



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SEDIMENTOS EN BIFURCACIONES PARA BOCATOMAS, MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA

Yesenia Siancas-Columbos

Piura, marzo de 2018

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Siancas, Y. (2018). *Estudio del comportamiento de sedimentos en bifurcaciones para bocatomas, mediante modelación numérica* (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**“Estudio del comportamiento de sedimentos en bifurcaciones para bocatomas,
mediante modelación numérica”**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Yesenia Minerva Siancas Columbos

Asesor: Dr. Jorge D. Reyes Salazar

Piura, marzo de 2018

A Dios por permitir cumplir mi sueño. A mis
padres Miguel y Rita por su paciencia y amor. Y
a la memoria de mi abuela Aura y hermano
Ángel, mis eternos ángeles.

Prólogo

Una bocatoma es una estructura hidráulica construida sobre un río o un canal con el objetivo de captar una parte o la totalidad del caudal de la corriente principal, siendo inevitable la captación de sedimentos. Por lo tanto, el diseño de esta estructura está ligado al conocimiento de las descargas mínimas, medias y máximas de un río y de los sedimentos (fondo y suspensión).

En la presente tesis se analizan bocatomas que captan en forma directa las aguas de un río sin ninguna estructura de almacenamiento tipo presa, evitando la construcción de barrajes que constituyen un costo elevado. Por lo tanto, es necesario realizar investigaciones de las características hidráulicas y sedimentológicas presentes en una captación directa con un ángulo de 90° respecto al canal principal, permitiendo reconocer las zonas de recirculación que reducen el ancho efectivo de una bifurcación, siendo esta reducción afectada por un coeficiente de contracción que muestra el espacio real que aprovechará el canal; así como las líneas de corriente y el comportamiento sedimentológico en las zonas de ingreso.

La ecuación de Pedroli es la que se ajusta mejor a resultados de mediciones de campo considerando cargas de sedimentos realizados en canales rígidos en presencia de captaciones laterales. Otra opción para la representación del comportamiento hidráulico y sedimentológico son los modelos físicos a escala, donde se puede observar la realidad, pero hay fuerzas que no se representan correctamente debido a la reducción del tamaño de la estructura.

Es por esto que la modelación numérica 2D a trabajar en la presente tesis mediante el programa Telemac Mascaret, es capaz de representar el comportamiento de sedimentos en canales con bifurcaciones. Una vez lograda la representación de la realidad se podrá construir modelos físicos para estudiar situaciones concretas. La gran ventaja de ambos es la confiabilidad, ahorro de tiempo y dinero.

En función a resultados realizados por Thoma, Bulle, Cristiani y Benini e interpretaciones del Dr. Arturo Rocha, y a los trabajos ejecutados por el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura, se ha definido un valor de ancho – profundidad (b/y) para la máxima eficiencia hidráulica, $Q_{entrada}$, pendiente, coeficiente de rugosidad, ancho y largo de los canales principales y secundarios.

El valor de la relación b/y se considera para observar la distribución de los gastos líquidos y sólidos, el comportamiento del flujo cuando hay diferentes anchos entre el canal principal y de derivación, y el coeficiente de captación de sólidos.

Agradezco el apoyo de mi asesor, el Dr. Jorge. D. Reyes Salazar, quien siempre tuvo la disposición de participar de la investigación, brindando su aporte en la interpretación hidráulica de los resultados. Al Ing. Leo R. Guerrero Asmad, por su constante apoyo en la modelación numérica.

Resumen

La presente tesis tiene como objetivo principal caracterizar el comportamiento hidráulico y sedimentológico en diferentes tipos de bifurcaciones de 90° respecto al eje del canal principal y la dirección del flujo de agua del canal derivador, con la finalidad de obtener esquemas gráficos de diseño para bocatomas.

Se logró modelar y visualizar el comportamiento de una bocatoma mediante los softwares de simulación numérica Telemac Mascaret 2D (comportamiento hidráulico) y Sisyphe (comportamiento sedimentológico), complementando y validando los resultados de estos estudios con la representación de dos modelos físicos de bocatomas con bifurcación a 90° investigados por Thoma. Por lo que resulta factible decir que el modelo numérico se convierte en una herramienta indispensable para el diseño de estructuras hidráulicas.

Concluyéndose la influencia que tiene la zona de recirculación, presente en la bifurcación, en los comportamientos descritos, dando como recomendación un cambio de diseño en la bifurcación, de aristas vivas a redondeadas, para eliminar las zonas de recirculación y reducir así la sedimentación tanto en el canal principal como derivador.

Índice General

Introducción	1
Capítulo 1 Sedimentos.....	3
1.1. Fuente de los sedimentos.....	3
1.1.1 Naturales	3
1.1.2 Artificiales.....	4
1.2. Clasificación de los sedimentos.....	5
1.2.1 Características de las partículas sedimentarias	5
1.2.1.1 Tamaño.....	6
1.2.1.2 Forma	8
1.2.1.3 Densidad y peso específico	12
1.2.1.4 Velocidad de caída de una partícula.....	14
1.2.1.5 Composición mineralógica de los sólidos.....	15
1.3. Fondo móvil, iniciación de movimiento de una partícula	16
1.3.1 Criterio de Shields.....	17
1.3.2 Fases del transporte sólido.....	22
1.4. Gasto sólido de fondo	23
1.4.1 Metodología de cálculo	23
1.4.2 Fórmula de arrastre de fondo de Meyer Peter y Müller.....	24
1.5. Gastos sólidos en suspensión.....	25
1.5.1 Cálculo del gasto sólido en suspensión.....	25
1.6. Distribución vertical del gasto sólido en suspensión.....	27
Capítulo 2 Las bifurcaciones y su conocimiento para el diseño de bocatomas.....	29
2.1. Bocatomas	29
2.1.1 Clasificación de bocatomas	31
2.1.2 Clasificación de bocatomas de acuerdo con su temporalidad	32
2.1.2.1 Bocatomas temporales	32
2.1.2.2 Bocatomas definitivas	33
2.1.3 Criterios para el diseño de bocatomas.....	34
2.1.3.1 Ubicación	34
2.1.3.2 Topografía	35
2.1.3.3 Condiciones geológicas y geotécnicas	35
2.1.3.4 Información hidrológica.....	36

2.1.3.5 Condiciones ecológicas.....	36
2.1.4 Eficiencia de la captación.....	36
2.2. Bifurcaciones.....	36
2.3. Análisis dimensional de una bifurcación	37
2.4. Análisis hidráulico de la influencia del ángulo de bifurcación	39
2.5. Investigaciones realizadas para el estudio de bocatomas con bifurcación.....	40
2.5.1 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a 30° y 90° realizadas por Thoma ...	40
2.5.2 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a diferentes ángulos realizadas por Bulle	42
2.5.3 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a 30° realizadas por Vogel	45
2.5.4 Investigaciones de Dancy	46
2.5.5 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a diferentes ángulos realizados por Cristiani y de Benini	47
2.5.6 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a 90° realizadas por Shiu Wai Law ..	47
Capítulo 3 Modelos físicos y numéricos	51
3.1. Modelos físicos	51
3.1.1 Introducción.....	51
3.2. Modelación numérica.....	52
3.2.1 Modelos de profundidad promedio.....	52
3.2.2 Recopilación de datos.....	53
3.2.3 Modelación numérica en el ámbito de la hidráulica fluvial en la actualidad	53
3.2.4 Telemac -2D	55
3.2.4.1 Presentación del software TELEMAC-2D	55
3.2.4.2 Aspectos teóricos	56
3.2.5 Sisyphe.....	57
3.2.5.1 Introducción	57
3.2.5.2 Ecuación de evolución de fondo	58
3.3. Modelos numéricos vs Modelos físicos	59
Capítulo 4 Diseño del modelo numérico de una bocatoma con bifurcación a 90°	61
4.1. Dimensionamiento del modelo numérico	61
4.2. Pre-procesamiento	63
4.2.1 Cálculo del caudal de entrada a la bocatoma	63
4.2.2 Diseño de la superficie en BlueKenue.....	65
4.2.3 Condiciones de borde	70
4.2.4 Archivos de control del Telemac-2D para la modelación numérica del flujo de agua	73
4.2.5 Archivos de control del Telemac-2D para la modelación numérica de los sedimentos	77
Capítulo 5 Resultados	85
5.1. Resultados hidrodinámicos	86
5.1.1 Caudales	87
5.1.2 Líneas de corriente de agua.....	88

5.1.2.1 Zonas de recirculación	90
5.1.3 Número de Froude	92
5.1.4 Tirante y Nivel de agua	95
5.1.5 Velocidades.....	99
5.2. Resultados sedimentológicos.....	102
5.2.1 Zonas sedimentadas.....	102
5.3. Cambio en el diseño de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas a aristas redondeadas	113
5.3.1 Resultados sedimentológicos.....	114
5.4. Comprobación del modelo físico de las investigaciones de una bocatoma con bifurcación a 30° y 90° con aristas viva, realizadas por Thoma mediante el programa Telemac-2D	123
5.4.1 Preparación de los modelos para ejecutarlos en el programa TELEMAC-2D.....	123
5.4.2 Resultados	126
5.5. Análisis de resultados	128
5.5.1 Influencia de los anchos de la bifurcación en la captación sólida.	128
5.5.2 Líneas de corriente de agua en la bifurcación a 90° con aristas vivas y redondeadas, con partículas de arena de diámetro 1,2 mm.....	129
5.5.3 Influencia de la captación líquida en el número de Froude	129
5.5.4 Influencia de la captación líquida en el tirante	129
5.5.5 Influencia de la captación líquida en las velocidades	129
5.5.6 Influencia de la captación líquida en la captación sólida	130
5.5.7 Influencia del ancho de bifurcación en la captación de sólidos.....	130
5.5.8 Influencia del coeficiente de contracción en la captación de sólidos.....	130
Conclusiones y recomendaciones	139
Referencia Bibliográfica.....	141
Apéndices.....	145

Introducción

La presente tesis se fundamenta en el estudio hidrodinámico y sedimentológico de bocatomas con bifurcaciones a 90° con aristas vivas y redondeadas mediante modelación numérica.

En el primer capítulo, se explican las características de los sedimentos, así como también la forma de cómo se genera el movimiento de las partículas.

En el segundo capítulo, se define lo que es una bocatoma y su bifurcación, clasificación, criterios para su diseño, influencia del ángulo de bifurcación, entre otros.

En el tercer capítulo, se introduce el concepto de modelación física y numérica, así como la descripción de los softwares utilizados Telemac-2D y Sisyphe.

En el cuarto capítulo, se describe el diseño de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas, dimensionamiento de los canales y el pre-procesamiento que se debe tener en cuenta para ejecutarlos en los programas de Telemac-2D y Sisyphe.

Por último, en el quinto capítulo se presentan los resultados y el análisis de los resultados del comportamiento hidrodinámico y sedimentológico de los modelos con bifurcación a 90° con aristas vivas y redondeadas. Así como la comprobación del modelo físico de las investigaciones de una bocatoma con bifurcación a 30° y 90° con arista viva, realizadas por Thoma mediante el programa Telemac Mascaret-2D.

Capítulo 1

Sedimentos

Se da el nombre genérico de sedimentos a las partículas procedentes de las rocas o suelos, acarreadas por las aguas que escurren y por los vientos. Todos estos materiales, después de cierto acarreo, finalmente son depositados a lo largo de los propios cauces, lagos o lagunas, mar y en las partes bajas de la cuenca, principalmente en la planicie, lo que da origen a la formación de capas de sedimentos y a su levantamiento.

El material depositado en un gran cuerpo de agua modifica su estructura y característica final.

1.1. Fuente de los sedimentos

Este apartado se ha realizado utilizando la referencia de García & Maza (1998)

No es posible indicar con precisión todas las fuentes que producen los sedimentos que llegan a un río y que son acarreador por su corriente. Sin embargo, la fuente principal la constituyen los suelos y rocas que se encuentran en su cuenca, y el agua y el viento son, en nuestro medio, los principales agentes de erosión y de transporte. Por otro lado, dada la actividad del hombre en el medio que lo rodea, las fuentes del sedimento pueden clasificarse en naturales y antropogénicas.

1.1.1 Naturales

- a) **Erosión de la superficie del terreno:** el suelo, capa delgada y frágil, experimenta la acción del viento y la lluvia. El viento arrastra y levanta partículas (transporte eólico) que llegan a depositarse en las llanuras, o cae directamente en las corrientes. Las gotas de lluvia o granizos, al impactarse contra el terreno, mueven o arrancan partículas de suelos y rocas. Una buena parte de la lluvia riega los vegetales o se infiltra en el terreno. Una vez que la intensidad de lluvia agota la capacidad de infiltración del suelo de la cuenca, se inicia el llamado flujo de agua superficial. Este escurrimiento superficial desprende y acarrea también partículas de las capas superficiales del terreno. La cantidad de material acarreado es tanto mayor cuanto más frecuentes y violentas son las lluvias o los vientos, y menos densa es la cobertura vegetal del suelo.
- b) **Erosión del cauce principal y sus tributarios:** una vez que el escurrimiento superficial se ha iniciado, y como consecuencia de las irregularidades topográficas, se crean en primer lugar arroyos, los cuales aumentan gradualmente su caudal y se transforman en torrentes, estos últimos con gran capacidad erosiva y transportadora. Además, cuando los

ríos se desbordan o abandonan su cauce, su acción erosiva y transportadora es notable y, en ocasiones, catastrófica.

Los ríos pueden ser juveniles, maduros y viejos. A cada una de estas tres etapas en la vida de un río o valle, corresponden cambios graduales en su perfil longitudinal, en su corte transversal y en su trazado o curso, pues el río profundiza, ensancha y alarga su cauce por la erosión continua de los materiales que constituyen su lecho y riberas. De esta manera, el río acarrea materiales de diversos tamaños, depositándolos, en forma graduada, a lo largo de su perfil longitudinal, según varía la velocidad de su corriente: al disminuir la velocidad del flujo de agua, la capacidad del acarreo del río también disminuye, por lo que primero se depositan los materiales más gruesos, mientras que en la zona de planicie, donde las velocidades son relativamente bajas, se deposita parte del material fino, y el resto continua su recorrido hacia los cuerpos de agua o al mar.

- c) Movimientos naturales del terreno:** los deslizamientos de grandes masas de tierra y rocas ayudan a que mucho material quede suelto y sin protección. En ocasiones, aunque muy rara vez, la roca y el suelo se impregnan tanto de agua, que toda la ladera puede soltarse bruscamente en un deslizamiento de tierra. Con el transcurso del tiempo, y por la acción de la lluvia y el viento, estos materiales llegan a las corrientes.

1.1.2 Antropogénicas

- a) Destrucción de la vegetación:** muy a menudo, por desgracia, el hombre destruye irracionalmente bosques y praderas para abrir terrenos al cultivo, o para el desarrollo urbano o industrial. Pero sin duda, el desmonte, la quema y el descepa de extensas zonas boscosas, con el propósito de abrir terrenos para los cultivos, son las actividades que más sedimentos producen, ya que de esa manera se priva al suelo de su manto protector, indispensable contra las aguas de arroyada.
- b) Obras de ingeniería:** la construcción de caminos, vías férreas, presas, plantas industriales, ciudades, etc., para desarrollar una región, hace que grandes volúmenes de materiales sean removidos y queden más sueltos que en su estado natural, se modifican las pendientes del terreno, y otros materiales quedan expuestos sin protección, lo que facilita su transporte hacia la corrientes y cuerpos de agua.
- c) Explotación de minas y canteras:** todas estas actividades rompen y fracturan rocas y suelos, y producen al final grandes cantidades de materiales en forma de partículas pequeñas o polvo.
- d) Desechos urbanos e industriales:** son los materiales arrastrados por el drenaje y que son arrojados directamente a ríos o lagos.

En problemas de ingeniería se sugiere dividir el orden de los sedimentos en tres grupos, ya que al tratar de reducirlos se puede proceder de manera distinta para cada uno:

- i) Sedimentos que se originan en la superficie de la cuenca: Se reducen aplicando técnicas de conservación de suelos.
- ii) Sedimentos que proceden del fondo y orillas de los ríos: Se reduce con los embalses de grandes presas, presas derivadoras y construyendo pequeños diques en arroyos y cañadas.

- iii) Sedimentos que provienen de los desechos industriales y urbanos: Se reducen aplicando técnicas sanitarias sobre el manejo de desechos sólidos.

1.2. Clasificación de los sedimentos

Este apartado se ha realizado utilizando la referencia de García & Maza (1998)

Los sedimentos naturales están constituidos por una gran variedad de partículas que difieren entre sí en tamaño, forma y densidad. Desde el punto de vista de la resistencia que oponen a ser arrastrados y de su comportamiento al ser transportados por una corriente de agua, se distinguen principalmente dos clases de sedimentos: cohesivos como arcillas y légameos, y no cohesivos como arenas y gravas. Sin embargo, hay sedimentos que muestran características mixtas, es decir, presentan a la vez, cohesión y fricción interna.

- **Sedimento no cohesivo o friccionante**, también denominado material granular, formado por granos gruesos o partículas sueltas, como las arenas y gravas. En los granos gruesos de los sedimentos o suelos, la fuerza de gravedad predomina fuertemente sobre cualquier otra fuerza principal que resiste las fuerzas de arrastre y sustentación, o sea el empuje de la corriente, y dado que la fuerza de gravedad siempre está presente, al disminuir o cesar la acción del agua, las partículas se detienen, caen y se depositan. Por tanto, el empuje que debe ejercer un flujo de agua para mover o transportar tales partículas es función del peso de cada una de ellas, y cuando se depositan lo hacen apoyándose directamente unas en otras, teniendo cada partícula varios puntos de apoyo y dejando vacíos entre ellas. Así, el comportamiento mecánico e hidráulico de los sedimentos no cohesivos queda definido por la compacidad del depósito, es decir, el grado de acomodo alcanzado por las partículas, y por la orientación de las mismas.
- **Sedimento cohesivo**, formado por partículas de grano muy fino, constituidas por minerales de arcilla, que se mantienen unidas entre sí por la fuerza de cohesión, la cual se opone a que las partículas individuales sean separadas o arrancadas del conjunto del que forman parte. Esa fuerza de unión es considerablemente mayor que el peso de cada grano, y es la que resiste a las fuerzas de arrastre y sustentación causadas por el flujo de agua. Por tanto, una vez que la cohesión ha sido vencida, las partículas desprendidas o levantadas pueden llegar a comportarse como no cohesivas, aunque siempre serán transportadas o mantenidas en suspensión con mayor facilidad, ya que por ser muy pequeño su peso prácticamente no influye en sus movimientos; en cuanto cesa la acción del agua, muchas de ellas (coloides) no se depositan, a menos que por la presencia de sales se facilite el proceso de floculación (formación de grumos o flóculos).

Las interacciones entre el flujo de agua y un suelo no cohesivo han sido estudiadas con mayor detenimiento, y más ampliamente que las existentes con un suelo cohesivo, entre otros motivos porque a lo largo de los cursos de las corrientes naturales abundan mucho más los materiales no cohesivos, aun en el lecho de aquellos tramos con márgenes arcillosas, ya que la mayor parte de los ríos escurren sobre suelos no cohesivos; por ellos, en la hidráulica fluvial se trata más con las propiedades de los sedimentos o suelos no cohesivos.

1.2.1 Características de las partículas sedimentarias

Las características importantes de un sedimento no cohesivo, se refieren a las partículas que forman el sedimento, pero considerándolas como entes aislados: tamaño, forma, densidad y peso específico, velocidad de caída, composición mineralógica.

Estas propiedades se refieren a las partículas individuales y no al conjunto de ellas.

1.2.1.1 Tamaño

El tamaño de las partículas es una de las propiedades del sedimento más importantes y quizás la más utilizada. Pero el tamaño de las partículas no puede definirse fácilmente con una sola dimensión, como podría hacerse si ellas fueran esferas o cubos, porque las partículas naturales tienen muy diversas formas y nunca alcanzan la forma de esferas en que podría conocerse su tamaño al medir su diámetro. Las formas tan irregulares que asumen las partículas sedimentarias dificultan su clasificación, ya que el diámetro como índice de tamaño pierde su significado usual. Por ello ha sido necesario definir dimensiones, idear métodos y desarrollar procedimientos de laboratorio que, junto con técnicas estadísticas, ayudan a describir y, sobre todo, a cuantificar adecuadamente las características de un sedimento.

El tamaño de una partícula suele definirse en términos de su volumen o de su velocidad de caída, o por el tamaño de la abertura de la malla de una criba o por sus dimensiones triaxiales. A excepción de la definición dada en términos del volumen de la partícula, todas las demás definiciones están influenciadas por la forma o densidad de la partícula. Por tanto, el tamaño de una partícula dependerá de la dimensión que se mida, según se haya definido, y del procedimiento que se utilice para obtener dicha medida. Para precisar el tamaño de una partícula, los principales criterios están basados sobre las definiciones siguientes:

- **Diámetro nominal**

Es el diámetro de una esfera de igual volumen que la partícula, ver Ecuación 1-1:

$$D_{\text{nominal}} = \left[\frac{6}{\pi} \cdot V_p \right]^{1/3} \quad (1-1)$$

Donde:

V_p = volumen de la partícula.

Se observa que, con la definición, ni la forma, ni la densidad de la partícula influyen en la determinación del diámetro nominal, porque partículas de diferente forma y densidad pueden tener el mismo volumen y, por ende, el mismo diámetro nominal. Por ello, este diámetro casi no se emplea en estudios sobre transporte de sedimentos. Se utiliza preferentemente para definir el tamaño de partículas gruesas, ya que la medición del volumen de una partícula se hace tanto más difícil y poco práctica, cuanto más pequeña es la partícula tratada.

- **Diámetro de cribado**

Es el tamaño de la abertura de la malla por donde pasa justamente la partícula. Se utiliza comúnmente para definir el tamaño de partículas mayores de 0,062 mm, como las arenas y gravas.

Partículas largas de sección transversal angosta, pueden pasar o no a través de una malla de abertura pequeña; si logran pasar, significa que el diámetro de cribado clasifica las partículas de acuerdo con su menor área transversal; pero si ello no ocurre, la clasificación es según la mayor dimensión triaxial de la partícula por lo que el diámetro de cribado no tiene en cuenta la forma real de los granos ni su densidad. En el caso de una esfera, los diámetros nominales y de cribado siempre son iguales. Para partículas naturales, las cuales muestran siempre

desgaste o redondez, se ha encontrado que el diámetro de cribado es ligeramente menor que el diámetro nominal, esto es expresado en la Ecuación 1-2

$$D_{\text{cribado}} = 0,90 D_{\text{nominal}} \quad (1-2)$$

▪ Diámetro de sedimentación o equivalente

Es el diámetro de una esfera que tiene igual densidad y velocidad de caída que la partícula tratada, al caer ambas en el mismo líquido y a la misma temperatura.

▪ Diámetro estándar de sedimentación

Es el diámetro de una esfera cuya densidad relativa es 2,65 y que tiene la misma velocidad de caída que la partícula considerada, cuando ambas caen en agua destilada a 24 °C. Los diámetros de sedimentación se emplean habitualmente para definir el tamaño de partículas muy finas, como las de los limos o arcillas. En problemas relacionados con el transporte de sedimentos, los diámetros de sedimentación tienen mayor significado físico que los anteriores, ya que en su determinación influyen la forma y densidad reales de la partícula, así como la densidad del fluido en el que se sedimentan. El diámetro de cribado y el de sedimentación son los más utilizados en la práctica. Cuando un material se ha cribado adecuadamente, el diámetro de cribado corresponde aproximadamente a su diámetro de sedimentación.

▪ Dimensiones triaxiales

El tamaño de una partícula también puede definirse en función de tres dimensiones características de la misma, las cuales se denotan, en orden decreciente de magnitud, con las letras a, b, c, o sea $a > b > c$, medidas en la dirección de tres ejes ortogonales entre sí, haciendo coincidir uno de ellos (Ilustración 1-1).

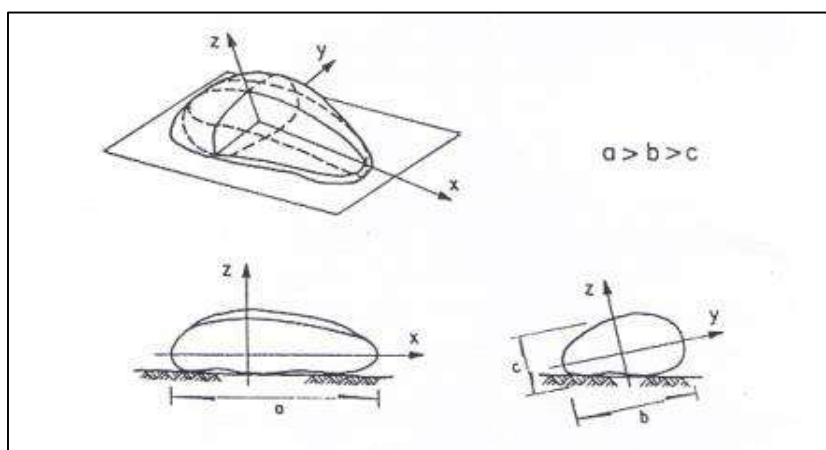


Ilustración 1-1 Esquema de las dimensiones triaxiales de una partícula

Fuente: (García & Maza, 1998)

Las dimensiones triaxiales se utilizan preferentemente para especificar el tamaño de partículas gruesas o fragmentos rocosos, ya que conforme disminuye el tamaño de una partícula se dificulta la determinación de sus dimensiones triaxiales. Puesto que los ejes tienen que ser ortogonales entre sí, los valores de a , b y c dependen de la manera como se define o elige el primer eje, o de cuál de ellos se escoge primero. Por tanto, para evitar ambigüedades, siempre hay que indicar claramente la manera como fueron seleccionados los ejes. En la Ilustración 1-2, por ejemplo, se presentan tres maneras diferentes de seleccionar los ejes ortogonales y, por ende, tres formas distintas de medir las dimensiones triaxiales de un hexaedro regular o cubo.

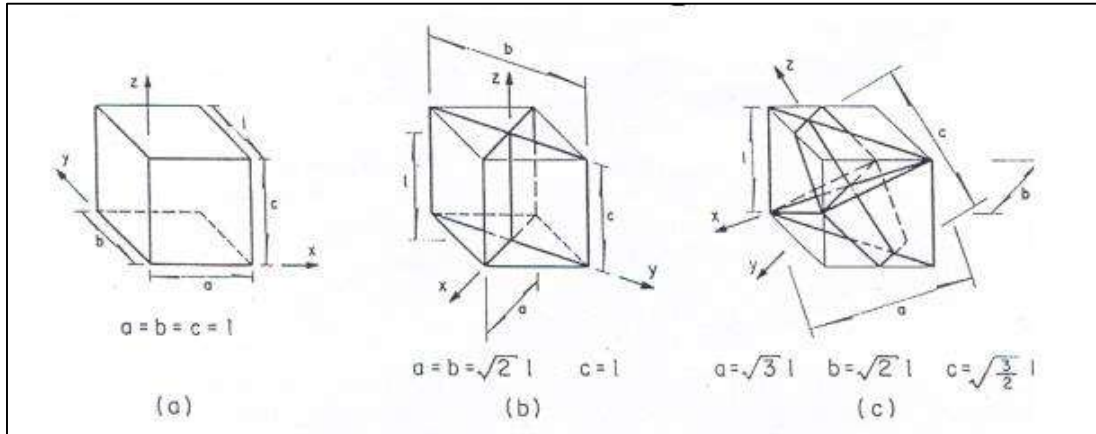


Ilustración 1-2 Selección de ejes para definir las dimensiones triaxiales de un hexaedro regular o cubo

Fuente: (García & Maza, 1998)

Se debe tener en cuenta lo siguiente: por convención, sólo en el caso de esferas las tres dimensiones triaxiales son iguales, o sea $a = b = c$, por lo que la selección de ejes indicada en la Ilustración 1-2a no sería la correcta; por otro lado, si se considera que la menor dimensión triaxial o uno de los ejes debe ser vertical cuando la partícula descansa en su postura más estable, entonces la Ilustración 1-2b muestra la manera de seleccionar los ejes; por último, si se establece como criterio que uno de los ejes debe coincidir con la mayor dimensión de la partícula, la forma correcta de seleccionar los ejes sería la que se presenta en la Ilustración 1-2c, y es la que aquí se recomienda.

1.2.1.2 Forma

Esta característica describe el aspecto o apariencia de la partícula, independientemente de su tamaño, densidad o composición mineralógica. La forma es una característica importante, porque influye en el movimiento de las partículas que caen o se desplazan dentro del seno de un fluido; además, se ha comprobado el influjo de la forma de los granos en la determinación de algunas características de los sedimentos o suelos no cohesivos, como ángulo de reposo y compacidad o porosidad; por otro lado, en igualdad de condiciones, el poder abrasivo de las partículas depende de su forma.

La Tabla 1-1 muestra la clasificación de los materiales sedimentarios según *American Geophysical Union*.

Tabla 1-1 Clasificación del *American Geophysical Union* para materiales sedimentarios

Grupo	Clase	Tamaño mm	
Bolos	muy grandes	2 048	4096
	grandes	1 024	2048
	medianos	512	1024
	pequeños	256	512
Cantos	grandes	128	256
	pequeños	64	128
Grava	muy gruesa	32	64
	gruesa	16	32
	mediana	8	16
	finas	4	8
	muy fina	2	4
Arena	muy gruesa	1	2
	gruesa	0,5	1
	mediana	0,25	0,5
	finas	0,125	0,25
	muy fina	0,062	0,125
Limo	grueso	0,031	0,062
	medianos	0,016	0,031
	finos	0,008	0,016
	muy finos	0,004	0,008

Fuente: (García & Maza, 1998)

Las partículas sedimentarias pueden asumir un sin número de formas, lo cual dificulta su clasificación. Formas geométricas regulares tales como esferas, cilindros y elipsoides resultan artificiales, pues tales descripciones, aun cuando dan una idea de la forma de la partícula, son poco efectivas. Sin embargo, lo que se requiere es un parámetro sencillo que sea susceptible de análisis matemático.

A continuación, se presentan algunos de los muchos parámetros que se han definido para precisar la forma de las partículas sedimentarias.

▪ **Factor de forma, SF**

De acuerdo con los estudios realizados por diferentes investigadores como Schultz & Albertson (1954), McNown & Malaika (1950), se encontró que el parámetro más adecuado para estudiar el efecto de la forma sobre la velocidad de caída y, por consiguiente, un factor muy apropiado para definir la forma de los granos o partículas, es el llamado factor de forma, el cual se define en la Ecuación 1-3 como

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (1-3)$$

Donde a, b y c son las dimensiones triaxiales de las partículas.

Para el caso de esferas, $SF = 1$; para otras formas se obtendrá que $SF < 1$

▪ Esfericidad (ε)

La esfera es el cuerpo o sólido geométrico que tiene la menor superficie por unidad de volumen. Sobre este principio se apoyó a Wadell (1932) para clasificar, comparando con la forma esférica, las formas de las partículas sedimentarias. Wadell (1932) definió la esfericidad como la raíz cúbica del cociente que resulta de comparar el volumen de la partícula, V_p , entre el volumen de la menor esfera que la circunscribe, V_s , representado en la Ecuación 1-4:

$$\varepsilon = \left[\frac{V_p}{V_s} \right]^{1/3} \quad (1-4)$$

Si se conocen el diámetro nominal de la partícula y la mayor de sus dimensiones triaxiales, la Ecuación 1-4 se reduce a una Ecuación 1-5 más simple

$$\varepsilon = \frac{D_{\text{nominal}}}{a} \quad (1-5)$$

Por su parte, Krumbein definió la esfericidad en términos de las dimensiones triaxiales de la partícula, representado en la Ecuación 1-6

$$\varepsilon = \left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 \cdot \frac{c}{b} \right]^{1/3} \quad (1-6)$$

En cualquier caso, la esfericidad de una esfera es, por definición, $\varepsilon = 1$; para otras formas deberá ser $\varepsilon < 1$. La esfericidad promedio de las partículas naturales o sedimentarias varía entre 0,60 y 0,85.

Por otro lado, dependiendo de los valores de los parámetros adimensionales b/a y c/b , Zingg (1935) clasifica las partículas como discos, láminas, rollos y esferoides. Dado que Zingg (1935) y Krumbein (1941) utilizan los mismos parámetros, se pueden dibujar en el diagrama de Zingg (1935), mediante la Ecuación 1-6, curvas de igual esfericidad. La Ilustración 1-3, presenta la clasificación propuesta por Zingg (1935), en la que se han dibujado varias curvas de esfericidad constante.

▪ Planidad, grosor y largura

Wentworth (1922), Wadell (1932) y Cailleux (1965) Cailleux definieron el índice de planidad de una partícula, ip , en términos de sus dimensiones triaxiales, expresado en la Ecuación 1-7

$$ip = \frac{a + b}{2c} \quad (1-7)$$

El índice de planidad puede ser igual a uno o mayor. Según Cailleux (1965), el índice de planidad de partículas naturales varía de 1,05 a 10. Cuanto más grande es el índice de planidad, tanto más aplanada es la partícula, como una laja.

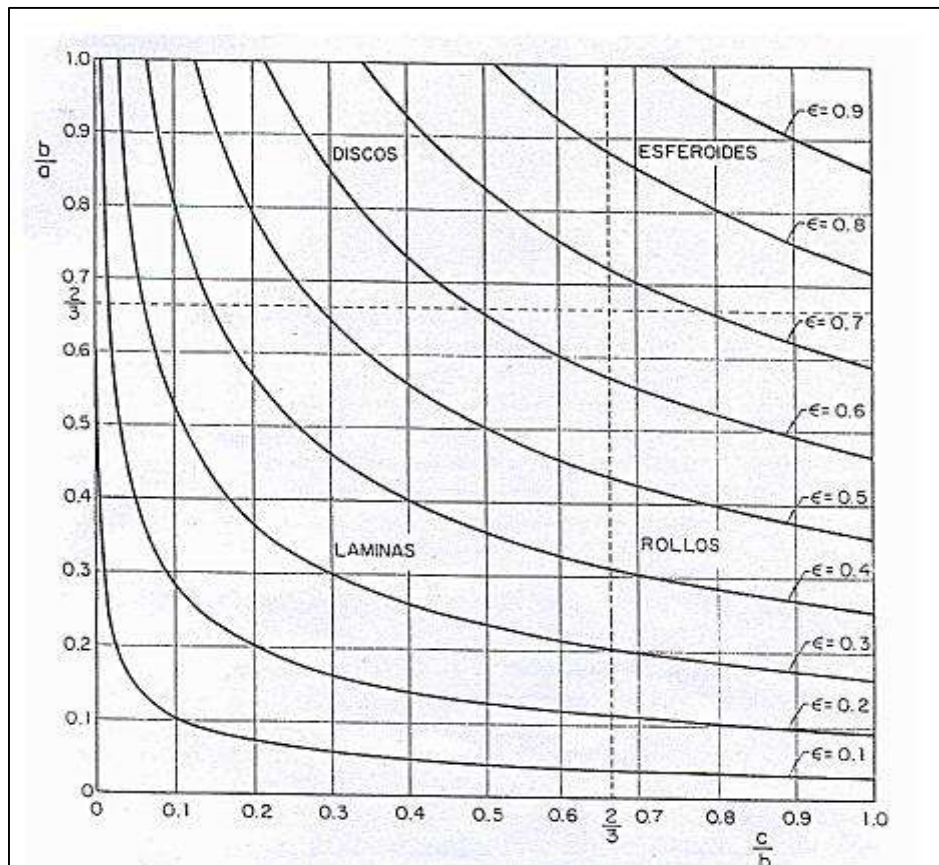


Ilustración 1-3 Diagrama para clasificar la forma de las partículas

Fuente: (García & Maza, 1998)

Markwick definió los módulos o índices de grosor y largura, i_g y i_l , respectivamente, en términos de las dimensiones triaxiales de la partícula, expresado en la Ecuación 1-8 y 1-9

$$i_g = \frac{c}{b} \quad (1-8)$$

$$i_l = \frac{a}{b} \quad (1-9)$$

Si $c/b < 0,6$ la partícula es de poco espesor respecto de su ancho, en tanto que si $a/b > 1,8$, la partícula es más larga que ancha, o sea de apariencia alargada.

▪ Redondez

Un concepto importante que se ha establecido para detallar el contorno o bordes de una partícula, es el de redondez.

Si se considera el área que proyecta una partícula en su postura o posición más estable (la menor dimensión triaxial vertical), el índice de redondez puede definirse entonces como el cociente que resulta de dividir el radio promedio de curvatura del contorno de la superficie proyectada (o sea el promedio de los radios de curvatura de los diferentes bordes o esquinas que delinean el contorno del área proyectada), entre el radio del círculo máximo que puede inscribirse en el área proyectada.

Según esta definición, la redondez es un parámetro que da una idea cuantitativa de qué tan chatos o puntiagudos están los filos o aristas que delinean el contorno de la partícula: si una partícula muestra angulosidades, o sea cantos o bordes puntiagudos, tendrá un índice bajo de redondez; si por el contrario exhibe aristas romas o filos achatados, tendrá entonces un índice alto de redondez. Así, por ejemplo, una partícula de forma alargada tendrá un alto grado de redondez si sus bordes o esquinas están redondeados.

La redondez de una esfera es por definición, 1, y para otra forma será menor que dicho valor. En el caso de partículas naturales, la redondez promedio varía entre 0,3 y 0,8. Para dar una idea del aspecto que tienen las partículas según su grado de redondez, en la Ilustración 1-4 se muestra el contorno de algunas partículas y su correspondiente índice de redondez.

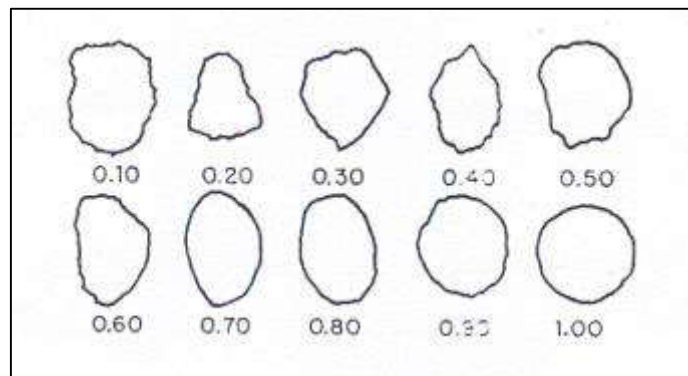


Ilustración 1-4 Índice de redondez de partículas

Fuente: (García & Maza, 1998)

El desgaste que experimenta la partícula, ocasionado por el golpeteo, la abrasión y la rodadura, perfila y redondea su contorno. La redondez indica, pues, el deterioro que ha sufrido la partícula al viajar. Por tanto, partículas angulosas indicarán que éstas casi no han experimentado desgaste o que han viajado relativamente poco. En teoría, la redondez y la esfericidad son independientes, y no están supeditadas al tamaño de la partícula. Sin embargo, en el caso de materiales aluviales, la experiencia ha demostrado lo contrario, pues en los ríos la redondez de las partículas crece al aumentar la esfericidad, y ambas se incrementan a medida que se agranda el tamaño del sedimento: una arena de río, por ejemplo, puede contener granos redondeados más gruesos y otros angulosos más finos. Por último, la redondez es un parámetro que altera poco la esfericidad, y prácticamente no influye en el comportamiento dinámico de las partículas. En igualdad de condiciones, el poder abrasivo de las partículas será tanto más grande cuanto menor sea su redondez.

1.2.1.3 Densidad y peso específico

En general, las partículas sedimentarias no son completamente densas o sólidas, sino que poseen cierta porosidad o relación de vacíos. Por ello, en una partícula natural se distinguen tres fases constituyentes: sólida, líquida y gaseosa. La sólida está formada por las partículas minerales que la componen, la líquida por el agua y la gaseosa por el aire. Las fases líquida y gaseosa de la partícula suelen comprenderse en el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida constituye el volumen de sólidos.

Por tanto, el peso específico de la fase sólida de una partícula, γ_s , se define en la Ecuación 1-10 como el cociente que resulta de comparar el peso de su fase o materia sólida, W_s , con el volumen de sólidos, V_s , o sea

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (1-10)$$

Se obtiene la densidad o masa específica (Ecuación 1-11) de la fase sólida de la partícula, ρ_s , dividiendo entre g ambos miembros de la Ecuación 1-10. Es decir

$$\rho_s = \frac{\gamma_s}{g} = \frac{W_s}{gV} \quad (1-11)$$

La densidad de una partícula depende de su composición mineralógica, o sea de la densidad de los minerales que la constituyen. El granito forma aproximadamente el 95% de la parte superior de la corteza terrestre, aunque en su mayor parte no está al descubierto, es la roca madre o fuente original de los sedimentos. El granito está constituido esencialmente por feldespato y cuarzo. Por desintegración mecánica el granito se convierte en un conjunto de fragmentos o granos sueltos de feldespato y cuarzo, que son acarreados por los ríos en forma de grava y arena; luego, por acción química, parte del feldespato se convierte fácilmente en arcilla, en cambio el cuarzo es mucho más resistente. Puesto que los materiales aluviales contienen un alto porcentaje de cuarzo, se puede suponer, para propósitos prácticos, que la densidad relativa de las partículas sedimentarias (Ecuación 1-12) es

$$S_s = \frac{\rho_s}{\rho} = \frac{\gamma_s}{\gamma} = 2,65 \quad (1-12)$$

de donde se obtiene que su peso específico (Ecuación 1-13) es

$$\gamma_s = \gamma S_s = 2650 \text{ kgf/m}^3 \quad (1-13)$$

en el SI (Ecuación 1-14)

$$\gamma_s = 25996,5 \text{ N/m}^3 = 25,9965 \text{ kN/m}^3 \quad (1-14)$$

Se debe tener en cuenta que la presencia de hierro, Fe, incrementa notablemente la densidad del mineral, como es el caso de la magnetita, cuya densidad relativa promedio es 5,10. Por ello las partículas sedimentarias constituidas por minerales pesados poseen densidades relativas elevadas (mayores de 4,5).

▪ **Peso específico sumergido**

Cuando las partículas sedimentarias están dentro del agua, el empuje hidrostático influye en los pesos, tanto específicos como específicos relativos. El peso específico de la materia sólida sumergida, γ'_s , se expresa en la Ecuación 1-15

$$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma \quad (1-15)$$

pues el empuje hidrostático neto es el peso en agua del volumen desalojado por los sólidos.

Un parámetro muy utilizado en la hidráulica fluvial es el peso específico relativo de la materia sólida sumergida, Δ , el cual se expresa en la Ecuación 1-16 como

$$\Delta = S'_s = S_s - 1 = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (1-16)$$

1.2.1.4 Velocidad de caída de una partícula

Una partícula que cae con una velocidad terminal en un fluido quieto, es conducida por la fuerza resultante, considerando la partícula peso animado, y la fuerza resistente del fluido arrastrado. Este es el resultado de una u otra fuerza de tensión tangencial ejercida por el fluido sobre la partícula, una diferencia de presión sobre esta, o una combinación de las 2 fuerzas (Carrasco, 1989).

La Ecuación 1-17 muestra la ecuación general de arrastre

$$F_D = C_D \cdot \rho_f \cdot A_o \cdot \frac{D^2}{W} \quad (1-17)$$

Donde F_D es la fuerza de arrastre, C_D es un coeficiente de arrastre, ρ_f es la densidad del fluido, A_o es el área proyectada de la partícula en dirección de caída igual a $K_1 D^2$, K_1 es la constante numérica que depende de la forma de la partícula, D es el diámetro de la partícula y W es la velocidad de caída de la partícula.

El coeficiente de arrastre y la velocidad de caída, pueden ser determinados empíricamente por análisis dimensional.

Las variables que afectan la velocidad de una partícula cayendo en agua quieta de extensión infinita son (Ecuación 1-18):

$$\Phi_1(W, \rho_f, \rho_s, \mu, D, S_p, f, Sr, F) = 0 \quad (1-18)$$

Donde:

W = velocidad de caída
 ρ_f = densidad del fluido
 ρ_s = densidad de la partícula
 μ = viscosidad cinemática del fluido
 D = diámetro de la partícula
 S_p = factor de forma
 f = frecuencia de oscilación de la partícula
 Sr = rugosidad superficial
 F = peso animado de la partícula e igual a $(\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot K_2 \cdot D$ y K_2 es una constante numérica que depende de la forma de la partícula.

Usando análisis dimensional y eliminando Sr , porque experimentalmente es importante reducir la Ecuación 1-18 a la Ecuación 1-19:

$$\phi_2 \left(\frac{\rho_f \cdot W \cdot D}{\mu}, \frac{F}{\rho_f \cdot w^2 \cdot D^2}, S_p, \frac{f \cdot D}{W}, \frac{\rho_s}{\rho_f} \right) \quad (1-19)$$

Para una partícula cayendo con una velocidad terminal (Ecuación 1-20)

$$F_D = F \quad (1-20)$$

Examinando las Ecuaciones 1-18, 1-19 y 1-20 vemos que C_D de la Ecuación 1-17 es dada por la Ecuación 1-21

$$C_d = \phi_3 \left(R_w, S_p, \frac{f \cdot D}{W}, \frac{\rho_s}{\rho_f} \right) \quad (1-21)$$

Donde R_w es el número de Reynolds de la partícula, igual a la Ecuación 1-22

$$\frac{\rho_f \cdot W \cdot D}{\mu} \quad (1-22)$$

Muchas partículas, en formas de esferas, o partículas aproximadamente de forma esférica, no oscilan cuando caen. Asimismo, la densidad ρ_s/ρ_f es constante o sin importancia para partículas no oscilantes. Para este caso, la Ecuación 1-21 cambia a la Ecuación 1-23:

$$C_D = \phi_4(R_w, S_p) \quad (1-23)$$

1.2.1.5 Composición mineralógica de los sólidos

La composición mineralógica de los sólidos es muy variable, depende de la naturaleza geológica de la cuenca. Puede ocurrir que en un mismo río se encuentren composiciones mineralógicas diferentes. Esto se debe a que se producen lluvias en distintas zonas de la cuenca, arrastrando cada vez materiales sólidos de composición mineralógica particular.

La composición mineralógica no influye prácticamente en el fenómeno de transporte; interesa fundamentalmente en los aprovechamientos hidroeléctricos que se hagan.

El análisis mineralógico indica las cantidades de determinados elementos presentes en la muestra. Si la muestra corresponde a los materiales más finos es probable que la proporción de elementos abrasivos sea mayor que en una muestra que incluya materiales más gruesos (Carrasco, 1989).

1.3. Fondo móvil, iniciación de movimiento de una partícula

Este apartado se ha realizado utilizando la referencia de Rocha, 1998

Para el estudio de la teoría del transporte de sedimentos y para la solución de numerosos problemas de ingeniería fluvial, es necesario conocer las condiciones de iniciación del movimiento de las partículas constituyentes del lecho.

El conocimiento de esta condición permite calcular el gasto sólido de fondo (el arrastre), la dimensión de canales estables, el diseño de sistemas de protección contra la erosión y resolver numerosos problemas de hidráulica fluvial.

Hay dos formas de aproximarse al estudio de la iniciación del movimiento:

- a) La primera se refiere a la acción del esfuerzo de corte, o fuerza tractiva. El movimiento de las partículas del fondo empieza cuando la fuerza actuante τ_0 (es decir, la fuerza tractiva) es igual a la fuerza tractiva crítica τ_c , o con mayor precisión $(\tau_0)_c$, que es propia de cada material constituyente del fondo.
- b) La otra forma es la determinación de la velocidad crítica V_c . Se denomina velocidad crítica de arrastre a la velocidad media de la corriente, la cual empieza el movimiento (el arrastre) de las partículas constituyentes del lecho. El gasto correspondiente a la iniciación del movimiento se denomina gasto crítico de iniciación del movimiento, o gasto crítico de arrastre, y se designa como Q_0 . Es igual al producto del área de la sección transversal por la velocidad crítica V_c .

La iniciación del movimiento no sólo es difícil de determinarse, sino también de definirse. En un lecho natural hay partículas de la más diversa granulometría, en principio, cada partícula tiene su propia velocidad crítica. En un lecho constituido por un material de granulometría uniforme todas las partículas no son exactamente iguales, ni sufren de la misma forma la acción de la turbulencia, en consecuencia, la iniciación del movimiento es un fenómeno esencialmente probabilístico.

A continuación, se presenta tres intensidades de iniciación del movimiento, definidas por Kramer

- Movimiento débil: Algunas de las partículas más pequeñas se mueven en lugares aislados. Se podría contar el número de partículas que se mueve en un centímetro cuadrado.
- Movimiento medio: Las partículas de diámetro medio están en movimiento en tal proporción que no es posible contarlas. El movimiento está generalizado, pero tiene una intensidad tan pequeña que no se produce deformación del fondo.
- Movimiento general: El movimiento está generalizado en todo el lecho. El movimiento alcanza hasta partículas de un diámetro tal que se produce un lecho de configuración variable, que da lugar a las formas del fondo, constituyentes de las fases del transporte.

El fenómeno de iniciación del movimiento es complejo. Cada uno de los granos que constituye el lecho está sometido a las siguientes fuerzas:

- a) Peso propio del grano sumergido (es decir, su peso menos el empuje de Arquímedes).
- b) Fuerzas dinámicas de presión y corte originadas en el escurrimiento.
- c) Fuerzas de reacción del grano sobre el fondo.

La condición límite para la iniciación del movimiento corresponde a aquella en la que el peso de la partícula es igual a la fuerza de empuje.

Cuando la iniciación del movimiento se define en términos de la fuerza tractiva hay que tener presente que debido a la turbulencia se presentan fluctuaciones de la velocidad, como consecuencia de las cuales la fuerza tractiva está sujeta a fluctuaciones instantáneas en el tiempo. Al respecto, tal como se aprecia en la Ilustración 1-5 Günter (1971) ha señalado los tres casos siguientes:

- Caso A: $\bar{\tau}_o - \Delta \tau_{max} > \tau_c$. Expresión en la que $\Delta \tau_{max}$ es la máxima fluctuación de la fuerza tractiva media sobre el fondo $\bar{\tau}_o$. En consecuencia, el estado crítico es excedido el 100% del tiempo y todos los granos están en movimiento.
- Caso B: $\bar{\tau}_o = \tau_c$. Los granos están expuestos al estado crítico el 50% del tiempo, lo que equivale a decir que en cada instante las condiciones críticas son excedidas por el 50% de los granos.
- Caso C: $\bar{\tau}_o + \Delta \tau_{max} = \tau_c$. El estado crítico de iniciación del movimiento sólo se alcanza en algunos momentos (instantes), pero nunca es excedido. Corresponde a la iniciación o a la finalización del movimiento.

Los valores de la fuerza tractiva crítica para cada tipo de material sólido se obtienen experimentalmente. De la misma manera se puede conocer los valores de la velocidad crítica de arrastre.

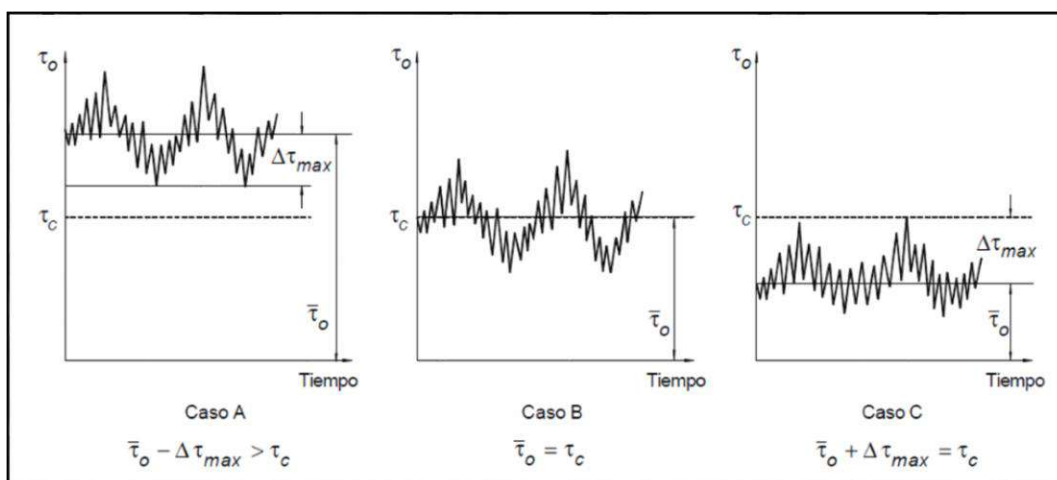


Ilustración 1-5 Influencia de las fluctuaciones en la iniciación del movimiento

Fuente: (Rocha, 1998)

1.3.1 Criterio de Shields

Se demuestra, como consecuencia de diversas investigaciones teóricas y experimentales, que la iniciación del movimiento de una partícula sólida de diámetro “d” puede describirse, cuando hay influencia de la subcapa laminar, como la relación entre los dos parámetros adimensionales siguientes (Ecuación 1-24 y 1-25)

▪ Parámetro de Shields

$$\tau_c^* = \frac{(\tau_o)_c}{(\gamma_s - \gamma)} = \frac{\rho V_*^2}{(\gamma_s - \gamma)} = F_{cr}^* \quad (1-24)$$

▪ **Índice de inestabilidad**

$$Re_* = \frac{V_* d}{\nu} = 11,6 \frac{d}{\delta} \quad (1-25)$$

Donde:

$(\tau_o)_c$ = fuerza tractiva sobre el fondo en el momento de la iniciación del movimiento. Se puede designar también como τ_c

V_* = velocidad de corte = $\sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = \sqrt{gRS}$; radio hidráulico R, pendiente S

Re_* = número de Reynolds calculado con la velocidad de corte y el diámetro de la partícula

Δ = espesor de la subcapa laminar

ν = viscosidad cinemática del fluido

F_{cr}^* = fuerza tractiva crítica (parámetro de Shields)

τ_c^* = fuerza tractiva crítica (parámetro de Shields)

γ = peso específico del agua

γ_s = peso específico de los sedimentos

ρ = densidad del fluido

En el diagrama de Shields (Ilustración 1-6) se presenta gráficamente la función expresada en la Ecuación 1-26

$$\frac{(\tau_o)_c}{(\gamma_s - \gamma)d} = \phi(Re_*) \quad (1-26)$$

como consecuencia de los trabajos experimentales realizados por él mismo y otros investigadores.

El primer miembro de la Ecuación 1-26 corresponde al parámetro adimensional de la “fuerza tractiva crítica” (parámetro de Shields) y se designa como τ_c^* o también como F_{cr}^* (Ecuación 1-24).

El segundo miembro es el “índice de inestabilidad”, se le designa también con el nombre de número de Reynolds corte referido al diámetro, Re_* (Ecuación 1-25).

El diagrama de Shields se basa en los resultados de numerosos investigadores, quienes trabajaron con materiales diversos (arena, ámbar, granito, vidrio, grava, etc.). El diagrama mostrado en la Ilustración 1-6 muestra la línea divisoria entre movimiento y reposo de una partícula en zonas de influencia viscosa, tiene unas líneas rectas auxiliares para el diámetro y la velocidad de corte, las que permiten calcular las condiciones de iniciación del movimiento cuando se trata partículas de cuarzo ($\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$) y la temperatura del agua es de 12°C. Así por ejemplo, para una partícula de cuarzo de 0,5 mm se lee inmediatamente que la velocidad de corte V_* necesaria para la iniciación del movimiento es 0,0165 m/s (se verifica que el número de Reynolds es de 6,6 y que el parámetro de Shields es 0,034).

Hay muchas formas de analizar este importante diagrama. Una de ellas consiste en distinguir cuatro zonas

- **Zona 1:** El espesor de la subcapa laminar δ es mayor que el diámetro de las partículas (se debe recordar que $\delta = 11,6 \nu/V_*$). Para $Re_* \leq 1$ se cumple que $Re_* \tau_c^* = 0,1$. Expresado en la Ecuación 1-27

$$\frac{V_* d}{\nu} < 2 \quad (1-27)$$

- **Zona 2:** El espesor de la subcapa laminar y el diámetro de las partículas son del mismo orden de magnitud. En esta zona, para $Re_* = 11,6$ se tiene que $d = \delta$ y el parámetro de Shields tiene su valor mínimo $\tau_c^* = 0,033$. Expresado en la Ecuación 1-28

$$2 < \frac{V_* d}{\nu} < 20 \quad (1-28)$$

- **Zona 3:** El espesor de la subcapa laminar es menor que el diámetro de las partículas. El contorno se comporta como hidráulicamente rugoso. Expresado en la Ecuación 1-29

$$20 < \frac{V_* d}{\nu} < 400 \quad (1-29)$$

- **Zona 4:** La turbulencia se ha desarrollado plenamente. El parámetro de Shields tiende a ser constante y no depende ya del número de Reynolds. La constante tiene un valor que generalmente se fija en 0,06. Expresado en la Ecuación 1-30

$$\frac{V_* d}{\nu} > 400 \quad (1-30)$$

Para la obtención de las condiciones de iniciación del movimiento mediante la aplicación del diagrama de Shields se sugiere el siguiente método general (se conoce las características de las partículas, del fluido y la pendiente)

1. Suponer un valor para el parámetro de Shields τ_c^* con lo que se puede calcular $(\tau_o)_c$ expuesto en la Ecuación 1-31

$$(\tau_o)_c = \tau_c^* (\gamma_s - \gamma) d \quad (1-31)$$

2. A partir del conocimiento de $(\tau_o)_c$ podemos calcular el tirante mediante la Ecuación 1-31 (supongamos por simplicidad que se trata de un canal muy ancho)

$$y = \frac{(\tau_o)_c}{\gamma S} \quad (1-32)$$

3. Ahora calculamos la velocidad de corte mediante la Ecuación 1-33

$$V_* = \sqrt{gyS} \quad (1-33)$$

4. Podemos entonces determinar el valor de Re_* mediante la Ecuación 1-34

$$Re_* = \frac{V_* d}{\nu} \quad (1-34)$$

5. Comparamos este valor así obtenido con el que en el diagrama de Shields corresponde a la iniciación del movimiento para el valor τ_c^* asumido en el punto 1 de esta secuencia. Si no son iguales se repite el procedimiento hasta lograr la igualdad.
6. Obtenido el valor correcto de Re_* se calcula el coeficiente C de Chezy expresado en la Ecuación 1-35, que en el caso más general es

$$C = 18 \log \frac{6R}{\frac{k}{2} + \frac{\delta}{7}} \quad (1-35)$$

Los coeficientes de esta expresión pueden variar ligeramente en función de determinados resultados experimentales. Si el contorno es hidráulicamente rugoso entonces $\delta \rightarrow 0$. El valor de k, rugosidad absoluta, depende de la granulometría del lecho. Para granulometría uniforme (contorno rugoso) el coeficiente C de Chezy puede calcularse de la Ecuación 1-35 considerando $k = 2d$, dando como resultado la Ecuación 1-36

$$C = 18 \log \frac{12R}{2d} = 18 \log \frac{6R}{d} \quad (1-36)$$

En un canal muy ancho el radio hidráulico se hace igual al tirante.

7. Aplicamos la ecuación de Chezy y obtenemos la velocidad media. En este caso la velocidad media es la velocidad crítica de arrastre (es decir, de iniciación del movimiento). No debe confundirse con la velocidad crítica que separa ríos y torrentes, que es un concepto diferente.
8. Puede finalmente calcularse q_o mediante la Ecuación 1-37, que es el gasto crítico específico, o de iniciación del movimiento por unidad de ancho mediante la Ecuación 1-38

$$q_o = V_C \cdot y \quad (1-37)$$

$$Q_o = q_o \cdot B \quad (1-38)$$

Donde, B es el ancho del canal.

La razón por la cual hay que recurrir a un método de aproximaciones sucesivas radica en que, la velocidad de corte aparece como dato de entrada para el cálculo de ambos parámetros.

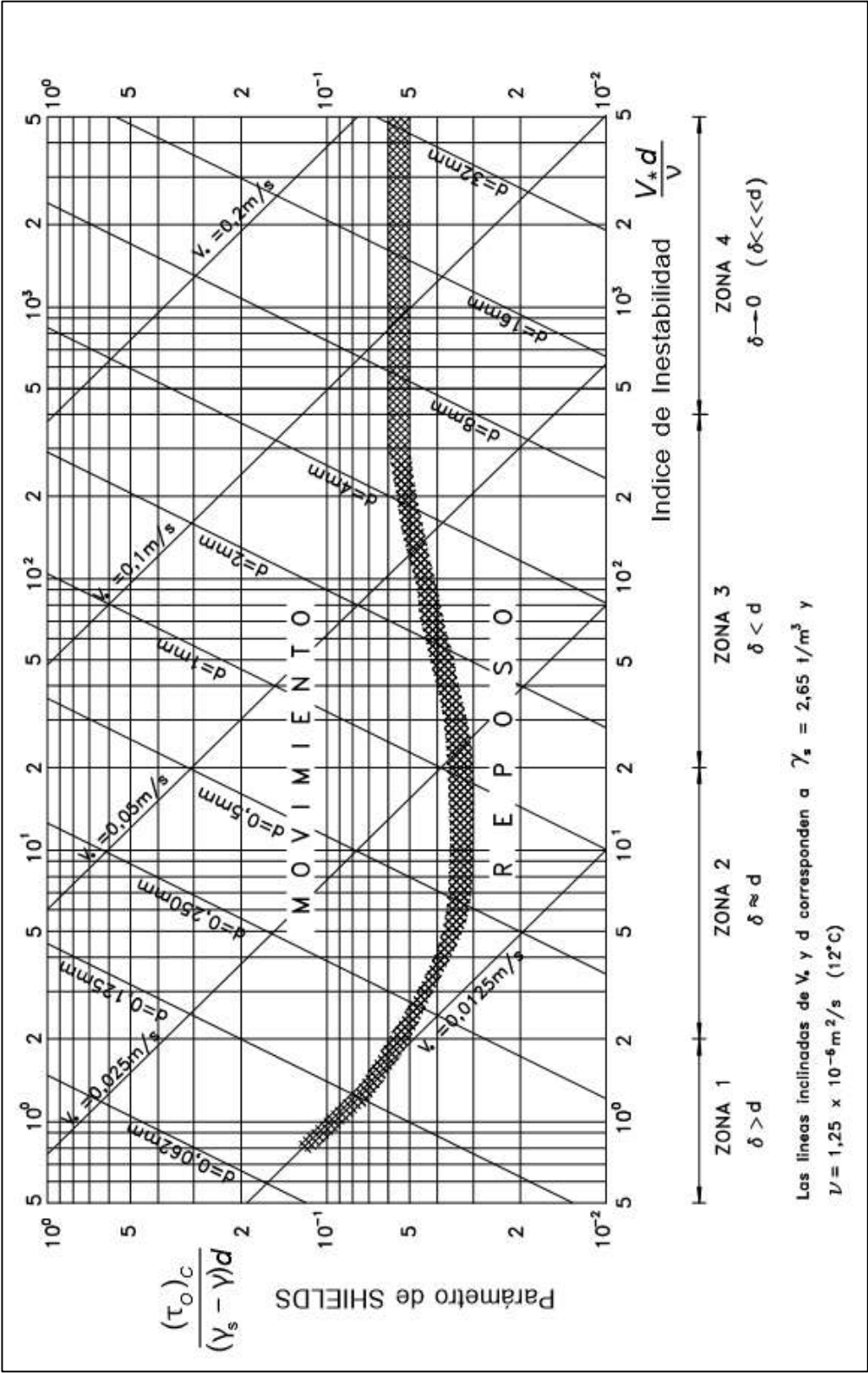


Ilustración 1-6 Diagrama de SHIELDS para la iniciación de movimiento

Fuente: (Rocha, 1998)

1.3.2 Fases del transporte sólido

Para un flujo de velocidad gradualmente creciente, se tiene que la configuración del fondo es variable y pasa por varios estados que son función de la velocidad media del flujo. Dichos estados, son los siguientes y se pueden observar en la Ilustración 1-7:

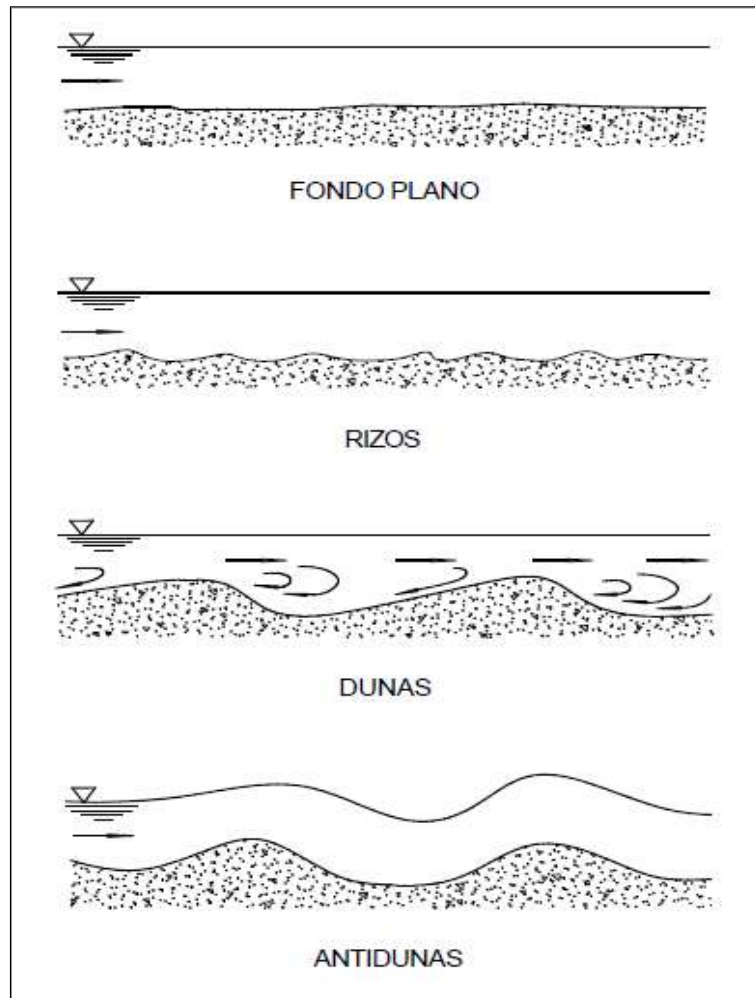


Ilustración 1-7 Fases del transporte sólido

Fuente: (Rocha, 1998)

- **Fondo plano:** es una etapa inicial que corresponde a una velocidad pequeña. Se observa movimientos aislados e intermitentes de las partículas más gruesas constituyentes del fondo; las más pequeñas entran eventualmente en suspensión.
- **Rizos:** al incrementarse la velocidad aparecen en el fondo ondulaciones de pequeña amplitud. Hay un aumento de resistencia. (Aumento del coeficiente de Manning y disminución del de Chezy). El Número de Froude es menor que 1.
- **Dunas:** cambio en la forma de los rizos. Adquieren hacia aguas arriba una pendiente suave en la que se produce erosión y hacia aguas abajo una pendiente fuerte que es igual a la tangente del ángulo de reposo. Hay un aumento de la resistencia. Eventualmente las dunas pueden alargarse hasta concentrarse en barras. El Número de Froude es menor que 1.

- **Antidunas:** representan una inversión de las dunas. Suelen ser más simétricas. El Número de Froude es mayor que 1.
- **Fondo Plano:** aparece nuevamente para altas velocidades.

Los rizos y las dunas se distinguen entre sí por su tamaño. Se mueven en la dirección de la corriente, pero con una velocidad menor que la del flujo. No producen perturbaciones en la superficie libre. En cambio, las antidunas pueden moverse en cualquier dirección o ser estacionarias. Producen perturbación en la superficie libre del escurrimiento.

Entre las fases de dunas y antidunas puede presentarse nuevamente un fondo plano.

1.4. Gasto sólido de fondo

(Rocha, 1998) El gasto sólido fluvial está, en primer lugar, relacionado con las características de la cuenca, específicamente con su erosionabilidad, y, por lo tanto, con la producción de sedimentos. De acá que la cuantificación del gasto sólido debe empezar por el conocimiento de la cuenca.

La erosión de las cuencas es un fenómeno de intensidad variable, en el tiempo y en el espacio, esta es una de las causas por las que el gasto sólido es tan variable en el tiempo. El conocimiento de esta variabilidad, y de su origen, es fundamental para la evaluación del gasto sólido fluvial.

Evidentemente que, si no existe erosión de la cuenca, tampoco existirá transporte sólido en el río, esto ocurre en algunas épocas del año. Por el contrario, si como consecuencia de los factores ya conocidos, la erosión de la cuenca es grande, también lo será el gasto sólido. Esta situación se presenta en los meses lluviosos.

La determinación del gasto sólido está también relacionada con las características hidráulicas del río. Como consecuencia de estas características (pendiente, velocidad, tirantes, rugosidad, etc.) de la granulometría, y de otras propiedades del material sólido, éste se transportará como de fondo o de suspensión.

Toda corriente posee una capacidad de transporte sólido de fondo determinada. Lo que, en otras palabras, significa que un río no tiene una capacidad ilimitada para arrastrar sólidos.

Se denomina capacidad de transporte a la máxima cantidad de material sólido de fondo, de una cierta granulometría, que una corriente puede transportar con un gasto dado. La capacidad de transporte constituye un máximo, que un río no siempre alcanza.

El gasto sólido que lleva un río en un momento determinado puede ser menor que su capacidad de transporte. Así, un río que escurre sobre un fondo constituido por piedras de gran tamaño puede tener como consecuencia de su velocidad una gran capacidad de transporte, pero en realidad pudiera no haber transporte sólido (debido al gran tamaño de las piedras que constituyen el lecho). En un caso como éste se dice que el río se encuentra en estado de erosión latente, esto se da frecuentemente en ciertos torrentes. Cuando un río transporta su máxima capacidad de sólidos se dice que se halla en estado aluvional o de saturación.

1.4.1 Metodología de cálculo

El cálculo del gasto sólido de fondo, que normalmente forma parte de un estudio sedimentológico, debe empezar por estudios y reconocimientos de campo. Los mismos que,

como sabemos, se inician en la cuenca. Hay un factor adicional que se debe tener en cuenta; los estudios sedimentológicos se hacen para el futuro, como parte de un proyecto que se va a desarrollar en el tiempo. En consecuencia, debemos evaluar los factores que intervienen en el comportamiento de la cuenca y su evolución en los años venideros en concordancia con la vida del proyecto.

Luego viene el estudio del río, cuyas características hidráulicas deben conocerse en detalle. En un río todo es variable: los caudales líquidos y sólidos, los tirantes, las velocidades, los niveles, la granulometría, la rugosidad y, en general, todo lo asociado al río. Esta rapidísima descripción de la variabilidad fluvial podría ahondarse mucho más. También es variable la composición mineralógica del material sólido, la forma de las partículas, la temperatura del agua, la viscosidad, etc. La variabilidad es una gran dificultad, pero es la esencia de lo que es un río.

Como parte del estudio del río debemos escoger un tramo fluvial característico. Los ríos, como sabemos, no son rectos; tienen muchas curvas y en ellas predomina la tridimensionalidad. Se debe, pues, escoger un tramo más o menos recto, al que se le considera representativo del río y que, naturalmente, debe aproximarse a las condiciones en las que se han establecido las fórmulas, en especial aquéllas que se piensan utilizar para el cálculo del gasto sólido.

Escogido el tramo característico del río, se debe hacer un estudio hidráulico que comprenda los aspectos topográficos, batimétricos e hidrométricos. Los elementos hidráulicos de dicho tramo deben satisfacer una ecuación como la de Chezy o Manning. El reconocimiento de campo debe incluir los aspectos morfológicos del río, la presencia de playas, bancos y áreas de inundación.

1.4.2 Fórmula de arrastre de fondo de Meyer Peter y Müller

(Reyes, 2015) Esta ecuación sirve para evaluar el transporte de partículas en la capa de fondo. Se utiliza cuando el material es granular, ya sean gravas o arenas y se expresa con la siguiente Ecuación 1-39

$$g_B = 8 \gamma_s D_m^{3/2} g^{1/2} \Delta^{1/2} \left[\left(\frac{\dot{n}}{n} \right)^{3/2} \frac{R \cdot S}{\Delta D_m} - 0,047 \right]^{3/2} \quad (1-39)$$

Donde:

g_B = arrastre en la capa de fondo, en toda la sección (Kgf/s.m)

γ = peso específico del agua (kgf/m³)

γ_s = peso específico sólido (kgf/m³)

g = aceleración gravitacional (m/s²)

Δ = peso específico relativo de la materia sólida sumergida $\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)$

$\dot{n}$ = rugosidad debida a las partículas $\frac{D_m^{1/6}}{26}$

n = rugosidad de fondo según Manning $\frac{R^{2/3} S^{1/2}}{V}$

R = radio hidráulico (m)

S = pendiente de fondo (m/m)

V = velocidad (m/s)

D_m = diámetro 90

1.5. Gastos sólidos en suspensión

(Rocha, 1998) El material sólido en suspensión transportado por un río, así como el de fondo, proviene de la erosión de la cuenca. La suspensión está constituida por las partículas finas, las que se distribuyen en toda la sección transversal del río y dan color al agua.

El movimiento de las partículas del fondo empieza cuando la fuerza tractiva, que imaginamos creciente, llega a un valor igual a la fuerza tractiva crítica, y la excede. El exceso de fuerza tractiva, con respecto a la crítica, es lo que causa el movimiento de las partículas del fondo y determina la intensidad del arrastre, que se caracteriza porque las partículas ruedan o se deslizan sobre el fondo, ocasionando que algunas partículas se desprenden del fondo y avanzan temporalmente a saltos, esta modalidad de transporte es llamada saltación.

Si la fuerza tractiva continúa aumentando, lo que significa aumento de caudal, de velocidad, etc. llega un momento en el que la velocidad de corte será mayor que la velocidad de caída de las partículas, y éstas entran en suspensión, manteniéndose a una altura de equilibrio entre la componente ascensional de la turbulencia y la velocidad de caída.

Conceptualmente, y para fines prácticos, el inicio de la suspensión corresponde a la llamada condición de Bagnold, que se presenta cuando la velocidad de corte es mayor que la velocidad de caída de las partículas expresada en la Ecuación 1-40

$$V_* > W \quad (1-40)$$

Para partículas muy finas el inicio de la suspensión corresponde a una condición menos exigente. Engelund trabaja con la condición $V_* = 0,25W$, como condición límite.

Se debe tenerse presente que no hay un límite claro entre la saltación y la suspensión. No basta con que una partícula se desprenda temporalmente del fondo para admitir que esté en suspensión, investigaciones realizadas en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Delft (Holanda) consideró que una partícula estaba en suspensión cuando al desplazarse se mantenía separada del fondo una distancia mayor que 100 veces su diámetro.

El tema del inicio de la suspensión y el estudio del mecanismo por el que las partículas se mantienen suspendidas tienen enormes posibilidades de análisis dentro de la teoría de la turbulencia y del transporte de sedimentos.

Cuando el material en suspensión es de granulometría variada y contiene más de 10% de partículas finas de arcilla adquiere propiedades cohesivas. Esto significa que las fuerzas electrostáticas son de magnitud comparable a las fuerzas gravitacionales entre las partículas.

1.5.1 Cálculo del gasto sólido en suspensión

Para el cálculo del gasto sólido en suspensión consideremos el flujo, en un canal como el mostrado en la Ilustración 1-8. En una porción elemental de canal, de ancho unitario y altura dh , el gasto sólido en suspensión específico puede expresarse como la Ecuación 1-41

$$dt_s = c_h V_h dh \quad (1-41)$$

h es la distancia variable, a partir del fondo, a la que corresponden la concentración y velocidad señaladas con subíndice h .

Integrando a Ecuación 1-41 obtenemos la expresión correspondiente al gasto sólido en suspensión específico mediante la Ecuación 1-42:

$$t_s = \int_{\text{fondo (h=a)}}^{\text{superficie (h=y)}} c_h V_h dh \quad (1-42)$$

La Ecuación 1-42 se reemplaza con las siguientes Ecuaciones 1-43, 1-44 y 1-45:

- Distribución vertical de concentraciones en un canal

$$\frac{c_h}{c_a} = \left(\frac{y-h}{y-a} \cdot \frac{a}{h} \right)^Z \quad (1-43)$$

Donde:

c_h : representa la concentración a la altura h del fondo

c_a : concentración a la distancia a del fondo, esta distancia se define como una franja de espesor $2d$ (dos diámetros), siendo “ d ” el diámetro característico de las partículas constituyentes del fondo. Se considera $a = 0,05y$

El campo de validez de la Ecuación 1-43 está restringido a la región $a \leq h \leq y$

Z : número de Rouse o parámetro características de la suspensión $Z = \frac{W}{\beta k V_*}$, donde β es un coeficiente menor que 1, k es la constante de Karman, W es la velocidad de caída de las partículas y V_* es la velocidad de corte. Se considera para β el valor 1 y para k el valor 0,4. De acá que usualmente se acepta para Z la expresión $Z = 2,5 \frac{W}{V_*}$

- Distribución de velocidad puntual a la distancia h del fondo

$$V_h = \frac{V_*}{k} \ln \frac{30h}{k} \quad (1-44)$$

Entonces:

$$t_s = 2,5 c_a V_* \int_a^y \left(\frac{y-h}{y-a} \cdot \frac{a}{h} \right)^Z \ln \frac{30h}{k} dh \quad (1-45)$$

Se ha supuesto que el contorno es hidráulicamente rugoso, si no fuese así habría que usar la ecuación correspondiente.

Para establecer la distribución vertical de concentraciones es necesario conocer la concentración en un punto (la que debe ser medida).

Cuando se está estudiando un río se mide las velocidades y concentraciones a diferentes profundidades (Ilustración 1-8).

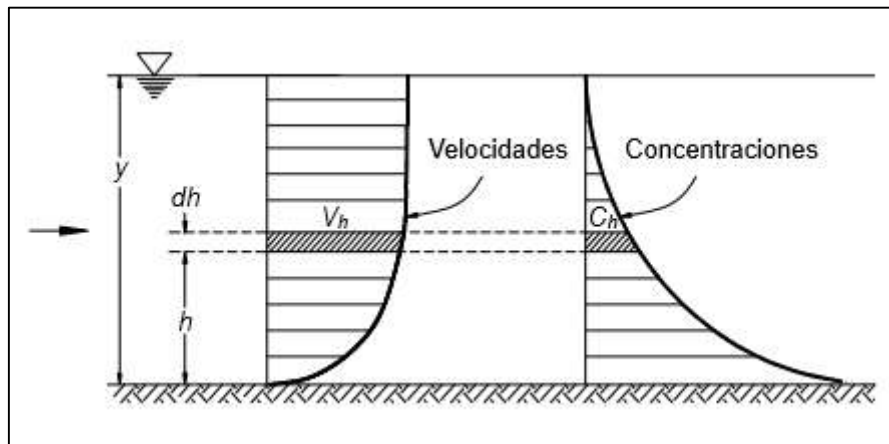


Ilustración 1-8 Esquema de definición para el cálculo del gasto sólido en suspensión

Fuente: (Rocha, 1998)

Otra posibilidad, muy usada para el cálculo del gasto sólido, consiste en recurrir simplemente a una sumatoria como se expresa en la Ecuación 1-46

$$t_s = \sum_{h=a}^{h=y} c_h V_h \Delta h \quad (1-46)$$

El gasto sólido en suspensión se suele expresar, para fines prácticos, como una función del gasto líquido. Esta relación puede hacerse, por ejemplo, para valores diarios, mensuales, anuales, estacionales, etc.

Cuando se dispone de mediciones de sólidos durante un periodo dado se establece, para este periodo, una ley gasto líquido gasto sólido, la que luego se extiende, usando las series hidrológica disponibles, o generadas, para un periodo más largo, 50 o 100 años, y se encuentra así el volumen total de sólidos en el lapso considerado.

1.6. Distribución vertical del gasto sólido en suspensión

(Rocha, 1998) Se determina que parte, porcentaje, del gasto sólido en suspensión pasa por debajo del nivel “h” y, de esta manera encontrar por diferencia el porcentaje de sólidos que puede ser captado por la ventana. Al porcentaje del gasto sólido que pasa entre el fondo y el nivel “h” se le designa como $\phi_{(t_s)}$ y viene dado por la siguiente Ecuación 1-47

$$\phi_{(t_s)} = \frac{[t_s]_a^h}{[t_s]_a^y} \cdot 100 \quad (1-47)$$

En la Ilustración 1-9 se representa esta función a la que se ingresa con los valores de Z . La relación $(h-a)/(y-a)$ ha sido reemplazada por la expresión aproximada de h/y .

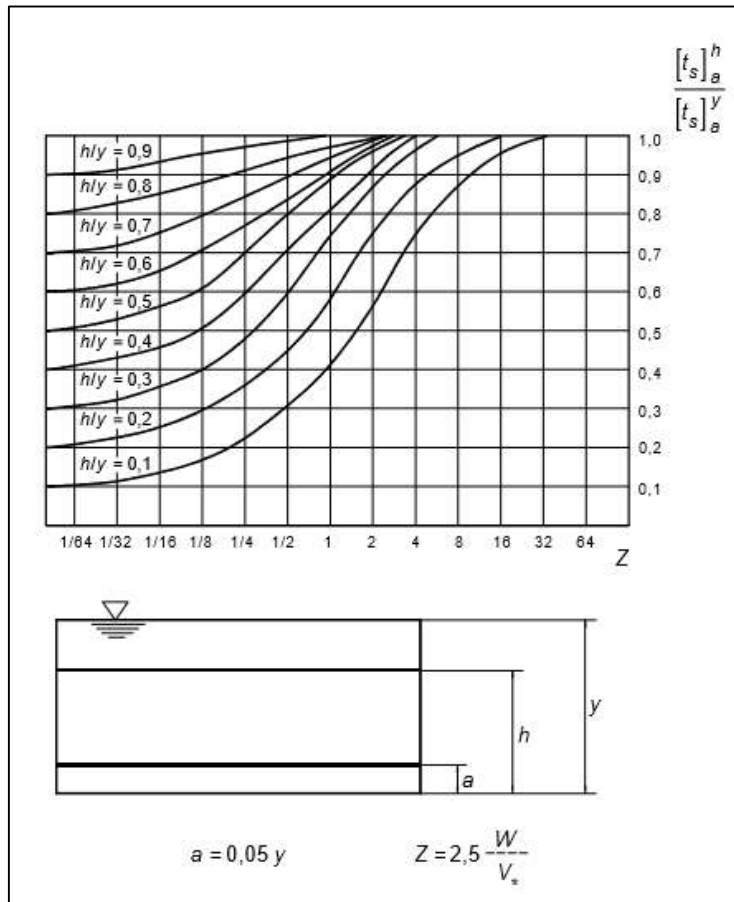


Ilustración 1-9 Distribución proporcional del gasto sólido en la vertical

Fuente: (Rocha, 1998)

Capítulo 2

Las bifurcaciones y su conocimiento para el diseño de bocatomas

La forma más simple de una captación de agua corresponde a la bifurcación de un canal, sin ninguna estructura de guía o control. El estudio de bifurcaciones libres es muy importante para comprender el funcionamiento de una obra de captación más compleja, y para obtener los fundamentos teóricos indispensables de su diseño.

2.1. Bocatomas

Las obras de bocatoma son estructuras hidráulicas que se construyen en un río o canal, con el objetivo de captar, o desviar, una parte o el total del agua que escurre por el cauce. Se caracterizan principalmente por el caudal de captación, el que se define como el gasto máximo que una obra de bocatoma puede admitir.

Habitualmente, estas obras están destinadas a proveer de agua a la agricultura, la generación de electricidad, la población rural y urbana, la industria y la minería.

Pueden llegar a ser obras muy complejas, y en su diseño intervienen prácticamente todas las especialidades de la ingeniería civil. En muchos casos los diseños propuestos son verificados por medio de modelos a escala reducida (modelos físicos) debido a la complicación de los fenómenos.

Se pueden clasificar desde distintos puntos de vista, ya sea por su envergadura, su objetivo, su permanencia en el tiempo, sus características particulares y los materiales de los que están hechas.

En cualquier caso, las bocatomas siempre deben cumplir, entre otras, con tres exigencias básicas:

- Deben ser capaces de extraer el caudal para el cual fueron diseñadas, con el mínimo nivel de agua en el cauce, siempre que ese caudal esté disponible.
- Deben permitir el paso de la crecida de diseño en caso de ocurrir ésta.
- Su operación no debe producir modificaciones de las condiciones del tránsito del agua y de los sólidos arrastrados, que puedan provocar daños en la propiedad privada, pública o en el medioambiente.

Conceptualmente, y de manera muy simplificada, una bocatoma está compuesta por los siguientes elementos.

- Una barrera transversal, que puede ser total o parcial en el cauce, cuyo objetivo es medir el agua e incrementar su nivel para introducirla en una canal o zanja de aducción. La

barrera debe permitir el paso de los excedentes de agua y de las crecidas. Cuando el nivel de agua en el cauce es suficientemente alto de manera natural, se prescinde de la barrera.

- Un canal o zanja de aducción, generalmente lateral, por el que se deriva el caudal captado.
- Una estructura de control (compuerta), que permite manejar el ingreso del agua desde el canal de aducción al canal que conduce finalmente las aguas a los puntos de consumo.

En la descripción de obras específicas, son precisados en detalle otros componentes que existen habitualmente. La Ilustración 2-1 muestra un esquema básico de una captación por bocatoma.

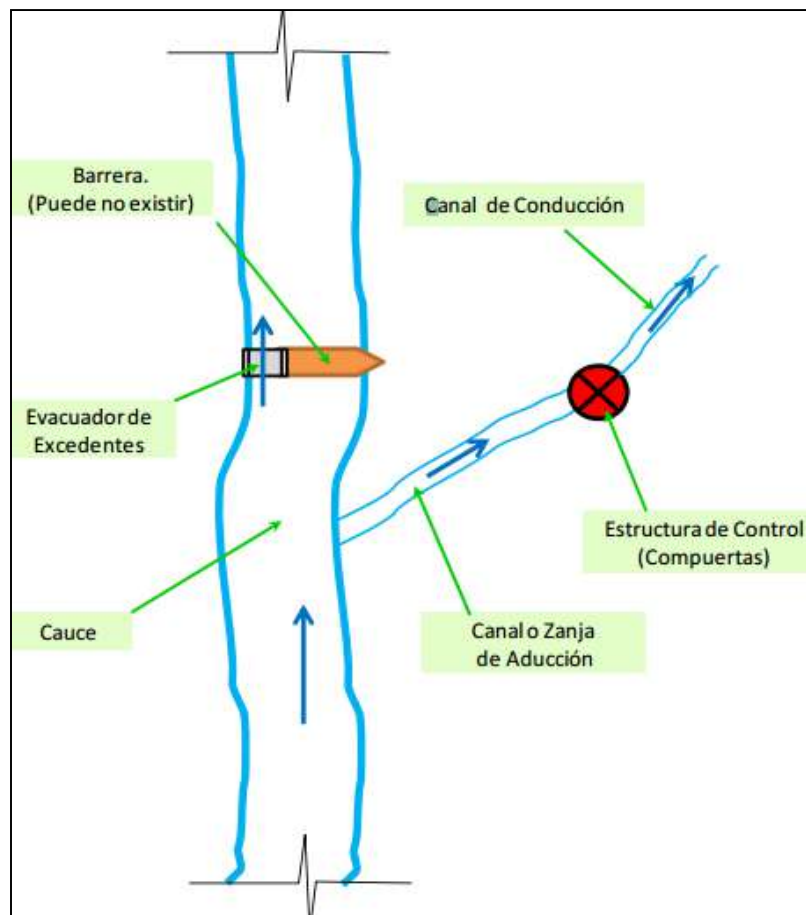


Ilustración 2-1 Esquema básico de una bocatoma

Fuente: (Aquaterra Ingenieros LTDA, 2009)

El costo de construcción de las bocatomas en ríos de gran tamaño es generalmente muy elevado, por lo que ese costo queda definido principalmente por el tamaño del río. Parte importante de ese costo corresponde a las barreras en el cauce por lo que, en general y en medida en que las condiciones hidráulicas lo permiten, se prescinde de las barreras transversales totales en el cauce.

En suministros se requieren gran seguridad en su funcionamiento, como es el caso de la alimentación de centrales hidroeléctricas y el abastecimiento de agua potable para una población, el estándar de calidad de las bocatomas es superior, incluyéndose mayor cantidad de elementos de operación y control. Con el objetivo de disminuir los costos de construcción, y sin ser excluyente, en la agricultura se suele construir bocatomas más modestas por cuanto se puede permitir eventuales fallas de las obras por períodos cortos sin que eso signifique una pérdida de la producción (Aquaterra Ingenieros LTDA, 2009).

La estabilidad y la vida de una bocatoma están asociadas al concepto de avenida de diseño. Tradicionalmente se ha usado el concepto de avenida de diseño para designar el máximo caudal del río que una bocatoma puede dejar pasar sin sufrir daños que la afecten estructuralmente (Sparrow, 2008).

Con la presencia e ingreso del material sólido, se determinan las condiciones de funcionamiento y aprovechamiento; la eficiencia queda definida en términos del agua no captada. La eficiencia de una bocatoma es la relación entre la cantidad de agua realmente incorporada a la bifurcación y aquella que podría haberse captado desde el punto de vista de las disponibilidades hídricas.

Los factores que disminuyen la captación real son (Rocha, 1978):

- La necesidad de mantener en el río un gasto remanente, lo suficientemente grande como para evitar sedimentación aguas abajo y permitir así el arrastre de los sólidos no captados.
- El gasto empleado por medio de un canal de purga para eliminar el material sólido grueso inmediatamente después de su ingreso.
- El gasto empleado para purgar el desarenador. Este valor oscila entre el 5 y 10% del gasto derivado.
- La sedimentación en el canal de derivación disminuye la capacidad hidráulica.

2.1.1 Clasificación de bocatomas

(Anguisaca & Maza, 2012) Las obras de captación se clasifican según diversos criterios, a continuación, se nombran algunos:

Teniendo en cuenta su finalidad:

- Bocatoma para irrigación
- Bocatoma para central hidroeléctrica
- Bocatoma para abastecimiento público
- Bocatoma para uso industrial
- Bocatoma para uso múltiple

Según el nivel de la toma con respecto al río

- Bocatoma con nivel libre
- Bocatoma con captación profunda
- Bocatoma con captación por infiltración

Según el emplazamiento con respecto al río

- Bocatoma con captación desde una margen (lateral)
- Bocatoma con captación en el río (frontal)
- Bocatoma con captación desde ambas márgenes (bilateral)

Según el criterio de funcionamiento

- Bocatoma por gravedad
- Bocatoma por bombeo

Según el tiempo de vida

- Bocatoma temporal

- Bocatoma definitiva

Según la manera de combatir el ingreso de sólidos, distinguimos entre tomas libre los siguientes tipos:

- Bocatoma sin ningún dispositivo especial (bocatoma directa)
- Bocatoma con barrajes (con captación a ángulo recto o inclinado)
- Bocatoma con efectos especiales

2.1.2 Clasificación de bocatomas de acuerdo con su temporalidad

(Aquaterra Ingenieros LTDA, 2009) De acuerdo con su temporalidad las bocatomas se clasifican en bocatomas temporales y definitivas.

2.1.2.1 Bocatomas temporales

También llamadas “bocatomas provisorias” o “bocatomas rústicas”. Son obras que no son operables de forma continua, independiente de las condiciones climáticas que se presenten.

Requieren habitualmente labores importantes de mantenimiento entre una temporada y otra, por no disponer de los elementos que permiten manejar todos los fenómenos físicos y los requerimientos de operación que se necesitan.

Las bocatomas temporales o rústicas están destinadas principalmente al servicio de la agricultura. La Ilustración 2-2 muestra una bocatoma rústica típica.

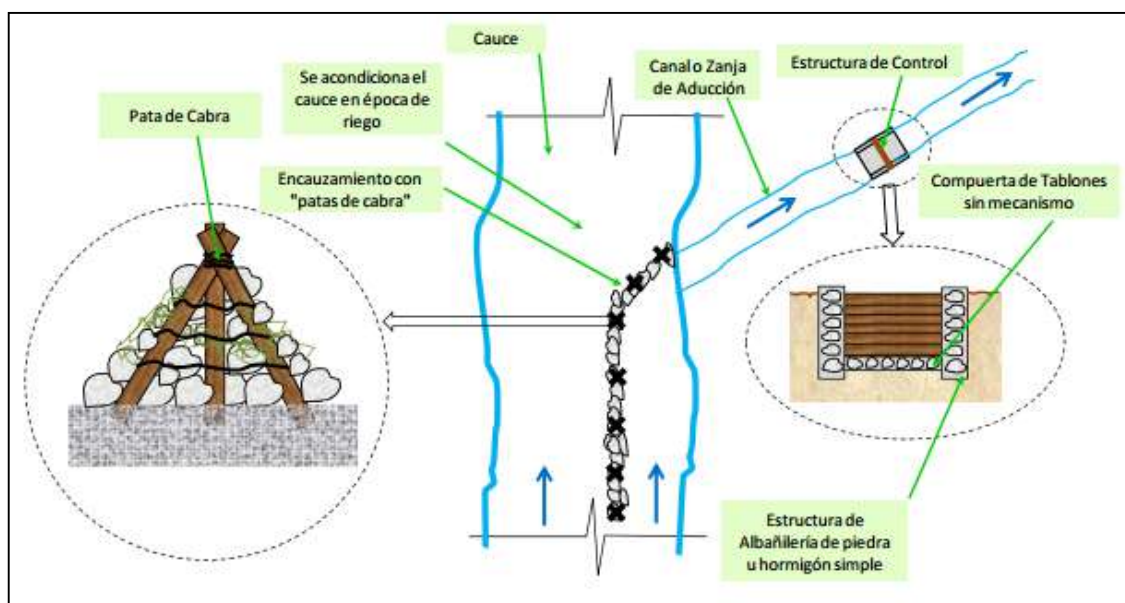


Ilustración 2-2 Esquema básico de una bocatoma temporal

Fuente: (Aquaterra Ingenieros LTDA, 2009)

Se identifican por la existencia de obras rústicas o carencias como las siguientes:

- Barrera en el cauce inexistente, formada por pretiles hechos con material del cauce, pircas de piedra, palos, plásticos o “patas de cabra”. Estas últimas consisten en trípodes formados por rollizos de madera amarrados entre sí, que se clavan en el cauce y afianzan con bolones, alambres, ramas, champas o cualquier material que se disponga.

- Encauzamientos contruidos con los mismos materiales anteriores.
- Estructura de control sencilla, formada habitualmente por una obra de albañilería de piedra u hormigón simple, en la cual se colocan tablones de madera en forma manual para conseguir el cierre. También se usan tacos de tierra, palos, champas o plásticos, en reemplazo de compuertas en la obra de control.
- Ausencia de protecciones de riberas, elementos de operación y control, revestimientos, etc.

Las obras son parcial o totalmente destruidas con la ocurrencia de grandes crecidas, y deben ser reparadas o reconstruidas cada temporada. En general, la rehabilitación de este tipo de obras requiere del uso de maquinaria pesada, para manejar el material del cauce y reponer las condiciones iniciales de operación requeridas.

2.1.2.2 Bocatomas definitivas

Las bocatomas definitivas son aquellas cuyo estándar de construcción permite su operación de forma continua, de manera independiente de las condiciones climáticas que se presenten, y que persisten en el tiempo sin necesidad de hacer mantenimientos mayores entre las distintas estaciones del año.

Para cumplir lo anterior, las bocatomas definitivas disponen de todos, o al menos de la mayoría de los elementos que se requieren para cubrir y resolver cada uno de los fenómenos físicos y requerimientos de operación que se presenten.

Se identifican por la existencia de obras civiles de importancia como muros y losas de hormigón, compuertas con mecanismos para su operación, barreras de hormigón o enrocados, protecciones de riberas con gaviones, enrocados o revestimientos de hormigón o albañilería de piedra.

Un resumen general de las distintas obras de una bocatoma definitiva, es la siguiente:

I. Obras en el cauce:

- Barrera fija: habitualmente contruida con hormigón o grandes rocas consolidadas con hormigón. En general están coronadas a una cota levemente mayor al nivel de agua para la captación, y sobre ellas pasa parte o el total del caudal de las crecidas.
- Barrera móvil: son complementarias o alternativas a las barreras fijas. Normalmente son compuertas contruidas en acero, madera o goma.
- Muros de encauzamiento: son los muros que confinan las obras en sentido lateral, manteniendo rígida la geometría de la sección transversal del cauce en la zona de emplazamiento.
- Protecciones de riberas: son defensas fluviales que se colocan aguas arriba o aguas abajo de la bocatoma, para evitar erosiones del cauce.
- Pretil Fusible: es un pretil que se construye en algunas bocatomas en el lado opuesto a la captación, que en las grandes crecidas puede destruirse quedando el resto de la obra intacta.
- Colchón disipador: es una cubeta encargada de disipar la energía de los torrentes que se forman al pie de algunas obras, como la barrera fija o las compuertas cuando están parcialmente abiertas.

- **Enrocados de protección:** son protecciones de fondo del cauce, ejecutadas con rocas grandes y sanas, en zonas en que se producen aceleraciones fuertes de la corriente, como al pie de la barrera fija y descarga del canal desripiador.
- **Canal y compuerta desripiadora:** es un canal paralelo al sentido del cauce ubicado junto a la bocatoma, con una compuerta que puede cerrar el flujo. Durante la operación de extracción de agua, la compuerta permanece cerrada. Cada cierto tiempo, al detectarse la existencia de sólidos frente a la bocatoma, la compuerta es abierta deprimiéndose el nivel de la poza y acelerándose el flujo por tener fuerte pendiente. Producto de lo anterior los sólidos acumulados son arrastrados aguas abajo con lo que la zona frente a la bocatoma queda nuevamente limpia, factor fundamental para minimizar el ingreso de sólidos al canal.

II. Obras de captación

- **Umbral de captación:** se ubica de manera lateral frente al canal desripiador. Funciona como vertedero lateral con su umbral ubicado a mayor altura que el fondo del canal para reducir el ingreso de sólidos.
- **Rejas:** se instalan después del umbral de captación para impedir el ingreso de sólidos grandes a la toma.
- **Compuerta de control de la captación:** su función es regular el ingreso de agua a la toma, o cerrarla completamente.
- **Compuerta y canal de devolución:** es una obra destinada a devolver los excedentes del agua al cauce original.
- **Aforador:** el aforador es una obra destinada a medir el caudal extraído. En general son instrumentos que aceleran la corriente produciendo escurrimiento crítico, situación en la cual el caudal se calcula en función de la altura de agua que se produce aguas arriba, medida por medio de una regla o limnómetro. Existen varios tipos, siendo los más usuales:
 - ✓ Barrera triangular
 - ✓ Barrera rectangular
 - ✓ Aforador Parshall
 - ✓ Angostamiento
- **Desarenador:** Es una obra destinada a recoger y eliminar las arenas que hayan ingresado al canal. Son obras de grandes dimensiones y alto costo, fundamentales para las centrales hidroeléctricas por el daño que las arenas pueden causarles a los rodets y las tuberías a presión.

2.1.3 Criterios para el diseño de bocatomas

(Anguisaca & Maza, 2012) Para el diseño de una bocatoma, se deben examinar los siguientes aspectos:

2.1.3.1 Ubicación

En un proyecto es importante la ubicación de la bocatoma en el cauce de río, por lo que se recomienda que el sitio elegido reúna las siguientes condiciones:

- ✓ La dirección o ruta del flujo de agua debe ser lo más estabilizada o definida.
- ✓ La captación del agua a ser derivada debe ser posible aún en tiempo de estiaje.
- ✓ La entrada de sedimentos hacia el caudal de derivación debe ser limitada al máximo posible.

Un punto recomendable para cumplir las condiciones anteriores, se encuentra ubicado aguas abajo del centro de la parte cóncava en los tramos curvos del río, explicado en la Ilustración 2-3.

En este punto se cumplirán las condiciones topográficas (cota de captación), geológicas y geotécnicas, así como condiciones sobre facilidades constructivas (disponibilidad de materiales), para evitar posibles inundaciones o daños a construcciones vecinas.

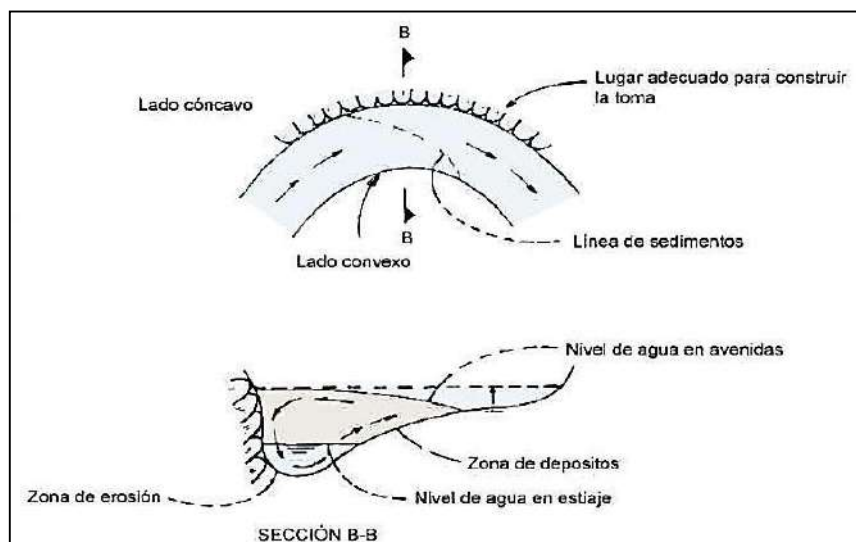


Ilustración 2-3 Ubicación de la bocatoma en tramos curvos

Fuente: (Anguisaca & Maza, 2012)

2.1.3.2 Topografía

Definida la posible ubicación, se recomienda realizar los siguientes trabajos topográficos:

- ✓ Levantamiento en planta del cauce del río, entre 500 m y 1000 m, tanto aguas arriba como aguas abajo del eje del barraje. La escala recomendada es 1:2000.
- ✓ Levantamiento de la zona de ubicación de la bocatoma, se recomienda un área de 100 m x 100 m como mínimo. La escala no debe ser menor de 1:500.
- ✓ Perfil longitudinal del río, por lo menos 1000 m, tanto aguas arriba como aguas abajo del eje del barraje. La escala recomendada es $H = 1:2000$ y $V = 1:200$.
- ✓ Secciones transversales del cauce del río cada 50 m, en un tramo comprendido 1000 m aguas arriba y 500 m aguas abajo del eje del barraje. La escala variara entre 1:100 y 1:200.

2.1.3.3 Condiciones geológicas y geotécnicas

El conocimiento de las condiciones geomorfológicas, geológicas y geotécnicas permitirá dimensionar con seguridad la estructura. Se recomiendan los siguientes datos como resultado de los estudios geológicos – geotécnicos:

- ✓ Curva de graduación del material conformante del lecho del río.
- ✓ Sección transversal que muestre la geología de la zona de ubicación de la bocatoma.
- ✓ Coeficiente de permeabilidad.
- ✓ Capacidad portante.
- ✓ Resultados sobre ensayos de hincado de pilotes o tabla estacas.
- ✓ Cantidad de sedimentos que transporta el río.

2.1.3.4 Información hidrológica

Es importante conocer el comportamiento hidrológico del río para garantizar el caudal a derivar, y definir las dimensiones de los elementos conformantes de la bocatoma. Los datos a obtener son:

- ✓ Caudal de diseño para una avenida máxima.
- ✓ Caudales medios y mínimos.
- ✓ Curva de caudal versus tirante en la zona del barraje.

2.1.3.5 Condiciones ecológicas

Toda construcción en un río siempre causa alteraciones de equilibrio ecológico de la zona, sobre todo en lo relacionado con la fauna, por esta razón es que se debe tratar de no alterar dicho equilibrio mediante la construcción de estructuras que compensen este desequilibrio causado por la bocatoma.

2.1.4 Eficiencia de la captación

(Rocha, 1978) La presencia e ingreso del material sólido determina las condiciones de funcionamiento y aprovechamiento, y la purga se efectúa normalmente por medio del agua. La eficiencia queda definida en términos del agua no captada, sea por no haberse podido tomar del río o porque luego de su captación se utilizó para la purga.

Así pues, la eficiencia es la relación entre la cantidad de agua realmente incorporada a la bifurcación y aquella que podría haberse captado desde el punto de vista de las disponibilidades hídricas.

Los factores que disminuyen la captación real son:

- La necesidad de mantener en el río un gasto remanente, lo suficientemente grande como para evitar sedimentación y permitir el arrastre de los sólidos no captados.
- El gasto empleado por medio de un canal de purga para eliminar el material sólido grueso inmediatamente después de su ingreso.
- El gasto empleado para purgar el desarenador. Este valor oscila entre 5 y 10% del gasto derivado.

El diseño de una bocatoma debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Asegurar la derivación permanente del caudal de diseño.
- Captar el mínimo de sólidos y disponer de medios apropiados para su evacuación.
- Estar ubicada en un lugar que presenta condiciones favorables desde el punto de vista constructivo.
- Conservarse aguas abajo suficiente capacidad de transporte para evitar sedimentaciones.

2.2. Bifurcaciones

(Rocha, 1978) La forma más simple de captar agua corresponde a una bifurcación del canal sin ninguna estructura de guía o control, distribuyendo agua y sólidos transportados por la corriente, en proporciones diferentes. Se considera un canal principal de ancho B del cual se deriva una bifurcación de ancho b , y un ángulo θ formado por el eje del canal principal y el eje del canal lateral denominado ángulo de derivación, como se muestra en la Ilustración 2-4.

En el cauce principal escurre un gasto Q del cual se deriva un gasto Q_1 hacia el canal derivador, quedando un gasto Q_2 en la extensión del canal principal.

El río lleva también una cierta cantidad de material sólidos Q_s , la misma que a su vez se distribuyen en Q_{s1} y Q_{s2} . Se establecen las siguientes Ecuaciones 2-1 y 2-2 de continuidad:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (2-1)$$

$$Q_s = Q_{s1} + Q_{s2} \quad (2-2)$$

La ecuación Q_s está vinculada al tiempo, esto se debe a que, en un intervalo relativamente corto, se producen fenómenos locales de erosión y sedimentación de manera que sólo se logra el equilibrio después de transcurrido un cierto tiempo.

El estado de equilibrio se define, para un tramo de río, como la igualdad entre las cantidades de sólido que entran y salen por los extremos de dichos tramos. Si el volumen de sólidos que ingresa es menor que el volumen de sólidos que sale, decimos que hay erosión; en caso contrario hay sedimentación.

Q_s representa el transporte sólido total, que puede descomponerse esquemáticamente en transporte sólido de fondo Q_{SF} y transporte sólido en suspensión Q_{SS} , expresado en la Ecuación 2-3:

$$Q_s = Q_{SF} + Q_{SS} \quad (2-3)$$

El caudal Q_1 debe captar el mínimo material sólido.

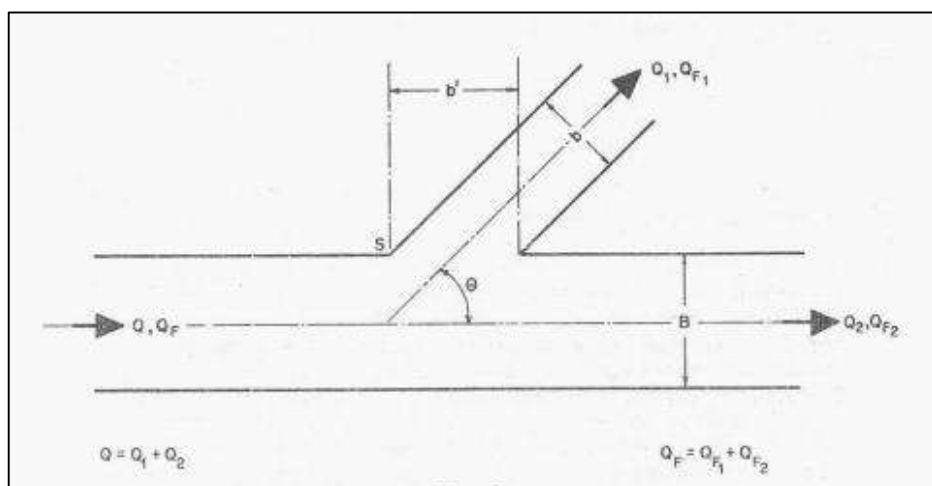


Ilustración 2-4 Representación esquemática de una bifurcación

Fuente: (Rocha, 1978)

2.3. Análisis dimensional de una bifurcación

(Rocha, 2005) Los estudios experimentales por regla general son bastantes caros, por lo que es necesario mantener la experimentación requerida a un mínimo, realizando una técnica llamada análisis dimensional, la cual está basada en la noción de homogeneidad dimensional, en el que todos los términos de una ecuación deben tener la misma dimensión.

Similitud es el estudio de predecir condiciones del prototipo a partir de observaciones en modelos, presentado después del análisis dimensional. Esta implica el uso de parámetros

sin dimensiones obtenidos en un análisis dimensional. Para garantizar la similitud completa entre modelo y prototipo, se exige que:

- Se satisfaga la similitud geométrica
- La relación de masa de elementos del fluido correspondientes sea una constante.
- Los parámetros sin dimensiones apropiados del número de Euler (Eu), número de Reynolds (Re), número de Froude (Fr), número de Mach (M), número de Strouhal (St) y número de Weber (We) sean iguales.

Existen dos métodos que se utilizan en el estudio de análisis dimensional y similitud. En primer lugar, se utiliza el teorema π de Buckingham, el cual organiza los pasos que garantizan la homogeneidad dimensional. En segundo lugar, se extraen los parámetros sin dimensiones que afectan a una situación de flujo particular de las ecuaciones diferenciales y las condiciones límite requeridas para describir el fenómeno que se está investigando (Potter & Wiggert, 2003).

Para estudiar sistemáticamente el problema de la distribución de sólidos en una bifurcación, se puede considerar las siete cantidades fundamentales siguientes

- Q = gasto específico en el canal principal
- Q_1 = gasto específico en el canal derivador
- Q_F = gasto sólido específico en el canal principal
- Q_{F1} = gasto sólido específico en el canal derivador
- W = velocidad de caída de las partículas sólidas
- v = velocidad media de la corriente
- d = tamaño representativo de la resistencia del lecho

En consecuencia, se tendrá que en una bifurcación (ver Ecuación 2-4):

$$\phi(Q, Q_1, Q_F, Q_{F1}, w, v, d) = 0 \quad (2-4)$$

Estas siete cantidades pueden reducirse por medio del teorema de Buckingham a cuatro parámetros π adimensionales, que son los siguientes

- **Relación de bocatoma**, es la relación entre el gasto específico en el canal lateral y el gasto específico en el canal principal. Su expresión es mediante la Ecuación 2-5

$$\pi_1 = \frac{Q_1}{Q} \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}/\text{m}}{\text{m}^3/\text{s}/\text{m}} \right] \quad (2-5)$$

- **Coefficiente de captación sólida**, es la relación entre el gasto sólido específico en el canal de derivación y el que corresponde al canal principal. Su expresión es mediante la Ecuación 2-6

$$\pi_2 = \frac{Q_{F1}}{Q_F} \left[\frac{\text{m}^3/\text{s}/\text{m}}{\text{m}^3/\text{s}/\text{m}} \right] \quad (2-6)$$

- **Rugosidad relativa**, es la relación entre el tirante en el canal principal y el tamaño representativo de la resistencia del lecho. Cuando el fondo es móvil la resistencia

dependerá de las características de la fase del transporte que se presente (rizos o dunas). Su expresión es mediante la Ecuación 2-7

$$\pi_3 = \frac{y}{d} = \frac{Q}{vd} \left[\frac{m^3/s/m}{(m/s) m} \right] \quad (2-7)$$

- **Relación entre la velocidad de caída de las partículas y la velocidad media**, es la relación entre una característica de las partículas, su velocidad de caída en aguas tranquilas, y una característica del escurrimiento, su velocidad media. Su expresión es mediante la Ecuación 2-8

$$\pi_4 = \frac{w}{v} \left[\frac{m/s}{m/s} \right] \quad (2-8)$$

Si consideramos, además, el ángulo de derivación θ , se tendrá entonces un conjunto de cinco parámetros adimensionales importantes (Ecuación 2-9) para describir los problemas que se presentan en una bifurcación. Ellos son:

$$\phi = \left(\frac{Q_1}{Q}, \frac{Q_{F1}}{Q_F}, \frac{Q}{vd}, \frac{w}{v}, \theta \right) \quad (2-9)$$

En general, es importante que en una obra de bocatoma el “coeficiente de captación sólida” tenga el menor valor posible, si su valor fuese cero entonces teóricamente no habría ingreso de sólidos en absoluto.

2.4. Análisis hidráulico de la influencia del ángulo de bifurcación

(Rocha , 2005) El ángulo de bifurcación determina la distribución de sólidos en una bifurcación. Este determina, en primer lugar, que para un mismo ancho de bifurcación se presente un mayor o menor abertura de entrada, con el consiguiente efecto sobre la captación de sólidos.

En la Ilustración 2-4 se aprecia que para un ancho “b” del canal de derivación, la abertura en el canal principal es “b’”, consecuentemente si $\theta = 90^\circ$, entonces $b = b'$ y el ancho de entrada será mínimo. El valor del ángulo de bifurcación “ θ ” determina también la curvatura de las líneas de corriente y la trayectoria de las partículas que se dirigen hacia la bifurcación. Un ángulo grande produce una fuerte curvatura.

La Ilustración 2-5 muestra esquemáticamente algunos de los fenómenos secundarios que se presentan en una bifurcación, con el borde interior redondeado (arista redondeada), como consecuencia de la curvatura de las líneas de corriente y de la aparición de una capa límite. En torno al punto “A” aparece una pequeña zona vorticosa en la que se presenta una contracorriente y, finalmente, una zona de estancamiento. La aparición de esta zona de estancamiento corresponde a un fenómeno de separación. El redondeo de la esquina comprometida no elimina la zona de estancamiento, pero altera ligeramente su forma desplazando la parte más ancha hacia aguas abajo. El redondeo de la esquina produce un aumento del ancho de entrada “b”. No puede afirmarse que el redondeo disminuya la cantidad de material sólido captado, porque, de un lado, aumenta el ancho de entrada y, de otro, el redondeo hace más inestable la zona de separación. Como consecuencia del redondeo pueden presentarse fluctuaciones turbulentas de la velocidad que determinan el ingreso de una mayor cantidad de material sólido fino.

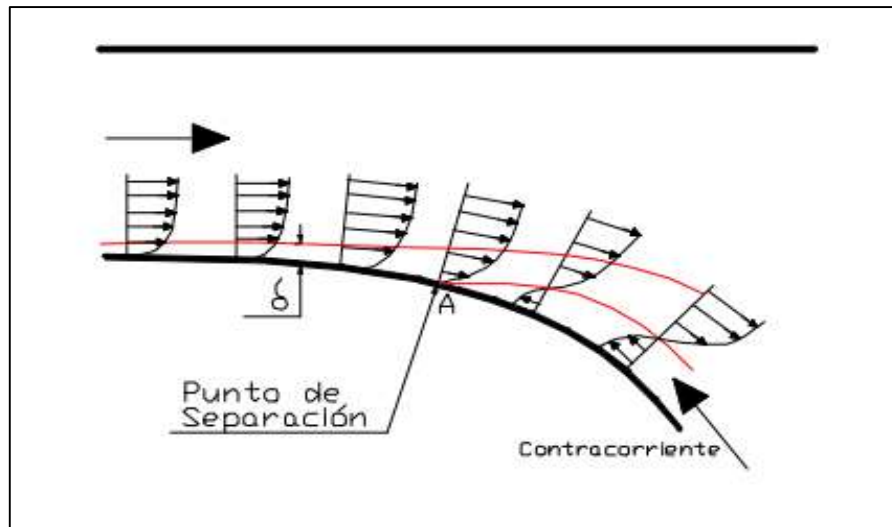


Ilustración 2-5 Fenómenos secundarios que se presentan en una bifurcación

Fuente: (Rocha , 2005)

En la Ilustración 2-6 se muestra las respectivas zonas de estancamiento en una bifurcación con ángulos de 30°, 90°, 120°, sin redondear (aristas vivas). Con el objeto de apreciar la influencia del ángulo de bifurcación sobre la cantidad de sólidos captados, la Ilustración 2-7 presenta los resultados de las investigaciones de Thoma, Benini, Bule, Dancy y las del laboratorio de Vicksburg. Thoma realizó mediciones para ángulos de 30° y 90°. Este último ángulo tenía la esquina redondeada, sin embargo, se consideró en el gráfico dado que el efecto del redondeo de la esquina es en realidad pequeño. Las mediciones de Vicksburg se originaron en un modelo del río Mississippi, por lo tanto, las condiciones son diferentes a la bifurcación esquematizada que se están estudiando, sin embargo, se consideró útil su incorporación al gráfico. Las experiencias de Benini y de Bulle corresponden al caso genérico en estudio. Dancy utilizó únicamente un ángulo de 30°, pero diversos diámetros para el material sólido.

Se concluye luego de analizar las diversas investigaciones, que la influencia del ángulo de bifurcación (Ilustración 2-7) en la captación de material sólido, no tiene un ángulo óptimo.

En consecuencia, la influencia del ángulo de bifurcación es pequeña, no bien conocida y no susceptible de generalización.

2.5. Investigaciones realizadas para el estudio de bocatomas con bifurcación

Para la presente tesis se tomaron en cuenta las siguientes investigaciones que muestran el comportamiento del flujo y sedimentos en bifurcaciones

2.5.1 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a 30° y 90° realizadas por Thoma

(Rocha , 2005) Las primeras investigaciones sistemáticas sobre la distribución de los sólidos de fondo en una bifurcación fueron hechas por Thoma (1933), a partir de los estudios de una bocatoma en el Mittel Isar, ubicada aguas debajo de Munich, Alemania. Los experimentos se hicieron en una canal simple de 4 metros de largo, 0,30 m de ancho y 0,2 m de profundidad (Ilustración 2-8), con una sección de la bifurcación igual a la de la bocatoma. Por lo tanto, la aportación del gasto se repartió en partes iguales, en consecuencia, la relación de bocatoma es 0,5.

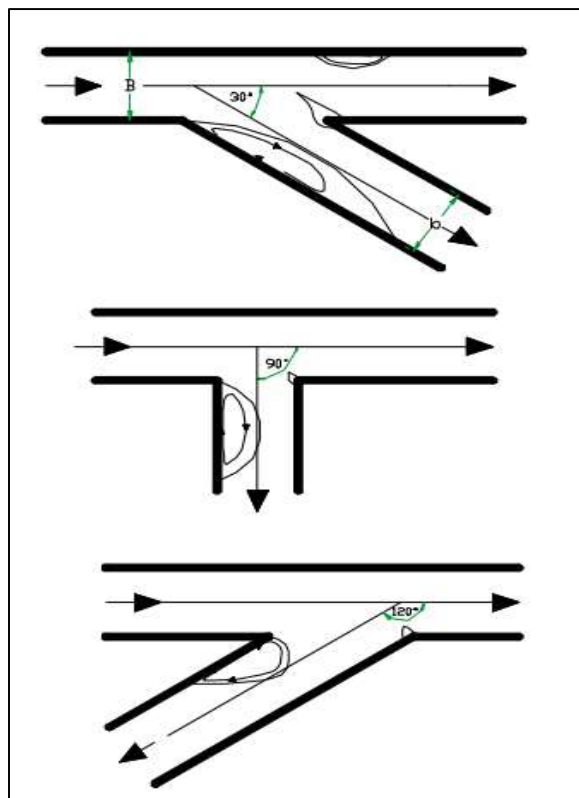


Ilustración 2-6 Zonas de estancamiento y depósito

Fuente: (Rocha , 2005)

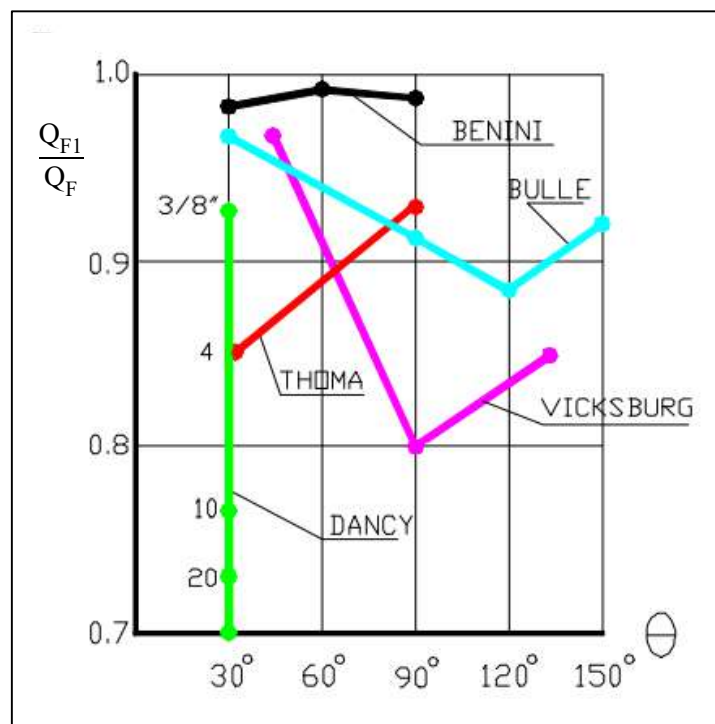


Ilustración 2-7 Influencia del ángulo de bifurcación en la captación de sólidos

Fuente: (Rocha , 2005)

Las primeras pruebas se realizaron con un ángulo de 30° y aristas redondeadas, mostrando que el 85,2% del gasto sólido de fondo (TF) se dirigía hacia la bifurcación. Pruebas posteriores realizadas con un ángulo de derivación de 90° y aristas vivas dieron por resultado que el 92,1 % del material de fondo ingresara a la bifurcación. Es decir, un resultado superior al obtenido en el experimento anterior pero bastante parecido, tal como se ve en la Ilustración 2-8 y 2-9.

Los resultados de Thoma (1933) fueron muy importantes porque permitieron establecer experimentalmente que en una bifurcación el material de fondo tiene una marcada tendencia a dirigirse hacia la bifurcación. Se realizaron también pruebas con materiales de bajo peso específico, comprobando la misma tendencia.

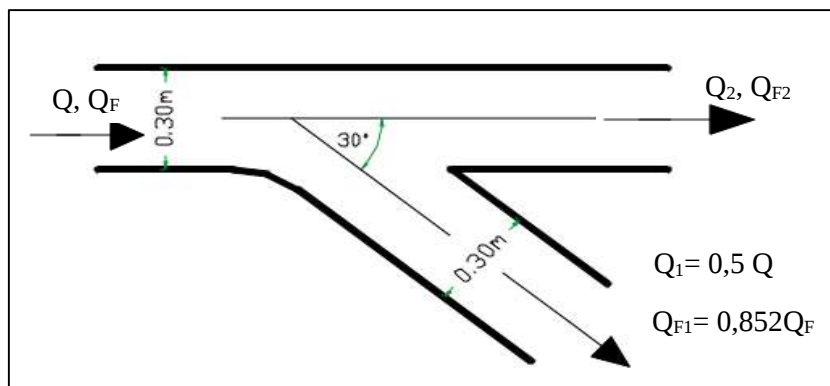


Ilustración 2-8 Resultados de las investigaciones de Thoma ($\theta = 30^\circ$)

Fuente: (Rocha , 2005)

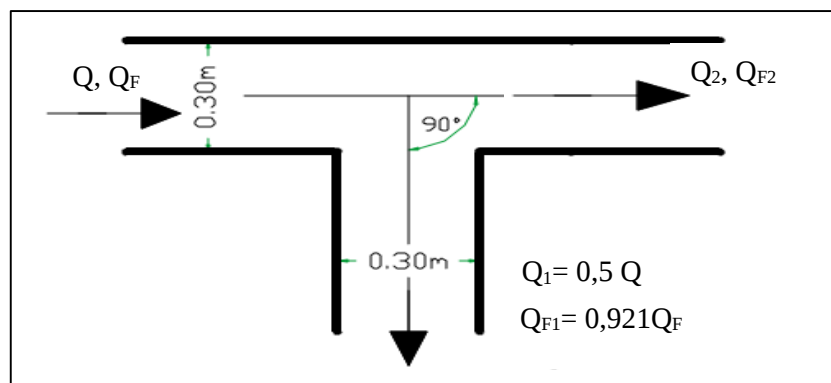


Ilustración 2-9 Resultados de las investigaciones de Thoma ($\theta = 90^\circ$)

Fuente: (Rocha , 2005)

2.5.2 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a diferentes ángulos realizadas por Bulle

(Díaz, 2015) H. Bulle realizó hacia 1926 experiencias sistemáticas en el laboratorio de hidráulica de Karlsruhe, con el objetivo de profundizar el estudio de la distribución de sedimentos de fondo en una bifurcación y establecer sus causas. Gracias a las investigaciones previas de Thoma, Bulle partió de la base de que no existía, como podría pensarse, la misma relación entre la distribución de caudales líquidos y sólidos de fondo y que tampoco se obtenían resultados correctos si se hacía un cálculo teórico en base a las capacidades de

transporte de cada canal. Por tanto, la relación de bocatoma y el coeficiente de captación sólida no son necesariamente iguales.

Las investigaciones de Bulle (1926) se realizaron en un canal rectangular de 0,2 m de ancho, tanto el principal como el lateral (Ilustración 2-10), con una velocidad media del flujo de 0,37 m/s y un caudal de 5 l/s. Los ángulos de derivación estudiados fueron 30°, 60°, 90°, 120° y 150° (la investigación se inició con un ángulo de derivación de 30° y fondo rígido). En la mayoría de los experimentos, la relación de bocatoma inicial fue de 0,5 (mismo caudal por los dos ramales).

Las observaciones sobre el comportamiento del flujo indicaron que la capa inferior de 1 cm de espesor, que correspondía aproximadamente a 1/7 del tirante presentado, se dirigía íntegramente a la bifurcación. Como se sabe, en la zona cercana al fondo las velocidades son mucho menores que cerca de la superficie.

Otro descubrimiento fue la aparición de áreas de recirculación en determinadas zonas en el canal de derivación. Como se puede observar en la Ilustración 2-10, éstas aparecen en el margen derecho de la bifurcación (vista aguas abajo), ocupando prácticamente la mitad de la superficie del ancho del canal y en el margen izquierdo del canal principal, con unas dimensiones más reducidas. También se observó, alrededor del vértice de desvío (punto S), en una zona de erosión del lecho. Por último, hace falta destacar que en el canal principal se generó un cierto aumento de la pendiente transversal.

Como se ha comentado anteriormente, Bulle (1926) hizo ciertas modificaciones en algunos de los parámetros, con el objetivo de analizar su relevancia. Realizó este mismo tipo de ensayos para los otros cuatro ángulos mencionados, con resultados similares. Hizo cambios en el redondeo del borde interior, pero no se mostraron alteraciones fundamentales en los resultados.

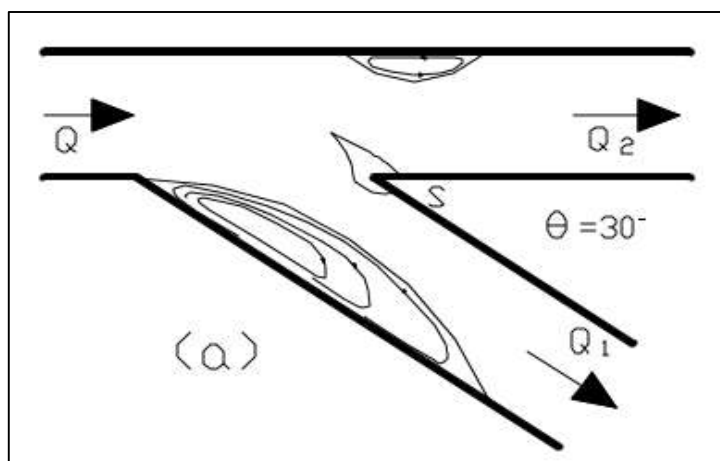


Ilustración 2-10 Esquema de la zona de derivación en las investigaciones de Bulle, con las áreas de recirculación de flujo y los vórtices generados
Fuente: (Díaz, 2015)

Después de estas investigaciones, se llevó a cabo experimentos incorporando arena como material de fondo, cuyo diámetro era de 1,2 mm. Para una repartición igual de caudales entre ambos canales Bulle obtuvo los siguientes resultados (Tabla 2-1).

Tabla 2-1 Tabla resumen de los resultados obtenidos referentes al coeficiente de captación sólida en función del ángulo de desvío adoptado

θ	$Q_{F1}/Q_F(\%)$
30°	97
60°	96
90°	90
120°	87.5
150°	92

Fuente: (Díaz, 2015)

Estos resultados corresponden a pruebas realizadas incorporando arena, durante 45 minutos en cada prueba. Los ensayos realizados con una duración de 75 minutos no mostraron una diferencia sustancial. Finalmente, se realizaron variaciones en la relación de bocatoma, modificando la sección del canal de derivación, obteniendo el diagrama que se muestra en la Ilustración 2-11.

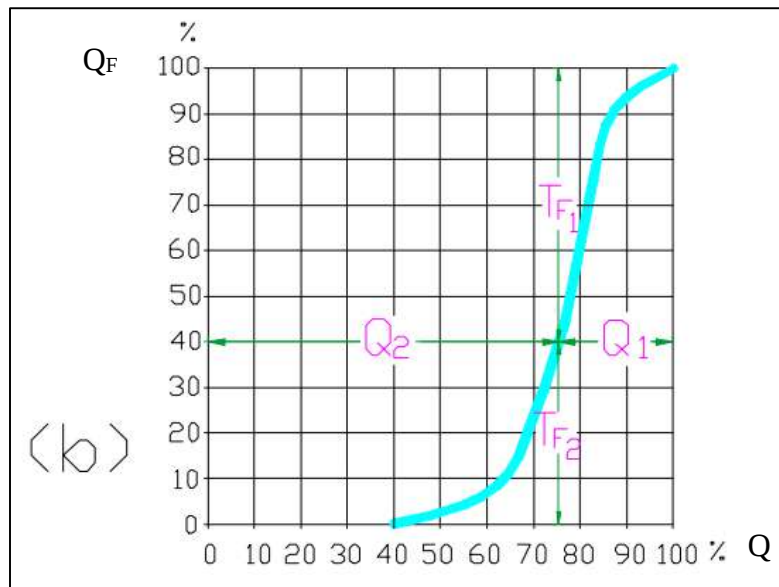


Ilustración 2-11 Diagrama realizado por Bulle después de realizar los experimentos en los cuales hizo modificaciones en la relación de bocatoma

Fuente: (Díaz, 2015)

Gracias a las experiencias realizadas y en función de los resultados obtenidos, Bulle obtuvo una serie de conclusiones:

- En una derivación, el flujo de la capa inferior más cercana al lecho se dirige preferentemente hacia el ramal lateral.

- ii. La tendencia del material sólido de fondo por dirigirse hacia la derivación se explica como una consecuencia de la pendiente transversal que se crea en la bifurcación y por las bajas velocidades que tiene el flujo en esa zona. Esta tendencia es mayor al aumentar el caudal derivador, así como al aumentar el ancho de la bifurcación. También hace falta destacar que a medida que aumenta el caudal circulante, la cantidad de material sólido que se dirige hacia la derivación disminuye.
- iii. En las zonas próximas a la bifurcación se forman flujos helicoidales y se generan zonas de acumulación y erosión de material. En la entrada de la rama lateral se genera una zona de recirculación cuyas dimensiones varían en función del ángulo de derivación θ y de la morfología de la derivación (arista redondeada). Dicha zona reduce la sección del canal y es la causante de la formación de la pendiente transversal en la zona de derivación.
- iv. La captación de sólidos se ve modificada por los ángulos de derivación, produciéndose un mayor desequilibrio cuando los ángulos son de 90° y 120° respectivamente. Sin embargo, las variaciones no son muy significativas, manteniéndose dentro del rango de valores bastante reducido.
- v. La modificación de la morfología de aristas redondeadas de la bifurcación no provoca diferencias significativas en relación a la distribución de sedimentos. Se destaca que la arista redondeada provoca la reducción del vórtice que se genera en la entrada de la bifurcación, provocando una disminución de caudal sólido captado.

Luego de estas investigaciones, primero de Thoma y luego de Bulle, queda perfectamente claro que en una bifurcación los gastos líquidos y sólidos se distribuyen en proporciones diferentes. En las capas inferiores las velocidades son muy pequeñas y, por lo tanto, son éstas las que realizan cambios de dirección. Por el contrario, las capas superiores de mayor velocidad son las que siguen de largo. Se denominará efecto Bulle a la tendencia que tienen en una bifurcación las capas inferiores del escurrimiento, cargadas de sedimentos, de dirigirse preferentemente hacia la bifurcación. (Díaz, 2015)

2.5.3 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a 30° realizadas por Vogel

Hacia 1934 H. D Vogel realizó investigaciones sobre el comportamiento de las bifurcaciones en el Waterways Experiment Station, de Vicksburg, Estados Unidos. La diferencia fundamental con respecto a los anteriores estudios radica en que Vogel consideró además del transporte de fondo el transporte en suspensión. Para ello utilizó un canal rectangular de 0,61 m de ancho con una velocidad media de 0,30 m/s.

Realizó los primeros experimentos con un ángulo de derivación de 30° , repartición igual de caudales y arena fina, obteniendo que el 76% del material sólido se dirigió hacia la bifurcación, mientras que para un material muy fino y con condiciones iguales a las anteriores, ingresaba el 55% de los sólidos.

Asimismo, realizó también otra serie de experimentos en una canaleta de sección circular de 0,61 m de radio en el canal principal y 0,35 m de radio en el canal derivador, con un ángulo de derivación de 30° . Los resultados que obtuvo fueron:

- i. Para arenas gruesas: cuando la relación de bocatoma es 0,36, el coeficiente de captación sólida es de 0,65.
- ii. Para arena fina: cuando la relación de bocatoma es 0,5, el coeficiente de captación sólida es de 0,52.

A partir de los estudios de Vogel (1934) se confirma una vez más que el gasto líquido y el gasto sólido no se reparten en la misma proporción. Sin embargo, si el gasto sólido se

encuentra constituido parcialmente por material en suspensión, el coeficiente de captación sólida tiende a ser igual a la relación de bocatoma. De acá se concluye que en una bifurcación un material sólido muy fino transportado íntegramente en suspensión tiende a distribuirse en la misma proporción que los caudales líquidos. (Díaz, 2015)

2.5.4 Investigaciones de Dancy

Dancy realizó en 1927, una serie de estudios experimentales sobre bifurcaciones con el objeto de estudiar la repartición del gasto sólido según la modalidad del transporte (de fondo o de suspensión). El modelo tenía las siguientes dimensiones tanto para el canal principal como de derivación de sección rectangular de 0,15 m de ancho y 0,125 m de altura. Las conclusiones experimentales de Dancy (1927) se representan gráficamente en la Ilustración 2-12 en la que se muestra la vinculación entre el coeficiente de captación sólida y la relación de bocatoma, en función del parámetro adimensional α y para un ángulo de bifurcación de 30° . Para preparar ese gráfico, a partir de las mediciones de Dancy, ha sido necesario calcular en cada caso las velocidades de caída de las partículas W y la velocidad de corte V_* y determinar así el parámetro α , expresado en la Ecuación 2-10.

$$\alpha = \frac{2.5 W}{V_*} \quad (2-10)$$

En la Ilustración 2-12 se observa que para valores altos de α , que corresponden a grandes concentraciones de sólidos en las zonas cercanas a fondo, la distribución de sólidos tiende a comportarse según el efecto Bulle (mayor parte de sedimentos se dirige hacia la derivación); en cambio, para valores pequeños de α , que corresponden a una distribución más o menos uniforme del material sólido en suspensión en toda la sección transversal, el coeficiente de captación sólida tiende a ser igual a la relación de bocatoma (Rocha , 2005).

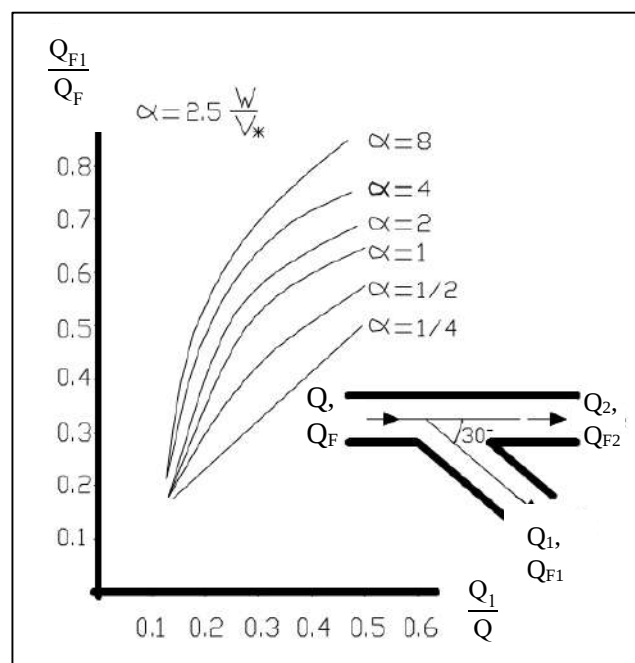


Ilustración 2-12 Resultado del procesamiento de las investigaciones de Dancy
Fuente: (Rocha , 2005)

2.5.5 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a diferentes ángulos realizados por Cristiani y de Benini

(Rocha , 2005) (Cristiani, 1955) El Ing. Mario Cristiani, de Verona, Italia, realizó en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Padua una serie de investigaciones sobre bifurcaciones, quedando inconclusas por su muerte. Sin embargo, sus resultados fueron presentados por Benini, del mismo laboratorio, ampliados por sus experiencias hacia 1955.

Las experiencias de Cristiani se realizaron en un canal de sección trapecial de 0,28 m de ancho en la base y taludes 1:4, del cual se deriva un canal trapecial de 0,1 m y 0,26 m de ancho en la base y taludes 1:4, para la primera y segunda serie de ensayos respectivamente. En todas las pruebas se mantuvo un ángulo de derivación de $26^{\circ}45'$. (Benini, 1955) Benini, a partir de las citadas investigaciones de Cristiani, planteó las siguientes conclusiones

- i. En todos los ensayos el coeficiente de captación sólida aumenta rápidamente con la relación de bocatoma.
- ii. No se nota influencia de la velocidad; sin embargo, esta afirmación solo puede mantenerse en tanto que la velocidad no sea tan grande que ponga en suspensión parcial o totalmente el material sólido.
- iii. Al aumentar el diámetro de la arena, el coeficiente de captación sólida tiende a disminuir.

Las investigaciones propias de Benini siguieron la línea general trazada por Cristiani, examinando el comportamiento de las bifurcaciones en un canal de sección rectangular de 0,30 m de ancho y 0,20 m de profundidad, para tres ángulos de 30° , 60° y 90° , dos tirantes de 0,1 m y 0,17 m y dos velocidades medias en el canal principal 0,47 m/s y 0,73 m/s. Se usó material sólido de una sola granulometría. En todos los ensayos los sólidos se desplazaban como material de fondo (arrastre).

Las conclusiones del estudio de Benini fueron:

- i. El ángulo de derivación “ θ ” no tiene una influencia bien determinada sobre el coeficiente de captación sólida.
- ii. El ancho de la derivación no produce variaciones destacables sobre el coeficiente de captación sólida
- iii. El peso específico y el diámetro de las partículas tiene poca relevancia sobre el coeficiente de captación sólida.
- iv. Al aumentar el tirante disminuye el coeficiente de captación sólida.

2.5.6 Investigaciones de bocatomas con bifurcación a 90° realizadas por Shiu Wai Law

Law (1965) estudió el rendimiento global de un flujo divisorio utilizando un modelo en el que se fija una ramificación en ángulo recto a un canal recto, dando detalles de las condiciones de flujo tanto en la unión como en la derivación.

Describe los comportamientos observables en el flujo de división, ya sea “flujos inversos” o “regiones de recirculación”, y saltos hidráulicos. Para estudiar el problema de la división de flujos en un canal abierto, Law utilizó canales horizontales con secciones rectangulares, el principal tenía 12 pies de largo y el derivador 6 pies de largo, ambos con un ancho de 8 pulgadas. Las paredes fueron construidas de placas de plástico acrílico transparente de $\frac{1}{2}$ pulgada para facilitar la observación visual (Ilustración 2-13).

El resultado mostrado fue que, en el canal principal el flujo es siempre tranquilo y la superficie generalmente suave. En esta zona no se observan saltos hidráulicos o flujos inversos. En cambio, en el canal derivador se observaron remolinos o zonas de recirculación en la esquina aguas arriba de la unión debido a la separación del flujo. La extensión de esta región depende del estado de la entrada, del porcentaje de la descarga total en la rama y de su profundidad.

Para relaciones de descarga grandes no se observó flujo inverso (aunque se pudo observar un flujo inverso en el canal de salida principal), la superficie en este canal es relativamente lisa. Aquí existe una zona de contracción que se observa cuando el flujo comienza a aproximarse al canal de derivación y se separa del canal principal (Ilustración 2-14).

Según Law la zona de contracción afectada por un coeficiente de contracción “c” está relacionada al tirante de flujo, número de Froude, descarga del flujo, y el ángulo de intersección “ θ ” entre el canal principal y derivador. A continuación, se expresa la Ecuación 2-11 dada por Chung Cheih para hallar el coeficiente de contracción:

$$c = \frac{2F^2 \left(\frac{Q_1}{Q}\right)^2}{\left(\frac{d_1}{d}\right) \left[1 + 2F^2 \left(\frac{Q_1}{Q}\right) \frac{\cos\theta}{n} \right] - \left(\frac{d_1}{d}\right)^3} \quad (2-11)$$

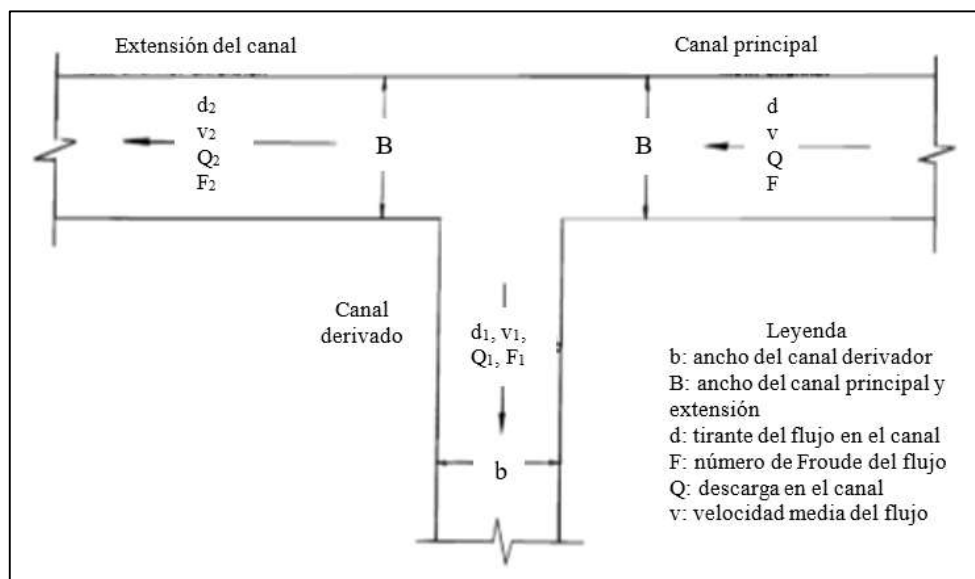


Ilustración 2-13 Representación del canal utilizado por Law
Fuente: (Law, 1965)

Los resultados que obtuvo fueron:

- Cuando el flujo es profundo, o el número de Froude en el canal principal es menor $F < 0,5$ no existe flujo inverso extenso en el canal derivador, por el contrario, cuando $F > 0,5$ las regiones de extensión del flujo varían.
- A medida que las relaciones de descarga se hacen más pequeñas, la región de recirculación en el canal de derivación se extiende tanto a lo largo como a lo ancho del canal. (ver Ilustración 2-15)

- Generalmente la región de recirculación termina aguas abajo a una distancia de aproximadamente tres veces el ancho del canal.
- Cuando más del 50% de la descarga total pasa por la extensión del canal principal se observa la formación de ondas estacionarias, estas son manifestaciones de saltos hidráulicos que se forman después de que el flujo se vuelva supercrítico en la unión. Para valores pequeños del número de Froude (F) no se prevén saltos hidráulicos ($F < 0,3$).

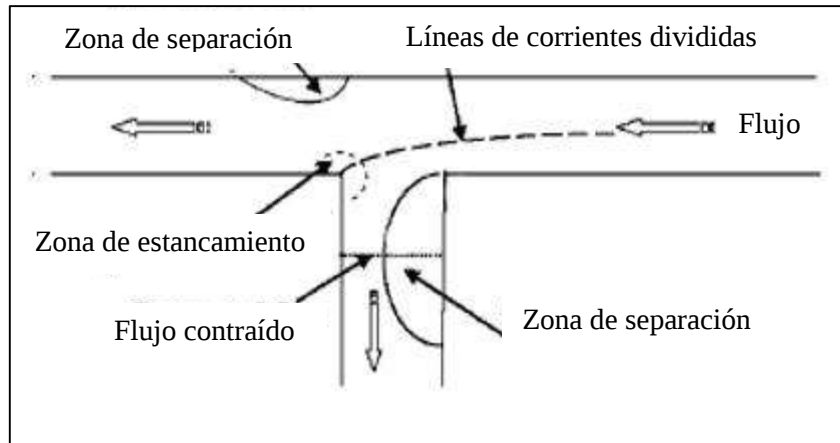


Ilustración 2-14 Características de la división del flujo en canales abiertos
Fuente: (Law, 1965)

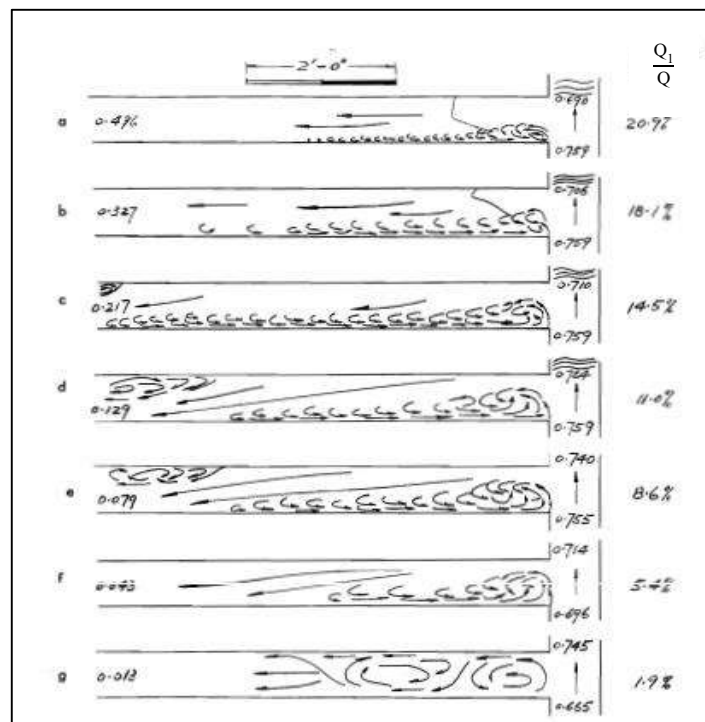


Ilustración 2-15 Regiones de recirculación en la bifurcación, mostrando las direcciones de flujo
Fuente: (Law, 1965)

Law afirma que, cuando la relación $Q_1/Q > 0,6$, la zona de recirculación en la bifurcación no sobrepasa la distancia de cuatro veces el ancho del canal.

Capítulo 3

Modelos físicos y numéricos

El desarrollo de la modelación física, en particular de la modelación fluvial se reporta desde hace 120 años. Sin embargo, hace apenas treinta años se dispone de la posibilidad real de aplicación de la modelación numérica debido a un importante renacimiento del análisis numérico, gracias al vertiginoso desarrollo de la técnica de los computadores.

Dentro del ámbito de aplicación de los modelos físicos, se debe considerar que el ingeniero busca a través de ellos lograr una representación simplificada, geométricamente similar, de un fenómeno de flujo del agua. En ellos no es imprescindible el uso del medio fluido agua, sino que también pueden utilizarse modelos de medio fluido aire o modelos analógicos, donde se aplica la analogía entre las leyes de la mecánica de los fluidos y otros campos de la física.

Desde esta óptica, es entonces importante reconocer como modelo numérico la posibilidad real de lograr los criterios de solución de un determinado problema hidráulico por medio del conocimiento y la formulación de las ecuaciones que describen el fenómeno, de su solución numérica sobre la base de un adecuado algoritmo teórico y de la correcta interpretación de los resultados. La diferencia fundamental entre los dos tipos de modelación hidráulica radica justamente en esta exigencia sobre el grado de conocimiento o experiencia alrededor del fenómeno. En el caso de la modelación física es suficiente la identificación de fuerzas actuantes más relevantes y de aquí la formulación de los parámetros y del criterio de similitud dinámica restringida (Castro & Hidalgo , 2003).

3.1. Modelos físicos

(Herrera, 2004) Los modelos físicos se utilizan normalmente como una herramienta técnica de apoyo al diseño de estructuras hidráulicas y en general a la ingeniería hidráulica, cuando estos involucran fenómenos complejos o desconocidos para los cuales no hay una teoría.

3.1.1 Introducción

Es la simulación física de un fenómeno hidráulico, que ocurre en relación con una obra de ingeniería, en un sistema semejante simplificado que permite observarlo y controlarlo con facilidad, además confirmar la validez del diseño de la obra, optimizarla o tomar nota de los efectos colaterales, que deberán ser considerados durante la operación de la misma.

Según las características propias de los modelos se pueden clasificar en:

a) Clasificación respecto de la semejanza geométrica con el prototipo

- Modelos geoméricamente semejantes: son aquellos en los que se conserva la semejanza de todas las variables geométricas. Existe un único factor de reducción o ampliación, llamado escala, de todas las magnitudes geométricas y las que se derivan de ellas, además de la igualdad de ángulos correspondientes entre el modelo y el prototipo. Dentro de estos tenemos: modelos de desarenadores, desgravadores, bocatomas, canales, etc.
- Modelos geoméricamente distorsionados: se conserva la semejanza con el prototipo, pero los factores a usar de reducción o ampliación son distintos para diferentes dimensiones del mismo. Es frecuente que las dimensiones horizontales tengan una escala o factor y las dimensiones verticales, otras. El uso de distorsiones resulta, muchas veces, necesario cuando el factor único produce una reducción demasiado grande en las dimensiones verticales, lo cual originaría efectos significativos en fuerzas que en el modelo son despreciables o inexistentes en el prototipo. Este tipo de modelos es usual en estructuras marítimas.

b) Clasificación respecto de la movilidad y deformabilidad del contorno:

- Modelos de contorno fijo: hay casos en que la deformabilidad del contorno no es relevante al fenómeno estricto, por tanto, puede representarse simplificadaamente en el modelo como si fuera fijo o indeformable. Los modelos de este tipo serían, por ejemplo, sistemas de presión, canales revestidos o cursos naturales donde el fondo no experimente muchos cambios.
- Modelos de contorno móvil: existen situaciones en que el modelo debe representar el contorno móvil en una forma fiel y confiable, ya que los fenómenos que ocurren, caso del escurrimiento vienen determinados por la movilidad y deformabilidad de la sección. Estos casos son frecuentes sobretodo en obras hidráulicas y de mecánica fluvial. El modelo puede tener sólo lecho móvil y las riberas o bordes fijos, o bien tener el perímetro móvil o lecho móvil por zonas.

3.2. Modelación numérica

Las tecnologías de softwares combinado con la capacidad de las computadoras hoy en día están haciendo el análisis detallado más rutinario en casi todas las ramas de la ingeniería. Estos modelos son útiles en los estudios donde los detalles locales de la distribución de velocidad y profundidad son importantes. Los ejemplos incluyen diseño de puentes, encauzamientos, obras de derivación, entre otros.

3.2.1 Modelos de profundidad promedio

(Elera, 2005) Hay diversos dominios comerciales y públicos de modelos 2D disponibles. Ellos están basados en una variedad de esquemas numéricos y ofrecen un rango gráfico pre y post procesador de módulos. Los fundamentos físicos son más comunes, sin embargo, todos los modelos 2D resuelven la ecuación básica de conservación de masa y los dos componentes (horizontales) de conservación de velocidad adquirida (impulso). Las salidas del modelo son dos componentes (horizontales) de velocidad y profundidad a cada punto o nodo. Las distribuciones de velocidad en la vertical son asumidas para ser uniformes y las distribuciones de presiones son asumidas para ser hidrostáticas. Los diseños del modelo 2D se basaron en diferencias finitas, volúmenes finitos, y también del método de elementos finitos. Cada método tiene sus ventajas y desventajas. Al riesgo de groseramente afirmar que

el método de volúmenes finitos ofrece la mejor estabilidad y eficacia mientras que el método de elementos finitos ofrecen la mejor flexibilidad geométrica.

3.2.2 Recopilación de datos

(Elera, 2005) Un modelo sólo es tan bueno como la entrada de los datos. Como en los datos de entrada, los modelos hidrodinámicos 2D requieren la topografía del fondo del cauce, rugosidad, así como condiciones de borde, y las condiciones iniciales del flujo. Además, debe diseñarse alguna clase de malla discreta debe para capturar las variaciones del flujo.

Obtener una representación exacta de la topografía del fondo es probablemente lo más crítico, difícil, y el tiempo que toma los ejercicios de modelación 2D es considerable. Los simples estudios de secciones transversales generalmente son inadecuados. Combinando GPS y los sistemas sonoros de profundidad para los ríos grandes y los estudios distribuidos de estación total para los ríos más pequeños tienen que ser buscados para ser efectivos. En cualquier evento, debe esperarse a gastar mínimo una semana para la colección de datos de campo para el estudio. Los datos del campo deben procesarse y deben verificarse a través de un modelo de calidad digital del terreno antes de usarse como la entrada para los modelos 2D.

La rugosidad del fondo, en la forma de una altura de rugosidad o del valor “n” de Manning, es un parámetro de entrada menos crítico. Comparado con modelos tradicionales unidimensionales donde muchos efectos bidimensionales son resumidos en el factor de resistencia, el término de la resistencia bidimensional sólo responde al cortante directo del fondo. Las observaciones del material del fondo y del tamaño de las formas del fondo (dunas, bancos de arena, etc.) son normalmente suficientes para establecer estimaciones de rugosidad razonables. Si los valores de rugosidad requeridos son poco realistas, es probable que haya problemas con la topografía del fondo.

Las condiciones del borde normalmente toman la forma de una descarga total en las secciones de entrada y en las secciones de salida las elevaciones de superficie de agua son fijas. Colocando los bordes del flujo a alguna distancia de las áreas de interés es importante para minimizar el efecto de incertidumbre de las condiciones de borde. Las condiciones iniciales son importantes, incluso para el flujo permanente, debido a que normalmente utilizan como punto de partida el procedimiento de la solución iterativa. Una buena estimación reducirá significativamente el tiempo de ejecución total y puede hacerse la diferencia entre una ejecución permanente y una no permanente.

El diseño de la malla o cuadrícula es el arte de la modelación 2D. El número total de grados de libertad (el número de nodos, tres incógnitas por nodo) está limitado por la capacidad de la computadora y el tiempo de ejecución. El desafío es distribuir estos nodos de tal manera que la solución más exacta se obtenga para un propósito particular. Estrechando los nodos en las regiones de alto interés o en regiones de variación de flujo, los cambios graduales en el espaciamiento del nodo, y regularidad de elemento o forma de la celda son consideraciones importantes.

3.2.3 Modelación numérica en el ámbito de la hidráulica fluvial en la actualidad

(Balairón, 2004) La modelación numérica del flujo de agua es una técnica para determinar las variables hidráulicas (velocidad, caudal, etc.) a partir de la resolución por métodos numéricos de las ecuaciones de comportamiento. La modelación numérica es siempre una aproximación a la realidad, que será tanto mejor cuanto más se adapten las

condiciones de partida y el esquema numérico para sus resoluciones al fenómeno real que se está estudiando.

En la práctica real, los modelos matemáticos más utilizados en la actualidad en el ámbito de la hidráulica fluvial son los de 1D y 2D de flujo superficial, utilizando las clásicas ecuaciones de Saint Venant. La consideración del transporte de sedimentos está en un grado de maduración y desarrollo menor que la modelación hidrodinámica, en muchos modelos matemáticos de ríos se calcula por separado el transporte de sedimentos transportados como carga del lecho y como carga en suspensión para luego sumar ambos efectos y con la carga total analizar la evolución morfológica del cauce. Con todo lo anteriormente dicho, existe una gran diversidad de herramientas disponibles para este tipo de análisis. En primer lugar, hay que diferenciar entre los modelos matemáticos comerciales y los desarrollados en centros de investigación públicos, básicamente en entornos universitarios. Los modelos comerciales tienen la ventaja de presentarse en su mayoría con interfaces relativamente sencillas de manejar y visualizar, aunque pueden introducir simplificaciones en el tratamiento de las ecuaciones constitutivas buscando la mayor generalidad posible en su uso y son, en consecuencia, difícilmente adaptables a situaciones específicas, además tienen un alto costo económico variable. Los modelos matemáticos desarrollados en centros de investigación públicos suelen ser de descarga gratuita, y suelen ofrecer un buen servicio de mantenimiento y asesoramiento. Entre los modelos matemáticos desarrollados en centros de investigación pública se pueden considerar los siguientes:

- **HEC**, desarrollado por el US Army Corps of Engineers de los Estados Unidos de América, es seguramente el modelo matemático unidimensional más conocido y aplicado a la hidráulica fluvial. Es un software de descarga libre (desde la dirección <http://www.hec.usace.army.mil/>) cuyas primeras versiones datan del año 1964 y que en la actualidad tienen módulos para el cálculo en régimen variable y con transporte de sedimentos.
- **MIKE**, este modelo, desarrollado en Dinamarca por el Danish Hydraulic Institute DHI constituye un entorno integral para la modelización hidrodinámica en una (MIKE 11) y en dos (MIKE 21) dimensiones. Después de los HEC, es uno de los modelos más conocidos y utilizados en el mundo para la modelación hidrodinámica.
- **TELEMAC**, desarrollado inicialmente en Francia por Electricité de France EDF este modelo en elementos finitos tiene módulos para la simulación de flujos en 1D, 2D y 3D, y la posibilidad de considerar el transporte de sedimentos.
- **DELFT 3D**, este modelo fue desarrollado por DELTARES y permite la simulación de flujos en 2D y 3D.
- **INFOWORKS**, es el modelo matemático de HR Wallingford desarrollado en la época en la que esta organización era un centro de investigación público. En la actualidad, el modelo está completamente integrado en GIS y tiene módulos para el modelado de ríos (InfoWorks RS) y también para otros ámbitos de la ingeniería del agua como abastecimientos (InfoWorks WS), saneamientos (InfoWorks CS), así como módulos costeros y para la gestión de los recursos hídricos. En España la distribución la realiza la empresa Sistemas de Ingeniería Civil y Ambiental.

El mayor avance en el último año al respecto de los modelos matemáticos comerciales antes referidos es el hecho de que en 2011 se haya optado por ofrecer algunos de ellos en código abierto (open source) lo que abre una nueva forma de entender la modelación numérica. Así, por ejemplo, en el entorno del modelo TELEMAC que fue inicialmente desarrollado por EDF en Francia, se ha constituido un consorcio integrado por diversos

centros de investigación franceses (el propio EDF, el laboratorio de puertos CETMEF y la consultora Sogreah-Artelia), ingleses (HR Wallingford y el Laboratorio de Daresbury) y alemanes (el centro público BAW) que han puesto a disposición gratuita de los usuarios el modelo TELEMAC junto con otro modelo hidrodinámico (el MASCARET, desarrollado hace 20 años por EDF y CETMEF) en sus versiones 2D y 3D, junto con los módulos para el transporte de sedimentos (SISYPHE), para la calidad de las aguas (DELWAQ) y otros en el ámbito portuario y costero (TOMAWAC y ARTEMIS). Esta iniciativa se complementa con la creación de un potente club de usuarios que celebra seminarios, reuniones científicas y canaliza las inquietudes y sugerencias de usuarios de estos modelos. A todo ellos se puede acceder gratuitamente luego de crear una cuenta desde el sitio web <http://www.opentelemac.org/>.

3.2.4 Telemac -2D

(Lang, 2014) A continuación, se puntualizan algunas características del programa Telemac-2D basado en el manual de dicho programa.

3.2.4.1 Presentación del software TELEMAC-2D

El código TELEMAC-2D resuelve las ecuaciones de flujo superficial libre de profundidad promedio, tal como se deriva por primera vez por Barré de Saint-Venant en 1871. Los principales resultados en cada nodo de la malla computacional son la profundidad del agua y los componentes de la velocidad de profundidad promedio. La principal aplicación de TELEMAC-2D se encuentra en la superficie libre marítima o la hidráulica fluvial. El programa es capaz de tener en cuenta los siguientes fenómenos:

- Propagación de ondas largas, incluidos los efectos no lineales,
- Fricción en el fondo,
- Los efectos de la fuerza Coriolis,
- Los efectos de los fenómenos meteorológicos como la presión atmosférica, la lluvia o evaporación y el viento,
- Turbulencia,
- Flujos supercríticos y subcríticos,
- Influencia de la temperatura y gradientes de salinidad horizontales sobre la densidad,
- Coordenadas cartesianas o esféricas de grandes dominios,
- Zonas secas en el campo computacional: planos de marea y llanuras de inundación,
- Captación y difusión de un trazador por las corrientes, incluyendo términos de creación y desintegración,
- Seguimiento de partículas y el cálculo de las derivadas de Lagrange,
- El tratamiento de singularidades: presas, diques, alcantarillas, etc.,
- Saltos fuera del dique,
- Fuerzas de arrastre creadas por estructuras verticales,
- Fenómenos de porosidad,
- Corrientes inducidas por las olas (por vínculos transversales con los módulos de ARTEMIS y TOMAWAC),
- Acoplamiento con el transporte de sedimentos,
- Acoplamiento con herramientas de calidad del agua.

El software tiene muchos campos de aplicación. En el ámbito marítimo cabe destacar el dimensionamiento de las estructuras portuarias, el estudio de los efectos de la construcción de diques sumergibles o de dragado, el impacto de los residuos descargados de un emisario costero o el estudio de penachos térmicos. En las aplicaciones fluviales se

pueden mencionar también los estudios referentes al impacto de las obras de construcción (puentes, vertederos, tubos), roturas de presas, inundaciones o el transporte de trazadores con descomposición o sin descomposición. TELEMAC-2D también se ha utilizado para una serie de aplicaciones especiales, como el estallido de embalses industriales, avalanchas que caen en un embalse, etc.

TELEMAC-2D fue desarrollado inicialmente por el Laboratorio Nacional de Hidráulica y Medio Ambiente (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement - LNHE) de la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Junta de Electricidad de Francia (EDF-R & D), y actualmente es gestionado por un consorcio de otros consultores e institutos de investigación. Al igual que las versiones anteriores del programa, la versión 7.0 cumple con los procedimientos de Aseguramiento de Calidad de EDFR & D para los programas científicos y técnicos. Esto establece normas para desarrollar y verificar la calidad del producto en todas las etapas. En particular, un programa cubierto por los procedimientos de Garantía de Calidad va acompañado de un Documento de Validación que describe el campo de uso del software y un conjunto de casos de prueba. Este documento se puede utilizar para determinar el rendimiento y las limitaciones del software y definir su campo de aplicación. Los casos de prueba también se utilizan para desarrollar el software y se comprueban cada vez que se producen nuevas versiones.

3.2.4.2 Aspectos teóricos

El código TELEMAC-2D resuelve simultáneamente las siguientes cuatro Ecuaciones hidrodinámicas 3-3, 3-4, 3-5 y 3-6.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(h) + h \operatorname{div}(\vec{u}) = S_h \quad \text{Continuidad} \quad (3-3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\nabla} u) \quad \text{Momento a lo largo de X} \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad \text{Momento a lo largo de Y} \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(T) = +S_T + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_T \vec{\nabla} T) \quad \text{Conservación de indicadores} \quad (3-6)$$

Donde:

h	(m)	profundidad del agua
u, v	(m/s)	componentes de velocidad
T	(g/l o °C)	indicador pasivo (no flotante)
g	(m/s ²)	aceleración gravitacional
v _t , v _T	(m ² /s)	coeficiente de momento e indicadores de difusión
Z	(m)	elevación de superficie libre
t	(s)	tiempo
x, y	(m)	coordenadas espaciales horizontales
S _h	(m/s)	fuelle o sumidero del fluido
S _x , S _y	(m/s ²)	fuelle o sumidero en ecuaciones dinámicas
S _T	(g/l/s)	fuelle o sumidero del indicador

h , u , v y T son las incógnitas.

Las ecuaciones están en coordenadas cartesianas. También se pueden procesar usando coordenadas esféricas.

S_x y S_y (m/s^2) son términos de origen que representan el viento, la fuerza de Coriolis, la fricción de fondo, una fuente o un sumidero de momento dentro del dominio. Los diferentes términos de estas ecuaciones se procesan en una o más etapas (en el caso de la advección por el método de las características):

- Advección de h , u , v y T ,
- Términos de propagación, difusión y fuente de las ecuaciones dinámicas,
- Difusión y términos fuente de la ecuación del transporte trazador.

Cualquiera de estos pasos se puede omitir, y en este caso se resuelven diferentes ecuaciones. Además, cada una de las variables h , u , v y T puede ser adveccionada por separado. De esta manera, es posible, por ejemplo, resolver una de advección de un indicador y ecuación de difusión usando un campo de velocidad de advección fijo.

La viscosidad turbulenta puede ser dada por el usuario o determinada por un modelo que simula el transporte de las cantidades turbulentas k (energía cinética turbulenta) y Epsilon (disipación turbulenta), para las cuales las Ecuaciones 3-7 y 3-8 son las siguientes:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(k) = \frac{1}{h} \text{div} \left(h \frac{v_t}{\sigma_k} \vec{\nabla} k \right) + P - \varepsilon + P_{kv} \quad (3-7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(\varepsilon) = \frac{1}{h} \text{div} \left(h \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \vec{\nabla} \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P - c_{2\varepsilon} \varepsilon) + P_{\varepsilon v} \quad (3-8)$$

Los términos del lado derecho de estas ecuaciones representan la producción y destrucción de las cantidades turbulentas (energía y disipación).

3.2.5 Sisyphé

(Tassi, 2014) A continuación, se detallarán algunas características del programa Sisyphé basado en el manual de dicho programa.

3.2.5.1 Introducción

Sisyphé es un modelo morfodinámico que transporta sedimentos, forma parte del elemento de hidrodinámica finita y del sistema de volúmenes finitos de Telemac Mascaret. Se calculan las velocidades de transporte de sedimentos, divididas en carga de fondo y carga suspendida en cada nodo en función del flujo (velocidad, profundidad del agua, altura de la ola, etc.) y sedimento (diámetro del grano, densidad relativa, velocidad de sedimentación, etc.).

La carga de fondo se calcula utilizando una fórmula clásica de transporte de sedimentos, disponible en la literatura. La carga suspendida está expresada por una ecuación de transporte adicional para la concentración de sedimento suspendido promediado en profundidad. La ecuación de evolución de fondo (ecuación de Exner) se puede resolver utilizando un elemento finito o una formulación de volumen finito.

Sisyphe es aplicable a sedimentos no cohesivos (uniformes o clasificados), sedimentos cohesivos, así como mezclas arena-lodo. La composición de sedimentos está representada por un número finito de clases, cada una caracterizada por su diámetro medio, densidad de grano y velocidad de sedimentación. Los procesos de transporte de sedimentos también pueden incluir el efecto de la pendiente del fondo, fondos rígidos, corrientes secundarias y el fallo de la pendiente. Para los sedimentos cohesivos, el efecto de la consolidación del fondo puede ser explicado.

Sisyphe se puede aplicar a una gran variedad de condiciones de flujo hidrodinámico incluyendo ríos, estuarios y aplicaciones costeras. Para después, los efectos de las ondas superpuestas a una corriente de marea pueden incluirse. Los esfuerzos de corte de fondo, descompuesto en fricción superficial y la forma de arrastre, pueden ser calculado ya sea imponiendo un coeficiente de fricción (Strickler, Nikuradse, Manning, Ch'ezzy o definido por el usuario) o por un predictor fondo-rugosidad.

Las variables hidrodinámicas notables pueden ser impuestas en el modelo (método de encadenamiento) o calculadas por un cálculo hidrodinámico (acoplamiento interno) utilizando uno de los módulos hidrodinámicos del sistema Telemac (módulos Telemac-2d, Telemac-3d o Tomawac) o un modelo hidrodinámico externo.

3.2.5.2 Ecuación de evolución de fondo

En el Capítulo 1, apartado 1.4 y 1.5 se describe el tema de carga de fondo y carga en suspensión.

▪ Carga de fondo

Para calcular la evolución del fondo, Sisyphe resuelve la Ecuación 3-9 de Exner

$$(1-n) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \nabla \cdot Q_b = 0 \quad (3-9)$$

Donde n es el fondo poroso no cohesivo, Z_f elevación de fondo y Q_b ($m^3/s/m$) transporte de volumen sólido (carga de fondo) por unidad de ancho.

La Ecuación 3-9 establece que la variación del espesor del fondo de sedimento puede derivarse de un simple balance de masa y es válida para condiciones de equilibrio

▪ Evolución de fondo por suspensión

Al considerar sólo transporte de sedimentos por carga suspendida, la evolución de fondo es función del flujo de sedimento vertical en la interfase entre la carga de fondo y la carga suspendida, dada por la Ecuación 3-10

$$(1-n) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + (E - D)_Z = Z_{ref} = 0 \quad (3-10)$$

Donde Z_f es la elevación de fondo, E flujo de arrastre de sedimentos hacia arriba, D flujo de deposición de sedimentos hacia abajo, Z_{ref} es la interfase entre la carga de fondo y la carga suspendida, y n la porosidad de fondo.

Una vez que las variables de flujo se determinan resolviendo las ecuaciones de hidrodinámica y transporte en sedimento suspendido, los cambios en el nivel del fondo se calculan a partir de la Ecuación 3-10 para la celda que coincide con el fondo, calculando en cada paso de tiempo el flujo neto de sedimento ($E - D$) en la interfaz de carga suspendida ($z = Z_{\text{ref}}$).

3.3. Modelos numéricos vs Modelos físicos

(Castro & Hidalgo, 2003) La diferencia fundamental entre los dos tipos de modelación hidráulica radica justamente en la exigencia sobre el nivel de conocimiento o experiencia alrededor del fenómeno. En el caso de la modelación física es suficiente la identificación de las fuerzas actuantes más relevantes y de aquí la formulación de los parámetros y del criterio de similitud dinámica.

Existen áreas de la ciencia de la ingeniería civil en donde el desarrollo de la modelación numérica es efectivamente viable y muy importante. Tal es el caso de los problemas alrededor del flujo a presión, de la estimación del perfil de flujo en canales y colectores con superficie libre, en aprovechamiento de aguas subterráneas, entre otros más relacionados con el saneamiento ambiental.

El uso alternativo de la modelación numérica tiene mucho en común con la utilización de modelos físicos eficientes. En la siguiente Tabla 3-1 se resume el proceso de desarrollo en la solución de un problema, con la ayuda de la modelación hidráulica, sea esta física o numérica, lo que permite resaltar las diferencias fundamentales entre los dos tipos.

Tabla 3-1 Diferencias entre los modelos físicos y numéricos

	Modelo físico	Modelo numérico
1	Definición del problema. Identificación de las fuerzas actuantes esenciales	
	Definición de los objetivos del tratamiento experimental	
2	Definición de los criterios de similitud dinámica total y concreta	Definición del sistema de ecuaciones
3	Formulación de las condiciones de borde o de contorno	
4	Construcción del modelo	Desarrollo del esquema para la solución numérica
5	Calibración del modelo utilizando	
6	Mediciones → Solución	Cálculos → Solución
7	Optimización de la solución conforme a los objetivos del modelo	
	Variantes constructivas en el modelo	Variantes en los datos de entrada / iniciales
8	Cálculo para las condiciones reales del prototipo y comprobación de los resultados	

Fuente: (Castro & Hidalgo, 2003)

La decisión sobre el tipo de modelación más adecuada, debe considerar los siguientes criterios respecto de la calidad de la metodología para lograr la solución: simplicidad, flexibilidad, claridad en las observaciones, exactitud requerida, confiabilidad de los resultados (posibilidad de comprobación), restricciones físicas, de tiempo y de costo, viabilidad para pronóstico y extrapolaciones, posibilidad real de que los resultados sean útiles. El modelo seleccionado debe ser simple, adecuadamente aproximado y económico. Mientras el modelo numérico es normalmente flexible para su análisis, el modelo físico es muy claro en la presentación del fenómeno.

La principal limitación del modelo físico consiste en el limitado número de variables influyentes que encuentran su representación adecuada dentro del criterio de similitud seleccionado. Por el contrario, en el modelo numérico la principal restricción constituye el carácter particular del sistema cerrado de ecuaciones que deben ser resueltos, ya que para la gran mayoría de fenómenos tridimensionales no se ha podido encontrar soluciones analíticas generales.

En los últimos años es muy común el uso de los dos tipos de modelos en forma complementaria para conseguir los criterios de diseño hidráulico que conduzcan a la solución del problema. Se trata de la modelación denominada híbrida, que exige una interacción entre un modelo físico y otro numérico, en donde los resultados del uno sirven de sustento para la operación del otro.

Capítulo 4

Diseño del modelo numérico de una bocatoma con bifurcación a 90°

En este capítulo se determinan las dimensiones de la bocatoma y su bifurcación a modelar en el programa **Telemac-2D**, tomando en cuenta para dichas medidas ejemplos de relaciones de anchos tanto del canal principal como derivador de obras hidráulicas de bocatomas existentes en el Perú.

El siguiente paso una vez establecidas las medidas es, con ayuda del programa **Hcanales** hallar los caudales de entrada para los diferentes modelos a estudiar. Otras herramientas de trabajo utilizadas en esta tesis son el Bluekenue y Notepad++, para el pre-procesamiento de las simulaciones del comportamiento hidráulico y sedimentológico.

4.1. Dimensionamiento del modelo numérico

Para estudiar el comportamiento en un canal abierto, se utilizaron canales horizontales con secciones rectangulares. La Ilustración 4-1 muestra la nomenclatura y forma del canal.

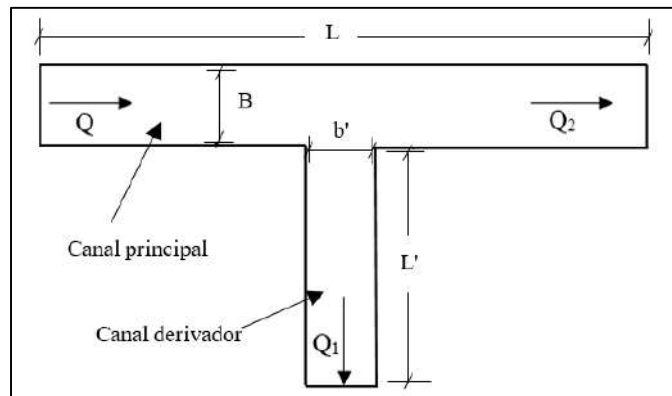


Ilustración 4-1 Nomenclatura y forma de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas
Fuente: Elaboración propia

Donde:

L	(m)	longitud del canal principal
L'	(m)	longitud del canal derivador
B	(m)	ancho del canal principal
b'	(m)	ancho del canal derivador
Q	(m ³ /s)	caudal de entrada total
Q_1	(m ³ /s)	caudal de salida del canal derivador
Q_2	(m ³ /s)	caudal de salida de la extensión del canal principal

Uno de los factores que intervienen en el costo de la construcción de un canal es el volumen de material por excavar, que a su vez depende de la sección transversal. Teniendo en cuenta este factor se calcula un tirante que satisfaga las condiciones hidráulicas, hallando la sección de máxima eficiencia hidráulica. Se dice que una sección es de máxima eficiencia cuando para la misma área, pendiente y calidad de paredes deja pasar un gasto mínimo. O bien, es aquella que para el mismo gasto, pendiente y calidad de paredes tiene un área mínima. Dicho de otro modo, es aquella sección que le corresponde el mínimo perímetro mojado. Se puede utilizar para canales revestidos pues minimiza el volumen de revestimiento (Rocha, 2007) .

Donde la relación base-tirante esta expresada en la Ecuación 4-1

$$\frac{b}{y} = 2 \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (4-1)$$

La Tabla 4-1 muestra la relación b/y según talud

Tabla 4-1 Relación b/y según talud

Talud Z	b/y
0	2
1/4	1,562
1/2	1,236
3/4	1
1	0,828
1 1/2	0,605
2	0,472
3	0,325

Fuente: (Rocha, 2007)

Para hallar el ancho de las bifurcaciones se tomó en cuenta las dimensiones de los anchos de las obras hidráulicas de bocatomas existentes en el Perú. A continuación, en la Tabla 4-2 se nombran las obras hidráulicas, seguido del dimensionamiento final del modelo numérico.

Tabla 4-2 Dimensionamiento de las bocatomas con bifurcaciones existentes en el Perú

	Datos de bocatomas con bifurcaciones existentes en el Perú			Modelo numérico	
	Canal principal	Canal derivador	Relación	Canal principal	Canal derivador
	Ancho (m)	Ancho (m)		Ancho (m)	Ancho (m)
	B	b'		B	b'
Bocatoma Chavimochic	72	30	0.417	5	2.083
Bocatoma Cañón del Pato	25	4	0.160		0.800
Bocatoma Raca Rumi	23.5	10	0.426		2.128
Bocatoma Zamba	25	9	0.360		1.800

Fuente: Elaboración propia

Los experimentos se realizaron en un canal principal de ancho 5 metros, a partir de este dato hallado, los anchos del canal derivador teniendo en cuenta las relaciones b'/B encontradas anteriormente (ver Tabla 4-2), están entre 0,8 m y 2,1 m, por lo que se tomó los valores de 1 m y 2 m, así como un tercer valor de 5 m.

Así pues, las dimensiones finales de los modelos a trabajar en la presente tesis se muestran a continuación en la Tabla 4-3:

Tabla 4-3 Dimensionamiento de los modelos numéricos a estudiar

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas				
	Canal principal		Canal derivador	
	Largo (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Ancho (m)
	L	B	L'	b'
Modelo 1	100	5	60	1
Modelo 2				2
Modelo 3				5

Fuente: Elaboración propia

4.2. Pre-procesamiento

A continuación, se expone la metodología del desarrollo de la tesis que describe el pre-procesamiento del análisis del modelo numérico.

4.2.1 Cálculo del caudal de entrada a la bocatoma

Para hallar el caudal que ingresa a los modelos se utilizará el programa Hcanales (Ilustración 4-2) desarrollado por el Ing. Peruano Máximo Villón Béjar, profesor e investigador de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Este programa permite resolver los más frecuentes problemas que se presentan en el diseño de canales y estructuras hidráulicas, a continuación, se nombran algunos:

- Cálculo del tirante normal
- Cálculo del tirante crítico
- Cálculo del resalto hidráulico
- Cálculo de la curva de remanso
- Cálculo del caudal transportado en un canal construido para las secciones transversales artificiales de uso común, como son, sección triangular, rectangular, trapezoidal, parabólica y circular.
- Cálculo del caudal transportado en un canal natural tanto para rugosidad constante como para rugosidad variable.
- Entre otros.



Ilustración 4-2 Programa Hcanales de Máximo Villón Béjar

Fuente: Elaboración propia

Para poder hacer uso del programa y hallar el caudal se debe establecer un tirante, ancho del canal, talud, coeficiente de rugosidad y pendiente.

Se trabajará con un ancho de canal principal de 5 m, coeficiente de rugosidad según Manning de 0,016 para un conducto abierto revestido con mortero lanzado y de alineamiento recto de buena calidad, pendiente 0,001 y para el tirante que alcanzará el canal, se halla con la máxima eficiencia hidráulica, para un talud vertical igual a 0 (sección rectangular), dando una relación b/y de 2, con lo que:

$$\frac{b}{y} = 2 \rightarrow y = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ m}$$

A continuación, en la Tabla 4-4 se muestra un resumen de los parámetros a utilizar para calcular el caudal en el programa **Hcanales**:

Tabla 4-4 Parámetros a utilizar en el programa Hcanales

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas			
Parámetros	Descripción	Valores	Unidades
B	ancho del canal principal	5	m
n	coeficiente de Manning	0,016	
z	talud	0	
s	pendiente	0,001	m/m
y	tirante	2,5	m

Fuente: Elaboración propia

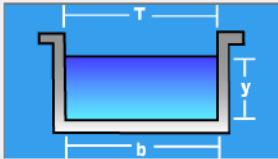
La Ilustración 4-3 muestran el resultado del caudal una vez ejecutado el programa para el valor de tirante 2,5 m. Se obtiene un caudal de ingreso al canal principal de 28,67 m³/s.

Calculo del caudal, sección trapezoidal, rectangular, triangular

Lugar: Proyecto:
 T.ano: Revesamiento:

Datos:

Triante (y): m
 Ancho de solera (b): m
 Talud (Z):
 Coeficiente de rugosidad (n):
 Pendiente (S): m/m



Resultados:

Caudal (Q): m³/s Velocidad (v): m/s
 Área hidráulica (A): m² Perímetro (pl): m
 Radio hidráulico (R): m Espejo de agua (T): m
 Número de Froude (F): Energía específica (E): m-Kg/Kg
 Tipo de flujo:

Ilustración 4-3 Resultado del caudal de entrada a la bocatoma a partir del programa Hcanales
 Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Diseño de la superficie en BlueKenue

La geometría de la bocatoma con bifurcación a 90° se crea en BlueKenue, ya que, por ser líneas rectas, se pueden representar correctamente sin necesidad de crear la superficie en AutoCAD Civil.

En primer lugar, se crean 10 puntos con la opción “New PointSet” bajo el nombre de “BORDEEXTERNO” con unidades “M” (ver Ilustración 4-4). Estos puntos se guardan en un formato “*.xyz”.

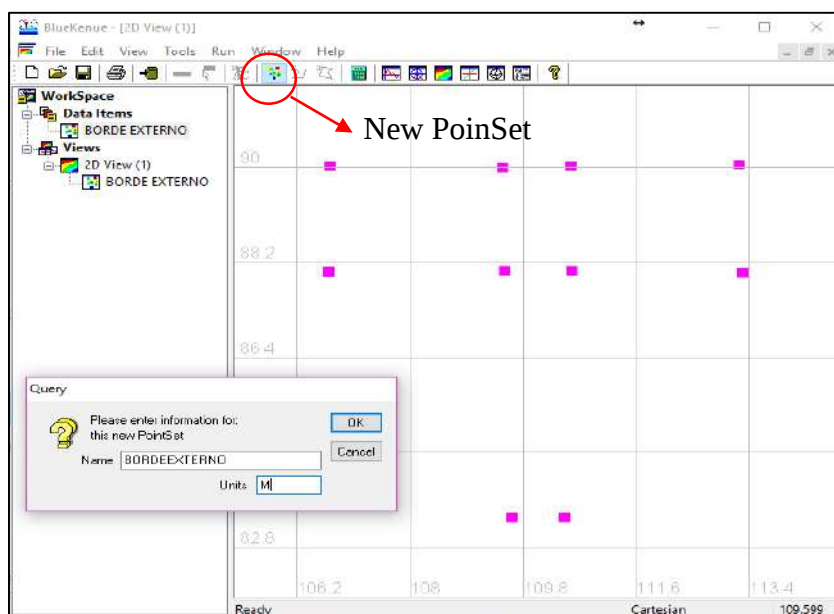
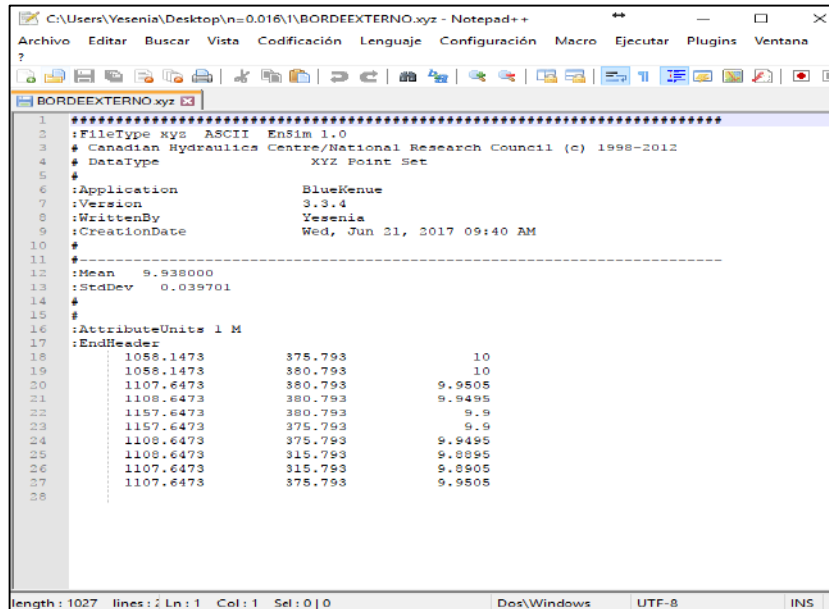


Ilustración 4-4 Puntos para el desarrollo del borde externo de la bocatoma con bifurcación a 90°
 Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 4-5 muestra el archivo “BORDEEXTERNO.xyz” visualizado en el programa Notepad++, en el cual se colocan manualmente las coordenadas de ubicación en “x” e “y”, y en “z” se ubican las cotas de nivel de fondo del canal principal y derivador, teniendo en cuenta la pendiente 0,001 m/m, esto para los 10 puntos que conforman la superficie de los canales, que ayudará a generar la triangulación del fondo. Llamamos triangulación a la división del dominio en discretas áreas llamadas elementos finitos, que se definen por las conexiones entre los puntos nodales. Los nodos están en los vértices de los triángulos.



```

1 *****
2 :FileType xyz ASCII En5im 1.0
3 * Canadian Hydraulics Centre/National Research Council (c) 1998-2012
4 * DataType XYZ Point Set
5 *
6 :Application BlueKenue
7 :Version 3.3.4
8 :WrittenBy Yesenia
9 :CreationDate Wed, Jun 21, 2017 09:40 AM
10 *
11 *-----*
12 :Mean 9.938000
13 :StdDev 0.039701
14 *
15 #
16 :AttributeUnits 1 M
17 :EndHeader
18 1058.1473 375.793 10
19 1058.1473 380.793 10
20 1107.6473 380.793 9.9505
21 1108.6473 380.793 9.9495
22 1157.6473 380.793 9.9
23 1157.6473 375.793 9.9
24 1108.6473 375.793 9.9495
25 1108.6473 315.793 9.8895
26 1107.6473 315.793 9.8905
27 1107.6473 375.793 9.9505
28

```

Ilustración 4-5 Puntos y sus respectivas cotas del borde externo del modelo numérico en Notepad++
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se crea una polilínea ubicando los 10 puntos sacados manualmente del apartado anterior y un 11avo punto para cerrar la superficie, esto con la opción “New Open Line”, se guarda con el nombre de “BORDEEXTERNO” con formato “*.i2s” (Ilustraciones 4-6 y 4-7). Este borde interno es la superficie donde se genera la malla no estructurada del fondo, que requiere la selección de los puntos internos de la malla (vértices de nodos) y su triangulación. Para la solución numérica es necesario que los elementos de la malla tengan una alta calidad a fin de asegurar una adecuada discretización y buenas condiciones en el sistema lineal.

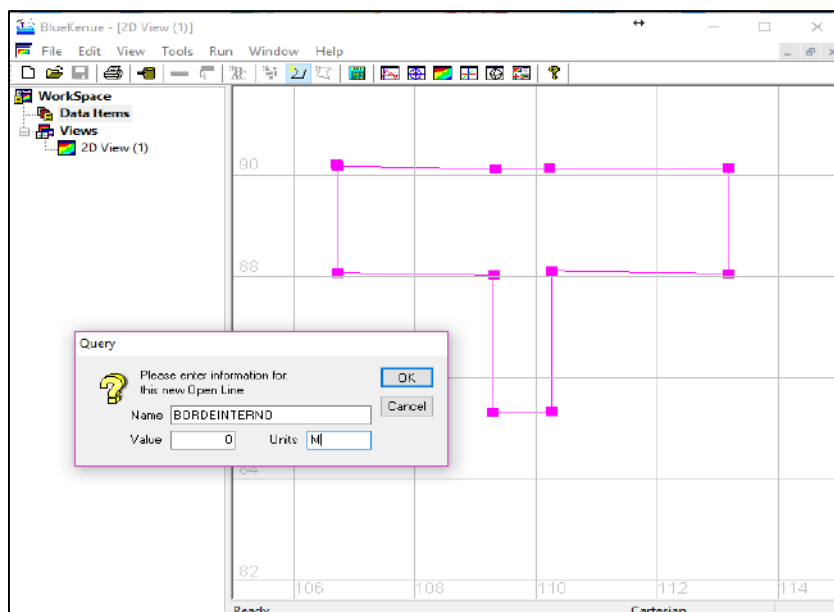


Ilustración 4-6 Polilínea creada en Bluekenue para obtener el borde del modelo numérico
Fuente: Elaboración propia

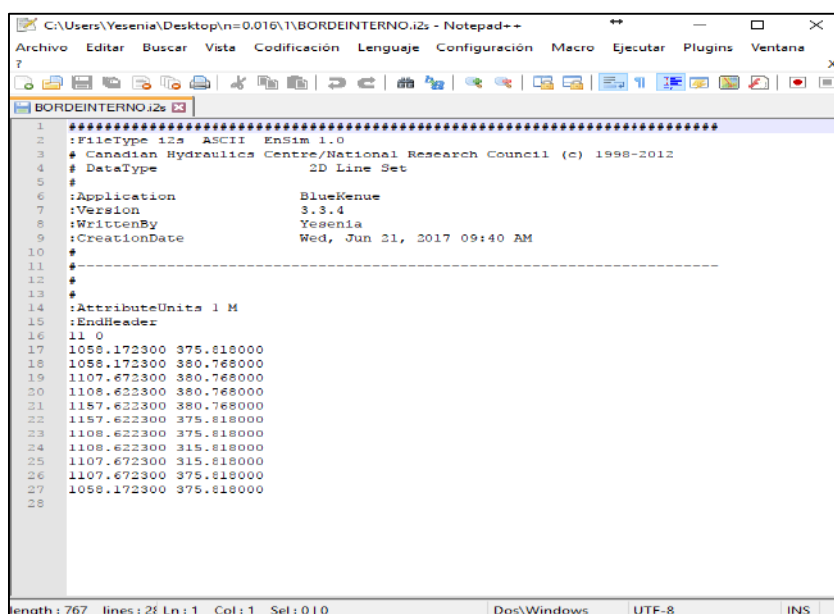


Ilustración 4-7 Puntos del borde interno del modelo numérico en Notepad++
Fuente: Elaboración propia

Luego de obtener los puntos que dan la forma de “T” al canal principal y derivador, se genera la triangulación de fondo de los canales con la opción *File → New → Triangulation*, tal como se muestra en las Ilustraciones 4-8, 4-9 y 4-10 respectivamente.

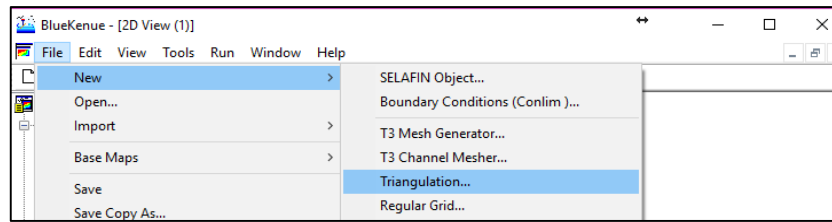


Ilustración 4-8 Selección en el programa Bluekenue para la elaboración de la triangulación del modelo
Fuente: Elaboración propia

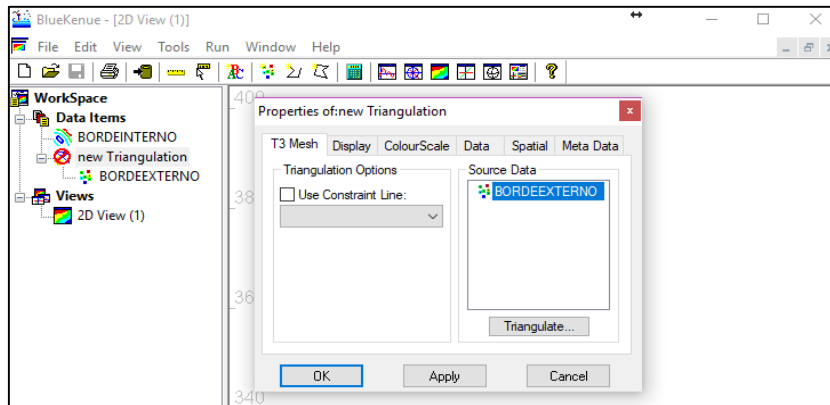


Ilustración 4-9 Elaboración de la triangulación del borde externo de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas
Fuente: Elaboración propia

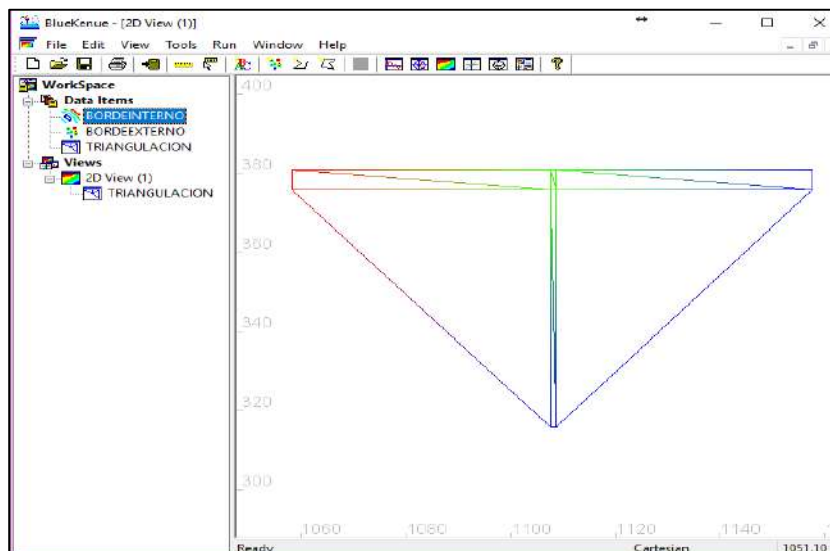


Ilustración 4-10 Triangulación del fondo de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, las Ilustraciones 4-11 y 4-13 muestran la generación de la malla computacional con la opción *File* → *New* → *T3 Mesh Generator*, teniendo en cuenta el buen criterio al momento de definir la separación de nodos, se procede a crear tres archivos más con formato “*.i2s” con nombres “BordeC”, “BordeD” y “BordeI” como se observa en la Ilustración 4-12, donde se especifica que para el tramo del canal derivador y parte del tramo del canal principal, tanto al lado derecho como izquierdo a la entrada del canal derivador, la separación de nodos no será uniforme, ya que se necesita tener esta zona más detallada y

especificada para obtener una mayor precisión. Por este motivo, la malla del “BordeD” y “BordeI” tiene una separación de nodos de 0.1 m y el “BordeC” una separación de 0.05 m. La separación de los nodos en la malla de la superficie de fondo es 0,25 m (Ilustración 4-14).

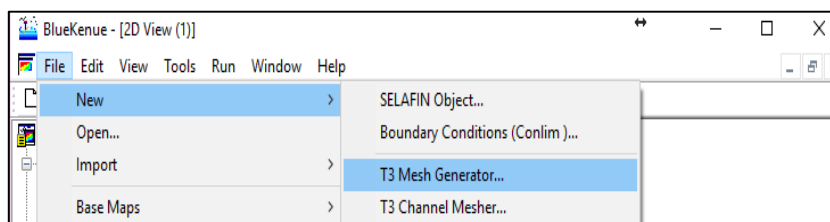


Ilustración 4-11 Selección en el programa Bluekenue para la elaboración de la malla computacional del modelo numérico
Fuente: Elaboración propia

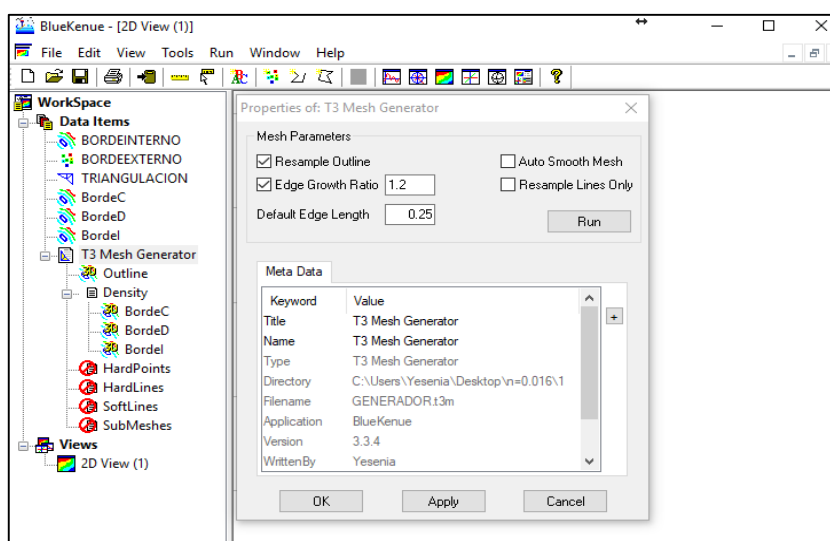


Ilustración 4-12 Nuevos archivos “.i2s” con separación de nodos distintos
Fuente: Elaboración propia

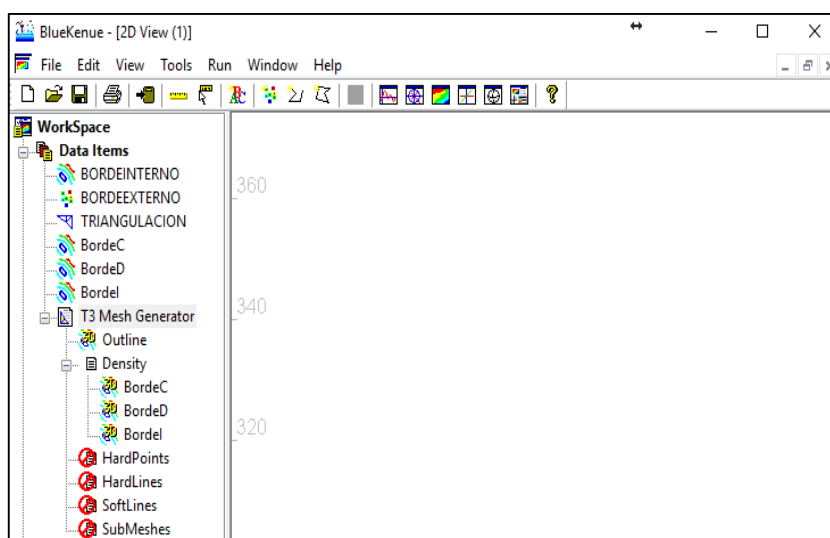


Ilustración 4-13 Generación de la malla de fondo de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas
Fuente: Elaboración propia

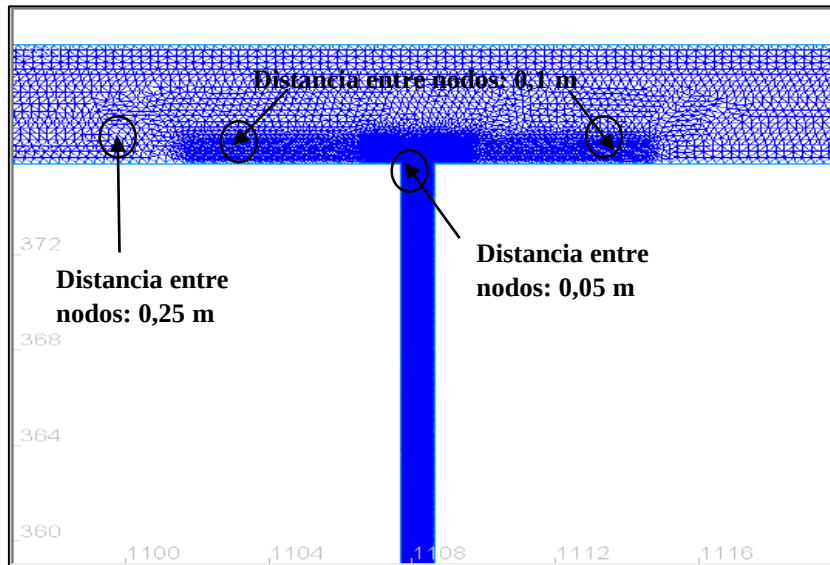


Ilustración 4-14 Densificación del mallado de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Condiciones de borde

Las condiciones de borde para los modelos estudiados son archivos de entrada para el programa Telemac-2D. El archivo de geometría se crea con el formato de Selafin, teniendo la extensión “.slf” y el archivo de las condiciones de frontera, formato ASCII, con la extensión “.cli”.

Primero se crea el archivo geometría del modelo, *File* → *New* → *SELAFIN Object*. Seguido se procede a cambiar de nombre por GEO, la geometría cuenta con la malla “*New Mesh*” que tiene el nuevo nombre de “*BOTTOM*” para que Telemac lo reconozca como la batimetría (relieve de la superficie), como se muestra en las Ilustraciones 4-15 y 4-16 respectivamente.

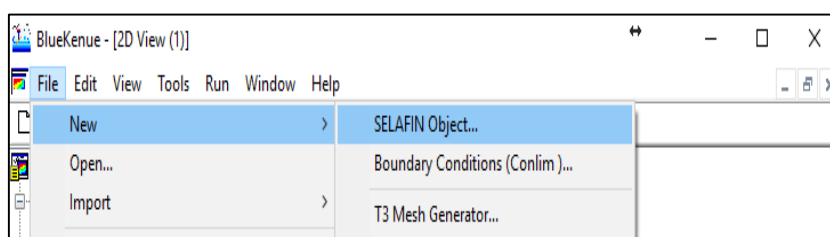


Ilustración 4-15 Selección en el programa Bluekenue para la elaboración de la geometría del modelo a estudiar

Fuente: Elaboración propia

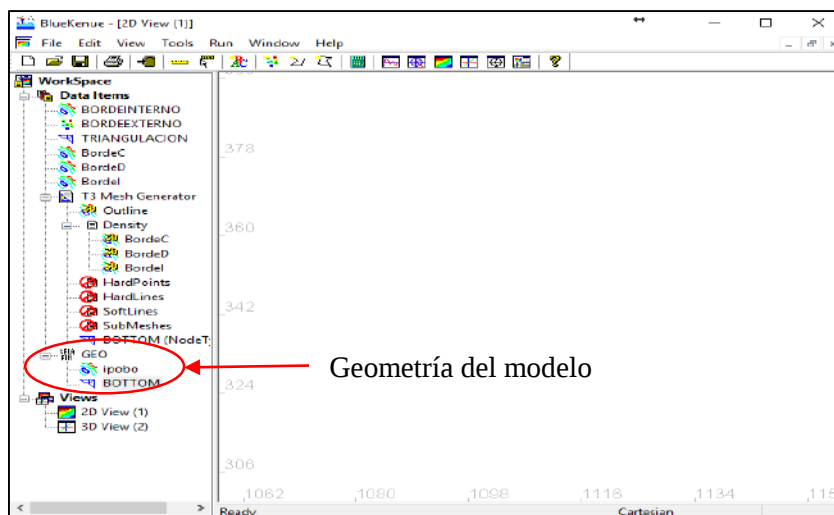


Ilustración 4-16 Geometría de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas denominado con el nombre GEO

Fuente: Elaboración propia

Las Ilustraciones 4-17 y 4-18 muestran la creación del archivo que contiene las condiciones de borde de la superficie del modelo, con la opción *File* → *New* → *Boundary Conditions*. Se obtiene un objeto llamado BOTTOM_BC con un sub-objeto BOTTOM_BC (LIHBOR)

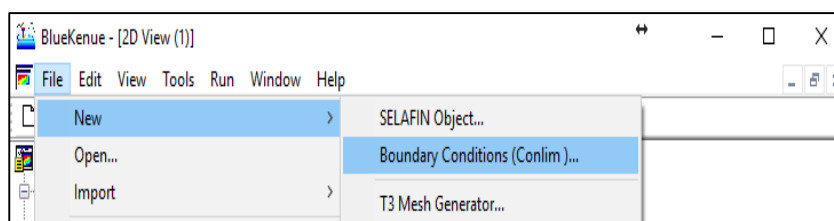


Ilustración 4-17 Selección en el programa Bluekenue para establecer las condiciones de borde de la superficie del modelo

Fuente: Elaboración propia

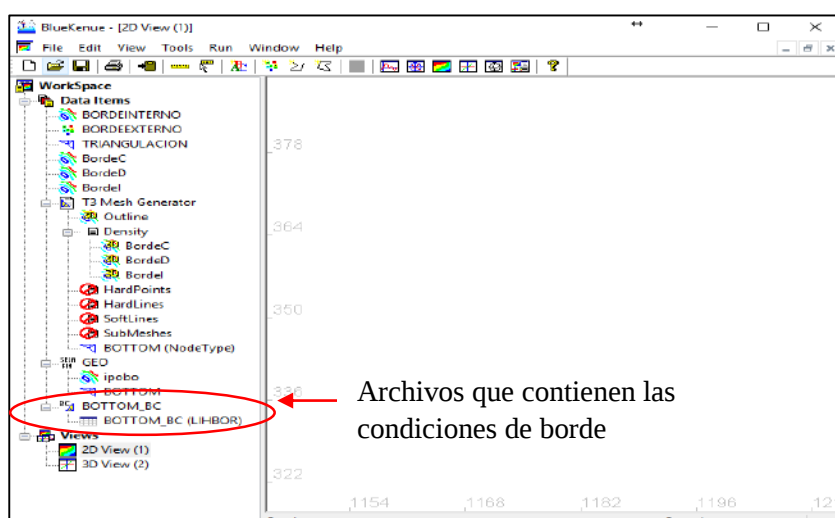


Ilustración 4-18 Archivos que contienen las condiciones de borde de la superficie de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas

Fuente: Elaboración propia

Por último, se definen las condiciones de borde, entrada y salida. Como muestra la Ilustración 4-19, se observa que la entrada (inLet) al canal está de color azul y tiene como condición de entrada que solo ingrese un caudal “Q”, para las salidas (outLet) del canal están de color verde y tienen como condición de salida un nivel de agua “H” (fondo + cota) y una curva de descarga de caudal vs nivel de agua (Tabla 4-5 e Ilustración 4-20). Se tiene en cuenta esta curva de descarga para los archivos de control a la hora de ejecutar el programa Telemac-2D.

Los archivos se guardan con otro nombre, BOTTOM_BC(LIHBOR) por “cli.bc2” para las condiciones de contorno y BOTTOM_BC por “cli.cli” para la definición de los límites, esto para que el programa Telemac pueda ejecutarlos.

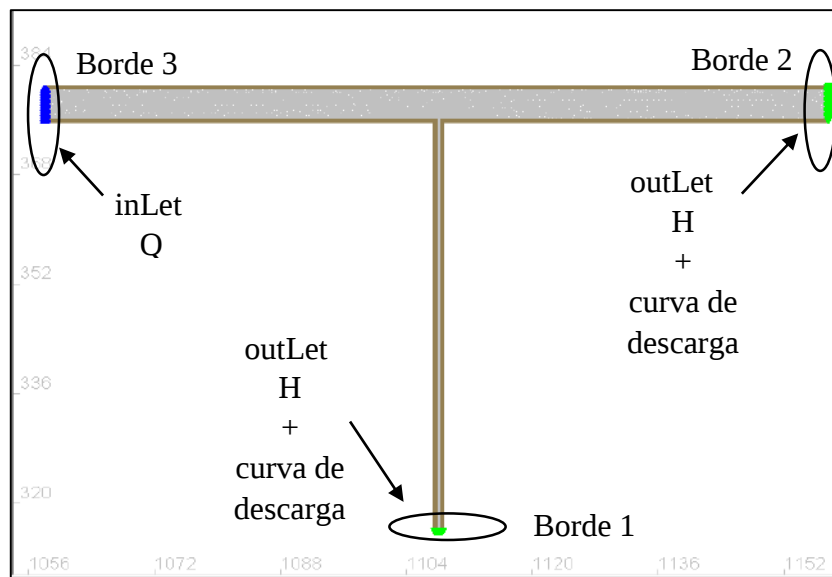


Ilustración 4-19 Definición de las condiciones de borde, entrada y salida de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-5 Valores para la elaboración de la curva de descarga vs nivel de agua

Curva de descarga					
Borde 1 ($b' = 2$ m)			Borde 2 ($B = 5$ m)		
Tirante (m)	Nivel de agua (m)	Caudal (m^3/s)	Tirante (m)	Nivel de agua (m)	Caudal (m^3/s)
0	9,890	0	0	9,900	0
1,920	11,810	5,730	0,810	10,710	5,730
3,440	13,330	11,470	1,290	11,190	11,470
4,920	14,810	17,200	1,720	11,620	17,200
6,390	16,280	22,940	2,120	12,020	22,940
7,860	17,750	28,670	2,500	12,400	28,670

Fuente: Elaboración propia

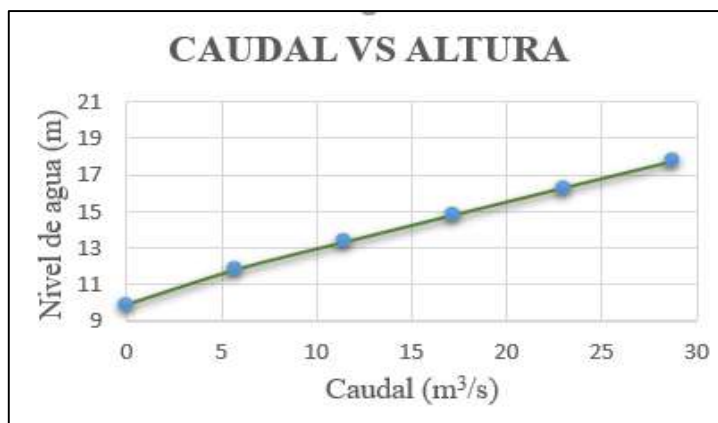


Ilustración 4-20 Curva de descarga
Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Archivos de control del Telemac-2D para la modelación numérica del flujo de agua

Para poder ejecutar el software Telemac-2D se deben tener en cuenta los siguientes archivos necesarios para la representación hidrodinámica (Ilustración 4-21):

Nombre	Tipo
cas.txt	Documento de texto
cli.bc2	Archivo BC2
cli.cli	Archivo CLI
curvaDescarga.txt	Documento de texto
GEO.slf	Archivo SLF

Ilustración 4-21 Archivos para la representación hidrodinámica
que se ejecutará en el programa Telemac-2D
Fuente: Elaboración propia

A) cas.txt, le ordena al Telemac que hacer bajo un formato “.txt”, aquí se encuentran algunos parámetros que tienen las características de los canales a estudiar, como por ejemplo el coeficiente de rugosidad, turbulencia, velocidades, entre otros.

```

/-----
/ TELEMAC2D Version v7p1 Jun 18, 2013
/ BOCATOMA CON BIFURCACIÓN A 90 GRADOS
/-----
/-----
/ EQUATIONS
/-----
FRICITION COEFFICIENT      =0.016
LAW OF BOTTOM FRICTION     =4
//TURBULENCE MODEL FOR SOLID BOUNDARIES = 2
TURBULENCE MODEL          =3
/-----
/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
/-----

```

```

VELOCITY PROFILES                =1;1;1
PRESCRIBED FLOWRATES             =0;0;28.67
PRESCRIBED ELEVATIONS            =14.80;10.71;0
STAGE-DISCHARGE CURVES           =1;1;0
OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES     =1;1;1
/-----
/ EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS
/-----
INITIAL DEPTH                    =2.3
INITIAL CONDITIONS               ='CONSTANT DEPTH'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, FILES
/-----
STEERING FILE                    ='cas.txt'
BOUNDARY CONDITIONS FILE         ='cli.cli'
GEOMETRY FILE                    ='GEO.slf'
STAGE-DISCHARGE CURVES FILE      ='curvaDescarga.txt'
/LIQUID BOUNDARIES FILE          ='inlet.liq'
/PREVIOUS COMPUTATION FILE       ='hotStart.slf'
RESULTS FILE                     ='res'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING
/-----
LISTING PRINTOUT PERIOD          =12500
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS =U,V,H,B,US,S,M,K,E,F,C,L
MASS-BALANCE                     =YES
INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL = YES
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD          =25000
/COMPUTATION CONTINUED           = YES
/INITIAL TIME SET TO ZERO        = YES
/-----
/ NUMERICAL PARAMETERS
/-----
NUMBER OF TIME STEPS             =500000
PARALLEL PROCESSORS              =10
/STOP IF A STEADY STATE IS REACHED = YES
STOP CRITERIA                    =0.000001;0.000001;0.000001;0.000001
TIME STEP                        =0.002

```

(Lang, 2014) Descripción de cada uno de los comandos que simulará el modelo a estudiar mediante el programa de Telemac-2D:

Equations

- *Friction coefficient*: coeficiente de fricción, tiene un valor de 0,016 para un canal revestido con mortero lanzado.
- *Law of bottom friction*: fricción en el fondo, se elige el número 4 con el que el Telemac-2D entiende que está trabajando con la fórmula de Manning.
- *Turbulence model*: Modelo de turbulencia con un valor de 3, para una viscosidad constante se utiliza un modelo k-epsilon. Se opta por utilizar este modelo puesto que logra representar el comportamiento del flujo, demostrado por los estudios realizados por la

Ingeniera Cecilia Ruiz, la cual expone que las gráficas del modelo de turbulencia K-epsilon muestran resultados semejantes a los del modelo físico del desarenador San Gabán con una eficiencia del 97% (Ruiz, 2017).

Equations, boundary conditions

- *Velocity profiles*: perfil de velocidad, se proporciona el valor de 1 para cada limite abierto. En el caso de un caudal prescrito el valor del vector se establece en 1 y luego se multiplica por una constante para obtener el caudal deseado. Se tienen tres valores de 1 para cada frontera abierta.
- *Prescribed flowrates*: flujos prescritos, se utiliza para fijar el valor del caudal que ingresa. Un valor positivo corresponde a una entrada en el dominio, mientras que un valor negativo corresponde a un flujo de salida. El valor de caudal de entrada que lee el programa es 28,67 m³/s, los valores que aparecen con “0” representan por donde sale el caudal (tanto para el canal principal como derivador)
- *Prescribed elevations*: elevaciones prescritas, se utiliza para definir la elevación de un límite abierto con la elevación prescrita (superficie libre). Para el modelo utilizado como ejemplo los valores son 14,80 m y 10,71 m, el primer y segundo valor son los niveles de agua que pueden alcanzar a la salida del canal derivador y extensión del canal principal. Esto se especifica en las condiciones de borde “inLet” y “outLet” mencionadas en el apartado 4.3.2, el valor “0” es para la entrada del canal ya que la condición de borde es solo caudal.
- *Stage-discharge curves*: curva de descarga, la elevación (nivel de agua) en función de la descarga. Esta curva de descarga se define en las condiciones de borde en el apartado 4.3.2. El valor 1 y 0 es cuando hay y no una curva de descarga.
- *Option for liquid boundaries*: opción para límites líquidos, esta opción activa las fronteras abiertas por donde entra y sale el caudal de los canales. El valor 1 es por defecto.

Equation, initial conditions

- *Initial depth*: profundidad inicial, fija el tirante que ingresa a la bocatoma.
- *Initial conditions*: Condición inicial, establece que todo el modelo comienza con la misma profundidad de agua. Esto se establece con la palabra “CONSTANT DEPTH”

Input-output files

- *Steering file*: archivo de dirección (obligatorio), contiene los parámetros utilizados para ejecutar el software Telemac-2D.
- *Boundary conditions file*: archivo de condición de borde, contiene las condiciones de borde que debe cumplir el modelo descritos en el apartado 4.3.2.
- *Geometry file*: archivo de geometría, contiene la superficie de fondo de modelo a estudiar.
- *Stage-dicharge curves file*: archivo de la curva de descarga, contiene los valores de las curvas de descarga determinadas como condición de salida de los canales principal y derivador.
- *Results file*: archivo resultado, el archivo resultado una vez ejecutado el programa con todas las condiciones descritas. Se podrá visualizar en el programa BlueKenue.

Input-output, graphics and listing

- *Listing printout period*: listado de periodo de impresión, fija el periodo entre las ediciones de paso del tiempo. El valor se da en el número de pasos de tiempo.

- *Variables for graphic printouts*: variables para la impresión de gráficos, se utiliza para especificar la lista de variables que se van a almacenar en el archivo de resultados. La descripción de cada variable utilizada es:

U : velocidad en el eje “x” (m/s)

V : velocidad en el eje “y” (m/s)

H : altura del fluido (m)

B : elevación o cota del fondo (m)

US: velocidad de fricción (m/s)

S : elevación de la superficie libre (m)

M : velocidad escalar (m/s)

K : energía turbulenta del modelo k-e (J/kg)

E : disipación de la energía turbulenta (w/kg)

F : número de Froude

C : velocidad de la onda de agua (m/s)

L : número de Courant

- *Mass-balance*: balance de masa, el usuario tendrá información sobre los flujos de masa (o más bien volúmenes) en el dominio en cada paso de tiempo impreso.
- *Information about k-epsilon model*: información con respecto al modelo k-epsilon
- *Graphic printout period*: periodo de impresión gráfica, corrige el periodo para las salidas con el fin de evitar tener u archivo excesivamente grande.

Numerical parameters

- *Number of time steps*: número de pasos de tiempo, duración total del cálculo suministrado por medio de una serie de time steps.
- *Parallel processors*: procesadores paralelos, el usuario especifica el número de procesadores con los que trabaja dependiendo de la capacidad del ordenador utilizado.
- *Stop criteria*: criterios de parada, el cálculo se detiene cuando los valores de incremento absoluto de estas variables entre dos pasos de tiempo en todos los nodos están por debajo de los límites indicados. Cabe destacar que esta función es inoperante en el caso de flujos fundamentalmente no estacionarios como los remolinos de Karman detrás de los muelles del puente.
- *Time step*: paso de tiempo, define el tiempo que separa dos instantes consecutivos del cálculo.

Los comandos que se encuentren con un (/) delante, se encuentran desactivados, por lo que no se leerán una vez ejecutado el programa.

- B) curvaDescarga.txt**, contiene datos de los niveles de agua que pueden llegar a alcanzar los canales a la salida, tanto para el principal como para el derivador, así como los caudales correspondientes a estos niveles. Estos datos representan una curva de descarga que el programa Telemac-2D debe leer. Este archivo se crea en el programa Notepad++ bajo un formato “.txt”. (Ilustración 4-22)

```

1  #STAGE-DISCHARGE CURVE BOUNDARY 1
2  Z (1)      Q (1)
3  m          m3/s
4  9.89       0
5  14.80      5.73
6  19.42      11.47
7  24.03      17.20
8  28.64      22.94
9  33.24      28.67
10 #
11 #STAGE-DISCHARGE CURVE BOUNDARY 2
12 Z (2)      Q (2)
13 m          m3/s
14 9.9         0.00
15 10.71       5.73
16 11.19       11.47
17 11.62       17.20
18 12.02       22.94
19 12.40       28.67
20 #

```

Ilustración 4-22 Archivo de la curva de descarga creada en Notepad++

Fuente: Elaboración propia

- C) **cli.bc2**, **cli.cli** y **GEO.slf**, archivos que se obtienen según lo descrito en el apartado anterior 4.2.3. Contienen las condiciones de borde y la superficie del modelo que el Telemac-2D lee.

4.2.5 Archivos de control del Telemac-2D para la modelación numérica de los sedimentos

Para la modelación de sedimento con el programa Telemac-2D y Sisyphe se deben tener en cuenta los siguientes archivos (Ilustración 4-23):

Nombre	Tipo
 cli.bc2	Archivo BC2
 cli.cli	Archivo CLI
 cliSed.cli	Archivo CLI
 noerod.f	Archivo F
 GEO.slf	Archivo SLF
 resInitial.slf	Archivo SLF
 cas.txt	Documento de texto
 curvaDescarga.txt	Documento de texto
 sisCas.txt	Documento de texto

Ilustración 4-23 Archivos para la modelación sedimentológica que se ejecutará en el programa Telemac-2D y Sisyphe

Fuente: Elaboración propia

En el apartado 4.2.4 se describen algunos de los archivos que contiene la carpeta a partir de la cual se ejecuta el programa. Algunos tienen unos pequeños cambios descritos a continuación para adaptarse a las condiciones que deben cumplir para la modelación numérica de sedimentos.

A) **GEO.slf**, la geometría del fondo de los canales a modelar se ve afectada por una variable llamada “NOER”, la cual indica las zonas rígidas no erosionables de los canales.

A partir de las Ilustraciones 4-24 y 4-25 se muestra como se crea la nueva variable. Se activa la opción “Add Variable”, en “Name” se escribe “NOER” y “0” en “Default Node Value”.

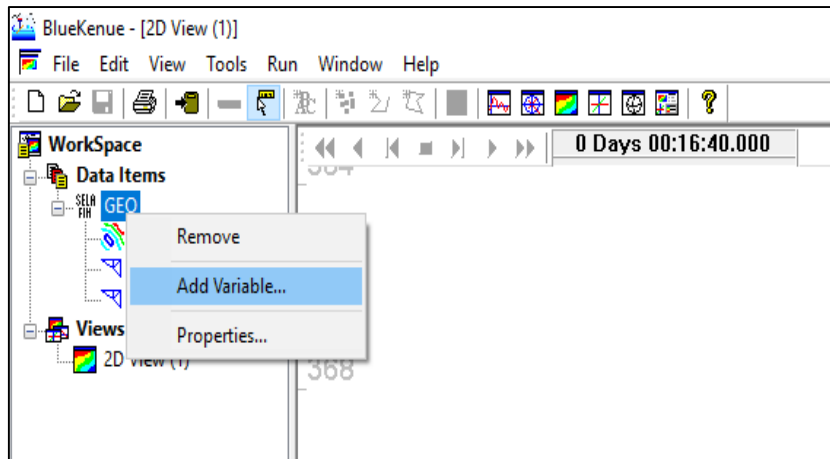


Ilustración 4-24 Creación de la variable NOER

Fuente: Elaboración propia

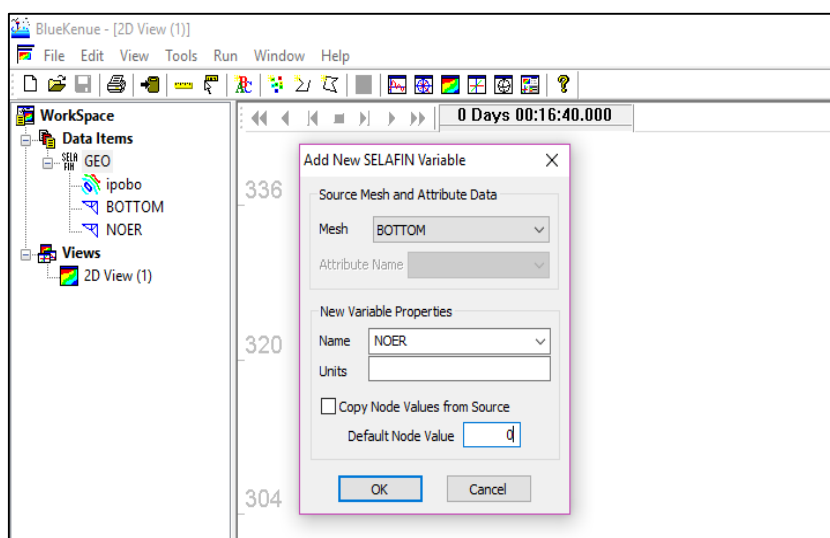


Ilustración 4-25 Variable NOER

Fuente: Elaboración propia

El archivo “NOER” se guarda dentro de “GEO.slf”. La superficie que se observa a continuación en la Ilustración 4-26, muestra el fondo que indica el valor “0” para las zonas no erosionables ya que es un fondo rígido, esto es leído por Telemac-2D.

Tabla 4-6 Variables del archivo "cli.cli"

Variables		
X1	LIHBOR	Condición de borde (tirante de agua)
X2	LIUBOR	Condición de borde (velocidad en el eje X)
X3	LIVBOR	Condición de borde (velocidad en el eje Y)
X4	HBOR	Valor de tirante de agua
X5	UBOR	Valor de velocidad en el eje X
X6	VBOR	Valor de velocidad en el eje Y
X7	AUBOR	
X8	LITBOR	
X9		
X10		
X11		
G	# de nodo	
L		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-7 Variables del archivo "cliSed.cli"

Variables		
X2	LIQBOR	
X5	QBOR	Concentración de sedimentos (m^2/s)
X8	LIEBOR	
	LICBOR	
X9	EBOR	
	CBOR	

Fuente: Elaboración propia

Dependiendo de las condiciones de bode para los sedimentos, se define una configuración de códigos para las variables. En la presente tesis, se evalúa el transporte de carga de sólido de fondo. Esta carga se impone a la entrada de la bocatoma, dejando libre la salida del canal derivador y extensión del canal principal (ver Tabla 4-8).

Tabla 4-8 Configuración de los nuevos códigos para el archivo "cliSed.cli"

Configuración de códigos para las variables															
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	G	L		
"cli.cli"	5	4	4	0	0	0	0	4	0	0	0	7687	2	#	outLet
"cliSed.cli"	5	4	4	0	0	0	0	4	0	0	0	7687	2	#	outLet
"cli.cli"	5	4	4	0	0	0	0	4	0	0	0	60852	1481	#	outLet
"cliSed.cli"	5	4	4	0	0	0	0	4	0	0	0	60852	1481	#	outLet
"cli.cli"	4	5	5	0	0	0	0	4	0	0	0	20	1901	#	inLet
"cliSed.cli"	4	5	5	0	0	0	0	5	0	0	0	20	1901	#	inLet

Fuente: Elaboración propia

Para los 3 casos estudiados donde b' es de 1 m, 2 m y 5 m, las variables X1, X2 X3 y X8 mantienen el cambio de 4 5 5 4 a 4 5 5 5 en el caso de la entrada (inLet) al canal principal, para el caso del canal derivador y extensión del canal principal se mantiene 5 4 4 4.

D) resInitial.slf, archivo resultado del modelo hidrodinámico.

E) **cas.txt**, al archivo “cas.txt” explicado en el apartado 4.3.3 se le agrega unos comandos para insertar al módulo SISYPHE en la modelación de sedimentos

```

/-----
/ INPUT-OUTPUT, FILES
/-----
PREVIOUS COMPUTATION FILE      ='resInitial.slf'
FORTRAN FILE                    ='noerod.f'
/-----
/ COUPLING WITH SISYPHE
/-----
COUPLING WITH                   = 'SISYPHE'
SISYPHE STEERING FILE          = 'sisCas.txt'
COUPLING PERIOD FOR SISYPHE    = 1

```

Donde:

Previous computation file, es el archivo que proporciona el resultado del modelo hidrodinámico que leerá el programa Telemac-2D para correr los sedimentos. *Coupling with sisyph*, especifica el tipo de acoplamiento (*coupling with*), el nombre del archivo de dirección de Sisyph (*sisyphe steering file*) y el periodo de acoplamiento de Sisyph (*coupling period for sisyph*)

F) **sisCas.txt**, archivo de control de “Sisyph” utilizado para la modelación de sedimentos de los canales a trabajar

```

/-----/
/  SISYPHE - BOCATOMA CON BIFURCACIÓN A 90 GRADOS      /
/-----/
GEOMETRY FILE                  = 'GEO.slf'
BOUNDARY CONDITIONS FILE       = 'cliSed.cli'
RESULTS FILE                   = 'resSed.slf'
/-----
/ GENERAL INFORMATIONS - OUTPUTS
/-----
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS = 'B,M,E,QSBL,Q,R,TOB'
TIME STEP                      = 0.002
NUMBER OF TIME STEPS           = 500000
/-----
/ BOUNDARY CONDITIONS
/-----
MASS-BALANCE                   = YES
/-----
/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
/-----
PRESCRIBED SOLID DISCHARGES    =0.0;0.0;0.00136
/-----
/ PHYSICAL PARAMETERS
/-----
NUMBER OF SIZE-CLASSES OF BED MATERIAL      = 1
SEDIMENT DENSITY                          = 2650

```

NON COHESIVE BED POROSITY	= 0.4
SEDIMENT DIAMETERS	= 0.062
INITIAL FRACTION FOR PARTICULAR SIZE CLASS	= 1
COHESIVE SEDIMENTS	= NO
/SETTLING VELOCITIES	= 0.0173;0.0064;0.0024
SHIELDS PARAMETERS	= 0.045
/-----	
/ MODELING PARAMETERS	
/-----	
BED-LOAD TRANSPORT FORMULA	= 1
BED LOAD	= YES
FORMULA FOR SLOPE EFFECT	= 1
FORMULA FOR DEVIATION	= 1
SLOPE EFFECT	= YES
FRICTION ANGLE OF THE SEDIMENT	= 40
BETA	= 1.3
PARAMETER FOR DEVIATION	= 0.85
SEDIMENT SLIDE	= YES
SECONDARY CURRENTS	= YES
SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT	= 1
CORRECTION ON CONVECTION VELOCITY	= NO
MASS CONCENTRATION	= NO
OPTION FOR THE TREATMENT OF NON ERODABLE BEDS	= 3

Descripción de cada uno de los comandos que simulará el modelo a estudiar mediante el programa de Sisyphe (Tassi, 2014):

General informations-outputs

- *Variables for graphic printouts*: variables para la impresión de gráficos, se utiliza para especificar la lista de variables que se van a almacenar en el archivo de resultados. La descripción de cada variable utilizada es:

B : elevación de fondo (m)
 M : descarga de la carga de fondo (m²/s)
 E : evolución de fondo (m)
 QSBL : velocidad de carga de fondo
 Q : flujo de agua de un fluido (m²/s)
 R : fondo no erosionable
 TOB : esfuerzo cortante de fondo (N/m²)

Equations, boundary conditions

- *Prescribed solid discharges*: Descargas sólidas prescritas (m³/s), especifica la concentración de carga sólida que pasará por el canal.

El cálculo del caudal sólido que ingresa a la bocatoma, para observar el comportamiento de la sedimentación, se halla mediante la fórmula de Meyer Peter y Müller (Ecuación 1-39), teniendo en cuenta los datos del caudal de entrada de 28,67 m³/s, el caudal sólido de fondo es:

$$g_B = 0,945 \text{ kgf/s/m}$$

$$g_B = 4,725 \text{ kgf/s}$$

$$g_B = 0,002 \text{ m}^3/\text{s}$$

Physical parameters

- *Number of size-classes of bed material (NSICLA)*: número de clases de material de fondo. Para sedimentos uniformes, la distribución granulométrica está representada por un solo valor NSICLA = 1.
- *Sediment density*: densidad del sedimento. Se trabaja con un valor de 2650 kgf/m³.
- *Non cohesive bed porosity*: porosidad del fondo no cohesivo. Por defecto tiene un valor de 0,4.
- *Sediment diameters*: diámetro del sedimento. Para el modelo trabajado se escoge un diámetro de partícula igual a 1,2 mm, según la Tabla 1-1 para la clasificación de sedimentos tipo arena.
- *Initial fraction for particular size class*: fracción inicial para clases de tamaño particular. Para la modelación de bocatomas con bifurcación a 90° se usó un tamaño de sedimento, por lo tanto, tenemos el 100% del mismo tamaño.
- *Cohesive sediments*: sedimentos cohesivos. NO, para sedimentos no cohesivos.
- *Shields parameters*: parámetros de protección (θ_c). Es usado para calcular el inicio del movimiento de los sedimentos en el flujo del fluido y es calculado por el modelo como una función del diámetro adimensional del grano D_* , ver Ecuaciones 4-4 y 4-5

$$D_* = d \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho - 1} \right) \frac{g}{v^2} \right]^{1/3} \quad (4-4)$$

$$\begin{cases} 0,24D_*^{-1} & D_* \leq 4 \\ 0,14D_*^{-0,64} & 4 < D_* \leq 10 \\ 0,04D_*^{-0,10} & 10 < D_* \leq 20 \\ 0,013D_*^{-0,29} & 20 < D_* \leq 150 \\ 0,045 & 150 < D_* \end{cases} \quad (4-5)$$

Modeling parameters

- *Bed-load transport formula*: fórmula de transporte de carga de fondo. Para el presente estudio se estableció un ICF = 1, que corresponde a la fórmula de Meyer-Peter-Müller. Esta clásica fórmula de carga de fondo ha sido validada para sedimentos gruesos en el rango de 0,4 mm < d₅₀ < 29 mm.
- *Bed load*: carga de fondo. YES, existe carga de fondo.
- *Formula for slope effect*: fórmula para efecto de pendiente. Este efecto inclinado aumenta la velocidad de transporte de carga de fondo en la dirección de la pendiente descendente y se reduce en la dirección de la pendiente ascendente. Valor 1 por defecto.
- *Formula for deviation*: fórmula de desviación. Se elige para la corrección de dirección. Valor 1 por defecto.
- *Slope effect*: efecto de pendiente.
- *Friction angle of the sediment*: ángulo de fricción del sedimento
- *Beta*: factor empírico con valor por defecto de 1,3.
- *Parameter for deviation*: parámetro de desviación. Valor de 0,85 por defecto.

- *Sediment slide*: deslizamiento de sedimentos
- *Secondary currents*: corrientes secundarias. Se activa para el transporte de carga de fondo. No, opción por defecto.
- *Secondary currents alpha coefficient*: coeficiente alpha para corrientes secundarias. Se activa para el transporte de carga de fondo. Valor 1, opción por defecto.
- *Correction on convection velocity*: corrección de la velocidad de convección
- *Mass concentration*: concentración de masa
- *Option for the treatment of non erodable beds*: opción para el tratamiento de cama no erosionables. Limita la erosión del fondo. Se elige un valor de 3 para minimizar la descarga sólida en elementos finitos.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se analizan los resultados hidrodinámicos y sedimentológicos obtenidos de la solución de cada ensayo para bocatomas con bifurcación a 90° con aristas vivas. El programa Bluekenue y Tecplot 360 EX 2017 R2 es utilizado para analizar, visualizar y presentar los resultados de forma interactiva.

Para el estudio de los resultados se creó una polilínea (Ilustración 5-1) dentro de la superficie, que contiene 5 puntos cada cierta distancia según el modelo, dando un total de 125 puntos que arrojan resultados, visualizados en el programa Bluekenue (Ilustración 5-2).

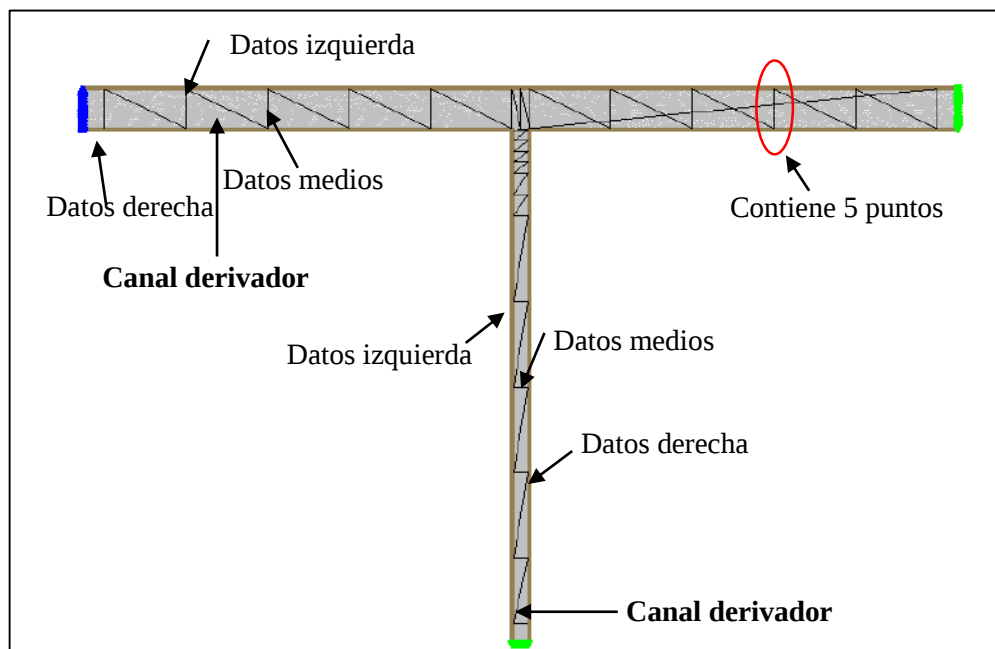


Ilustración 5-1 Ubicación de la polilínea que contendrá los puntos que se tomarán para representar los resultados hidrodinámicos y sedimentológicos

Fuente: Elaboración propia

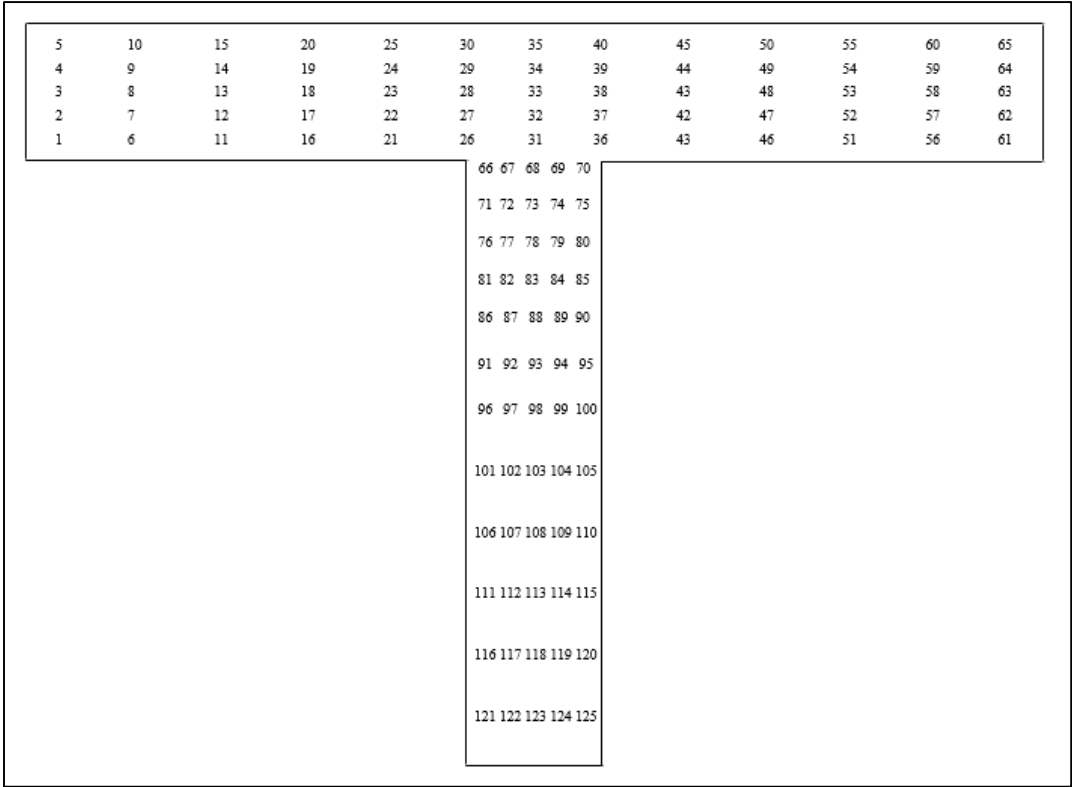


Ilustración 5-2 Numeración de los 125 puntos que almacenarán los datos a estudiar
Fuente: Elaboración propia

5.1. Resultados hidrodinámicos

A continuación, se exponen los resultados hidrodinámicos para los 3 modelos estudiados.

Las Ilustraciones 5-3a, 5-3b, 5-3c muestran la superficie de los modelos que se toman en cuenta para el análisis, con un ancho de bifurcación de 1 m, 2 m y 5 m respectivamente.

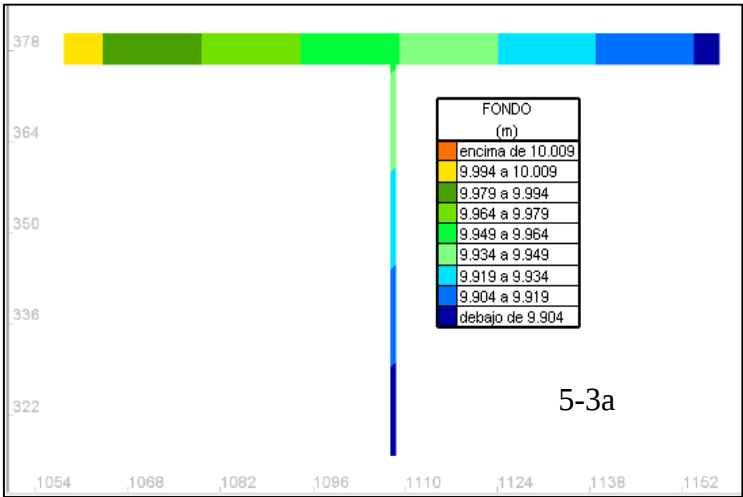
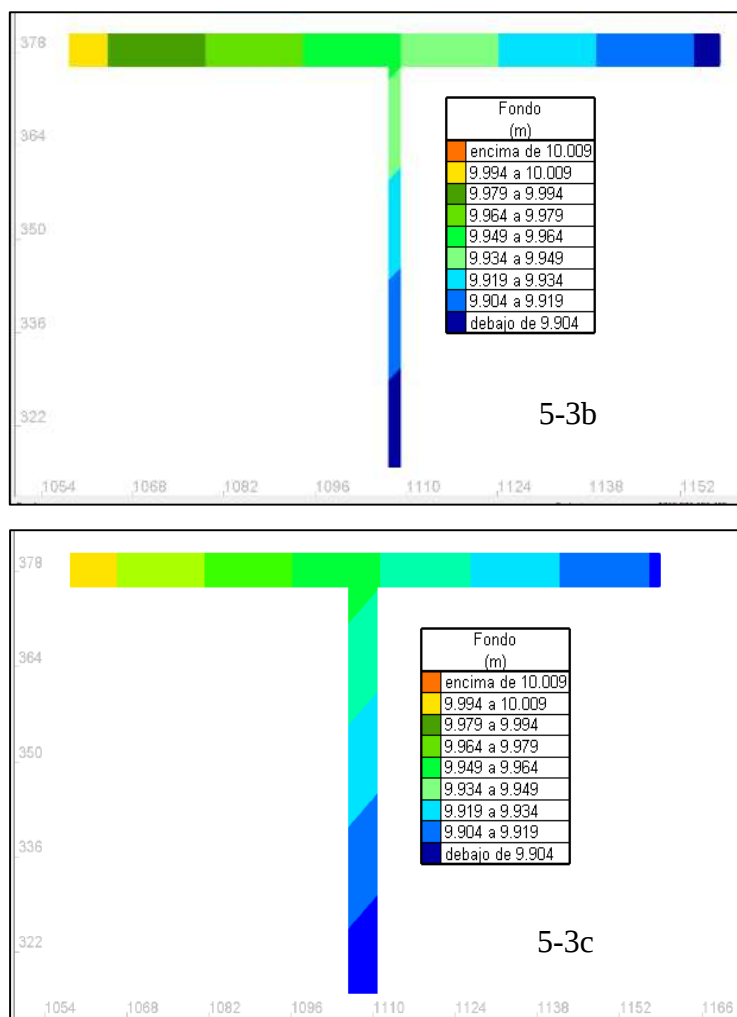


Ilustración 5-3 Superficie de la bocatoma con una bifurcación a 90° con aristas vivas
Fuente: Elaboración propia



Continuación de Ilustración 5-3 Superficie de la bocatoma con una bifurcación a 90° con aristas vivas
Fuente: Elaboración propia

5.1.1 Caudales

En la Tabla 5-1 se pueden observar los resultados de la captación de flujo, en un tiempo de 16 minutos 57 segundos, para la entrada al canal principal (Q) y salida del canal derivador (Q_1) y extensión del canal principal (Q_2). Se observa que a medida que el ancho de la bifurcación aumenta, la captación de flujo aumenta. Guardando relación de a mayor ancho mayor caudal captado.

Tabla 5-1 Resultados de los caudales para los 3 modelos estudiados
Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas

Modelos	Ancho del canal derivador	Caudales			% caudales de salida	
	b' m	Q m ³ /s	Q ₁ m ³ /s	Q ₂ m ³ /s	Q ₁ %	Q ₂ %
Modelo 1	1	28.670	2.484	26.186	8.665	91.335
Modelo 2	2	28.670	5.245	23.425	18.295	81.705
Modelo 3	5	28.670	8.162	20.508	28.470	71.530

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5-2 e Ilustración 5-4 muestran la relación de bocatoma (apartado 2.3) que es la relación entre el gasto específico del canal derivador y principal. Se observa que a medida que aumenta el ancho del canal derivador la relación de bocatoma Q_1/Q aumenta. Lo contrario pasa con la relación de tirantes, a mayor ancho disminuye el tirante de agua.

Tabla 5-2 Datos para obtener la relación de bocatoma

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas					
Modelos	Ancho del canal derivador	Relación de bocatoma	Tirante según caudal de salida	Tirante de caudal de entrada	Relación de tirantes
	b'/m	Q_1/Q	y_1/m	y/m	y_1/y
Modelo 1	1	0.087	2.277	2.500	0.911
Modelo 2	2	0.183	1.785	2.500	0.714
Modelo 3	5	0.285	1.023	2.500	0.409

Fuente: Elaboración propia

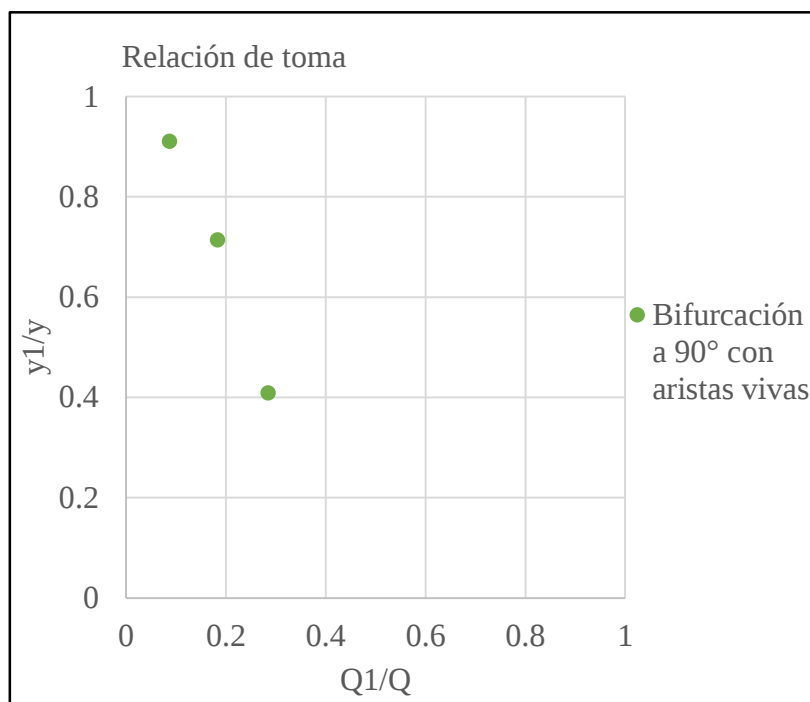


Ilustración 5-4 Gráfica de "Relación de bocatoma" para una bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas

Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Líneas de corriente de agua

En la Ilustración 5-5 se muestra las direcciones de la velocidad del flujo de la bocatoma hacia la bifurcación.

Se observa una zona de recirculación abc (flujos inversos al sentido de la corriente de agua) ubicada al lado derecho aguas arriba del canal derivador, donde el flujo forma vórtices,

esto se debe a la separación que sufre el flujo al cambiar de dirección del canal principal al derivador.

Esta zona reduce el ancho geométrico a un ancho efectivo. A partir del punto “c” hasta aguas abajo de la bifurcación el flujo sigue la trayectoria recuperando todo su ancho geométrico.

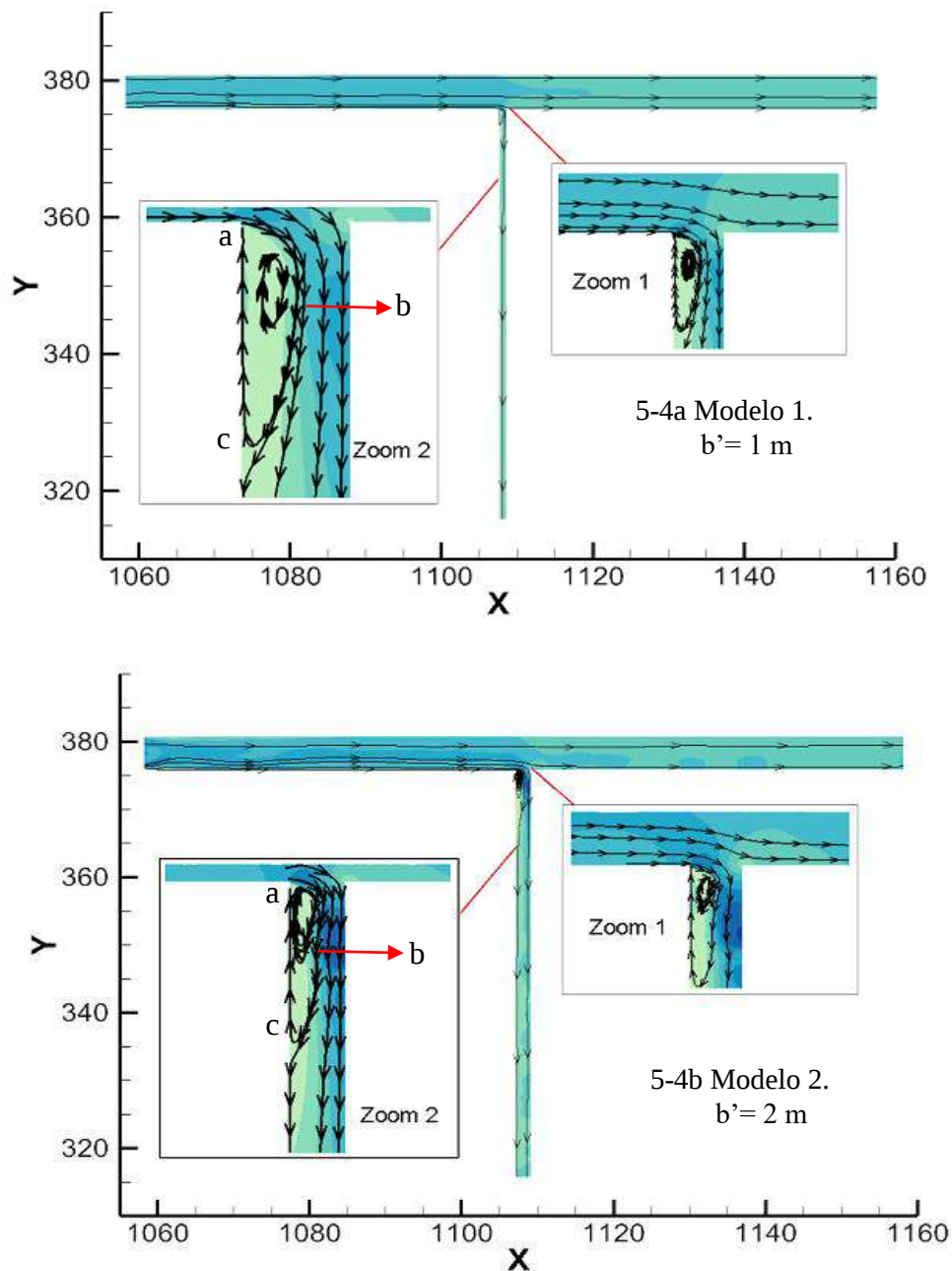
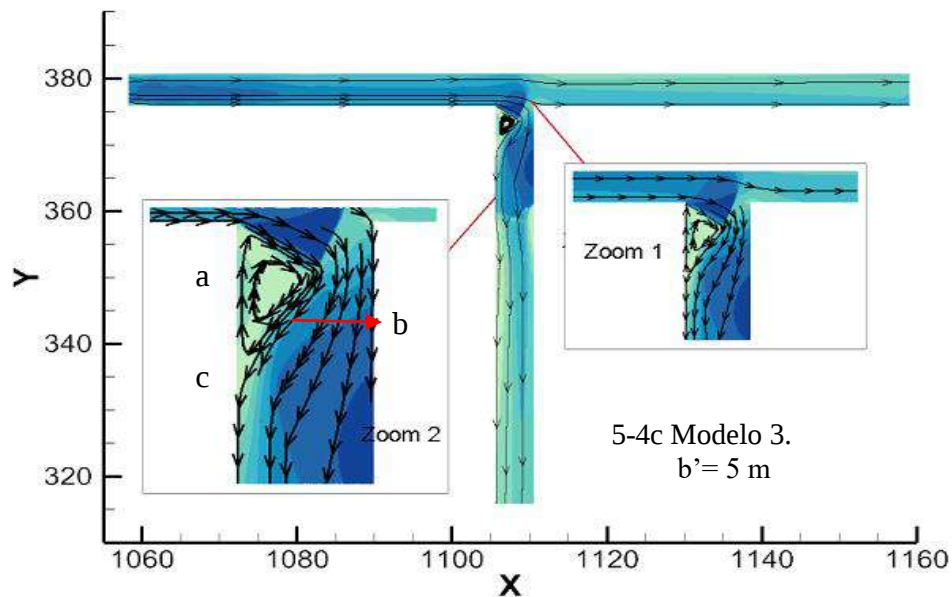


Ilustración 5-5 Dirección del vector velocidad para los ensayos de los modelos 1, 2 y 5 visualizados en Tecplot
Fuente: Elaboración propia



Continuación de Ilustración 5-5 Dirección del vector velocidad para los ensayos de los modelos 1, 2 y 5 visualizados en Tecplot

Fuente: Elaboración propia

5.1.2.1 Zonas de recirculación

Las zonas de recirculación son remolinos ocasionados por la dirección opuesta al flujo general, ubicadas aguas arriba y a la esquina izquierda del canal derivador. Se observa en la Ilustración 5-6 que estas zonas disminuyen el ancho de captación “b” tomando diferentes formas y áreas a medida que aumenta el ancho del canal derivador, provocando cambios en el estado del flujo.

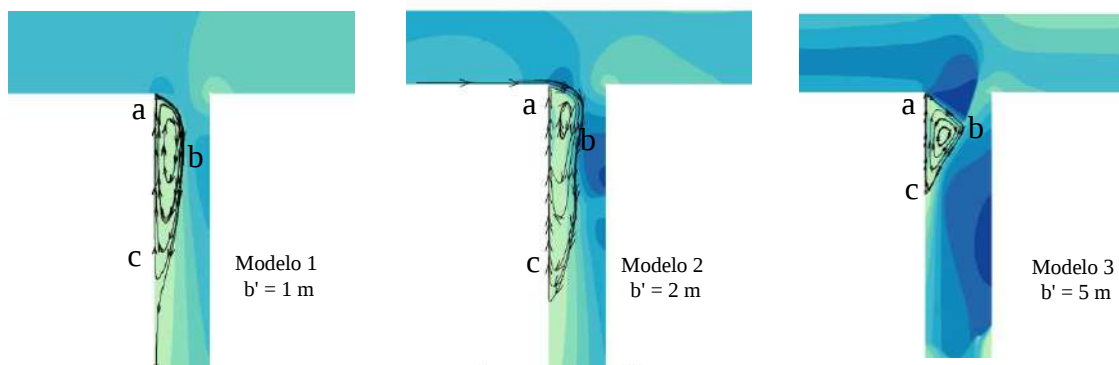


Ilustración 5-6 Zonas de recirculación

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la simulación de los modelos numéricos presentados en la Ilustración 5-6 rectifican lo expuesto por Wai Law (apartado 2.5.6) que concluye que la zona de recirculación termina aguas abajo del canal derivador. Las zonas de recirculación no terminan aguas abajo del canal derivador.

La Ilustración 5-7 muestra el esquema de los modelos estudiados en la presente tesis, ubicando la zona de recirculación y reducción del ancho geométrico, mencionados

anteriormente. Se denomina cb' a la zona de reducción, donde “c” es el coeficiente de contracción que afecta al ancho geométrico de la bifurcación.

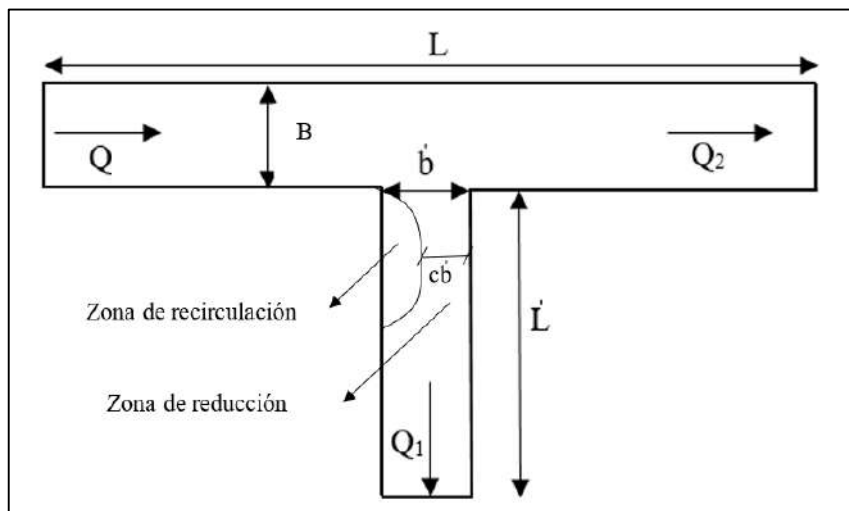


Ilustración 5-7 Ubicación de la zona de reducción

Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de contracción se halla mediante los resultados de Telemac-2D observados en Bluekenue (Tabla 5-3), y por la Ecuación 2-11 de Chung Cheih (Tabla 5-4) mencionada en el apartado 2.5.6.

Tabla 5-3 Coeficiente de contracción hallado mediante el programa Bluekenue

	Coeficiente de contracción					
	Zona de recirculación		$c b'$	b'	$B = 5 \text{ m}$	
	Ancho m	Largo m	Ancho efectivo m	Ancho geométrico m	b'/B	c
Modelo 1	0.500	2.300	0.500	1	0.200	0.500
Modelo 2	1.200	6.800	0.800	2	0.400	0.400
Modelo 3	3.200	6.700	1.800	5	1	0.360

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-4 Coeficiente de contracción hallado mediante la fórmula de Chung Cheih

Coeficiente de contracción				
Modelos	$c b'$	b'	$B = 5 \text{ m}$	
	Ancho contraído m	Ancho real m	b'/B	c
Modelo 1	0.452	1	0.200	0.452
Modelo 2	0.513	2	0.400	0.257
Modelo 3	0.503	5	1	0.101

Fuente: Elaboración propia

Se observa en las Tablas 5-3 y 5-4 que el coeficiente de contracción se reduce a medida que aumenta el ancho de la bifurcación. Se demuestra lo expuesto en las investigaciones de Wai Law (apartado 2.5.6) respecto a la localización de zonas de recirculación aguas arriba del canal derivador, las cuales reducen el ancho geométrico afectado por un coeficiente de contracción “c”.

Los resultados de simulación de los modelos numéricos (Tabla 5-4) demuestran que a medida que las relaciones de descarga aumentan (incremento del ancho del canal derivador) la región de recirculación en este canal se extiende tanto a lo largo como ancho del mismo. Rectifican lo expuesto en las investigaciones de Wai Law (apartado 2.5.6) que concluye que a medida que las relaciones de descarga se hacen más pequeñas la región de recirculación en el canal derivador se extiende tanto a lo largo como ancho del canal.

La Ilustración 5-8 muestra la influencia del ancho del canal derivador en el coeficiente de contracción, a partir de los datos de las tablas anteriores. Se guarda relación para ambos casos a mayor ancho del canal derivador menor coeficiente de contracción.

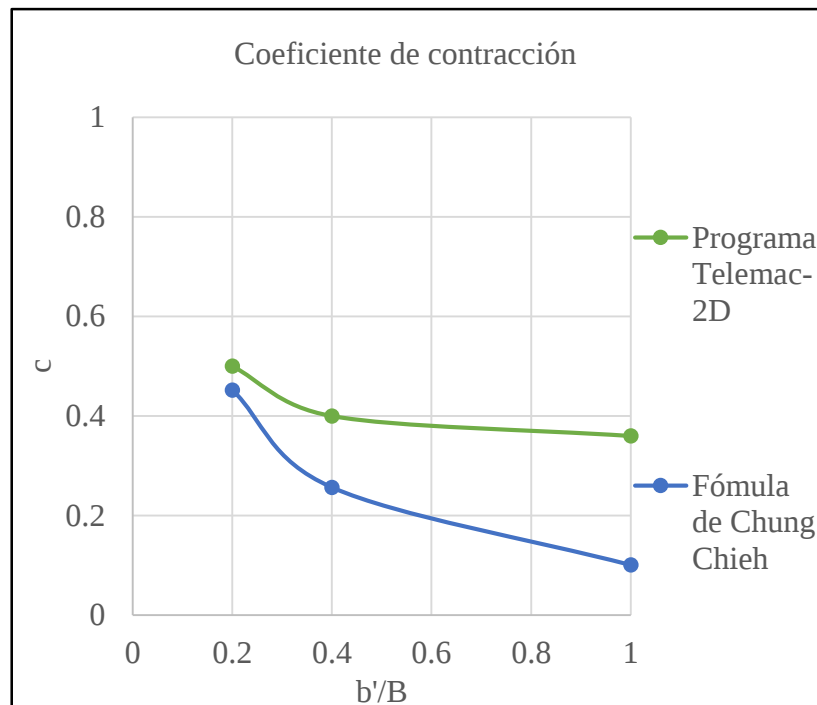


Ilustración 5-8 Relación de coeficiente de contracción vs b/B

Fuente: Elaboración propia

Se trabaja con los datos de las áreas de la zona de recirculación dadas por los resultados de Telemac-2D.

Las áreas de las zonas de recirculación, influyen en los datos presentados en los apartados 5.1.3, 5.1.4 y 5.1.5 con respecto a los puntos de la derecha, medio e izquierda para el canal principal e izquierda, medio y derecha para el canal derivador. Las áreas de recirculación abarcan los puntos izquierdos y medios ubicados en el canal derivador, nunca llegan a tocar los puntos derechos.

5.1.3 Número de Froude

El flujo presenta tres estados: crítico $F = 1$, subcrítico $F < 1$ o supercrítico $F > 1$.

En la Ilustración 5-9 se observa a la entrada del canal principal para los modelos 1 y 2 un flujo en estado subcrítico, caso contrario para el modelo 3 donde el flujo en los puntos medios llega a un estado supercrítico.

La zona de ingreso al canal derivador en el canal principal presenta una reducción del número de Froude a consecuencia de la zona de recirculación presente en canal derivador.

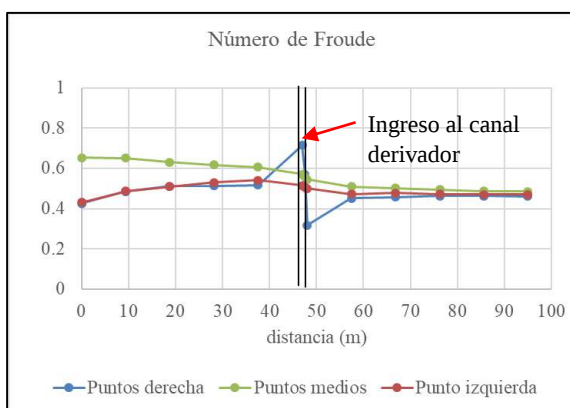
El flujo para los 3 modelos pasada la zona de ingreso al canal derivador se mantiene en un estado subcrítico ($F < 1$) hasta llegar aguas abajo de la extensión del canal principal.

En el canal derivador se observa para los 3 modelos que el número de Froude disminuye siempre en la zona de recirculación, de un estado supercrítico a subcrítico para los modelos 2 y 3. Pasada la zona de recirculación el flujo en los 3 modelos se mantiene en estado subcrítico hasta llegar aguas abajo del canal.

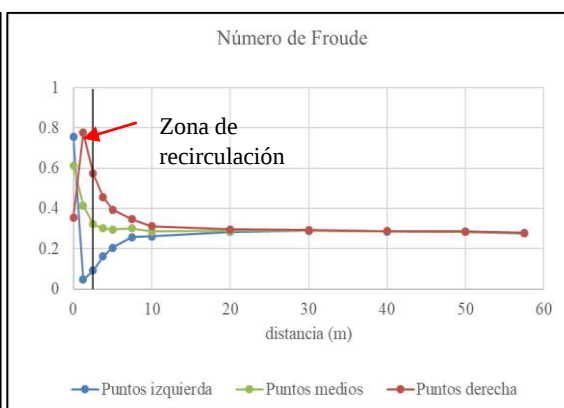
Se comprueba lo expuesto por Law en sus investigaciones (apartado 2.5.6), cuando $F > 0,5$ las regiones de extensión del flujo varían, tal como se muestra en la Ilustración 5-9.

Modelo 1: $b' = 1 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$

Canal principal

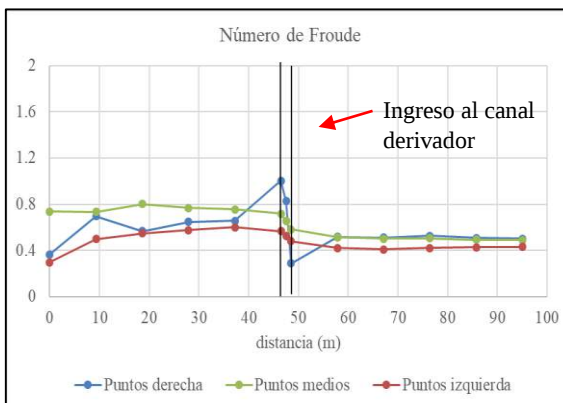


Canal derivador



Modelo 2: $b' = 2 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$

Canal principal



Canal derivador

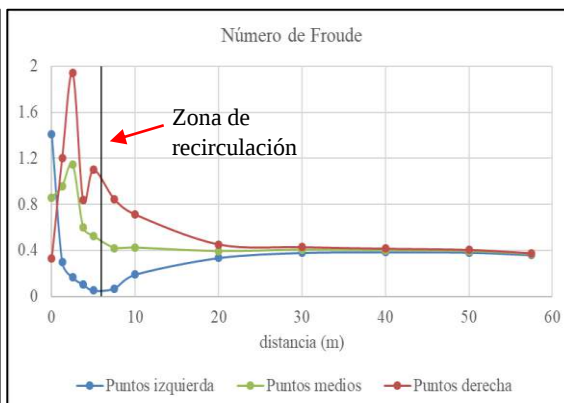
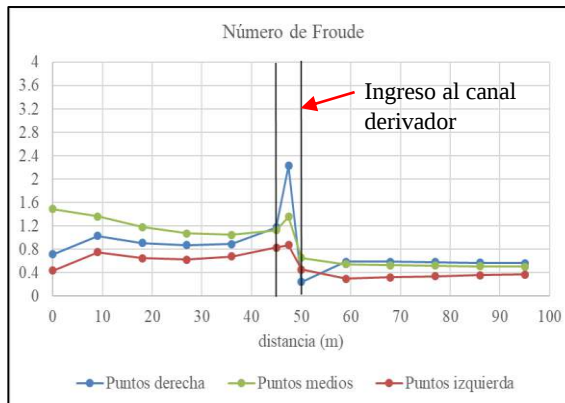
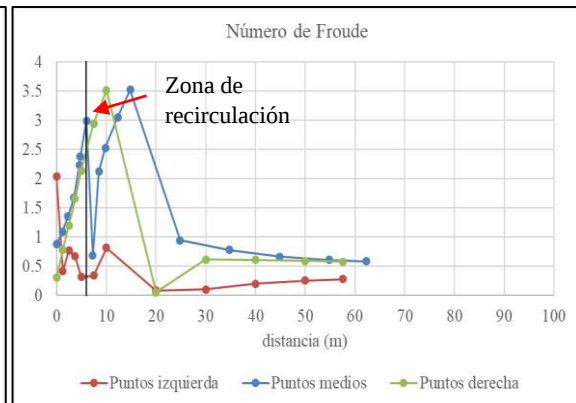


Ilustración 5-9 Número de Froude para el canal principal y derivador
Fuente: Elaboración propia

Modelo 3: $b' = 5 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$ **Canal principal****Canal derivador**

Continuación de la Ilustración 5-9 Número de Froude para el canal principal y derivador
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5-5 muestra un cuadro resumen que localiza el estado del flujo en el canal principal y derivador, así como el resalto hidráulico que produce el cambio de un flujo supercrítico a subcrítico.

Tabla 5-5 Localización de los flujos subcríticos/supercríticos turbulentos y saltos hidráulicos

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas				
Anchos de la bifurcación		Modelo 1 $b' = 1 \text{ m}$	Modelo 2 $b' = 2 \text{ m}$	Modelo 3 $b' = 5 \text{ m}$
Canal principal	Canal principal	Flujo subcrítico turbulento	Flujo subcrítico turbulento	Flujo supercrítico/subcrítico turbulento
	Ingreso al canal secundario	Flujo subcrítico turbulento	Flujo supercrítico/subcrítico turbulento	Flujo supercrítico/subcrítico turbulento
	Extensión del canal principal	Flujo subcrítico turbulento	Flujo subcrítico turbulento	Flujo subcrítico turbulento
Canal secundario	Zona de recirculación	Flujo subcrítico turbulento	Flujo supercrítico/subcrítico turbulento	Flujo supercrítico/subcrítico turbulento
	Aguas abajo	Flujo subcrítico turbulento	Flujo subcrítico turbulento	Flujo supercrítico/subcrítico turbulento
Resalto hidráulico	Canal principal	No	Sí	Sí
	Canal secundario	No	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia

En el Apéndice A se pueden observar los 125 valores extraídos del número de Froude para el canal principal y derivador.

5.1.4 Tirante y Nivel de agua

En la Ilustración 5-10 se puede observar el aumento del tirante para los 3 modelos aguas abajo de la extensión del canal principal. Esto ocurre por el resalto hidráulico presente por los cambios de estado de los flujos descritos en la Tabla 5-5. Aunque el modelo 1 no presenta un resalto hidráulico se observa que existe un aumento del tirante.

Aguas arriba del canal derivador todos los casos sufren un descenso de agua ocasionado por las zonas de recirculación, pasada esta zona se puede observar que el tirante aumenta hasta llegar aguas abajo.

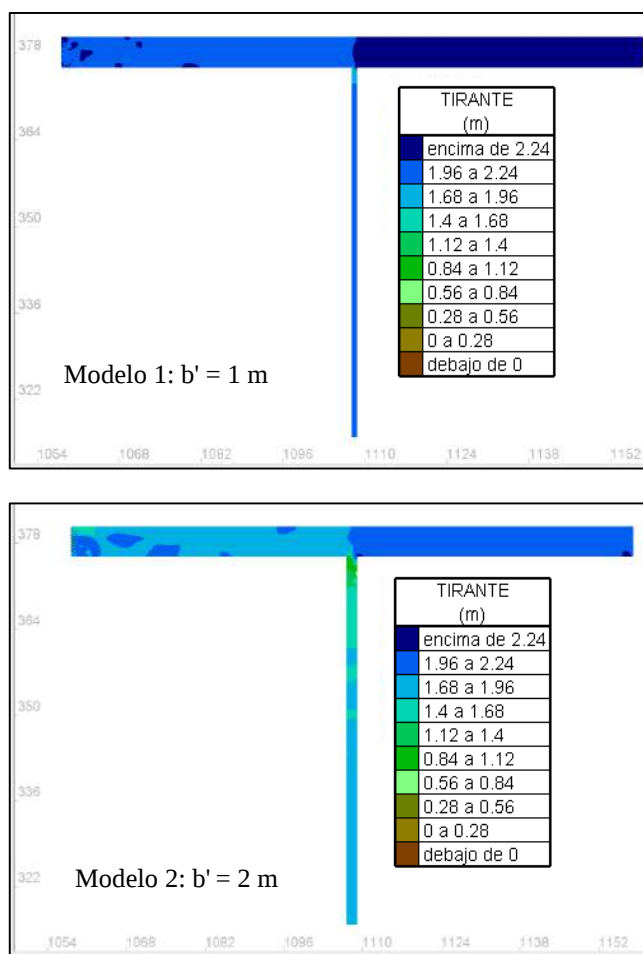
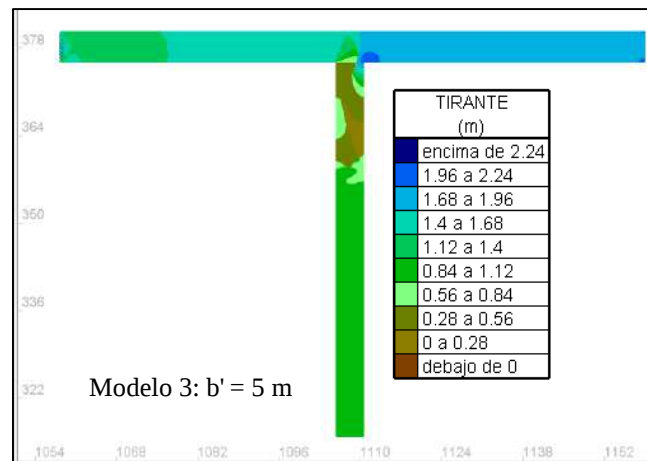


Ilustración 5-10 Niveles de agua a lo largo de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas
Fuente: Elaboración propia



Continuación de la Ilustración 5-10 Niveles de agua a lo largo de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas

Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 5-11 muestra los resultados de los datos obtenidos en los 125 puntos de la superficie de cada modelo para el caso de los niveles de agua. Se visualiza en el canal principal que los datos ubicados en la zona de ingreso al canal derivador (puntos derecha) arrojan un descenso en el nivel de agua, este declive se hace más pronunciado a media que aumenta el ancho y caudal de la bifurcación, así como el área de la zona de recirculación.

También se observa en el canal principal que a medida que los puntos se alejan de la zona de ingreso al canal derivador como es el caso de los puntos medios e izquierda, el nivel de agua no llega a reducirse tan abruptamente, ya que se encuentran alejados de la zona de recirculación. En estos puntos para el modelo 1, el nivel de agua se mantiene constante (flujo subcrítico), comparado con los modelos 2 y 3 que siguen presentando un descenso en estos puntos a pesar que se encuentran fuera de la zona de recirculación, siendo la reducción más pronunciada en el modelo 3 debido a que aumenta el ancho y caudal del canal derivador. Pasada esta zona y seguido el flujo hacia la extensión del canal principal se observa que hay un aumento del nivel de agua para los 3 casos, pero sólo el modelo 2 y 3 presentan un resalto hidráulico que se propaga hasta aguas abajo.

Aguas arriba del canal derivador se observa que el nivel de agua en la zona de recirculación desciende, y a medida que avanza en longitud aumenta hasta llegar aguas abajo. Se observa un mayor descenso de nivel a medida que aumenta el área de esta zona (aumenta el ancho del canal derivador). Los datos de los puntos derecha a pesar que no están dentro de la zona de recirculación, se ven afectados ya que el ancho efectivo del canal se ve reducido, pasada la zona y recuperado el ancho geométrico el nivel de agua aumenta hasta llegar aguas abajo.

El aumento del nivel de agua se debe a los resaltos hidráulicos, descritos en la Tabla 5-5. Esto involucra una pérdida de energía como se puede observar las líneas de color verde. En consecuencia, el contenido de energía en el flujo después del resalto es apreciablemente menor.

En el Apéndice A se pueden observar los 125 valores extraídos de los niveles de agua para el canal principal y derivador.

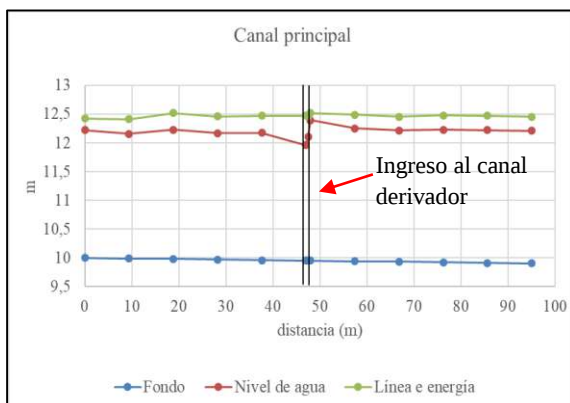
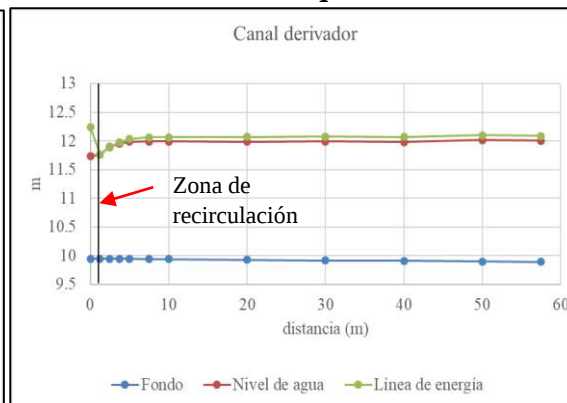
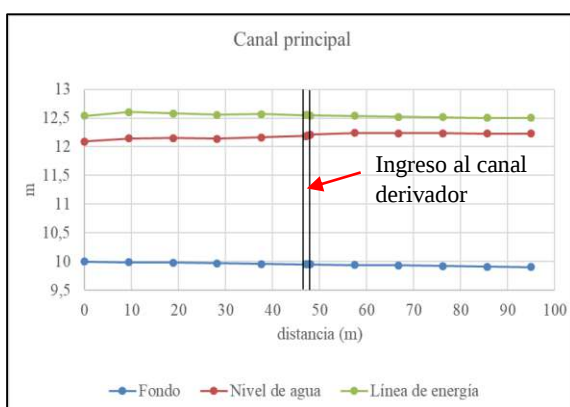
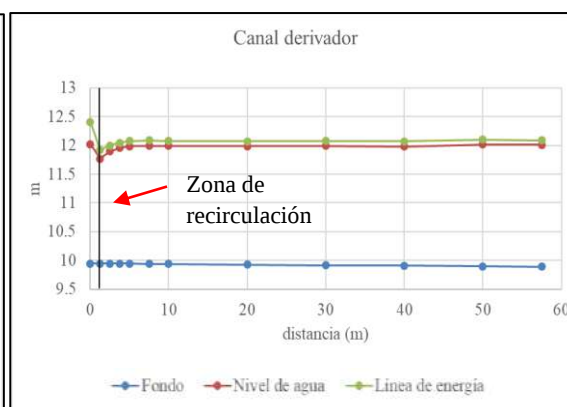
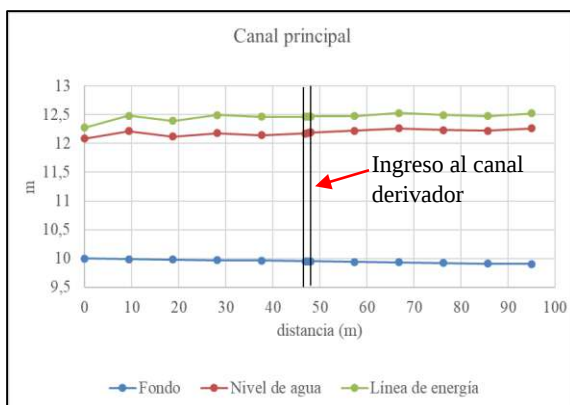
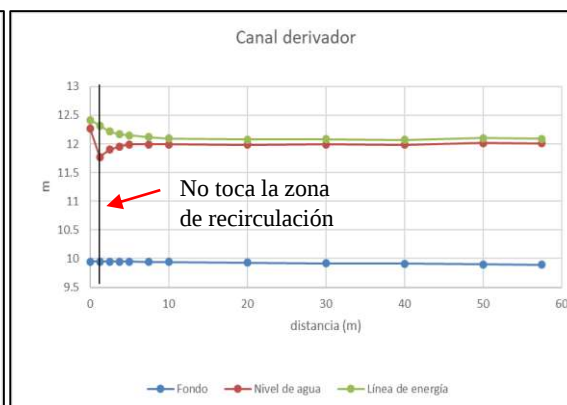
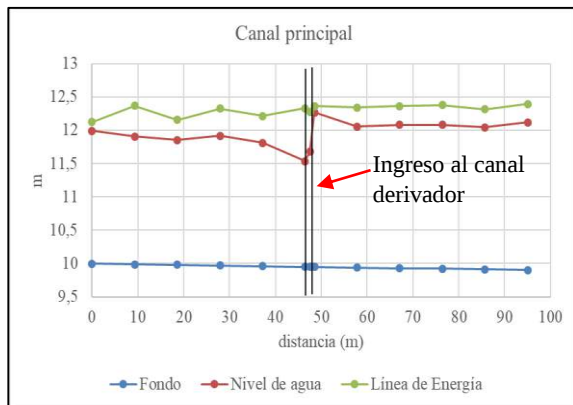
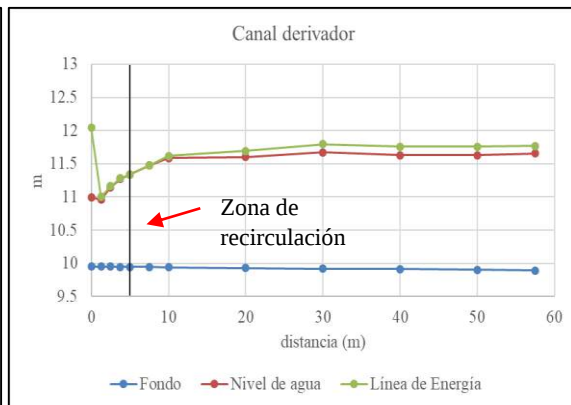
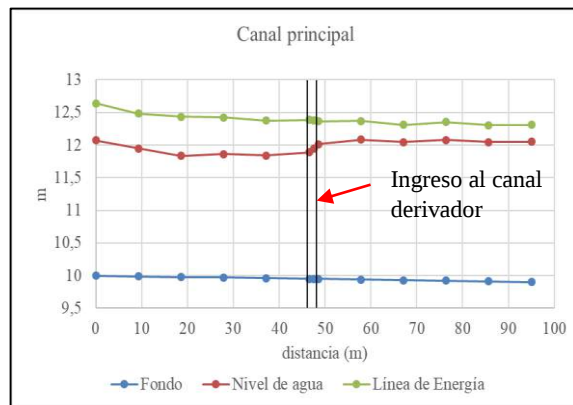
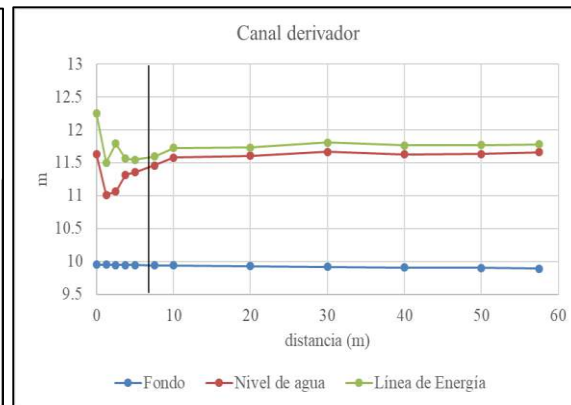
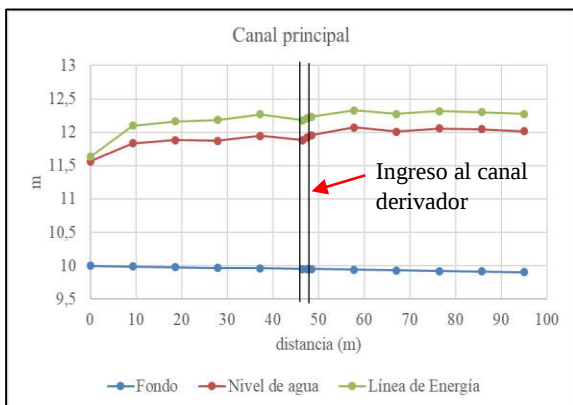
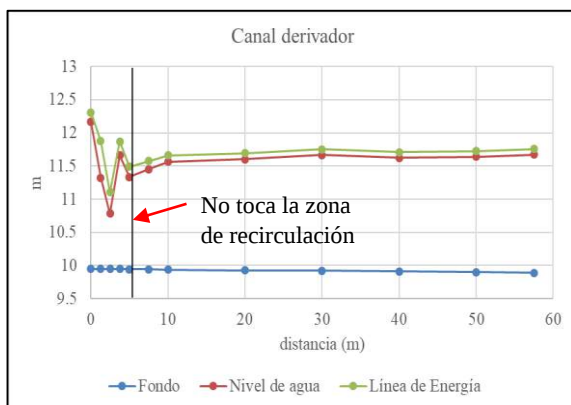
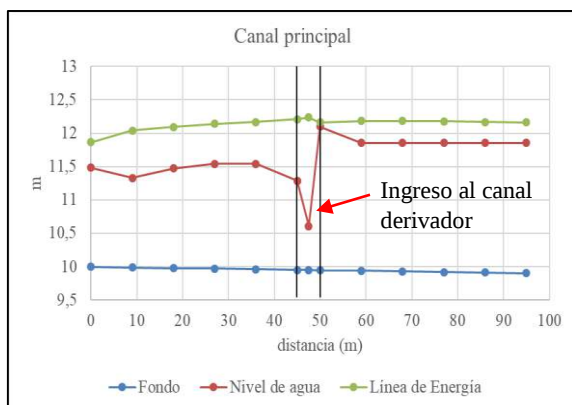
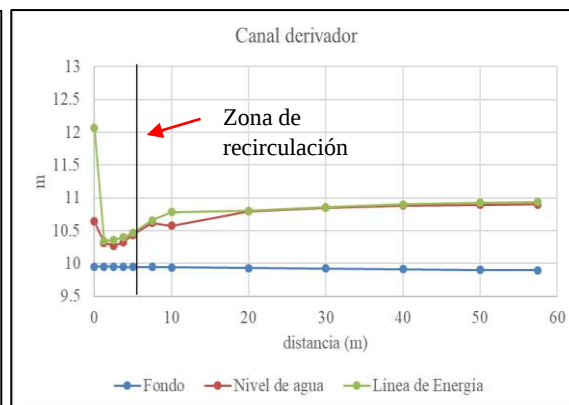
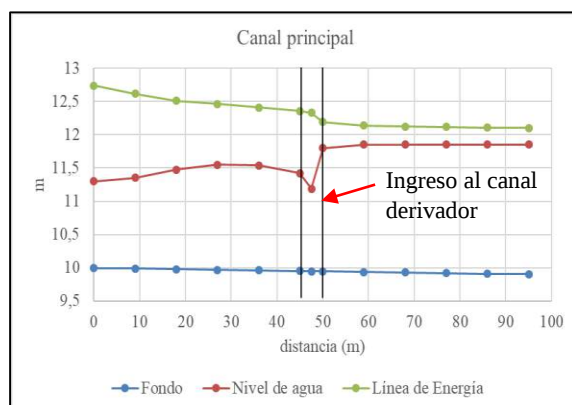
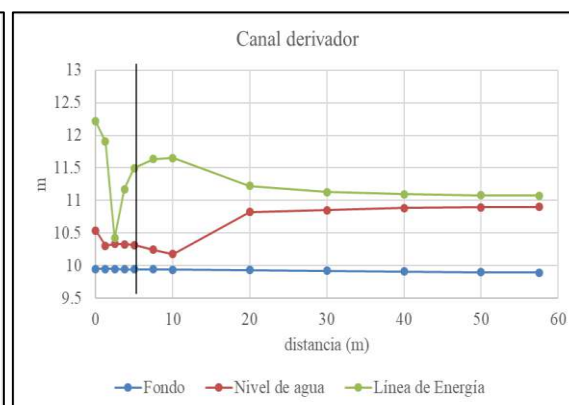
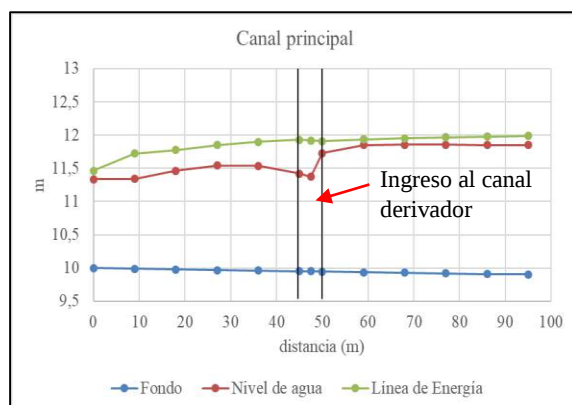
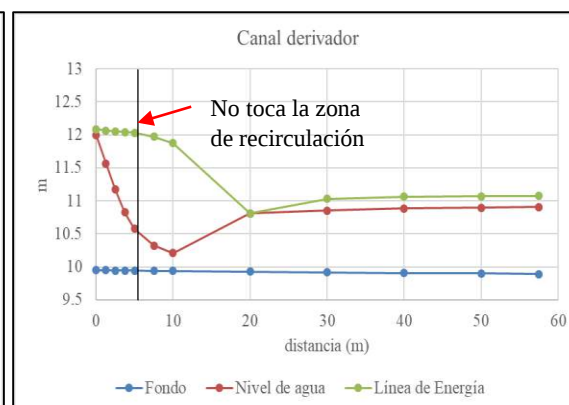
Modelo 1: $b' = 1 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$ **Puntos derecha****Puntos izquierda****Puntos medios****Puntos medios****Puntos izquierda****Puntos derecha**

Ilustración 5-11 Datos del nivel de agua para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos

Fuente: Elaboración propia

Modelo 2: $b' = 2 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$ **Puntos derecha****Puntos izquierda****Puntos medios****Puntos medios****Puntos izquierda****Puntos derecha**

Continuación de la Ilustración 5-11 Datos del nivel de agua para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos
Fuente: Elaboración propia

Modelo 3: $b' = 5 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$ **Puntos derecha****Puntos izquierda****Puntos medios****Puntos medios****Puntos izquierda****Puntos derecha**

Continuación de la Ilustración 5-11 Datos del nivel de agua para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos
Fuente: Elaboración propia

5.1.5 Velocidades

En la Ilustración 5-12 se visualiza la magnitud de la velocidad de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas. La magnitud aumenta de marrón a azul, en la escala de colores.

Se observa una reducción de la velocidad en el flujo para los 3 casos aguas abajo de la extensión del canal principal (pasada la zona del ingreso al canal derivador). Esto se debe al resalto hidráulico (para el modelo 2 y 3).

Para el caso del canal derivador se aprecia que en la zona de recirculación las velocidades disminuyen, recuperando fuerza pasada esta zona y recuperado el ancho geométrico del canal hasta llegar aguas abajo.

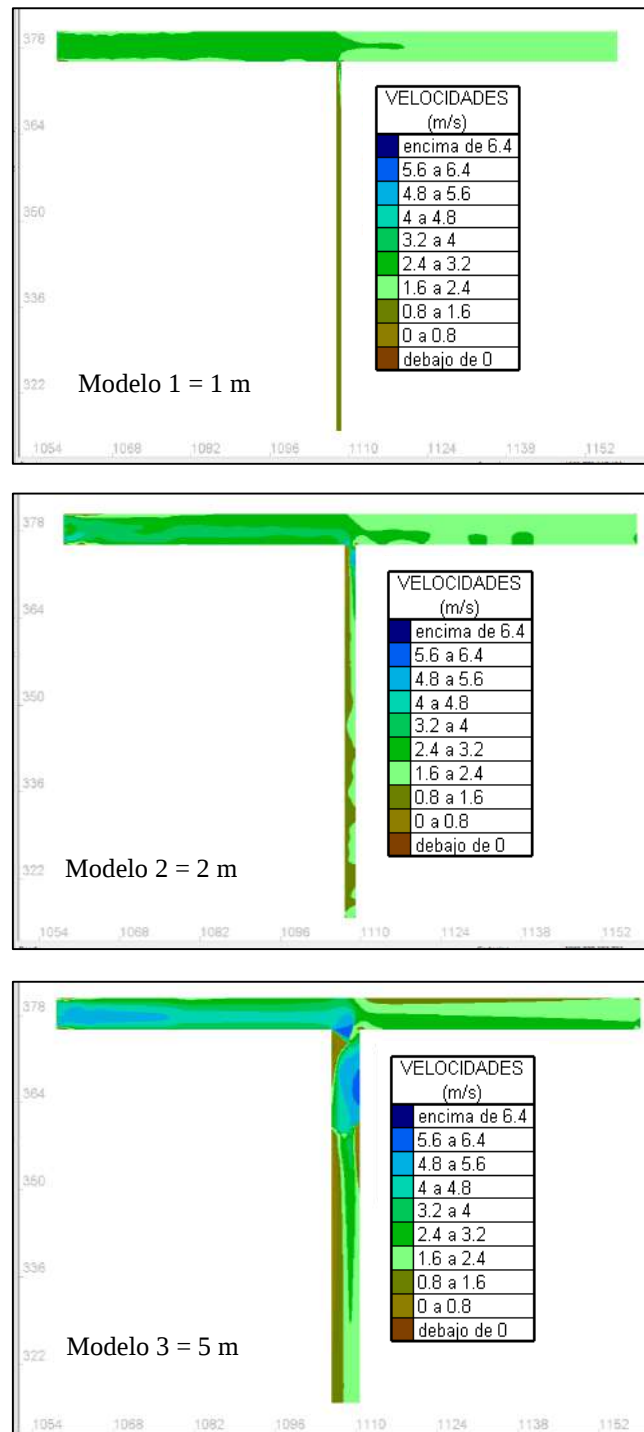


Ilustración 5-12 Velocidades a lo largo de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas
Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 5-13 muestra los datos obtenidos a partir de los 125 puntos distribuidos en la superficie de los canales, dando un mejor detalle del comportamiento de las velocidades. Se observa en los modelos 2 y 3, para la zona del canal principal que abarca el ancho del ingreso al canal derivador, una reducción de velocidad que se mantiene hasta llegar aguas abajo de la extensión del canal principal. Esto ocurre por el cambio de los estados del flujo de supercrítico a subcrítico (resalto hidráulico), puesto que el nivel de agua aumenta y la velocidad disminuye.

El modelo 1 muestra un descenso de velocidades en la extensión del canal principal hasta llegar aguas abajo. Aunque no existe un cambio de estado de flujo, el nivel de agua aumenta como se puede observar en la Ilustración 5-11, es por esto que ocurre la reducción de velocidades.

Para el caso del canal derivador se observa que, en el área de la zona de recirculación para los 3 casos, los datos de los puntos izquierda y medios que abarcan el ancho de esta zona, la velocidad disminuye. Una vez recuperado el ancho geométrico del canal la velocidad aumenta y se mantiene constante hasta llegar aguas abajo. Esto ocurre a causa del resalto hidráulico, a mayor nivel de agua la velocidad se reduce.

En el Apéndice A se pueden observar los 125 valores extraídos de las velocidades para el canal principal y derivador.

Modelo 1: $b' = 1 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$

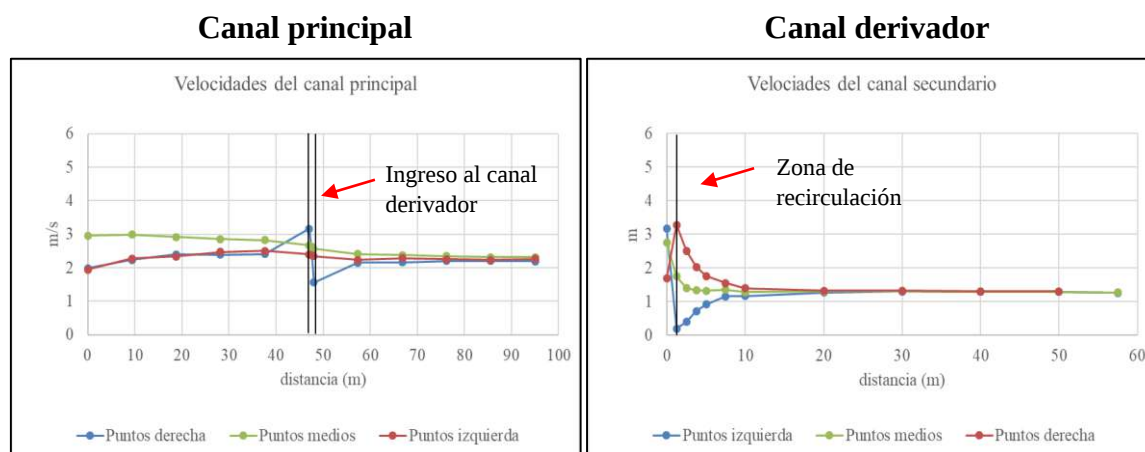
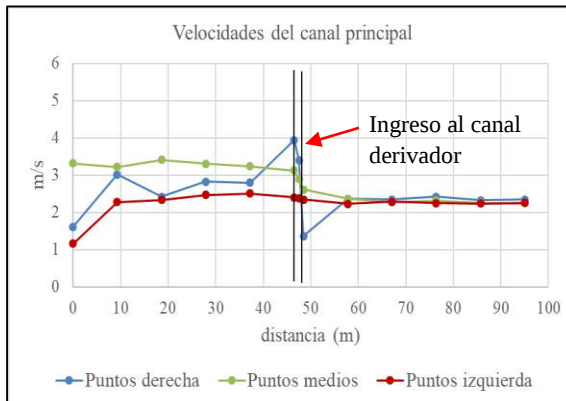
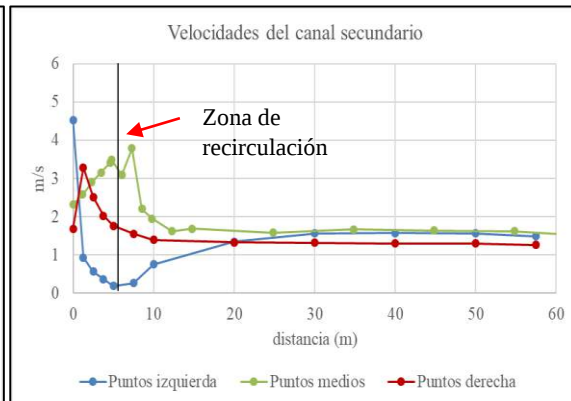
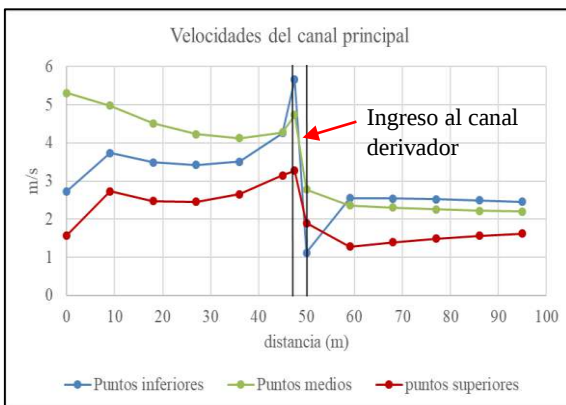
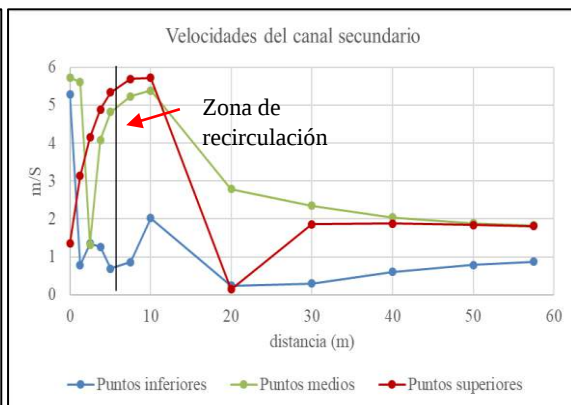


Ilustración 5-13 Datos de las velocidades para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos

Fuente: Elaboración propia

Modelo 2: $b' = 2 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$ **Canal principal****Canal derivador****Modelo 3: $b' = 5 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$** **Canal principal****Canal derivador**

Continuación de la Ilustración 5-13 Datos de las velocidades para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos
Fuente: Elaboración propia

5.2. Resultados sedimentológicos

Se usa sólo transporte de fondo por la mayor repercusión morfológica que causa sobre el río mismo, ya que su desequilibrio causa modificaciones morfológicas, sedimentaciones y fenómenos de gran importancia en la ingeniería fluvial (Martín, 2003).

5.2.1 Zonas sedimentadas

La sedimentación para las bocatomas con bifurcación a 90° con aristas vivas tiene en cuenta la dirección de las líneas de corriente, así como las futuras formaciones de zonas de recirculación, y las velocidades que presentan.

La Ilustración 5-14 y 5-15 muestra la trayectoria de las corrientes de agua mezcladas con partículas de diámetro 1,2 mm. Así como zonas de recirculación que se forman en el canal derivador.

Las velocidades se muestran en el Apéndice B.

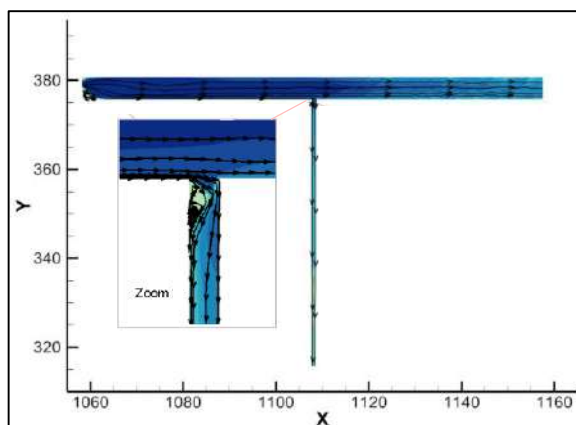
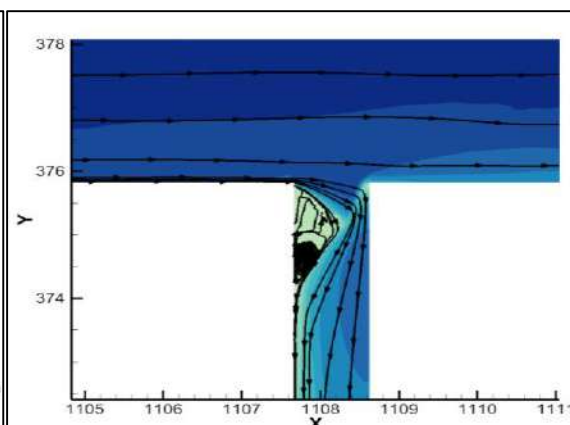
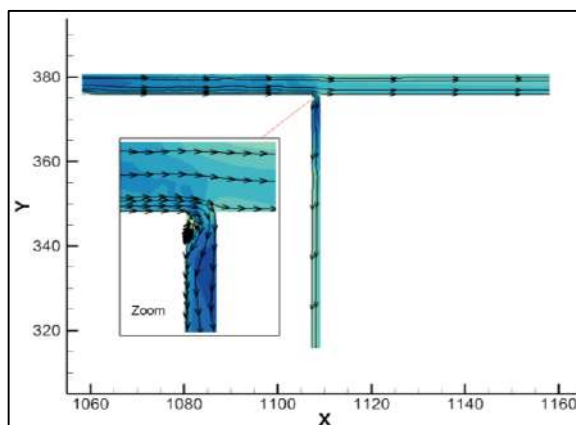
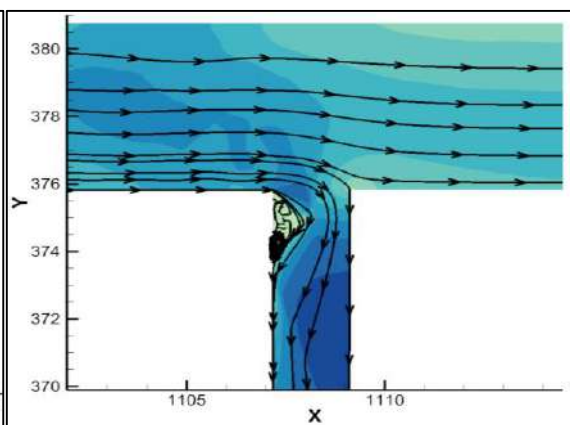
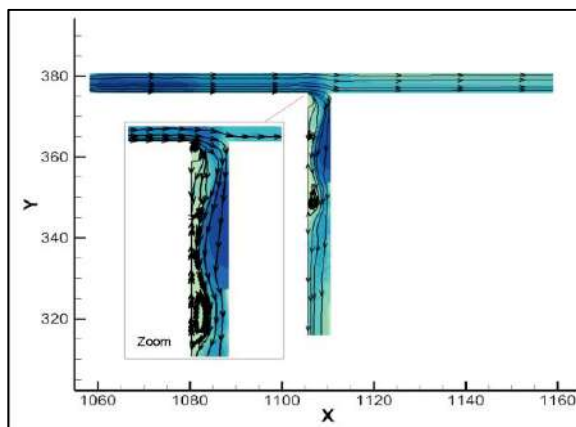
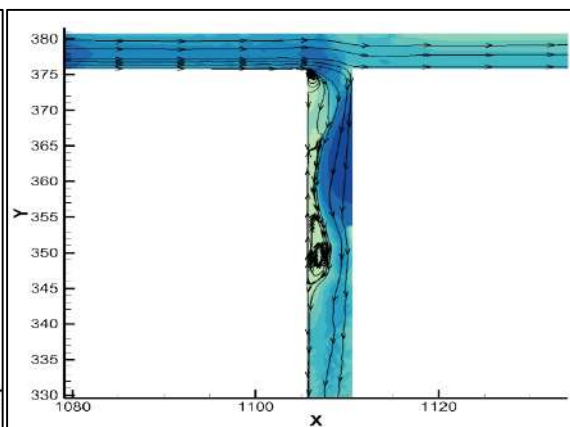
Modelo 1: $b' = 1 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$ **Líneas de corriente****Zonas de recirculación****Modelo 2: $b' = 2 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$** **Líneas de corriente****Zonas de recirculación****Modelo 3: $b' = 5 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$** **Líneas de corriente****Zonas de recirculación**

Ilustración 5-14 Trayectoria del agua mezclada con sedimentos de diámetro 1,2 mm
Fuente: Elaboración propia

Se observan cambios en las zonas de recirculación tanto a lo largo y ancho del canal derivador, dependiendo de su ancho. Siendo el cambio más notable en el modelo 3, ancho del canal principal y derivador 5 m, donde la zona de recirculación llega hasta la mitad de la longitud del canal. Por lo que se comprueba lo dicho por Bulle, de que las zonas de recirculación llegan a ocupar aproximadamente la mitad del ancho geométrico del canal.

A continuación, la Tabla 5-6 muestra los resultados de las dimensiones de estas áreas encontradas en las modelaciones con sedimento de diámetro de 1,2 mm en Telemac-2D, así como su respectivo coeficiente de contracción.

Tabla 5-6 Datos de las zonas de recirculación para partículas de diámetro 1,2 mm

Modelos	Coeficiente de contracción					
	Ancho m	Largo m	Ancho efectivo m	Ancho geométrico(b') m	b'/B	c
Modelo 1	0.400	1.700	0.600	1	0.200	0.600
Modelo 2	0.900	2.200	1.100	2	0.400	0.550
Modelo 3	2.500	30.200	2.500	5	1	0.500

Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 5-15 muestra los valores del coeficiente de contracción tanto para los ensayos con agua, como para agua mezclada con partículas de arena. Se observa que hay un mayor valor de los coeficientes de contracción para los ensayos de agua con partículas de diámetro 1,2 mm. Esto indica que el área de la zona de recirculación es menor, en tanto la zona de contracción es mayor para el canal derivador.

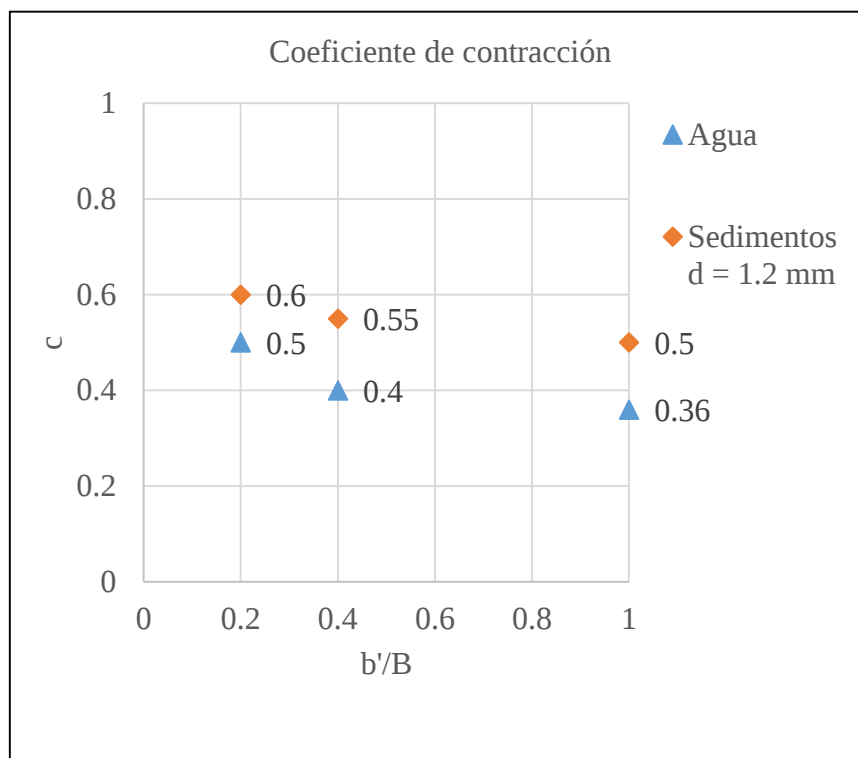


Ilustración 5-15 Valores de coeficiente de contracción de los modelos estudiados

Fuente: Elaboración propia

Las Ilustraciones 5-16 muestran el fondo original de los canales estudiados y el fondo sedimentado, en un tiempo de 30 minutos.

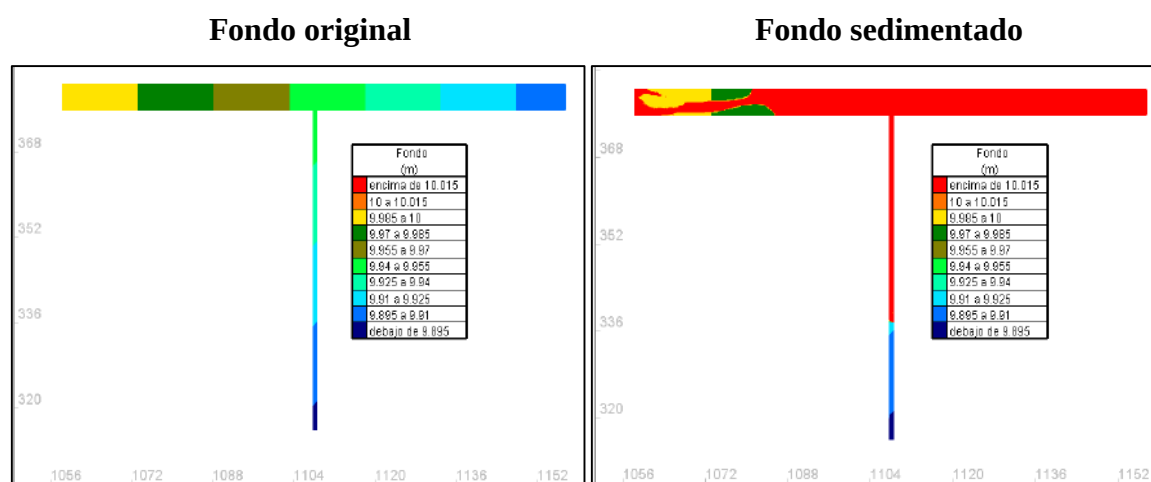
En escala de colores, el fondo sedimentado (acumulación de sedimentos) aumenta de azul a naranja.

Se observa que las zonas donde existe mayor sedimentación, tanto en el canal principal como derivador, se da en el modelo 1. Los modelos 2 y 3 presentan menor zonas de sedimentación, no llega a colmatar el fondo aguas debajo de la extensión del canal principal.

Se comprueba lo expuesto por Bulle de que la tendencia del material sólido de fondo tiende a dirigirse hacia el canal derivador como una consecuencia de la pendiente transversal que se crea en la bifurcación. A este fenómeno se le denomina efecto Bulle.

Los tres modelos no presentan sedimentación aguas abajo del canal derivador.

Modelo 1: $b' = 1 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$



Modelo 2: $b' = 2 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$

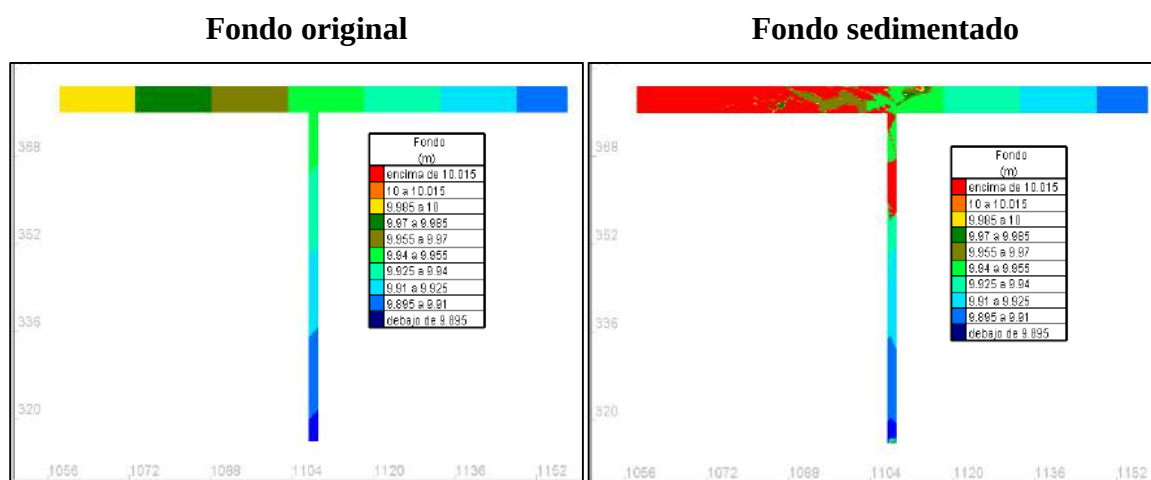
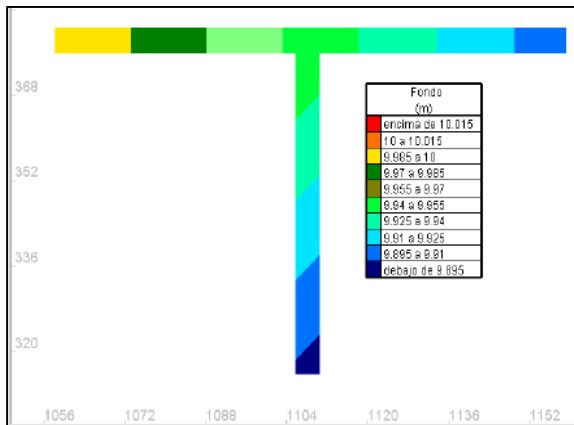
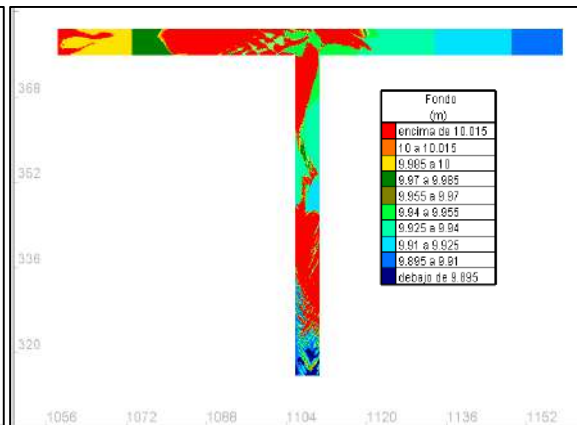


Ilustración 5-16 Zonas sedimentadas a lo largo de la bocatoma con bifurcación a 90° , para diámetro de sedimento de 1,2 mm

Fuente: Elaboración propia

Modelo 3: $b' = 5 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$ **Fondo original****Fondo sedimentado**

Continuación de la Ilustración 5-16 Zonas sedimentadas a lo largo de la bocatoma con bifurcación a 90°, para diámetro de sedimento de 1,2 mm

Fuente: Elaboración propia

En el Apéndice B se pueden observar los 125 valores extraídos del cambio de fondo original y fondo sedimentado (evolución de fondo) para el canal principal y derivador.

La Ilustración 5-17 muestran los resultados de los datos obtenidos en los 125 puntos de la superficie de cada modelo para el caso de las acumulaciones de sedimentos.

Se visualiza que en el modelo 1 se tiene una mayor zona de sedimentación tanto en el canal principal como derivador. Ocasionando que el nivel de agua sea mayor al establecido (12,5 m), teniendo como consecuencia un desborde de agua (ver Apéndice B).

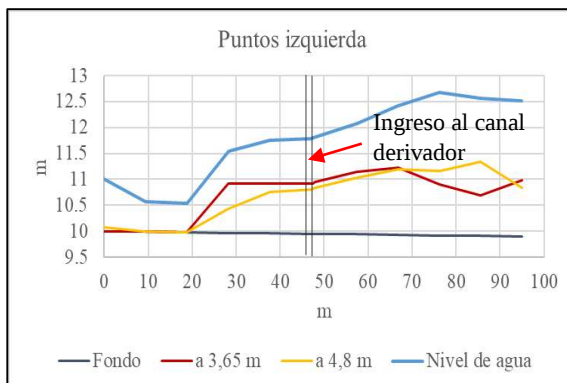
A medida que aumenta el ancho del canal derivador y por consiguiente la captación de agua, se observa que para el modelo 2 y 3 no llega a sedimentarse aguas abajo tanto para la extensión del canal principal como derivador.

Las formas sedimentadas de fondo son dunas triangulares con taludes muy diferentes. Aumentado más velocidad, las dunas se alargan hasta ser barridas quedando un lecho plano. (Martín, 2003)

Diámetro de partícula = 1.2 mm

Modelo 1: $b' = 1$ m, $B = 5$ m

Canal principal



Canal derivador

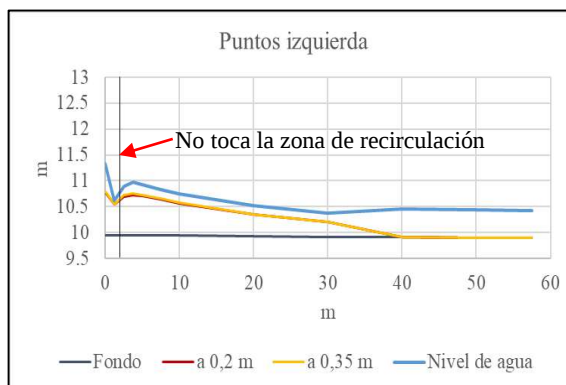
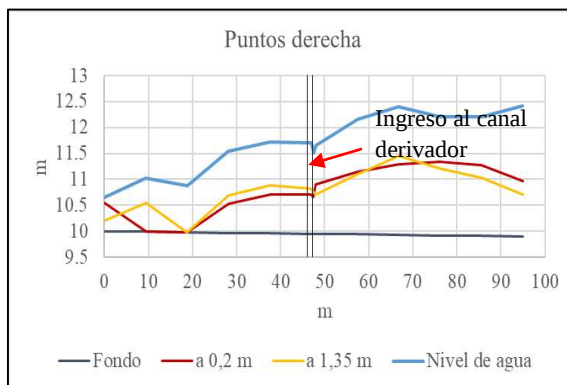
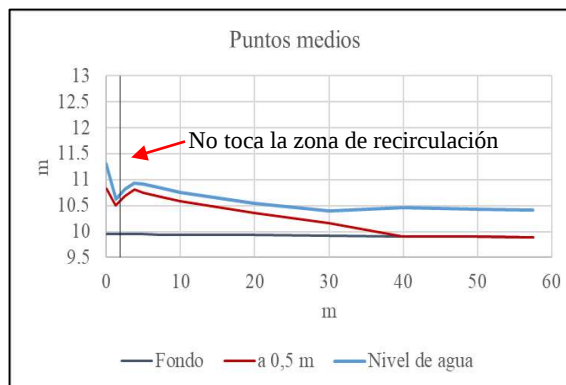
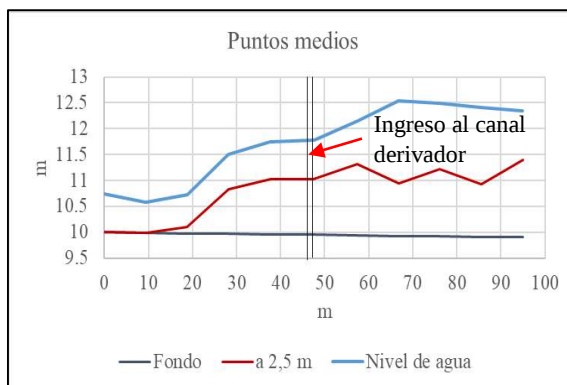
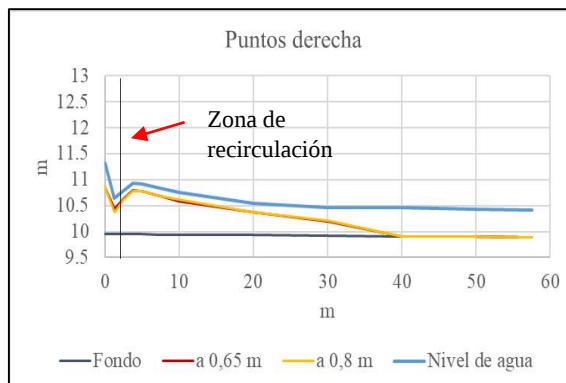
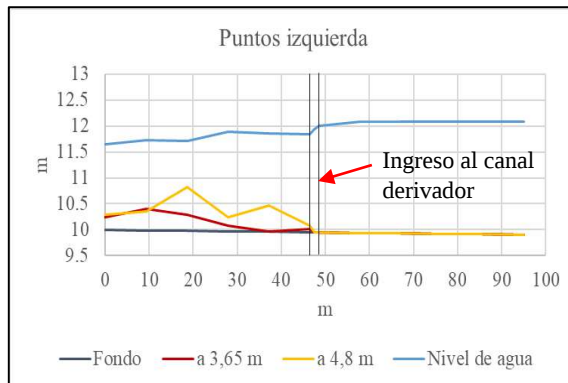
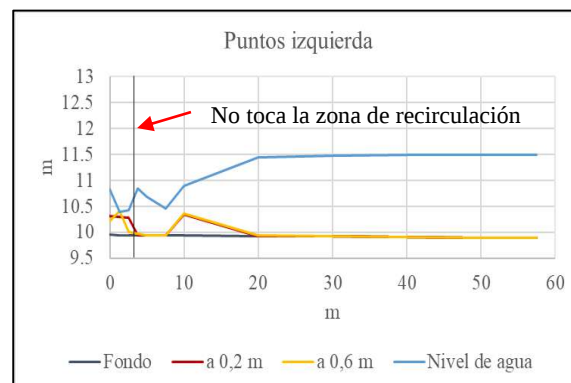
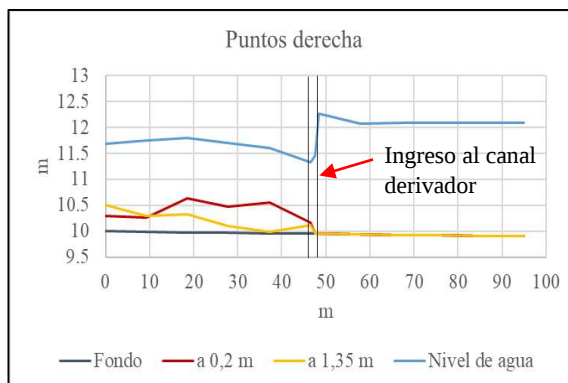
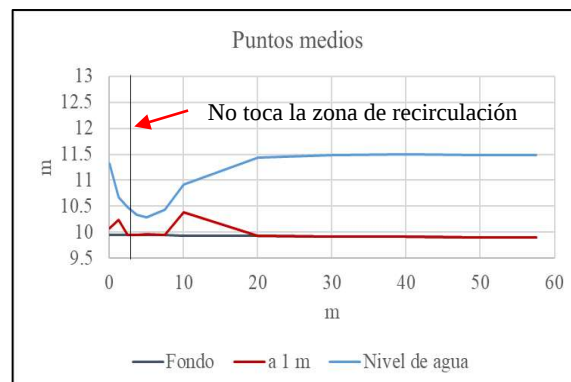
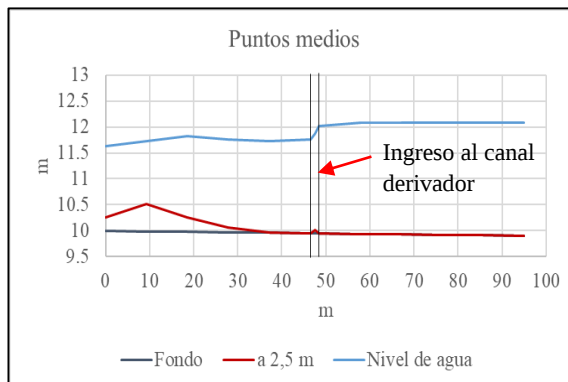
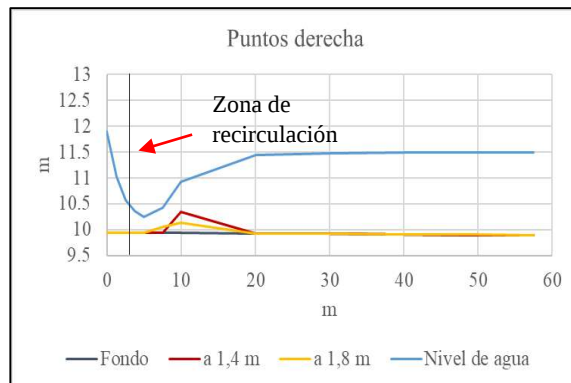


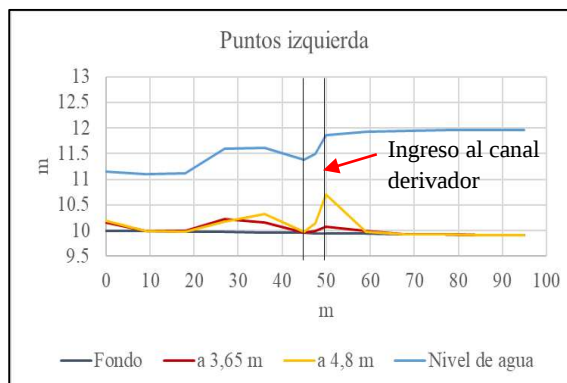
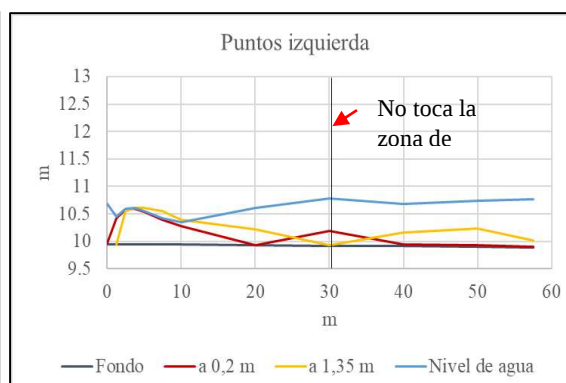
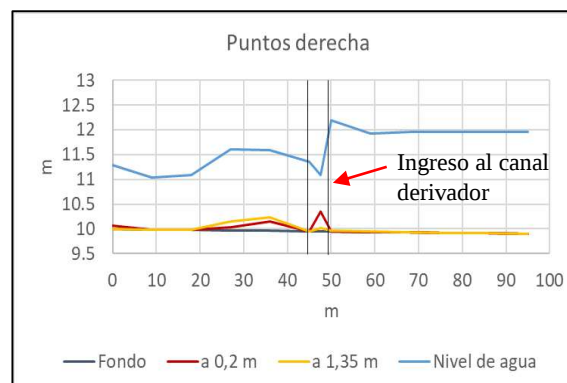
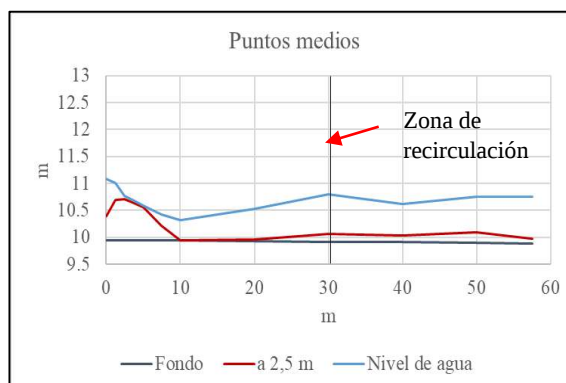
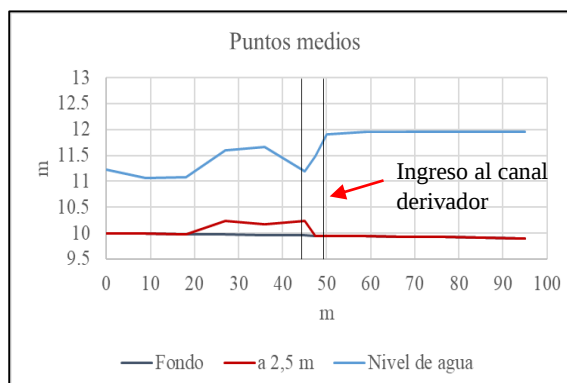
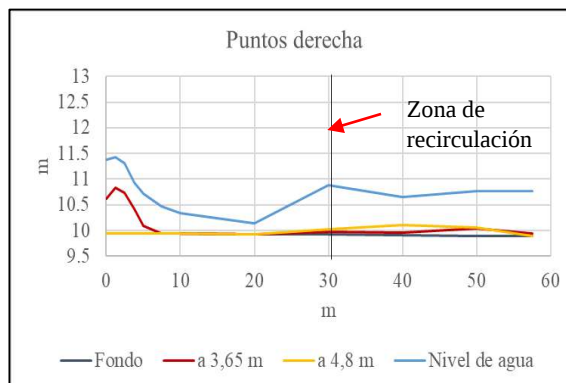
Ilustración 5-17 Datos de las zonas sedimentadas para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos. Diámetro de partícula de 1.2 mm

Fuente: Elaboración propia

Modelo 2: $b' = 2$ m, $B = 5$ m**Canal principal****Canal derivador**

Continuación de la Ilustración 5-17 Datos de las zonas sedimentadas para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos. Diámetro de partícula de 1.2 mm

Fuente: Elaboración propia

Modelo 3: $b' = 5 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$ **Canal principal****Canal derivador**

Continuación de la Ilustración 5-17 Datos de las zonas sedimentadas para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos. Diámetro de partícula de 1.2 mm
Fuente: Elaboración propia

Las Tablas 5-7, 5-8 y 5-9 muestran la altura de la acumulación de sedimentos teniendo en cuenta las velocidades y el sentido del flujo presentados en los datos de los 125 puntos, tanto en el canal principal como derivador.

Se observa una mayor acumulación de sedimentos en las zonas de recirculación presentes en el canal derivador para los tres modelos estudiados, respecto a las zonas donde no existen los vórtices.

Tabla 5-7 Datos de la acumulación de sedimentos con sus respectivas velocidades, para el modelo 1 con partículas de diámetro 1,2 mm

Acumulación de sedimentos / Velocidades																						
Canal principal											Canal derivador											
Distancia	Puntos derecha				Puntos medios		Puntos izquierda				Distancia	Puntos izquierda				Puntos medios		Puntos derecha				
m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	
0	0.547	1.067	0.204	7.550	0.000	11.233	0.000	10.960	0.077	4.444	0	0.827	5.939	0.841	6.107	0.869	6.194	0.904	6.206	0.918	6.021	
9.4	0.000	6.517	0.559	9.954	0.000	10.680	0.000	9.189	0.000	7.541	1.25	0.599	0.823	0.601	2.907	0.550	4.176	0.487	4.893	0.430	5.345	
18.8	0.000	7.082	0.000	9.189	0.125	9.591	0.000	8.089	0.000	7.415	2.5	0.751	2.969	0.772	4.092	0.729	4.513	0.693	4.825	0.673	5.030	
28.2	0.558	6.034	0.716	7.720	0.860	8.532	0.945	7.425	0.459	5.687	3.75	0.780	2.642	0.806	3.603	0.859	4.191	0.846	4.419	0.838	4.552	
37.6	0.748	5.745	0.920	7.063	1.069	7.867	0.965	6.875	0.792	5.618	5	0.767	2.781	0.782	3.439	0.803	3.969	0.828	4.209	0.839	4.324	
47	0.753	5.782	0.873	6.795	1.074	7.410	0.963	6.611	0.862	5.620	7.5	0.692	2.963	0.713	3.431	0.729	3.814	0.734	4.034	0.740	4.146	
47.5	0.702	6.130	0.806	6.708	1.083	7.371	0.976	6.580	0.876	5.600	10	0.625	3.026	0.636	3.387	0.647	3.684	0.647	3.822	0.677	3.951	
48	0.953	5.846	0.755	6.615	1.084	7.322	0.994	6.546	0.890	5.580	20	0.429	2.897	0.421	2.899	0.430	2.997	0.440	3.045	0.446	3.104	
57.4	1.206	4.549	1.158	5.571	1.383	6.430	1.205	5.789	1.096	4.945	30	0.282	2.803	0.285	2.861	0.240	2.657	0.270	2.615	0.285	2.686	
66.8	1.366	4.199	1.523	5.027	1.015	5.228	1.300	5.013	1.266	4.706	40	0.000	0.747	0.000	0.880	0.000	0.885	0.000	0.873	0.000	0.857	
76.2	1.424	4.437	1.281	4.684	1.295	4.939	0.981	4.141	1.245	4.745	50	0.000	0.777	0.000	0.789	0.000	0.774	0.000	0.734	0.000	0.680	
85.6	1.367	4.116	1.119	4.254	1.010	4.816	0.777	4.008	1.433	4.394	57.5	0.000	1.157	0.000	1.157	0.000	1.126	0.000	1.092	0.000	1.080	
95	1.058	3.331	0.806	3.918	1.491	4.618	1.075	3.903	0.928	2.772												

Fuente: Elaboración propia

-  Entrada a la bifurcación
 Zona de recirculación

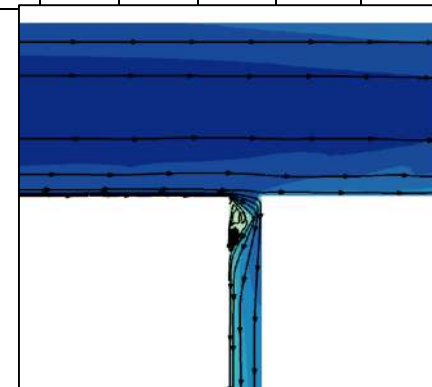


Tabla 5-8 Datos de la acumulación de sedimentos con sus respectivas velocidades, para el modelo 2 con partículas de diámetro 1,2 mm
Fuente: Elaboración propia

Acumulación de sedimentos / Velocidades																					
Canal principal											Canal derivador										
Distancia	Puntos inferiores				Puntos medios		Puntos superiores				Distancia	Puntos izquierda				Puntos medios		Puntos derecha			
m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s
0	0.297	1.744	0.515	4.953	0.257	5.031	0.237	5.099	0.285	3.376	0	0.365	4.923	0.269	5.076	0.122	3.759	0.000	2.559	0.000	1.747
9.3	0.279	3.237	0.314	4.603	0.535	4.770	0.422	4.464	0.367	3.618	1.25	0.347	0.055	0.462	1.669	0.290	4.440	0.001	4.638	0.000	4.552
18.6	0.650	3.391	0.343	4.401	0.278	4.402	0.307	3.977	0.846	3.539	2.5	0.336	3.831	0.058	5.115	0.000	5.527	0.000	5.609	0.000	5.640
27.9	0.497	3.516	0.131	4.146	0.088	4.356	0.103	3.224	0.274	2.694	3.75	0.000	3.643	0.030	5.602	0.000	5.888	0.000	5.952	0.000	5.988
37.2	0.594	3.633	0.022	3.933	0.000	4.103	0.000	3.237	0.510	3.450	5	0.000	4.005	0.000	4.968	0.024	5.910	0.000	6.067	0.000	6.093
46.5	0.209	4.186	0.171	4.199	0.000	3.775	0.063	2.984	0.125	2.184	7.5	0.000	4.508	0.000	5.063	0.000	5.428	0.000	5.592	0.120	5.689
47.5	0.000	3.703	0.000	3.466	0.062	3.409	0.000	2.645	0.000	1.905	10	0.398	3.276	0.418	3.775	0.440	4.184	0.405	4.403	0.204	4.407
48.5	0.000	1.225	0.012	2.745	0.000	2.926	0.000	2.390	0.000	1.727	20	0.000	0.531	0.008	1.108	0.000	1.778	0.000	2.392	0.000	2.569
57.8	0.000	2.428	0.000	2.634	0.000	2.531	0.000	1.986	0.000	1.452	30	0.000	1.166	0.000	1.349	0.000	1.594	0.000	1.858	0.000	2.079
67.1	0.000	2.436	0.000	2.541	0.000	2.447	0.000	2.012	0.000	1.590	40	0.000	1.377	0.000	1.466	0.001	1.583	0.003	1.706	0.004	1.806
76.4	0.000	2.427	0.000	2.485	0.000	2.386	0.000	2.024	0.000	1.686	50	0.000	1.446	0.000	1.501	0.001	1.573	0.002	1.646	0.003	1.703
85.7	0.000	2.435	0.000	2.453	0.000	2.339	0.000	2.023	0.000	1.741	57.5	0.000	1.460	0.000	1.501	0.000	1.557	0.001	1.615	0.001	1.657
95	0.000	2.432	0.000	2.428	0.000	2.308	0.000	2.028	0.000	1.782											

Entrada a la bifurcación

Zona de recirculación

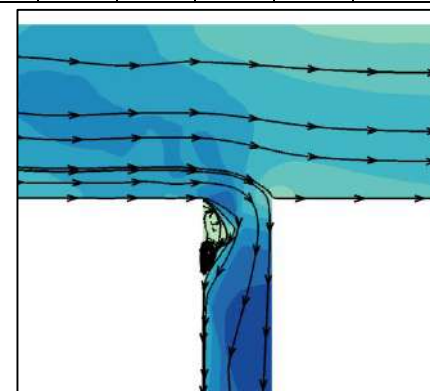
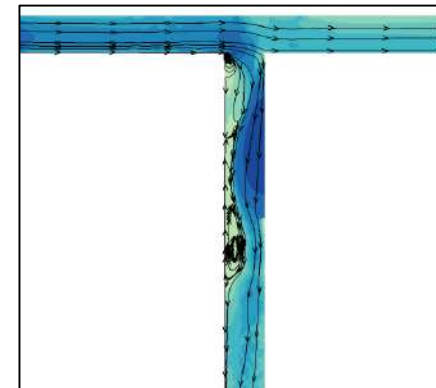


Tabla 5-9 Datos de la acumulación de sedimentos con sus respectivas velocidades, para el modelo 3 con partículas de diámetro 1,2 mm
Fuente: Elaboración propia

Acumulación de sedimentos / Velocidades																					
Canal principal											Canal derivador										
Distancia	Puntos inferiores				Puntos medios		Puntos superiores				Distancia	Puntos izquierda				Puntos medios		Puntos derecha			
m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s
0	0.063	3.957	0.000	5.777	0.000	5.767	0.163	5.558	0.197	3.507	0	0.018	5.270	0.000	5.748	0.440	4.842	0.679	4.221	0.000	1.010
9	0.000	4.812	0.000	5.865	0.000	5.878	0.004	5.364	0.000	4.233	1.25	0.476	0.832	0.597	2.577	0.749	4.403	0.883	3.571	0.000	2.537
18	0.000	4.798	0.000	5.631	0.000	5.666	0.017	5.119	0.000	4.260	2.5	0.624	0.558	0.666	1.080	0.756	3.126	0.787	3.425	0.000	3.892
27	0.061	3.625	0.174	4.501	0.271	4.524	0.248	3.890	0.208	3.076	3.75	0.652	0.381	0.663	1.011	0.694	2.390	0.481	4.267	0.000	4.804
36	0.180	3.810	0.272	4.598	0.217	4.254	0.205	3.876	0.358	3.442	5	0.593	0.695	0.608	1.062	0.608	2.181	0.148	4.915	0.000	5.353
45	0.000	4.227	0.000	4.917	0.279	5.037	0.000	4.277	0.017	3.545	7.5	0.445	1.105	0.454	0.998	0.277	3.181	0.000	5.650	0.000	5.839
47.5	0.400	4.870	0.064	4.724	0.002	4.060	0.047	3.646	0.184	2.782	10	0.334	0.536	0.277	0.282	0.000	5.402	0.000	5.879	0.000	5.994
50	0.000	1.854	0.023	2.777	0.003	2.730	0.128	2.345	0.761	2.213	20	0.000	0.505	0.000	1.761	0.035	4.775	0.000	5.460	0.000	5.500
59	0.000	2.848	0.011	2.838	0.006	2.440	0.047	1.830	0.033	1.199	30	0.273	0.152	0.244	1.129	0.139	2.519	0.064	3.439	0.113	1.830
68	0.000	2.733	0.000	2.687	0.000	2.370	0.000	1.774	0.000	1.220	40	0.035	1.910	0.324	2.824	0.128	3.445	0.052	2.922	0.204	2.325
77	0.000	2.682	0.000	2.599	0.000	2.297	0.000	1.812	0.000	1.383	50	0.036	1.861	0.119	2.481	0.198	2.206	0.144	1.432	0.159	1.113
86	0.000	2.645	0.000	2.539	0.000	2.251	0.000	1.845	0.000	1.500	57.5	0.001	1.810	0.000	2.043	0.078	1.858	0.048	1.259	0.000	0.410
95	0.000	2.596	0.000	2.489	0.000	2.228	0.000	1.877	0.000	1.587											

Entrada a la bifurcación

Zona de recirculación



5.3. Cambio en el diseño de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas a aristas redondeadas

Según investigaciones realizadas por el Doctor Ing. Arturo Rocha destaca que las bifurcaciones con aristas redondeadas provocan una reducción del vórtice (zona de recirculación) generada a la entrada del canal derivador, lo que provoca una reducción del caudal sólido captado (Rocha , 2005). Por lo que en la presente tesis se realiza el análisis para observar el comportamiento de bocatomas con bifurcaciones a 90° con aristas redondeadas (ver Ilustración 5-18).

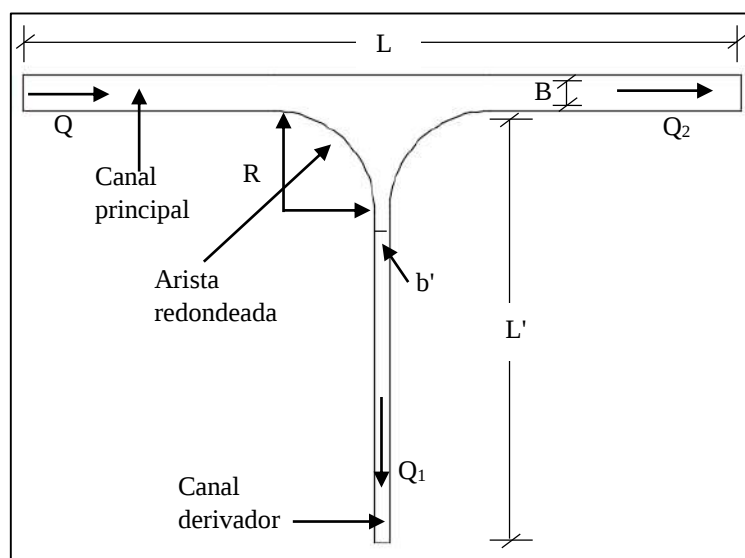


Ilustración 5-18 Geometría del nuevo diseño de una bifurcación a 90° con aristas redondeadas

Fuente: Elaboración propia

En el diseño de canales, el cambio brusco de dirección se sustituye por una arista redondeada cuyo radio no debe ser muy grande, se elige un radio mínimo “R”. Dado que al trazar curvas con radios grandes no significa ningún ahorro de energía, es decir la curva no será hidráulicamente más eficiente, en cambio sí será más costosa al darle una mayor longitud. La Tabla 5-10 muestra los radios mínimos teniendo en cuenta la capacidad de captación de agua del canal (Autoridad Nacional del Agua, 2010).

Tabla 5-10 Radio mínimo en función al caudal

Capacidad del canal	Radio mínimo
Hasta 10 m ³ /s	3*ancho de la base
De 10 a 14 m ³ /s	4*ancho de la base
De 14 a 17 m ³ /s	5*ancho de la base
De 17 a 20 m ³ /s	6*ancho de la base
De 20 m ³ /s a más	7*ancho de la base
Los radios mínimos deben ser redondeados hasta el próximo metro superior	

Fuente: (Autoridad Nacional del Agua, 2010)

Teniendo en cuenta que el caudal de ingreso es 28,67 m³/s, ubicamos en la Tabla 5-10 el radio mínimo, siendo el valor para los tres modelos estudiados, con ancho 1 m, 2 m y 5 m

en el canal derivador, de $7 \times$ ancho de la base ($R = 7 \times b'$). Se toma en cuenta la Tabla 4-3 para la dimensión de los tres nuevos modelos.

La Tabla 5-11 muestra el radio curvatura mínimo para cada modelo según el ancho del canal derivador.

Tabla 5-11 Radio mínimo teniendo en cuenta el ancho de la bifurcación		
Bocatomas con bifurcación a 90° con aristas redondeadas		
	Canal derivador	Radio curvatura
	b' (m)	R (m)
Modelo 1	1	7
Modelo 2	2	14
Modelo 3	5	35

Fuente: Elaboración propia

5.3.1 Resultados sedimentológicos

La Ilustración 5-19 muestra las direcciones de las velocidades del flujo de agua mezclada con partículas de arena de diámetro 1,2 mm para los tres modelos estudiados.

Se observa la presencia de zonas de recirculación ubicadas justo en las aristas redondeadas a la entrada del canal derivador, estos vórtices no llegan a reducir el ancho geométrico del canal.

La dirección del flujo de agua para el canal principal no muestra ninguna presencia de vórtices para los modelos 1 y 2, a diferencia del modelo 3 que presenta la formación de un vórtice en la extensión del canal principal.

En el Apéndice C se pueden observar los 125 valores extraídos de las velocidades para los modelos con aristas redondeadas.

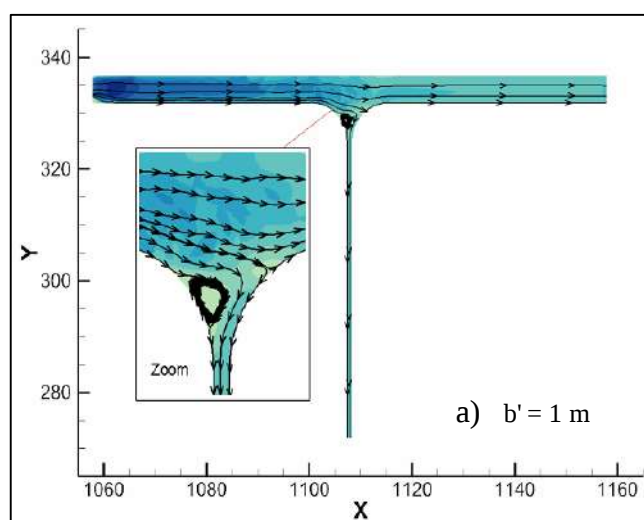
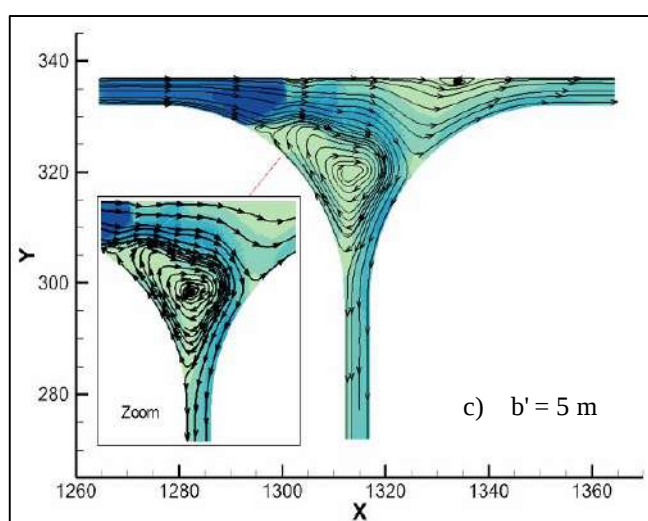
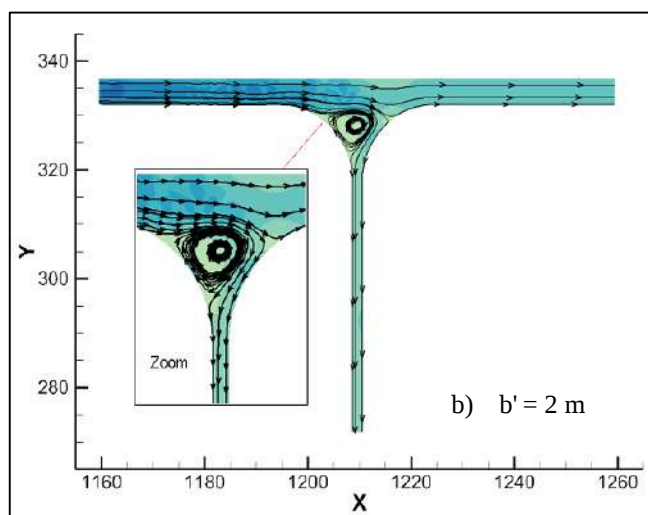


Ilustración 5-19 Líneas de corriente de agua en bocatomas con bifurcación a 90° con aristas redondeadas

Fuente: Elaboración propia



Continuación de la Ilustración 5-19 Líneas de corriente de agua en bocatomas con bifurcación a 90° con aristas redondeadas
Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 5-20 muestra el fondo original y el fondo sedimentado de los canales estudiados, en un tiempo de 30 minutos.

En escala de colores, el fondo sedimentado (acumulación de sedimentos) aumenta de azul a naranja.

Se observan zonas de sedimentación sólo a la entrada del canal principal, aguas abajo no se llega a sedimentar tanto para la extensión del canal principal como derivador.

Se comprueba lo dicho por Bulle al decir que las aristas redondeadas provocan la reducción del vórtice que se genera en la entrada del canal derivador, provocando una disminución del caudal sólido captado.

Comparadas las zonas de sedimentación de la Ilustración 5-16 con la Ilustración 5-20, se observa a primera vista una reducción en acumulación de sedimentos en el fondo, siendo más notable en el modelo 1, donde la sedimentación es nula aguas abajo de la extensión del canal principal.

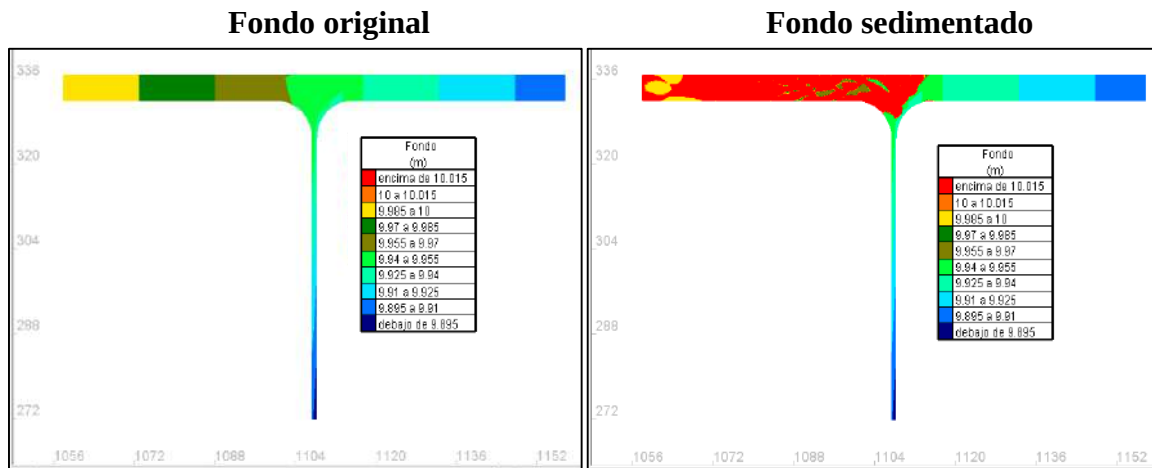
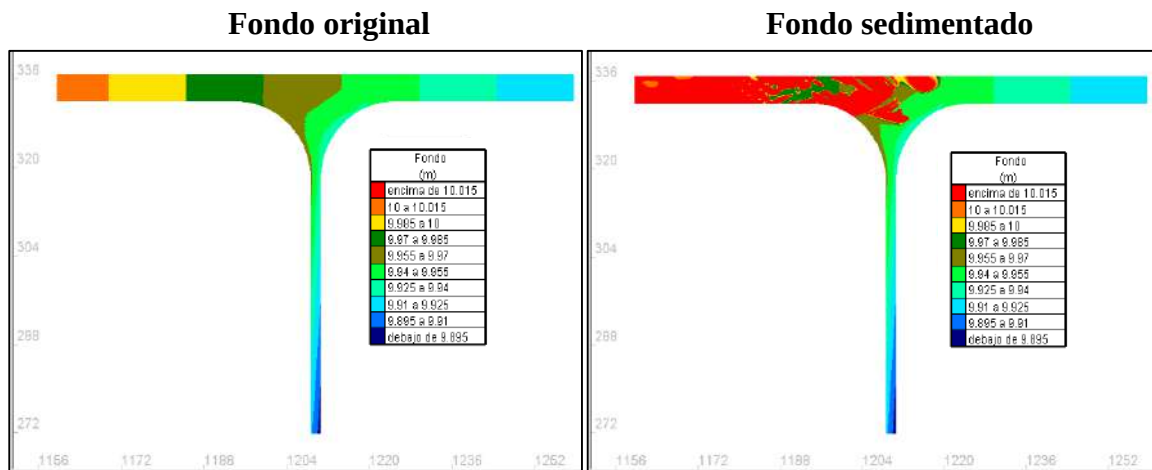
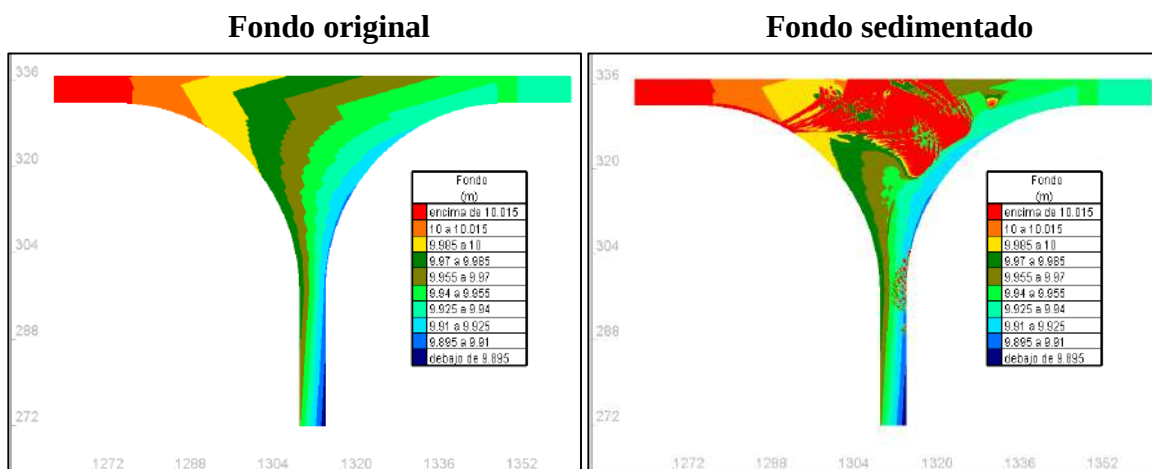
Modelo 1: $b' = 1 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$, $R = 7 \text{ m}$ **Modelo 2: $b' = 2 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$, $R = 14 \text{ m}$** **Modelo 3: $b' = 5 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$, $R = 35 \text{ m}$** 

Ilustración 5-20 Zonas sedimentadas a lo largo de la bocatoma con bifurcación a 90° con aristas redondeadas, para diámetro de sedimento de 1,2 mm

Fuente: Elaboración propia

En el Apéndice C se pueden observar los 125 valores extraídos del cambio del fondo original al fondo sedimentado (evolución de fondo) para los modelos con aristas redondeadas.

La Ilustración 5-21 muestran los resultados de los datos obtenidos en los 125 puntos de la superficie de cada modelo para el caso de las acumulaciones de sedimentos.

Existe una reducción de sedimentos de fondo en el canal principal. Siendo el caso más notorio el modelo 1, donde se visualiza que las sedimentaciones de fondo aguas arriba y aguas abajo del canal disminuye a diferencia de los resultados presentados para una bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas (apartado 5.2.1), por lo tanto, el nivel de agua disminuye y no sobrepasa el tirante establecido de 2,5 m.

Los resultados de los tres modelos estudiados para una bocatoma con bifurcación a 90° con aristas redondeadas, muestran la reducción total de la sedimentación de fondo en el canal derivador pasado los 3 metros, comparado con los resultados de los tres modelos con aristas vivas.

Modelo 1: $b' = 1$ m, $B = 5$ m, $R = 7$ m

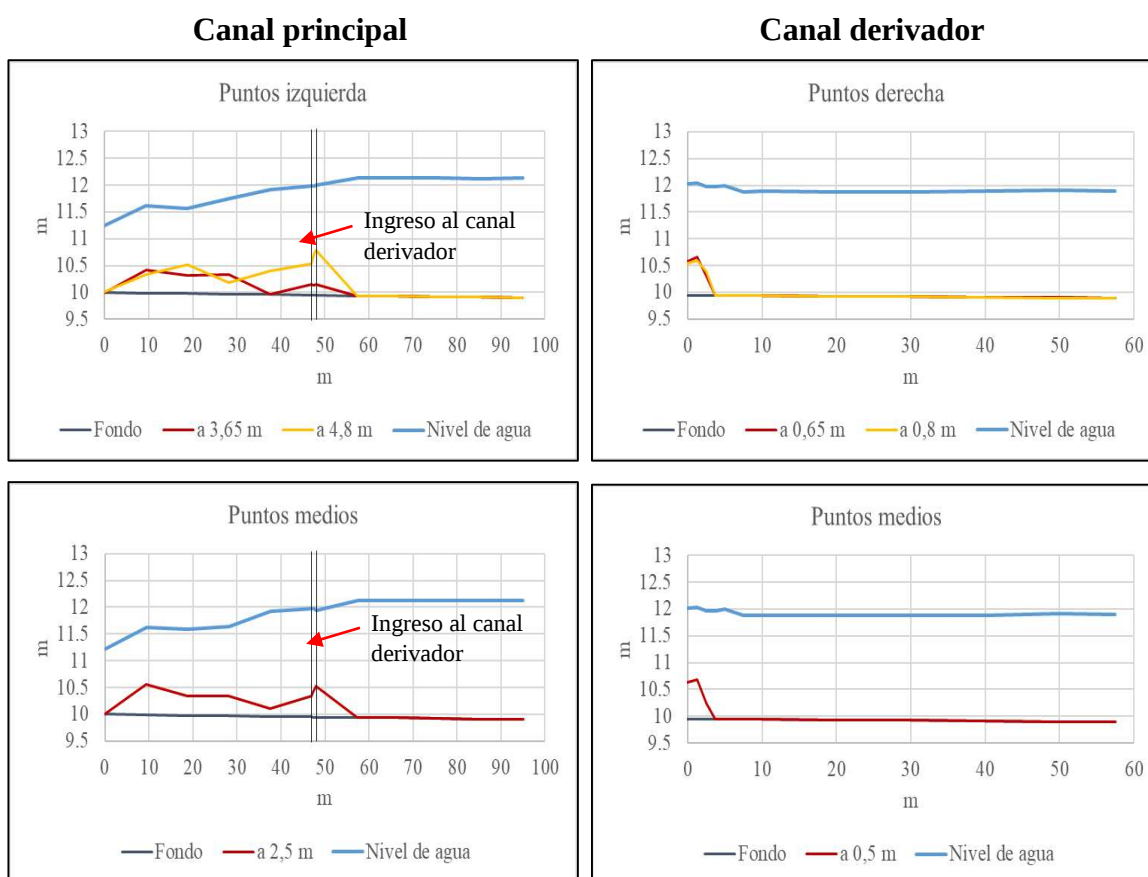
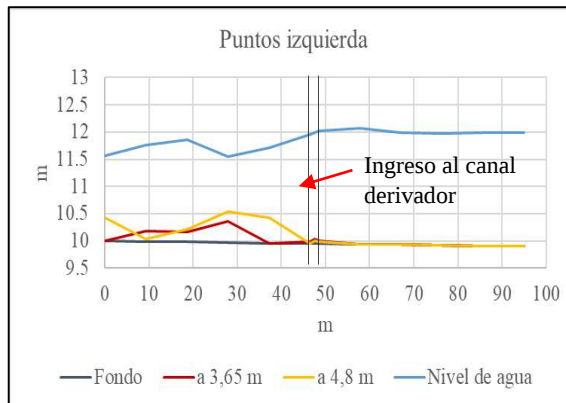
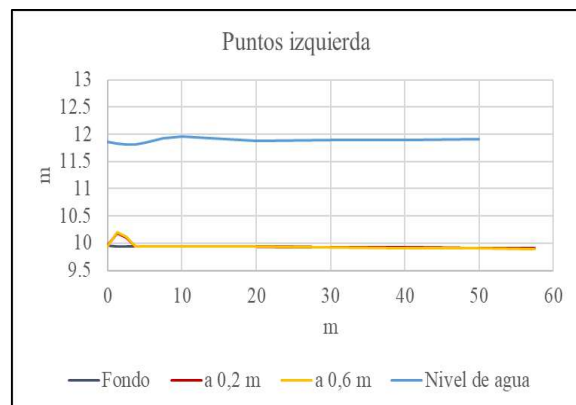
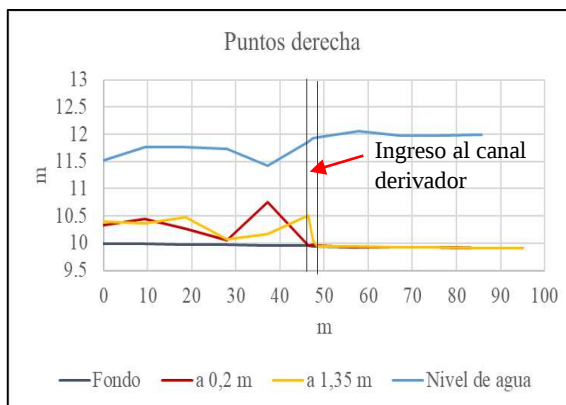
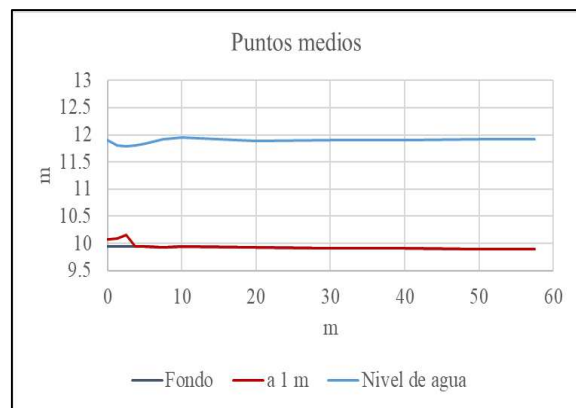
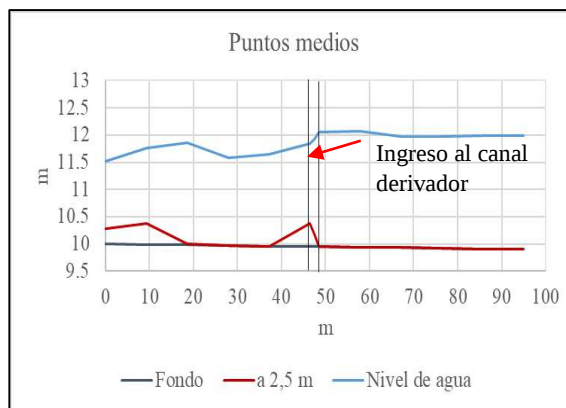
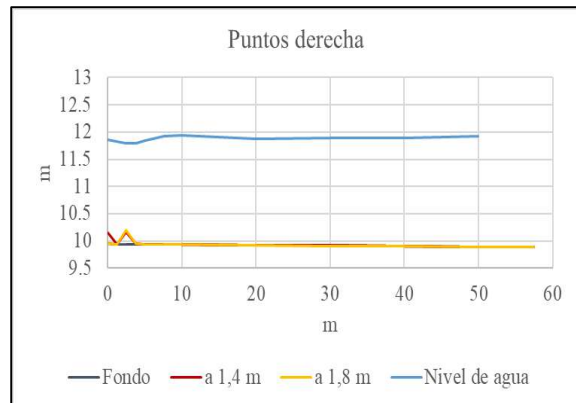


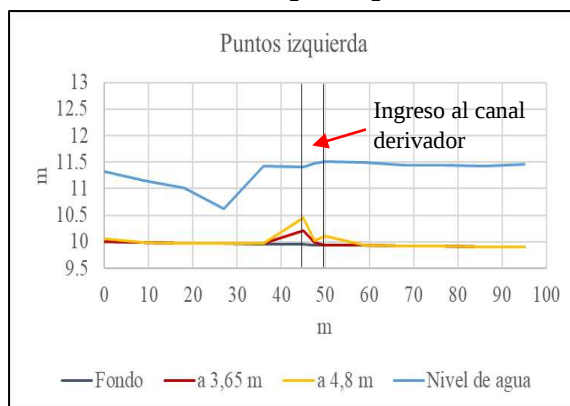
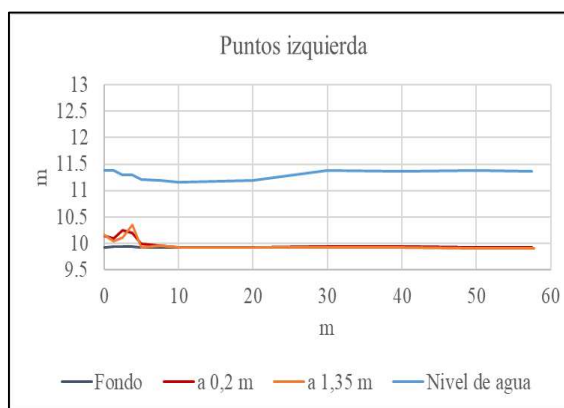
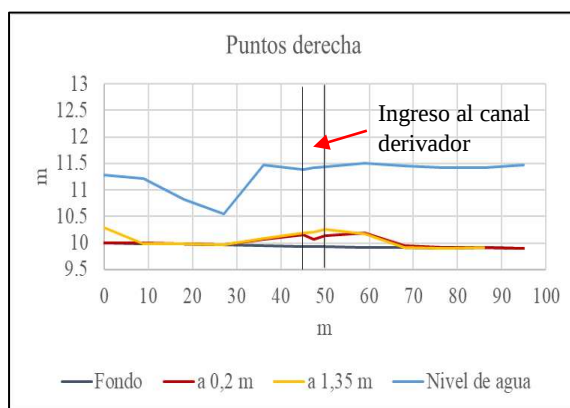
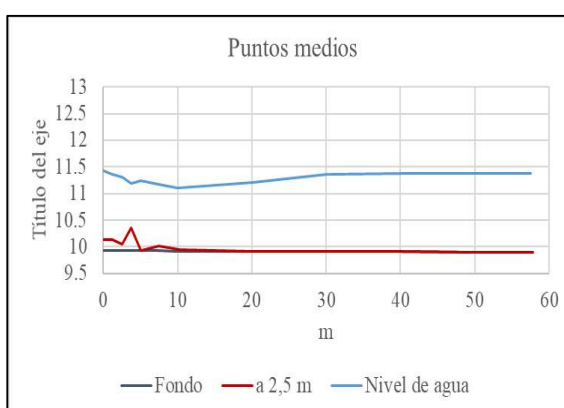
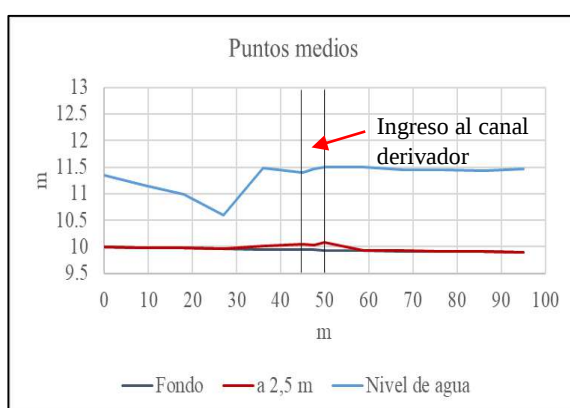
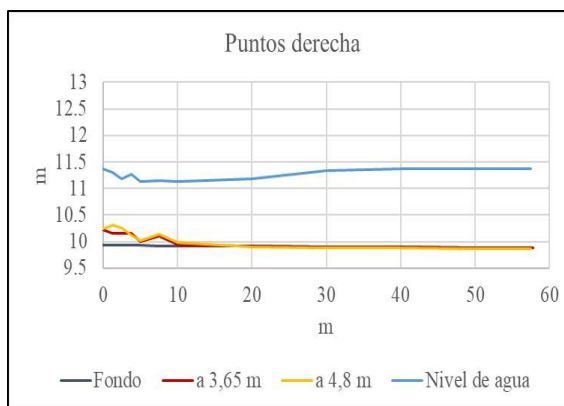
Ilustración 5-21 Datos de las zonas sedimentadas para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos. Diámetro de partícula de 1.2 mm.

Fuente: Elaboración propia

Modelo 2: $b' = 2 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$, $R = 14 \text{ m}$ **Canal principal****Canal derivador**

Continuación de la Ilustración 5-21 Datos de las zonas sedimentadas para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos. Diámetro de partícula de 1.2 mm.

Fuente: Elaboración propia

Modelo 3: $b' = 5 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$, $R = 35 \text{ m}$ **Canal principal****Canal derivador**

Continuación de la Ilustración 5-21 Datos de las zonas sedimentadas para los modelos estudiados, obtenidos de los 125 puntos. Diámetro de partícula de 1.2 mm.

Fuente: Elaboración propia

En el Apéndice C se pueden observar los 125 valores extraídos de los niveles de agua para los modelos con aristas redondeadas.

Las Tablas 5-12, 5-13 y 5-14 muestran la altura de sedimentación de los canales principal y derivador, teniendo en cuenta las velocidades y el sentido del flujo presentados en los 125 puntos alrededor de la superficie.

Tabla 5-12 Datos de la acumulación de sedimentos con sus respectivas velocidades, para el modelo 1 con partículas de diámetro 1,2 mm

Acumulación de sedimentos / Velocidades																					
Canal principal											Canal derivador										
Distancia	Puntos inferiores				Puntos medios		Puntos superiores				Distancia	Puntos izquierda				Puntos medios		Puntos derecha			
m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s
0	0.387	3.059	0.026	6.209	0.000	6.327	0.000	6.109	0.026	3.615	0	0.857	3.129	0.768	2.746	0.688	2.673	0.623	2.673	0.599	2.657
9.4	0.038	2.910	0.320	5.060	0.575	5.421	0.434	5.126	0.350	3.490	1.25	0.744	2.169	0.761	2.116	0.743	2.056	0.708	2.005	0.656	1.950
18.8	0.228	3.407	0.469	4.801	0.357	5.351	0.333	4.962	0.542	3.733	2.5	0.152	0.522	0.225	0.587	0.297	0.653	0.372	0.717	0.451	0.778
28.2	0.012	3.026	0.382	4.348	0.366	5.033	0.361	4.205	0.217	2.401	3.75	0.000	0.444	0.000	0.635	0.000	0.852	0.000	1.087	0.000	1.328
37.6	0.420	3.373	0.450	4.164	0.144	3.931	0.006	3.476	0.443	2.622	5	0.000	0.897	0.000	1.138	0.000	1.379	0.000	1.612	0.000	1.825
47	0.830	3.450	0.422	3.054	0.395	3.266	0.195	2.775	0.580	2.304	7.5	0.000	2.045	0.000	2.101	0.000	2.161	0.000	2.219	0.000	2.265
47.5	0.634	2.882	0.507	3.338	0.499	3.266	0.185	2.803	0.759	2.405	10	0.000	2.099	0.000	2.123	0.000	2.150	0.000	2.177	0.000	2.199
48	0.723	2.954	0.428	3.136	0.580	3.356	0.198	2.731	0.836	2.595	20	0.000	2.104	0.000	2.109	0.000	2.115	0.000	2.120	0.000	2.124
57.4	0.000	2.262	0.000	2.518	0.000	2.479	0.000	2.107	0.000	1.666	30	0.000	2.093	0.000	2.094	0.000	2.095	0.000	2.097	0.000	2.098
66.8	0.000	2.285	0.000	2.389	0.000	2.379	0.000	2.154	0.000	1.893	40	0.000	2.111	0.000	2.113	0.000	2.113	0.000	2.114	0.000	2.115
76.2	0.000	2.268	0.000	2.334	0.000	2.337	0.000	2.179	0.000	2.003	50	0.000	2.147	0.000	2.148	0.000	2.148	0.000	2.149	0.000	2.149
85.6	0.000	2.273	0.000	2.312	0.000	2.303	0.000	2.170	0.000	2.030	57.5	0.000	2.170	0.000	2.170	0.000	2.170	0.000	2.171	0.000	2.171
95	0.000	2.283	0.000	2.306	0.000	2.277	0.000	2.135	0.000	1.993											

Fuente: Elaboración propia

Entrada a la bifurcación

Zona de recirculación

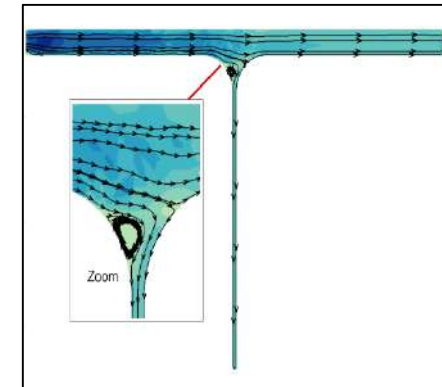


Tabla 5-13 Datos de la acumulación de sedimentos con sus respectivas velocidades, para el modelo 2 con partículas de diámetro 1,2 mm

Acumulación de sedimentos / Velocidades																					
Canal principal											Canal derivador										
Distancia	Puntos inferiores				Puntos medios		Puntos superiores				Distancia	Puntos izquierda				Puntos medios		Puntos derecha			
m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s
0	0.330	3.193	0.404	4.691	0.282	4.964	0.000	4.834	0.430	3.277	0	0.000	2.805	0.000	2.746	0.127	2.754	0.207	2.853	0.011	2.618
9.3	0.460	3.050	0.381	4.113	0.381	4.397	0.188	4.184	0.051	3.064	1.25	0.243	1.716	0.256	1.778	0.149	1.826	0.000	1.813	0.000	1.819
18.6	0.296	3.202	0.500	4.077	0.021	3.946	0.182	3.658	0.230	3.154	2.5	0.166	0.758	0.178	0.780	0.208	0.807	0.231	0.853	0.259	0.926
27.9	0.086	3.398	0.100	3.958	0.000	4.253	0.387	3.988	0.563	3.716	3.75	0.004	0.276	0.007	0.165	0.010	0.073	0.013	0.240	0.013	0.465
37.2	0.788	4.196	0.201	3.969	0.000	3.934	0.000	3.484	0.467	3.085	5	0.000	0.474	0.000	0.527	0.000	0.628	0.000	0.783	0.000	0.969
46.5	0.000	2.936	0.552	3.609	0.428	3.143	0.041	2.456	0.007	1.939	7.5	0.000	0.517	0.000	0.658	0.000	0.832	0.000	1.032	0.000	1.231
47.5	0.026	2.742	0.104	2.678	0.237	2.707	0.086	2.315	0.058	1.813	10	0.000	0.592	0.000	0.784	0.000	0.977	0.000	1.162	0.000	1.329
48.5	0.017	2.660	0.000	2.580	0.000	2.275	0.061	2.048	0.033	1.621	20	0.000	1.454	0.000	1.467	0.000	1.484	0.000	1.502	0.000	1.517
57.8	0.000	1.890	0.000	2.038	0.000	1.975	0.000	1.723	0.000	1.420	30	0.000	1.523	0.000	1.526	0.000	1.532	0.000	1.541	0.000	1.550
67.1	0.000	2.096	0.000	2.256	0.000	2.320	0.000	2.149	0.000	1.907	40	0.000	1.587	0.000	1.592	0.000	1.597	0.000	1.602	0.000	1.604
76.4	0.000	2.326	0.000	2.337	0.000	2.269	0.000	2.050	0.000	1.829	50	0.000	1.576	0.000	1.580	0.000	1.585	0.000	1.588	0.000	1.590
85.7	0.000	2.214	0.000	2.227	0.000	2.211	0.000	2.095	0.000	1.956	57.5	0.000	1.547	0.000	1.550	0.000	1.554	0.000	1.557	0.000	1.559
95	0.000	2.168	0.000	2.211	0.000	2.226	0.000	2.128	0.000	2.006											

Fuente: Elaboración propia

- Entrada a la bifurcación
- Zona de recirculación

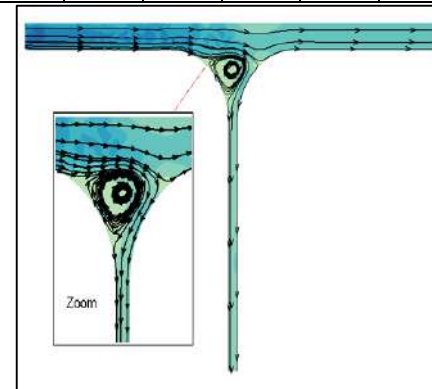
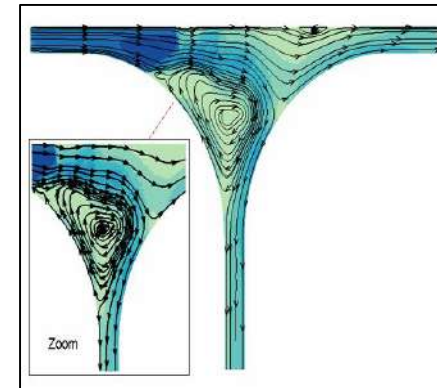


Tabla 5-14 Datos de la acumulación de sedimentos con sus respectivas velocidades, para el modelo 3 con partículas de diámetro 1,2 mm

Acumulación de sedimentos / Velocidades																					
Canal principal											Canal derivador										
Distancia	Puntos inferiores				Puntos medios		Puntos superiores				Distancia	Puntos izquierda				Puntos medios		Puntos derecha			
m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s	m	m/s
0	0.287	3.299	0.011	4.840	0.000	5.108	0.000	5.072	0.057	3.599	0	0.212	3.109	0.229	2.925	0.201	2.997	0.301	3.164	0.320	3.022
9	0.000	4.005	0.009	5.012	0.000	5.288	0.000	5.169	0.000	4.257	1.25	0.167	3.304	0.120	3.158	0.198	3.305	0.220	3.411	0.375	3.496
18	0.000	5.242	0.000	5.486	0.000	5.477	0.000	5.190	0.000	4.554	2.5	0.323	3.381	0.186	3.121	0.115	3.165	0.223	3.580	0.335	3.640
27	0.000	5.960	0.000	5.946	0.000	5.821	0.000	5.564	0.000	5.250	3.75	0.262	2.561	0.428	3.331	0.426	3.187	0.234	2.938	0.189	3.251
36	0.140	3.926	0.124	2.886	0.066	2.585	0.010	1.619	0.006	0.200	5	0.067	2.158	0.002	2.264	0.001	2.296	0.077	2.604	0.096	2.739
45	0.245	3.050	0.216	2.544	0.114	1.874	0.257	1.502	0.496	1.199	7.5	0.022	1.086	0.038	1.195	0.089	1.335	0.188	1.477	0.212	1.579
47.5	0.275	3.011	0.138	2.355	0.092	1.632	0.041	1.255	0.065	0.791	10	0.002	0.423	0.007	0.433	0.032	0.523	0.014	0.443	0.078	0.847
50	0.327	2.856	0.197	1.966	0.143	1.545	0.000	1.139	0.164	0.788	20	0.000	0.618	0.002	0.590	0.000	1.070	0.000	1.702	0.000	2.355
59	0.259	0.615	0.265	0.404	0.000	0.269	0.000	0.191	0.001	0.147	30	0.000	0.663	0.000	1.099	0.000	1.759	0.000	2.391	0.000	2.709
68	0.000	0.978	0.033	0.657	0.013	0.367	0.000	0.111	0.000	0.053	40	0.000	1.411	0.000	1.601	0.000	1.916	0.000	2.284	0.000	2.452
77	0.000	2.459	0.000	1.952	0.000	1.365	0.000	0.924	0.000	0.665	50	0.000	1.384	0.000	1.590	0.000	1.877	0.000	2.197	0.000	2.454
86	0.000	2.665	0.000	2.466	0.000	2.008	0.000	1.662	0.000	1.470	57.5	0.000	1.349	0.000	1.559	0.000	1.880	0.000	2.208	0.000	2.447
95	0.000	2.333	0.000	2.201	0.000	1.976	0.000	1.747	0.000	1.579											

Fuente: Elaboración propia

- Entrada a la bifurcación
- Zona de recirculación



5.4. Comprobación del modelo físico de las investigaciones de una bocatoma con bifurcación a 30° y 90° con aristas viva, realizadas por Thoma mediante el programa Telemac-2D

Mediante el programa Telemac-2D se observa y verifica el comportamiento de las investigaciones físicas realizadas por Thoma para bocatomas con bifurcaciones a 90° y 30°, con arista vivas. Las dimensiones para estos canales están descritas en el apartado 2.5.1.

5.4.1 Preparación de los modelos para ejecutarlos en el programa TELEMAC-2D

- A) Se establecen las dimensiones y parámetros de los dos modelos de 90° y 30° según Thoma

La Ilustración 5-22 muestra la nomenclatura y geometría de los modelos investigados por Thoma.

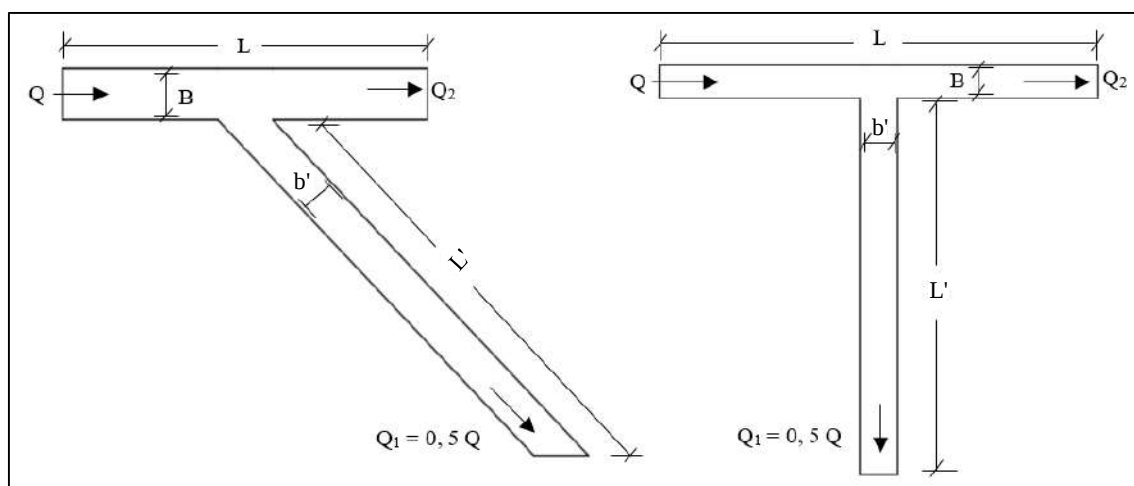


Ilustración 5-22 Nomenclatura de los modelos investigados por Thoma

Fuente: Elaboración propia

Se muestra en la Tabla 5-15 las dimensiones que se toman en cuenta para la elaboración de la geometría de los canales a estudiar.

Tabla 5-15 Dimensionamiento de los modelos investigados por Thoma

Bocatoma con bifurcación		90°	30°
Ancho (m)	B b'	0,3	
Largo (m)	L L'	4	
Caudal de entrada (m ³ /s)	Q	0,06	
Altura de canal (m)	H	0,2	

Tabla 5-15 Dimensionamiento de los modelos investigador por Thoma (continuación)

Bocatoma con bifurcación		90°	30°
Coeficiente de Manning	n	0,016	
Pendiente (m/m)	s	0,0065	
Talud	z	0	

Fuente: Elaboración propia

- B) Se crean las superficies “GEO” de los dos modelos, tomando en cuenta los pasos ejecutados en el apartado 4.3.1. Con una separación de nodos en la malla de 0,012 y 0,02 (ver Ilustración 5-23).

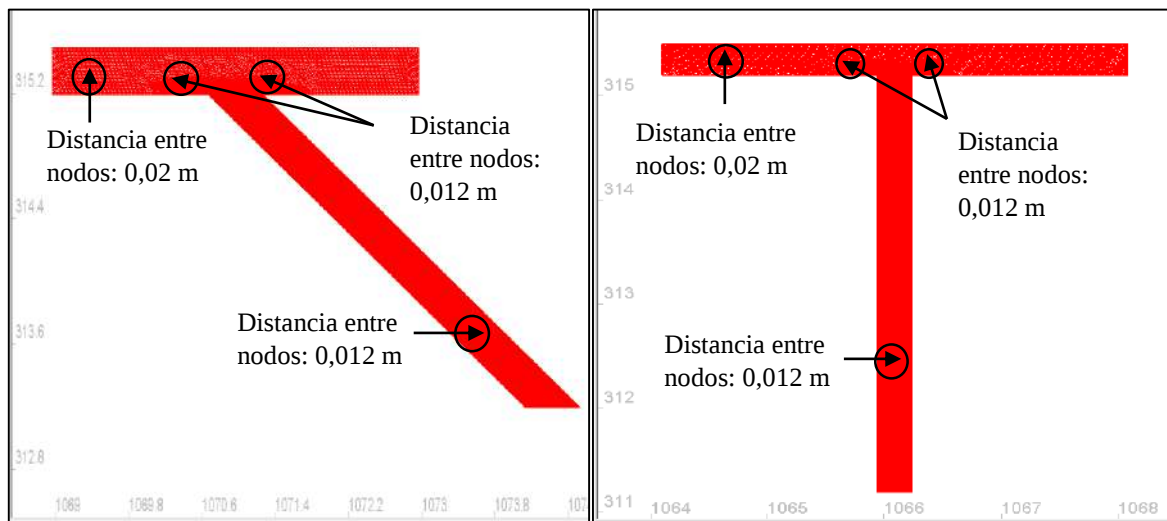


Ilustración 5-23 Densificación de malla para los modelos de Thoma

Fuente: Elaboración propia

- C) Seguido de la creación de las superficies, se establecen las condiciones de borde del modelo, especificados en la Ilustración 5-24, que sirven como archivos de entrada para el programa Telemac-2d (ver apartado 4.3.2 para realizar los pasos).
- D) Para la ejecución del modelo hidrodinámico, se tienen en cuenta los archivos de control del Telemac-2D descritos en el apartado 4.3.3.

Se toma en cuenta para los caudales de salida el 50% del caudal de entrada ($0,03 \text{ m}^3/\text{s}$). Se modela un tiempo de 20 minutos.

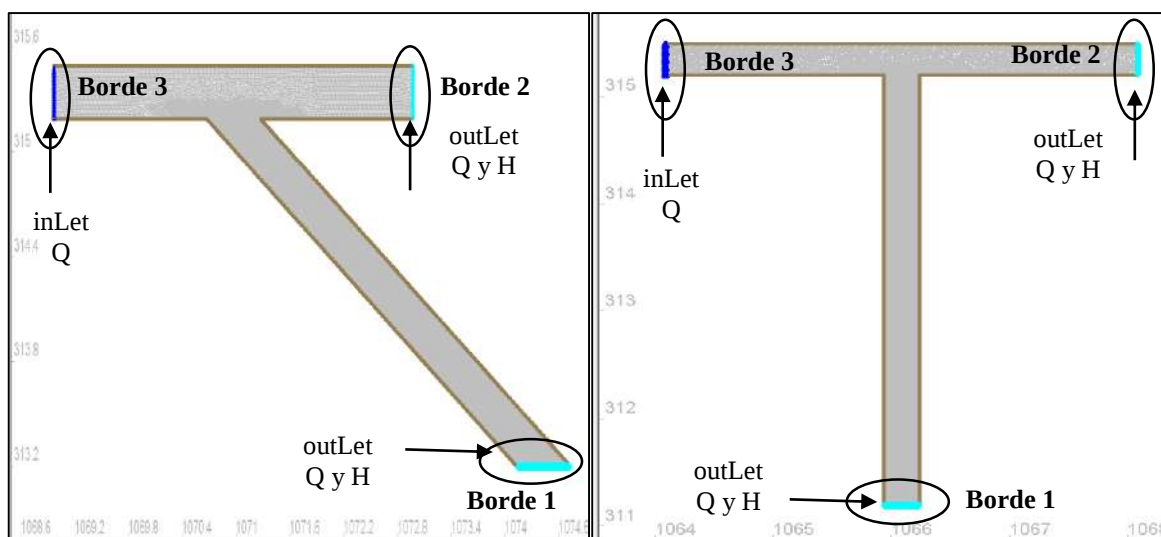


Ilustración 5-24 Condiciones de borde para modelar en Telemac-2D

Fuente: Elaboración propia

- E) Finalmente, para la ejecución de modelos sedimentológicos, se tienen en cuenta los archivos de control para Telemac-2D y Sisyphe descritos en el apartado 4.3.4. Ver Apéndice D para ver a detalle el archivo cas.txt para el caso de sedimentos, así como el archivo sisCas.txt.

Se trabaja con un diámetro de partículas de 0,062 mm para la modelación, y una condición de carga de sólido sólo a la entrada del canal dejando libre las salidas. Para poder observar el comportamiento de sedimentación tanto en el canal principal como derivador.

Teniendo en cuenta que solo ingresará un caudal de sólido (carga de fondo), se definen los códigos para las variables (archivo cliSed.cli) mostrados en la Tabla 5-15.

Tabla 5-16 Configuración de los nuevos códigos para el archivo "cliSed.cli"

Configuración de códigos para las variables															
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	G	L		
"cli.cli"	5	5	5	0	0	0	0	4	0	0	0	59101	978	#	outLet
"cliSed.cli"	5	5	5	0	0	0	0	4	0	0	0	59101	978	#	outLet
"cli.cli"	5	5	5	0	0	0	0	4	0	0	0	41357	2071	#	outLet
"cliSed.cli"	5	5	5	0	0	0	0	4	0	0	0	41357	2071	#	outLet
"cli.cli"	4	5	5	0	0	0	0	4	0	0	0	18	2360	#	inLet
"cliSed.cli"	4	5	5	0	0	0	0	5	0	0	0	18	2360	#	inLet

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de los caudales sólidos se utiliza la fórmula de Meyer Peter y Müller (ver Ecuación 1-39). Donde:

$$g_B = 0,098 \text{ kgf/s/m}$$

$$g_B = 0,029 \text{ kgf/s}$$

$$g_B = 1.107\text{E-}05 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.4.2 Resultados

A continuación, se presentan los resultados y gráficas obtenidos de la modelación numérica mediante el programa Telemac-2D para bocatomas con bifurcación a 30° y 90° con aristas vivas, para la respectiva comparación de datos y gráficas realizados mediante modelos físicos por Thoma (ver apartado 3.1.2.1).

La Ilustración 5-25 muestra el resultado del modelo físico realizado por Thoma, ubicando una zona de recirculación aguas arriba del canal principal. Y un total de ingreso de caudal sólido hacia la bifurcación del 85,2 % y 92,1% del caudal sólido de ingreso al canal principal, para bifurcaciones a 30° y 90° respectivamente.

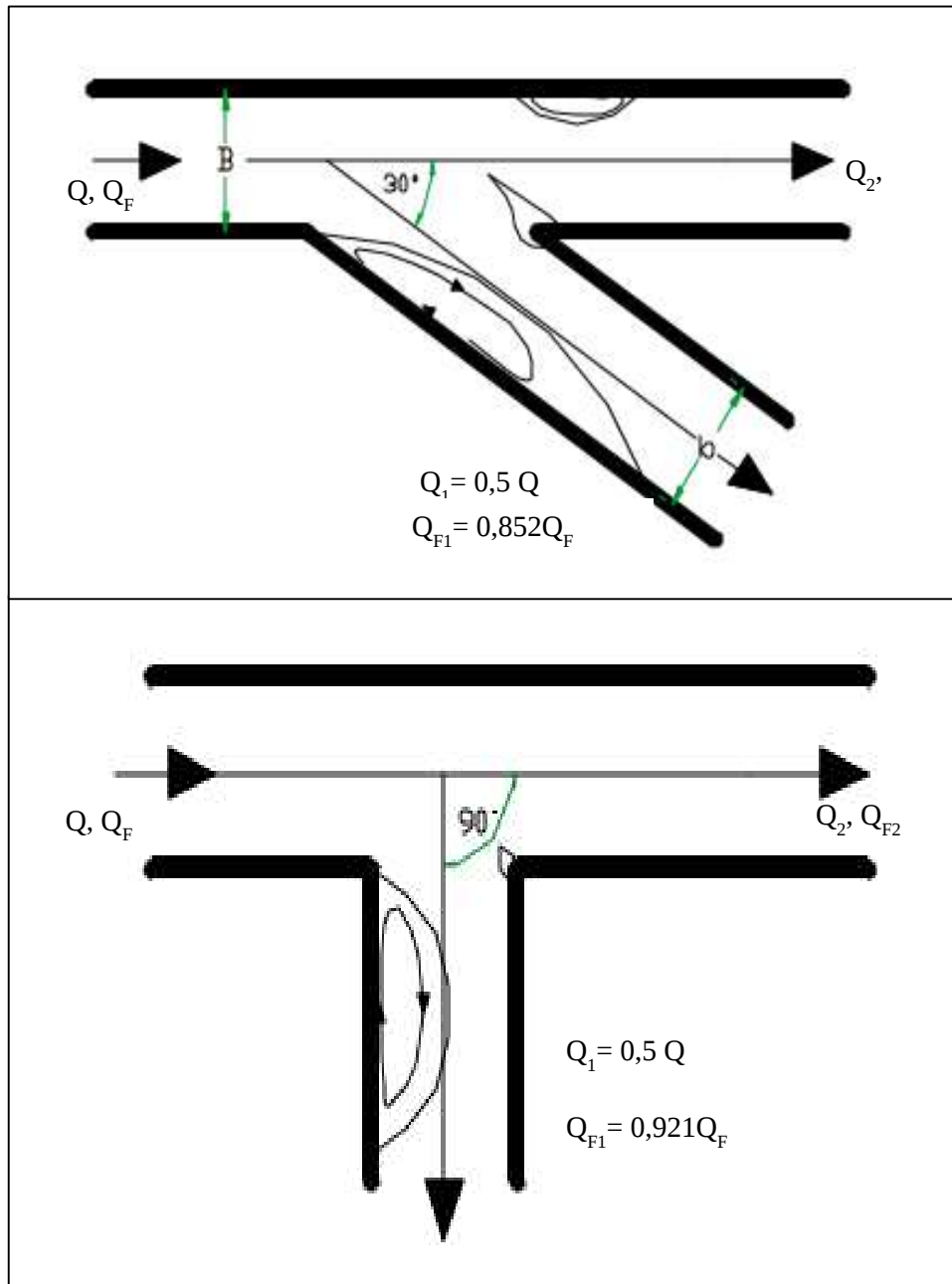


Ilustración 5-25 Modelos físico de una bocatoma con bifurcación a 30° y 90° con aristas vivas, estudiados por Thoma
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Ilustración 5-26, que la primera diferencia entre el modelo físico realizado por Thoma en un laboratorio y el realizado por modelación numérica mediante el software Telemac Mascaret 2D, es la zona de recirculación ubicada aguas arriba del canal derivador. No existe zona de recirculación para una captación de agua del 50% del canal principal hacia el derivador, para el caso de una bocatoma con bifurcación a 30°. Para el caso de una bocatoma con bifurcación a 90° se puede observar que si coincide con la formación de una zona de recirculación aguas arriba del canal derivador.

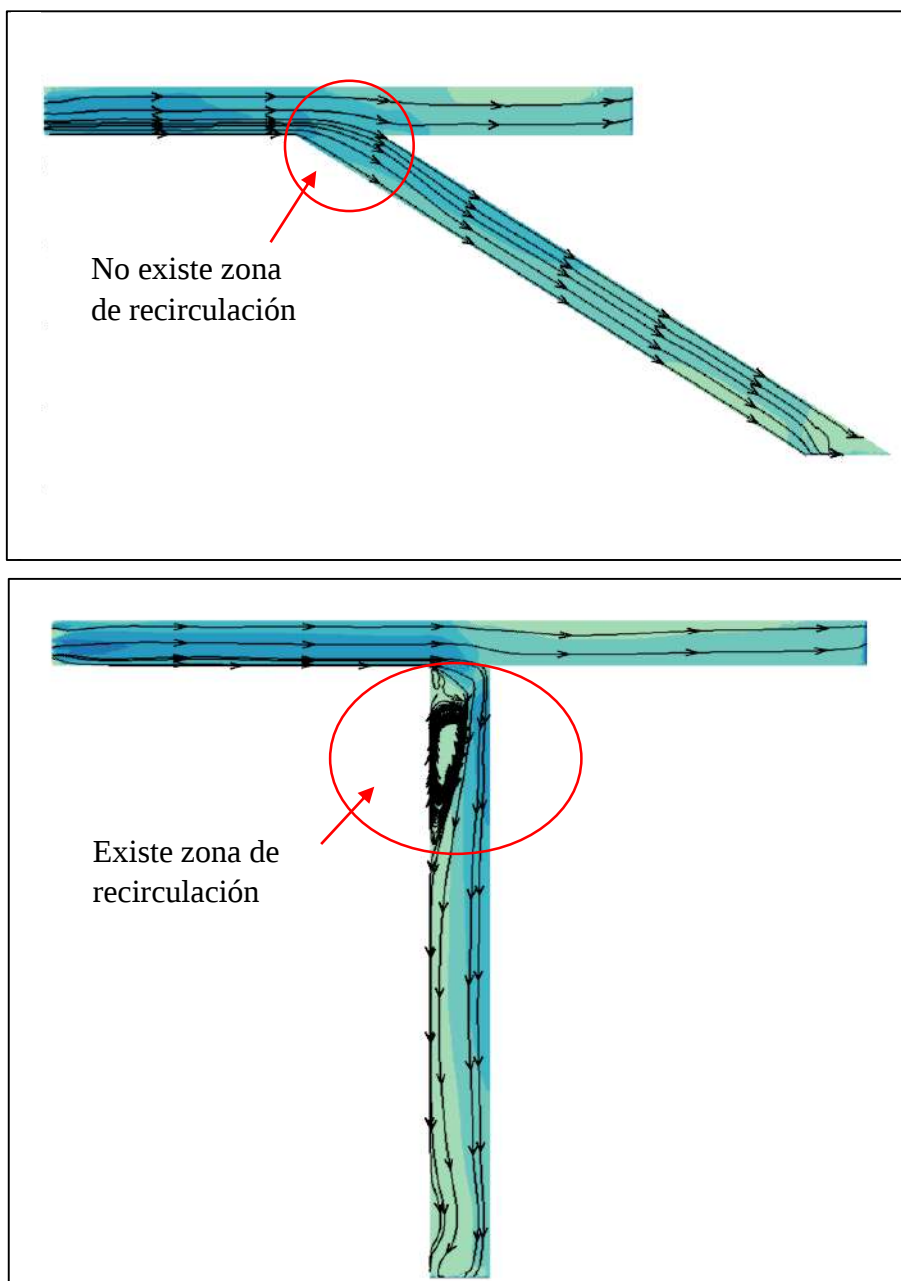


Ilustración 5-26 Resultado de la ejecución del modelo de Thoma mediante el programa Telemac Mascaret 2D

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5-17 muestra los resultados de las cargas sólidas de fondo tanto para el canal principal como derivador. Se observa que el porcentaje de caudal sólido para el canal derivador (Q_{s1}) es el 93,817% y 65,071% respecto al caudal sólido que ingresa al canal principal, para bocatomas con bifurcación a 30° y 90° respectivamente. Comparando los

resultados del modelo físico de Thoma con el modelo numérico no nos arroja exactamente una captación del caudal sólido del 85% y 92,2% para bifurcaciones a 30° y 90° respectivamente, pero como menciona el Dr. Ing. Arturo Rocha en su libro “Análisis del comportamiento de los sólidos en una bifurcación”, luego de estudiar las investigaciones realizadas por Thoma, Bulle, Vogel y Dancy (apartado 2.5), la tendencia que tienen en una bifurcación las capas inferiores del escurrimiento, cargadas de sedimento, es de dirigirse perfectamente hacia el canal derivador.

Se cumple que el caudal sólido tiende a dirigirse hacia el canal derivador en un porcentaje mayor al 50% del caudal sólido de entrada.

Tabla 5-17 Resultados de los caudales sólidos de fondo mediante modelación numérica Telemac Mascaret 2D

	Carga sólida de fondo			Porcentaje	
	Qs	Qs1	Qs2	Qs1	Qs2
	l/s	l/s	l/s	%	%
Bifurcación a 30°	0.492	0.4616	0.304	93.817	6.183
Bifurcación a 90°	0.314	0.204	0.110	65.071	34.929

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las investigaciones hechas por Vogel (apartado 2.5.3), los resultados de la simulación de modelos numéricos presentados en la Tabla 5-17, no guardan relación con los modelos físicos, ya que Vogel expresa que para arenas finas cuando la relación de bocatoma es 0,5 el coeficiente de captación sólida es 0,52 (para bocatomas con bifurcación a 90° con aristas vivas). Se observa en la tabla presentada con resultados de la modelación numérica Telemac Mascaret 2D que la captación de sólidos es 0,65.

Existe discrepancia entre lo expresado por las investigaciones de Benini (apartado 2.5.5) y los resultados de la modelación numérica expresados en la Tabla 5-1. El ángulo de derivación “ θ ” sí tiene influencia sobre el coeficiente de captación sólida, según los resultados arrojados por la modelación numérica, rectificando lo expuesto por Benini que concluye que el ángulo no influye.

5.5. Análisis de resultados

A continuación, se presentan gráficos adimensionales que muestran las relaciones entre los resultados de los modelos de bocatomas con bifurcaciones a 90° con aristas vivas y redondeadas.

El Apéndice E contiene las tablas con los valores que se tomaron en cuenta para las siguientes gráficas.

5.5.1 Influencia de los anchos de la bifurcación en la captación de agua

Se observa en la Ilustración 5-27 que a medida que aumenta el ancho del canal derivador, también aumenta la captación de agua. Para el caso del canal principal, al aumentar la captación de agua en la derivación, la captación de agua para la extensión del canal principal disminuye.

El porcentaje de captación de agua en el canal derivador, para una relación de anchos de 0,2 y 0,4 (ancho del canal derivador 1 y 2 respectivamente) la captación de agua del canal

derivador para ambos casos es el 10% y 20% aproximadamente. Por el contrario, cuando la relación de anchos es igual a 1 para una bifurcación a 90° con aristas vivas, no sobrepasa el 30% por el contrario, cuando tiene aristas redondeadas el porcentaje de captación es casi el 50% del caudal de entrada.

Se tiene un coeficiente de correlación muy cercano a 1 lo que indica una relación lineal perfecta.

5.5.2 Líneas de corriente de agua en la bifurcación a 90° con aristas vivas y redondeadas, con partículas de arena de diámetro 1,2 mm

En el apéndice F se muestra la ilustración de las direcciones de velocidades en una bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas y redondeadas. Se puede observar que la dirección del flujo para el caso de aristas vivas presenta una zona de recirculación aguas arriba del canal derivador, que influye en la reducción del ancho geométrico, presentando zonas de mayor sedimentación como se explica en el apartado 5.2 y 5.3.

Los modelos con aristas redondeadas no generan zonas de recirculación en el canal derivador, estas se localizan justo en la parte de las aristas redondeadas, por lo que no interrumpen el ancho geométrico del canal, evitando así la acumulación de sedimentos.

5.5.3 Influencia de la captación líquida en el número de Froude

Se observa en la Ilustración 5-28 que a medida que aumenta el porcentaje de captación de agua en el canal derivador con aristas vivas y redondeadas, el número de Froude aumenta. Lo contrario pasa con la extensión del canal principal, a medida que aumenta la captación de agua, el número de Froude disminuye.

Aguas abajo del canal derivador y extensión del canal principal el estado de flujo se mantiene en subcrítico, pero en la trayectoria presenta resaltos hidráulicos por los cambios de estado descritos en el apartado 5.1.3.

Se tiene un coeficiente de correlación muy cercano a 1 lo que indica una relación lineal perfecta.

5.5.4 Influencia de la captación líquida en el tirante

Se observa en la Ilustración 5-29 que a medida que aumenta el porcentaje de captación de agua en el canal derivador con aristas vivas y redondeadas, el tirante disminuye. Lo mismo ocurre para la captación de agua en la extensión del canal principal.

Se tiene un coeficiente de correlación muy cercano a 1 lo que indica una relación lineal perfecta.

Los modelos con aristas redondeadas alcanzan un menor y mayor tirante respecto a los modelos con aristas vivas, para el caso del canal derivado y extensión del canal principal respectivamente.

5.5.5 Influencia de la captación líquida en las velocidades

Se observa en la Ilustración 5-30 que, a medida que aumenta la captación de agua en el canal derivador con aristas vivas y redondeadas, aumenta la velocidad. Para ambos casos con aristas vivas y redondeadas, cuando la captación de agua del canal derivador llega a un 30% y 50% respectivamente del caudal de entrada del canal principal respectivamente, la

velocidad alcanzada por ambos casos llega a un 70% y 80% de la velocidad con la que ingresa el flujo.

A medida que aumenta la captación de agua en la extensión del canal principal, la velocidad disminuye. Se alcanza una mayor velocidad para una captación de agua del 15% en el canal derivador, respecto a una captación del 50% (bifurcación a 90° con aristas redondeadas)

Se tiene un coeficiente de correlación muy cercano a 1 lo que indica una relación lineal perfecta.

5.5.6 Influencia de la captación líquida en la captación sólida

Se observa en la Ilustración 5-31 que, a medida que aumenta la captación de agua en el canal derivador con aristas vivas y redondeadas, la captación de sólidos aumenta, siendo menor esta captación para los casos con aristas redondeadas. Esto sucede ya que al aumentar el ancho del canal derivador el tirante disminuye con lo que la captación de sólidos aumenta.

Para una captación de agua del 50% en el canal derivador con aristas vivas y redondeadas, existe una captación de sólidos del 63% y 50% respectivamente. Menor en los casos con aristas redondeadas. Ocurre lo mismo para la extensión del canal principal.

Cuando la captación de agua en el canal derivador no excede el 40% del canal principal, la captación de sólidos tampoco excede ese porcentaje, para ambos modelos.

Se tiene un coeficiente de correlación muy cercano a 1 lo que indica una relación lineal perfecta.

5.5.7 Influencia del ancho de bifurcación en la captación de sólidos

La Ilustración 5-32 muestra que a medida que aumenta el ancho del canal derivador con aristas vivas, aumenta el coeficiente de captación de sólidos, rectificando lo expuesto en las investigaciones de Benini (2.5.5) donde concluye que el ancho del canal derivador no produce variaciones. La captación de sólidos no sobrepasa el 40%, para una relación de anchos igual a 1. Lo contrario pasa para la extensión del canal principal, a mayor ancho del canal derivador, se disminuye la captación de sólidos.

Se tiene un coeficiente de correlación muy cercano a 1 lo que indica una relación lineal perfecta.

Los datos de la Ilustración 5-32 no incluyen los datos del modelo de Thoma realizado mediante modelación numérica.

5.5.8 Influencia del coeficiente de contracción en la captación de sólidos

Se observa en la Ilustración 5-33, para bocatomas con bifurcación a 90° con aristas vivas que a medida que aumenta el coeficiente de contracción en el canal derivador (reducción del ancho geométrico a un ancho efectivo), la captación de sólidos disminuye, por el contrario, para la extensión del canal principal la relación de captación de sólidos aumenta.

Se tiene un coeficiente de correlación muy cercano a 1 lo que indica una relación lineal perfecta.

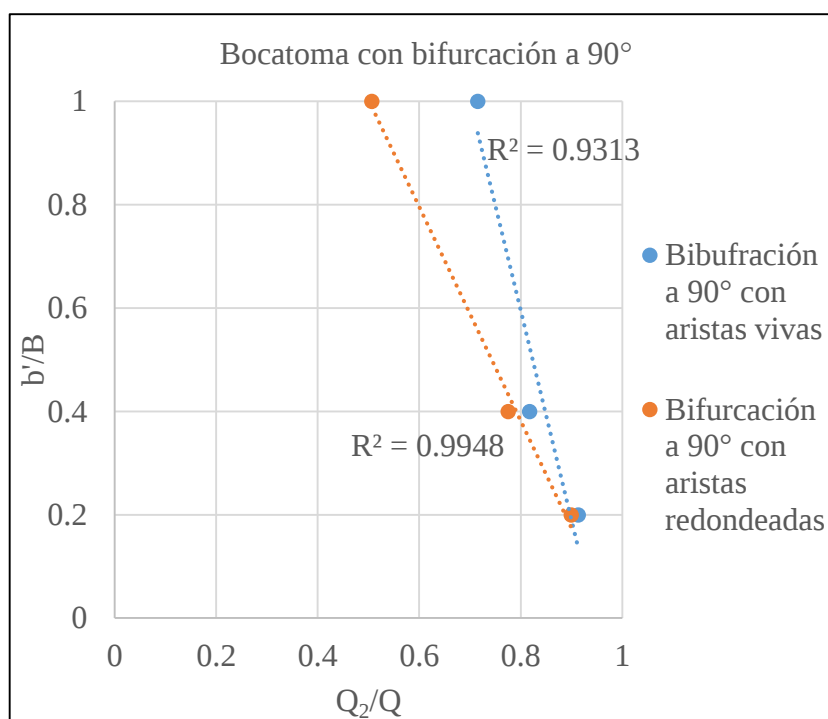
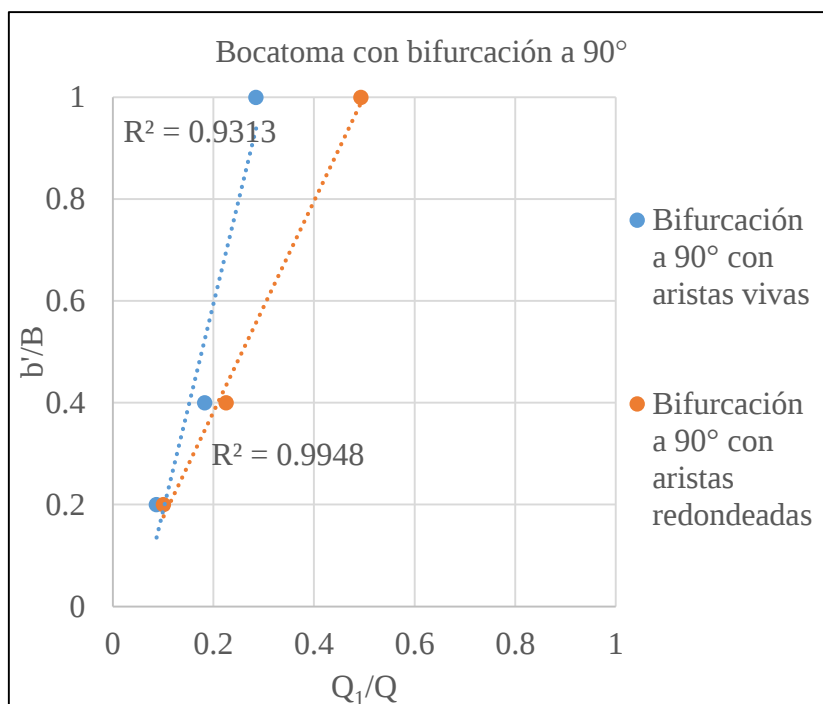


Ilustración 5-27
Fuente: Elaboración propia

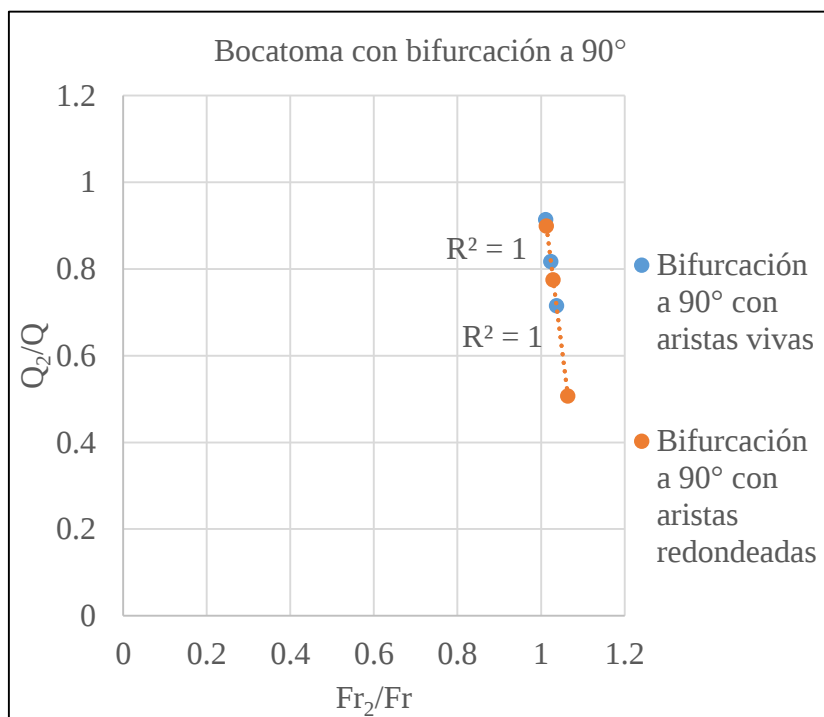
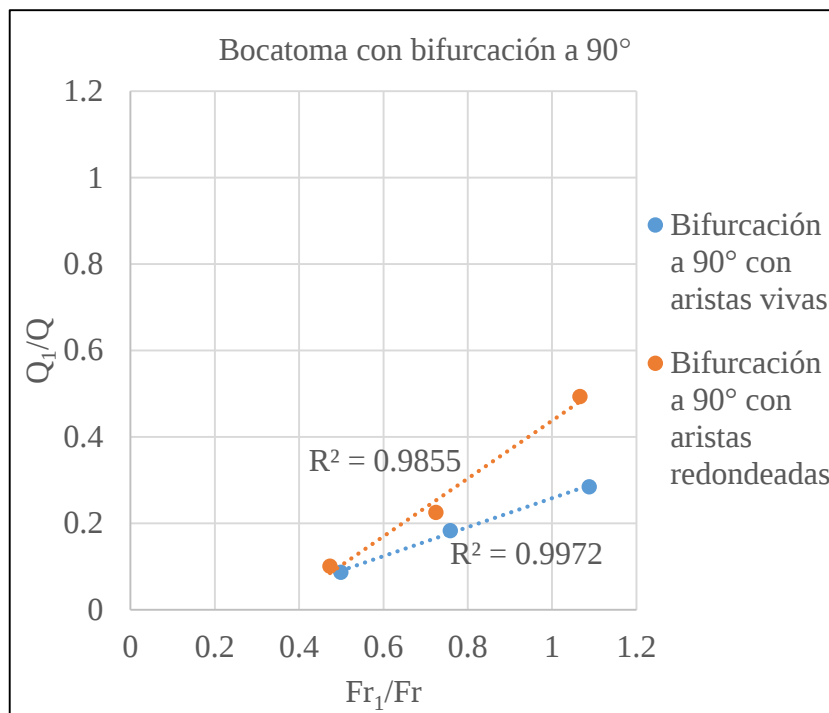


Ilustración 5-28
Fuente: Elaboración propia

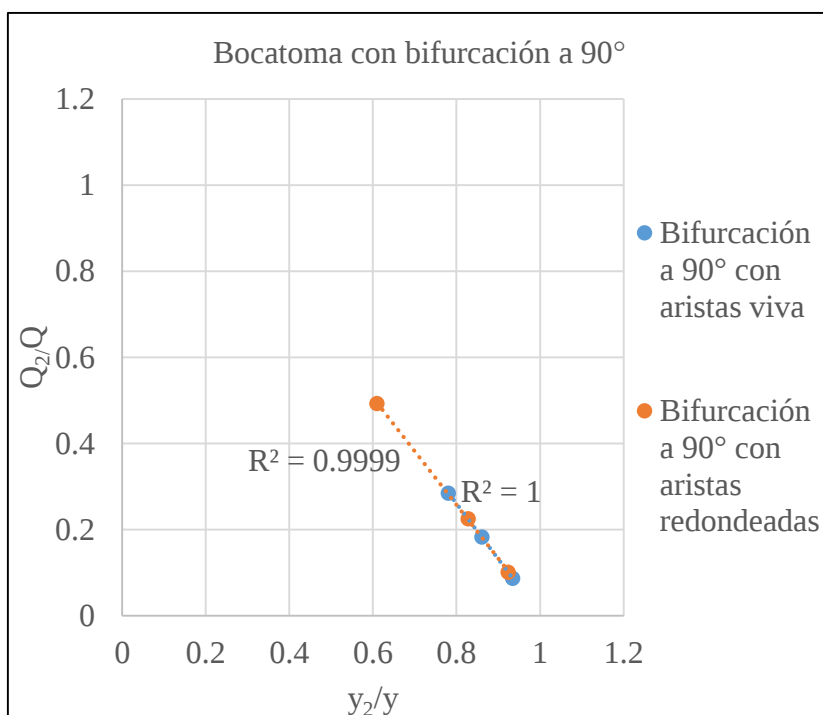
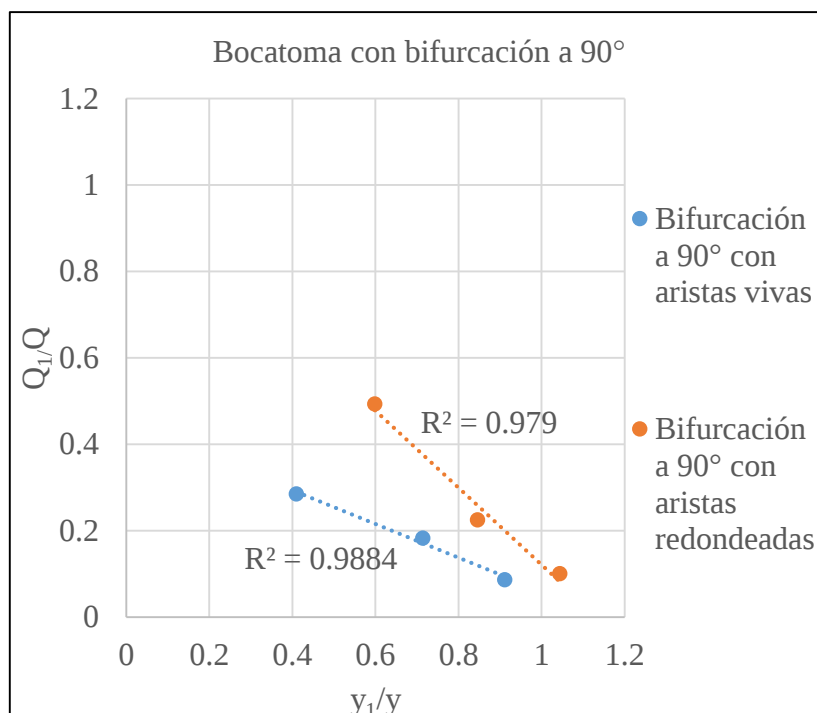


Ilustración 5-29

Fuente: Elaboración propia

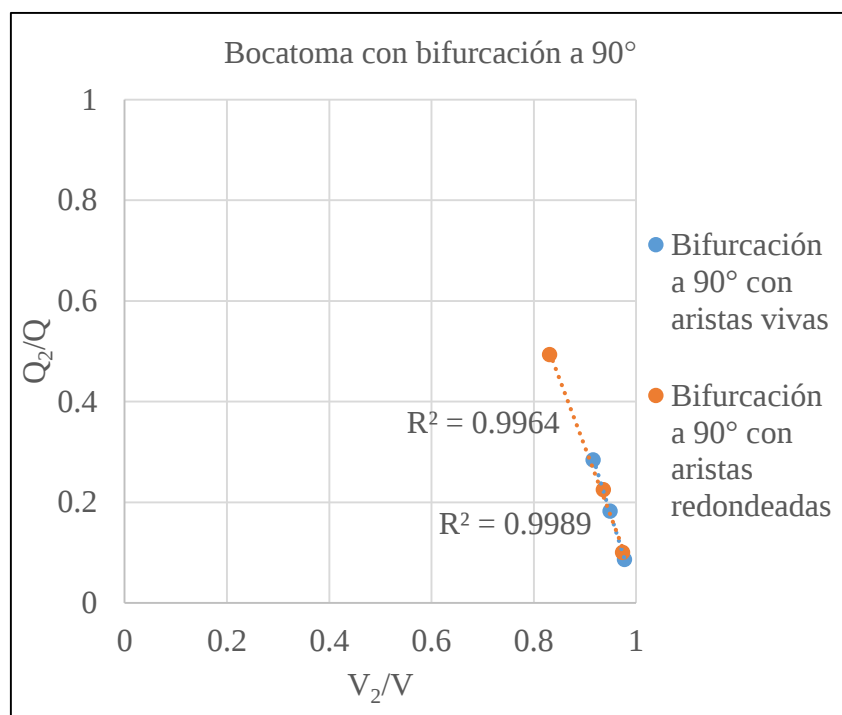
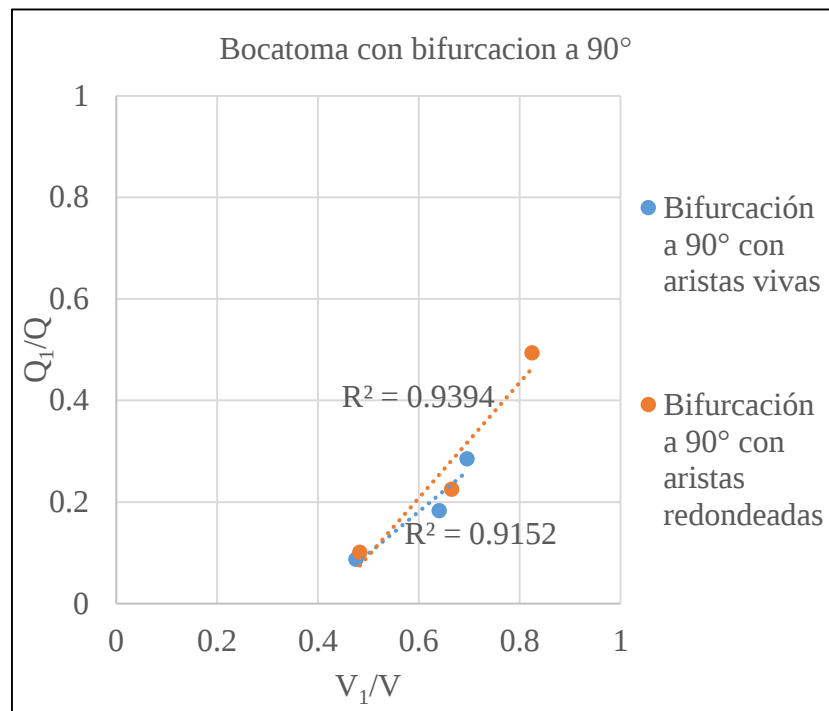


Ilustración 5-30
Fuente: Elaboración propia

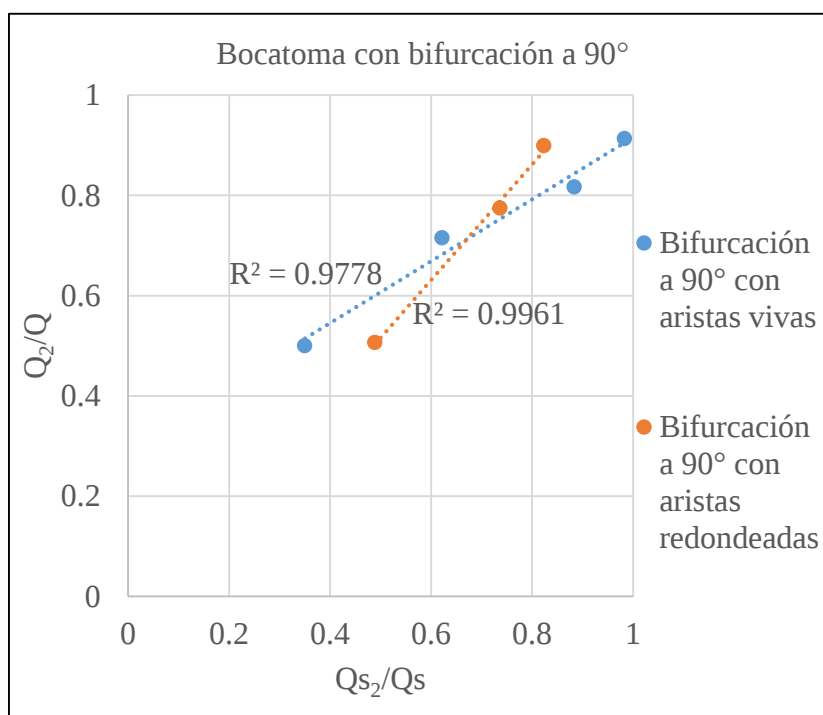
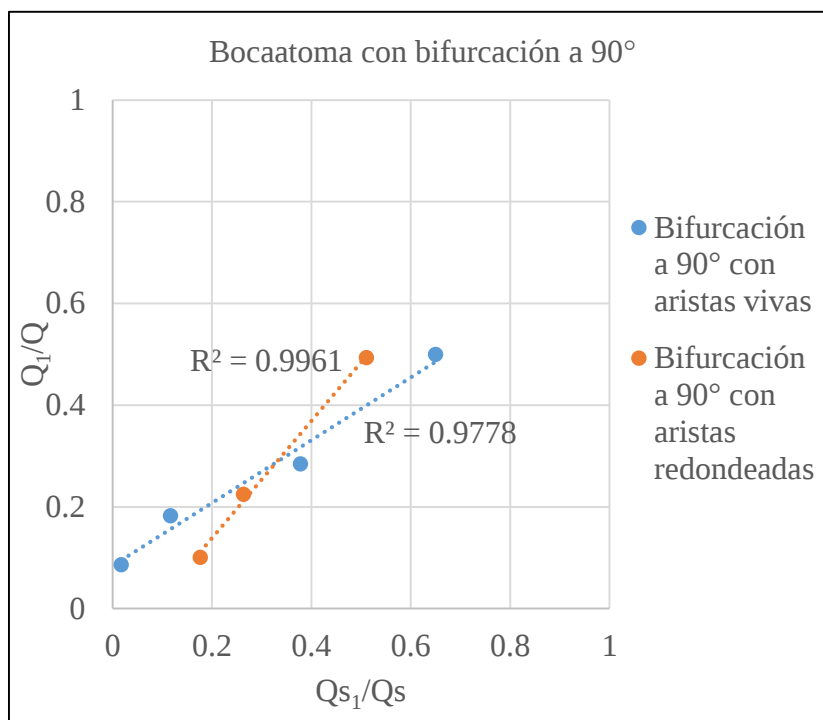


Ilustración 5-31
Fuente: Elaboración propia

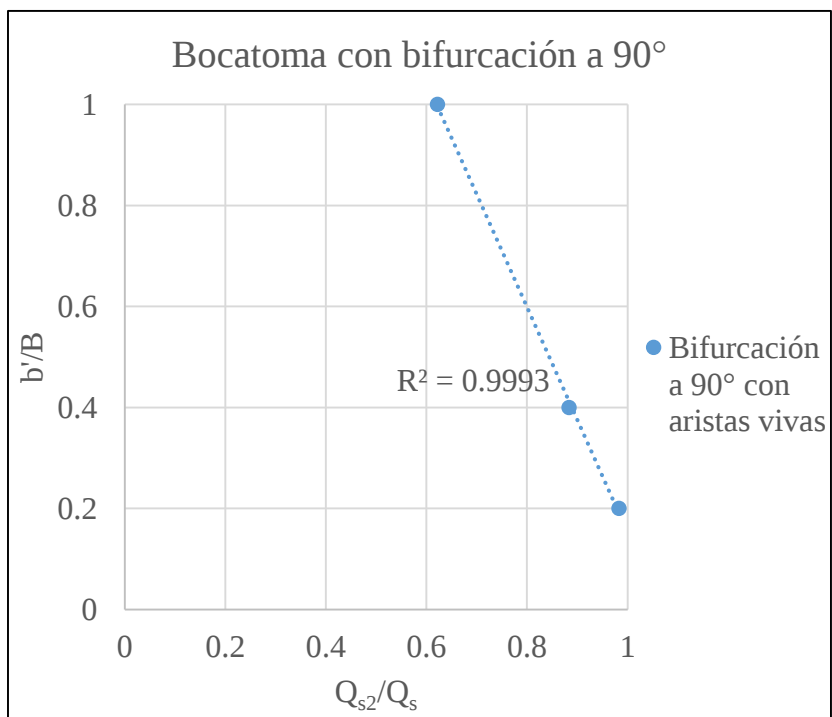
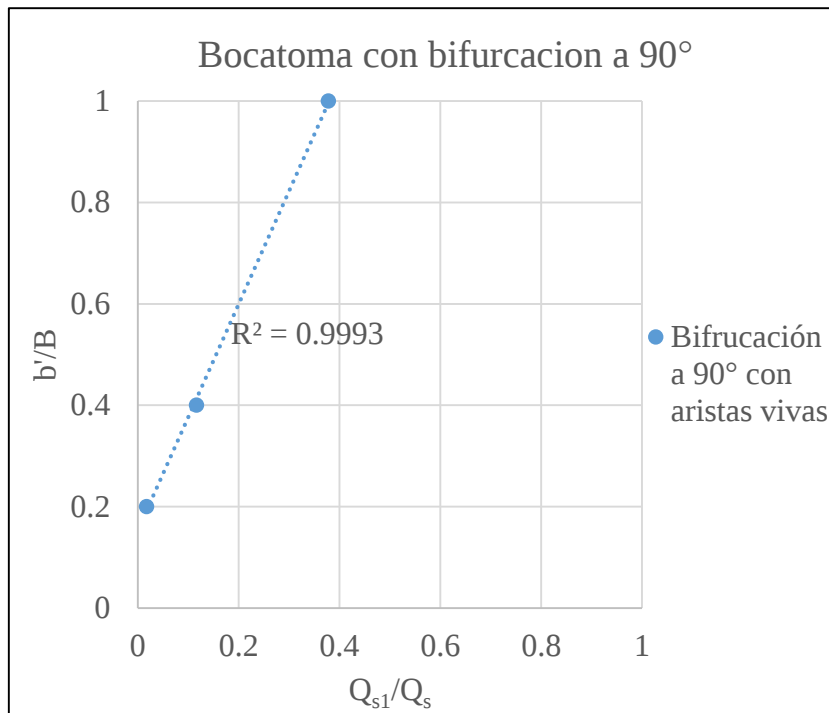


Ilustración 5-32
Fuente: Elaboración propia

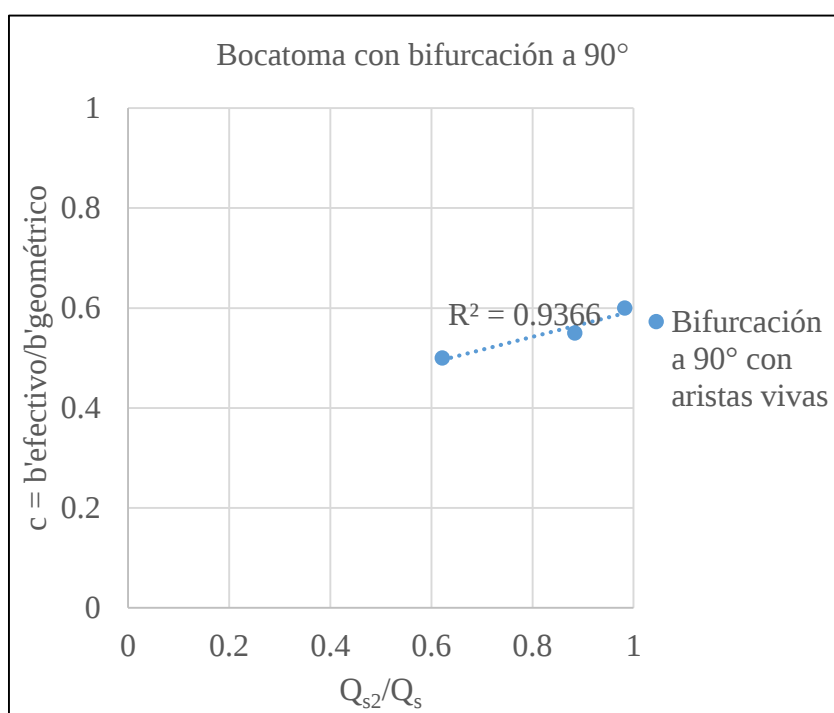
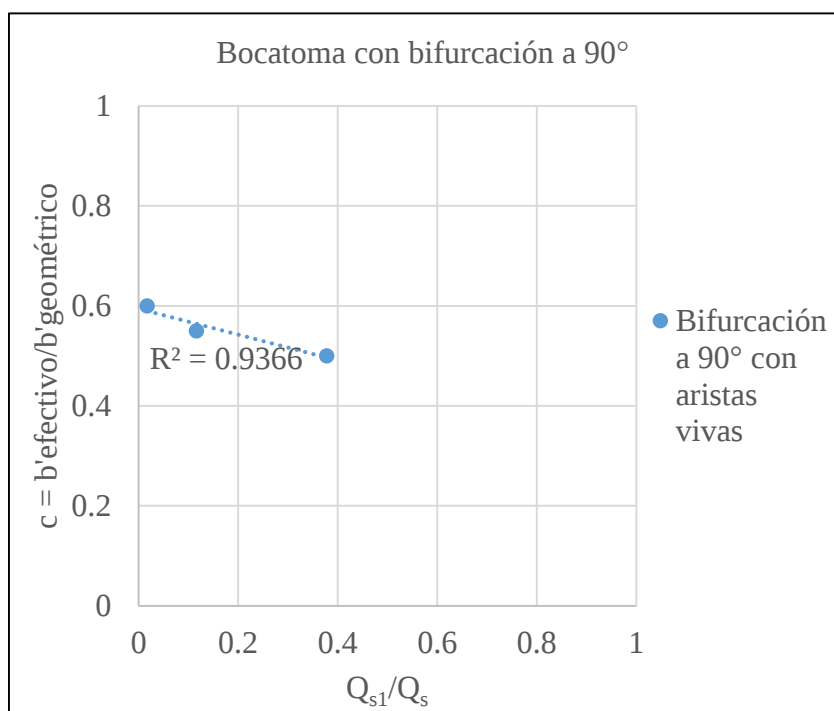


Ilustración 5-33
Fuente: Elaboración propia

Conclusiones y recomendaciones

- Al comparar los resultados mencionados en la presente tesis respecto a la modelación numérica y los modelos físicos recopilados e interpretados por el Dr. Ing. Arturo Rocha, se comprueba la similitud entre ambos para el comportamiento de una bocatoma con bifurcación a 90° libre de estructuras. Siendo un gran aporte en el ámbito de la Ingeniería Hidráulica, así como un ahorro de tiempo y dinero.
- Se comprueba que, a medida que aumenta el ancho del canal derivador, aumenta la captación de agua. Para el caso de bifurcaciones a 90° con aristas vivas la captación de agua para anchos de 1 m, 2 m y 5 m es del 10%, 20% y 30% respectivamente. Igualmente, para aristas redondeadas, la captación de agua es de 12%, 22% y el 50% respectivamente para los anchos mencionados. Siendo mayor la captación para los modelos con arista redondeadas.
- Mediante la modelación numérica se comprueba la generación de una zona de recirculación aguas arriba del canal derivador, la cual llega a ocupar aproximadamente la mitad del ancho geométrico del canal. Esta zona reduce dicho ancho, el cual se ve afectado por un coeficiente de contracción “c”.
- Se presenta una reducción del caudal sólido captado en los modelos estudiados de bocatomas con bifurcación a 90° con aristas redondeadas respecto a los modelos con aristas vivas, esta curva provoca que la zona de recirculación se ubique a la entrada del canal derivador y no afecte su ancho geométrico, lo que evita la acumulación de sedimentos en dicho canal y un mejor recorrido del flujo de agua combinado con sedimentos. Por el contrario, en los modelos con aristas vivas la zona de recirculación ocasiona una reducción de ancho geométrico, produciendo una mayor sedimentación a lo largo del canal derivador. Estos resultados coinciden con las investigaciones realizadas por el Dr. Ing. Arturo Roche donde destaca que las bifurcaciones con aristas redondeadas provocan una reducción de vórtice (zona de recirculación) generada a la entrada de la bifurcación, lo que provoca una reducción del caudal sólido captado.
- A medida que aumenta la captación de agua en la bifurcación a 90° con aristas vivas y redondeadas, la captación de sólidos aumenta, siendo menor esta captación para los casos con aristas redondeadas. Esto sucede ya que al aumentar el ancho del canal el tirante disminuye con lo que la captación de sólidos aumenta. Por ejemplo, para una captación de agua del 50% en el canal derivador con aristas vivas y redondeadas, existe una captación de sólidos del 63% y 50% respectivamente. Menor en los casos con aristas redondeadas. Ocurre lo mismo para la extensión del canal principal.
- Se justifica que el diseño de bocatoma con bifurcación a 90° con aristas redondeadas al tener una menor captación de sólidos tanto en el canal principal como derivador, el nivel

de agua también se ve reducido respecto a los modelos con aristas vivas. Para el caso del modelo 1 con aristas vivas, cuando el ancho de canal derivador es 1 m, el nivel del agua sobrepasa el límite de los 12,5 m establecidos, por el contrario, cuando se modifican las aristas vivas a redondeadas, el nivel de agua se reduce a 12,1 m.

- Para bocatomas con bifurcación a 90° con aristas vivas, se observa que, a medida que aumenta el coeficiente de contracción (reducción del ancho geométrico a un ancho efectivo) para los 3 modelos con anchos de 1 m, 2 m y 5 m, la relación de captación de sólidos en el canal derivador disminuye, por el contrario, para la extensión del canal principal la relación de captación de sólidos aumenta.
- Se comprueba que la tendencia de las capas inferiores del escurrimiento presentes en los canales, se dirigen perfectamente hacia el canal derivador.

Los modelos numéricos ejecutados en la presente tesis, muestran que el caudal sólido tiende a dirigirse hacia el canal derivador en un porcentaje mayor al 50% del caudal sólido de entrada, como consecuencia de la pendiente transversal que se crea en la bifurcación. Esta tendencia es mayor al aumentar la captación del canal derivador, así como el aumento de su ancho. A este fenómeno se le denomina efecto Bulle.

- Para bocatomas con bifurcación a 30° y 90° respectivamente, el porcentaje de caudal sólido para el canal derivador (Q_{s1}) es el 93,817% y 65,071% respecto al caudal sólido que ingresa al canal principal. Con estos resultados se comprueba que el ángulo de derivación " θ " sí tiene influencia sobre el coeficiente de captación sólida.
- Se comprueba que no existe la misma relación entre la distribución de caudales líquidos y sólidos de fondo.
- Se comprueba que a medida que las relaciones de descarga aumentan (incremento del ancho del canal derivador) la región de recirculación en este canal se extiende tanto a lo largo como ancho del mismo.
- Se recomienda hacer simulaciones con modelación numérica para los mismos diseños ejecutados con un ingreso de granulometría variada, ya que la presente tesis muestra resultados para un solo tamaño de partícula de sedimento. También se recomienda hacer simulaciones en tramos curvos, en donde exista mejores condiciones de ubicación de la bocatoma para poder observar el comportamiento de los sedimentos en el canal derivador.

Finalmente se recomienda el uso de un espigón ubicado antes de la entrada hacia la bifurcación a 90° , ya que esto logrará disminuir el ingreso de sedimentos al canal derivador debido al efecto curvo que se genera, lo cual permite una tasa menor al 2% y 38% de la captación de sólidos. Los resultados favorables se deben a la presencia de una corriente helicoidal. Esta recomendación está comparada con los resultados expuestos en los apuntes del curso Diseño de Obras Hidráulicas, Maestría Recursos Hídricos de la Universidad de Piura, investigado por del Dr. Ing. Jorge Reyes.

- Para obtener importantes ahorros en los proyectos, primero se debe recurrir a la modelación numérica y posteriormente con estos resultados verificar con la modelación física el proyecto.

Referencia Bibliográfica

- Anguisaca, M., & Maza, X. (2012). Estudio de los procesos de flujo en una obra de captación mediante experimentación de un modelo físico de escala reducida. Estudio para el proyecto Hidrosanbartolo. Teis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad de Cuenca, Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/775/1/ti901.pdf>
- Aquaterra Ingenieros LTDA. (2009). Guías de reconocimiento de obras tipo y procedimientos. Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile. Recuperado el Mayo de 2017, de <http://documentos.dga.cl/INF5049.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua. (2010). Criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico. Manual, AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA, Lima. Recuperado el Setiembre de 2017, de <http://www.ana.gob.pe/media/389716/manual-dise%C3%B1os-1.pdf>
- Balairón, L. (2004). Modelación matemática en el ámbito de la dinámica fluvial. Ingeniería del agua. Obtenido de <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2011/pdf/LBalairon.pdf>
- Benini, G. (1955). Sull'angolo di presa di una derivazione: L'Energía Electrica.
- Bulle, H. (1926). Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen.
- Cailleux, A. (1965). Anatomy of Earth (World University Library). Littlehampton Book Services.
- Carrasco, P. (1989). Estudio del transporte de sedimento en canales. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Univeridad de Piura, Piura, Piura.
- Castro, M., & Hidalgo, X. (2003). Sobre la modelación hidráulica en obras de saneamiento básico. Escuela Politécnica Nacional, Departamento de ciencias del agua, Quito. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/ecuador10/leo.pdf>
- Cristiani, M. (1955). Wasserableitung aus Flüssen mit Sedimentbewegung.
- Dancy, A. (1927). Stream sedimentation in a divides channel. Thesis Iowa State University.

- Díaz, P. (2015). Estudio experimental de los panales de Odgaard para trabajar en contra del efecto Bulle. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Obtenido de [file:///C:/Users/Yesenia/Downloads/TFG_Diaz_Pablo%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Yesenia/Downloads/TFG_Diaz_Pablo%20(2).pdf)
- Elera, G. A. (2005). Modelación numérica del Río Piura utilizando River 2D, entre los puentes Cáceres e Integración. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad de Piura, Piura.
- García, M. H. (2004). Sedimentation Engineering - Processes, Measurements, Modelling, and Practice. American Society of Civil Engineers.
- García, M., & Maza, J. A. (1998). Origen y propiedades de los sedimentos. Universidad Nacional Autónoma de México. México: Instituto de Ingeniería de la UNAM. Recuperado el 2017 de 2017, de http://eias.utalca.cl/isi/publicaciones/unam/origen_y_propiedades_de_los_sedimentos.pdf
- Günter, A. (1971). Force de entraînement moyene critique ôc, avec prise en consideration des fluctuations dues a la turbulence, de la force d'entraînement agissant le materiau de un lit alluvionnaire. Congress of the International Association for Hydraulic.
- Herrera, A. A. (2004). Investigación en modelo hidráulico de la represa de la hidroeléctrica Chimay. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad de Piura, Departamento de Ingeniería Civil, Piura.
- Krumbein, W. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology.
- Lang, P. (2014). Telemac modelling system.
- Law, S. W. (1965). Dividing flow in an open channel. McGill University, Department of Civil Engineering, Montreal.
- Martín, J. (2003). Ingeniería de ríos. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A de C.V. Obtenido de <https://www.slideshare.net/LOSHVID/ingenieria-de-rios-martin-vide>
- McNown, J., & Malaika, J. (1950). Effects of Particle Shape on settling velocity at low Reynolds number. Transactions American Geophysical Union (AGU), Vol. 31.
- Potter, M., & Wiggert, D. (2003). Mecánica de fluidos (Tercera ed.). S.A Ediciones Paraninfo.
- Reyes, J. (2015). Apuntes de clase del curso Diseño de obras hidráulicas de la Universidad de Piura. Los sedimentos. Piura, Piura, Perú: Universidad de Piura.
- Reyes, J. (2017). Apuntes del curso Diseño de Obras Hidráulicas, Maestría Recursos Hídricos de la Universidad de Piura. Piura, Piura, Perú: Universidad de Piura.
- Rocha, A. (2005). Análisis del comportamiento de los sólidos en una bifurcación. Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI.

- Rocha, A. (1978). Introducción teórica al estudio de bocatomas. Universidad Nacional de Ingeniería, Departamento de hidráulica e hidrología, Lima.
- Rocha, A. (1998). Introducción a la hidráulica fluvial (Primera ed.). Perú.
- Rocha, A. (2007). Hidráulica de tuberías y canales (Primera ed.). Lima, Perú.
- Ruiz, C. (2017). Calibración hidráulica del desarenador de San Gaban analizando modelos de turbulencia con Telemac-3D. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad de Piura, Piura, Piura.
- Schultz, E., & Albertson, M. (1954). Influence of shape on the fall velocity of sedimentary particles. MRD Series N°3.
- Sparrow, E. (2008). Estructuras hidráulicas. Universidad Nacional del Santa, Perú. Obtenido de <https://es.slideshare.net/LuisSantillanTafur/bocatoma>
- Tassi, P. (2014). Sisyphe V6.3 User's Manual.
- Thoma, H. (1933). Mechanics of sediment transport.
- Vogel, H. (1934). Diversions from alluvial channels.
- Wadell, H. (1932). Volume, Shape, and roundness of rock particles. Journal of Geology, 443-451.
- Wentworth, C. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. Journ Geol, 377-392.
- Zingg, T. (1935). Beitrage zur Shotteranalyse. Schweiz. MIneral. Obtenido de <file:///C:/Users/Yesenia/Downloads/859285037.TRABAJO%20PR%C3%81CTICO%20N%C2%B03.pdf>

APÉNDICE

APÉNDICE A

**Resultados para los modelos de bocatomas con bifurcación a 90° con
aristas vivas**

Tabla A-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: $b = 1 \text{ m}$						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
	m	m	m	m	m	m/s	
1	1060.672	376.018	9.997	2.226	12.223	1.989	0.426
2	1060.672	377.168	9.997	2.203	12.201	2.569	0.553
3	1060.672	378.318	9.997	2.094	12.092	2.959	0.653
4	1060.672	379.468	9.997	2.292	12.289	2.882	0.608
5	1060.672	380.618	9.997	2.087	12.085	1.947	0.430
6	1070.072	376.018	9.988	2.169	12.157	2.238	0.485
7	1070.072	377.168	9.988	2.158	12.146	2.769	0.602
8	1070.072	378.318	9.988	2.159	12.147	2.992	0.650
9	1070.072	379.468	9.988	2.189	12.177	2.771	0.598
10	1070.072	380.618	9.988	2.231	12.219	2.277	0.487
11	1079.472	376.018	9.979	2.251	12.230	2.399	0.510
12	1079.472	377.168	9.979	2.210	12.188	2.738	0.588
13	1079.472	378.318	9.979	2.171	12.150	2.913	0.631
14	1079.472	379.468	9.979	2.155	12.134	2.689	0.585
15	1079.472	380.618	9.979	2.141	12.120	2.334	0.509
16	1088.872	376.018	9.969	2.199	12.169	2.387	0.514
17	1088.872	377.168	9.969	2.172	12.141	2.651	0.574
18	1088.872	378.318	9.969	2.171	12.140	2.852	0.618
19	1088.872	379.468	9.969	2.210	12.179	2.710	0.582
20	1088.872	380.618	9.969	2.214	12.183	2.471	0.530
21	1098.272	376.018	9.960	2.217	12.176	2.413	0.517
22	1098.272	377.168	9.960	2.220	12.180	2.650	0.568
23	1098.272	378.318	9.960	2.201	12.161	2.821	0.607
24	1098.272	379.468	9.960	2.185	12.145	2.687	0.580
25	1098.272	380.618	9.960	2.187	12.147	2.508	0.541
26	1107.672	376.018	9.950	2.010	11.960	3.169	0.714
27	1107.672	377.168	9.950	2.215	12.165	2.658	0.570
28	1107.672	378.318	9.950	2.237	12.187	2.672	0.570
29	1107.672	379.468	9.950	2.231	12.182	2.541	0.543
30	1107.672	380.618	9.950	2.223	12.174	2.406	0.515
31	1108.172	376.018	9.950	2.159	12.109	2.619	0.569
32	1108.172	377.168	9.950	2.242	12.192	2.551	0.544
33	1108.172	378.318	9.950	2.249	12.199	2.621	0.558
34	1108.172	379.468	9.950	2.240	12.190	2.506	0.535
35	1108.172	380.618	9.950	2.234	12.184	2.375	0.507

Tabla A-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: $b = 1 \text{ m}$						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
	m	m	m	m	m	m/s	
36	1108.672	376.018	9.949	2.448	12.397	1.560	0.318
37	1108.672	377.168	9.949	2.276	12.226	2.419	0.512
38	1108.672	378.318	9.949	2.261	12.210	2.567	0.545
39	1108.672	379.468	9.949	2.249	12.198	2.471	0.526
40	1108.672	380.618	9.949	2.245	12.194	2.345	0.500
41	1118.072	376.018	9.940	2.315	12.255	2.155	0.452
42	1118.072	377.168	9.940	2.309	12.249	2.332	0.490
43	1118.072	378.318	9.940	2.299	12.239	2.415	0.509
44	1118.072	379.468	9.940	2.289	12.229	2.332	0.492
45	1118.072	380.618	9.940	2.285	12.225	2.234	0.472
46	1127.472	376.018	9.930	2.284	12.214	2.162	0.457
47	1127.472	377.168	9.930	2.289	12.219	2.282	0.482
48	1127.472	378.318	9.930	2.303	12.234	2.384	0.501
49	1127.472	379.468	9.930	2.323	12.253	2.348	0.492
50	1127.472	380.618	9.930	2.333	12.264	2.288	0.478
51	1136.872	376.018	9.921	2.310	12.231	2.206	0.463
52	1136.872	377.168	9.921	2.311	12.232	2.284	0.480
53	1136.872	378.318	9.921	2.312	12.233	2.350	0.494
54	1136.872	379.468	9.921	2.313	12.234	2.304	0.484
55	1136.872	380.618	9.921	2.315	12.236	2.253	0.473
56	1146.272	376.018	9.911	2.314	12.225	2.209	0.464
57	1146.272	377.168	9.911	2.316	12.227	2.266	0.476
58	1146.272	378.318	9.911	2.316	12.228	2.321	0.487
59	1146.272	379.468	9.911	2.313	12.225	2.281	0.479
60	1146.272	380.618	9.911	2.311	12.223	2.237	0.470
61	1155.672	376.018	9.902	2.311	12.213	2.190	0.460
62	1155.672	377.168	9.902	2.315	12.217	2.251	0.472
63	1155.672	378.318	9.902	2.326	12.228	2.313	0.484
64	1155.672	379.468	9.902	2.347	12.249	2.295	0.478
65	1155.672	380.618	9.902	2.363	12.265	2.261	0.470
66	1107.872	375.818	9.950	1.782	11.732	3.163	0.756
67	1108.022	375.818	9.950	1.906	11.856	3.159	0.731
68	1108.172	375.818	9.950	2.071	12.021	2.762	0.613
69	1108.322	375.818	9.950	2.225	12.175	2.262	0.484
70	1108.472	375.818	9.950	2.320	12.270	1.683	0.353
71	1107.872	374.568	9.949	1.813	11.762	0.196	0.046

Tabla A-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

	Modelo 1: b = 1 m						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	id	x	y	y		V	F
		m	m	m	m	m/s	
72	1108.022	374.568	9.949	1.814	11.763	0.676	0.160
73	1108.172	374.568	9.949	1.818	11.766	1.747	0.414
74	1108.322	374.568	9.949	1.822	11.770	2.772	0.656
75	1108.472	374.568	9.948	1.823	11.771	3.284	0.777
76	1107.872	373.318	9.948	1.947	11.895	0.397	0.091
77	1108.022	373.318	9.948	1.949	11.896	0.853	0.195
78	1108.172	373.318	9.948	1.948	11.895	1.409	0.322
79	1108.322	373.318	9.947	1.949	11.896	1.998	0.457
80	1108.472	373.318	9.947	1.949	11.896	2.511	0.574
81	1107.872	372.068	9.947	2.009	11.955	0.715	0.161
82	1108.022	372.068	9.946	2.009	11.955	0.998	0.225
83	1108.172	372.068	9.946	2.009	11.955	1.334	0.301
84	1108.322	372.068	9.946	2.009	11.955	1.693	0.381
85	1108.472	372.068	9.946	2.009	11.955	2.026	0.456
86	1107.872	370.818	9.945	2.043	11.989	0.919	0.205
87	1108.022	370.818	9.945	2.043	11.988	1.106	0.247
88	1108.172	370.818	9.945	2.043	11.988	1.324	0.296
89	1108.322	370.818	9.945	2.043	11.988	1.553	0.347
90	1108.472	370.818	9.945	2.043	11.988	1.762	0.393
91	1107.872	368.318	9.943	2.051	11.993	1.155	0.258
92	1108.022	368.318	9.943	2.051	11.993	1.248	0.278
93	1108.172	368.318	9.943	2.051	11.993	1.354	0.302
94	1108.322	368.318	9.942	2.051	11.994	1.461	0.326
95	1108.472	368.318	9.942	2.051	11.994	1.555	0.347
96	1107.872	365.818	9.940	2.053	11.993	1.169	0.261
97	1108.022	365.818	9.940	2.053	11.993	1.224	0.273
98	1108.172	365.818	9.940	2.053	11.993	1.284	0.286
99	1108.322	365.818	9.940	2.053	11.993	1.345	0.300
100	1108.472	365.818	9.940	2.053	11.992	1.397	0.311
101	1107.872	355.818	9.930	2.054	11.985	1.274	0.284
102	1108.022	355.818	9.930	2.055	11.985	1.286	0.286
103	1108.172	355.818	9.930	2.055	11.985	1.301	0.290
104	1108.322	355.818	9.930	2.055	11.985	1.315	0.293
105	1108.472	355.818	9.930	2.055	11.985	1.326	0.295
106	1107.872	345.818	9.920	2.070	11.991	1.299	0.288
107	1108.022	345.818	9.920	2.070	11.991	1.303	0.289

Tabla A-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

	Modelo 1: b = 1 m						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	id	x		y		y	V
	m	m	m	m	m	m/s	
108	1108.172	345.818	9.920	2.071	11.991	1.308	0.290
109	1108.322	345.818	9.920	2.071	11.991	1.313	0.291
110	1108.472	345.818	9.920	2.071	11.991	1.317	0.292
111	1107.872	335.818	9.910	2.072	11.982	1.290	0.286
112	1108.022	335.818	9.910	2.072	11.982	1.291	0.286
113	1108.172	335.818	9.910	2.072	11.982	1.293	0.287
114	1108.322	335.818	9.910	2.072	11.982	1.295	0.287
115	1108.472	335.818	9.910	2.073	11.982	1.297	0.288
116	1107.872	325.818	9.900	2.115	12.015	1.294	0.284
117	1108.022	325.818	9.900	2.115	12.015	1.295	0.284
118	1108.172	325.818	9.900	2.115	12.015	1.296	0.284
119	1108.322	325.818	9.900	2.115	12.015	1.296	0.285
120	1108.472	325.818	9.900	2.115	12.015	1.297	0.285
121	1107.872	318.318	9.893	2.114	12.007	1.264	0.278
122	1108.022	318.318	9.893	2.114	12.007	1.264	0.278
123	1108.172	318.318	9.893	2.114	12.007	1.265	0.278
124	1108.322	318.318	9.892	2.115	12.007	1.265	0.278
125	1108.472	318.318	9.892	2.115	12.007	1.265	0.278

Fuente: Elaboración propia

Tabla A-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: $b = 2 \text{ m}$						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
	m	m	m	m	m	m/s	
1	1060.672	376.018	9.997	1.994	11.991	1.619	0.366
2	1060.672	377.168	9.997	1.975	11.973	4.376	0.994
3	1060.672	378.318	9.997	2.078	12.075	3.322	0.736
4	1060.672	379.468	9.997	1.701	11.699	3.586	0.879
5	1060.672	380.618	9.997	1.564	11.562	1.163	0.297
6	1069.972	376.018	9.988	1.916	11.904	3.021	0.697
7	1069.972	377.168	9.988	1.918	11.906	3.398	0.783
8	1069.972	378.318	9.988	1.962	11.950	3.227	0.735
9	1069.972	379.468	9.988	1.929	11.917	2.971	0.683
10	1069.972	380.618	9.988	1.849	11.837	2.118	0.497
11	1079.272	376.018	9.979	1.875	11.854	2.426	0.565
12	1079.272	377.168	9.979	1.902	11.881	3.319	0.768
13	1079.272	378.318	9.979	1.858	11.837	3.420	0.801
14	1079.272	379.468	9.979	1.874	11.853	2.921	0.681
15	1079.272	380.618	9.979	1.905	11.884	2.369	0.548
16	1088.572	376.018	9.970	1.946	11.916	2.827	0.647
17	1088.572	377.168	9.970	1.910	11.880	3.265	0.754
18	1088.572	378.318	9.970	1.894	11.864	3.310	0.768
19	1088.572	379.468	9.970	1.903	11.872	2.913	0.674
20	1088.572	380.618	9.970	1.901	11.871	2.484	0.575
21	1097.872	376.018	9.960	1.852	11.812	2.804	0.658
22	1097.872	377.168	9.960	1.862	11.822	3.156	0.738
23	1097.872	378.318	9.960	1.879	11.840	3.242	0.755
24	1097.872	379.468	9.960	1.922	11.882	2.957	0.681
25	1097.872	380.618	9.960	1.988	11.948	2.655	0.601
26	1107.172	376.018	9.951	1.584	11.535	3.950	1.002
27	1107.172	377.168	9.951	1.841	11.792	3.405	0.801
28	1107.172	378.318	9.951	1.936	11.887	3.130	0.718
29	1107.172	379.468	9.951	1.951	11.902	2.766	0.632
30	1107.172	380.618	9.951	1.934	11.885	2.468	0.567
31	1108.172	376.018	9.950	1.733	11.683	3.406	0.826
32	1108.172	377.168	9.950	1.909	11.859	3.159	0.730
33	1108.172	378.318	9.950	2.001	11.950	2.899	0.654
34	1108.172	379.468	9.950	1.991	11.941	2.580	0.584
35	1108.172	380.618	9.950	1.970	11.920	2.319	0.528
36	1109.172	376.018	9.949	2.317	12.266	1.370	0.287

Tabla A-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: b' = 2 m						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
	m	m	m	m	m	m/s	
37	1109.172	377.168	9.949	2.124	12.073	2.482	0.544
38	1109.172	378.318	9.949	2.064	12.013	2.620	0.582
39	1109.172	379.468	9.949	2.027	11.976	2.373	0.532
40	1109.172	380.618	9.949	2.006	11.955	2.135	0.481
41	1118.472	376.018	9.940	2.116	12.055	2.363	0.519
42	1118.472	377.168	9.940	2.129	12.069	2.447	0.535
43	1118.472	378.318	9.940	2.143	12.083	2.365	0.516
44	1118.472	379.468	9.940	2.147	12.086	2.125	0.463
45	1118.472	380.618	9.940	2.135	12.075	1.923	0.420
46	1127.772	376.018	9.930	2.153	12.083	2.350	0.511
47	1127.772	377.168	9.930	2.140	12.070	2.378	0.519
48	1127.772	378.318	9.930	2.115	12.046	2.283	0.501
49	1127.772	379.468	9.930	2.092	12.022	2.045	0.451
50	1127.772	380.618	9.930	2.080	12.011	1.852	0.410
51	1137.072	376.018	9.921	2.158	12.079	2.427	0.528
52	1137.072	377.168	9.921	2.162	12.083	2.423	0.526
53	1137.072	378.318	9.921	2.156	12.077	2.323	0.505
54	1137.072	379.468	9.921	2.145	12.066	2.108	0.460
55	1137.072	380.618	9.921	2.139	12.060	1.936	0.423
56	1146.372	376.018	9.912	2.130	12.042	2.324	0.508
57	1146.372	377.168	9.912	2.130	12.041	2.323	0.508
58	1146.372	378.318	9.912	2.132	12.044	2.259	0.494
59	1146.372	379.468	9.912	2.135	12.047	2.094	0.458
60	1146.372	380.618	9.912	2.137	12.049	1.958	0.428
61	1155.672	376.018	9.902	2.214	12.116	2.346	0.504
62	1155.672	377.168	9.902	2.190	12.093	2.327	0.502
63	1155.672	378.318	9.902	2.150	12.052	2.242	0.488
64	1155.672	379.468	9.902	2.124	12.026	2.087	0.457
65	1155.672	380.618	9.902	2.114	12.016	1.963	0.431
66	1107.372	375.818	9.951	1.047	10.998	4.525	1.411
67	1107.772	375.818	9.950	1.132	11.083	4.726	1.418
68	1108.172	375.818	9.950	1.683	11.633	3.489	0.859
69	1108.572	375.818	9.950	2.037	11.986	2.531	0.566
70	1108.972	375.818	9.949	2.216	12.165	1.524	0.327
71	1107.372	374.568	9.950	1.008	10.957	0.930	0.296
72	1107.772	374.568	9.949	1.023	10.972	0.266	0.084

Tabla A-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: b' = 2 m						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
	m	m	m	m	m	m/s	
73	1108.172	374.568	9.949	1.064	11.013	3.091	0.957
74	1108.572	374.568	9.948	1.238	11.186	4.494	1.290
75	1108.972	374.568	9.948	1.377	11.325	4.422	1.203
76	1107.372	373.318	9.948	1.197	11.145	0.565	0.165
77	1107.772	373.318	9.948	1.178	11.126	1.029	0.303
78	1108.172	373.318	9.948	1.115	11.063	3.785	1.144
79	1108.572	373.318	9.947	0.916	10.863	5.262	1.756
80	1108.972	373.318	9.947	0.834	10.781	5.555	1.942
81	1107.372	372.068	9.947	1.325	11.272	0.371	0.103
82	1107.772	372.068	9.947	1.336	11.283	0.681	0.188
83	1108.172	372.068	9.946	1.371	11.317	2.202	0.601
84	1108.572	372.068	9.946	1.516	11.462	3.428	0.889
85	1108.972	372.068	9.945	1.717	11.662	3.446	0.840
86	1107.372	370.818	9.946	1.393	11.339	0.192	0.052
87	1107.772	370.818	9.945	1.400	11.346	0.694	0.187
88	1108.172	370.818	9.945	1.409	11.354	1.949	0.524
89	1108.572	370.818	9.945	1.406	11.351	3.310	0.891
90	1108.972	370.818	9.944	1.390	11.334	4.064	1.101
91	1107.372	368.318	9.943	1.528	11.472	0.267	0.069
92	1107.772	368.318	9.943	1.523	11.466	0.832	0.215
93	1108.172	368.318	9.943	1.517	11.459	1.621	0.420
94	1108.572	368.318	9.942	1.512	11.454	2.502	0.650
95	1108.972	368.318	9.942	1.510	11.451	3.253	0.845
96	1107.372	365.818	9.941	1.646	11.587	0.760	0.189
97	1107.772	365.818	9.940	1.643	11.584	1.147	0.286
98	1108.172	365.818	9.940	1.637	11.577	1.690	0.422
99	1108.572	365.818	9.940	1.630	11.569	2.304	0.576
100	1108.972	365.818	9.939	1.624	11.563	2.843	0.712
101	1107.372	355.818	9.931	1.671	11.601	1.351	0.334
102	1107.772	355.818	9.930	1.672	11.603	1.454	0.359
103	1108.172	355.818	9.930	1.674	11.604	1.587	0.392
104	1108.572	355.818	9.930	1.675	11.604	1.724	0.425
105	1108.972	355.818	9.929	1.676	11.605	1.833	0.452
106	1107.372	345.818	9.921	1.749	11.670	1.566	0.378
107	1107.772	345.818	9.920	1.748	11.668	1.614	0.390
108	1108.172	345.818	9.920	1.747	11.667	1.671	0.404

Tabla A-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

	Modelo 2: b' = 2 m						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
id	m	m	m	m	m	m/s	
109	1108.572	345.818	9.920	1.746	11.665	1.728	0.418
110	1108.972	345.818	9.919	1.746	11.665	1.771	0.428
111	1107.372	335.818	9.911	1.720	11.630	1.574	0.383
112	1107.772	335.818	9.910	1.719	11.629	1.601	0.390
113	1108.172	335.818	9.910	1.718	11.628	1.637	0.399
114	1108.572	335.818	9.910	1.715	11.625	1.673	0.408
115	1108.972	335.818	9.909	1.714	11.623	1.700	0.415
116	1107.372	325.818	9.901	1.731	11.632	1.567	0.380
117	1107.772	325.818	9.900	1.733	11.633	1.587	0.385
118	1108.172	325.818	9.900	1.735	11.635	1.617	0.392
119	1108.572	325.818	9.900	1.737	11.636	1.647	0.399
120	1108.972	325.818	9.899	1.738	11.638	1.668	0.404
121	1107.372	318.318	9.893	1.760	11.654	1.491	0.359
122	1107.772	318.318	9.893	1.763	11.656	1.506	0.362
123	1108.172	318.318	9.893	1.767	11.659	1.530	0.368
124	1108.572	318.318	9.892	1.772	11.664	1.553	0.373
125	1108.972	318.318	9.892	1.782	11.674	1.570	0.375

Fuente: Elaboración propia

Tabla A-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b' = 5 m						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
	m	m	m	m	m	m/s	
1	1060.672	376.018	9.997	1.488	11.485	2.737	0.717
2	1060.672	377.168	9.997	1.380	11.378	5.028	1.367
3	1060.672	378.318	9.997	1.300	11.298	5.314	1.488
4	1060.672	379.468	9.997	1.308	11.305	4.618	1.289
5	1060.672	380.618	9.997	1.339	11.336	1.573	0.434
6	1069.672	376.018	9.988	1.340	11.328	3.736	1.031
7	1069.672	377.168	9.988	1.344	11.332	4.971	1.369
8	1069.672	378.318	9.988	1.364	11.352	4.976	1.360
9	1069.672	379.468	9.988	1.347	11.336	4.203	1.156
10	1069.672	380.618	9.988	1.354	11.343	2.734	0.750
11	1078.672	376.018	9.979	1.494	11.474	3.489	0.911
12	1078.672	377.168	9.979	1.489	11.468	4.501	1.178
13	1078.672	378.318	9.979	1.493	11.473	4.511	1.179
14	1078.672	379.468	9.979	1.498	11.477	3.652	0.953
15	1078.672	380.618	9.979	1.485	11.465	2.480	0.650
16	1087.672	376.018	9.970	1.574	11.544	3.428	0.873
17	1087.672	377.168	9.970	1.579	11.549	4.240	1.077
18	1087.672	378.318	9.970	1.578	11.548	4.230	1.075
19	1087.672	379.468	9.970	1.575	11.545	3.400	0.865
20	1087.672	380.618	9.970	1.575	11.546	2.455	0.625
21	1096.672	376.018	9.961	1.579	11.540	3.514	0.893
22	1096.672	377.168	9.961	1.581	11.542	4.150	1.054
23	1096.672	378.318	9.961	1.580	11.541	4.123	1.047
24	1096.672	379.468	9.961	1.579	11.540	3.416	0.868
25	1096.672	380.618	9.961	1.575	11.537	2.658	0.676
26	1105.672	376.018	9.952	1.334	11.287	4.258	1.177
27	1105.672	377.168	9.952	1.458	11.411	4.316	1.141
28	1105.672	378.318	9.952	1.470	11.423	4.278	1.126
29	1105.672	379.468	9.952	1.472	11.425	3.742	0.985
30	1105.672	380.618	9.952	1.469	11.422	3.152	0.830
31	1108.172	376.018	9.950	0.656	10.606	5.659	2.230
32	1108.172	377.168	9.950	1.010	10.960	5.252	1.669
33	1108.172	378.318	9.950	1.238	11.188	4.737	1.360
34	1108.172	379.468	9.950	1.370	11.320	3.962	1.081
35	1108.172	380.618	9.950	1.424	11.374	3.271	0.875
36	1110.672	376.018	9.947	2.151	12.098	1.121	0.244

Tabla A-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b' = 5 m						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
	m	m	m	m	m	m/s	
37	1110.672	377.168	9.947	1.964	11.912	2.475	0.564
38	1110.672	378.318	9.947	1.850	11.798	2.780	0.652
39	1110.672	379.468	9.947	1.792	11.739	2.409	0.575
40	1110.672	380.618	9.947	1.780	11.728	1.902	0.455
41	1119.672	376.018	9.939	1.914	11.853	2.550	0.588
42	1119.672	377.168	9.939	1.913	11.852	2.645	0.610
43	1119.672	378.318	9.939	1.913	11.852	2.361	0.545
44	1119.672	379.468	9.939	1.913	11.852	1.774	0.410
45	1119.672	380.618	9.939	1.914	11.853	1.280	0.295
46	1128.672	376.018	9.930	1.924	11.854	2.545	0.586
47	1128.672	377.168	9.930	1.924	11.854	2.552	0.587
48	1128.672	378.318	9.930	1.924	11.854	2.304	0.530
49	1128.672	379.468	9.930	1.924	11.854	1.820	0.419
50	1128.672	380.618	9.930	1.925	11.855	1.396	0.321
51	1137.672	376.018	9.921	1.933	11.854	2.523	0.579
52	1137.672	377.168	9.921	1.933	11.854	2.488	0.571
53	1137.672	378.318	9.921	1.933	11.854	2.260	0.519
54	1137.672	379.468	9.921	1.933	11.854	1.850	0.425
55	1137.672	380.618	9.921	1.934	11.855	1.489	0.342
56	1146.672	376.018	9.912	1.941	11.853	2.493	0.571
57	1146.672	377.168	9.912	1.941	11.853	2.438	0.559
58	1146.672	378.318	9.912	1.941	11.853	2.225	0.510
59	1146.672	379.468	9.912	1.941	11.853	1.871	0.429
60	1146.672	380.618	9.912	1.941	11.854	1.563	0.358
61	1155.672	376.018	9.903	1.949	11.853	2.460	0.563
62	1155.672	377.168	9.903	1.949	11.852	2.397	0.548
63	1155.672	378.318	9.903	1.948	11.852	2.201	0.504
64	1155.672	379.468	9.903	1.948	11.852	1.890	0.432
65	1155.672	380.618	9.903	1.949	11.852	1.625	0.372
66	1105.872	375.818	9.952	0.691	10.643	5.290	2.042
67	1107.022	375.818	9.951	0.603	10.554	5.656	2.327
68	1108.172	375.818	9.950	0.591	10.541	5.730	2.381
69	1109.322	375.818	9.949	0.762	10.710	4.705	1.773
70	1110.472	375.818	9.948	2.046	11.993	1.357	0.303
71	1105.872	374.568	9.951	0.365	10.316	0.780	0.413
72	1107.022	374.568	9.950	0.351	10.301	1.067	0.575

Tabla A-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b' = 5 m						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
	m	m	m	m	m	m/s	
73	1108.172	374.568	9.949	0.357	10.306	5.603	2.992
74	1109.322	374.568	9.948	1.471	11.419	2.091	0.550
75	1110.472	374.568	9.946	1.619	11.565	3.134	0.786
76	1105.872	373.318	9.950	0.320	10.270	1.353	0.763
77	1107.022	373.318	9.949	0.301	10.249	0.175	0.102
78	1108.172	373.318	9.948	0.386	10.334	1.323	0.679
79	1109.322	373.318	9.946	1.019	10.965	3.565	1.128
80	1110.472	373.318	9.945	1.231	11.176	4.149	1.194
81	1105.872	372.068	9.949	0.371	10.319	1.271	0.666
82	1107.022	372.068	9.947	0.330	10.278	1.133	0.629
83	1108.172	372.068	9.946	0.379	10.326	4.086	2.118
84	1109.322	372.068	9.945	0.703	10.648	4.519	1.721
85	1110.472	372.068	9.944	0.881	10.825	4.890	1.663
86	1105.872	370.818	9.947	0.492	10.439	0.696	0.317
87	1107.022	370.818	9.946	0.387	10.334	3.205	1.645
88	1108.172	370.818	9.945	0.370	10.315	4.817	2.527
89	1109.322	370.818	9.944	0.538	10.482	5.033	2.190
90	1110.472	370.818	9.943	0.634	10.577	5.338	2.140
91	1105.872	368.318	9.945	0.673	10.618	0.870	0.338
92	1107.022	368.318	9.944	0.509	10.453	4.255	1.912
93	1108.172	368.318	9.943	0.300	10.242	5.235	3.054
94	1109.322	368.318	9.941	0.353	10.295	5.507	2.959
95	1110.472	368.318	9.940	0.380	10.321	5.689	2.945
96	1105.872	365.818	9.942	0.634	10.577	2.028	0.813
97	1107.022	365.818	9.941	0.599	10.540	4.102	1.692
98	1108.172	365.818	9.940	0.238	10.178	5.383	3.525
99	1109.322	365.818	9.939	0.259	10.198	5.599	3.512
100	1110.472	365.818	9.938	0.270	10.207	5.716	3.515
101	1105.872	355.818	9.932	0.865	10.798	0.238	0.082
102	1107.022	355.818	9.931	0.870	10.801	1.702	0.582
103	1108.172	355.818	9.930	0.895	10.825	2.792	0.943
104	1109.322	355.818	9.929	0.896	10.825	3.055	1.030
105	1110.472	355.818	9.928	0.880	10.807	0.148	0.050
106	1105.872	345.818	9.922	0.928	10.850	0.304	0.101
107	1107.022	345.818	9.921	0.929	10.850	1.026	0.340
108	1108.172	345.818	9.920	0.931	10.851	2.347	0.776

Tabla A-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b' = 5 m						
	Coordenadas		Cotas	Tirante	Nivel de agua	Velocidades	Número de Froude
	x	y		y		V	F
	m	m	m	m	m	m/s	
109	1109.322	345.818	9.919	0.933	10.852	2.822	0.933
110	1110.472	345.818	9.918	0.936	10.853	1.858	0.613
111	1105.872	335.818	9.912	0.971	10.883	0.608	0.197
112	1107.022	335.818	9.911	0.972	10.883	1.092	0.354
113	1108.172	335.818	9.910	0.973	10.883	2.044	0.661
114	1109.322	335.818	9.909	0.974	10.883	2.476	0.801
115	1110.472	335.818	9.908	0.975	10.883	1.880	0.608
116	1105.872	325.818	9.902	0.994	10.896	0.791	0.253
117	1107.022	325.818	9.901	0.996	10.897	1.168	0.374
118	1108.172	325.818	9.900	0.997	10.897	1.892	0.605
119	1109.322	325.818	9.899	0.998	10.897	2.291	0.732
120	1110.472	325.818	9.898	0.999	10.897	1.844	0.589
121	1105.872	318.318	9.895	1.006	10.901	0.879	0.280
122	1107.022	318.318	9.894	1.006	10.900	1.214	0.386
123	1108.172	318.318	9.893	1.008	10.900	1.834	0.583
124	1109.322	318.318	9.891	1.010	10.902	2.188	0.695
125	1110.472	318.318	9.890	1.016	10.906	1.817	0.576

Fuente: Elaboración propia

APÉNDICE B

**Resultados para los modelos de bocatomas con bifurcación a 90° con
aristas vivas- Sedimentos**

Tabla B-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: b = 1 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
1	1060.672	376.018	9.997	10.544	0.109	10.653	1.067
2	1060.672	377.168	9.997	10.201	0.301	10.502	7.550
3	1060.672	378.318	9.997	9.997	0.739	10.737	11.233
4	1060.672	379.468	9.997	9.997	1.007	11.004	10.960
5	1060.672	380.618	9.997	10.075	1.534	11.609	4.444
6	1070.072	376.018	9.988	9.988	1.033	11.021	6.517
7	1070.072	377.168	9.988	10.547	0.442	10.989	9.954
8	1070.072	378.318	9.988	9.988	0.593	10.581	10.680
9	1070.072	379.468	9.988	9.988	0.584	10.572	9.189
10	1070.072	380.618	9.988	9.988	0.590	10.578	7.541
11	1079.472	376.018	9.979	9.979	0.906	10.885	7.082
12	1079.472	377.168	9.979	9.979	0.893	10.872	9.189
13	1079.472	378.318	9.979	10.103	0.623	10.727	9.591
14	1079.472	379.468	9.979	9.979	0.561	10.540	8.089
15	1079.472	380.618	9.979	9.979	0.349	10.328	7.415
16	1088.872	376.018	9.969	10.527	1.015	11.541	6.034
17	1088.872	377.168	9.969	10.686	0.823	11.508	7.720
18	1088.872	378.318	9.969	10.829	0.678	11.507	8.532
19	1088.872	379.468	9.969	10.915	0.629	11.543	7.425
20	1088.872	380.618	9.969	10.428	1.155	11.583	5.687
21	1098.272	376.018	9.960	10.707	1.010	11.718	5.745
22	1098.272	377.168	9.960	10.880	0.863	11.743	7.063
23	1098.272	378.318	9.960	11.029	0.717	11.746	7.867
24	1098.272	379.468	9.960	10.925	0.824	11.748	6.875
25	1098.272	380.618	9.960	10.752	0.994	11.746	5.618
26	1107.672	376.018	9.950	10.703	1.002	11.706	5.782
27	1107.672	377.168	9.950	10.824	0.881	11.705	6.795
28	1107.672	378.318	9.950	11.024	0.748	11.773	7.410
29	1107.672	379.468	9.950	10.913	0.875	11.789	6.611
30	1107.672	380.618	9.950	10.813	0.981	11.794	5.620
31	1108.172	376.018	9.950	10.652	0.862	11.514	6.130
32	1108.172	377.168	9.950	10.756	0.993	11.749	6.708
33	1108.172	378.318	9.950	11.033	0.749	11.781	7.371
34	1108.172	379.468	9.950	10.926	0.874	11.801	6.580
35	1108.172	380.618	9.950	10.826	0.982	11.808	5.600
36	1108.672	376.018	9.949	10.902	0.759	11.662	5.846

Tabla B-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: b' = 1 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
37	1108.672	377.168	9.949	10.704	1.084	11.789	6.615
38	1108.672	378.318	9.949	11.033	0.758	11.792	7.322
39	1108.672	379.468	9.949	10.944	0.873	11.816	6.546
40	1108.672	380.618	9.949	10.840	0.983	11.823	5.580
41	1118.072	376.018	9.940	11.146	1.015	12.160	4.549
42	1118.072	377.168	9.940	11.098	1.119	12.217	5.571
43	1118.072	378.318	9.940	11.323	0.828	12.152	6.430
44	1118.072	379.468	9.940	11.145	0.932	12.076	5.789
45	1118.072	380.618	9.940	11.036	1.147	12.183	4.945
46	1127.472	376.018	9.930	11.296	1.101	12.397	4.199
47	1127.472	377.168	9.930	11.454	0.942	12.396	5.027
48	1127.472	378.318	9.930	10.945	1.595	12.540	5.228
49	1127.472	379.468	9.930	11.231	1.187	12.417	5.013
50	1127.472	380.618	9.930	11.196	0.974	12.170	4.706
51	1136.872	376.018	9.921	11.345	0.864	12.209	4.437
52	1136.872	377.168	9.921	11.202	1.047	12.249	4.684
53	1136.872	378.318	9.921	11.216	1.273	12.489	4.939
54	1136.872	379.468	9.921	10.902	1.770	12.672	4.141
55	1136.872	380.618	9.921	11.166	1.007	12.173	4.745
56	1146.272	376.018	9.911	11.279	0.933	12.212	4.116
57	1146.272	377.168	9.911	11.030	1.367	12.398	4.254
58	1146.272	378.318	9.911	10.921	1.490	12.412	4.816
59	1146.272	379.468	9.911	10.688	1.874	12.562	4.008
60	1146.272	380.618	9.911	11.345	0.880	12.224	4.394
61	1155.672	376.018	9.902	10.960	1.453	12.413	3.331
62	1155.672	377.168	9.902	10.708	1.803	12.511	3.918
63	1155.672	378.318	9.902	11.393	0.953	12.346	4.618
64	1155.672	379.468	9.902	10.977	1.533	12.510	3.903
65	1155.672	380.618	9.902	10.830	1.818	12.648	2.772
66	1107.872	375.818	9.950	10.777	0.557	11.334	5.939
67	1108.022	375.818	9.950	10.792	0.508	11.299	6.107
68	1108.172	375.818	9.950	10.819	0.483	11.303	6.194
69	1108.322	375.818	9.950	10.854	0.471	11.325	6.206
70	1108.472	375.818	9.950	10.867	0.494	11.361	6.021
71	1107.872	374.568	9.949	10.548	0.076	10.624	0.823
72	1108.022	374.568	9.949	10.550	0.076	10.626	2.907
73	1108.172	374.568	9.949	10.498	0.125	10.624	4.176
74	1108.322	374.568	9.949	10.436	0.199	10.635	4.893

Tabla B-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: b' = 1 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
75	1108.472	374.568	9.948	10.379	0.274	10.653	5.345
76	1107.872	373.318	9.948	10.699	0.202	10.901	2.969
77	1108.022	373.318	9.948	10.719	0.118	10.837	4.092
78	1108.172	373.318	9.948	10.677	0.135	10.812	4.513
79	1108.322	373.318	9.947	10.640	0.152	10.792	4.825
80	1108.472	373.318	9.947	10.621	0.159	10.780	5.030
81	1107.872	372.068	9.947	10.727	0.246	10.973	2.642
82	1108.022	372.068	9.946	10.752	0.219	10.971	3.603
83	1108.172	372.068	9.946	10.805	0.134	10.940	4.191
84	1108.322	372.068	9.946	10.792	0.132	10.924	4.419
85	1108.472	372.068	9.946	10.784	0.130	10.915	4.552
86	1107.872	370.818	9.945	10.712	0.208	10.921	2.781
87	1108.022	370.818	9.945	10.727	0.194	10.921	3.439
88	1108.172	370.818	9.945	10.748	0.176	10.924	3.969
89	1108.322	370.818	9.945	10.773	0.148	10.922	4.209
90	1108.472	370.818	9.945	10.784	0.132	10.915	4.324
91	1107.872	368.318	9.943	10.635	0.193	10.828	2.963
92	1108.022	368.318	9.943	10.656	0.173	10.829	3.431
93	1108.172	368.318	9.943	10.671	0.160	10.831	3.814
94	1108.322	368.318	9.942	10.676	0.157	10.833	4.034
95	1108.472	368.318	9.942	10.682	0.149	10.831	4.146
96	1107.872	365.818	9.940	10.565	0.188	10.752	3.026
97	1108.022	365.818	9.940	10.576	0.174	10.750	3.387
98	1108.172	365.818	9.940	10.587	0.163	10.750	3.684
99	1108.322	365.818	9.940	10.587	0.172	10.760	3.822
100	1108.472	365.818	9.940	10.617	0.136	10.753	3.951
101	1107.872	355.818	9.930	10.359	0.157	10.516	2.897
102	1108.022	355.818	9.930	10.351	0.192	10.543	2.899
103	1108.172	355.818	9.930	10.360	0.176	10.536	2.997
104	1108.322	355.818	9.930	10.370	0.172	10.542	3.045
105	1108.472	355.818	9.930	10.376	0.148	10.524	3.104
106	1107.872	345.818	9.920	10.203	0.165	10.368	2.803
107	1108.022	345.818	9.920	10.206	0.154	10.360	2.861
108	1108.172	345.818	9.920	10.160	0.235	10.396	2.657
109	1108.322	345.818	9.920	10.190	0.270	10.461	2.615
110	1108.472	345.818	9.920	10.205	0.245	10.450	2.686
111	1107.872	335.818	9.910	9.910	0.548	10.458	0.747
112	1108.022	335.818	9.910	9.910	0.551	10.461	0.880

Tabla B-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: b' = 1 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
113	1108.172	335.818	9.910	9.910	0.548	10.458	0.885
114	1108.322	335.818	9.910	9.910	0.555	10.465	0.873
115	1108.472	335.818	9.910	9.910	0.566	10.476	0.857
116	1107.872	325.818	9.900	9.900	0.533	10.433	0.777
117	1108.022	325.818	9.900	9.900	0.532	10.432	0.789
118	1108.172	325.818	9.900	9.900	0.529	10.429	0.774
119	1108.322	325.818	9.900	9.900	0.529	10.429	0.734
120	1108.472	325.818	9.900	9.900	0.524	10.424	0.680
121	1107.872	318.318	9.893	9.893	0.525	10.418	1.157
122	1108.022	318.318	9.893	9.893	0.526	10.419	1.157
123	1108.172	318.318	9.893	9.893	0.526	10.418	1.126
124	1108.322	318.318	9.892	9.892	0.527	10.419	1.092
125	1108.472	318.318	9.892	9.892	0.535	10.427	1.080

Fuente: Elaboración propia

Tabla B-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: b = 2 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
1	1060.672	376.018	9.997	10.294	1.394	11.688	1.744
2	1060.672	377.168	9.997	10.513	1.093	11.605	4.953
3	1060.672	378.318	9.997	10.255	1.381	11.636	5.031
4	1060.672	379.468	9.997	10.234	1.411	11.645	5.099
5	1060.672	380.618	9.997	10.282	1.376	11.658	3.376
6	1069.972	376.018	9.988	10.267	1.487	11.754	3.237
7	1069.972	377.168	9.988	10.303	1.451	11.753	4.603
8	1069.972	378.318	9.988	10.523	1.203	11.726	4.770
9	1069.972	379.468	9.988	10.410	1.318	11.728	4.464
10	1069.972	380.618	9.988	10.355	1.372	11.727	3.618
11	1079.272	376.018	9.979	10.629	1.165	11.794	3.391
12	1079.272	377.168	9.979	10.322	1.382	11.703	4.401
13	1079.272	378.318	9.979	10.257	1.573	11.831	4.402
14	1079.272	379.468	9.979	10.286	1.432	11.718	3.977
15	1079.272	380.618	9.979	10.825	0.940	11.765	3.539
16	1088.572	376.018	9.970	10.466	1.237	11.703	3.516
17	1088.572	377.168	9.970	10.100	1.603	11.703	4.146
18	1088.572	378.318	9.970	10.057	1.706	11.763	4.356
19	1088.572	379.468	9.970	10.073	1.817	11.890	3.224
20	1088.572	380.618	9.970	10.244	1.624	11.868	2.694
21	1097.872	376.018	9.960	10.554	1.059	11.613	3.633
22	1097.872	377.168	9.960	9.982	1.717	11.699	3.933
23	1097.872	378.318	9.960	9.960	1.762	11.722	4.103
24	1097.872	379.468	9.960	9.960	1.896	11.856	3.237
25	1097.872	380.618	9.960	10.470	1.032	11.502	3.450
26	1107.172	376.018	9.951	10.160	1.177	11.338	4.186
27	1107.172	377.168	9.951	10.122	1.446	11.568	4.199
28	1107.172	378.318	9.951	9.951	1.809	11.760	3.775
29	1107.172	379.468	9.951	10.014	1.836	11.850	2.984
30	1107.172	380.618	9.951	10.076	1.805	11.880	2.184
31	1108.172	376.018	9.950	9.950	1.508	11.458	3.703
32	1108.172	377.168	9.950	9.950	1.865	11.815	3.466
33	1108.172	378.318	9.950	10.012	1.855	11.866	3.409
34	1108.172	379.468	9.950	9.950	1.996	11.946	2.645
35	1108.172	380.618	9.950	9.950	2.015	11.965	1.905
36	1109.172	376.018	9.949	9.949	2.323	12.272	1.225
37	1109.172	377.168	9.949	9.961	2.102	12.063	2.745
38	1109.172	378.318	9.949	9.949	2.071	12.020	2.926

Tabla B-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: b' = 2 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
39	1109.172	379.468	9.949	9.949	2.055	12.004	2.390
40	1109.172	380.618	9.949	9.949	2.053	12.002	1.727
41	1118.472	376.018	9.940	9.940	2.140	12.080	2.428
42	1118.472	377.168	9.940	9.940	2.140	12.080	2.634
43	1118.472	378.318	9.940	9.940	2.140	12.080	2.531
44	1118.472	379.468	9.940	9.940	2.140	12.080	1.986
45	1118.472	380.618	9.940	9.940	2.140	12.080	1.452
46	1127.772	376.018	9.930	9.930	2.153	12.083	2.436
47	1127.772	377.168	9.930	9.930	2.153	12.083	2.541
48	1127.772	378.318	9.930	9.930	2.153	12.084	2.447
49	1127.772	379.468	9.930	9.930	2.153	12.084	2.012
50	1127.772	380.618	9.930	9.930	2.153	12.084	1.590
51	1137.072	376.018	9.921	9.921	2.164	12.085	2.427
52	1137.072	377.168	9.921	9.921	2.164	12.085	2.485
53	1137.072	378.318	9.921	9.921	2.164	12.085	2.386
54	1137.072	379.468	9.921	9.921	2.164	12.085	2.024
55	1137.072	380.618	9.921	9.921	2.164	12.085	1.686
56	1146.372	376.018	9.912	9.912	2.173	12.085	2.435
57	1146.372	377.168	9.912	9.912	2.173	12.085	2.453
58	1146.372	378.318	9.912	9.912	2.173	12.085	2.339
59	1146.372	379.468	9.912	9.912	2.173	12.085	2.023
60	1146.372	380.618	9.912	9.912	2.173	12.085	1.741
61	1155.672	376.018	9.902	9.902	2.182	12.085	2.432
62	1155.672	377.168	9.902	9.902	2.182	12.084	2.428
63	1155.672	378.318	9.902	9.902	2.180	12.083	2.308
64	1155.672	379.468	9.902	9.902	2.180	12.083	2.028
65	1155.672	380.618	9.902	9.902	2.180	12.083	1.782
66	1107.372	375.818	9.951	10.316	0.509	10.825	4.923
67	1107.772	375.818	9.950	10.219	0.636	10.855	5.076
68	1108.172	375.818	9.950	10.072	1.250	11.322	3.759
69	1108.572	375.818	9.950	9.950	1.943	11.893	2.559
70	1108.972	375.818	9.949	9.949	2.145	12.094	1.747
71	1107.372	374.568	9.950	10.296	0.105	10.401	0.055
72	1107.772	374.568	9.949	10.411	0.029	10.440	1.669
73	1108.172	374.568	9.949	10.239	0.441	10.680	4.440
74	1108.572	374.568	9.948	9.949	1.073	11.022	4.638
75	1108.972	374.568	9.948	9.948	1.255	11.203	4.552
76	1107.372	373.318	9.948	10.284	0.137	10.421	3.831

Tabla B-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: b' = 2 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
77	1107.772	373.318	9.948	10.006	0.402	10.408	5.115
78	1108.172	373.318	9.948	9.948	0.533	10.480	5.527
79	1108.572	373.318	9.947	9.947	0.618	10.565	5.609
80	1108.972	373.318	9.947	9.947	0.662	10.609	5.640
81	1107.372	372.068	9.947	9.947	0.893	10.840	3.643
82	1107.772	372.068	9.947	9.977	0.398	10.375	5.602
83	1108.172	372.068	9.946	9.946	0.386	10.332	5.888
84	1108.572	372.068	9.946	9.946	0.409	10.355	5.952
85	1108.972	372.068	9.945	9.945	0.420	10.366	5.988
86	1107.372	370.818	9.946	9.946	0.747	10.693	4.005
87	1107.772	370.818	9.945	9.945	0.729	10.674	4.968
88	1108.172	370.818	9.945	9.969	0.319	10.288	5.910
89	1108.572	370.818	9.945	9.945	0.301	10.246	6.067
90	1108.972	370.818	9.944	9.944	0.306	10.250	6.093
91	1107.372	368.318	9.943	9.943	0.510	10.453	4.508
92	1107.772	368.318	9.943	9.943	0.506	10.449	5.063
93	1108.172	368.318	9.943	9.943	0.497	10.440	5.428
94	1108.572	368.318	9.942	9.942	0.479	10.421	5.592
95	1108.972	368.318	9.942	10.062	0.263	10.326	5.689
96	1107.372	365.818	9.941	10.339	0.560	10.899	3.276
97	1107.772	365.818	9.940	10.359	0.543	10.902	3.775
98	1108.172	365.818	9.940	10.380	0.532	10.912	4.184
99	1108.572	365.818	9.940	10.345	0.589	10.933	4.403
100	1108.972	365.818	9.939	10.143	0.819	10.962	4.407
101	1107.372	355.818	9.931	9.931	1.510	11.441	0.531
102	1107.772	355.818	9.930	9.939	1.490	11.429	1.108
103	1108.172	355.818	9.930	9.930	1.502	11.432	1.778
104	1108.572	355.818	9.930	9.930	1.508	11.437	2.392
105	1108.972	355.818	9.929	9.929	1.512	11.441	2.569
106	1107.372	345.818	9.921	9.921	1.565	11.486	1.166
107	1107.772	345.818	9.920	9.920	1.565	11.486	1.349
108	1108.172	345.818	9.920	9.920	1.566	11.486	1.594
109	1108.572	345.818	9.920	9.920	1.566	11.486	1.858
110	1108.972	345.818	9.919	9.919	1.566	11.485	2.079
111	1107.372	335.818	9.911	9.911	1.583	11.494	1.377
112	1107.772	335.818	9.910	9.911	1.583	11.493	1.466
113	1108.172	335.818	9.910	9.911	1.582	11.493	1.583
114	1108.572	335.818	9.910	9.913	1.581	11.493	1.706

Tabla B-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: b' = 2 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
115	1108.972	335.818	9.909	9.913	1.579	11.493	1.806
116	1107.372	325.818	9.901	9.901	1.592	11.493	1.446
117	1107.772	325.818	9.900	9.900	1.592	11.493	1.501
118	1108.172	325.818	9.900	9.901	1.592	11.492	1.573
119	1108.572	325.818	9.900	9.901	1.591	11.492	1.646
120	1108.972	325.818	9.899	9.902	1.590	11.492	1.703
121	1107.372	318.318	9.893	9.893	1.595	11.489	1.460
122	1107.772	318.318	9.893	9.893	1.596	11.489	1.501
123	1108.172	318.318	9.893	9.893	1.596	11.488	1.557
124	1108.572	318.318	9.892	9.893	1.596	11.488	1.615
125	1108.972	318.318	9.892	9.893	1.596	11.488	1.657

Fuente: Elaboración propia

Tabla B-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b = 5 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante y	Nivel de agua	Velocidades V
	x	y					
	m	m	m	m	m	m	m/s
1	1060.672	376.018	9.997	10.060	1.233	11.293	3.957
2	1060.672	377.168	9.997	9.997	1.208	11.206	5.777
3	1060.672	378.318	9.997	9.997	1.226	11.223	5.767
4	1060.672	379.468	9.997	10.161	0.994	11.154	5.558
5	1060.672	380.618	9.997	10.194	0.992	11.186	3.507
6	1069.672	376.018	9.988	9.988	1.055	11.044	4.812
7	1069.672	377.168	9.988	9.988	1.041	11.029	5.865
8	1069.672	378.318	9.988	9.988	1.069	11.057	5.878
9	1069.672	379.468	9.988	9.993	1.108	11.100	5.364
10	1069.672	380.618	9.988	9.988	1.121	11.109	4.233
11	1078.672	376.018	9.979	9.979	1.103	11.083	4.798
12	1078.672	377.168	9.979	9.979	1.101	11.081	5.631
13	1078.672	378.318	9.979	9.979	1.107	11.087	5.666
14	1078.672	379.468	9.979	9.997	1.120	11.117	5.119
15	1078.672	380.618	9.979	9.979	1.134	11.114	4.260
16	1087.672	376.018	9.970	10.031	1.576	11.607	3.625
17	1087.672	377.168	9.970	10.144	1.467	11.611	4.501
18	1087.672	378.318	9.970	10.242	1.360	11.602	4.524
19	1087.672	379.468	9.970	10.218	1.386	11.604	3.890
20	1087.672	380.618	9.970	10.179	1.424	11.603	3.076
21	1096.672	376.018	9.961	10.142	1.440	11.582	3.810
22	1096.672	377.168	9.961	10.233	1.241	11.474	4.598
23	1096.672	378.318	9.961	10.178	1.487	11.666	4.254
24	1096.672	379.468	9.961	10.166	1.441	11.608	3.876
25	1096.672	380.618	9.961	10.320	1.182	11.502	3.442
26	1105.672	376.018	9.952	9.952	1.405	11.357	4.227
27	1105.672	377.168	9.952	9.952	1.276	11.228	4.917
28	1105.672	378.318	9.952	10.232	0.969	11.201	5.037
29	1105.672	379.468	9.952	9.952	1.431	11.383	4.277
30	1105.672	380.618	9.952	9.969	1.481	11.450	3.545
31	1108.172	376.018	9.950	10.350	0.741	11.090	4.870
32	1108.172	377.168	9.950	10.014	1.249	11.262	4.724
33	1108.172	378.318	9.950	9.951	1.527	11.478	4.060
34	1108.172	379.468	9.950	9.997	1.506	11.503	3.646
35	1108.172	380.618	9.950	10.134	1.518	11.652	2.782
36	1110.672	376.018	9.947	9.947	2.248	12.195	1.854
37	1110.672	377.168	9.947	9.970	2.025	11.996	2.777
38	1110.672	378.318	9.947	9.951	1.954	11.905	2.730

Tabla B-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b' = 5 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante y	Nivel de agua	Velocidades V
	x	y					
	m	m	m	m	m	m	m/s
39	1110.672	379.468	9.947	10.076	1.794	11.870	2.345
40	1110.672	380.618	9.947	10.709	1.081	11.790	2.213
41	1119.672	376.018	9.939	9.939	1.986	11.925	2.848
42	1119.672	377.168	9.939	9.950	1.979	11.929	2.838
43	1119.672	378.318	9.939	9.945	2.005	11.950	2.440
44	1119.672	379.468	9.939	9.986	1.943	11.928	1.830
45	1119.672	380.618	9.939	9.972	1.961	11.933	1.199
46	1128.672	376.018	9.930	9.930	2.022	11.952	2.733
47	1128.672	377.168	9.930	9.930	2.022	11.952	2.687
48	1128.672	378.318	9.930	9.930	2.022	11.952	2.370
49	1128.672	379.468	9.930	9.930	2.022	11.952	1.774
50	1128.672	380.618	9.930	9.930	2.023	11.952	1.220
51	1137.672	376.018	9.921	9.921	2.036	11.957	2.682
52	1137.672	377.168	9.921	9.921	2.036	11.957	2.599
53	1137.672	378.318	9.921	9.921	2.036	11.957	2.297
54	1137.672	379.468	9.921	9.921	2.036	11.957	1.812
55	1137.672	380.618	9.921	9.921	2.036	11.957	1.383
56	1146.672	376.018	9.912	9.912	2.047	11.959	2.645
57	1146.672	377.168	9.912	9.912	2.047	11.959	2.539
58	1146.672	378.318	9.912	9.912	2.047	11.959	2.251
59	1146.672	379.468	9.912	9.912	2.047	11.959	1.845
60	1146.672	380.618	9.912	9.912	2.047	11.959	1.500
61	1155.672	376.018	9.903	9.903	2.057	11.960	2.596
62	1155.672	377.168	9.903	9.903	2.057	11.960	2.489
63	1155.672	378.318	9.903	9.903	2.056	11.960	2.228
64	1155.672	379.468	9.903	9.903	2.056	11.959	1.877
65	1155.672	380.618	9.903	9.903	2.056	11.959	1.587
66	1105.872	375.818	9.952	9.970	0.714	10.684	5.270
67	1107.022	375.818	9.951	9.951	0.607	10.558	5.748
68	1108.172	375.818	9.950	10.390	0.688	11.078	4.842
69	1109.322	375.818	9.949	10.628	0.749	11.377	4.221
70	1110.472	375.818	9.948	9.948	2.280	12.227	1.010
71	1105.872	374.568	9.951	10.427	0.019	10.446	0.832
72	1107.022	374.568	9.950	10.547	0.076	10.623	2.577
73	1108.172	374.568	9.949	10.698	0.306	11.005	4.403
74	1109.322	374.568	9.948	10.831	0.602	11.433	3.571
75	1110.472	374.568	9.946	9.946	2.036	11.982	2.537
76	1105.872	373.318	9.950	10.574	0.015	10.589	0.558

Tabla B-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b = 5 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
77	1107.022	373.318	9.949	10.615	0.020	10.635	1.080
78	1108.172	373.318	9.948	10.704	0.073	10.776	3.126
79	1109.322	373.318	9.946	10.734	0.571	11.305	3.425
80	1110.472	373.318	9.945	9.945	1.580	11.525	3.892
81	1105.872	372.068	9.949	10.600	0.009	10.609	0.381
82	1107.022	372.068	9.947	10.611	0.017	10.628	1.011
83	1108.172	372.068	9.946	10.640	0.041	10.680	2.390
84	1109.322	372.068	9.945	10.426	0.509	10.935	4.267
85	1110.472	372.068	9.944	9.944	1.168	11.112	4.804
86	1105.872	370.818	9.947	10.541	0.017	10.557	0.695
87	1107.022	370.818	9.946	10.554	0.016	10.570	1.062
88	1108.172	370.818	9.945	10.553	0.034	10.587	2.181
89	1109.322	370.818	9.944	10.091	0.634	10.726	4.915
90	1110.472	370.818	9.943	9.943	0.874	10.816	5.353
91	1105.872	368.318	9.945	10.390	0.027	10.417	1.105
92	1107.022	368.318	9.944	10.398	0.015	10.412	0.998
93	1108.172	368.318	9.943	10.219	0.200	10.419	3.181
94	1109.322	368.318	9.941	9.941	0.532	10.474	5.650
95	1110.472	368.318	9.940	9.940	0.561	10.502	5.839
96	1105.872	365.818	9.942	10.276	0.072	10.348	0.536
97	1107.022	365.818	9.941	10.218	0.127	10.344	0.282
98	1108.172	365.818	9.940	9.940	0.373	10.313	5.402
99	1109.322	365.818	9.939	9.939	0.395	10.334	5.879
100	1110.472	365.818	9.938	9.938	0.408	10.346	5.994
101	1105.872	355.818	9.932	9.932	0.673	10.606	0.505
102	1107.022	355.818	9.931	9.931	0.678	10.609	1.761
103	1108.172	355.818	9.930	9.965	0.571	10.536	4.775
104	1109.322	355.818	9.929	9.929	0.213	10.142	5.460
105	1110.472	355.818	9.928	9.928	0.213	10.141	5.500
106	1105.872	345.818	9.922	10.195	0.593	10.788	0.152
107	1107.022	345.818	9.921	10.165	0.579	10.744	1.129
108	1108.172	345.818	9.920	10.059	0.734	10.793	2.519
109	1109.322	345.818	9.919	9.983	0.893	10.876	3.439
110	1110.472	345.818	9.918	10.031	0.834	10.865	1.830
111	1105.872	335.818	9.912	9.947	0.728	10.676	1.910
112	1107.022	335.818	9.911	10.235	0.360	10.595	2.824
113	1108.172	335.818	9.910	10.038	0.577	10.614	3.445
114	1109.322	335.818	9.909	9.961	0.686	10.647	2.922

Tabla B-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b' = 5 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
115	1110.472	335.818	9.908	10.111	0.470	10.582	2.325
116	1105.872	325.818	9.902	9.938	0.800	10.737	1.861
117	1107.022	325.818	9.901	10.021	0.691	10.712	2.481
118	1108.172	325.818	9.900	10.098	0.651	10.749	2.206
119	1109.322	325.818	9.899	10.043	0.719	10.762	1.432
120	1110.472	325.818	9.898	10.057	0.680	10.737	1.113
121	1105.872	318.318	9.895	9.896	0.874	10.770	1.810
122	1107.022	318.318	9.894	9.894	0.880	10.773	2.043
123	1108.172	318.318	9.893	9.971	0.790	10.761	1.858
124	1109.322	318.318	9.891	9.940	0.826	10.766	1.259
125	1110.472	318.318	9.890	9.890	0.895	10.785	0.410

Fuente: Elaboración propia

APÉNDICE C

**Resultados para los modelos de bocatomas con bifurcación a 90° con
aristas redondeadas - Sedimentos**

Tabla C-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: b = 1 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
1	1060.358	332.048	9.998	10.385	0.698	11.083	3.059
2	1060.358	333.198	9.998	10.023	0.970	10.993	6.209
3	1060.358	334.348	9.998	9.998	1.218	11.216	6.327
4	1060.358	335.498	9.998	9.998	1.254	11.252	6.109
5	1060.358	336.648	9.998	10.023	1.356	11.379	3.615
6	1069.758	332.048	9.988	10.027	1.666	11.693	2.910
7	1069.758	333.198	9.988	10.308	1.346	11.653	5.060
8	1069.758	334.348	9.988	10.564	1.056	11.619	5.421
9	1069.758	335.498	9.988	10.422	1.187	11.609	5.126
10	1069.758	336.648	9.988	10.338	1.266	11.604	3.490
11	1079.158	332.048	9.979	10.207	1.458	11.665	3.407
12	1079.158	333.198	9.979	10.448	1.080	11.528	4.801
13	1079.158	334.348	9.979	10.336	1.258	11.594	5.351
14	1079.158	335.498	9.979	10.312	1.253	11.564	4.962
15	1079.158	336.648	9.979	10.521	1.071	11.592	3.733
16	1088.558	332.048	9.970	9.982	1.768	11.749	3.026
17	1088.558	333.198	9.970	10.352	1.337	11.689	4.348
18	1088.558	334.348	9.970	10.335	1.301	11.636	5.033
19	1088.558	335.498	9.970	10.331	1.419	11.749	4.205
20	1088.558	336.648	9.970	10.186	1.714	11.900	2.401
21	1097.958	332.048	9.960	10.380	1.324	11.704	3.373
22	1097.958	333.198	9.960	10.410	1.174	11.584	4.164
23	1097.958	334.348	9.960	10.105	1.815	11.920	3.931
24	1097.958	335.498	9.960	9.966	1.953	11.919	3.476
25	1097.958	336.648	9.960	10.403	1.418	11.822	2.622
26	1107.358	332.048	9.946	10.776	1.010	11.786	3.450
27	1107.358	333.198	9.946	10.368	1.680	12.048	3.054
28	1107.358	334.348	9.947	10.342	1.636	11.979	3.266
29	1107.358	335.498	9.949	10.144	1.847	11.990	2.775
30	1107.358	336.648	9.950	10.530	1.461	11.990	2.304
31	1107.858	332.048	9.945	10.579	1.417	11.996	2.882
32	1107.858	333.198	9.945	10.452	1.495	11.948	3.338
33	1107.858	334.348	9.947	10.446	1.536	11.982	3.266
34	1107.858	335.498	9.948	10.133	1.845	11.978	2.803
35	1107.858	336.648	9.950	10.709	1.257	11.966	2.405
36	1108.358	332.048	9.944	10.667	1.297	11.964	2.954

Tabla C-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: b' = 1 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante y	Nivel de agua	Velocidades V
	x	y					
	m	m	m	m	m	m	m/s
37	1108.358	333.198	9.945	10.373	1.630	12.003	3.136
38	1108.358	334.348	9.946	10.526	1.418	11.943	3.356
39	1108.358	335.498	9.948	10.146	1.853	11.999	2.731
40	1108.358	336.648	9.949	10.785	1.134	11.920	2.595
41	1117.758	332.048	9.940	9.940	2.185	12.125	2.262
42	1117.758	333.198	9.940	9.940	2.188	12.128	2.518
43	1117.758	334.348	9.940	9.940	2.193	12.133	2.479
44	1117.758	335.498	9.940	9.940	2.198	12.137	2.107
45	1117.758	336.648	9.940	9.940	2.199	12.139	1.666
46	1127.158	332.048	9.930	9.930	2.203	12.134	2.285
47	1127.158	333.198	9.930	9.930	2.203	12.134	2.389
48	1127.158	334.348	9.930	9.930	2.203	12.134	2.379
49	1127.158	335.498	9.930	9.930	2.203	12.134	2.154
50	1127.158	336.648	9.930	9.930	2.204	12.134	1.893
51	1136.558	332.048	9.921	9.921	2.211	12.132	2.268
52	1136.558	333.198	9.921	9.921	2.211	12.132	2.334
53	1136.558	334.348	9.921	9.921	2.211	12.132	2.337
54	1136.558	335.498	9.921	9.921	2.211	12.133	2.179
55	1136.558	336.648	9.921	9.921	2.212	12.133	2.003
56	1145.958	332.048	9.912	9.912	2.214	12.126	2.273
57	1145.958	333.198	9.912	9.912	2.215	12.126	2.312
58	1145.958	334.348	9.912	9.912	2.215	12.127	2.303
59	1145.958	335.498	9.912	9.912	2.215	12.127	2.170
60	1145.958	336.648	9.912	9.912	2.215	12.127	2.030
61	1155.358	332.048	9.902	9.902	2.220	12.123	2.283
62	1155.358	333.198	9.902	9.902	2.219	12.121	2.306
63	1155.358	334.348	9.902	9.902	2.221	12.123	2.277
64	1155.358	335.498	9.902	9.902	2.227	12.129	2.135
65	1155.358	336.648	9.902	9.902	2.230	12.132	1.993
66	1107.558	331.848	9.946	10.803	1.026	11.829	3.129
67	1107.708	331.848	9.946	10.713	1.258	11.972	2.746
68	1107.858	331.848	9.945	10.634	1.385	12.018	2.673
69	1108.008	331.848	9.945	10.568	1.456	12.024	2.673
70	1108.158	331.848	9.945	10.543	1.492	12.035	2.657
71	1107.558	330.598	9.946	10.691	1.316	12.007	2.169
72	1107.708	330.598	9.946	10.707	1.308	12.015	2.116
73	1107.858	330.598	9.946	10.689	1.339	12.028	2.056
74	1108.008	330.598	9.945	10.653	1.386	12.039	2.005

Tabla C-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: b' = 1 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
75	1108.158	330.598	9.945	10.601	1.451	12.052	1.950
76	1107.558	329.348	9.945	10.097	1.865	11.962	0.522
77	1107.708	329.348	9.944	10.169	1.796	11.965	0.587
78	1107.858	329.348	9.944	10.241	1.729	11.969	0.653
79	1108.008	329.348	9.943	10.315	1.661	11.976	0.717
80	1108.158	329.348	9.943	10.394	1.592	11.986	0.778
81	1107.558	328.098	9.945	9.945	2.020	11.965	0.444
82	1107.708	328.098	9.944	9.944	2.022	11.966	0.635
83	1107.858	328.098	9.943	9.943	2.024	11.967	0.852
84	1108.008	328.098	9.942	9.942	2.027	11.970	1.087
85	1108.158	328.098	9.941	9.941	2.031	11.972	1.328
86	1107.558	326.848	9.945	9.945	2.070	12.015	0.897
87	1107.708	326.848	9.944	9.944	2.065	12.009	1.138
88	1107.858	326.848	9.943	9.943	2.060	12.003	1.379
89	1108.008	326.848	9.941	9.941	2.054	11.995	1.612
90	1108.158	326.848	9.940	9.940	2.047	11.987	1.825
91	1107.558	324.346	9.947	9.947	1.937	11.884	2.045
92	1107.708	324.346	9.945	9.945	1.939	11.884	2.101
93	1107.858	324.346	9.943	9.943	1.941	11.883	2.161
94	1108.008	324.346	9.940	9.940	1.942	11.882	2.219
95	1108.158	324.346	9.938	9.938	1.944	11.882	2.265
96	1107.558	321.846	9.945	9.945	1.939	11.884	2.099
97	1107.708	321.846	9.942	9.942	1.941	11.883	2.123
98	1107.858	321.846	9.940	9.940	1.943	11.883	2.150
99	1108.008	321.846	9.938	9.938	1.946	11.883	2.177
100	1108.158	321.846	9.936	9.936	1.948	11.883	2.199
101	1107.558	311.846	9.935	9.935	1.946	11.881	2.104
102	1107.708	311.846	9.933	9.933	1.948	11.881	2.109
103	1107.858	311.846	9.930	9.930	1.950	11.881	2.115
104	1108.008	311.846	9.928	9.928	1.952	11.880	2.120
105	1108.158	311.846	9.926	9.926	1.955	11.880	2.124
106	1107.558	301.846	9.925	9.925	1.951	11.876	2.093
107	1107.708	301.846	9.923	9.923	1.953	11.876	2.094
108	1107.858	301.846	9.920	9.920	1.955	11.875	2.095
109	1108.008	301.846	9.918	9.918	1.957	11.875	2.097
110	1108.158	301.846	9.916	9.916	1.959	11.875	2.098
111	1107.558	291.846	9.915	9.915	1.972	11.887	2.111
112	1107.708	291.846	9.913	9.913	1.975	11.888	2.113

Tabla C-1 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 1

id	Modelo 1: b' = 1 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante y	Nivel de agua	Velocidades V
	x	y					
	m	m	m	m	m	m	m/s
113	1107.858	291.846	9.911	9.911	1.977	11.888	2.113
114	1108.008	291.846	9.908	9.908	1.979	11.888	2.114
115	1108.158	291.846	9.906	9.906	1.982	11.888	2.115
116	1107.558	281.846	9.905	9.905	2.003	11.908	2.147
117	1107.708	281.846	9.903	9.903	2.006	11.908	2.148
118	1107.858	281.846	9.901	9.901	2.008	11.908	2.148
119	1108.008	281.846	9.898	9.898	2.010	11.908	2.149
120	1108.158	281.846	9.896	9.896	2.012	11.908	2.149
121	1107.558	274.346	9.897	9.897	2.000	11.897	2.170
122	1107.708	274.346	9.895	9.895	2.002	11.897	2.170
123	1107.858	274.346	9.893	9.893	2.004	11.897	2.170
124	1108.008	274.346	9.891	9.891	2.007	11.897	2.171
125	1108.158	274.346	9.889	9.889	2.009	11.897	2.171

Fuente: Elaboración propia

Tabla C-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: $b = 2 \text{ m}$						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
1	1162.051	332.073	9.997	10.327	1.192	11.520	3.193
2	1162.051	333.223	9.997	10.402	1.095	11.497	4.691
3	1162.051	334.373	9.997	10.279	1.245	11.525	4.964
4	1162.051	335.523	9.997	9.997	1.566	11.563	4.834
5	1162.051	336.673	9.997	10.427	1.073	11.500	3.277
6	1171.351	332.073	9.988	10.448	1.310	11.757	3.050
7	1171.351	333.223	9.988	10.369	1.395	11.764	4.113
8	1171.351	334.373	9.988	10.370	1.386	11.756	4.397
9	1171.351	335.523	9.988	10.177	1.577	11.754	4.184
10	1171.351	336.673	9.988	10.039	1.737	11.776	3.064
11	1180.651	332.073	9.979	10.275	1.496	11.770	3.202
12	1180.651	333.223	9.979	10.479	1.207	11.687	4.077
13	1180.651	334.373	9.979	10.000	1.854	11.854	3.946
14	1180.651	335.523	9.979	10.161	1.695	11.856	3.658
15	1180.651	336.673	9.979	10.208	1.588	11.797	3.154
16	1189.951	332.073	9.970	10.055	1.676	11.731	3.398
17	1189.951	333.223	9.970	10.070	1.573	11.643	3.958
18	1189.951	334.373	9.970	9.970	1.615	11.585	4.253
19	1189.951	335.523	9.970	10.356	1.196	11.552	3.988
20	1189.951	336.673	9.970	10.533	1.011	11.544	3.716
21	1199.251	332.073	9.960	10.748	0.672	11.419	4.196
22	1199.251	333.223	9.960	10.161	1.379	11.540	3.969
23	1199.251	334.373	9.960	9.960	1.691	11.651	3.934
24	1199.251	335.523	9.960	9.960	1.749	11.710	3.484
25	1199.251	336.673	9.960	10.427	1.287	11.714	3.085
26	1208.551	332.073	9.950	9.950	1.919	11.869	2.936
27	1208.551	333.223	9.951	10.503	1.184	11.688	3.609
28	1208.551	334.373	9.951	10.378	1.461	11.840	3.143
29	1208.551	335.523	9.951	9.992	1.969	11.961	2.456
30	1208.551	336.673	9.951	9.958	2.018	11.976	1.939
31	1209.551	332.073	9.949	9.975	1.953	11.928	2.742
32	1209.551	333.223	9.950	10.054	1.926	11.980	2.678
33	1209.551	334.373	9.950	10.187	1.743	11.930	2.707
34	1209.551	335.523	9.950	10.036	1.946	11.982	2.315
35	1209.551	336.673	9.950	10.008	1.993	12.001	1.813
36	1210.551	332.073	9.947	9.964	1.976	11.940	2.660
37	1210.551	333.223	9.949	9.949	2.070	12.019	2.580
38	1210.551	334.373	9.949	9.949	2.105	12.054	2.275

Tabla C-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: b = 2 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
39	1210.551	335.523	9.949	10.010	2.018	12.027	2.048
40	1210.551	336.673	9.949	9.982	2.042	12.025	1.621
41	1219.851	332.073	9.930	9.930	2.129	12.059	1.890
42	1219.851	333.223	9.933	9.933	2.129	12.063	2.038
43	1219.851	334.373	9.936	9.936	2.129	12.065	1.975
44	1219.851	335.523	9.940	9.940	2.127	12.067	1.723
45	1219.851	336.673	9.940	9.940	2.127	12.067	1.420
46	1229.151	332.073	9.930	9.930	2.049	11.980	2.096
47	1229.151	333.223	9.930	9.930	2.050	11.980	2.256
48	1229.151	334.373	9.930	9.930	2.050	11.981	2.320
49	1229.151	335.523	9.930	9.930	2.051	11.981	2.149
50	1229.151	336.673	9.930	9.930	2.051	11.982	1.907
51	1238.451	332.073	9.921	9.921	2.052	11.973	2.326
52	1238.451	333.223	9.921	9.921	2.052	11.973	2.337
53	1238.451	334.373	9.921	9.921	2.051	11.972	2.269
54	1238.451	335.523	9.921	9.921	2.051	11.972	2.050
55	1238.451	336.673	9.921	9.921	2.051	11.972	1.829
56	1247.751	332.073	9.912	9.912	2.075	11.987	2.214
57	1247.751	333.223	9.912	9.912	2.075	11.987	2.227
58	1247.751	334.373	9.912	9.912	2.075	11.986	2.211
59	1247.751	335.523	9.912	9.912	2.074	11.986	2.095
60	1247.751	336.673	9.912	9.912	2.074	11.986	1.956
61	1257.051	332.073	9.903	9.903	2.102	12.004	2.168
62	1257.051	333.223	9.903	9.903	2.100	12.003	2.211
63	1257.051	334.373	9.903	9.903	2.095	11.997	2.226
64	1257.051	335.523	9.903	9.903	2.094	11.997	2.128
65	1257.051	336.673	9.903	9.903	2.093	11.996	2.006
66	1208.751	331.873	9.949	9.949	1.920	11.869	2.805
67	1209.151	331.873	9.949	9.949	1.933	11.882	2.746
68	1209.551	331.873	9.948	10.075	1.824	11.899	2.754
69	1209.951	331.873	9.947	10.155	1.701	11.855	2.853
70	1210.351	331.873	9.947	9.957	1.959	11.917	2.618
71	1208.751	330.623	9.946	10.189	1.640	11.829	1.716
72	1209.151	330.623	9.945	10.201	1.619	11.820	1.778
73	1209.551	330.623	9.944	10.094	1.714	11.808	1.826
74	1209.951	330.623	9.944	9.944	1.881	11.825	1.813
75	1210.351	330.623	9.943	9.943	1.904	11.847	1.819
76	1208.751	329.373	9.943	10.108	1.707	11.816	0.758

Tabla C-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: $b = 2 \text{ m}$						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
77	1209.151	329.373	9.942	10.120	1.682	11.802	0.780
78	1209.551	329.373	9.941	10.149	1.644	11.793	0.807
79	1209.951	329.373	9.940	10.171	1.620	11.791	0.853
80	1210.351	329.373	9.939	10.198	1.600	11.798	0.926
81	1208.751	328.123	9.942	9.946	1.874	11.819	0.276
82	1209.151	328.123	9.940	9.947	1.860	11.807	0.165
83	1209.541	328.123	9.939	9.949	1.850	11.799	0.073
84	1209.951	328.123	9.938	9.951	1.844	11.795	0.240
85	1210.351	328.123	9.937	9.950	1.849	11.799	0.465
86	1208.751	326.873	9.941	9.941	1.909	11.850	0.474
87	1209.151	326.873	9.939	9.939	1.905	11.845	0.527
88	1209.541	326.873	9.938	9.938	1.904	11.842	0.628
89	1209.951	326.873	9.936	9.936	1.904	11.840	0.783
90	1210.351	326.873	9.935	9.935	1.907	11.842	0.969
91	1208.751	324.373	9.940	9.940	1.984	11.924	0.517
92	1209.151	324.373	9.938	9.938	1.985	11.923	0.658
93	1209.541	324.373	9.935	9.935	1.986	11.921	0.832
94	1209.951	324.373	9.933	9.933	1.985	11.918	1.032
95	1210.351	324.373	9.931	9.931	1.984	11.915	1.231
96	1208.751	321.873	9.944	9.944	2.013	11.957	0.592
97	1209.151	321.873	9.940	9.940	2.010	11.951	0.784
98	1209.551	321.873	9.937	9.937	2.008	11.945	0.977
99	1209.951	321.873	9.933	9.933	2.005	11.938	1.162
100	1210.351	321.873	9.929	9.929	2.002	11.932	1.329
101	1208.751	311.873	9.942	9.942	1.942	11.884	1.454
102	1209.151	311.873	9.936	9.936	1.948	11.884	1.467
103	1209.551	311.873	9.930	9.930	1.954	11.884	1.484
104	1209.951	311.873	9.924	9.924	1.960	11.884	1.502
105	1210.351	311.873	9.918	9.918	1.965	11.884	1.517
106	1208.751	301.873	9.932	9.932	1.965	11.897	1.523
107	1209.151	301.873	9.926	9.926	1.971	11.897	1.526
108	1209.551	301.873	9.920	9.920	1.977	11.897	1.532
109	1209.951	301.873	9.914	9.914	1.982	11.897	1.541
110	1210.351	301.873	9.908	9.908	1.988	11.897	1.550
111	1208.751	291.873	9.922	9.922	1.976	11.898	1.587
112	1209.151	291.873	9.916	9.916	1.982	11.898	1.592
113	1209.551	291.873	9.910	9.910	1.988	11.898	1.597
114	1209.951	291.873	9.904	9.904	1.993	11.898	1.602

Tabla C-2 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 2

id	Modelo 2: b = 2 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
115	1210.351	291.873	9.898	9.898	1.999	11.898	1.604
116	1208.751	281.873	9.912	9.912	2.005	11.917	1.576
117	1209.151	281.873	9.906	9.906	2.011	11.917	1.580
118	1209.551	281.873	9.900	9.900	2.017	11.917	1.585
119	1209.951	281.873	9.894	9.894	2.022	11.917	1.588
120	1210.351	281.873	9.888	9.888	2.028	11.917	1.590
121	1208.751	274.373	9.904	9.904	2.018	11.922	1.547
122	1209.151	274.373	9.898	9.898	2.023	11.922	1.550
123	1209.551	274.373	9.893	9.893	2.029	11.922	1.554
124	1209.951	274.373	9.887	9.887	2.035	11.922	1.557
125	1210.351	274.373	9.881	9.881	2.041	11.922	1.559

Fuente: Elaboración propia

Tabla C-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: $b = 5 \text{ m}$						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante y	Nivel de agua	Velocidades V
	x	y					
	m	m	m	m	m	m	m/s
1	1267.019	332.098	9.998	10.285	1.002	11.287	3.299
2	1267.019	333.248	9.998	10.009	1.308	11.317	4.840
3	1267.019	334.398	9.998	9.998	1.351	11.349	5.108
4	1267.019	335.548	9.998	9.998	1.330	11.327	5.072
5	1267.019	336.698	9.998	10.054	1.270	11.324	3.599
6	1276.019	332.098	9.989	9.989	1.220	11.209	4.005
7	1276.019	333.248	9.989	9.998	1.190	11.188	5.012
8	1276.019	334.398	9.989	9.989	1.172	11.161	5.288
9	1276.019	335.548	9.989	9.989	1.158	11.147	5.169
10	1276.019	336.698	9.989	9.989	1.153	11.142	4.257
11	1285.019	332.098	9.980	9.980	0.848	10.827	5.242
12	1285.019	333.248	9.979	9.979	0.934	10.913	5.486
13	1285.019	334.398	9.977	9.977	1.004	10.981	5.477
14	1285.019	335.548	9.976	9.976	1.045	11.021	5.190
15	1285.019	336.698	9.979	9.979	1.054	11.033	4.554
16	1294.019	332.098	9.965	9.965	0.580	10.545	5.960
17	1294.019	333.248	9.964	9.964	0.612	10.576	5.946
18	1294.019	334.398	9.963	9.963	0.638	10.601	5.821
19	1294.019	335.548	9.966	9.966	0.649	10.615	5.564
20	1294.019	336.698	9.970	9.970	0.650	10.620	5.250
21	1303.019	332.098	9.950	10.090	1.383	11.473	3.926
22	1303.019	333.248	9.949	10.073	1.448	11.520	2.886
23	1303.019	334.398	9.952	10.018	1.460	11.478	2.585
24	1303.019	335.548	9.957	9.967	1.454	11.421	1.619
25	1303.019	336.698	9.961	9.967	1.430	11.397	0.200
26	1312.019	332.098	9.936	10.181	1.202	11.383	3.050
27	1312.019	333.248	9.939	10.155	1.227	11.382	2.544
28	1312.019	334.398	9.943	10.057	1.343	11.400	1.874
29	1312.019	335.548	9.948	10.204	1.211	11.415	1.502
30	1312.019	336.698	9.952	10.447	0.948	11.396	1.199
31	1314.519	332.098	9.932	10.208	1.207	11.415	3.011
32	1314.519	333.248	9.937	10.075	1.388	11.463	2.355
33	1314.519	334.398	9.941	10.033	1.438	11.471	1.632
34	1314.519	335.548	9.945	9.986	1.494	11.481	1.255
35	1314.519	336.698	9.949	10.014	1.468	11.483	0.791
36	1317.019	332.098	9.930	10.256	1.183	11.439	2.856
37	1317.019	333.248	9.934	10.131	1.360	11.491	1.966
38	1317.019	334.398	9.938	10.082	1.420	11.502	1.545

Tabla C-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b' = 5 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
39	1317.019	335.548	9.942	9.942	1.568	11.510	1.139
40	1317.019	336.698	9.947	10.111	1.399	11.510	0.788
41	1326.019	332.098	9.921	10.180	1.326	11.506	0.615
42	1326.019	333.248	9.925	10.190	1.313	11.503	0.404
43	1326.019	334.398	9.929	9.929	1.573	11.503	0.269
44	1326.019	335.548	9.933	9.933	1.566	11.499	0.191
45	1326.019	336.698	9.938	9.939	1.559	11.498	0.147
46	1335.019	332.098	9.912	9.912	1.541	11.452	0.978
47	1335.019	333.248	9.916	9.949	1.501	11.450	0.657
48	1335.019	334.398	9.920	9.933	1.515	11.448	0.367
49	1335.019	335.548	9.924	9.924	1.523	11.447	0.111
50	1335.019	336.698	9.928	9.928	1.519	11.447	0.053
51	1344.019	332.098	9.904	9.904	1.519	11.423	2.459
52	1344.019	333.248	9.907	9.907	1.531	11.438	1.952
53	1344.019	334.398	9.911	9.911	1.534	11.445	1.365
54	1344.019	335.548	9.915	9.915	1.535	11.450	0.924
55	1344.019	336.698	9.919	9.919	1.533	11.452	0.665
56	1353.019	332.098	9.911	9.911	1.507	11.418	2.665
57	1353.019	333.248	9.911	9.911	1.511	11.422	2.466
58	1353.019	334.398	9.911	9.911	1.517	11.428	2.008
59	1353.019	335.548	9.911	9.911	1.521	11.432	1.662
60	1353.019	336.698	9.911	9.911	1.523	11.434	1.470
61	1362.019	332.098	9.902	9.902	1.565	11.467	2.333
62	1362.019	333.248	9.902	9.902	1.560	11.462	2.201
63	1362.019	334.398	9.902	9.902	1.556	11.459	1.976
64	1362.019	335.548	9.902	9.902	1.554	11.456	1.747
65	1362.019	336.698	9.902	9.902	1.553	11.456	1.579
66	1312.219	331.898	9.936	10.148	1.228	11.376	3.109
67	1313.369	331.898	9.934	10.163	1.284	11.447	2.925
68	1314.519	331.898	9.932	10.133	1.299	11.431	2.997
69	1315.669	331.898	9.931	10.231	1.147	11.378	3.164
70	1316.819	331.898	9.929	10.249	1.177	11.426	3.022
71	1312.219	330.648	9.937	10.103	1.283	11.386	3.304
72	1313.369	330.648	9.935	10.055	1.355	11.411	3.158
73	1314.519	330.648	9.933	10.131	1.226	11.357	3.305
74	1315.669	330.648	9.931	10.151	1.146	11.297	3.411
75	1316.819	330.648	9.929	10.305	1.016	11.321	3.496
76	1312.219	329.398	9.938	10.261	1.042	11.303	3.381

Tabla C-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b' = 5 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante y	Nivel de agua	Velocidades V
	x	y					
	m	m	m	m	m	m	m/s
77	1313.369	329.398	9.936	10.123	1.236	11.358	3.121
78	1314.519	329.398	9.934	10.049	1.264	11.313	3.165
79	1315.669	329.398	9.933	10.155	1.021	11.176	3.580
80	1316.819	329.398	9.931	10.266	0.927	11.193	3.640
81	1312.219	328.148	9.937	10.199	1.089	11.288	2.561
82	1313.369	328.148	9.935	10.363	0.738	11.100	3.331
83	1314.519	328.148	9.933	10.359	0.827	11.186	3.187
84	1315.669	328.148	9.931	10.165	1.112	11.276	2.938
85	1316.819	328.148	9.929	10.118	1.002	11.120	3.251
86	1312.219	326.898	9.935	10.001	1.215	11.217	2.158
87	1313.369	326.898	9.933	9.935	1.287	11.221	2.264
88	1314.519	326.898	9.931	9.932	1.301	11.233	2.296
89	1315.652	326.898	9.928	10.005	1.126	11.132	2.604
90	1316.819	326.898	9.926	10.022	1.173	11.195	2.739
91	1312.219	324.398	9.931	9.953	1.242	11.196	1.086
92	1313.369	324.398	9.928	9.966	1.218	11.184	1.195
93	1314.502	324.398	9.926	10.015	1.154	11.168	1.335
94	1315.652	324.398	9.923	10.111	1.042	11.152	1.477
95	1316.819	324.398	9.920	10.132	1.028	11.160	1.579
96	1312.219	321.898	9.929	9.931	1.231	11.162	0.423
97	1313.369	321.898	9.926	9.933	1.214	11.147	0.433
98	1315.652	321.898	9.919	9.951	1.150	11.100	0.523
99	1314.519	321.898	9.923	9.937	1.189	11.126	0.443
100	1316.819	321.898	9.916	9.994	1.090	11.085	0.847
101	1312.219	311.898	9.931	9.931	1.268	11.200	0.618
102	1313.369	311.898	9.924	9.927	1.276	11.202	0.590
103	1314.519	311.898	9.917	9.917	1.284	11.201	1.070
104	1315.669	311.898	9.910	9.910	1.282	11.191	1.702
105	1316.819	311.898	9.902	9.902	1.265	11.167	2.355
106	1312.219	301.898	9.945	9.945	1.432	11.377	0.663
107	1313.369	301.898	9.929	9.929	1.441	11.370	1.099
108	1314.519	301.898	9.914	9.914	1.444	11.359	1.759
109	1315.669	301.898	9.899	9.899	1.442	11.341	2.391
110	1316.819	301.898	9.885	9.885	1.435	11.320	2.709
111	1312.219	291.898	9.945	9.945	1.427	11.372	1.411
112	1313.369	291.898	9.928	9.928	1.444	11.372	1.601
113	1314.519	291.898	9.910	9.910	1.463	11.373	1.916
114	1315.669	291.898	9.893	9.893	1.484	11.376	2.284

Tabla C-3 Resultados del programa Telemac-2D para el modelo 3

id	Modelo 3: b' = 5 m						
	Coordenadas		Fondo	Evolución Fondo	Tirante	Nivel de agua	Velocidades
	x	y			y		V
	m	m	m	m	m	m	m/s
115	1316.819	291.898	9.876	9.876	1.506	11.381	2.452
116	1312.219	281.898	9.935	9.935	1.446	11.381	1.384
117	1313.369	281.898	9.918	9.918	1.463	11.381	1.590
118	1314.519	281.898	9.901	9.901	1.480	11.380	1.877
119	1315.669	281.898	9.883	9.883	1.496	11.380	2.197
120	1316.819	281.898	9.866	9.866	1.513	11.379	2.454
121	1312.219	274.398	9.927	9.927	1.445	11.372	1.349
122	1313.369	274.398	9.910	9.910	1.463	11.373	1.559
123	1314.519	274.398	9.893	9.893	1.481	11.374	1.880
124	1315.669	274.398	9.876	9.876	1.500	11.376	2.208
125	1316.819	274.398	9.859	9.859	1.518	11.378	2.447

Fuente: Elaboración propia

APÉNDICE D

**Archivos de control para los modelos de bocatomas con bifurcación a 90°
con aristas vivas según investigaciones de Thoma**

- **cas.txt**

```

/-----
/ TELEMAC2D Version v6p1 Jun 18, 2013
/ nom inconnu
/-----
/-----
/ EQUATIONS
/-----
FRICTION COEFFICIENT          =0.016
LAW OF BOTTOM FRICTION        =4
//TURBULENCE MODEL FOR SOLID BOUNDARIES = 2
TURBULENCE MODEL              =3
/-----
/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
/-----
VELOCITY PROFILES              =1;1;1
PRESCRIBED FLOWRATES           =-0.03;-0.03;0.06
PRESCRIBED ELEVATIONS          =10.072;10.0945;0
/STAGE-DISCHARGE CURVES       =1;1;0
OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES =1;1;1
/-----
/ EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS
/-----
/INITIAL DEPTH                 =0.09
/INITIAL CONDITIONS ='CONSTANT DEPTH'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, FILES
/-----
STEERING FILE                  ='cas.txt'
BOUNDARY CONDITIONS FILE       ='cli.cli'
GEOMETRY FILE                  ='GEO.slf'
/STAGE-DISCHARGE CURVES FILE   ='curvaDescarga.txt'
PREVIOUS COMPUTATION FILE      ='resInitial.slf'
RESULTS FILE                   ='res.slf'
FORTRAN FILE                   ='noerod.f'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING
/-----
LISTING PRINTOUT PERIOD        =6000
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS =U,V,H,B,US,S,M,K,E,F,C,L,N,O,R,Z,W
MASS-BALANCE                   =YES
INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL = YES
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD        =18000
/-----
/ INPUT-OUTPUT, INFORMATION
/-----
COMPUTATION CONTINUED =YES

INITIAL TIME SET TO ZERO = YES

```

```
/INITIAL DEPTH          =0.05
/INITIAL CONDITIONS     ='CONSTANT DEPTH'
/-----
/ COUPLING WITH SISYPHE
/-----
COUPLING WITH           = 'SISYPHE'
SISYPHE STEERING FILE   = 'sisCas.txt'
COUPLING PERIOD FOR SISYPHE = 1
/-----
/ NUMERICAL PARAMETERS
/-----
NUMBER OF TIME STEPS =360000
PARALLEL PROCESSORS =10
/STOP IF A STEADY STATE IS REACHED = YES
STOP CRITERIA          =0.000001;0.000001;0.000001;0.000001
TIME STEP              =0.005
```

- **siscas.txt**

```

/-----/
/  Bocatoma con bifurcación a 90°      /
/-----/
GEOMETRY FILE           = 'GEO.slf'
BOUNDARY CONDITIONS FILE = 'cliSed.cli'
RESULTS FILE            = 'resSed.slf'
/-----/
/  GENERAL INFORMATIONS - OUTPUTS
/-----/
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS = 'B,M,E,QSBL,Q,R,TOB'
TIME STEP                      = 0.005
NUMBER OF TIME STEPS           =360000
/-----/
/  BOUNDARY CONDITIONS
/-----/
MASS-BALANCE = YES
/-----/
/  EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
/-----/
PRESCRIBED SOLID DISCHARGES =0.0;0.0;0.0001038
/-----/
/  PHYSICAL PARAMETERS
/-----/
NUMBER OF SIZE-CLASSES OF BED MATERIAL  = 1
SEDIMENT DENSITY                        = 2650
NON COHESIVE BED POROSITY                = 0.4
SEDIMENT DIAMETERS                      =0.000062
INITIAL FRACTION FOR PARTICULAR SIZE CLASS = 1
COHESIVE SEDIMENTS                      = NO
/SETTLING VELOCITIES                    = 0.0173;0.0064;0.0024
SHIELDS PARAMETERS                      = 0.045
/-----/
/  MODELING PARAMETERS
/-----/
BED-LOAD TRANSPORT FORMULA              = 1
BED LOAD                                = YES
FORMULA FOR SLOPE EFFECT                  = 1
FORMULA FOR DEVIATION                    = 1
SLOPE EFFECT                             = YES
FRICTION ANGLE OF THE SEDIMENT            = 40
BETA                                     = 1.3
PARAMETER FOR DEVIATION                   = 0.85
SEDIMENT SLIDE                           = YES
SECONDARY CURRENTS                       = YES
SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT     = 1
CORRECTION ON CONVECTION VELOCITY        = NO
MASS CONCENTRATION                       = NO
OPTION FOR THE TREATMENT OF NON ERODABLE BEDS = 3
/----- SUSPENDED SEDIMENT -----

```

SUSPENSION	= NO
TYPE OF ADVECTION	= 1

APÉNDICE E

Tablas de resultados para el análisis de resultados

Tabla E-1 Resultados del programa Telemac-2D

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas																	
Modelos				Caudal líquido			Caudales Sólidos			PORCENTAJES				PORCENTAJES			
	b' m	B m	b'/B	Q m³/s	Q ₁ m³/s	Q ₂ m³/s	Q _s l/s	Q _{s1} l/s	Q _{s2} l/s	Q _{s1} %	Q _{s2} %	Q _{s1} /Q _s	Q _{s2} /Q _s	Q ₁ %	Q ₂ %	Q ₁ /Q	Q ₂ /Q
Modelo 1	1	5	0.2	28.670	2.484	26.186	304.695	5.242	299.453	1.720	98.280	0.017	0.983	8.665	91.335	0.087	0.913
Modelo 2	2		0.4		5.245	23.425	26.875	3.126	23.748	11.633	88.367	0.116	0.884	18.295	81.705	0.183	0.817
Modelo 3	5		1		8.162	20.508	48.367	18.289	30.078	37.813	62.187	0.378	0.622	28.470	71.530	0.285	0.715
Modelo Thoma 90°	0.3	0.3	1	0.060	0.030	0.030	0.313	0.204	0.110	65.240	35.016	0.652	0.350	0.105	0.105	0.500	0.500

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-2 Resultados del programa Telemac-2D

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas redondeadas																	
Modelos				Caudal líquido			Caudal sólido			PORCENTAJES				PORCENTAJES			
	b' m	B m	b'/B	Q m³/s	Q ₁ m³/s	Q ₂ m³/s	Q _s l/s	Q _{s1} l/s	Q _{s2} l/s	Q _{s1} %	Q _{s2} %	Q _{s1} /Q _s	Q _{s2} /Q _s	Q ₁ %	Q ₂ %	Q ₁ /Q	Q ₂ /Q
Modelo 1	1	5	0.2	28.670	2.890	25.780	60.611	10.694	49.917	17.643	82.357	0.176	0.824	10.080	89.920	0.101	0.899
Modelo 2	2		0.4		6.453	22.217	42.816	11.274	31.543	26.330	73.670	0.263	0.737	22.509	77.491	0.225	0.775
Modelo 3	5		1		14.146	14.524	31.018	15.857	15.161	51.123	48.877	0.511	0.489	49.342	50.658	0.493	0.507

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-3 Resultados del programa Telemac-2D

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas															
Modelos				Caudal líquido			Número de Froude			Tirantes			Velocidades		
	B m	b' m	b'/B	Q ₁ m ³ /s	Q m ³ /s	Q ₁ /Q	Fr ₁	Fr	Fr ₁ /Fr	y ₁ m	y m	y ₁ /y	V ₁ m/s	V m/s	V ₁ /V
Modelo 1	5	1	0.2	2.484	28.670	0.087	0.231	0.463	0.498	2.277	2.5	0.911	1.091	2.294	0.476
Modelo 2		2	0.4	5.245		0.183	0.351		0.758	1.785		0.714	1.469		0.641
Modelo 3		5	1	8.162		0.285	0.504		1.088	1.023		0.409	1.596		0.696

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-4 Resultados del programa Telemac-2D

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas															
Modelos				Caudal líquido			Número de Froude			Tirantes			Velocidades		
	B m	b' m	b'/B	Q ₂ m ³ /s	Q m ³ /s	Q ₂ /Q	Fr ₂	Fr	Fr ₂ /Fr	y ₂ m	y m	y ₂ /y	V ₂ m/s	V m/s	V ₂ /V
Modelo 1	5	1	0.2	26.186	28.670	0.913	0.468	0.463	1.011	2.337	2.5	0.935	2.242	2.294	0.977
Modelo 2		2	0.4	23.425		0.817	0.474		1.023	2.152		0.861	2.177		0.949
Modelo 3		5	1	20.508		0.715	0.480		1.037	1.952		0.781	2.101		0.916

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-5 Resultados del programa Telemac-2D

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas redondeadas															
Modelos				Caudal líquido			Número de Froude			Tirantes			Velocidades		
	B m	b' m	b'/B	Q ₁ m ³ /s	Q m ³ /s	Q ₁ /Q	Fr ₁	Fr	Fr ₁ /Fr	y ₁ m	y m	y ₁ /y	V ₁ m/s	V m/s	V ₁ /V
Modelo 1	5	1	0.2	2.890	28.670	0.101	0.219	0.463	0.473	2.609	2.5	1.044	1.108	2.294	0.483
Modelo 2		2	0.4	6.453		0.225	0.335		0.724	2.114		0.845	1.527		0.666
Modelo 3		5	1	14.146		0.493	0.494		1.066	1.496		0.598	1.891		0.825

Fuente: Elaboración propia

Tabla E-6 Resultados del programa Telemac-2D

Bocatoma con bifurcación a 90° con aristas redondeadas															
Modelos				Caudal líquido			Número de Froude			Tirantes			Velocidades		
	B m	b' m	b'/B	Q ₂ m ³ /s	Q m ³ /s	Q ₂ /Q	Fr ₂	Fr	Fr ₂ /Fr	y ₂ m	y m	y ₂ /y	V ₂ m/s	V m/s	V ₂ /V
Modelo 1	5	1	0.2	25.780	28.670	0.899	0.469	0.463	1.013	2.310	2.5	0.924	2.233	2.294	0.973
Modelo 2		2	0.4	22.217		0.775	0.477		1.029	2.070		0.828	2.147		0.936
Modelo 3		5	1	14.524		0.507	0.493		1.064	1.524		0.610	1.906		0.831

Fuente: Elaboración propia

APÉNDICE F

Líneas de corriente de agua

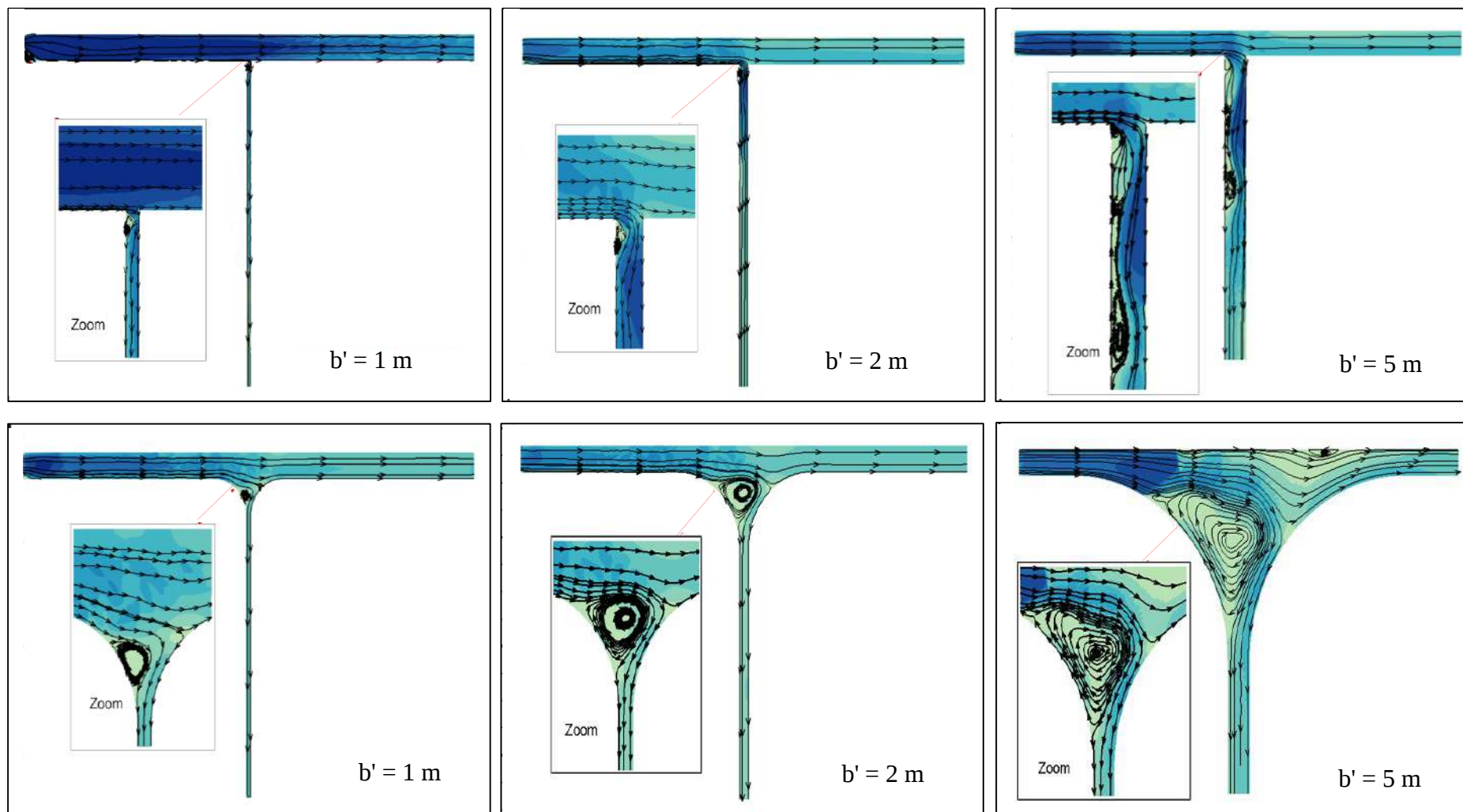


Ilustración 1 Líneas de corrientes para una bocatoma con bifurcación a 90° con aristas vivas y redondeadas
Fuente: Elaboración propia