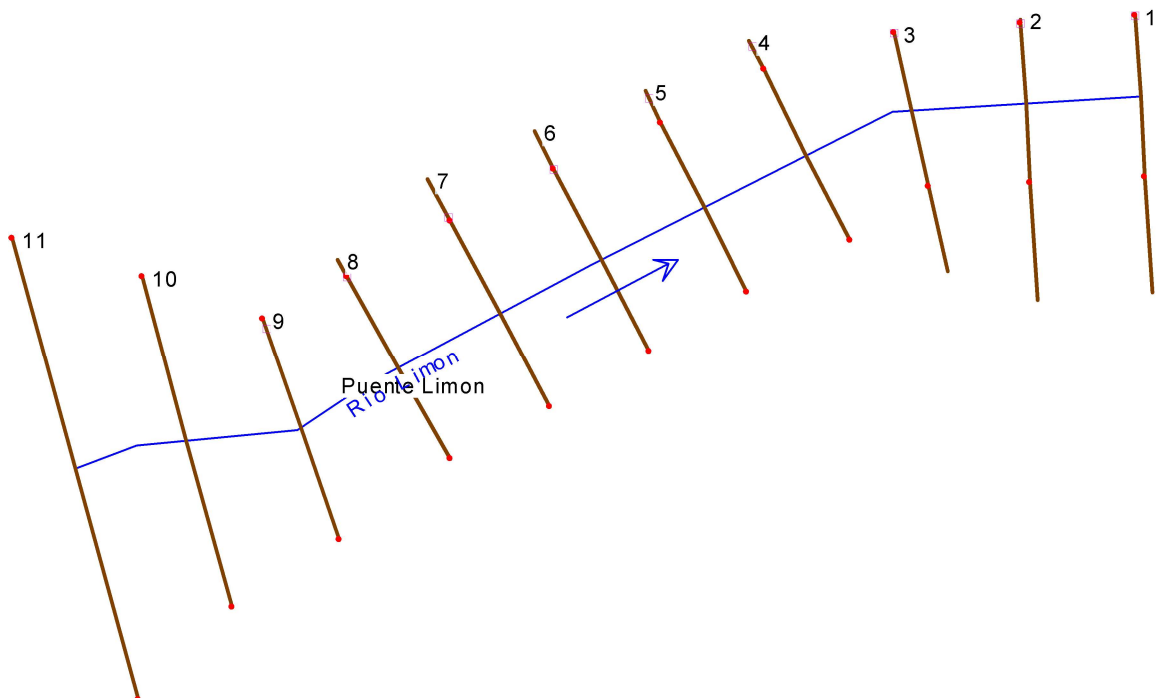


Figura 53.-Planta esquema de la Simulación hidráulica de la corriente Río Limón.

La codificación de secciones transversales del Río Limón para HEC-RAS, se muestra en el Anexo D. La Sección 06 localizada en el cadenamiento km 1+520, se ubica sobre el eje del Puente. A continuación de la Fig. 54 a 66 se muestran los resultados del HEC-RAS para el NADI, que es con el que se definen las dimensiones del Puente.

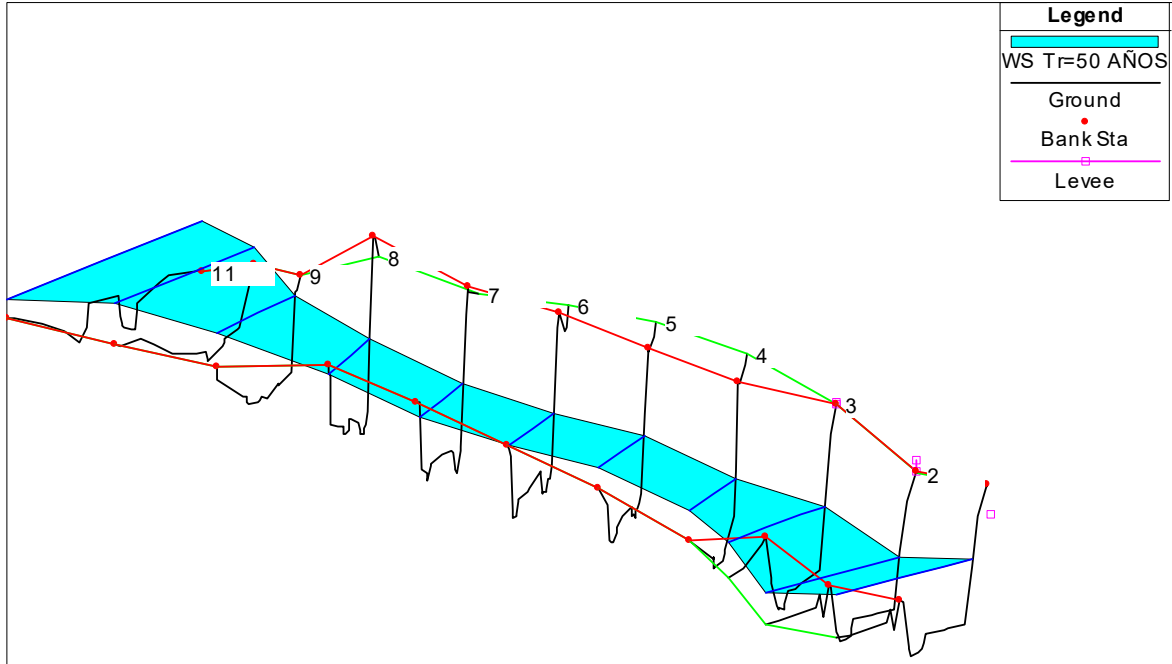


Figura 54.-Perfil longitudinal 3D del NADI sobre el cauce del Río Limón en la zona de estudio. La sección 06 esta sobre el eje del Puente.

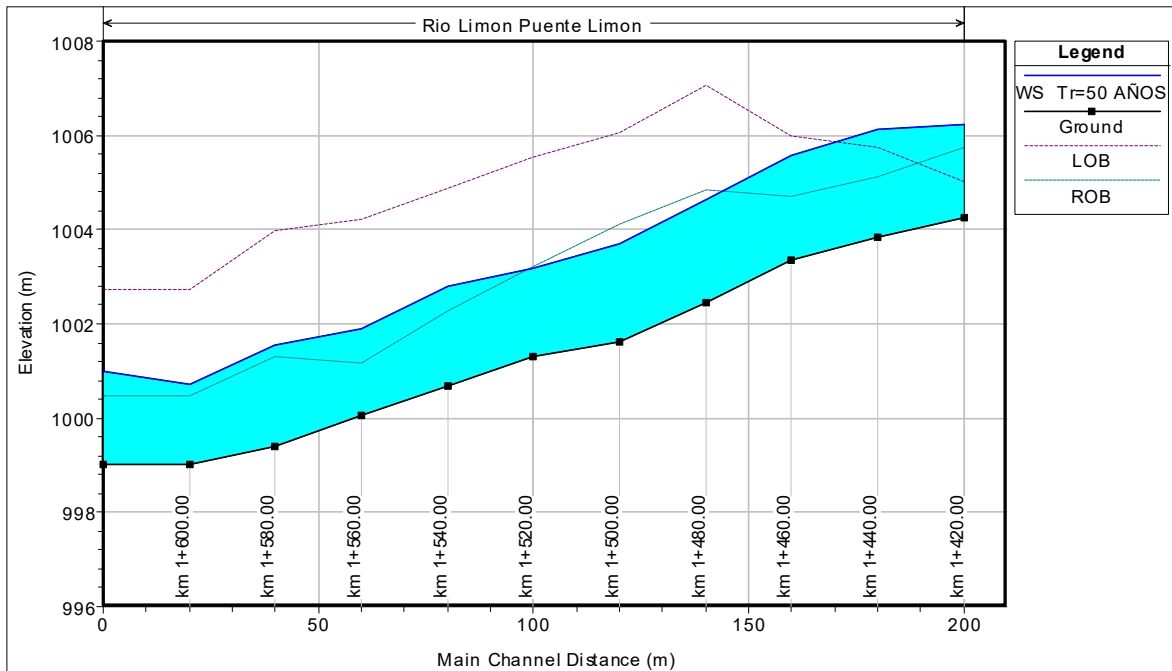


Figura 55.-Perfil longitudinal del NADI sobre el cauce del Río Limón en la zona de estudio. La sección 06 esta sobre el eje del Puente.

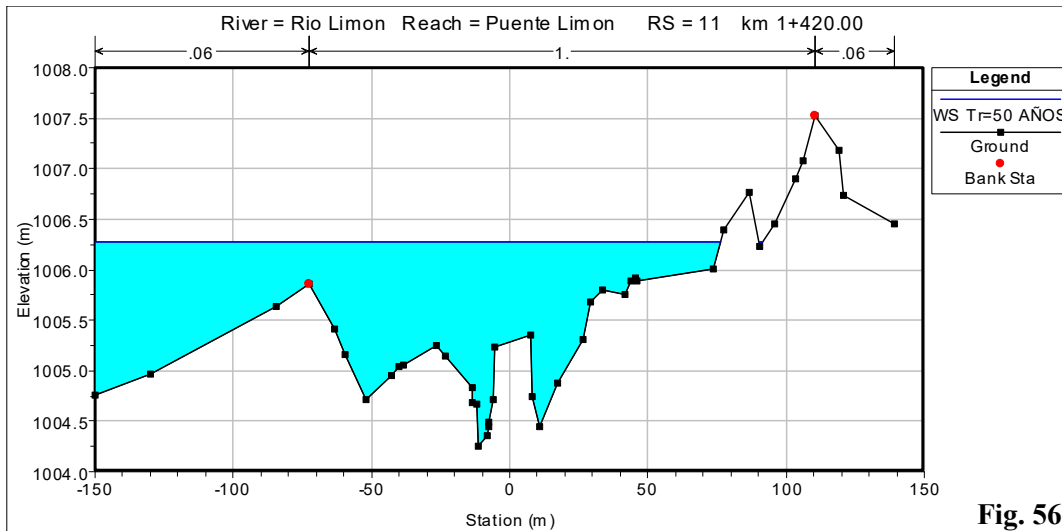


Fig. 56

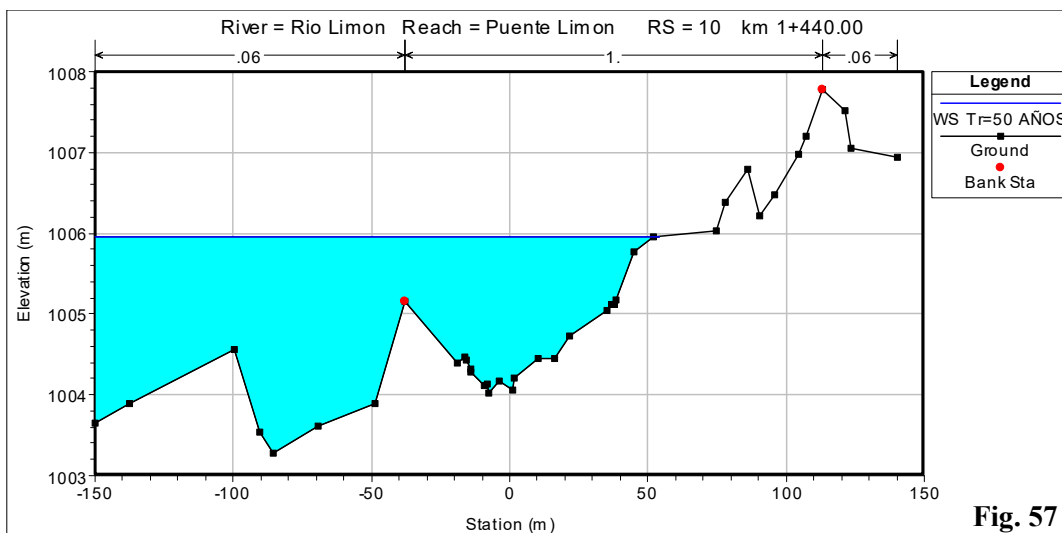


Fig. 57

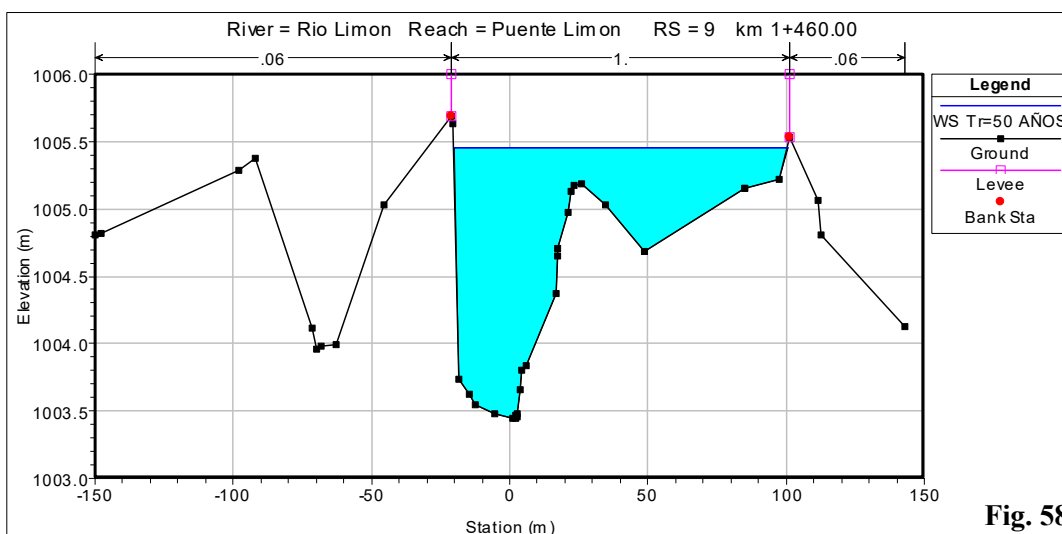
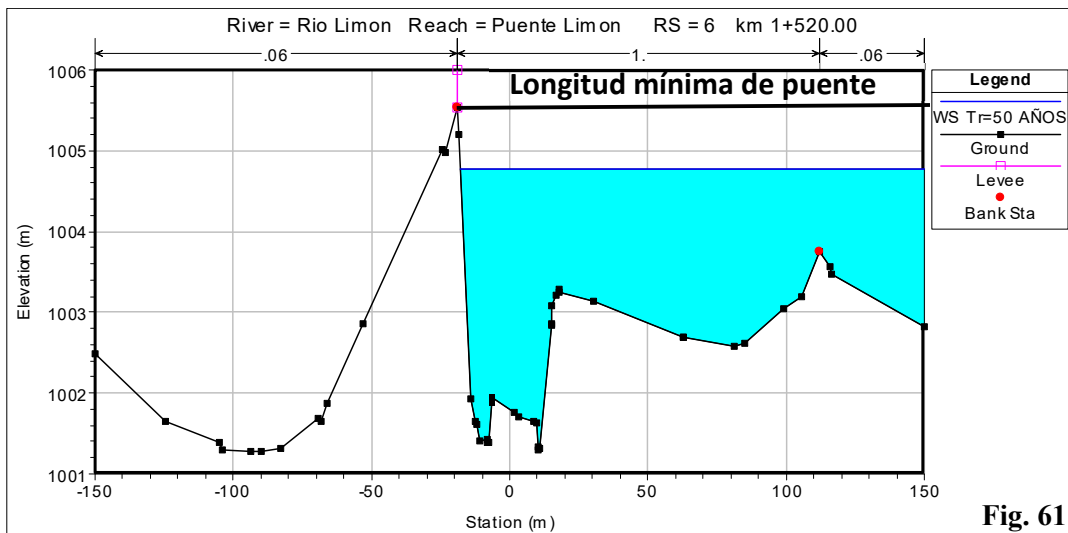
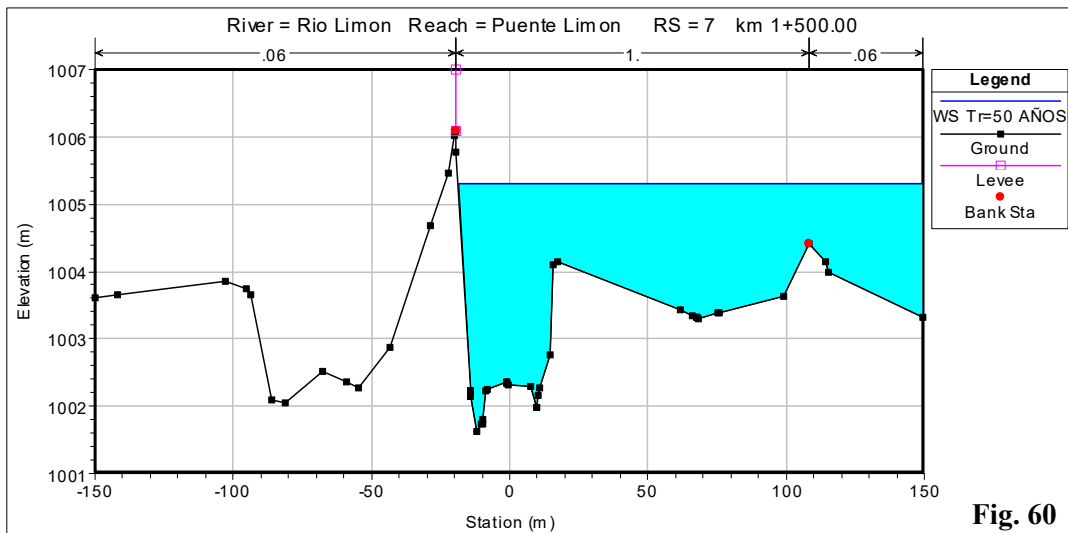
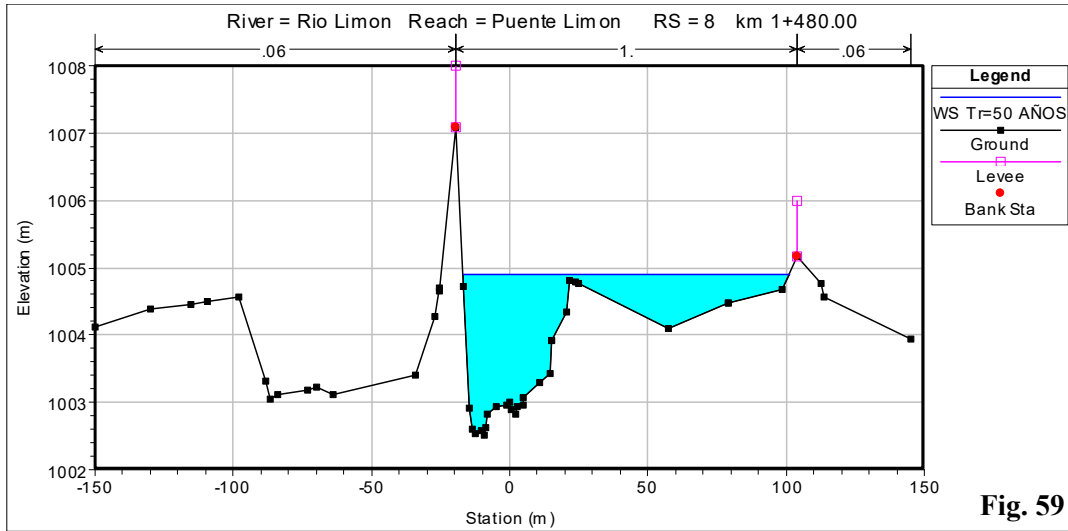
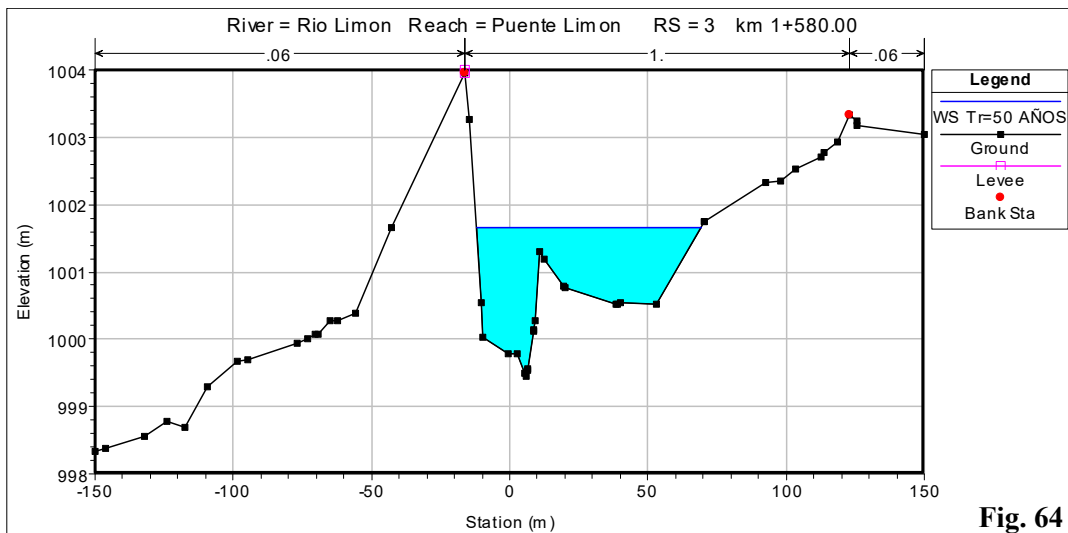
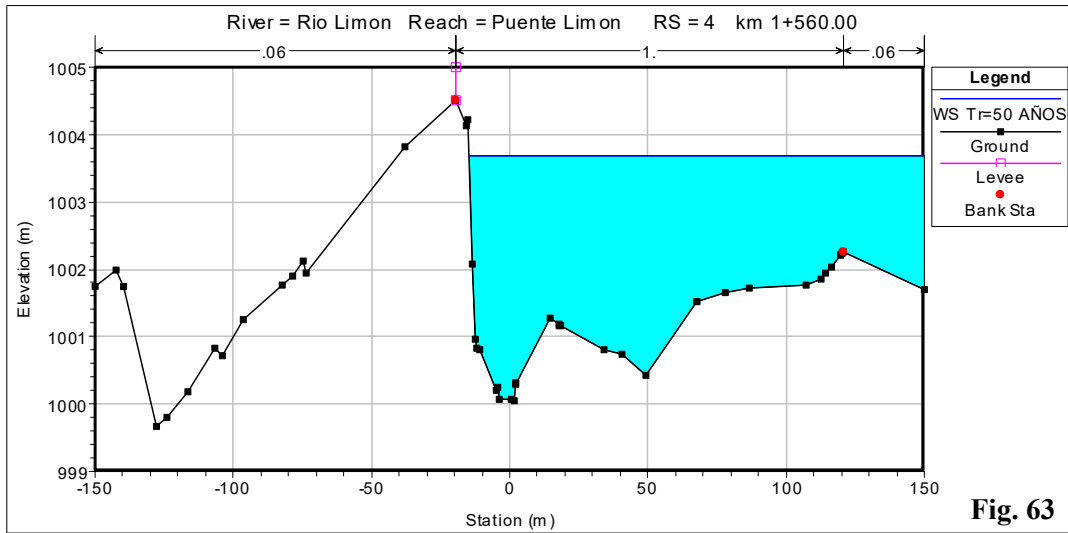
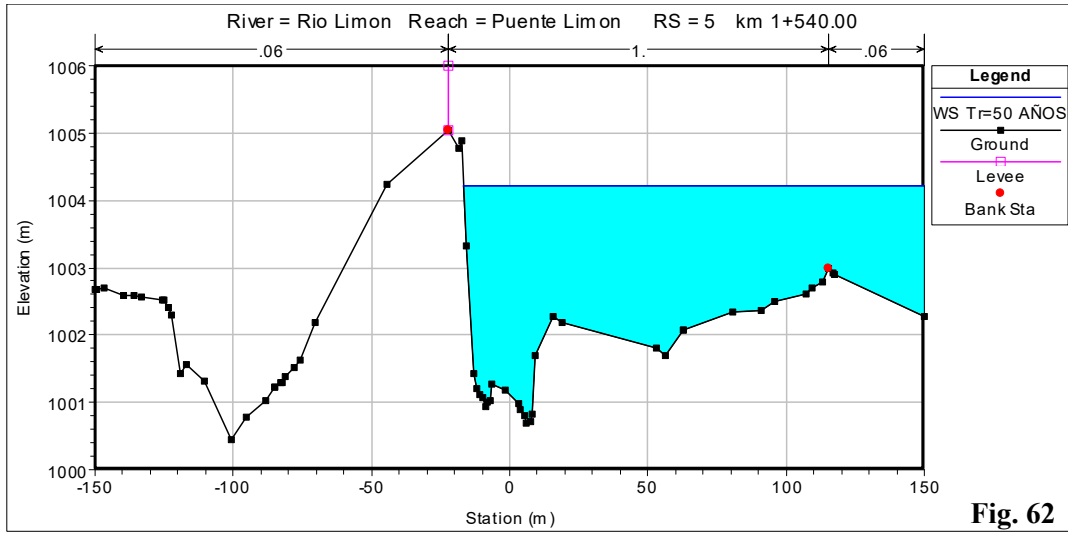


Fig. 58





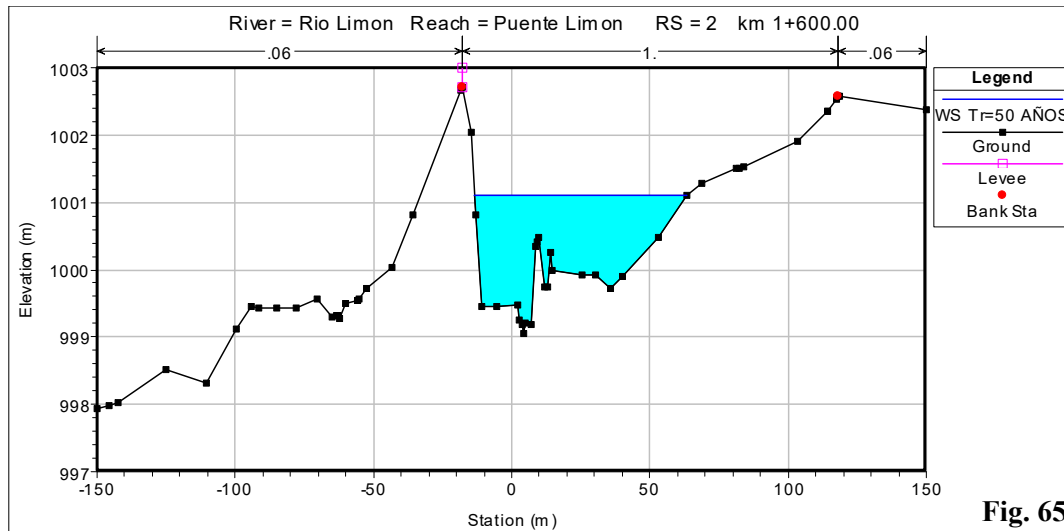


Fig. 65

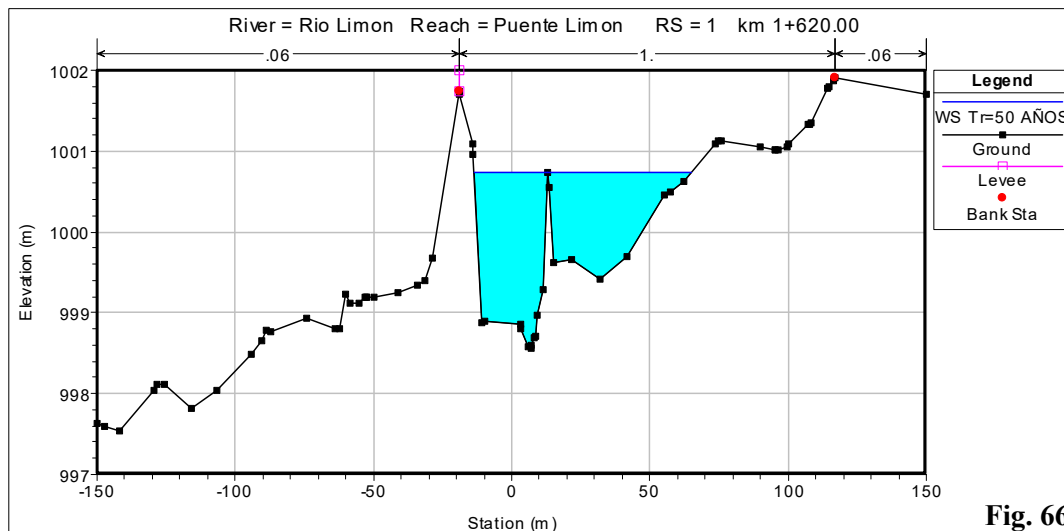


Fig. 66

Tabla 26.- Resultados de la simulación hidráulica sobre el cauce del Río Limón.

HEC-RAS Plan:												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Puente Limon	11	Tr=50 AÑOS	288.02	1004.25	1006.22	1006.16	1006.71	0.006490	3.07	93.81	82.86	0.92
Puente Limon	10	Tr=50 AÑOS	288.02	1003.83	1006.13	1006.60	1006.60	0.003996	3.04	94.89	59.25	0.77
Puente Limon	9	Tr=50 AÑOS	288.02	1003.37	1005.56	1005.56	1006.46	0.006644	4.19	68.67	37.86	0.99
Puente Limon	8	Tr=50 AÑOS	288.02	1002.44	1004.64	1005.06	1006.21	0.013736	5.54	51.98	32.71	1.40
Puente Limon	7	Tr=50 AÑOS	288.02	1001.62	1003.69	1004.36	1005.81	0.021706	6.45	44.67	31.57	1.73
Puente Limon	6	Tr=50 AÑOS	288.02	1001.30	1003.16	1003.82	1005.36	0.023135	6.56	43.89	31.77	1.78
Puente Limon	5	Tr=50 AÑOS	288.02	1000.70	1002.79	1003.42	1004.90	0.020496	6.42	44.83	30.52	1.69
Puente Limon	4	Tr=50 AÑOS	288.02	1000.05	1001.89	1002.64	1004.38	0.028072	6.99	41.20	31.40	1.95
Puente Limon	3	Tr=50 AÑOS	288.02	999.40	1001.55	1002.23	1003.82	0.021966	6.98	45.65	37.85	1.78
Puente Limon	2	Tr=50 AÑOS	288.02	999.02	1000.71	1001.42	1003.23	0.036735	7.58	42.28	42.81	2.20
Puente Limon	1	Tr=50 AÑOS	288.02	999.02	1001.01	1001.42	1002.45	0.015760	5.68	55.38	43.30	1.49

INFORME TÉCNICO**INFORME TOPOHIDRÁULICO-HIDROLÓGICO****CORRIENTE: RÍO LIMÓN.****CRUCE CON EL CAMINO: QUE UNE AL POBLADO DE LA UNIÓN CON LOS DE SAN JOSÉ ARAGÓN
Y SAN JUAN BAUTISTA ATATLAHUCA.****I. ASPECTOS GENERALES**

La corriente nace a 15.88 km del sitio de cruce y desemboca a 0.360 km, en el Río “Las Vueltas”, sin que su descarga provoque influencia hidráulica en el cruce. El área de la cuenca drenada hasta el cruce es de 74.95 km² y pertenece a la Región Hidrológica N° 28 “Cuenca del Papaloapan”, según clasificación de la CNA. En la zona de cruce, predomina la vegetación de cultivo y en general se puede clasificar como de tipo cálido húmedo con lluvias todo el año y la topografía es sensiblemente plana.

El cauce en la zona de cruce es:

sinuoso	estable	encajonado
sensiblemente recto	divagante	con llanuras de inundación
_____ X _____	_____ X _____	_____ _____

COMENTARIO: La geometría de su sección, así como la dirección dominante de la corriente dependen del caudal circulante. Escurre en crecidas atípicas o no hacia el Río Las Vueltas, sin impacto al Puente La Unión debido a que descarga 1.4 km agua arriba de este y a que converge en la dirección de su corriente.

El escurrimiento es de carácter torrencial **X** perenne **X** intermitente

Tipo y longitud máxima de los cuerpos flotantes árboles hasta de 15 m de longitud.

El período de lluvias en la región comprende los meses de junio a octubre y la precipitación media anual es de 1550 mm.

Geología superficial:

en el fondo arcilla y limo
 en la margen izquierda arcilla limosa
 en la margen derecha arcilla limosa

El eje del trazo respecto a la corriente cruza en dirección

normal X esviado ángulo de esviajamiento

El paso actual de vehículos se efectúa por el Puente La Unión.

II. ANÁLISIS HIDROLOGICO

Información utilizada Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrológicas y Carta topográfica E14D37 de San Francisco Telixtlahuaca, ambos editados por el INEGI.

Planos de Isoyetas de Intensidad-Duración-Periodo de Retorno para la República Mexicana, editados por la SCT 2015 y <http://www.cuencapaloapan.org/tucuenca.php>.

Métodos aplicados Racional, Hidrograma Unitario Triangular y Ven Te Chow.

Se obtuvo un gasto teórico de diseño (Q_{TD}) de 288.02 m³/s asociado a un período de retorno de 50 años, que corresponde al obtenido con el método de V. T. Chow.

OBSERVACIONES: (fuente de información, confiabilidad, etc.).

La confiabilidad en la información obtenida es muy buena, ya que se consideró la última versión del INEGI (2020) y la SCT (2015), para la zona en estudio. Y el gasto obtenido por el método de Chow, es adecuado conforme se plantea en el Estudio Hidrológico.

III. ANÁLISIS HIDRÁULICO

Se determinó un gasto de diseño (Q_D) de 288.02 m³/s asociado a un período de retorno de 50 años.

Nivel de aguas de construcción (NAC) m.

Nivel de aguas de diseño (NADI) 1005.36 m.

Secciones levantadas A cada 20 m, para hacer un total de 11 comprendiendo 5 hacia aguas arriba, una sobre el eje del puente y 5 hacia aguas abajo.

OBSERVACIONES: (fuente de información, confiabilidad, etc.).

Los niveles de agua se estimaron con el software HEC-RAS.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se debe adoptar como gasto de diseño (Q_{DI}) 288.02 m³/s.

El puente debe tener una longitud mínima de 150.00 m, ubicado del km. 4+075 al km. 4+225, con claros no menores de 30.00 m.

El espacio libre vertical entre el NADI y el lecho inferior de la superestructura debe ser de 1.70 m. como mínimo. La velocidad máxima sobre la obra será de 6.56 m/s y la sobreelevación de la superficie del agua NADI m.

Obras auxiliares propuestas para protección, encauzamiento, etc. Para garantizar el buen funcionamiento hidráulico de la corriente en la zona de cruce es necesario generar una morfología estable del cauce, encauzando la corriente.

OBSERVACIONES:

Converge con el Río Las Vueltas formando un ángulo de 48° en dirección de la corriente de este y de acuerdo con lo observado en campo en una zona de la margen derecha que el Río Limón ha erosionado.

CONCLUSIONES

1. Se aceptan las hipótesis del programa HEC-RAS en la simulación del tránsito del gasto de diseño sobre las secciones transversales del Río Limón en la zona del cruce con el camino que une al poblado de La Unión con los de San José Aragón y San Juan Bautista Atatlahuca, respecto a
 - *Flujo permanente*, ya que no se incluye términos dependientes del tiempo en la ecuación de la energía.
 - *Flujo gradualmente variado*, puesto que se considera una distribución de presión hidrostática en cada sección transversal y
 - Flujo unidimensional, debido a que la pendiente del canal es baja y la carga total de energía es la misma en todos los puntos de una sección transversal.
2. La morfología del cauce es divagante y en la zona de cruce es sensiblemente recta con escurrimiento torrencial perenne. La longitud máxima de los cuerpos flotantes es de 15 m. La geología en la zona de cruce se determinó como arcilla limosa. El eje del trazo respecto a la corriente cruza en dirección normal.
3. El Río Limón es un cauce ancho con gran capacidad de arrastre de sólidos y cuerpos flotantes, en el que la geometría de su sección, así como la dirección dominante de la corriente dependen del caudal circulante. Escurre en crecidas atípicas o no hacia el Río Las Vueltas, sin impacto al Puente La Unión debido a que descarga 1.4 km agua arriba de este y a que converge en la dirección de su corriente.
4. Se debe garantizar el buen funcionamiento hidráulico de la corriente en la zona de cruce, siendo necesario como obra auxiliar encauzarla para generar una morfología estable del cauce.
5. El resumen de los parámetros hidráulicos en el Río Limón se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27.- Resumen de parámetros hidráulicos de la corriente sobre el cauce del Río Limón.		
Concepto	Valor	Unidad
Gasto de diseño NADI	288.02	m ³ /s
Período de retorno NADI	50	años
Elevación NADI	1005.36	m
Velocidad del flujo	6.56	m/s
Tirante	4.06	m

6. Las dimensiones definidas para el Puente que cruza el Río Limón, se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28.- Dimensiones del Puente que cruza el Río Limón.		
Dimensión	Valor	Unidad
Longitud mínima	150.00	m
Claros no menores de	30.00	m.
Galibo vertical mínimo	1.70	m
Galibo horizontal	30.00	m
Elevación lecho bajo de superestructura	1007.06	m

7. De lo observado en campo, el escurrimiento atípico o no del Río las Vueltas no impacta la descarga del Río Limón y consecuentemente no ejerce influencia alguna en la zona de cruce de este con el Puente nuevo que dará continuidad al trazo del camino que une los poblados de La Unión y San Juan Bautista Atlatlahuca, por la razón de que converge a 48° en la dirección de la corriente del Río Las Vueltas y dicha descarga preferentemente erosiona la margen derecha de este último.

CONCLUSIONES



El tránsito de una avenida atípica sobre el río Chiquito, Oax. México provocó el colapso del terraplén de salida y azolvamiento del puente. Archivo del autor diciembre del 2012.

¿Qué sabe el pez del agua donde nada toda su vida

Albert Einstein

A. RESPECTO A LOS MÉTODOS

1. La relación funcional ψ , es una propuesta que hago para visualizar de manera rápida la conexión entre las variables que gobiernan el diseño hidráulico del puente. La considero de utilidad práctica para una respuesta pronta en el predimensionamiento hidráulico y de precisión en el definitivo, incluso de cualquier obra hidráulica sobre el cauce. Debe investigarse para calibrarse y profundizar su alcance, de entrada, la solución a la que conlleva es a la del enfoque tradicional.
2. La estructura de los elementos de la relación funcional ψ , permite una distinción clara y organizacional de las áreas que intervienen para lograr el diseño hidráulico del puente, lo que, con el enfoque clásico, confunde, revuelve y dificulta la visualización de la influencia de conexión que tienen.
3. En la relación funcional ψ , θ en su concepción permite considerar un modelo climático de circulación que bien podría ser uno atípico o el del actual cambio climático. Reestructurando por esta influencia, la filosofía del diseño hidráulico del puente en cuanto a los períodos de retorno y el gasto de diseño.
4. Es frecuente sobre la base de la inexperiencia que se opte por aceptar una determinada técnica, método o modelo de cálculo para resolver un problema específico, sin una idea comprensiva del mismo y desconociendo su verdadera capacidad para lograrlo.
5. Es imprescindible comprender rigurosamente los fundamentos teóricos y la metodología del diseño hidráulico de puentes dentro del marco de una normativa para el uso de modelos matemáticos y software apropiado.
6. Dado los resultados obtenidos el gasto definido para el dimensionamiento del Puente puede emplearse para llevar a cabo la revisión de la superestructura y la cimentación. En este trabajo no se muestran tales cálculos, debido a que quedan lejos de los alcances propuestos en los objetivos.
7. Aunque los eventos atípicos, infrecuentes o extremos de los procesos hidrológicos involucrados en el diseño hidráulico del puente, también se registran, estos se descartan para el análisis hidrológico, debido a que se les considera que no son representativos del ambiente climático local, lo que les da la calidad de perturbados y por lo tanto no homogéneos con el comportamiento de la muestra. Ya que si se les

considerara estos crean inconsistencias y sobredimensionamiento en la proyección de las obras hidráulicas.

8. Dado el impacto que tiene en los puentes la recurrencia de avenidas intensas y extremas producidas por el cambio climático, apremia la investigación que permita considerar en un rango de características representativas sus efectos en el dimensionamiento de puentes con una tendencia normativa y no de desastre.
9. El río es una corriente de agua que puede ser permanente, intermitente o efímera, está constituido por un cauce formado en condiciones naturales, que junto con el flujo transporta una cierta cantidad de material sólido o sedimento en suspensión y de fondo. Además, en las laderas y en el canal principal se presentan diferentes tipos de vegetación. Estos cuatro elementos: cauce, agua, sedimentos y vegetación (interviene en los procesos morfológicos y en la resistencia hidráulica), se influyen mutuamente y dan lugar a un determinado tipo de comportamiento particular en cada tramo.
10. Cuando el cauce no se protege, este se puede socavar debido al estrechamiento o contracción y a las altas velocidades del flujo y no existe una solución única, por lo cual la socavación depende del claro del puente o viceversa, lo mismo que de las condiciones geológicas y geotécnicas en el tramo del ponteadero.
11. Respecto a los puentes construidos en la ciudad, generalmente los ríos se encuentran canalizados y muchas veces regulados, por lo cual no existen contracciones del cauce aun en crecientes y en ese caso todo el espejo de agua o ancho de superficie libre se cubre con el puente.
12. Un puente se construye para operar durante un número alto de años, en la etapa de diseño se consideran las condiciones de estabilidad del cruce y sus posibles deformaciones. En este tiempo las condiciones de socavación pueden variar, lo mismo que la configuración en planta del río, debido a posibles erosiones laterales, a los procesos morfológicos o a la divagación del cauce por otros conceptos.

B. REFERENTES A LAS NORMAS: (NIT-SCT) N PRY CAR 1 a 6 006/18

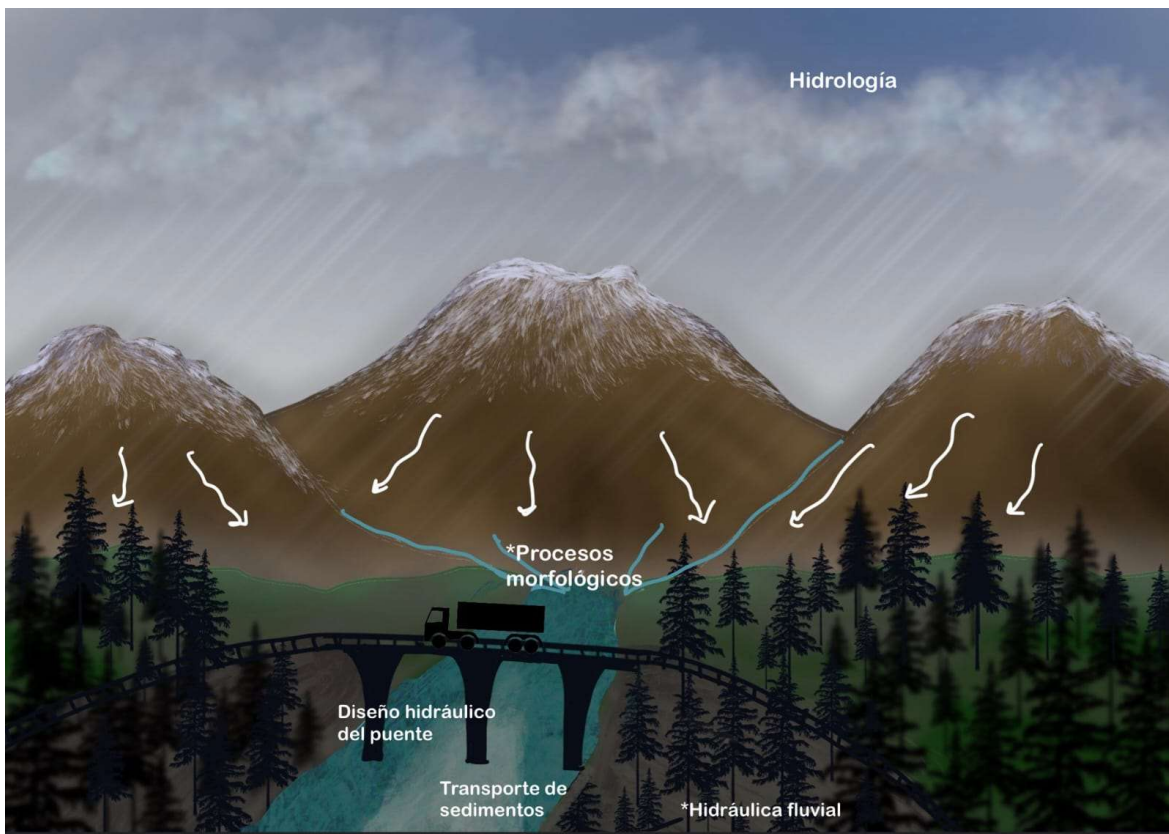
13. Con la finalidad de evitar diseños hidráulicos deficientes o sobredimensionados, es importante que se regule el grado de detalle que se debe alcanzar en los estudios hidrológicos e hidráulicos.
14. Sería de gran utilidad para optimizar el diseño hidráulico, el reglamentar el empleo de modelos unidimensionales o bidimensionales de simulación hidráulica, para no dejar al proyectista la decisión del tipo de análisis que debe realizar.
15. Deben incluir lineamientos para el tratamiento de avenidas atípicas o infrecuentes (baja frecuencia y gran magnitud).
16. No cuenta con preceptos que enmarquen criterios para el tratamiento en el análisis hidrológico, de los procesos hidrológicos extremos derivados del cambio climático, por lo que de inmediato debe impulsarse la investigación y orientar esfuerzos en este sentido para considerarlos.
17. Es indispensable una actualización de la norma, para estandarizar entre otros aspectos, el análisis de la socavación.

C. DEL CASO DE ESTUDIO: PUENTE RÍO LIMÓN

18. La consecuencia de subestimar la capacidad hidráulica de un puente es la falla estructural o colapso de este, lo que deja, por un lado, en riesgo a la carretera en ese punto y fuertes pérdidas socioeconómicas y por otro, para evitar que esto suceda es necesaria la inversión elevada en tiempo, mantenimiento y conservación.
19. La necesidad de reducir costos privilegia en general un mayor desarrollo de terraplenes en desmedro de mayores longitudes de puentes, provocando estrechamientos significativos de la corriente en el cruce con el puente, que se manifiestan como una sobreelevación del nivel de agua y altas velocidades, las cuales provocan tensiones de corte en el sedimento por encima de la crítica, lo que favorece el comienzo de movimiento importantes de tasas de transporte de sedimentos debido al incremento de la capacidad de arrastre de la corriente en la zona de emplazamiento del puente, que en gran parte de los casos, dejan expuesta la cimentación. Con lo que luego comienzan los asentamientos diferenciales de los apoyos.

20. Existen dos situaciones que no son analizadas en el desarrollo de esta tesina por la razón de no estar enmarcadas como parte de los objetivos planteados y que a saber son:
- a. La primera, es que no se analiza la confluencia de los Ríos Las Vueltas y Limón al no ejercerse influencia mutua que afecta al Puente Unión o al nuevo Puente, respectivamente. De llegar a ser necesario en algún caso, debe ampliarse la metodología expuesta respecto a el análisis hidrológico-hidráulico teniendo como soporte el estudio topográfico ampliado (dado que esta situación no está reglamentada), para así describir el comportamiento hidráulico del cauce Río Limón afectado por esta condición en la zona de cruce con el puente que de pie a definir sus dimensiones.
 - b. Tampoco se mencionó la manera en cómo debe tomarse en cuenta en el diseño hidráulico del nuevo puente, la existencia de otros aguas arriba de este. Debido a que en el caso de estudio presentado no existe puente alguno aguas arriba del diseñado.

REFERENCIAS



Arroyo Bastida Hilda Alejandra. "Relación funcional del puente con el binomio cauce-corriente". Cortesía, dibujo realizado para esta Tesina. Fecha de actualización: 06 de junio de 2020.

*"Todos somos muy ignorantes.
Lo que ocurre es que no todos ignoramos las mismas cosas"*

Albert Einstein

R E F E R E N C I A S

- Alvarado, R. (2018, Julio 04). *Colapso de Puentes: un Problema en el Manejo del Agua y de los Sedimentos*. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. <http://uchile.cl/n144771>
- Arneson, L., Zevenbergen, L., Lagasse, P. & Clopper, P. (2012). *Evaluating Scour at Bridges*. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Hydraulic Engineering Circular No. 18.
- Arroyo, P. (2019). *Análisis Hidrológico Superficial*. Apuntes personales del curso de Hidrología, UNAM, FES Aragón.
- Arroyo, P. (2010). *Funcionamiento hidráulico de canales*. Apuntes personales del curso de Hidráulica de Canales, UNAM, FES Aragón.
- Barbosa, S (2013). *Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de gravas)*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. <http://bdigital.unal.edu.co/11674/1/1128416170.2013.pdf>
- Delgado, J., Jiménez, O., Martínez, L., González, J. & Hernández, S. (2010). *Relación entre la falla de puentes vehiculares producida por eventos hidrológicos extraordinarios y la falta de mantenimiento*. [XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural]. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Guanajuato. www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_16/te_07/ar_08.pdf
- Espinoza, D., Gómez, C., & Carrillo, J. (2010). *Vulnerabilidad por socavación de puentes carreteros ante avenidas*. [XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural]. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Guanajuato. www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_16/te_08/ar_19.pdf
- Fattorelli, S & Fernández, P. (2011). *Diseño Hidrológico*. Water Assessment & Advisory Global Network.
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT). (2018). *Normativa para la infraestructura del Transporte*. Recuperado de: <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#06>
- Leal, G. (2018). Diseño hidráulico de cruces carreteros y puentes. *Tlálloc*, 68, 32 - 37. <http://amh.org.mx/wp-content/uploads/2018/08/Tlaloc68-final.pdf>

- Martín, P. (2003). *Ingeniería de ríos*. Alfaomega, México.
- Ochoa, T. (2011). *Hidráulica de Ríos y Procesos Morfológicos*. ECOE. Colombia.
- Ochoa, T. (2011). *Hidrología, Hidráulica y Socavación en Puente*. ECOE. Colombia
- Olaya, J., Dewez, R., Guerrero, P., Lefevre, B., Nalesso, M., Zuloaga, D. (2020). *Incluir el cambio climático en el análisis hidrológico para el trazado y diseño de infraestructura del transporte*. Banco Interamericano de Desarrollo, Nota Técnica No. IDB-TN-01860.
https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Incluir_el_cambio_clim%C3%A1tico_en_el_an%C3%A1lisis_hidrol%C3%B3gico_para_el_trazado_y_dise%C3%B1o_de_infraestructura_de_transporte_Gu%C3%ADa_metodol%C3%B3gica_e_implementaci%C3%B3n_en_33_puentes_vehiculares_en_Hait%C3%AD.pdf
- Perozo, M. & Rincon, J. (2015). Evaluación hidráulica de un puente sobre una quebrada con régimen mixto y lecho móvil. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(1), 16 – 30.
<http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v36n1/riha02115.pdf>
- Plasencia-Lozano, P. (2014). Puentes, sociedad e ingeniería. *Informes de la Construcción*, 66(535), 1 – 9.
informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/3487/3922
- Seaurz, Alisson (2006). *Dimensionamiento hidráulico optimizado de puentes con terraplenes*. Tesis de licenciatura. Universidad de Pirua.
https://www.academia.edu/24339028/HIDRAULICA_DE_PUENTES
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Dirección General de Servicios Técnicos. (2015). *Isoyetas de Intensidad - Duración - Periodo de retorno para la República Mexicana*. Recuperado de:
<http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/oaxaca.pdf>
- Tarback, E., Lutgens, F. K. y Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación S. A. Madrid.

ANEXOS



Puente de Kintaikyo-Iwakuni, Japón. Imagen tomada del sitio: <http://www.vacacionviajes.com/blog/wp-content/uploads/2012/08/Puente-de-Kintaikyo-Iwakuni-Jap%C3%B3n-1024x680.jpg>_ Fecha de actualización: 06 de junio del 2020.

*“Locura es hacer la misma cosa una y otra vez
esperando obtener diferentes resultados”*

Albert Einstein

ANEXO A

PLANO TOPOGRÁFICO: PLANTA GENERAL DEL CAUCE RÍO LIMÓN

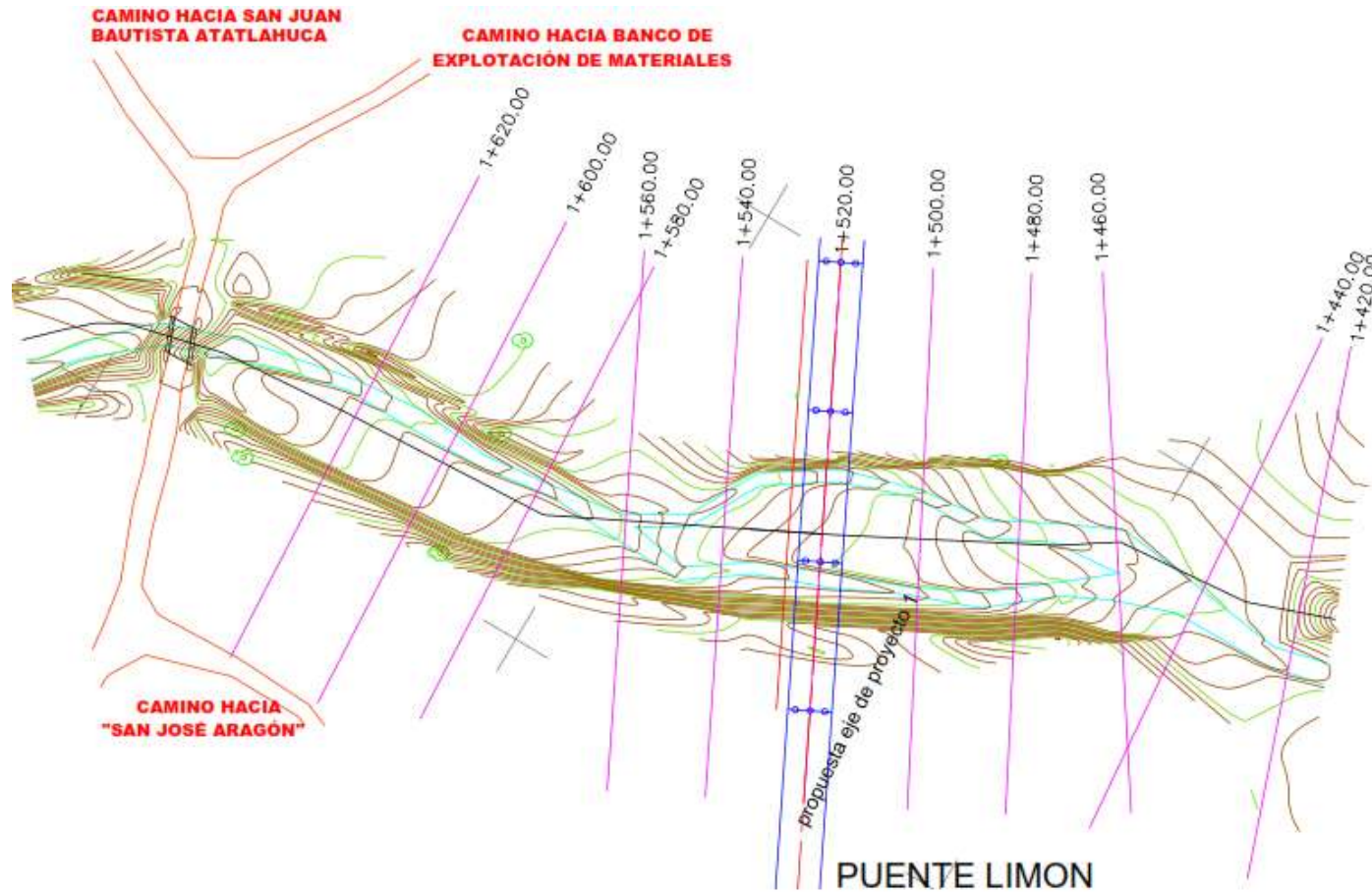


Figura 46.- Plano topográfico de la planta general del Río Limón, en la zona de estudio.

ANEXO B

PLANO TOPOGRÁFICO: PERFIL DEL CAUCE RÍO LIMÓN

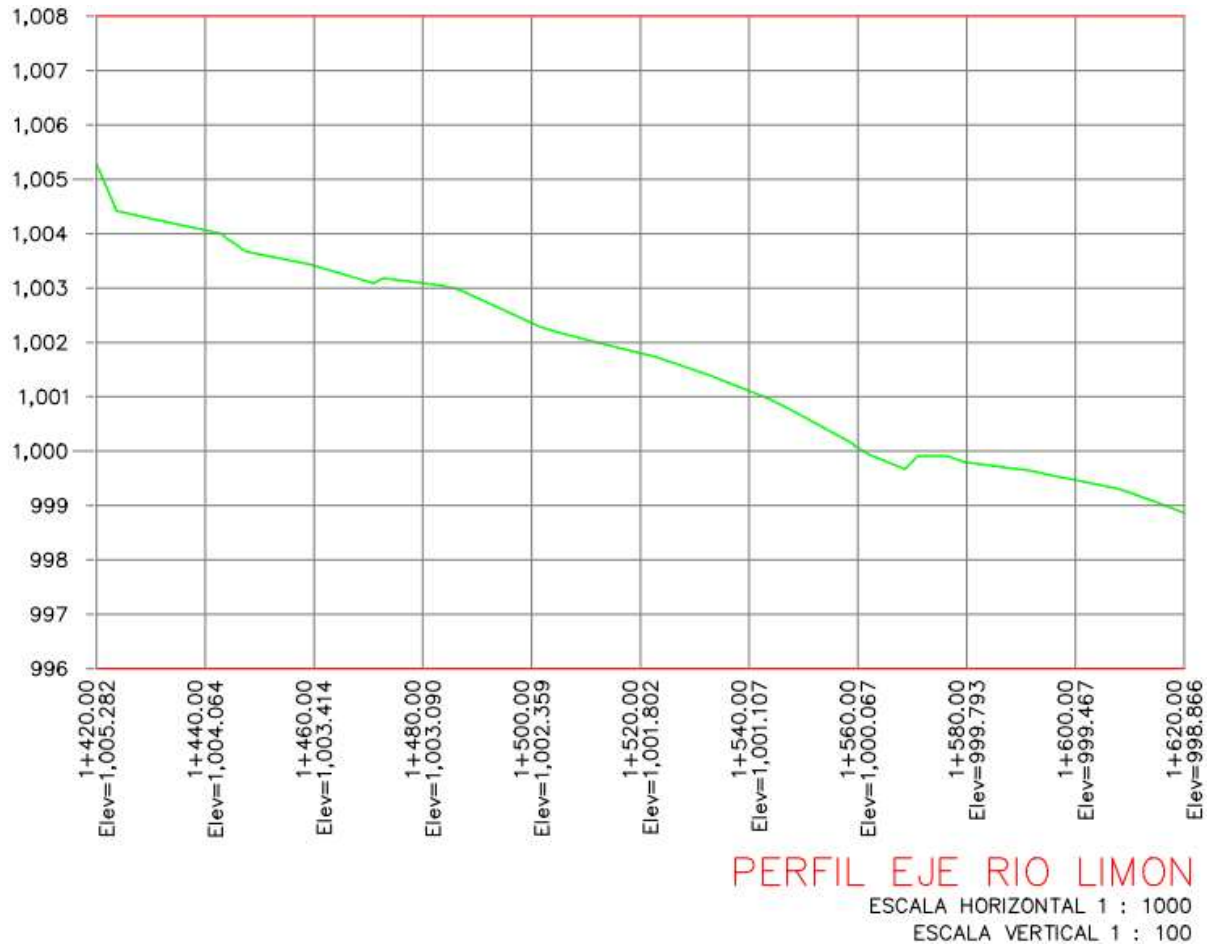


Figura 47.- Perfil del cauce Río Limón, en la zona de estudio.

ANEXO C

PLANO TOPOGRÁFICO: SECCIONES TRANSVERSALES DEL CAUCE RÍO LIMÓN

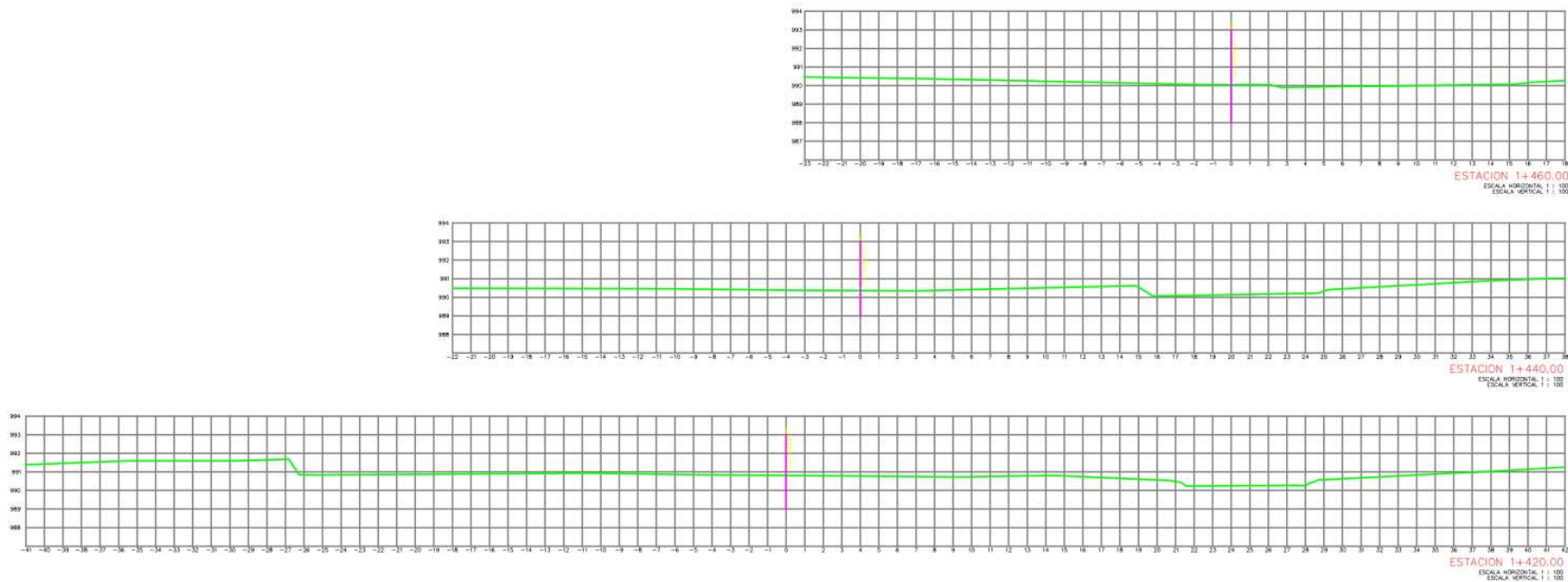


Figura 48.- Secciones transversales del cauce Río Limón, del km 1+420 al 1+460.

ANEXO C (cont)

PLANO TOPOGRÁFICO:

SECCIONES TRANSVERSALES DEL CAUCE RÍO LIMÓN

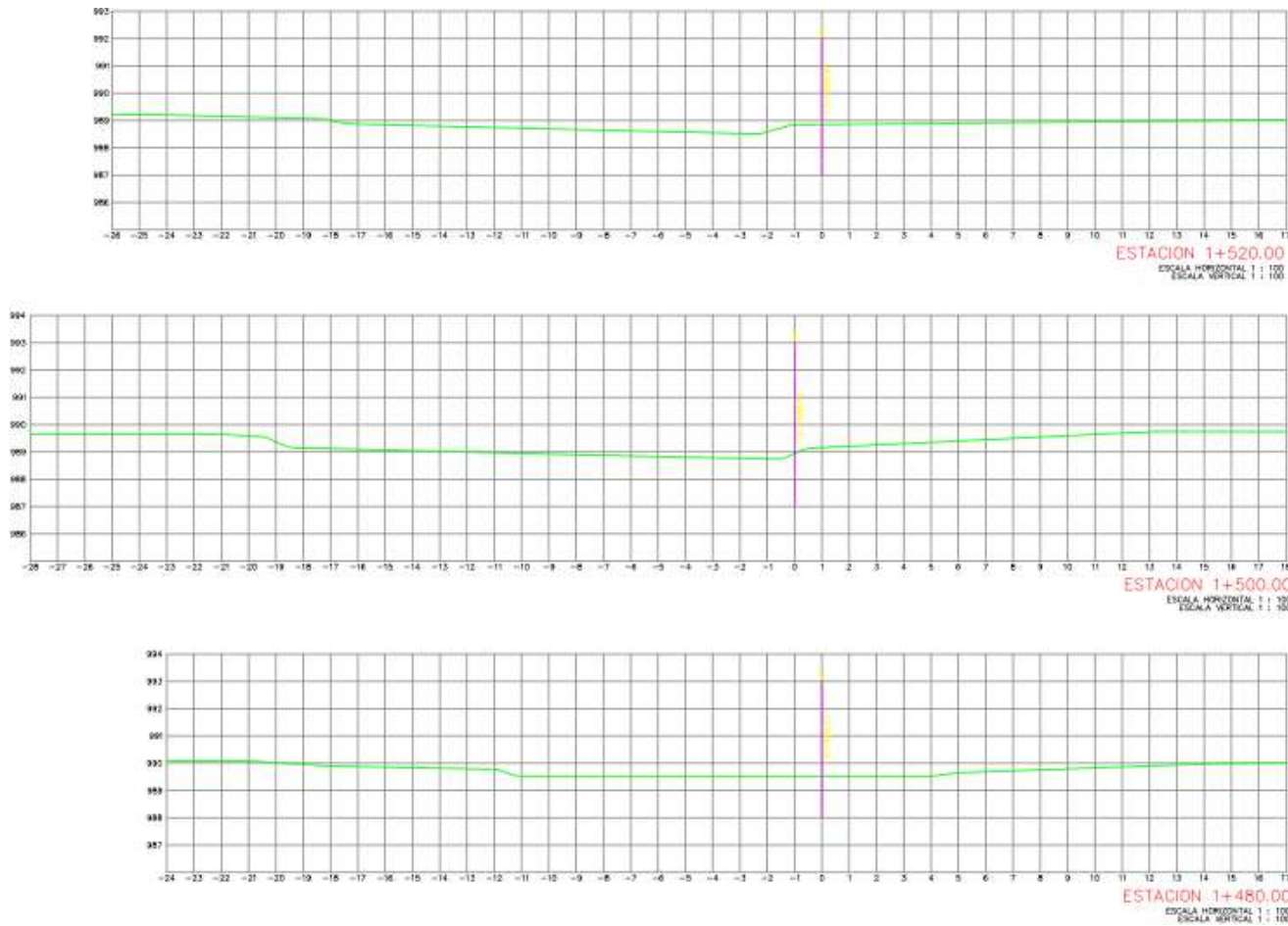


Figura 49.- Secciones transversales del cauce Río Limón, del km 1+480 al 1+520.

ANEXO C (cont)

PLANO TOPOGRÁFICO: SECCIONES TRANSVERSALES DEL CAUCE RÍO LIMÓN

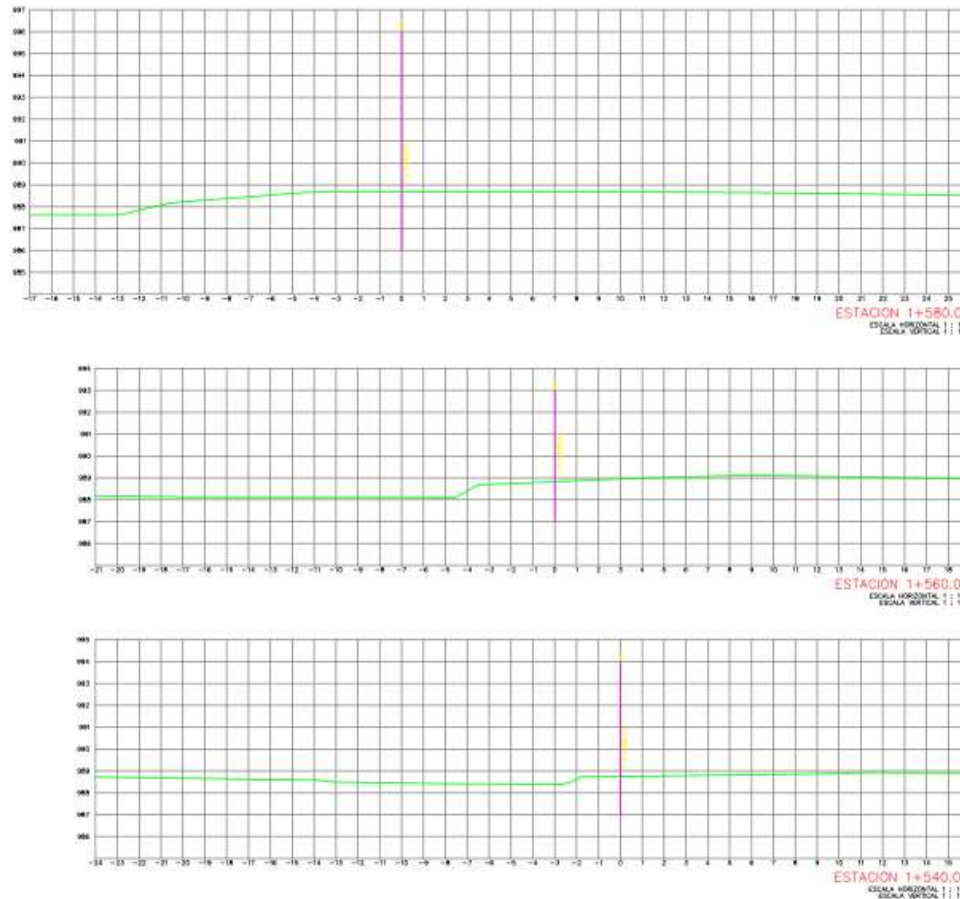


Figura 50.- Secciones transversales del cauce Río Limón, del km 1+540 al 1+580.

ANEXO C (cont.)

PLANO TOPOGRÁFICO:

SECCIONES TRANSVERSALES DEL CAUCE RÍO LIMÓN

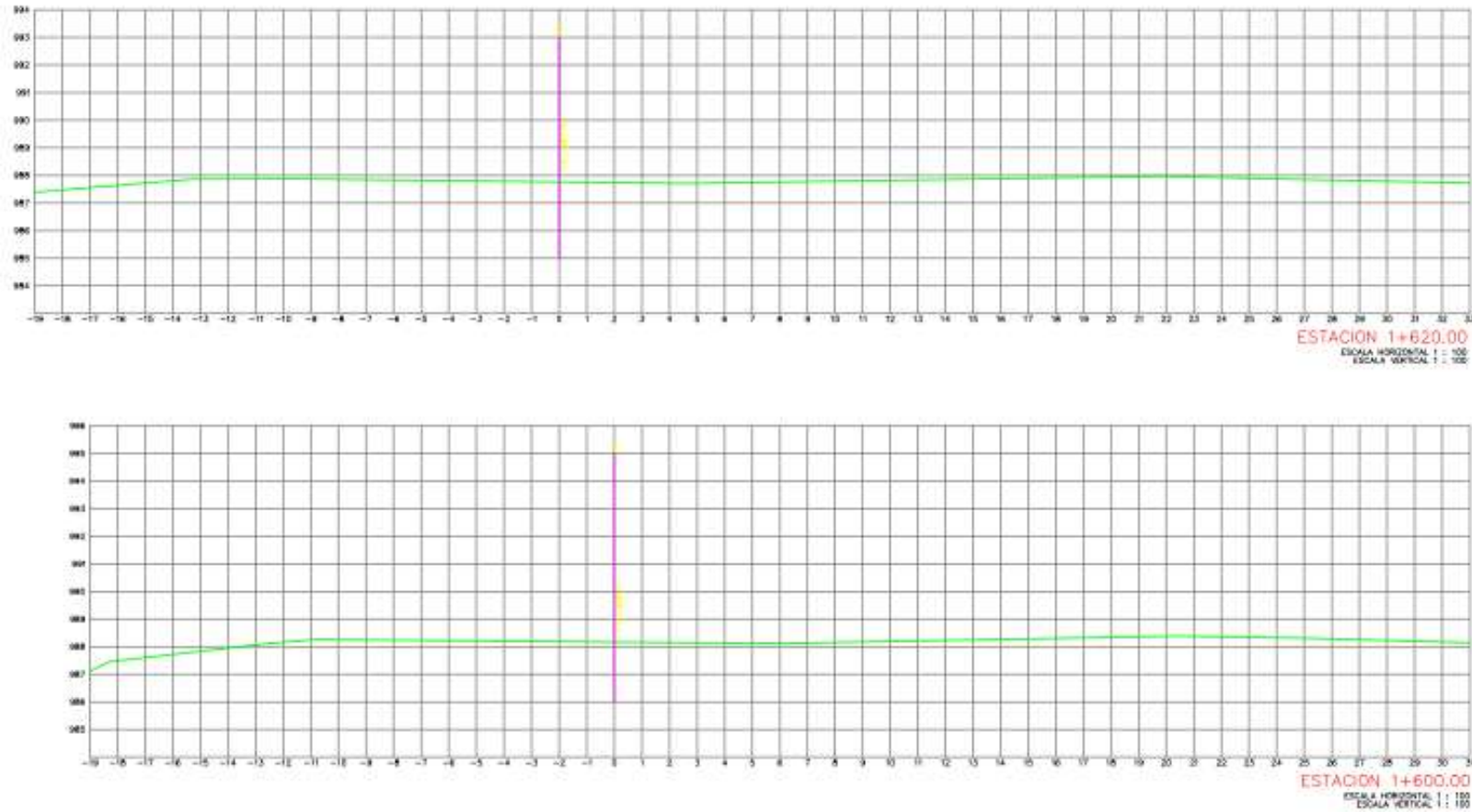


Figura 51.- Secciones transversales del cauce Río Limón, del km 1+600 al 1+620.

ANEXO D**CODIFICACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEL CAUCE RÍO LIMÓN, PARA HER-RAS**

Sección 11		km 1+420		Sección 10		km 1+440		Sección 09		km 1+460	
Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación	Distancia al eje	Elevación
(m)	(msnm)	(m)	(msnm)	(m)	(msnm)	(m)	(msnm)	(m)	(msnm)	(m)	(msnm)
-41.04	1005.01	-21.55	1005.74	-22.81	1006						
-40.318	1005.044	-14.875	1004.34	-20.711	1005.67						
-38.275	1005.053	-14.145	1004.321	-20.362	1005.63						
-26.755	1005.246	-9.1015	1004.199	-18.354	1003.736						
-23.192	1005.142	-8.9356	1004.122	-14.698	1003.619						
-13.739	1004.841	-8.3407	1004.007	-12.416	1003.544						
-13.421	1004.677	-7.782	1004.031	-12.412	1003.575						
-12.474	1004.258	-1.6795	1003.829	-7.1012	1003.371						
-11.181	1004.254	-1.4944	1003.849	-3.9933	1003.487						
-8.29	1004.365	-0.6478	1004.06	-3.512	1003.366						
-7.5339	1004.441	2.9773	1004.092	2.1698	1003.439						
-7.3228	1004.485	13.6056	1004.361	2.6402	1003.449						
-6.0256	1004.711	21.3275	1004.757	2.7246	1003.475						
-5.2862	1005.229	26.5608	1005.022	3.5528	1003.652						
7.324	1005.353	35.1633	1005.048	4.7155	1003.677						
8.2031	1004.751	37.6985	1005.13	17.043	1004.366						
10.7741	1004.452			17.1997	1004.641						
17.1134	1004.876			17.5741	1004.702						
26.7548	1005.312										
38.3678	1005.696										
41.8167	1005.761										

Sección 08 km 1+480	
Distancia al eje	Elevación
(m)	(msnm)
-23.27	1006.51
-20.432	1007.045
-19.751	1007.08
-16.697	1004.716
-14.496	1002.914
-13.58	1002.614
-12.251	1002.547
-12.016	1002.439
-10.248	1002.487
-8.9757	1002.509
-8.4884	1002.623
-7.9993	1002.834
-4.6901	1002.952
-1.925	1003.062
-0.1186	1003.12
0.3423	1003.007
0.6957	1002.872
2.5409	1002.797
4.4107	1002.843
4.7892	1002.965
5.1169	1003.069
9.4977	1003.183
14.5261	1003.354
15.1348	1004.002
15.23	1004.009
15.5663	1004.558
16.3255	1004.675
16.5506	1004.861

Sección 07 km 1+500	
Distancia al eje	Elevación
(m)	(msnm)
-27.6	1005.64
-20.157	1005.87
-19.178	1006.041
-18.286	1005.357
-14.271	1002.216
-14.019	1002.134
-11.678	1001.619
-10.327	1001.733
-9.882	1001.745
-9.7596	1001.798
-8.8236	1002.22
-8	1002.249
-1.2824	1002.353
-0.8966	1002.365
7.3858	1002.329
7.4396	1002.31
7.8287	1002.12
8.0816	1002.11
9.7219	1001.979
9.8188	1001.97
10.4423	1002.171
14.2666	1002.393
15.6669	1003.985
15.6926	1003.994
15.8092	1004.057
17.2999	1004.102

Sección 06 km 1+520	
Distancia al eje	Elevación
(m)	(msnm)
-25.99	1005.55
-24.135	1005.021
-23.512	1004.979
-18.695	1005.532
-18.16	1005.195
-13.845	1001.923
-12.252	1001.645
-11.919	1001.622
-10.751	1001.402
-10.569	1001.363
-8.0826	1001.392
-7.7756	1001.396
-6.6995	1001.880
-6.5284	1001.941
1.5345	1001.767
3.289	1001.699
8.9049	1001.659
9.5638	1001.629
10.4165	1001.331
10.5098	1001.302
10.8967	1001.31
12.9994	1001.306
13.5732	1001.498
14.9173	1002.837
15.009	1002.865
15.3611	1003.077
16.8561	1003.214

Sección 05 km 1+540	
Distancia al eje	Elevación
(m)	(msnm)
-23.67	1005.35
-22.272	1005.05
-18.658	1004.778
-17.573	1004.887
-15.927	1003.324
-12.908	1001.428
-12.159	1001.214
-10.776	1001.115
-9.5093	1001.077
-8.82	1000.931
-8.3454	1001.011
-7.1212	1001.024
-6.4335	1001.272
-1.8373	1001.181
3.2674	1000.982
3.634	1000.888
6.0021	1000.699
7.4501	1000.722
7.8571	1000.819
9.4054	1001.69
15.4378	1002.269

Sección 04 km 1+560	
Distancia al eje	Elevación
(m)	(msnm)
-20.62	1004.77
-19.455	1004.52
-15.848	1004.138
-14.98	1004.224
-13.431	1002.074
-12.282	1000.97
-5.874	1000.33
-5.4834	1000.22
-4.8119	1000.047
0.1784	1000.065
0.4249	1000.057
0.5238	1000.072
1.3521	1000.055
2.0446	1000.316
2.1088	1000.3
16.6243	1001.096
18.023	1001.178
18.0931	1001.173
18.1614	1001.171

Sección 03 km 1+580	
Distancia al eje	Elevación
(m)	(msnm)
-16.37	1003.97
-14.601	1003.278
-10.467	1000.555
-9.6599	1000.038
-0.5512	999.7966
2.4373	999.7892
3.6049	999.4936
3.7959	999.4048
5.6956	999.4488
5.9808	999.4385
6.6136	999.5494
8.735	1000.123
8.8259	1000.144
9.1072	1000.284
10.8839	1001.315
12.5881	1001.189
20.0768	1000.767
25.8692	1000.682

Sección 02		km 1+600	
Distancia al eje	Elevación		
(m)	(msnm)		
-18.49	1002.67		
-17.92	1002.718		
-14.856	1002.038		
-12.852	1000.817		
-10.761	999.4567		
-5.5717	999.453		
1.9938	999.4718		
2.4854	999.2404		
2.9649	999.0979		
4.289	999.0399		
6.2453	999.0176		
6.9775	999.1893		
7.2176	999.2538		
9.0333	1000.402		
9.99	1000.472		
11.8585	999.7397		
-14.856	1002.038		
-12.852	1000.817		
12.9173	1000.28		
13.8679	999.9791		
25.7111	999.9079		
30.1256	999.925		

Sección 01		km 1+620	
Distancia al eje	Elevación		
(m)	(msnm)		
-18.97	1001.74		
-18.836	1001.71		
-14.204	1001.095		
-14.008	1000.968		
-10.84	998.8825		
-9.6473	998.8879		
2.9757	998.8647		
3.1908	998.8016		
3.9651	998.5246		
6.1932	998.5757		
7.009	998.5681		
7.1152	998.5964		
8.1576	998.6884		
8.5832	998.7145		
9.0832	998.9708		
11.27	999.2856		
12.8972	1000.735		
13.4585	1000.557		
15.1409	999.6219		
21.7417	999.6544		
32.1588	999.4184		