

Entre los métodos hidrológicos aceptados, el TR-55 (NRCS, 1986) es preferido para los estudios hidrológicos. Este método ha sido incluido en la aplicación HEC-HMS. El DRNA y la JP recomiendan el uso de la aplicación HEC-HMS para estudios hidrológicos en Puerto Rico.

para determinar las pérdidas de la lluvia y calcular la escorrentía. Entre ellas está el método del NRCS (TR-55), el cual es muy utilizado en Puerto Rico. También contiene otras técnicas, las cuales se ven en ocasiones limitadas en su uso debido a la falta de información requerida en su aplicación. HEC-HMS tiene además la posibilidad de integrar las herramientas de GIS a través de la aplicación GEO-HMS. El ingeniero deberá ser consistente en las

metodologías seleccionadas y evitar mezclar unas con otras.

4.7.1 Método del TR-55 del NRCS en HEC-HMS

El Informe Técnico Núm. 55 (TR-55) del SCS (hoy conocido por NRCS) contiene procedimientos para estimar el caudal como respuesta de una cuenca hidrográfica a un impulso de lluvia. Este método está incluido en la aplicación HEC-HMS. La aplicación HEC-HMS provee la oportunidad para crear varios modelos de lluvia-escorrentía, seleccionando de entre las varias técnicas, para calcular las pérdidas de la lluvia, flujo base, hidrogramas y rastreos en los canales de la red fluvial. Para efectos de la determinación de caudales de diseño, el HEC-HMS será ejecutado en modo de evento independiente.

4.7.1.1 Número de Curva (Curve Number, CN)

La aplicación HEC-HMS contiene varias técnicas de hidrograma unitario desarrolladas por el NRCS. En la estimación de las abstracciones hidrológicas (pérdidas) se usará el método del Número de Curva, descrito a continuación.

El ingeniero incluirá en su informe los mapas de suelo y uso de terreno utilizados en el cómputo del CN. En el cómputo del CN se excluirá la condición de humedad antecedente I (AMC-I).

El Número de Curva, (CN, por sus siglas en inglés) es un parámetro de escorrentía que engloba las condiciones de la superficie de la cuenca para la producción de escorrentía. Las condiciones de la superficie incluyen aquellas atribuibles a las condiciones y tipo de suelos, los usos de los terrenos y otros factores hidrológicos. El CN varía entre 0 y 100 donde el cero representa

que el 100 por ciento de la lluvia se ha retenido en el cuenca y no produce escorrentía mientras que el 100 indica que prácticamente toda la lluvia se ha convertido en escorrentía. El ingeniero incluirá en su informe los mapas de suelo y uso de terreno utilizados en el cómputo del CN. Estos mapas deben tener claramente marcados e identificados los límites de la cuenca y subcuencas. Se podrá utilizar herramientas de GIS para la preparación de

estos mapas y para el cómputo del CN. Los cálculos del CN deberán ser incluidos en un apéndice del estudio. En el cómputo del CN se excluirá la condición de humedad antecedente I (AMC-I).

4.7.1.2 Tiempo de concentración y de retardo

El método del NRCS recomienda únicamente dos maneras para calcular los parámetros de tiempo utilizados en esta técnica. Las mismas son conocidas como *Método de Velocidad* y *Método de Retardo* (Lag Method, por su nombre en inglés). Sin embargo, otras técnicas para calcular el tiempo de concentración pueden utilizarse si se demuestra que dichas técnicas aplican a las condiciones locales y no únicamente a las condiciones donde fueron desarrolladas.

El *método de velocidad* incluye el cálculo del tiempo de viaje de una partícula de agua dentro de la cuenca. El tiempo de viaje se calcula para tres tipos de regímenes de flujo diferentes, esto es, flujo como lámina sobre la superficie, flujo concentrado de poca profundidad, y flujo en canal abierto. Cada uno de estos regímenes cuenta con su propia técnica para determinar el tiempo de viaje y sus propias limitaciones. El ingeniero deberá referirse al Informe Técnico Núm. 55 (TR-55) del NRCS para más detalles. El tiempo de concentración es el tiempo que le toma a una partícula de agua viajar desde el punto más lejano de la cuenca, hidráulicamente hablando, hasta llegar al punto de interés.

El ingeniero deberá presentar el valor de todos los parámetros utilizados en el cómputo del tiempo de retardo. El HEC-HMS requiere el ingreso del tiempo de retardo en minutos u horas. Si el ingeniero calcula el tiempo de concentración podrá utilizar la relación $T_{lag} = 0.6 T_c$ para obtener el tiempo de retardo.

El *método de retardo* requiere el uso del CN, del largo hidráulico de la cuenca y de la pendiente promedio de la superficie de la cuenca. Hasta el presente el uso de este método era tedioso y consumía mucho tiempo, específicamente para determinar la pendiente promedio de la cuenca. Sin embargo, con la ayuda de las nuevas herramientas de GIS, el cómputo de la pendiente promedio de la superficie de la cuenca se ha simplificado en gran manera. No obstante, el ingeniero deberá ejercer precaución al utilizar las herramientas de

GIS. El uso y aplicación incorrecta de los modelos de elevación digital (DEM) pueden producir valores errados en áreas escarpadas con altas pendientes. Para estos casos se requiere el uso de DEMs con resolución espacial de 10 metros o menos. El ingeniero deberá presentar el valor de todos los parámetros utilizados en el cómputo del tiempo de retardo. El HEC-HMS requiere el ingreso del tiempo de retardo en minutos u horas. Si el ingeniero

calcula el tiempo de concentración podrá utilizar la relación $T_{lag} = 0.6 T_c$ para obtener el tiempo de retardo.

4.7.2 Intervalo de tiempo computacional

El ingeniero utilizará el tamaño de intervalo de tiempo más pequeño posible sin recibir avisos o advertencias del modelo al respecto. El tamaño más pequeño es de un minuto.

Este es el *intervalo de tiempo* utilizado por HEC-HMS para realizar los cálculos del hidrograma de escorrentía. El tamaño de este intervalo tiene influencia en la magnitud del caudal pico determinado por el modelo. El ingeniero utilizará el tamaño de intervalo de tiempo más pequeño posible sin recibir avisos o advertencias del modelo al respecto.

El tamaño más pequeño es de un minuto. El tiempo al pico también es influenciado por este parámetro de tiempo.

Si el intervalo de tiempo de computación de un minuto funciona bien para eventos de lluvia de 24 horas de duración, entonces se utilizará un minuto para el intervalo de tiempo de computación para eventos de lluvia de menor duración. Intervalos de tiempo entre 1 y 5 minutos parecen dar resultados razonables para eventos de lluvia de 24 horas de duración.

El ingeniero debe estar consciente que el intervalo de tiempo de computación es distinto al intervalo de tiempo de los datos de lluvia. Consecuentemente, la aplicación HEC-HMS interpolará los valores de lluvia para aquellos intervalos de tiempo de computación para los cuales no se ha provisto información en los datos ingresados.

4.8 Otros modelos

Si el ingeniero pretende utilizar otros modelos hidrológicos deberá consultar por escrito y brindar una justificación al DRNA y la JP previo a la preparación del estudio para establecer detalles de su aplicación.

4.9 Calibración y verificación del modelo

Un modelo de simulación hidrológico, sin importar cuál sea, contiene parámetros que definen las condiciones particulares de la cuenca bajo estudio. Estos parámetros, usualmente con valores constantes durante el tiempo de la simulación, deben ser determinados usando datos locales. El valor verdadero de estos parámetros nunca es conocido, por lo que se introducen errores en los resultados del modelo.

Calibrar un modelo es buscar los valores de los parámetros del modelo que produzcan los errores mínimos en la respuesta del mismo. Para minimizar los errores en los resultados, se han desarrollado técnicas y procedimientos que garantizan la reducción

Para minimizar los errores en los resultados, se han desarrollado técnicas y procedimientos que garantizan la reducción de los errores en los resultados. Estas técnicas se conocen como calibración del modelo.

de los errores en los resultados. Estas técnicas se conocen como calibración del modelo.

La calibración puede ser manual o automatizada. En una calibración manual el ingeniero trata diferentes valores para los parámetros y compara el resultado del modelo con datos observados. Usualmente la comparación se realiza mediante la observación de diagramas que muestran el comportamiento de los residuales y utilizando estadísticas que definen el comportamiento de los residuales. El ingeniero ejerce entonces su juicio profesional para seleccionar la mejor combinación de valores de los parámetros. La calibración manual es requerida cuando la aplicación

de lluvia-escorrentía utilizada no contiene módulos, o subrutinas, de calibración.

La calibración automatizada realiza la búsqueda de la mejor combinación de los valores de los parámetros que produzca el menor error posible en los resultados. Este proceso se lleva a cabo utilizando métodos de búsqueda automáticos junto a un criterio para medir el error (función objetiva). El ingeniero ejerce su juicio profesional sobre los resultados de la calibración automatizada y decide si la misma fue exitosa o si necesita ser ajustada. La aplicación HEC-HMS contiene un módulo de calibración.

Existe una gran variedad de técnicas o métodos de búsqueda y criterios de errores (funciones objetivas) que pueden ser utilizados para calibrar un modelo. El ingeniero debe tener un conocimiento mínimo sobre técnicas de calibración para seleccionar adecuadamente el método aplicable.

Una vez el modelo es satisfactoriamente calibrado, se debe verificar utilizando datos observados diferentes a los empleados en la calibración. Los mismos criterios para medir la bondad de ajuste de los parámetros durante la calibración pueden ser utilizados para establecer las bondades de la verificación.

En ocasiones es difícil calibrar un modelo por falta de datos observados adecuados para este propósito. En este caso, el ingeniero incluirá en su informe todas las gestiones realizadas para calibrar el modelo y las razones por las cuales no se pudo realizar la misma. Sin embargo, se incluirá un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo que identifique aquellos parámetros de mayor influencia en los resultados del modelo y las precauciones tomadas para justificar el valor adoptado para estos parámetros.

4.10 Análisis de sensibilidad

El ingeniero debe incluir en el estudio H-H un análisis de sensibilidad para todos los parámetros utilizados durante la simulación. El análisis de sensibilidad es una herramienta que permite identificar aquellos parámetros del modelo que influyen la

El ingeniero debe incluir en el estudio H-H un análisis de sensibilidad para todos los parámetros utilizados durante la simulación.

respuesta del mismo. El ingeniero incluirá en el estudio H-H un análisis de sensibilidad para todos los parámetros utilizados durante la simulación. El análisis de sensibilidad es una herramienta que permite identificar aquellos parámetros del modelo que

influyen la respuesta del mismo, al mismo tiempo que ofrece un estimado del grado de influencia. Es importante identificar estos parámetros, ya que los errores en el valor asumido para éstos se propagan multiplicativamente en los caudales calculados. El análisis de sensibilidad también permite seleccionar sólo aquellos parámetros que deben ser calibrados. De esta manera se evita incluir parámetros en la calibración cuya influencia en los resultados del modelo es mínima o nula. Estos parámetros, conocidos como parámetros insensibles, causan problemas de estabilidad en el proceso de búsqueda en calibraciones automatizadas.

El ingeniero informará la sensibilidad relativa de los parámetros y las acciones tomadas con los parámetros más sensibles en el caso en que no se pueda realizar una calibración por falta de datos observados.

El coeficiente de sensibilidad relativa, S_r (adimensional), es dado por:

$$S_r = \frac{\partial Q}{\partial P} \frac{P}{Q}$$

donde Q representa el caudal calculado por el modelo hidrológico y P el valor original del parámetro. El análisis de sensibilidad se realizará utilizando la técnica de perturbación de parámetros utilizando $\pm 10\%$ de cambio en el valor original del parámetro ($\partial P \cong \Delta P = \pm 0.1P$), según se describe en (Hann, 2002). Deberán informar los valores de sensibilidad relativa para cada parámetro y su interpretación de tal forma que se puedan identificar los parámetros más sensibles.

HIDRÁULICA

5.1 Propósito

El propósito de este capítulo es dar una descripción de los requisitos necesarios para la elaboración de los modelos hidráulicos que se sometan al DRNA y la JP. Este capítulo se divide en estudios realizados con modelos en una y dos dimensiones y se incluye una sección sobre modelos para flujo no-permanente. Cuando los impactos geomorfológicos de un proyecto puedan alterar significativamente el equilibrio de un sistema fluvial, se podrían solicitar análisis más detallados que permitan conocer los impactos sobre la estabilidad del cauce de agua y los cambios en las características del mismo.

5.2 Modelos Hidráulicos de una Dimensión

5.2.1 Sistema HEC-RAS

La primera opción para realizar estudios H-H será el modelo de flujo permanente, gradualmente variado disponible en HEC-RAS (River System Analysis).

A continuación se incluye la guía para la creación de modelos hidráulicos adecuados a las capacidades del programa y a la representación efectiva de las condiciones hidráulicas del proyecto. Muchos de los aspectos mencionados en este Capítulo aplican también a otros modelos hidráulicos.

La primera opción para realizar estudios H-H será el modelo de flujo permanente, gradualmente variado disponible en HEC-RAS (River System Analysis). Alternativamente, los ingenieros podrán presentar sus estudios en otros modelos, debidamente justificado y aprobado previamente por el DRNA y la JP. Cuando el estudio afecta las zonas abarcadas por los mapas de inundación de la FEMA o tienen como propósito ser sometidos a la consideración de ésta, el modelo utilizado debe estar contenido en la lista de aquellos modelos aprobados por la misma y consultados previamente con la JP y el DRNA.

5.2.1.1 Condiciones requeridas para cualquier modelo de flujo permanente creado en HEC-RAS

El programa HEC-RAS permite al ingeniero modificar opciones dentro del modelo. Sin embargo, las opciones mencionadas en esta sección deberán ser comunes a todos los modelos desarrollados con HEC-RAS. Consecuentemente, no se deben cambiar opciones entre la condición

existente y las alternativas o planes propuestos en un proyecto, a menos que exista una justificación para ello. Estas opciones son:

- Método de cálculo del acarreo hidráulico
- Cálculo de la pendiente promedio de la energía entre dos secciones transversales consecutivas
- Tolerancias para los resultados
- Método de cálculo de la profundidad crítica

5.2.1.2 Método de cálculo del acarreo hidráulico

Se utilizará la ecuación de Manning para el cálculo de las pérdidas de energía por fricción en cuerpos de agua en movimiento. El cálculo del acarreo hidráulico deberá realizarse usando la condición pre-determinada por el programa, el cual calcula el acarreo hidráulico en aquellos sitios donde ocurren cambios en el valor del coeficiente de Manning. Una excepción a este caso es cuando se necesite reproducir un modelo existente desarrollado en HEC-2. En este caso deberá usarse la opción en la cual el acarreo hidráulico se calcula entre cada dos estaciones de la sección transversal. Ambas formas de calcular el acarreo hidráulico producen resultados diferentes y, por lo tanto, es necesario ser consistente para tener resultados comparables.

5.2.1.3 Cálculo de la pendiente promedio de la energía entre dos secciones transversales consecutivas

El cálculo de la pendiente promedio de la línea de energía entre dos secciones transversales consecutivas debe realizarse mediante el promedio pesado por el acarreo hidráulico entre las dos secciones. Este último método es el que produce los mejores resultados en la mayoría de los casos.

5.2.1.4 Tolerancias para los resultados

No se permite modificar la tolerancia propuesta por el modelo para el cálculo de la elevación de la superficie del agua ni de la profundidad crítica.

5.2.1.5 Método de cálculo de la profundidad crítica

Puesto que para la mayoría de los estudios se estiman flujos en las zonas inundables fuera del cauce principal, se debe usar el método de *búsqueda de múltiples profundidades críticas*. Este no es el método pre-determinado en HEC-RAS sino que el ingeniero debe cambiarlo en las opciones del programa. La razón de esta determinación es que los valles inundables típicamente se asemejan a secciones compuestas con diferentes resistencias y con múltiples

profundidades críticas. La opción de búsqueda de múltiples profundidades críticas permitirá al ingeniero darse cuenta de la existencia de más de una profundidad crítica y hacer las correcciones correspondientes.

5.2.2 Caudales para el modelo

El caudal correspondiente a una recurrencia de 100 años debe incluirse en todo estudio H-H que se somete al DRNA y la JP.

Los caudales para los modelos hidráulicos se calcularán con los métodos presentados en el Capítulo 4 de estas Guías. El caudal correspondiente a una recurrencia de 100 años debe incluirse en todo estudio H-H que se somete al DRNA y la JP. Cuando el

estudio tenga que ser revisado por la FEMA y se disponga del caudal con recurrencia de 100 años obtenido previamente en un estudio H-H realizado para el Programa de Seguro de Inundaciones, este caudal tiene que usarse para efectos de diseño. Deberán considerarse los cambios de caudal en lugares de confluencia o bifurcación de tributarios o, en cualquier sitio donde se tenga una descarga lateral significativa.

5.2.3 Elevaciones en las secciones limítrofes del modelo

El modelo hidráulico requiere especificar las elevaciones del agua en las secciones ubicadas al comienzo y/o al final del tramo del cuerpo de agua modelado. Los valores requeridos dependerán de los regímenes de flujo dentro del tramo que comprende el modelo hidráulico. Si el flujo es subcrítico se requieren condiciones aguas abajo, si el flujo es supercrítico se requieren condiciones aguas arriba y, si es mixto se requieren en ambos extremos. Los siguientes procedimientos se pueden utilizar para determinar las elevaciones en los extremos:

1. Si se determina que la primera sección del modelo aguas abajo se encuentra en una zona donde ocurre un cambio de régimen subcrítico a supercrítico, entonces se puede utilizar la profundidad crítica para establecer el nivel del agua en esta sección. Esta decisión debe estar debidamente justificada dentro del estudio. Secciones de cambio drástico de pendiente o contracciones significativas del flujo pueden provocar profundidad crítica. Deberá asegurarse que el flujo crítico ocurre para todos los caudales que se utilicen en el modelo. De no ser así, se debe usar otra relación de frontera para aquellos casos donde esto no ocurra.
2. Se permite calcular una curva de descarga usando una relación conocida entre elevación y caudal o el método de área-pendiente para determinar la elevación de la superficie del agua. La sección debe ser apropiada para el uso de estos métodos. Usar la pendiente del terreno o la del fondo del cuerpo de agua en el método de área-pendiente representa una aproximación. Por lo que se debe utilizar la pendiente de la línea de energía.
3. Si se usa la profundidad normal como condición en alguna sección de frontera, su uso debe hacerse asegurando que la pendiente que se utiliza es la

pendiente de la línea de energía y no la del terreno. Aunque por definición el término "profundidad normal" se refiere a un flujo uniforme, el cálculo de los perfiles se realiza bajo las suposiciones de flujo gradualmente variado; por lo tanto, la pendiente que se requiere es la de la línea de energía. El tramo que se utiliza para estos cálculos debe ser de características geométricas uniformes y de rugosidades similares. Deben evitarse cambios abruptos entre las secciones transversales ubicadas cerca de las fronteras del modelo.

4. Si el modelo incluye confluencia con algún tributario se pueden presentar dos casos: **Caso 1:** El flujo de diseño para el que se calcula el perfil para el tributario y para el cuerpo de agua principal que recibe sus aguas coincidan al mismo tiempo. En este caso se utiliza la elevación del agua del cuerpo de agua principal como el valor inicial en la confluencia del tributario. **Caso 2:** El flujo máximo en el tributario y en el cuerpo de agua principal no coinciden al mismo tiempo. En este caso se usa el método de *área-pendiente* para obtener el valor de la elevación del agua para el tributario en la confluencia.

5.2.4 Coeficientes de la Ecuación de Manning

La ecuación de Manning se usará para representar las pérdidas de energía a lo largo del cuerpo de agua. Este coeficiente incluye los efectos de fricción por la rugosidad y/o obstáculos a lo largo del cauce del agua así como los cambios en dirección del cauce principal. Estos efectos se cuantifican mediante el coeficiente "n" de la ecuación de Manning aplicado a cada tramo de diferente rugosidad dentro de la sección transversal. Los valores de "n" usados en los modelos desarrollados deben ser debidamente documentados. Estos valores han sido publicados en textos de ingeniería hidráulica, en tablas y fotografías. Los valores usados deben ser representativos del cauce principal y de los valles inundables según sea el caso.

El uso de "bloques" como opción en HEC-RAS se recomienda para representar obstrucciones significativas al paso del agua en lugar de valores de "n" altos. Ejemplo de esto son el desarrollo de nuevas urbanizaciones o edificios en las zonas inundables.

Si se dispone de estudios previos que reflejan las condiciones actuales o de marcas de agua producidas por inundaciones históricas documentadas, se recomienda usarlas como una guía para evaluar lo adecuado de los valores en "n". Cuando se modela un proyecto nuevo y se prevé que la resistencia del flujo aumente con los años, deberá escoger valores de "n" que reflejen la condición futura del proyecto.

La rugosidad de cualquier revestimiento depende de las características del material. En el caso de gaviones o piedras (rip-rap), la rugosidad depende del tamaño y forma de las piedras que se usen; sin embargo, estas características varían según las velocidades y esfuerzos cortantes que deben resistir. Por lo tanto, en estos casos se requiere un diseño particular donde se especifique el valor de la "n" de Manning y los tamaños de las rocas que se colocarán. Refiérase al Apéndice II de estas Guías para más detalles.

5.3 Secciones transversales

A continuación se detallan los requisitos para el levantamiento de secciones transversales para modelos hidráulicos en una dimensión.

5.3.1 Longitud del tramo del cuerpo de agua para un proyecto

La longitud a lo largo del cuerpo de agua del cual se deben levantar las secciones transversales es requisito para definir los límites del proyecto y el alcance de los datos que se deben recolectar.

El tramo del cuerpo de agua para el área de estudio debe tener sus límites lo suficientemente lejos del proyecto en forma tal que se puedan obtener resultados precisos en el sitio donde se proponen los cambios.

Las secciones transversales deben levantarse desde lo suficientemente aguas abajo y/o aguas arriba, en forma tal que las condiciones en los límites no afecten el perfil de la superficie del agua en el tramo del cuerpo de agua donde se ubica el proyecto.

El subestimar la longitud del tramo de estudio puede producir resultados con poca precisión, que posteriormente haga necesario el levantamiento topográfico y recolección de datos adicionales. Se debe revisar la longitud del tramo de estudio mediante visitas de campo y durante la preparación del estudio para determinar si es necesario ampliar los límites.

5.3.2 Localización y orientación de las secciones transversales

Para modelos unidimensionales es preferible disponer de secciones transversales completas obtenidas mediante un levantamiento topográfico de campo detallado. Las áreas inundables se asemejan a secciones compuestas, como la mostrada en la Figura 5.1. Para planicies inundables de gran extensión se pueden usar levantamientos aéreos de la zona inundable, suplementados con secciones más detalladas dentro del cauce principal del cuerpo de agua. Se debe documentar el proceso de levantamiento topográfico con fotografías.

La precisión de los cálculos y la delimitación de las zonas inundables dependen, entre otras cosas, de la planificación y realización del levantamiento de campo.

Para estudios en valles inundables, siempre que sea posible, se obtendrán secciones transversales que abarquen el ancho de toda la planicie inundable.

Las secciones transversales deben ser representativas del tramo del cuerpo de agua donde están ubicadas y, deben localizarse lo suficientemente cerca unas de otras para asegurar una estimación precisa de las pérdidas de

energía y una descripción apropiada de la geometría del paisaje.

Las secciones transversales utilizadas en estudios H-H tienen características particulares que las diferencian de aquellas para otros proyectos.

Esto se detalla en la siguiente sección.

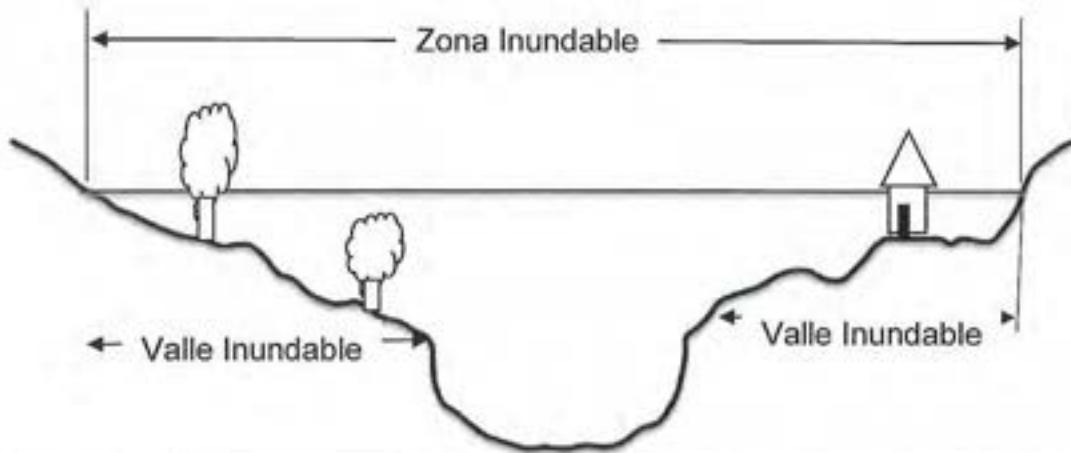


Figura 5.1. Esquemático de un cauce con valle inundable

5.3.3 Características de las secciones transversales

La localización y orientación de las secciones deberán ser analizadas por el ingeniero a cargo de realizar el estudio hidráulico y discutido con el agrimensor a cargo del trabajo topográfico, preferiblemente durante una visita de campo.

Las secciones transversales deben ser levantadas con las siguientes características y en los sitios indicados:

1. Cada sección transversal debe tener un nombre único, preferiblemente asociado con la distancia desde la primera sección del modelo aguas abajo hacia aguas arriba. La numeración debe ser ascendente de aguas abajo hacia

aguas arriba. (ver Figura 5.2).

2. Todas las secciones transversales deben ser medidas y presentadas con las estaciones en orden ascendente de izquierda a derecha mirando el cuerpo de agua hacia aguas abajo.
3. Anote la forma en que se definió y midió la porción del cauce principal del cuerpo de agua. Detalle la metodología que usó para medir esta porción; por ejemplo: con una varilla, con una cinta, con un sonar u otro método. Esto es importante, ya que en cuerpos de agua profundos se pueden usar

diferentes metodologías. Esto debe incluirse como una nota explicativa en los planos de secciones transversales.

4. La sección transversal debe ser típica de las condiciones del tramo que representa. Se pueden ignorar pequeñas hondonadas y/o lagunas que no son representativas para los propósitos del estudio. Sin embargo, se deben añadir objetos y/o construcciones que restringen significativamente el paso del agua.
5. Levantar secciones donde ocurren cambios en la pendiente longitudinal del cauce o del valle inundable.
6. Si se cuenta con estudios previos, se recomienda obtener secciones transversales que coincidan con esos estudios para facilitar la comparación de los niveles de agua obtenidos.
7. Se recomienda levantar secciones transversales donde se conozcan elevaciones de agua producidas por eventos históricos de periodo de recurrencia conocido o estimado para comparar los valores calculados con los observados.
8. Obtener secciones transversales más cercanas donde ocurran cambios apreciables en el área de la sección transversal, la rugosidad o la pendiente del cuerpo de agua.
9. Obtener secciones transversales al comienzo y al final de cualquier dique natural o artificial.
10. Obtener secciones transversales donde se prevea que existe una sección de control.
11. Las secciones transversales deben ser perpendiculares al movimiento principal del flujo. La Sección 3 de la Figura 5.3 muestra una desviación en la dirección para mantener la sección perpendicular a la dirección del flujo dentro de cauce principal.
12. A menos que se realice un estudio particular en una curva, no es recomendable obtener secciones transversales en la curva, ya que estos lugares no son representativos de la forma del cauce principal en ese tramo.
13. Las secciones cerca de las confluencias o bifurcaciones deben separarse adecuadamente para que no queden dentro de la zona de mezcla de ambas corrientes.
14. Es recomendable obtener secciones transversales donde hay límites territoriales entre municipios.
15. Considere obtener secciones transversales donde se planeen posibles desarrollos futuros tales como áreas residenciales, comerciales, parques y carreteras. Se deben levantar por lo menos tres secciones transversales que contengan el proyecto propuesto.
16. Anote en las secciones transversales las condiciones generales del terreno que se observaron en el campo, tanto para el cauce principal como para el valle de inundación. Algunos ejemplos de palabras para esta descripción son: gravas, arenas, gramas, arbustos, arboles, cultivos, edificios.
17. A menos que el propósito de su estudio lo requiera, las secciones en meandros no deben ser ubicadas pasando por el vértice de la curva, debido

a que esta sección no es representativa del cauce principal del cuerpo de agua. Probablemente en esta zona se encontrarán barras de arena, el cauce será más ancho y más profundo en la parte exterior de la curva. En la Figura 5.3 se marcan posibles sitios para la medición de secciones en una zona de meandros.

18. Nunca se deben cruzar dos o más secciones transversales. Las secciones 3.0 y 4.0 en la Figura 5.3 no se interceptan, ya que la Sección 4 fue desviada. Además, el cambio en dirección la hace perpendicular a la dirección del flujo durante una inundación. Note que la sección 3.0 posee una zona de flujo, la cual debe tomarse en cuenta si el levantamiento topográfico se extiende hasta el final del valle.
19. Siempre que sea posible, se recomienda incluir fotografías de cada sección transversal para documentar el modelo hidráulico y para ayudar en la selección de los valores del coeficiente para la ecuación de Manning. Estas fotos pueden incorporarse al modelo hidráulico en HEC-RAS.
20. La Figura 5.4 muestra un esquemático con las partes de un puente que pueden ser descritas dentro del modelo hidráulico. En zonas cercanas a puentes o atarjeas se deben levantar por lo menos cinco secciones transversales para una descripción adecuada de la hidráulica a través de la estructura. Estas secciones corresponden a las mostradas en la Figura 5.5. Las secciones 2 y 3 deben medirse cerca del puente pero fuera de los estribos o rellenos del puente o la carretera. De no existir estribos o rellenos se puede medir al lado de la estructura. Las secciones 1 y 4 se miden en el valle a una distancia siguiendo en una relación de expansión de aproximadamente 2:1 para aguas abajo (Sección 1) y 1:1 para aguas arriba (Sección 4). La Sección 5 corresponde a una sección sobre la superficie de rodaje que incluya el puente y la porción de la carretera dentro del valle inundable.
21. Si el ángulo que forma el puente con respecto a la dirección principal del agua está entre 20° y 30° , debe ajustarse la apertura del puente considerando el ángulo de alineamiento del puente con respecto al cauce del cuerpo de agua. Esta corrección está disponible en el modelo HEC-RAS. Ángulos menores de 20° no requieren ajuste, a menos que el ingeniero estime necesario por alguna condición específica que debe documentar. Para casos donde el ángulo sea mayor de 30° se espera que el área de paso efectiva sea mayor que la obtenida para ángulos entre 20° y 30° , ya que la corriente de agua va a girar un poco para pasar por el puente. En este caso el ingeniero deberá hacer los ajustes necesarios y documentar su decisión.
22. En áreas urbanas con cauces pequeños y pendientes altas las secciones deben reflejar mayores pérdidas de energía, razón por la cual se requieren secciones más cercanas una de la otra.
23. Se recomienda que las secciones transversales no estén separadas más de 1000 pies (305 m).
24. En ningún caso se permitirán secciones interpoladas usando el modelo HEC-RAS.

En la Sección 5.5.2 de estas guías se incluyen otros detalles de los levantamientos topográficos para la descripción de puentes y atarjeas.

(6)

61

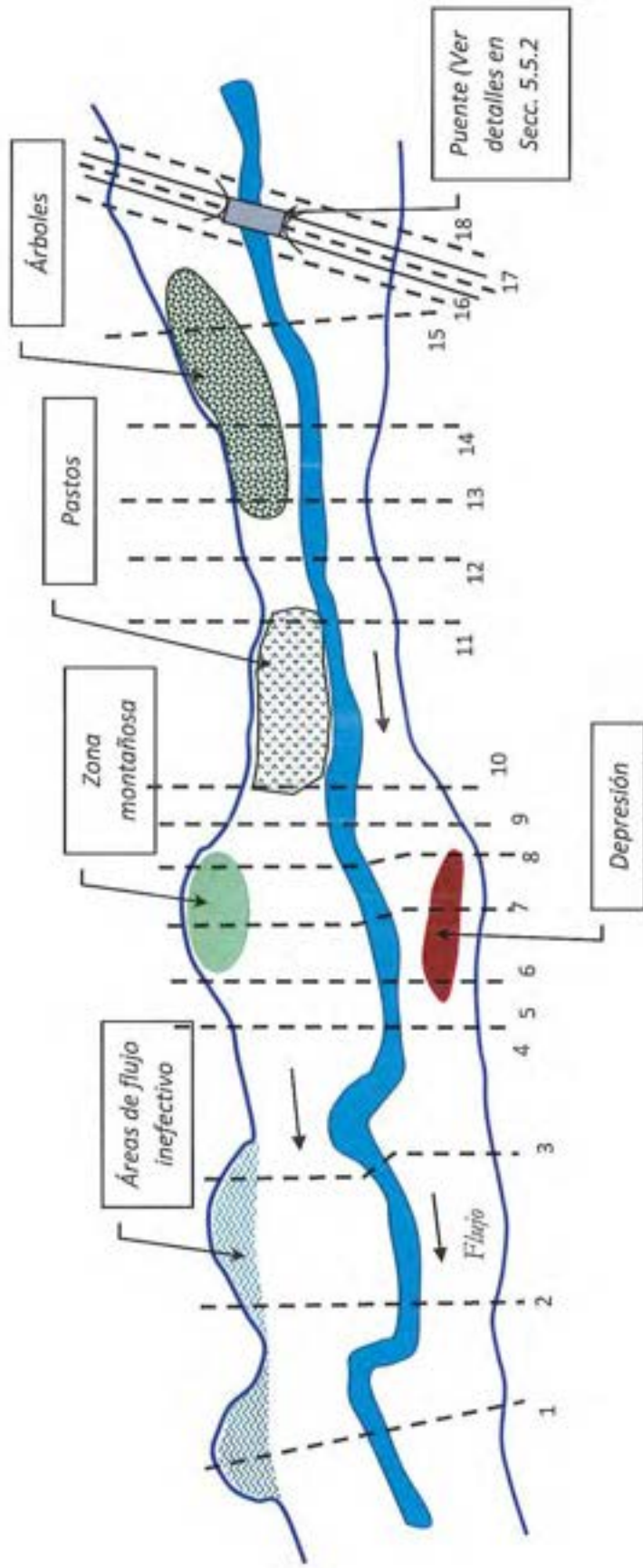


Figura 5.2 Ubicación de secciones transversales y características de la zona (Adaptado de https://secure.in.gov/dnr/water/files/wa-GGHA-chapter_5.pdf)

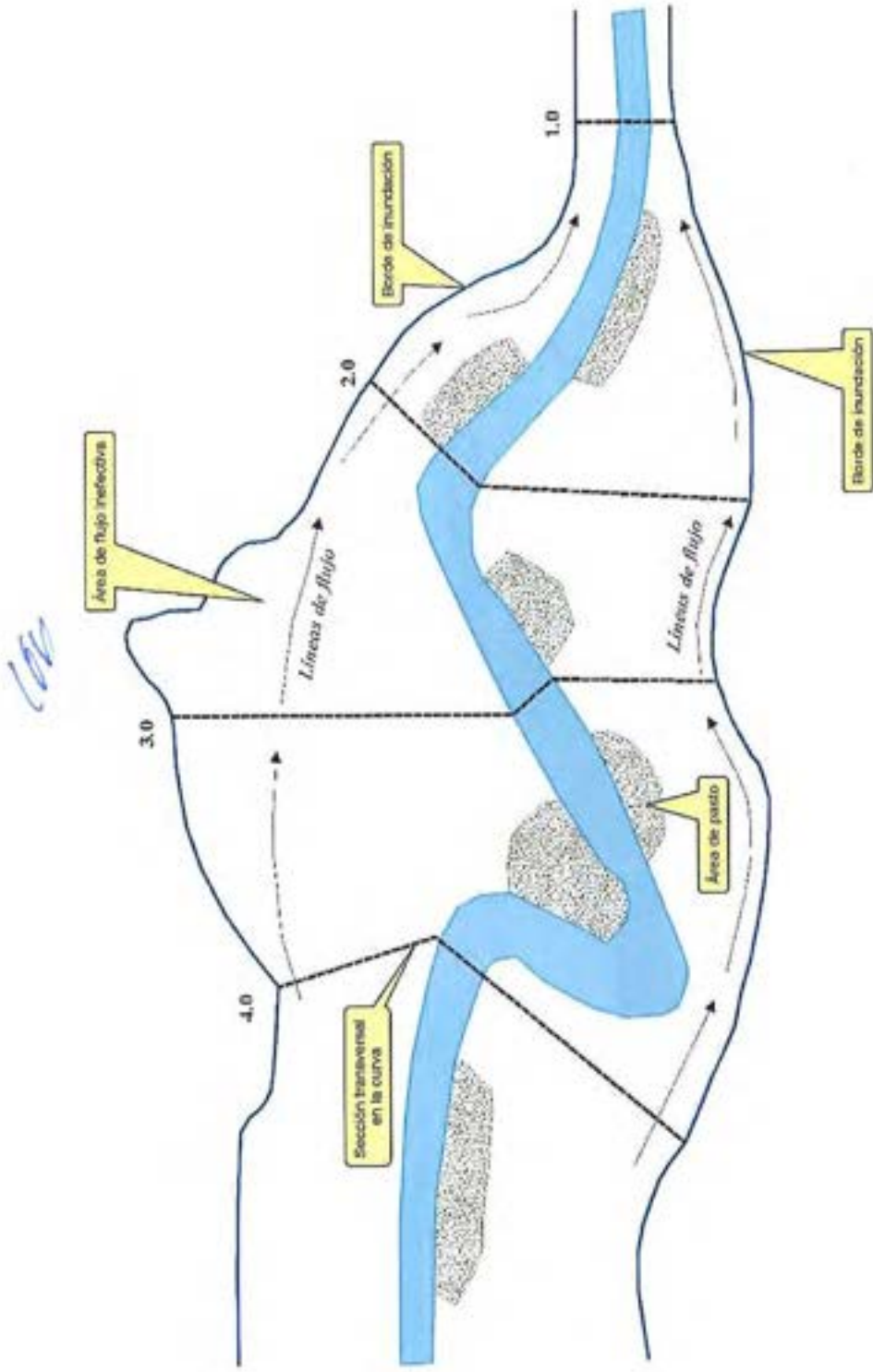


Figura 5.3. Ubicación de secciones transversales en cuerpos de agua con meandros

CGP

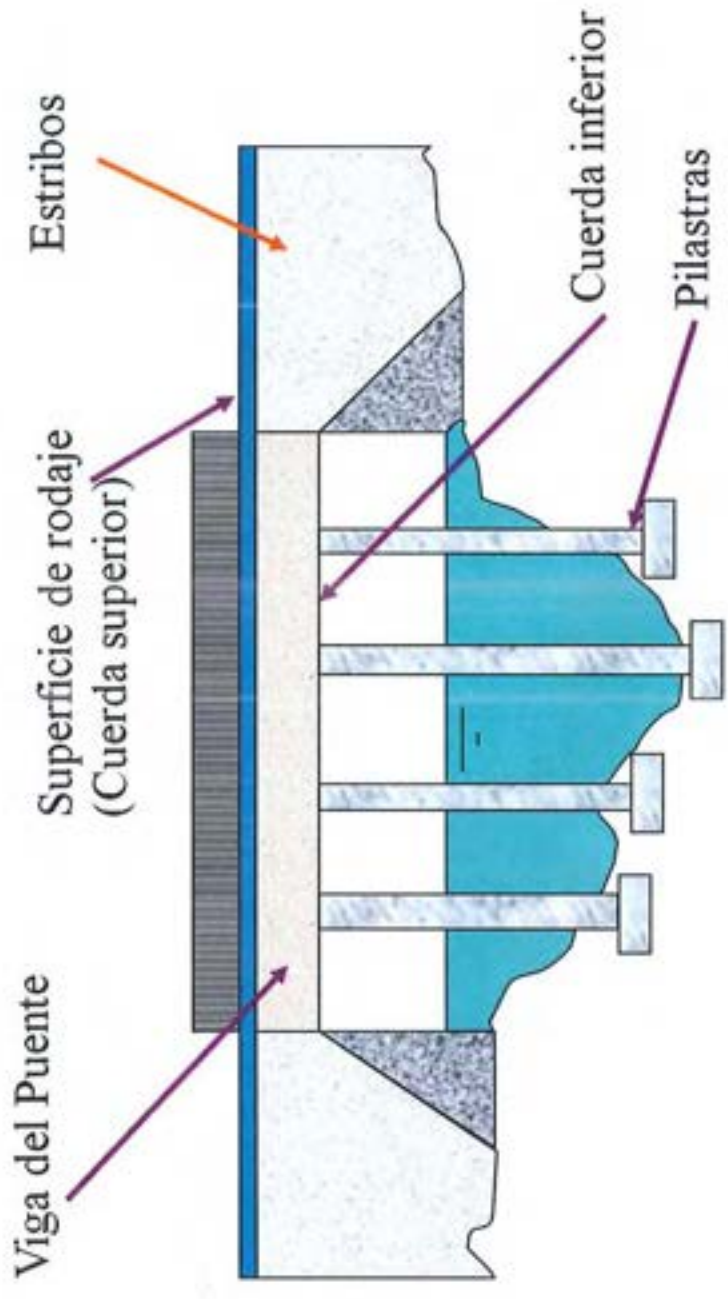


Figura 5.4. Esquemático de un puente mostrando sus partes

16p

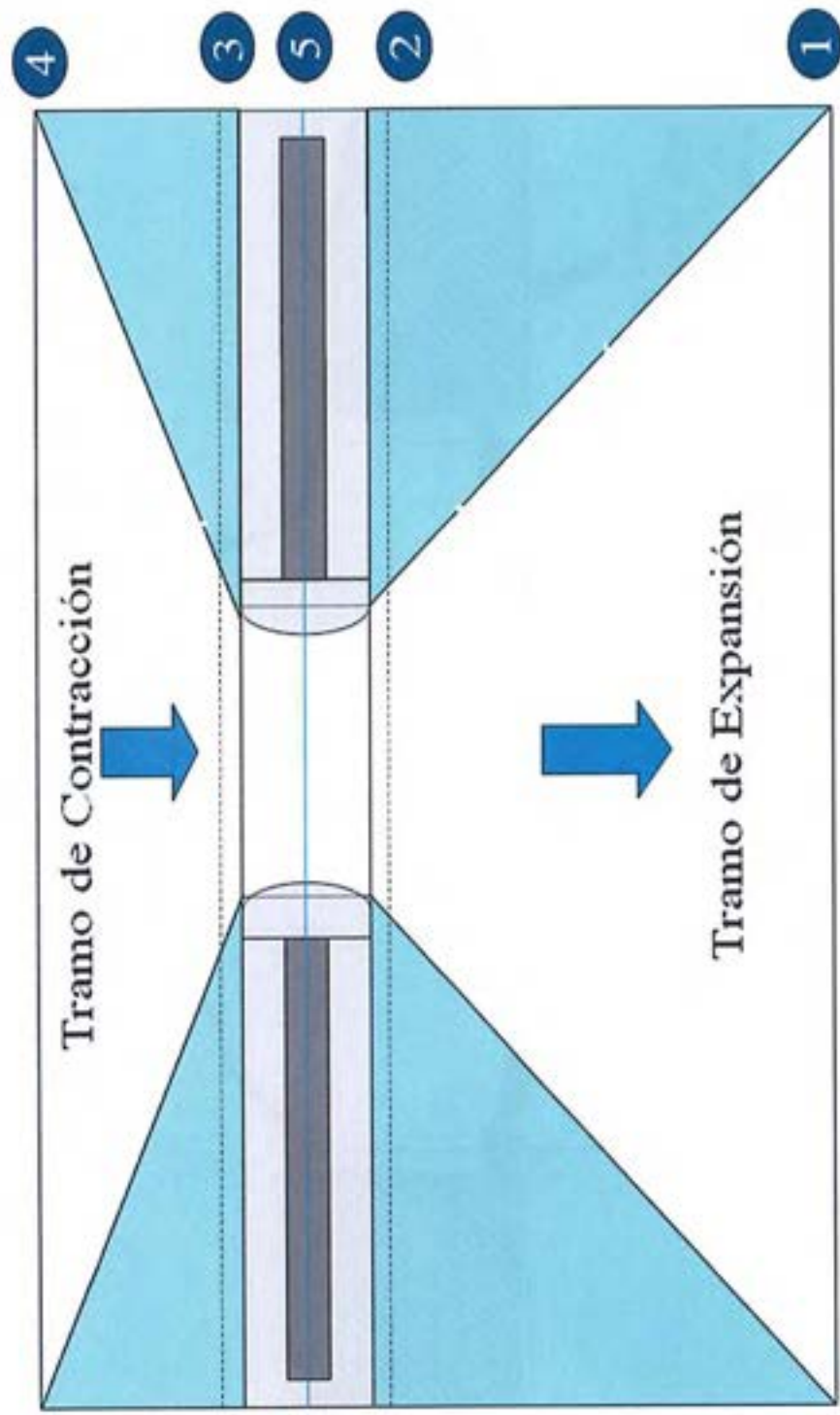


Figura 5.5. Ubicación de secciones transversales para puentes

167

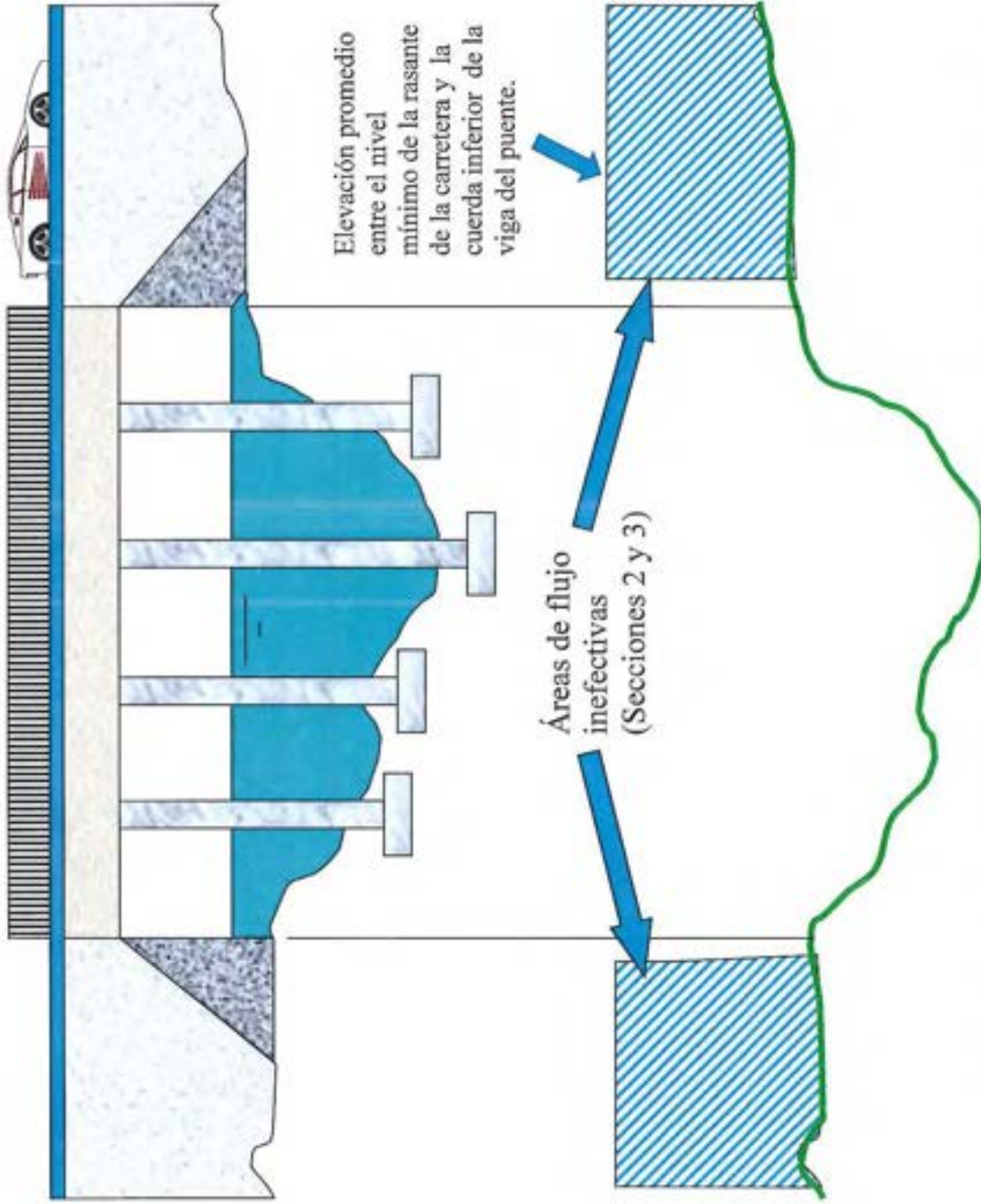


Figura 5.6. Ubicación de zonas de flujo inefectivo para la modelación de puentes

5.4 Información requerida en los planos topográficos

Los planos deben ser preparados digitalmente y en hojas de 24"x 36" bajo la supervisión de un agrimensor o ingeniero licenciado autorizado a ejercer la agrimensura en Puerto Rico por el Departamento de Estado y deben contener la siguiente información:

1. Indicación de Norte
2. Escala horizontal y vertical
3. Los controles que se usaron tanto verticales como horizontales. Los controles horizontales deben estar referidos al sistema de coordenadas estatales planas NAD-83 en su última revisión. Se debe especificar también la monumentación de los controles del proyecto y los que marcan las secciones transversales. Es preferible que los controles verticales estén referidos al msl. De no ser así debe especificar la superficie de referencia. Si utiliza GPS debe presentar la información de la sesión
4. Ubicación del proyecto sobre el cuadrángulo topográfico y sobre una fotografía aérea a escala legible
5. Contornos o perfiles existentes
6. Cuerpos de agua adicionales; así como, otras características notables del paisaje relacionadas con los cauces los mismos
7. Carreteras y caminos
8. Dibujo de las secciones transversales completas y un plano de vista en planta de la zona estudiada en escala apropiada
9. Una tabla con los datos de elevación y distancia de cada sección transversal. Cada punto del levantamiento debe aparecer en la tabla indicándose su distancia y elevación con respecto a los niveles de referencia indicados
10. Metodología utilizada para el levantamiento de las secciones dentro del cuerpo de agua
11. Firma y sello del agrimensor o ingeniero licenciado autorizado a ejercer la agrimensura en Puerto Rico responsable del levantamiento
12. Cualquier otra información que sea relevante a la zona de estudio o que deba considerarse en la creación del modelo hidráulico

5.5 Hidráulica de puentes y atarjeas

Los puentes y atarjeas que se incluyan en los modelos de HEC-RAS deben ser simulados usando la subrutina para puentes y/o atarjeas disponible en el programa. No son aceptables alteraciones de las secciones transversales del cauce asemejando las pilastras u otras características de puentes.

5.5.1 Métodos de cálculo

Los métodos permitidos para estimar las condiciones correspondientes a flujos bajos en puentes son: Energía, Cantidad de Movimiento y WSPRO. Se

seleccionará la solución que dé el nivel de agua mayor. No se permite el método de Yarnell, ya que el mismo no fue desarrollado para las condiciones predominantes en Puerto Rico.

Para flujos altos se usará el método de flujo como vertedor cuando la superficie del agua pase sobre el puente. Este método se combina con el de energía para completar la solución. La longitud del vertedor debe ser consistente con el ancho de la superficie del agua aguas arriba y aguas abajo del puente.

Como parte del reconocimiento de campo se debe indicar si hay acumulación de sedimentos, signos de agradación o degradación o inestabilidad de los bancos cerca del puente y si considera necesario realizar obras de protección para la estructura.

5.5.2 Secciones transversales en puentes y atarjeas

Las siguientes condiciones deben seguirse para completar el modelo de puentes y atarjeas:

1. Se requieren las cinco secciones cercanas a la estructura según se describió en la Sección 5.3.3, punto 20.
2. El estacionamiento horizontal de las secciones más cercanas al puente aguas abajo y aguas arriba deben estar alineadas entre sí y con las secciones aguas arriba y aguas abajo del cauce. La estación en el centro de una atarjea debe ser consistente con las secciones ubicadas aguas arriba y aguas abajo.
3. La sección sobre la superficie del puente debe medirse a lo largo de la elevación más baja que produzca flujo como un vertedor. Normalmente este corresponde a la corona de la superficie de rodaje.
4. Si existen barandas, barreras o vallas de seguridad continuas se debe anotar el tipo de barrera (por ejemplo de hormigón continua o de tubos de metal) y medirse como parte de la sección transversal de la carretera. Su altura, tipo y longitud son importantes para una descripción apropiada de la parte superior del puente (véase la Figura 5.4).
5. Anote si el puente está sesgado con respecto al cauce del cuerpo de agua tal como se indicó en el punto 21 de la Sección 5.3.3.
6. Documente el puente con fotos que muestren las condiciones cuando se realizó el estudio.
7. Deberá anotarse el material y la configuración de los alerones ("wingwalls" & "headwalls"). Esto es crítico en atarjeas, ya que estas características pueden variar la capacidad del conducto.

5.5.3 Datos necesarios para la descripción de puentes

Además de las secciones transversales y los datos mencionados en la Sección 5.5.2, para puentes se requieren los siguientes datos adicionales:

1. El alineamiento de la cuerda inferior (usualmente son las elevaciones de la parte inferior de la viga del puente). Véase la Figura 5.4.
2. El ancho, la forma y localización de cada pilastra. Si la pilastra varía su espesor o forma con la altura, debe definirse claramente la forma de la pilastra.
3. Indicar los estribos en las secciones de los puentes. En la mayoría de los casos los estribos tienen una pendiente constante la cual debe ser definida con dos elevaciones, una en la parte alta y otra en la parte baja del estribo.
4. Debido a la contracción del cauce provocada por el puente, las secciones adyacentes no serán efectivas en su totalidad y deben utilizarse zonas de flujo inefectivo hasta una elevación donde el agua comienza a pasar sobre la sección correspondiente a la superficie de rodaje (Figura 5.6).

5.5.4 Datos para la descripción de atarjeas

1. Se debe especificar la forma de la atarjea, las dimensiones y el material. Además se debe indicar el tipo de alerón o muro de cabecera (headwall) que tiene (por ejemplo la descripción puede ser: *alineado con el terreno o hacia afuera de la superficie de rodaje a un ángulo de 45 grados*). Se recomienda consultar la literatura de la FHWA para detalles y opciones disponibles sobre atarjeas. Estos datos son requeridos para la simulación en la computadora.
2. Se debe medir la longitud de la atarjea así como las elevaciones de las invertidas aguas abajo y aguas arriba de la misma.
3. Se deben examinar cuidadosamente los resultados de cálculos de atarjeas para determinar si los mismos son razonables en términos de control a la entrada y control a la salida. En caso de duda se recomienda realizar un cálculo independiente para determinar la operación de la atarjea.

5.5.5 Múltiples puentes y atarjeas

Estos casos representan situaciones complejas donde el agua atraviesa unas secciones compuestas por uno o varios puentes y una o varias atarjeas ubicadas en la misma sección transversal. Estos casos requieren especial cuidado para su modelación. Si se utiliza la opción de "aperturas múltiples" disponible en HEC-RAS, se deben seleccionar cuidadosamente los "puntos de estancamiento" que separan la porción del área que contribuye con el acarreo hidráulico de cada atarjea o puente. Este aspecto será evaluado para asegurar que la distribución del flujo en estos casos es la adecuada.

5.6 Otras opciones

HEC-RAS permite modelar estructuras hidráulicas, tales como vertedores, tanto a través del cauce principal como paralelas al mismo. En estos casos el DRNA y la JP revisarán las aplicaciones específicas para evaluar si las mismas se adaptan a las condiciones que se desean para el proyecto.

5.7 Otros modelos hidráulicos unidimensionales

El modelo HEC-RAS es adecuado para la mayoría de los estudios donde sea aceptable un modelo en una dimensión (1D). Hay otros modelos de flujo 1D – permanente que pueden ser usados, previa consulta con el DRNA y/o la JP. El modelo WSPRO desarrollado por el USGS está disponible a través de la FHWA. La versión disponible es de 1996 y no ha sido actualizada; además, este modelo no posee las capacidades para el cálculo de cauce mayor, por lo que no se recomienda su uso para estudios H-H. Sin embargo, HEC-RAS contiene la metodología usada por WSPRO para simular la hidráulica de los puentes, por esta razón se menciona en esta Guía.

Otros modelos han sido declarados "inaceptables" por la FEMA debido a que no han sido lo suficientemente probados, fueron absorbidos por otros modelos más recientes o, las agencias que los desarrollaron descontinuaron su desarrollo. Por otra parte, hay modelos hidráulicos recientes que, sin ser los aprobados por la FEMA ni requerir aprobación de esta agencia para el proyecto, pueden ser usados por los ingenieros, previo acuerdo con el DRNA y la JP. Normalmente estos serán casos excepcionales donde no hay otras opciones.

5.8 Modelos de flujo no-permanente

Por lo general los estudios se realizan asumiendo que las condiciones de flujo máximo son suficientes para la obtención de los niveles de agua en el cuerpo de agua. En estos casos se desprecian los efectos de almacenamiento a lo largo del tramo del cuerpo de agua estudiado y se asume que los flujos máximos coinciden con los niveles máximos del agua. Sin embargo, en ciertas condiciones, tales como las mencionadas en la siguiente lista, estas suposiciones no son correctas:

- Pendientes del cauce muy bajas (menos de 5 pies/milla).
- Flujos transitorios severos (rompimiento de represas).
- Valles inundables con áreas de almacenamiento grandes durante los eventos de inundación.
- Existen represas, compuertas, vertedores o estructuras de control.
- Valles empinados propensos a inundaciones rápidas (flash floods).

En estos casos es deseable el uso de modelos que consideren las variaciones temporales de las velocidades, los flujos y las elevaciones del cuerpo de agua durante eventos de inundación. Estos modelos se conocen como modelos de flujo no-permanente. El DRNA y la JP podrán requerir expansiones en un estudio H-H si se considera que los efectos de inundaciones rápidas (flash floods) combinados con almacenamientos en la cuenca y los posibles efectos de un proyecto sobre los niveles de inundación ameritan un modelo de flujo no-permanente. Deberá reunirse con personal especializado del DRNA y la JP si se anticipa la necesidad de un modelo no-permanente para el estudio.

El modelo HEC-RAS permite la creación de modelos de flujo no-permanente al alcance de profesionales especializados en estudios hidráulicos. Estos modelos requieren cuidados especiales de estabilidad numérica asociada con los intervalos de tiempo, cantidad y ubicación de las secciones transversales, regímenes de flujo, cambios en las condiciones de frontera, cambios en los parámetros del modelo, pre-procesamiento de los datos, calibración y, en general, un conocimiento más detallado de la hidráulica y la modelación numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo transitorio. De ser requeridos estos modelos, el ingeniero deberá reunirse con personal especializado del DRNA y la JP para determinar los requisitos específicos del modelo y su alcance.

5.9 Modelos hidrológico/hidráulicos combinados

Se incluyen en una categoría aparte aquellos modelos que combinan la hidrología y la hidráulica en un solo sistema. En esta categoría se incluye el modelo Storm Water Management Model (SWMM por sus siglas en inglés) del cual existe una versión de uso público que se obtiene del portal cibernético de la Agencia Federal de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) y se consigue también a través de varios proveedores privados, quienes incluyen interfaces gráficas e integran en algunos casos el Sistema de Información Geográfica (PCSWMM, XPSWMM). ICPR y XPSTORM también se encuentran en esta categoría. Estos modelos han sido desarrollados mayormente para aplicaciones de manejo de aguas de escorrentía en áreas urbanas y pueden resolver las ecuaciones para flujo no-permanente. La aplicación de estos modelos es adecuada y recomendada en áreas urbanas donde se combinan los sistemas de alcantarillado pluvial mayor y menor, el diseño de estructuras de mitigación de escorrentías y/o se desea incorporar medidas de desarrollo de bajo impacto (LID por sus siglas en inglés).

5.10 Modelos Bidimensionales

Los modelos en dos dimensiones se han convertido en una alternativa viable para proyectos que así lo ameriten.

Los avances en los modelos hidráulicos han llegado a poner al alcance de los ingenieros modelos hidráulicos multidimensionales. En algunos casos las zonas inundables, tales como los valles aluviales cerca de las zonas costeras, se extienden lateralmente. Esta apertura en

forma de abanico se aleja de las suposiciones hechas por los modelos unidimensionales. En estos casos se deben considerar las variaciones de velocidad en dirección transversal para describir adecuadamente los patrones del flujo. Para casos donde la distribución del flujo dentro del valle o de un cuerpo de agua ancho se vea afectado por un proyecto y esto produzca desviaciones significativas del patrón de flujo o pueda afectar los niveles de agua, el DRNA y la JP podrán requerir el uso de un modelo bi-dimensional. La mayoría de los modelos bi-dimensionales pueden realizar simulaciones para flujo permanente y flujo no-permanente. El uso de