



### 3. MODELOS FLUVIALES CON FONDO MÓVIL

Generalidades:

Los modelos fluviales de fondo móvil permiten estudiar las alteraciones en el fondo y en las márgenes debido al efecto de la fuerza provocada por el flujo del agua que se presenta en un cauce natural, es decir, podemos enfocarnos en los fenómenos de arrastre de sedimentos, erosión y depósito de sedimento

Los modelos de fondo móvil, al igual que para ríos, estuarios y playas se usan cuando es importante el movimiento de los materiales que componen las fronteras a causa del flujo del agua. Los problemas más frecuentes que se atienden con este tipo de modelos son los debidos principalmente a:

- a) Cambios longitudinales y transversales del cauce por la erosión y sedimentación asociados a obras hidráulicas instaladas en el mismo.
- b) Rectificación de cauces, eliminando curvas o meandros y protegiendo márgenes con espigones u otras obras.



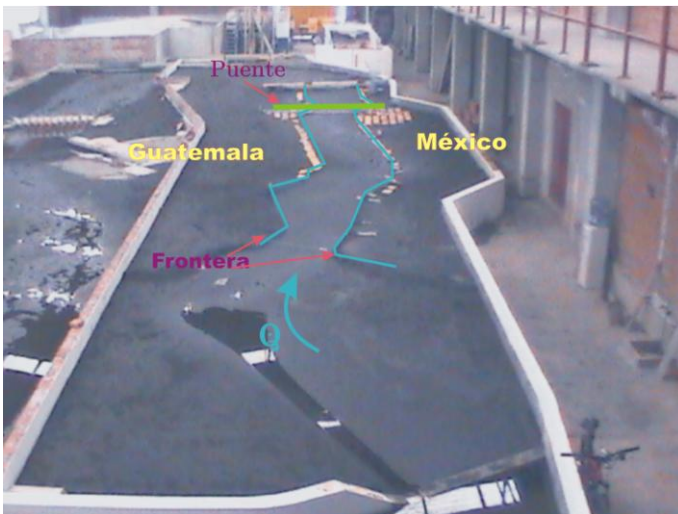
### 3.1 PRESENTACIÓN DE UN MODELO FÍSICO.

Los modelos físicos hidráulicos que se desarrollan en el Instituto de Ingeniería de la UNAM son planeados, modelados, contruidos y operados con múltiples objetivos entre los que sobresalen la investigación en el arrastre de partículas, sedimentación, obras de protección en márgenes de ríos, obras de desvío, obras de control, así como para analizar el comportamiento de vertedores y obras de excedencias en la presas, escotaduras y secciones transversales específicas de un cauce.

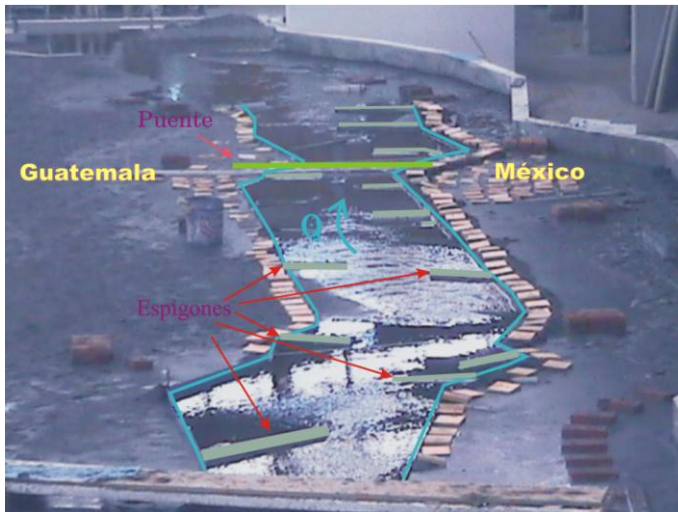
Estas obras son realizadas para proteger a las zonas de interés de posibles desastres naturales sobre todo en época de lluvias donde los fenómenos climatológicos hasta ahora son impredecibles y para garantizar un correcto funcionamiento y en su defecto proponer el mejoramiento de obras de protección, contención y control.

Un ejemplo que se muestra a continuación de este tipo de modelado, fue realizado para estudiar el comportamiento del río Suchiate, ubicado en el estado de Chiapas y que es la frontera natural y frontera política entre los países de México y Guatemala, por lo que tiene gran importancia nacional así como también para las comunidades que habitan en las márgenes del mismo el evitar y prevenir desastres naturales, como los que desafortunadamente ya se han presentado en esta río en el pasado.

Un ejemplo de desastre con devastadoras consecuencias ocurrió durante el paso del huracán Stan en el año 2005, el cual ocasiono severas inundaciones en la comunidad conocida como Ciudad Hidalgo, además de haber desviado del cauce original el curso del río, este problema trajo consecuencias políticas y sociales en la región por lo cual es necesario realizar estudios para prevenir y corregir este tipo de comportamientos no deseados en el cauce.



**Fig. 3.1**  
**Modelo Físico del río Suchiate**  
**parte de Ciudad Hidalgo Chiapas.**  
**Escala 1:100. Instituto de**  
**Ingeniería UNAM**



**Fig. 3.2**  
**Modelo Físico del río Suchiate**  
**parte de Ciudad Hidalgo Chiapas.**  
**Escala 1:100**  
**Prueba realizada con la**  
**simulación de obras de protección**  
**a las márgenes.**

Para la realización de modelos fluviales se podría describir el procedimiento en los siguientes pasos para representar adecuadamente el comportamiento de los ríos, de acuerdo al objetivo que se necesita representar con mayor interés.

El primer paso en el análisis es necesariamente el estudio del río. El río que está en la naturaleza es demasiado complejo para poderlo reproducir en un modelo matemático o físico. Tenemos que imaginar un río mucho más simplificado que el que existe realmente. En ningún modelo podríamos reproducir las variaciones instantáneas del caudal líquido, del caudal sólido, de la sección transversal, de la pendiente y de todas las características hidráulicas de un río. En consecuencia, nos fabricamos un río ideal, que es el que se estudia en un modelo, físico o matemático. Nuestras fórmulas no son para el río que existe en la naturaleza, sino para el río construido en nuestra mente.

Para el segundo paso es necesario simplificar y esquematizar la obra proyectada. En el modelo no se considera, por ejemplo, los problemas de estabilidad estructural y de socavación. Si bien es cierto que las simplificaciones son inevitables, debemos ser conscientes de ellas para poder interpretar los resultados obtenidos en cualquier modelo.

El tercer paso es darle una correcta interpretación a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el modelo idealizado, es decir, ahora intentar establecer un pronóstico de lo que podrá ocurrir en la naturaleza con las condiciones de laboratorio.



### 3.2 EJEMPLO DE MODELOS FLUVIALES CON FONDO MOVIL.

Modelos realizados en el instituto de ingeniería.

En el caso de los modelos realizados en el Instituto de Ingeniería los enfoques principales de la modelación fueron los siguientes; del río Suchiate en el tramo de Ciudad Hidalgo fue la de protección de márgenes, en el mismo río pero en la sección del Corte Ponciano la finalidad del estudio fue la de rectificación y protección de las orillas principalmente en el margen perteneciente a México. En la siguiente imagen se ilustra una prueba realizada con el principal objetivo de estudio era la protección de márgenes.



**Fig. 3.3** Modelo del río Suchiate en el tramo de Ciudad Hidalgo. El principal objetivo de estudio era la protección de márgenes.

### Modelo del río Suchiate, Ciudad Hidalgo.

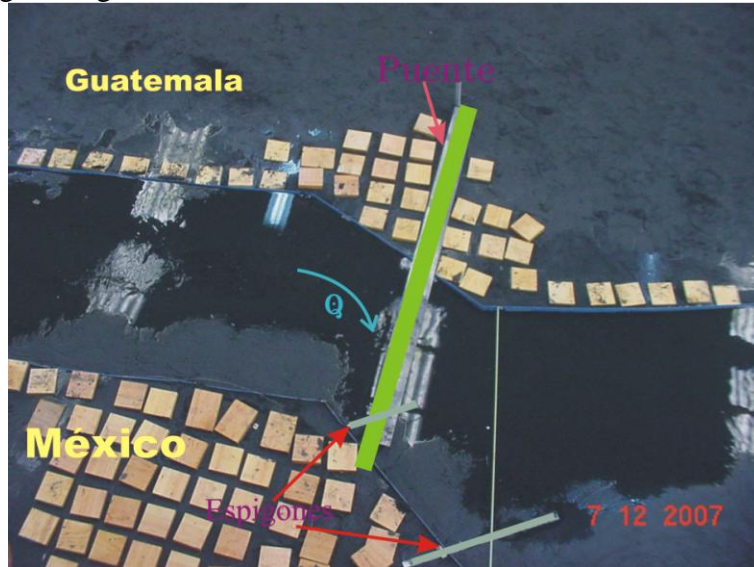
Se presentan algunos ejemplos de la modelación tratada en el presente trabajo, se tomaran algunos modelos realizados en el instituto de ingeniería para ilustrar este tema, antes de entrar en los desarrollos numéricos, que en ocasiones nublan un poco nuestro objetivo principal, el cual, es el de representar de manera esquemática los prototipos naturales, y en consecuencia, se pierde interés en el tema al solo abordarlo de manera matemática.

Este modelo construido en las instalaciones del Instituto de Ingeniería tenía dos propósitos, en dos tramos distintos del cauce, se estudiaron por separado cada caso y además por motivos de espacio y de escalas se realizaron dos modelos respectivamente en el Instituto de Ingeniería, el primero tenía como objetivo realizar las pruebas que nos ayudaran a entender los fenómenos y problemas de inundación y desbordamiento así como estudiar los efectos en las pilas del puente fronterizo, esto en la población de Ciudad Hidalgo, como posible obras de control se propusieron diferentes ensayos; como la colocación de espigones en áreas donde se apreciaban grandes velocidades del liquido para así proteger las márgenes del río, principalmente del lado mexicano, otra prueba que se ensayo fue la que nos permitiría que el río no se desbordara en la época de lluvias y para esto se realizaron una serie de dragados de distintas magnitudes dentro de las zonas que aparentemente pudieran ayudar o facilitar el arrastre de sedimentos y aumentar la capacidad de las secciones transversales para poder conducir mayores gastos, otra prueba realizada en este tramo fue la de proponer bordes mas elevados a orillas del río para aumentar su capacidad.

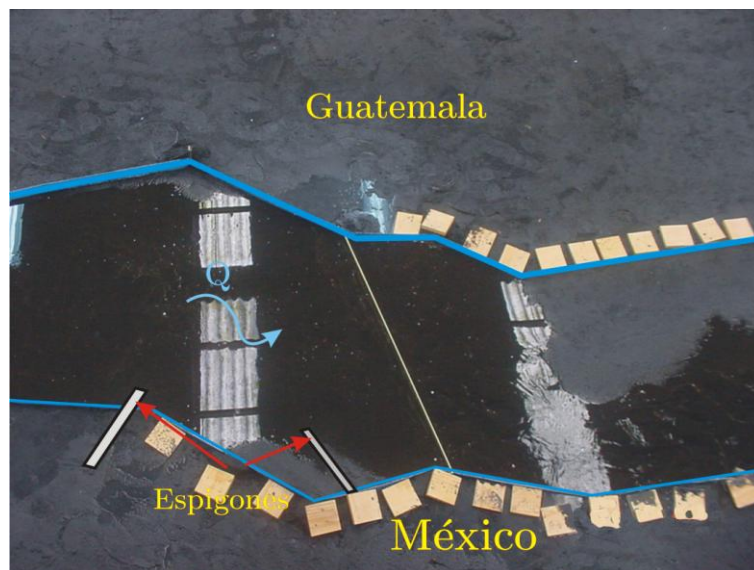


**Fig. 3.4 Pruebas realizadas con gastos de distintas magnitudes para entender mejor el fenómeno, vista aguas debajo de Ciudad Hidalgo.**

Para todas las pruebas se realizaron varios ensayos para cada posible solución con diferentes gastos y tiempos de operación del modelo la siguiente imagen muestra el puente de cruce entre los dos países una vez concluida una prueba con espigones para direccionar el cauce y proteger márgenes.



**Fig. 3.5 Pruebas realizadas con espigones probando algunas posibles geometrías. Ciudad Hidalgo.**



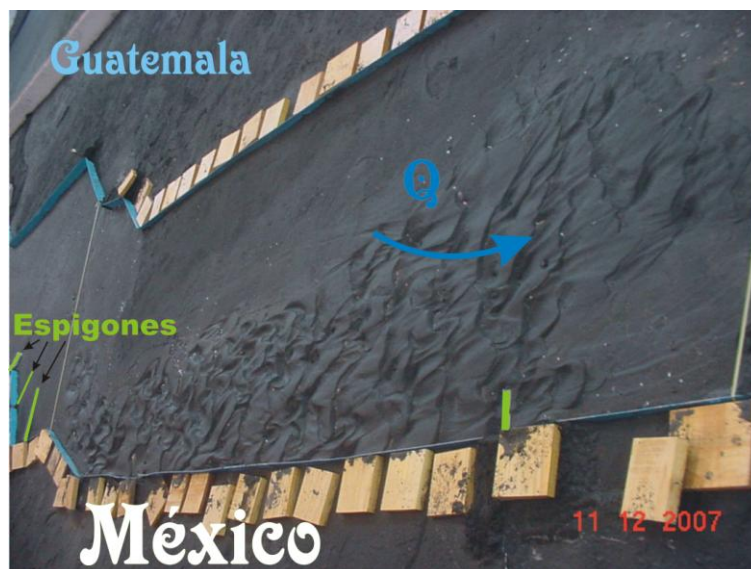
**Fig. 3.6 Espigones para reducir las velocidades y proteger márgenes**

En la siguiente figura se aprecia el funcionamiento de los espigones situados aguas abajo del puente fronterizo, los cuales ayudan a proteger los márgenes del río con un gasto de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo, cabe mencionar que a menores gastos los espigones funcionaron de una mejor manera y a mayores gastos se notaba las deficiencias que llegaban a tener



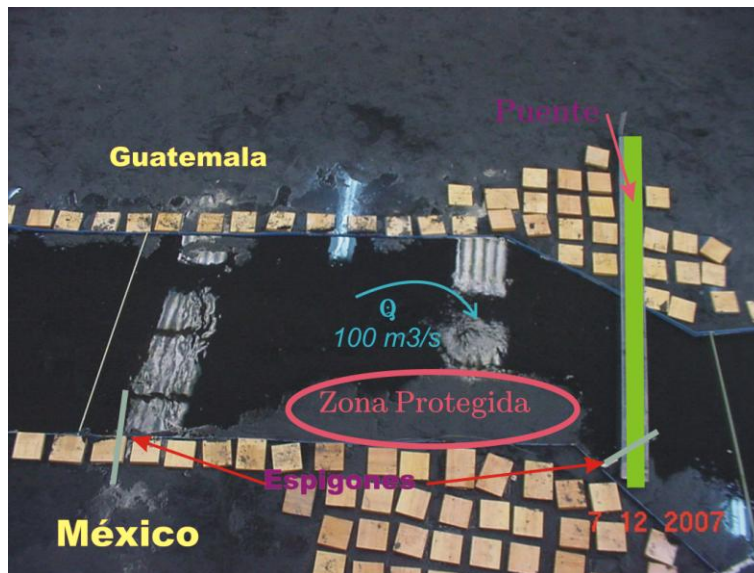
**Fig. 3.7 Espigones funcionando del lado Mexicano**

En las partes del río donde se rebasaba la velocidad de arrastre del material se presentaba el fenómeno de formación de dunas, evento que es de gran interés para tener en cuenta la cantidad de material arrastrado y depositado en secciones del cauce a evaluar.



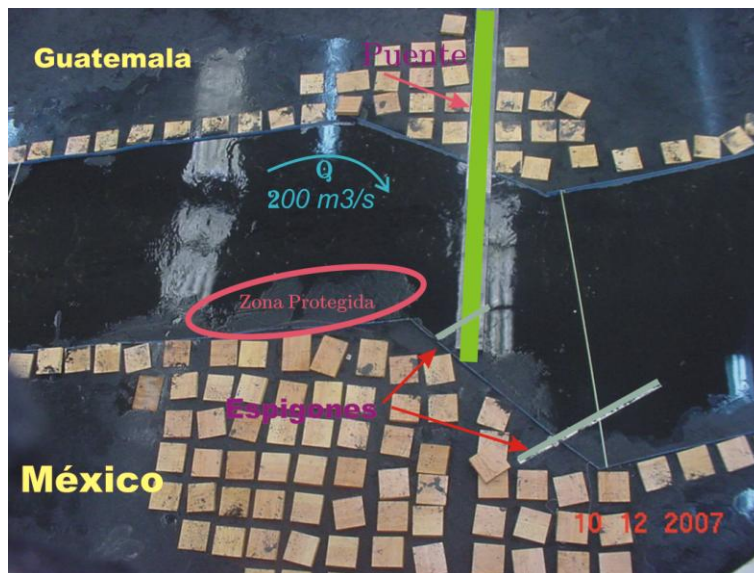
**Fig. 3.8 Dunas formadas aguas arriba del puente fronterizo**

Durante la modelación de las pruebas se proponían diferentes soluciones que pudieran auxiliar en futuras investigaciones dentro de la misma zona como los métodos de posible construcción de los espigones, orientación de los mismos o métodos de dragado en zonas específicas detectadas por medio del modelado y así contar con una idea mas precisa al momento de realizar las obras en el prototipo, esto al igual que las demás pruebas se tuvieron que realizar en la presencia de varios gastos



**Fig. 3.9** Prueba realizada con un gasto en prototipo de 100 m<sup>3</sup>/s.

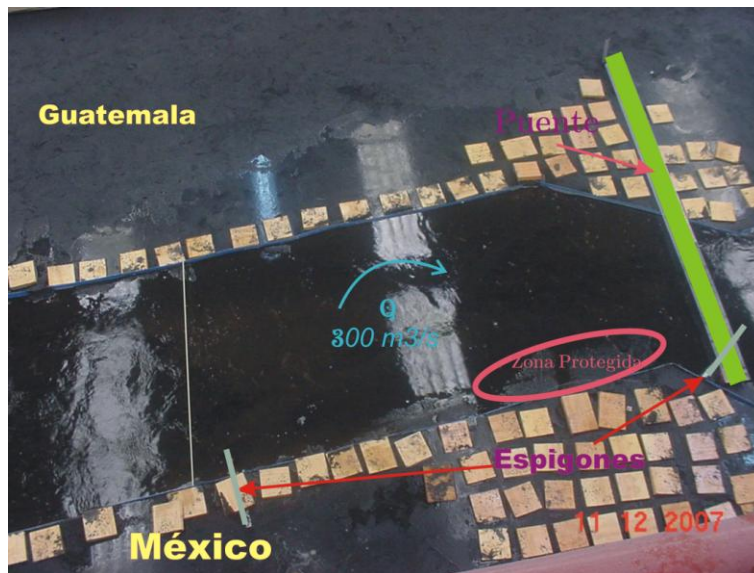
Se aprecia la zona protegida al actuar los espigones como barrera en las orillas



**Fig. 3.10** Prueba realizada con un gasto en prototipo de 200 m<sup>3</sup>/s.

En las figuras anteriores se aprecia que al aumentar el gasto se ve aumentada el área hidráulica dentro del río provocando mayores zonas susceptibles de inundación





**Fig. 3.11 Prueba realizada con un gasto en prototipo de 300 m<sup>3</sup>/s.**

Con el gasto de mayor los espigones en la geometría actual disminuyen su eficiencia así como el área que protegen.

Por otra parte también existen para estos casos la ayuda de modelos matemáticos recurrentes para los ingenieros, para resolver de manera teórica el mismo problema que se resuelve en el modelo físico, como por ejemplo para poder darle al flujo la dirección deseada en el cauce podríamos hacer uso de la ley de impulso y cantidad de movimiento para calcular las fuerzas con sus magnitudes y direcciones específicas dentro del fluido, y colocar los espigones de la manera geométrica mas adecuada para re direccionar el flujo, sin embargo esto no seria concluyente pues como se ha mencionado con anterioridad en el modelo matemático se idealiza el problema y es por eso que en estos casos se confía mas en los resultados de los experimentos prácticos.

### **Modelo del río Suchiate, Corte Ponciano**

En el tramo denominado como corte Ponciano el objetivo de las pruebas realizadas fueron la localización de obras hidráulicas que permitiesen regresar el río al cauce original, que debido a los fenómenos climatológicos que se suscitaron en el año del 2006 desbordaron el río hacia territorios donde ocasiono problemas en las poblaciones y debido a esto se tuvieron que estudiar las posibles soluciones para esta compleja situación.

En la siguiente figura se observa el tramo del río que fue objeto del estudio y que abarco diferentes etapas, como son la localización apropiada de las obras para su mayor eficiencia y fácil construcción, la experimentación con distintas geometrías en las obras propuestas, la experimentación con gastos para diferentes diseños en las obras hasta obtener los resultados deseados.



Fig. 3.12 Modelo del río Suchiate en el tramo del Corte Ponciano.

El principal objetivo de estudio era el de encausar el fluido por el trayecto original.

En esta imagen se muestra el problema del re-encauzamiento del tramo en estudio, cauce original y cauce no deseado.

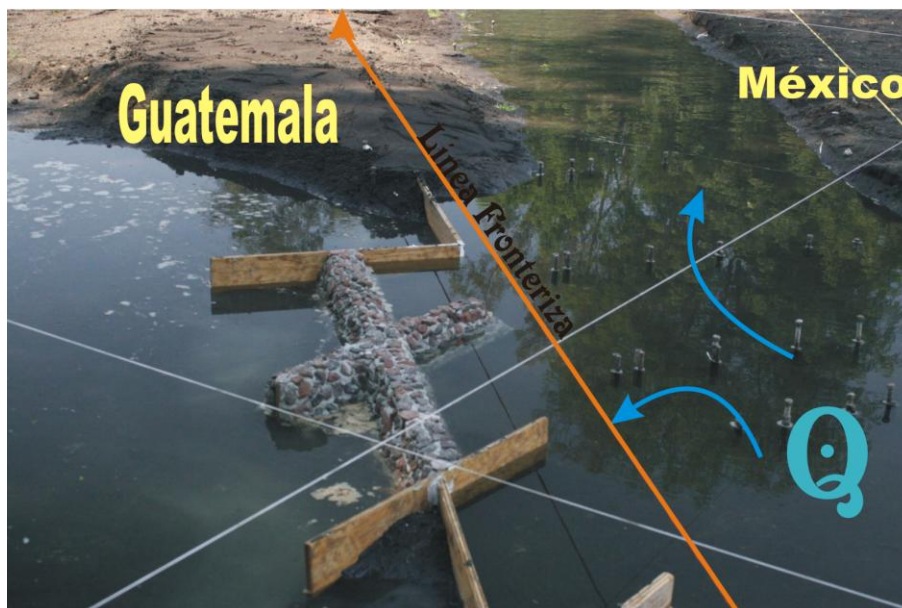
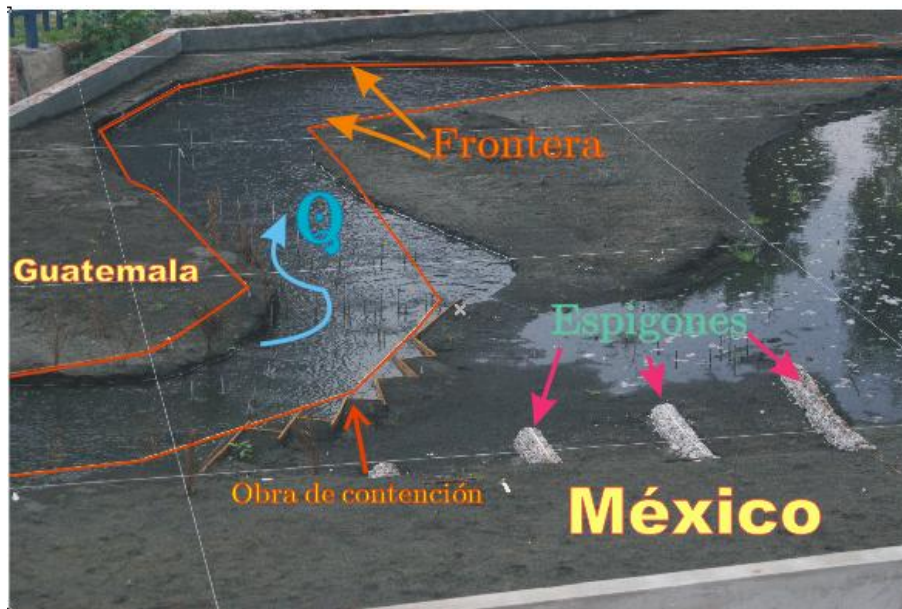


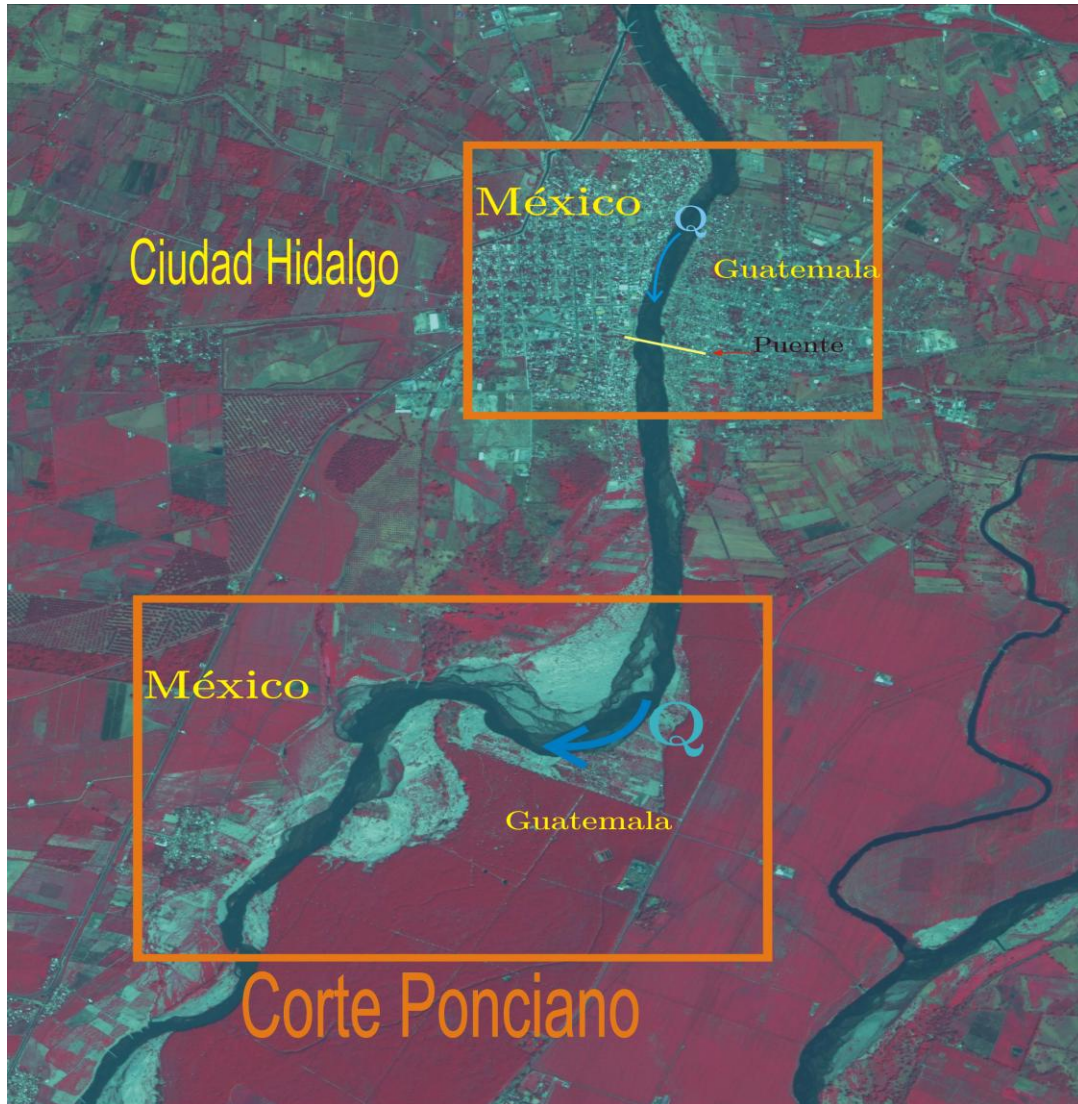
Fig. 3.13 Posible solución al problema estudiado



**Fig. 3.14 Obras propuestas: Geometría propuesta para el control del cauce y redireccionamiento del mismo**

En este tipo de problemas, como en todos donde tenga que tratarse la interacción hidrodinámica de una corriente con las características de los sedimentos, es sin duda muy complejo.

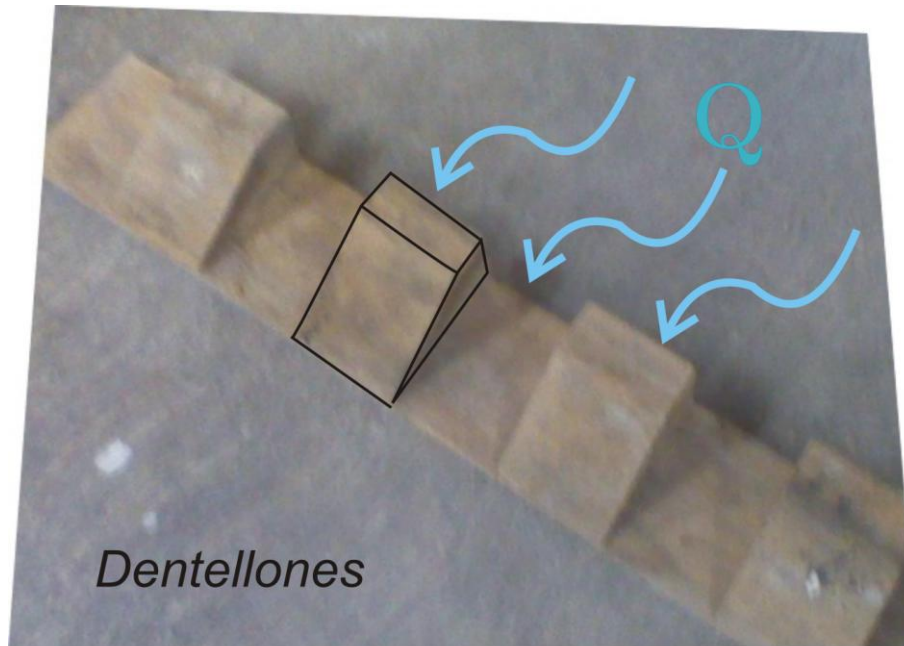
La misma dificultad que se establece para la selección del criterio analítico para tratar un problema de transporte de sedimentos, se presenta para seleccionar el criterio de similitud a emplear en modelos hidráulicos de fondo móvil, encontrándose con frecuencia posiciones opuestas, lo cual hace imposible encontrar o afirmar la existencia del criterio universal de similitud.



**Fig. 3.15 Imagen de la zona del río Suchiate modelada**

Se muestra la parte del río en Ciudad Hidalgo y la parte del río correspondiente al corte Ponciano.

Otros modelos que se construyeron dentro del instituto de ingeniería incluyen el modelo de la escotadura en el río carrizal que ha tenido varios objetos de estudio, dentro de los cuales podemos mencionar la disipación de la energía a la descarga de las compuertas de la obra de excedencias, para así evitar daños en la base de la obra y en las orillas circundantes, esto se logra mediante la experimentación y construcción de obras como dentellones, escalones y algunas combinaciones entre estos y las diferentes geometrías que pudieran arrojar los efectos deseados.



**Fig. 3.16**

**Dentellones a escala que ayudan a disipar la energía en la base de descargas de agua ya sea en vertedores de excedencias o compuertas**

### 3.4 BASES TEÓRICAS DE LA MODELACIÓN

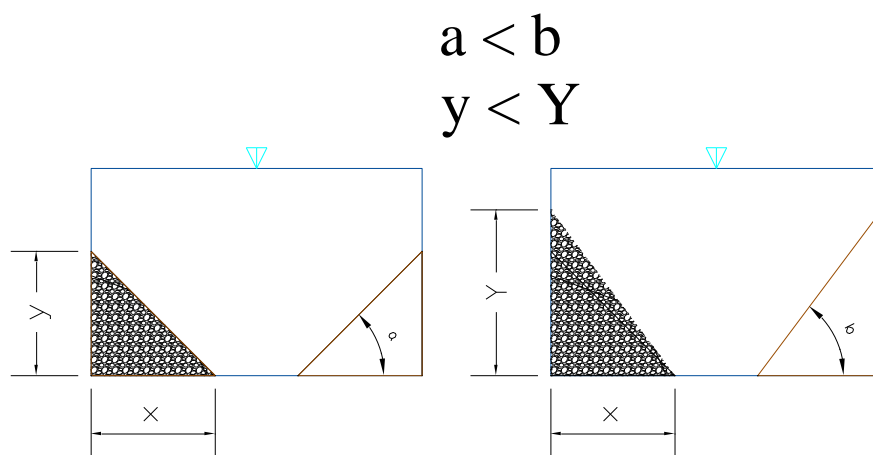
Básicamente la modelación es simplemente seleccionar un tamaño de escala que reduzca las dimensiones del prototipo al tamaño adecuado y menor del modelo de tal manera que lo podamos construir dentro del espacio con el que se cuenta como se explicara mas adelante.

Lo que caracteriza a los modelos de fondo móvil presentados en este trabajo es que la frontera en contacto con el líquido está representada por un material que puede ser arrastrado o depositado.

Las dos complicaciones que surgen en la modelación de este tipo (Maza, et al 1960) son que se debe de reproducir el movimiento del material de fondo así como el movimiento de agua en el prototipo, además de que durante la operación, la rugosidad del fondo no puede ser controlada o colocada por el operador, y más bien, depende del estado de movimiento y de las dimensiones de las partículas del fondo.

La distorsión en el contexto utilizado en la modelación, significa que las escalas tanto vertical como horizontal elegidas para el modelo tengan valores diferentes es decir se empleen dos escalas y no solo una para ambas dimensiones

Un problema que se presenta al aumentar la distorsión en un modelo de fondo móvil, es que la pendiente de las orillas se incrementa más allá del ángulo estable del material, de tal manera que no pueden sostenerse. Los modelos distorsionados tienen el efecto de que la pendiente se incrementa al haber dos escalas la vertical y la horizontal.



**Fig. 3.17 Ángulo de reposo la imagen de la izquierda tiene mayor estabilidad**



Un remedio posible será hacer las orillas del cauce de un material rígido, pero solo si los márgenes del prototipo son estables y no se desean estudiar los efectos sobre ésta.

Por lo anterior es importante entender lo suficiente el fenómeno, la influencia de las variables relevantes para ser seleccionadas y, a partir de esto, establecer el criterio de similitud más adecuado.

Como la distorsión en el modelado de cauces de fondo móvil siempre es positiva y mayor que la unidad esto implica que la escala de pendientes definida como

$$S_e = \frac{S_p}{S_m} \quad (3.1)$$

Sea

$S_p$ - Pendiente del prototipo.

$S_m$ - Pendiente del modelo

$S_e$ - Escala de Pendientes  $S_e \leq 1$

Puesto que la escala de pendientes  $S_m$  en los modelos siempre será mayor que la pendiente en el prototipo  $S_p$ .

Al aumentar la pendiente se hace notar que es necesario aumentar también la rugosidad puesto que el ángulo de reposo del material podría ser alcanzado más fácilmente con la pendiente incrementada y el efecto a estudiar implicaría una serie de adecuaciones que probablemente no representen el fenómeno. Según la bibliografía las distorsiones aceptadas y recomendadas son entre dos y siete.

➤ Elección de las escalas.

Los dos grados de libertad que ofrecen los modelos de fondo móvil son las escalas de líneas tanto vertical definida como

$$L_e = \frac{L_p}{L_m} \quad 3.2$$

así como en la horizontal

$$H_e = \frac{H_p}{H_m} \quad 3.3$$

La escala de líneas horizontales se elige tomando en cuenta el espacio disponible en el laboratorio y tiene valores muy comunes de entre 100 y 200.



La escala de líneas verticales se elige tomando en cuenta varios factores:

- 1.- Que se tenga el equipo adecuado para suministrar el gasto necesario en nuestro modelo.
- 2.- Que la distorsión no sea mayor que 10.
- 3.- Que la rugosidad sea reproducida sin dificultad.

➤ Similitud hidráulica

La teoría de similitud establece que “si dos sistemas que obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones, se hacen idénticos, los dos sistemas deben de exhibir que existe una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones”.

Es así que los modelos físicos deben ser similares en sus condiciones de flujo en prototipo y en el modelo; similares en forma (similitud geométrica), movimiento (similitud cinética) y fuerzas (similitud dinámica).

La similitud geométrica relaciona todas las longitudes homologas en los dos sistemas, donde  $l_e$  es la escala de líneas y cuantifica el tamaño relativo del prototipo y el modelo. La similitud geométrica se extiende a la rugosidad superficial de las paredes que limitan al flujo.

La similitud cinemática entre dos sistemas de flujo se interpreta como la semejanza geométrica entre las líneas de corriente de ambos flujos, ya sea con o sin distorsiones.

La similitud dinámica implica que la relación de las fuerzas dinámicas sea la misma. Tanto en la similitud geométrica como en la dinámica existen escalas de velocidad, fuerzas, tiempos, densidades, viscosidad, etc. los cuales miden las características o propiedades del fluido.

Los parámetros adimensionales que se utilizan en los modelos hidráulicos con flujo a superficie libre, en régimen turbulento, generalmente son el Número de Froude y el de Reynolds

Existen otras posibles condiciones para escalar un modelo, que implican realizar adecuaciones tanto físicas como matemáticas, las condiciones son relaciones que tendremos que proponer entre el prototipo y el modelo un ejemplo de esto sería la condición de Euler tomando como base del análisis el número de Euler.

$$E = \frac{v^2 \rho}{p} \quad 3.4$$





Que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de presión, al establecer la relación entre el modelo y prototipo, para esto tendríamos que proponer un fluido con diferente densidad en el modelo pues este factor también sería un parámetro a escalar; además de esta condición existen muchas más como la condición de Reynolds que utiliza el número del mismo para establecer la relación de escalas.

Dentro de todo esto la condición más favorable que se adecua a nuestras necesidades es la utilización de la condición de Froude como

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad 3.5$$

Puesto que relaciona las fuerzas de inercia con las de gravedad.

En prototipo y modelo se debe cumplir que:

$$F_{Pr} = F_{rM} \quad 3.6$$

Entonces la relación entre modelo y prototipo también tiene como variable la gravedad y debido a que sería muy difícil establecer campos gravitacionales a escala en los modelos, la condición queda como a continuación se presenta donde los subíndices m y p son para modelo y prototipo respectivamente.

$$F_{rE} = \frac{F_{rP}}{F_{rM}} = \frac{\frac{V_P}{\sqrt{g_P \cdot h_P}}}{\frac{V_M}{\sqrt{g_M \cdot h_M}}} \quad 3.7$$

$$F_{rE} = \frac{V_E}{\sqrt{g_E \cdot H_E}} = 1 \quad 3.7.1$$

Donde:

$V_E$ .-Escala de velocidades

$g_E$ .- aceleración de la gravedad

$H_E$ .-Escala de Tirantes medios

Y como la gravedad es la misma en ambos sistemas tenemos lo siguiente.

$$F_{rE} = \frac{V_E}{\sqrt{H_E}} = 1 \quad 3.7.2$$

Resultando que la escala de velocidades está en función de la escala de líneas horizontal:

$$V_E = \sqrt{H_E} \quad 3.8$$



Al igual que para la escala de velocidades, las restantes estarán en función de la escala de líneas.

Los valores de las escalas de mayor interés son los siguientes.

Escala de áreas.

$$A_E = H_E \cdot L_E \quad 3.9$$

Con base en la ecuación de continuidad para flujo unidimensional en régimen permanente se tiene que:

$$Q_E = A_E \cdot V_E \quad 2.10$$

Escala de gastos.

$$Q_E = H_E^{3/2} \cdot L_E \quad 3.10$$

De la definición de velocidad media, que es distancia entre tiempo, la escala de tiempos es igual a:

$$t_E = \frac{H_E}{V_E} = \frac{H_E}{\sqrt{H_E}} \quad 3.11$$

Escala de tiempos para recorridos horizontales de una partícula.

$$t_E = H_E^{1/2} \quad 3.12$$

Análogamente se obtienen la escala de volumen.

$$v_E = H_E \cdot L_E^2 \quad 3.13$$

Escala de pendientes.

$$S_E = \frac{H_E}{L_E} \quad 3.14$$

Y la distorsión queda definida como:

$$\Delta = \frac{L_E}{H_E} = S_E^{-1} \quad 3.15$$

### Escala de rugosidades.

El coeficiente de rugosidad estará estudiado principalmente por la expresión que desarrollo Robert Manning.

$$n = \frac{r^{2/3} S^{1/2}}{V} \quad 2.8$$

Y por lo tanto, la escala de coeficiente de rugosidad es:

$$n_E = \frac{r_E^{2/3} S_E^{1/2}}{V_E} \quad 3.16$$

Donde:

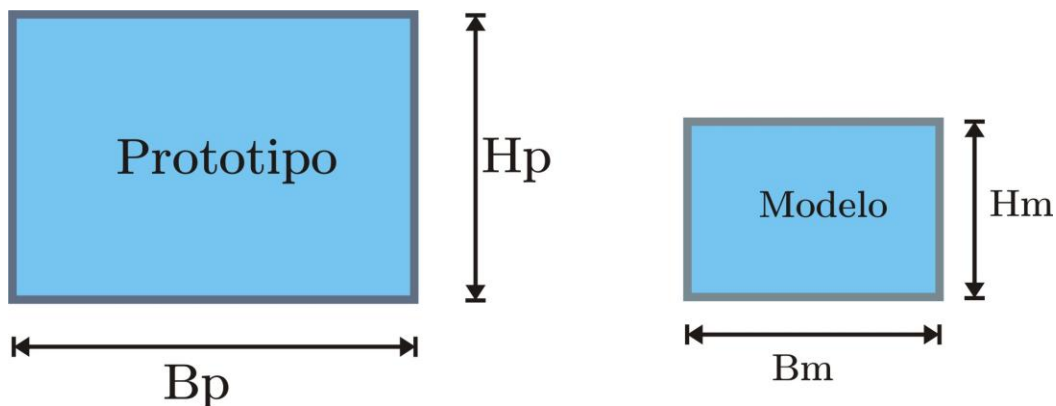
$n_e$ ; escala de rugosidades

$R_{He}$ ; escala de radios hidráulicos

$S_e$ ; escala de pendientes.

En la expresión anterior se desconoce el valor de la escala de radios hidráulicos, este depende de la geometría de la sección. Como ilustración del procedimiento de calculo, se indican los pasos a seguir si la sección del cauce es rectangular; si no lo fuera el procedimiento es semejante.

Sean las secciones del prototipo y su correspondiente en el modelo.





La relación de las escalas de radios hidráulicos se escribe como

$$r_E = \frac{r_P}{r_M} \quad 3.17$$

$$r_E = \frac{A_P / P_P}{A_M / P_M} \quad 3.18$$

Y sabiendo que

$$L_e = \frac{L_P}{L_M} = \frac{B_P}{B_M} \quad 3.2$$

$$H_e = \frac{H_P}{H_M} \quad 3.3$$

Se puede escribir

$$r_E = \frac{B_P \cdot H_P (B_M + 2H_M)}{B_M \cdot H_M (B_P + 2H_P)} = H_E \cdot L_E \frac{B_M + 2H_M}{B_P + 2H_P} \quad 3.19$$

Introduciendo a  $L_e$  en el paréntesis y sustituyendo a  $H_M$  por  $\frac{H_P}{H_E}$

$$r_E = \frac{H_E (L_E \cdot B_M + 2L_E \cdot H_P / H_E)}{B_P + 2H_P} \quad 3.20$$

Dividiendo entre  $B_P$  y sabiendo que la distorsión es:

$$\Delta = \frac{L_E}{H_E} = S_E^{-1} \quad 3.21$$

Resulta:

$$r_E = \frac{H_E \left( \frac{B_P}{B_M} \cdot \frac{B_M}{B_P} + 2 \frac{B_P}{B_M} \cdot \frac{H_P}{B_P \cdot H_E} \right)}{\frac{B_P}{B_P} + 2 \frac{H_P}{B_P}} \quad 3.22$$

Reordenando términos:

$$r_E = \frac{H_E (1 + 2\Delta H_P / B_P)}{1 + 2H_P / B_P} = K \cdot H_E \quad 3.23$$

Donde

$$K = \frac{(1 + 2\Delta H_P / B_P)}{1 + 2H_P / B_P} \quad 3.24$$



Sustituyendo los valores conocidos

$$n_E = \frac{K^{2/3} H_E^{2/3} H_E^{1/2}}{H_E^{1/2} L_E^{1/2}} \quad 3.25$$

Por lo que

$$n_E = \frac{K^{2/3} H_E^{2/3}}{L_E^{1/2}} \quad 3.26$$

Si se tiene un modelo no distorsionado  $L_e = H_e$   $K=1$  y por lo tanto.

$$n_E = L_E^{1/6} \quad 3.27$$

Como analogía más simplificada se tiene lo siguiente, de la expresión de Manning.

$$V_E = \frac{1}{n_E} R_{HE}^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

Como el radio hidráulico es una variable en dimensiones de longitud, entonces  $R_{He} = L_e$  (escala horizontal); las pendientes,  $S$ , en prototipo y modelo deben ser iguales, entonces  $S_e=1$ , por tanto la ecuación de Manning se simplifica a:

Resultando:

$$V_e = \frac{1}{n_e} L_e^{2/3} \quad (2.8)$$

De donde:

$$n_e = \frac{L_e^{2/3}}{V_e} = \frac{L_e^{2/3}}{\sqrt{L_e}} = L_e^{1/6} \quad 2.8.1$$

La *ecuación 2.8.1* indica que, con base en la fórmula de Manning, la relación de las rugosidades entre prototipo y modelo es igual a la escala de líneas a la  $1/6$ ; solo en el caso de modelos no distorsionados.



### 3.5 PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN MÓDELO

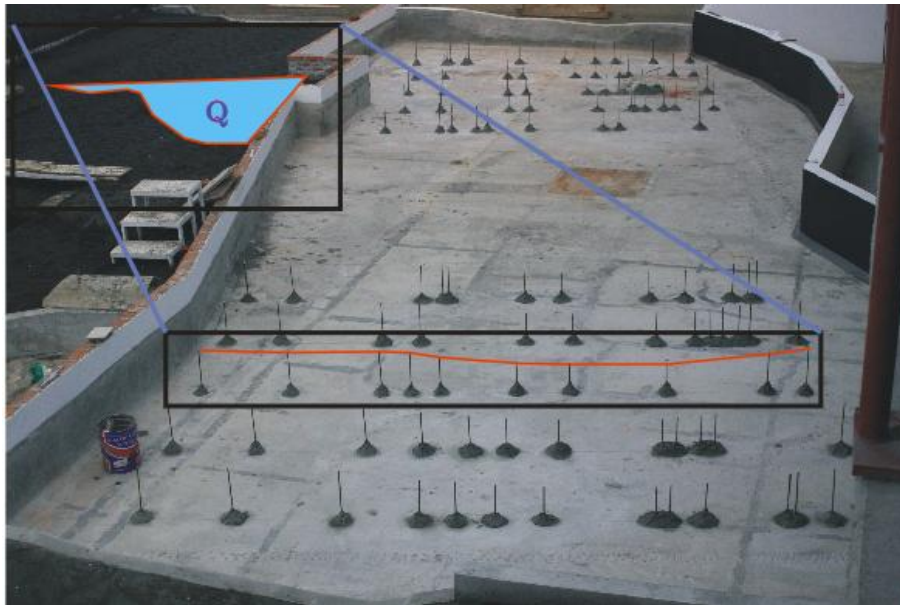
El procedimiento que se realiza en el instituto de ingeniería para construir los distintos modelos de los ríos es el siguiente:

- 1) Se seleccionan las escalas con los criterios adecuados conforme a lo descrito anteriormente.
- 2) Con los datos obtenidos de los diversos estudios se realizan los levantamientos topográficos para simular la batimetría del río en diferentes secciones. Esto se hace anclando varillas a distintas distancias como se muestra en la imagen 3.18
- 3) Se colocan secciones de control tanto aguas arriba como aguas abajo del cauce a estudiar para poder manipular los niveles de los tirantes dentro del flujo además de poder controlar los gastos a utilizar durante las pruebas y calibrar el modelo.
- 4) Se realizan las obras hidráulicas que se encuentran dentro del cauce, esto se hace a detalle para las simulaciones correctas como pueden ser compuertas, presas o alguna otra obra de control o contención.
- 5) Se calibra el modelo para poder obtener los resultados con la menor incertidumbre posible, esto es se realiza con muchos ensayos a través de prueba y error como se indica en la bibliografía (Maza et al 1960).
- 6) Con el material más conveniente a simular la escala de rugosidades, se rellena el área a estudiar, solo en el caso de modelos de fondo móvil.
- 7) Finalmente se dan los acabados finales al cauce y las obras para calibrar el modelo a estudiar con algunos datos que se tengan de mediciones en el prototipo para tener así unos resultados mas confiables haciendo uso de la técnica de ensayo y error descrita en la publicación del Dr. Maza et al 1960.



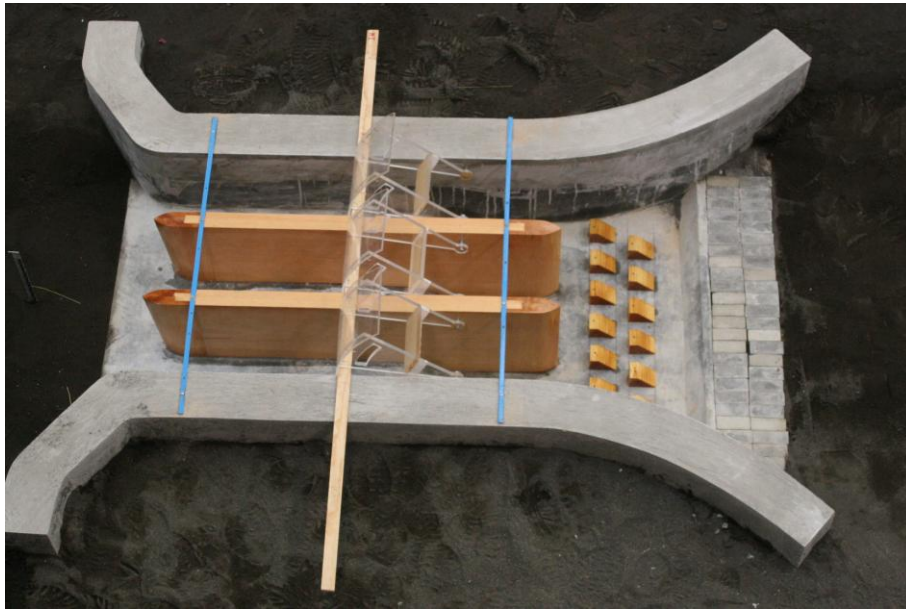
**Fig. 3.18 Área a utilizar en un modelo**

Selección de escalas horizontales de acuerdo con el área disponible dentro del laboratorio.



**Fig. 3.19 Modelo Projectado del río Pichualco.**

La imagen 3.19 muestra como se simula la batimetría del cauce por medio de varillas alineadas en cada sección elegida del prototipo y niveladas.



**Fig. 3.20 Modelo Projectado del río Pichualco.**  
Obra de control a estudiar en el comportamiento del modelado del cauce.



**Fig. 3.21 Modelo Projectado del río Pichualco.**

Finalmente con el material seleccionado para simular el fondo móvil del cauce se realizan los arreglos y detalles finales.





### 3.6 EJEMPLO DE APLICACIÓN

En esta sección se presenta la teoría para la selección de escalas en el trabajo de modelado. Para la selección de las escalas del modelo Suchiate, se realizaron las consideraciones ya descritas con anterioridad dentro de este mismo trabajo, una vez teniendo en cuenta esto, se procede a aterrizar dentro de la práctica las bases teóricas.

Para el modelo del río Suchiate realizado se tiene como ejemplificación que la escala tanto horizontal como vertical fueron las mismas esto nos dio un modelo que no fue distorsionado, es decir que, en este modelo se pueden estudiar los fenómenos sin introducir factores que nos relacionen a las dimensiones de profundidades del cauce y distancias horizontales entre secciones.

Las escalas fueron de 1:100 es decir que cada centímetro de tirante en el modelo es un metro en el prototipo.

Y así tenemos las siguientes relaciones de escalas en base a las definiciones echas anteriormente en este capítulo.

$$\begin{array}{c} \text{Escala horizontal} \\ L_e = \frac{L_p}{L_m} \end{array} \quad 3.2$$

$$\begin{array}{c} L_e = \frac{100}{1} \\ \text{Escala vertical} \\ H_e = \frac{H_p}{H_m} \end{array} \quad 3.3$$

$$H_e = \frac{100}{1}$$

Escala de velocidades;

$$\begin{array}{c} V_E = \sqrt{H_E} \\ V_E = \sqrt{100} = 10 \end{array} \quad 3.8$$

Principalmente esta es la condición para la cual se modelan este tipo de prototipos hidráulicos, la similitud de froude:

$$F_{rE} = \frac{V_E}{\sqrt{H_E}} = 1 \quad 3.7.2$$



Escala de áreas:

$$A_E = H_E \cdot L_E \quad 3.9$$
$$A_E = 100 \cdot 100 = 10000$$

Escala de gastos:

$$Q_E = A_E \cdot V_E \quad 2.9$$
$$Q_E = 10000 \cdot 10 = 100000$$

O bien;

$$Q_E = H_E^{3/2} \cdot L_E \quad 3.16$$
$$Q_E = 100^{3/2} \cdot 100 = 100000$$

La escala de tiempos es igual a:

$$t_E = \frac{H_E}{V_E} = \frac{H_E}{\sqrt{H_E}} \quad 3.11$$
$$t_E = \frac{100}{10} = \frac{100}{\sqrt{100}} = 10$$

Escala de tiempos para recorridos horizontales de una partícula.

$$t_E = H_E^{1/2} \quad 3.12$$
$$t_E = 100^{1/2} = 10$$

Escala de volumen.

$$v_E = H_E \cdot L_E^2 \quad 3.13$$
$$v_E = 100 \cdot 100^2 = 1,000,000$$

Escala de pendientes.

$$S_E = \frac{H_E}{L_E} \quad 3.14$$
$$S_E = \frac{100}{100} = 1$$

Distorsión en el modelo (se procura que la distorsión no sea mayor de 5 en modelos de fondo móvil):



$$\Delta = \frac{L_E}{H_E} = S_E^{-1} \quad 3.15$$

$$\Delta = \frac{100}{100} = 1$$

Escala de rugosidades:

$$n_E = \frac{L_E^{2/3}}{V_E} = \frac{L_E^{2/3}}{\sqrt{L_E}} = L_E^{1/6} \quad 3.16$$

$$n_E = 100^{1/6} = 2.15$$

Y con la obtención de todos estos valores de escalas se pueden trabajar las mediciones obtenidas en los prototipos y para calibrar los modelos, así como, interpretar los datos obtenidos en los modelos y pasarlos a las escalas de prototipo para tener una idea más realista utilizando las herramientas vistas en el capítulo 2 de este trabajo.