

José Luis Ayuso Muñoz • Óscar Castro Orgaz

Hidrología de superficie. Operación de ríos y embalses en cuencas hidrográficas



AULAMAGNA
PROYECTO CLAVE

Hidrología de superficie. Operación de ríos y embalses en cuencas hidrográficas

Primera edición: 2021

ISBN: 9788418392665

ISBN eBook: 9788418392108

Depósito Legal: SE 789-2021

© del texto:

José Luis Ayuso Muñoz

Óscar Castro Orgaz

© de esta edición:

Editorial Aula Magna, 2020. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.

editorialaulamagna.com

info@editorialaulamagna.com

Impreso en España – Printed in Spain

Quedan prohibidos, dentro de los límites establecidos en la ley y bajo los apercibimientos legalmente previstos, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, ya sea electrónico o mecánico, el tratamiento informático, el alquiler o cualquier otra forma de cesión de la obra sin la autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. Diríjase a info@editorialaulamagna.com si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

A María Luisa†, Patricia y José Luis jr.

A la pandilla de tres y su mamá

Índice

Prefacio	11
1. Introducción	15
2. Métodos hidrológicos e hidráulicos en operación de ríos y embalses.....	17
3. Modelado hidrológico.....	19
1. Sistema hidrológico general.....	19
2. Almacenamiento-descarga en una celda del sistema	22
3. Almacenamiento y transmisión del flujo	24
4. Embalses.....	25
4.1. Método de la superficie libre horizontal	25
4.2. Sistema hidráulico en presas: Aliviaderos, compuertas y desagües	29
4.3. Método de Puls modificado o de interpolación	38
4.4. Método implícito de Newton-Raphson.....	45
4.5. Método de Euler	47
4.6. Método de Runge-Kutta de cuarto orden.....	50
4.7. Estudio comparativo de métodos de solución	55
4.8. Gestión de embalses en situación de avenida: Método de evaluación volumétrica para abertura automática de compuertas.....	57
4.9. Caso práctico: Circulación de flujos en la presa de Aldeadávila.....	64
5. Circulación de flujos a través de canales abiertos	72
5.1. Método de Muskingum.....	73
5.2. Método de Muskingum no lineal	80
6. Cuencas hidrográficas	81
6.1. La cuenca como sistema lineal y el método del HU.....	81
6.2. Modelado de cuencas mediante cascadas de embalses lineales en serie	91
4. Modelado hidráulico.....	107
1. Onda dinámica	107
1.1. Ecuaciones básicas.....	107
1.2. Ondas de peso.....	114

2. Clasificación y ámbito de aplicación de los modelos distribuidos.	117
2.1. Relación caudal-calado en una sección.	118
3. Onda cinemática	121
4. Onda difusiva	127
5. Método de Muskingum-Cunge	129
6. Caso práctico: Desarrollo de un modelo computacional distribuido.	133
7. Solución de la onda dinámica mediante un esquema en volúmenes finitos.	147
7.1 Ecuación conservativa.	147
7.2. Reconstrucción espacial de la solución.	150
7.3. Método de Hancock.	152
7.4. Flujo numérico	153
7.5. Términos fuente	154
7.6. Determinación de Δt para tener una solución estable	155
7.7. Condiciones iniciales y de borde	155
7.8 Secuencia de cálculo.	156
7.9 Movimiento de una onda de avenida.	156
7.10. Simulación de las maniobras de una compuerta en un canal real.	158
7.11. Análisis de las limitaciones del modelo de Muskingun-Cunge	159
7.12. Método de las características.	160
Referencias	169
Anexo I. Colección de programas en Fortran para modelado hidrológico- hidráulico de presas, canales y cuencas	173
Anexo II. Datos para ejecutar los programas en los ejemplos del texto	207
Ejemplo 3	207
Ejemplo 4	210
Ejemplo 5	211
Ejemplo 6	212
Ejemplo 8	216
Sobre los autores	221

Prefacio

Las técnicas hidrológico-hidráulicas, usadas en operación de ríos y embalses, son habitualmente descritas de forma muy somera en textos generales de hidrología e hidráulica, presentándose solo los métodos básicos, muchas veces, sin demostración, sin explicar otros métodos más adecuados/avanzados, compararlos entre ellos o verificar la calidad y realismo de las soluciones usando datos experimentales. En este texto se describen en profundidad todas estas técnicas, justificándose el porqué de las mismas desde el punto de vista físico y numérico, a la vez que se proporcionan una gran cantidad de ejemplos resueltos en el texto, de gran ayuda a alumnos y profesionales, donde, además, se verifican los procedimientos con datos experimentales. Dichos ejemplos se pueden resolver también con una colección de programas escritos en FORTRAN. La profundidad en la exposición de los métodos, así como la consideración de diversas herramientas numéricas, datos experimentales y una biblioteca de programas explicados en detalle, paso por paso, hacen que el texto sea práctico y funcional. Este hecho es aún más relevante si consideramos que el material más avanzado suele estar disponible solo en inglés, no existiendo en español textos que traten esta temática con el detalle y profundidad con que se presenta en esta publicación.

En el texto, tras una introducción a la materia, se procede a descripción de las técnicas hidrológicas e hidráulicas usadas para la operación de ríos y embalses en cuencas hidrográficas, con énfasis en el tránsito de ondas de avenida por los diversos elementos del sistema.

El primer elemento del modelado hidrológico son los embalses, describiéndose primero desde el punto de vista físico el proceso de laminación de una onda de avenida. Tras esto, se entra a presentar en detalle los órganos hidráulicos de una presa: primeramente, el perfil hidráulico de aliviaderos y sus características de desagüe, para pasar a tratar las compuertas comúnmente utilizadas en los mismos y sus curvas de operación, así como los desagües profundos. La laminación de avenidas se considera tanto con vertido a labio fijo como regulada con compuertas. Para el tránsito se presenta la técnica habitual, el método de Puls, así como otras más avanzadas y adecuadas para su implementación real en la práctica, realizándose una comparativa entre todas ellas. Para el caso de presas con aliviaderos controlados se describe el algoritmo de control volumétrico, el cual se usa para la gestión del embalse en situación de avenida, de forma automática en tiempo real. La sección de presas finaliza con

un caso práctico real, en el que se detalla la circulación de flujos en la presa del Salto de Aldeadávila, en el río Duero.

Tras las presas y embalses se describe la circulación hidrológica en canales, presentando el método de Muskingum y su versión no lineal. Se explica en detalle tanto la calibración del modelo en cuencas hidrográficas aforadas como su uso en cuencas no aforadas.

La circulación hidrológica en cuencas hidrográficas comienza con la descripción de la cuenca en el contexto de la teoría de sistemas lineales, pasando a introducirse los conceptos de hidrograma unitario instantáneo e hidrograma unitario, mediante las relaciones de convolución correspondientes para la transformación lluvia-escorrentía. Se describe el modelado de la cuenca mediante el hidrograma de Nash, su calibración y uso, para obtener el hidrograma unitario para cualquier duración de lluvia en cuencas aforadas.

El modelado hidráulico comienza mediante el establecimiento de las ecuaciones de la onda dinámica en un volumen de control del río, tras lo cual se describen los distintos tipos de movimiento en cauces y el ámbito de aplicación de diversas aproximaciones usadas en ingeniería fluvial, como son la onda cinemática y la onda difusiva. La onda cinemática se describe de forma analítica, y se aplica al establecimiento del tiempo de viaje en elementos de drenaje lineal en la cuenca, como las cunetas, colectores y arroyos. Seguidamente, se presenta la onda difusiva no-lineal, y se muestra el proceso mediante el cual una onda se propaga y atenúa en un cauce según las características hidráulicas y morfológicas del mismo. Tras esto, se presenta el esquema numérico en diferencias finitas para la onda cinemática debido a Cunge, y se demuestra analíticamente su comportamiento según el factor de ponderación usado en la malla espacio-tiempo. Se discuten las características cinemáticas de base y su analogía con un modelo de convección-difusión de orden dos, si la ponderación en la malla espacio-tiempo se realiza usando una analogía entre la ecuación modelada por el esquema y la onda difusiva. La importancia del modelado distribuido en la práctica profesional se enfatiza mediante un caso práctico en el que se detallan, paso a paso, las etapas y procedimientos para implementar un modelo computacional distribuido en ordenador, usando como ejemplo el de Muskingum-Cunge, con aplicación a un río real aforado. Finalmente, las ecuaciones de onda dinámica son resueltas mediante técnicas modernas, basadas en el método de los volúmenes finitos.

Cada uno de los métodos descritos en el libro se ilustra con un ejemplo resuelto y con la aplicación de una colección de programas escritos en FORTRAN, los cuales se proporcionan en un apéndice del libro. Los programas están extensamente comentados en su interior usando la teoría que se explica en el texto. El texto, además, incluye numerosas simulaciones, comparativas de soluciones numéricas usando distintas técnicas, y con datos experimentales en modelo físico. La importancia del texto en la práctica profesional se ilustra mediante dos casos prácticos, el análisis de un embalse real y la construcción, paso a paso, de un modelo computacional hidráulico.

El material de base usado para preparar este libro se ha desarrollado en la Universidad de Córdoba durante los últimos 20 años y es usado para la docencia por los autores en cursos de grado y másteres, específicamente, en el *Máster interuniversitario de Hidráulica Ambiental* de las universidades de Granada, Córdoba y Málaga (<https://masteres.ugr.es/hidraulicaambiental/>), dentro del cual se desarrolla en la Universidad de Córdoba la especialidad de **Gestión Integral de Cuencas**.

Una gran cantidad de ingenieros a lo largo de los años se han formado en hidrología de superficie con este material docente, el cual deseamos poner a disposición de toda la comunidad académica. Nuestro cariño y agradecimiento al profesor Juan Vivente Giráldez Cervera, maestro e impulsor de la Hidrología en la Universidad de Córdoba.

José Luis Ayuso Muñoz y Óscar Castro Orgaz
Universidad de Córdoba

Introducción

La determinación de los caudales en las corrientes superficiales es el objetivo central de la Hidrología Superficial. La precipitación que llega a encauzarse como flujo en una corriente, entra a la misma como flujo superficial y/o subsuperficial, proceso conocido como escorrentía directa (o respuesta inmediata de la cuenca a un episodio de lluvia) que es la precipitación efectiva o exceso de lluvia que, tras fluir como flujo superficial en laderas, primero, y a través de canales de corriente y embalses, después, da lugar al hidrograma de salida de la cuenca. En el presente texto se analiza y estudia la hidráulica e hidrología de la circulación del flujo sobre el terreno, a lo largo de cauces y canales y a través de embalses.

En Hidrología, se conoce por **Circulación o propagación de flujos** al procedimiento mediante el cual se determina el avance progresivo (predicción de las variaciones en el tiempo y en el espacio) de una onda de flujo a lo largo de un tramo de canal o embalse, o se predice el hidrograma de salida de una cuenca, originado por una precipitación conocida (Eagleson, 1970; Bedient y Hubert, 1988; Ayuso, 1990; Bras, 1990; Brutsaert, 2005).

En sentido amplio, la circulación de flujos puede considerarse como el análisis para describir el flujo a través de un sistema hidrológico (cuenca, cauce o embalse) conocida la entrada al sistema (Figuras 1 y 2).

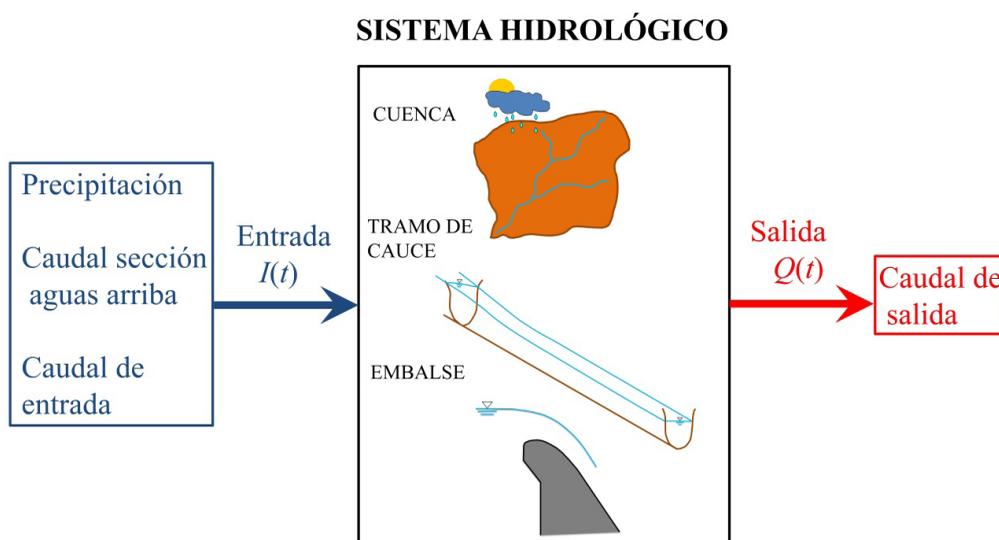


Figura 1 Representación esquemática del funcionamiento del sistema hidrológico

Mediante este procedimiento se puede determinar, por ejemplo, el tiempo y magnitud del flujo (es decir, el hidrograma) en un punto de un curso de agua, represado o no, a partir de hidrogramas conocidos o supuestos en uno o más puntos aguas arriba. Todos los proyectos de sistemas de recursos hidráulicos, como previsión de avenidas, diseño de embalses, aliviaderos de pequeñas y grandes presas, y simulación de cuencas, utilizan dicho procedimiento.

Las técnicas o métodos de circulación de flujos a través de canales, embalses y cuencas se presentan, seguidamente, en secciones separadas, estableciendo los fundamentos teóricos en los que se basan y las aplicaciones prácticas de los mismos. En algunos casos, se especifican los programas, en FORTRAN, de los modelos matemáticos.

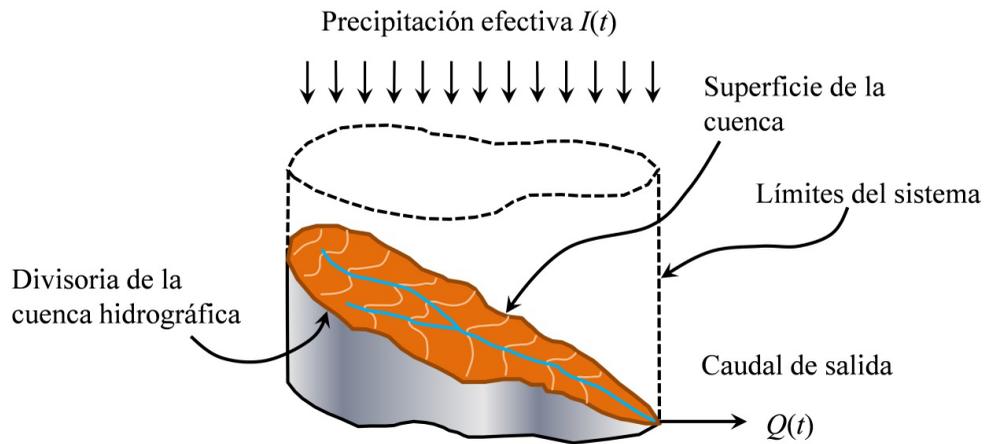


Figura 2 La cuenca como sistema hidrológico

Métodos hidrológicos e hidráulicos en operación de ríos y embalses

Los métodos de circulación de flujos se clasifican tanto desde el enfoque tradicional como desde el análisis de sistemas, en dos categorías (Raudkivi, 1979; Chow *et al.*, 1988; Brutsaer, 2005):

- **Circulación hidrológica de flujos**, también conocida como **Circulación de flujos a través de sistemas globales**.
- **Circulación hidráulica de flujos**, también llamada **Circulación de flujos a través de sistemas distribuidos**.

Las técnicas de circulación hidrológica emplean la ecuación de continuidad junto a una relación, analítica o empírica, entre el almacenamiento y la descarga dentro del sistema, mientras que las de circulación hidráulica utilizan la ecuación de continuidad y la ecuación de la cantidad de movimiento, conocidas como ecuaciones de Saint Venant (Cunge *et al.*, 1980; Castro-Orgaz y Hager, 2019).

Desde la perspectiva de la teoría de sistemas, la diferencia entre la circulación de flujos a través de sistemas globales y sistemas distribuidos, estriba en que en un **modelo de sistema global**, el flujo se calcula, únicamente, como función del tiempo en una localización particular (extremo aguas abajo de un canal, salida de un embalse o cuenca), mientras que en un **modelo de sistema distribuido**, el flujo se calcula como una función del tiempo y del espacio, a través del sistema (en sucesivos puntos a lo largo de un canal, embalse o cuenca).

Modelado hidrológico

1. Sistema hidrológico general

El volumen de agua almacenada en un sistema hidrológico S puede relacionarse a los caudales de entrada I , y de salida Q , mediante la ecuación de continuidad (Raudkivi, 1979; Chow *et al.*, 1988; Brutsaer, 2005):

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \quad (1)$$

Si el sistema hidrológico es un depósito, tal como el de la Figura 3, en el que S varía (aumenta y/o disminuye) con el tiempo en respuesta a I y Q y a sus variaciones con respecto al tiempo dI/dt , $d^2I/dt^2, \dots$, dQ/dt , $d^2Q/dt^2, \dots$, el almacenamiento, en cualquier instante, puede expresarse por una **función de almacenamiento** (Chow *et al.*, 1988) como

$$S = f\left(I, \frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, \dots, Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \dots\right) \quad (2)$$

la cual estará determinada por la naturaleza del sistema hidrológico que se tratae.

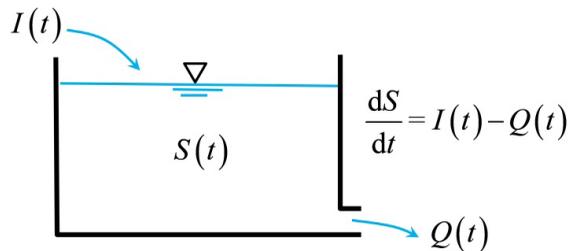


Figura 3 Ecuación de continuidad en un sistema hidrológico

La función de almacenamiento (2) puede expresarse por la ecuación diferencial lineal

$$S = A_0 I + A_1 \frac{dI}{dt} + A_2 \frac{d^2 I}{dt^2} + \dots + A_n \frac{d^n I}{dt^n} + B_0 Q + B_1 \frac{dQ}{dt} + B_2 \frac{d^2 Q}{dt^2} + \dots + B_n \frac{d^n Q}{dt^n} \quad (2a)$$

Si los términos de la ecuación (2a) fuesen productos de I y sus derivadas y Q y sus derivadas o potencias distintas de las de primer grado, el sistema descrito por esta función podría

ser no lineal. Los coeficientes A_0 a A_n , y B_0 a B_n de la ecuación (2a) pueden ser constantes, en cuyo caso el sistema lineal se dice que es **invariable en el tiempo** o algunos de los coeficientes pueden ser dependientes del tiempo, en cuyo caso el sistema lineal se dice que es **variable en el tiempo** (O'Donnell, 1986).

Considérese el embalse representado en la figura 3, en el que el almacenamiento S está relacionado al caudal de salida Q mediante la relación general:

$$S = KQ^n \quad (3)$$

La ecuación de continuidad (1) puede expresarse como:

$$\frac{dS}{dt} + Q = I \quad (3a)$$

Para el caso particular de $n = 1$ y K constante, la ecuación (3) da

$$\frac{dS}{dt} = K \frac{dQ}{dt} \quad (3b)$$

que sustituida en la expresión (3a) da

$$K \frac{dQ}{dt} + Q = I \quad (4)$$

que es una ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes, de modo que, para $n = 1$ y K constante, el embalse es un **sistema lineal invariable** en el tiempo, cuyo comportamiento es descrito por la ecuación (4).

Si $n = 1$ y K es una función del tiempo $K(t)$, entonces se tendrá como valor de dS/dt

$$\frac{dS}{dt} = K(t) \frac{dQ}{dt} + Q \frac{dK(t)}{dt}$$

que sustituido en la ecuación de continuidad (1) da

$$K(t) \frac{dQ}{dt} + \left[1 + \frac{dK(t)}{dt} \right] Q = I \quad (5)$$

que sigue siendo una ecuación diferencial lineal, pero que tiene un coeficiente variable con el tiempo, por lo que el embalse, en este caso, es un **sistema lineal variable en el tiempo**, cuyo comportamiento es descrito por la ecuación (5).

Finalmente, si $n \neq 1$ y K es constante, se tendrá al derivar la expresión (3) que

$$\frac{dS}{dt} = KnQ^{n-1} \frac{dQ}{dt}$$

valor que sustituido en la ecuación de continuidad da

$$KnQ^{n-1} \frac{dQ}{dt} + Q = I \quad (6)$$

que es una ecuación diferencial no lineal. Por consiguiente, para $n \neq 1$, cualquiera que sea K , el embalse es un **sistema no lineal**.

El modelo de embalse lineal es usado en la modelación de cuencas para el desarrollo del Hidrograma Unitario (§3.6.1).

La solución simultánea de las ecuaciones generales (1) y (2), de continuidad y almacenamiento, permite calcular el caudal de salida Q , conocido el de entrada I , siendo I y Q funciones del tiempo. La solución puede realizarse por dos procedimientos:

1. Diferenciando la función de almacenamiento (2) y sustituyendo el resultado de dS/dt en la ecuación (1), para resolver posteriormente la ecuación diferencial resultante por integración, obteniendo $Q(t)$ como una función de $I(t)$.
2. Aplicando los métodos de diferencias finitas, directamente, a las ecuaciones (1) y (2), para resolverlas, recursivamente, en puntos discretos a lo largo del tiempo.

Este será el método que se aplicará en la circulación de flujos a través de sistemas globales o circulación hidrológica de flujos. Para ello, se divide el tiempo en intervalos finitos y se resuelve la ecuación de continuidad (1) recursivamente, desde un instante de tiempo al siguiente, usando la función de almacenamiento (2) para responder del valor del mismo en cada instante de tiempo.

Ejemplo 1 Sea el caso de un embalse lineal como el representado en la figura 3, en el que el almacenamiento S está relacionado con el caudal de salida Q por la relación $S = KQ$. Obtener el caudal de salida Q por resolución de las ecuaciones (1) y (2) mediante el primer procedimiento establecido anteriormente.

Solución. Diferenciando la función de almacenamiento $S=KQ$ y sustituyendo el valor de dS/dt en la ecuación de continuidad (1), se obtiene la expresión

$$I - Q = K \frac{dQ}{dt} \quad (7)$$

que describe un sistema global, ya que contiene únicamente la derivada con respecto al tiempo. Integrando con la condición $Q = 0$ para $t = 0$, se obtiene

$$\int_{t=0}^t dt = K \int_0^Q \frac{dQ}{I - Q}$$

resultando

$$t = -K \left[\ln(I - Q) \right]_0^Q = -K \ln \frac{I - Q}{I}$$

de donde

$$-\frac{t}{K} = \ln\left(\frac{I-Q}{I}\right)$$

la cual, al tomar antilogaritmos, da

$$e^{-t/K} = \frac{I-Q}{I}$$

llegándose finalmente a la expresión

$$Q = I(1 - e^{-t/K}) \quad (8)$$

que da la relación entre el caudal de salida Q y el de entrada I . Se deduce que para un tiempo $t \rightarrow \infty$

$$Q_{t \rightarrow \infty} = I \left(1 - \frac{1}{e^{t/K}}\right) \rightarrow I \quad (9)$$

Es decir, se llega a un estado de equilibrio en el que se igualan los caudales de entrada y salida.

2. Almacenamiento-descarga en una celda del sistema

La forma específica de la función de almacenamiento dependerá de la naturaleza del sistema que se trate. Se estudiarán tres sistemas:

1. Circulación a través de embalses por el método de la superficie libre horizontal, en el que el almacenamiento S es una función no lineal de Q solamente

$$S = f(Q) \quad (10)$$

y la función $f(Q)$ se determina relacionando el almacenamiento S y el caudal de salida Q , a la cota z de la superficie libre en el embalse.

2. Circulación a través de canales por el método de Muskingum, en el que el almacenamiento S está linealmente relacionado a I y Q .
3. Circulación a través de cuencas, mediante la utilización de modelos conceptuales de cuenca, que pretenden predecir el hidrograma resultante como respuesta a la lluvia, en los que el almacenamiento S es una función lineal de Q y sus derivadas respecto al tiempo.

La relación entre el almacenamiento y el caudal de salida de un sistema hidrológico tiene gran influencia en la circulación del flujo. Esta relación puede ser **invariable** o **variable**, como se indica en la Figura 4. Una relación invariable tiene la forma de la ecuación (10) y se aplica a embalses con la superficie libre horizontal. Tales embalses tienen un vaso ancho y profundo, siendo muy pequeña la velocidad del flujo en los mismos.

La relación de almacenamiento invariable requiere que el caudal de salida del embalse, para una cota dada de la superficie libre de la lámina de agua, sea fijo, es decir, existe una relación biunívoca entre almacenamiento y descarga, lo que implica que las estructuras hi-