

CAPÍTULO 2

Modelado numérico de inundaciones fluviales

2. Modelado numérico de inundaciones fluviales

Las llanuras de inundación que conforman los humedales en general, dependen en gran medida de los ciclos de inundación y secado que se generan como resultado de la dinámica en las cuencas hidrológicas. Los humedales pueden ser clasificados de acuerdo a la presencia de agua en ellos, como permanentes, semi-permanentes y perenes. En ciertos periodos de tiempo, el flujo de inundación en estas zonas puede conectar ríos y lagunas. En consecuencia, la importancia ecológica de estos sistemas, es evidente. Para citar un ejemplo, la alteración de la hidrodinámica de estos sistemas tiene claras consecuencias ecológicas sobre su eutrofización y contenido de oxígeno, los cuales son parámetros clave para la sobrevivencia de la diversidad en la vegetación y la fauna nativa.

La administración de los recursos hídricos en todo el mundo (ej. regulación de flujos por estructuras de control), ha producido una alteración significativa de los patrones de flujo en muchos sistemas ribereños (Chauhan et al. 2005; Kingsford, 2000; Sánchez-Carrillo et al. 2004). Estas alteraciones, requieren de un cuidadoso manejo por parte de las autoridades encargadas, a fin de que sea posible delimitar y administrar los efectos que producen. Debido a la presión sobre la disponibilidad y uso del agua en todo el mundo, las prácticas del manejo de este recurso, han sufrido cambios drásticos orientados hacia una distribución más equitativa y sustentable. Es precisamente en este marco de trabajo donde se encuentra el manejo y delimitación de los humedales.

Por otra parte, es bien sabido que la modelación numérica de flujos de inundación sobre llanuras y humedales, es una herramienta de gran utilidad práctica no sólo para determinar los impactos ecológicos de una región sino también para proteger los bienes y/o comunidades aledañas. El presente estudio documenta los modelos bi-dimensionales que son utilizados con mayor frecuencia en la literatura, para determinar los flujos de inundación sobre llanuras (ej. humedales). De tal suerte que sus resultados proveen información vital para la determinación del área, duración, frecuencia y magnitud de la inundación.

2.1 Tipos de modelos para flujos en llanuras de inundación

Los modelos numéricos utilizados para resolver problemas de inundación y flujos en tierras bajas (ej. humedales), en la hidráulica fluvial y la hidrología, cubren un amplio espectro de metodologías. Con objeto de clasificar las hipótesis a las que se ajustan las diversas aproximaciones existentes, Chow et al. (1998) dividieron los modelos en diversas categorías con base en tres parámetros clave: aleatoriedad, espacio y tiempo. Una división alternativa, frecuentemente utilizada por los modeladores, es la que se define a través de los conceptos aplicados en el modelo para describir el comportamiento del sistema. Con lo que se definen tres categorías:

- **Modelos de caja negra.** Este tipo de modelos son aquellos que se basan en el comportamiento de datos, en los que se adopta una relación entre dos variables de interés (entrada-salida). Ejemplos de este tipo de modelos están representados por los métodos de redes-neuronales (Cameron et al. 2002), y correlaciones entre bases de datos (Young et al. 1997; Lees 2000). Para utilizar este tipo de aproximación, se requiere una gran cantidad de información (ej. gastos en los ríos, niveles, elevaciones, clima etc.) de tal suerte que se pueda establecer cierta correlación entre la causa y el efecto que se desea investigar. Usualmente, las funciones desarrolladas bajo este tipo método no reflejan la física del problema en estudio. Por lo que en México, su uso está limitado dada la poca cultura de medición que existe.
- **Modelos basados en la física.** Este tipo de modelos, también conocidos como modelos de procesos, son los más complejos de todos. Tienen su base en los principios fundamentales de la física del problema hidráulico, y se requiere de una adecuada adaptación mediante condiciones de frontera apegadas a la realidad. En su aplicación para la simulación de flujos en ríos y grandes dominios de inundación (ej. llanuras), se requiere de un proceso de calibración que a su vez necesita mediciones de campo a fin de validar la herramienta numérica (Madsen, 2003).
- **Modelos conceptuales.** Se refieren a aquellos que ofrecen cierto compromiso práctico entre los modelos de procesos y los modelos de caja negra (Viney et al., 2000). Estos modelos utilizan ecuaciones empíricas de los procesos considerados como dominantes en un sistema, en lugar de resolver las ecuaciones fundamentales de la física. No requieren de una considerable cantidad de datos de campo como en el caso de los modelos de procesos, pero tienen una clara desventaja en el hecho de que estos modelos requieren pasar por un arduo y largo proceso de calibración (con un conjunto ideal de datos, que no siempre está disponible).

2.1.1 Nota sobre la integración de modelos con datos geográficos

Antes de seleccionar un modelo numérico para describir el flujo en llanuras de inundación, se debe poner particular atención en los datos geográficos disponibles (ej. topografía, batimetría, rugosidad del suelo etc.). En primer lugar, la escala disponible de los datos geográficos determinará en gran medida la precisión y confiabilidad de los resultados numéricos. Es muy probable que las bases de datos existentes, no contengan la información a la escala requerida por un modelo, por lo que se requiere cierta experiencia para seleccionar la escala apropiada de resolución (Beven, 2001).

2.2 Estimación del área de inundación

La estimación del área de inundación en llanuras y humedales es fundamental para la evaluación de la vulnerabilidad de una zona y la administración de los riesgos asociados. La vulnerabilidad se establece por medio del análisis de los mapas de inundación en ciertas áreas dado un cierto periodo de retorno. A pesar de que el público en general puede considerar que toda inundación es inaceptable, es claro para la comunidad científica internacional que este objetivo es inalcanzable. El grado de aceptación de inundación para un periodo de retorno, se establece a través de una evaluación de costo-beneficio comparando las pérdidas potenciales en la zona, con el costo de construcción de obras de defensa para la misma (Dutta et al., 2003). Una vez definida la vulnerabilidad espacial de una zona, el problema estriba en determinar el peligro de inundación. Para ello, se requiere de un mapa que defina la extensión de la inundación y las velocidades de flujo asociadas para los periodos de retorno. El problema entonces consiste en cómo definir mapas confiables que determinen el área de inundación para un periodo de retorno dado.

La Tabla 1 proporciona una revisión de la variedad de modelos disponibles para la determinación de la extensión de inundación en llanuras. El método más simple, consiste en estimar un nivel plano de superficie libre del agua por medio de niveles de agua observados en estaciones hidrométricas. Esta superficie plana se intersecta con datos de elevación provenientes de un modelo digital de terreno (MDE) (Priestnall et al., 2000). Esta metodología no toma en cuenta la hidráulica de la llanura ni el río, y su extrema simplicidad se refleja en la deficiencia de sus resultados (Horrit y Bates, 2001). En consecuencia, se considera que su aplicación para la delimitación de humedales y áreas de inundación es inviable.

Por otra parte, el método de la celda de almacenamiento desarrollado por Cunge (1975) ha sido ampliamente aplicado en la determinación del área de inundación (Cunge et al. 1980; Jonge et al. 1996; Romanowicz y Beven 1998). En este método, la llanura o humedal es dividido en grandes celdas de almacenamiento, con agua fluyendo de los ríos hacia estas celdas y con intercambio de flujo entre celdas. El nivel del agua en las celdas es constante y se determina por medio del balance entre flujos de entrada y salida, similar a un volumen de control, y los flujos se determinan por medio de ecuaciones de flujo uniforme. En este tipo de aproximaciones, la extensión de la inundación y en consecuencia la confiabilidad del modelo está determinada por la forma en la que se definen las celdas (ej. tamaño, elevación).

Además se incluyen los modelos hidrodinámicos que resuelven las ecuaciones de continuidad de flujo en una dimensión y en dos dimensiones. En la Tabla 1 se incluyen, ejemplos de aplicación de estos modelos que están disponibles en la literatura junto con los códigos disponibles para su utilización.

Método	Descripción	Código (ejemplos)	Aplicaciones
Superficie libre del agua	Se define una superficie libre del agua (plana) a través de los valores de nivel obtenidos de estaciones hidrométricas en los ríos. Esta superficie se superpone a un MDE para obtener la inundación.	Ninguno	Priestnall et al. (2000)
Celda de almacenamiento (grande)	El río y la llanura se modelan de forma independiente, la llanura se discretiza como celdas de inundación y el flujo en el río se describe a través de ecuaciones basadas en el flujo uniforme (ej. Manning).	Ninguno	Cunge (1975); Jonge et al. (1996)
Celda de almacenamiento (pequeña)	Similar a la anterior, pero en lugar de discretizar la llanura en celdas asignadas, éstas se determinan en función del MDE. El río es modelado de forma unidimensional.	FLOODSIM, LISFLOOD-FP	Bechteler et al. (1994); Bates and de Roo (2000)
Modelos hidrodinámicos de una dimensión (1D)	Resuelven las ecuaciones de Saint-Venant (1D) por medio de una serie de secciones transversales del río y llanura de inundación, perpendiculares al flujo del río. Los niveles de agua resultantes en puntos 1D, pueden ser dibujados en 2D por medio de una interpolación espacial de los resultados.	HEC-RAS, ISIS, MIKE11, SOBEK	Tate y Maidment (1999); Penning Rowsell y Tunstall (1996); Gourbesville (1998); Werner (2001)
Modelos hidrodinámicos de dos dimensiones (2D)	Resuelven las ecuaciones de aguas someras en 2D, en algunos casos con modelos de cierre de turbulencia. Es posible discretizar la llanura de inundación por medio de mallas regulares (rectángulos) o adaptables (triángulos).	TELEMAC-2D, MIKE21, DELFT-FLS, DELFT3D, TUFLOW, DIVAST, TRENT	Hervouet (2000); Mc- Cowan y Collins (1999); Beffa y Connell (2001); Stelling y Duinmeijer (2003)

Tabla 2.1 Diferentes métodos para el modelado de inundación en llanuras en orden ascendente de complejidad hidráulica.

2.3 Modelos hidrodinámicos en una dimensión (1D)

Los modelos hidrodinámicos en una dimensión (1D) han sido aplicados con cierto éxito para el estudio de los niveles de inundación y descargas en sistemas ribereños a escalas que incluyen las decenas y centenas de kilómetros (Wijbenga et al. 1994; Lammersen et al. 2002; Yoshida y Dittrich 2002). Este tipo de modelos, permiten una evaluación rápida de la distribución del nivel del agua y los gastos en un río considerando efectos de advección y difusión.

Este tipo de códigos se basan en la hipótesis de que el flujo es unidimensional, siendo la dimensión relevante la longitud del problema, a lo largo de la cual se evalúan el gasto y los niveles de agua en el río. Se considera flujo gradualmente variado, de tal suerte que se asume presión hidrostática. La topología del río se define como una serie de ramas interconectadas en nodos, mientras que la geometría se define a través de secciones transversales perpendiculares a la dirección de flujo, con los niveles de agua en cada sección considerada como constante a lo largo de la misma.

Existen una variedad de códigos comerciales y no-comerciales disponibles (ver Tabla 1) y éstos varían dependiendo del objetivo de aplicación y su solución matemática y numérica, aunque todos se basan en los principios descritos por las ecuaciones de continuidad y momento en su versión de 1D. Además, utilizan la rugosidad de Manning para definir la fricción del fondo tal que:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat}$$
$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} = 0 \quad (2.1)$$

Dado que no existe solución analítica para las ecuaciones descritas en (1), los códigos resuelven el sistema de ecuaciones de forma numérica, principalmente por medio de la técnica de diferencias finitas. Se utilizan dos tipos de discretización espacial, (1) el esquema de caja o Preissmen, donde el nivel del agua y el gasto son definidos de forma conjunta en puntos a lo largo de la malla; ó (2) se utilizan esquemas anidados donde el nivel del agua y el gasto se definen de forma alternada en los nodos de la malla (Cunge et al. 1980).

La Tabla 2 presenta un resumen de los tipos de datos típicos que se necesitan para la puesta a punto de los modelos unidimensionales. Cabe resaltar, que los datos más importantes para la fiabilidad de los resultados obtenidos con este tipo de modelos, son las secciones transversales que determinan la forma del cauce del río.

Datos	Descripción	Fuente posible
Configuración del río.	Disposición del sistema de ríos.	Mapa, fotos aéreas y de satélite.
Nodos.	Ubicación de condiciones de contorno y confluencias.	Mapas, fotos aéreas y de satélite.
Canal principal.	Determinación del canal principal (cauce del río).	Mapas, fotos aéreas y de satélite.
Planicie de inundación.	Elevaciones en la llanura de inundación	Cartografía o levantamiento topográfico de campo
Ubicación/Descripción de estructuras de control	Ubicación, dimensiones y operación de las estructuras.	Levantamiento topobatemétrico en campo
Secciones transversales (ubicación y configuración)	Ubicación y elevación de las estructuras de control	Levantamiento topobatemétrico en campo

Tabla 2.2 Categorías típicas de datos topográficos requeridos para un modelo unidimensional.

Cabe mencionar que es posible obtener mapas de inundación en 2 dimensiones a partir de los resultados de un modelo unidimensional, bajo la hipótesis de que los niveles de agua modelados en 1D permanecen constantes a lo largo de la sección transversal modelada. Dado que, esta sección no representa sólo un punto sino una línea sobre el mapa de la llanura. Haciendo uso de esta hipótesis se pueden proyectar mapas de inundación en 2D, a través de una interpolación entre los niveles de agua descritos en cada nodo (ej. Marche et al. 1990; Werner 2001).

A pesar de que estos métodos de interpolación otorgan una poderosa representación visual de los resultados de un modelo 1D, los resultados obtenidos de esta forma son solamente eso, por lo que no hay una explícita representación hidráulica detallada entre las secciones utilizadas (Bates y de Roo, 2000).

2.4 Modelos hidrodinámicos en dos dimensiones (2D)

Dado que la aplicación de modelos hidrodinámicos unidimensionales está basada en la determinación de niveles de aguas horizontales (ej. constantes) lo largo de la sección transversal, es muy probable que no se les pueda utilizaren situaciones donde las condiciones de flujo son más complejas. Este puede ser el caso tanto de un desbordamiento de un río (Hesselink et al. 2003), como el de un flujo sobre una planicie o humedal con baja pendiente en el terreno (Aronica et al., 1999). A pesar de que es posible emplear modelos 1D representando una red de canales intercomunicados (ej. Doull y Bright, 1996), la dirección del flujo en cualquier punto del dominio estará restringida por la delineación de dichos canales, proporcionando resultados no satisfactorios en donde la dirección del flujo pueda cambiar significativamente, dependiendo de la condición de forzamiento (ej. Beffa y Connell, 2001). En estas condiciones, se requiere como mínimo, el empleo de un modelo hidrodinámico bidimensional (2D).

Este tipo de modelos fueron primeramente desarrollados y aplicados a estuarios y para el modelado de flujos costeros (Li y Falconer, 1995). Bates et al. (1996) enumeraron una lista de requisitos que un modelo bidimensional deberá cubrir para ser utilizado en la descripción de flujos de inundación en llanuras, estos son:

- El campo de flujo debe ser representado en al menos 2 dimensiones de tal suerte que se representen procesos dinámicos conocidos.
- Se debe utilizar un algoritmo numérico eficiente que haga tratable el problema desde el punto de vista computacional.
- El modelo deberá representar la topografía del terreno y la forma arbitraria de los ríos en la planicie (ej. meandros).
- El esquema numérico deberá ser capaz de manejar fronteras movibles en la planicie de inundación, asociadas con el mojado y secado de elementos.

La aplicación de modelos hidrodinámicos en dos dimensiones (2D) para la evaluación del comportamiento del flujo en llanuras de inundación, es hoy por hoy un tópico que ha sido abordado con mucha frecuencia por la comunidad científica internacional. En las últimas dos décadas, se han documentado diversas investigaciones abocadas al flujos extremos (ej. inundación) en ambientes rurales y urbanos (ej. Gee et al., 1990; Bates et al., 1998; Horrit, 2000; Nicholas y Mitchell, 2003; Romanowicz y Beven, 2003; Neelz et al. 2006; Patro et al., 2009).

En consecuencia, se han desarrollado una gran cantidad de códigos que satisfacen los requerimientos por Bates et al. (1996). Estos resuelven las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones, las cuales sin considerar la fricción de viento, se pueden escribir como:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} = 0$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} = 0$$

(2.2)

Los códigos difieren en el método numérico utilizado para resolver estas ecuaciones y en la discretización empleada para la topografía. Existen tres principios fundamentales: (i) mallas estructuradas o regulares; (ii) mallas no estructuradas; y (iii) mallas curvilíneas. De las cuales, la primera y la segunda representan las más utilizadas para el modelado numérico de inundación en llanuras.

Cuando se utilizan este tipo de modelos, se debe tener cuidado en el balance que representa el costo computacional de la solución del problema y la escala espacio-temporal que se desea resolver.

La creciente disponibilidad de datos de elevación a una resolución adecuada, por ejemplo, altimetría laser o de radar, ha provocado que la aplicación de este tipo de códigos, sea práctica común alrededor del mundo. Desafortunadamente, todavía hay escasez de datos batimétricos para determinar, con la misma precisión, la batimetría de los cauces principales de los ríos, por lo que existe el requerimiento de campañas de campo para obtener datos de precisión adecuada. Esto se debe a que el cauce principal es el forzador dominante y de no contar con una batimetría adecuada en este tipo de modelos, es posible que se añada una incertidumbre adicional a pesar de contar con datos de elevación confiables.

A pesar de la limitación mencionada respecto a la información disponible, es claro que la más completa representación de flujos hidrodinámicos complejos sobre planicies o llanuras de inundación, está dada por los modelos bidimensionales.

2.5 Factores a considerar en el desempeño de un modelo hidrodinámico

Sorooshian y Gupta (1998) notaron que la confiabilidad de los resultados de cualquier modelo hidrodinámico está limitada por las hipótesis, datos de entrada y parámetros utilizados durante su ejecución. Esto conlleva a dos dificultades, la primera de ellas concierne a la selección de la estructura del modelo y la segunda, a la estimación de los parámetros asociados, de tal suerte que el modelo reproduzca el comportamiento del sistema en estudio (Sorooshian y Gupta 1995). El proceso por el cual se seleccionan parámetros adecuados para el modelo y se comparan los resultados con datos independientes (idealmente provenientes de campo) a fin de demostrar su capacidad para describir el sistema, es conocido como calibración y validación.

Investigaciones recientes han demostrado que a pesar del considerable mejoramiento en los recursos computacionales disponibles, la calibración de los modelos numéricos usados de forma cotidiana en la ingeniería hidráulica es un proceso complicado (Sorooshian y Gupta, 1983). La mayoría de los modelos

hidráulicos y notablemente aquellos clasificados como de procesos y conceptuales, contienen alguna descripción de los flujos dinámicos que se consideran más importantes, ya sea a través del uso de ecuaciones con sustento físico (ej. continuidad y momento) o por medio del empleo de relaciones empíricas entre datos de entrada y salida. Evidentemente, entre más procesos son incorporados en la descripción de un sistema, se mejora la capacidad del modelo para reproducir su respuesta real. Sin embargo, cada una de las funciones utilizadas para describir un proceso físico requerirá de proceso de calibración, para lo que se requiere contar con datos de campo que permitan identificar los valores adecuados para caracterizar al sistema. El problema estriba en que es muy común que no se cuente con los datos necesarios para caracterizar todos los procesos de forma individual, lo que introduce cierta incertidumbre en los resultados numéricos. La selección de un modelo sobre otro, depende de la escala espacial del problema a resolver, los recursos computacionales disponibles y las necesidades de cada usuario. Sin embargo, cabe resaltar que un modelo puede ser considerado tan bueno como los datos utilizados para la definición de parámetros, su calibración y validación. La información necesaria para la correcta aplicación de un modelo hidráulico se centra en 4 categorías: (1) Condiciones de frontera; (2) Condiciones iniciales; (3) Datos topográficos; (4) Datos de fricción o rugosidad del terreno; (5) Datos hidráulicos (ej. descargas, niveles en los ríos, etc.).

2.5.1 Condiciones de frontera

La definición de cada condición de frontera depende de cada modelo y generalmente están asociadas a las condiciones que determinan el comportamiento físico de un sistema. Por ejemplo, el caudal de un río, el tránsito de un hidrograma, o la serie de tiempo del nivel medio del mar en una desembocadura. Estos datos, son generalmente determinados a partir de mediciones en campo y permiten que el modelo numérico esté limitado por condiciones de flujo asociadas a la realidad del sistema.

2.5.2 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales que se requieren para modelo hidráulico, son diferentes para cada modelo utilizado y se utilizan para otorgar un valor a las variables en todos los nodos de cómputo para el tiempo $t=0$. En la práctica, es imposible conocer las condiciones iniciales en todo el sistema que se va a modelar, por lo que se requiere hacer ciertas suposiciones adicionales. Para simulaciones en estado estacionario (ej. flujo uniforme), la simulación se inicia considerando los primeros pasos de simulación como un periodo de calentamiento, considerando los resultados válidos una vez que la solución muestra cierto equilibrio con las condiciones de frontera que se han especificado.

2.5.3 Datos topográficos

La topografía o elevación del terreno es considerada como el dato clave para el modelado de flujos de inundación. Las pendientes naturales del terreno determinan la ruta del flujo, por lo que se necesitan datos de gran precisión y resolución espacial. Tradicionalmente, los modelos hidrodinámicos se ponían a punto con secciones transversales de los ríos tomadas con un espaciamiento de entre 100m y 1000m. Este tipo de información tiene una precisión de milímetros y puede ser considerada en modelos hidrodinámicos 1D. Por otra parte, los datos provenientes de levantamientos topográficos son costosos y tampoco proveen información con una resolución espacial adecuada. En consecuencia, la ingeniería ha visto un aumento considerable en el uso de herramientas de percepción remota.

Existen tres alternativas que han mostrado un potencial razonable para adquirir datos útiles en el modelado hidrodinámico de inundaciones. La estereofotogrametría (Baltasvias, 1999; Lane, 2000; Westaway et al., 2003), la altimetría láser o LIDAR (Krabill et al. 1984; Gomes-Pereira y Wicherson, 1999)

y la interferometría de radares de apertura sintética (Hodgson et al., 2003). Dentro de estas tres opciones, desde el punto de vista económico se destaca la tercera de ellas por la disponibilidad gratuita de los datos provenientes de la Misión Topográfica de Radar (SRTM, por sus siglas en inglés, Rabus et al. 2003).

2.5.4 Datos de resistencia hidráulica

La resistencia hidráulica es un parámetro que representa la suma de una variedad de efectos: la fricción, el arrastre, y el impacto de la aceleración/desaceleración del flujo. Estos se combinan para determinar un coeficiente de arrastre general C_d , que en hidráulica se expresa en términos de los coeficientes de resistencia al flujo como la n de Manning y la C de Chezy, los cuales se determinan a partir de la teoría de flujos uniformes. Esto implica la hipótesis de que la tasa de disipación de energía para flujos no uniformes es igual que la que se presenta para flujos uniformes con la misma pendiente en la superficie libre. Los efectos precisos representados por el coeficiente de fricción para un modelo en particular dependen de su dimensión, ya que la parametrización compensa las pérdidas de energía debidas a procesos no representados en el modelo. Por lo tanto, la buena o mala representación del arrastre en el modelo numérico depende de la discretización seleccionada para representar las secciones transversales del río y sus meandros. Por ejemplo, una discretización con una alta resolución espacial (Δx pequeño), representará de forma explícita una mayor proporción del arrastre en el sistema que una baja resolución (Δx grande) para el mismo modelo.

Sin embargo, existen algunos componentes de la resistencia hidráulica que son más fáciles de abordar. Por ejemplo, la fricción es un parámetro que para el flujo en ríos y canales principales está determinado en función del tamaño medio de grano d_{50} (ej. Hey, 1979). De igual forma, en llanuras de inundación donde dominan los procesos de flujo más que de almacenamiento, se debe determinar un coeficiente de arrastre debido a la vegetación presente en la zona. Sin embargo, la determinación de este coeficiente es bastante complicada dado que las pérdidas de fricción se generan como resultado de la interacción entre las propiedades biofísicas de las plantas y el flujo (Kowen, 1988).

La determinación en campo de este tipo de parámetros en campo es, al igual que la topografía, muy complicada y consume bastantes recursos económicos y tiempo. Por lo que en años recientes, se han empezado a desarrollar técnicas de percepción remota para su definición. Ejemplos de este tipo técnicas están representados por la fotogrametría (Butler et al., 2001) y análisis detallado de información de LIDAR (Mason et al. 2003).

2.5.5 Calibración, validación e incertidumbre

En todos los casos de modelación de flujos sobre llanuras de inundación, se requiere algún tipo de calibración de la herramienta numérica, a fin de que esta reproduzca las condiciones reales en un sistema. Este proceso consiste en identificar valores adecuados para los parámetros y condiciones de frontera (asociados a la realidad), que determinan el comportamiento del modelo numérico. Lo ideal, sin duda es determinar los valores de dichos parámetros (ej. gastos, rugosidades, variaciones en el nivel medio) por medio de campañas de campo intensas (ej. Pedrozo-Acuña et al., 2009).

Sin embargo, en la mayoría de los casos este proceso de calibración se realiza a través de un ciclo de iteraciones sobre valores estimados hasta aproximar el evento que se desea reproducir. Los valores definidos a través de este último proceso, no tienen ninguna interpretación física y deben ser tomados como valores efectivos desde el punto de vista numérico, el cual posee una serie de errores inherentes que añaden cierta duda o incertidumbre a los resultados numéricos. Principalmente, los errores se relacionan a la falta de datos de campo, la representación topográfica del sistema y los gastos en las condiciones de frontera.