

CAPÍTULO I:
ASPECTOS GENERALES

1.1.INTRODUCCIÓN

Los métodos de cálculo de laminación son muy importantes para el diseño de una presa, está relacionada con la regulación de aguas en un embalse que determinaría su altura óptima. En función de esta regulación y la topografía se calcularía la laminación determinando las dimensiones del vertedero.

La laminación es también llamada propagación de caudales.

Se denomina propagación de caudales al procedimiento a través del cual se puede determinar el hidrograma del caudal en un punto de un curso de agua utilizando hidrógramas conocidos en uno o más puntos aguas arriba. Dicho procedimiento puede aplicarse a sistemas agregados o distribuidos. Cuando se aplica a sistemas agregados, el flujo se calcula como una función del tiempo en un lugar en particular, lo que también se conoce como propagación hidrológica. Cuando se aplica a sistemas distribuidos, el flujo se calcula como una función del espacio y del tiempo a través del sistema, lo que se conoce también como propagación hidráulica.

1.2.ANTECEDENTES

El diseño del vertedero está limitado a un sólo método laminación para dimensionar el vertedero y ese método es el método de la Curva Masa – diagrama de Rippl para demandas constantes.

El vertedero de la Presa El Molino fue diseñado con un solo método de laminación por lo que se obtuvo por realizar otros métodos de cálculo de métodos de laminación.

El diseño del vertedero está limitado a un solo método de laminación para dimensionar el vertedero y ese método es el método de la Curva Masa – diagrama de Rippl para demandas constantes.

a) Características de la Presa El Molino

El embalse tendrá dos tomas para alimentar sendos canales principales en cada margen del río Tomayapo.

El canal de margen derecha, regará parte de las pampas de Iscayachi y se extenderá hasta las nacientes de la cuenca del río Paichu conduciendo el agua por gravedad, para luego largar el agua al río. Esto es posible gracias a que el lecho del río Paichu es roca recubierta por aluvión de pequeño espesor y a que ya existe una extensa red de canales secundarios y terciarios construidos y en funcionamiento.

El canal de margen izquierda, regará parte de las pampas de Iscayachi y conducirá el agua hasta la altura de El Molino, para luego ingresar en una cámara de carga que conducirá el agua a presión hasta la localidad de Obispo.

b) Dimensiones, caudales y periodo de retorno de diseño de la presa

El cierre de la pantalla de la presa El Molino tiene una longitud de 375.75 m. su altura máxima es de 14.00 m. desde el lecho natural del río, se realizará una excavación aproximadamente de 6 – 8. m hasta llegar a la roca, a continuación se muestra una fotografía del emplazamiento de la presa.

FOTOGRAFÍA N°1.1. EJE DE LA PRESA



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo VI: Geología y Geotécnia.

Su vertedero de excedencias tiene una longitud de 62.20 m. constituida de 2 estrivos y una pila.

No existen registros de caudales en el sitio de presa y tampoco existen series de caudales representativas de ríos próximos y cuencas similares a la de estudio. Por tanto, para definir la disponibilidad de agua se requiere realizar estimaciones a partir de la transformación lluvia – caudal con modelación matemática.

Los datos disponibles para elaborar el modelo de disponibilidad de agua, provienen de las estaciones Campanario, El Molino y Sama – Iscayachi operadas por el SENAMHI. Las estaciones se encuentran próximas a la cuenca de aporte pero ninguna de ellas se encuentra dentro de la cuenca.

Debido a que no existen registros de caudales de crecida en el río Tomayapo, para definir los hidrogramas de crecida se utilizaron los métodos de Snyder y del Soil Conservation Service.

En el capítulo de caracterización de la cuenca vertiente, se presenta los principales parámetros que caracterizan la cuenca de aporte. Los tiempos de concentración para la cuenca de aporte y el valor promedio de los diferentes métodos aplicados resulta ser 1.78 horas.

Con estos datos se estimaron los parámetros fundamentales que definen los hidrogramas unitarios para diferentes recurrencias, como se muestra en los cuadros No. 1.1

Los caudales máximos determinados en estas condiciones para diferentes recurrencias y por cada método son:

CUADRO N°1.1 ESTIMACIÓN DE CRECIDAS

Recurrencia (Años)	Snyder (m ³ /s)	SCS (m ³ /s)	Caudal Promedio (m ³ /s)
100	248,41	286,79	268.00.
500	312,87	361,21	337.00
1000	340,87	393,54	367.00

Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología

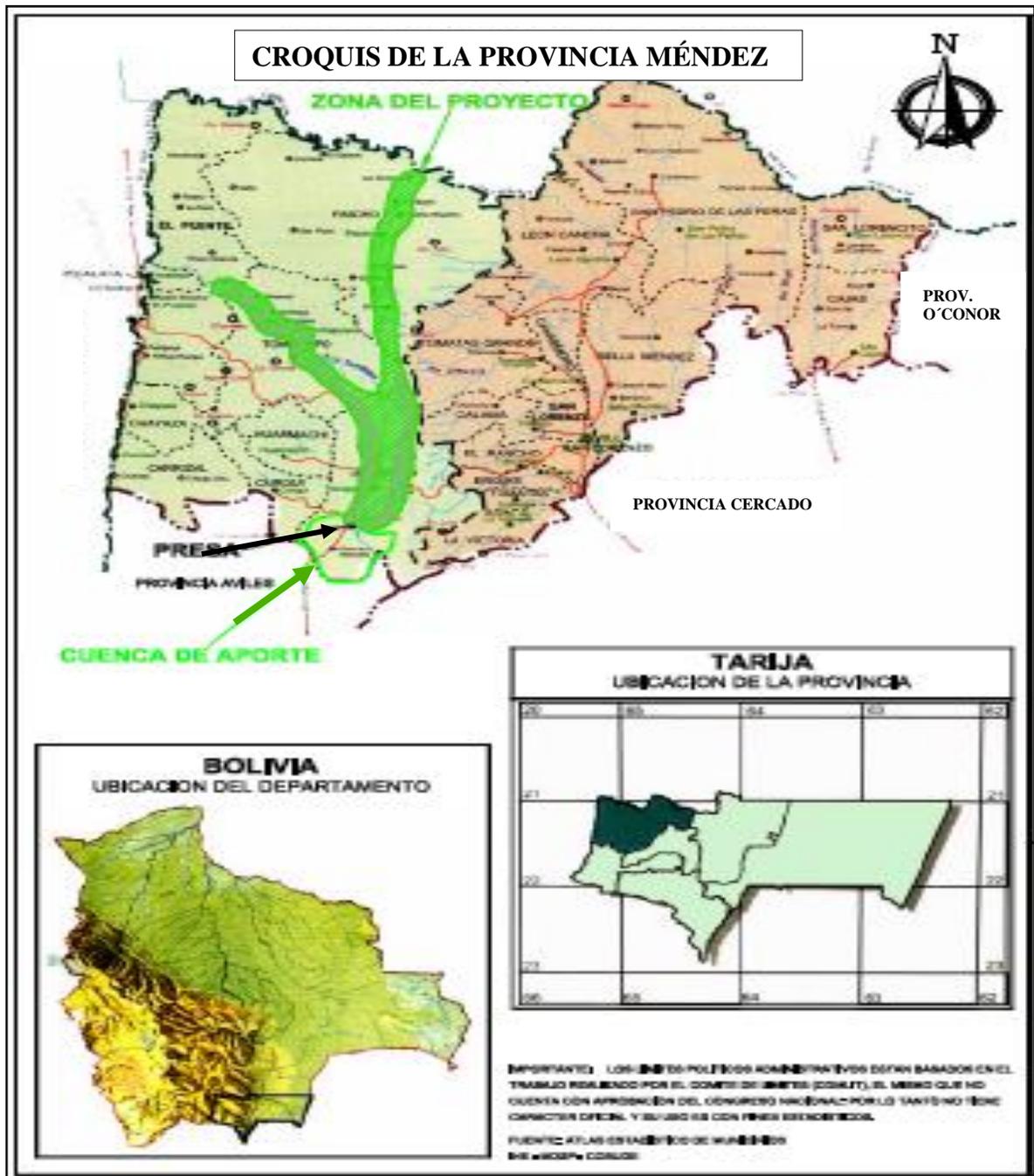
1.2.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO

La presa se ubica próxima a la comunidad de Pueblo Nuevo, en las proximidades del centro

Poblado de Iscayachi, área administrativa del Municipio El Puente, 2da sección de la provincia Eustaquio Méndez del departamento de Tarija, provincia con una población total de 28.038 habitantes (INE 2012). Al oeste está la serranía de Tajzara, al norte colinda con el río Camblaya (San Juan del Oro), y al sur y este con la serranía de Sama.

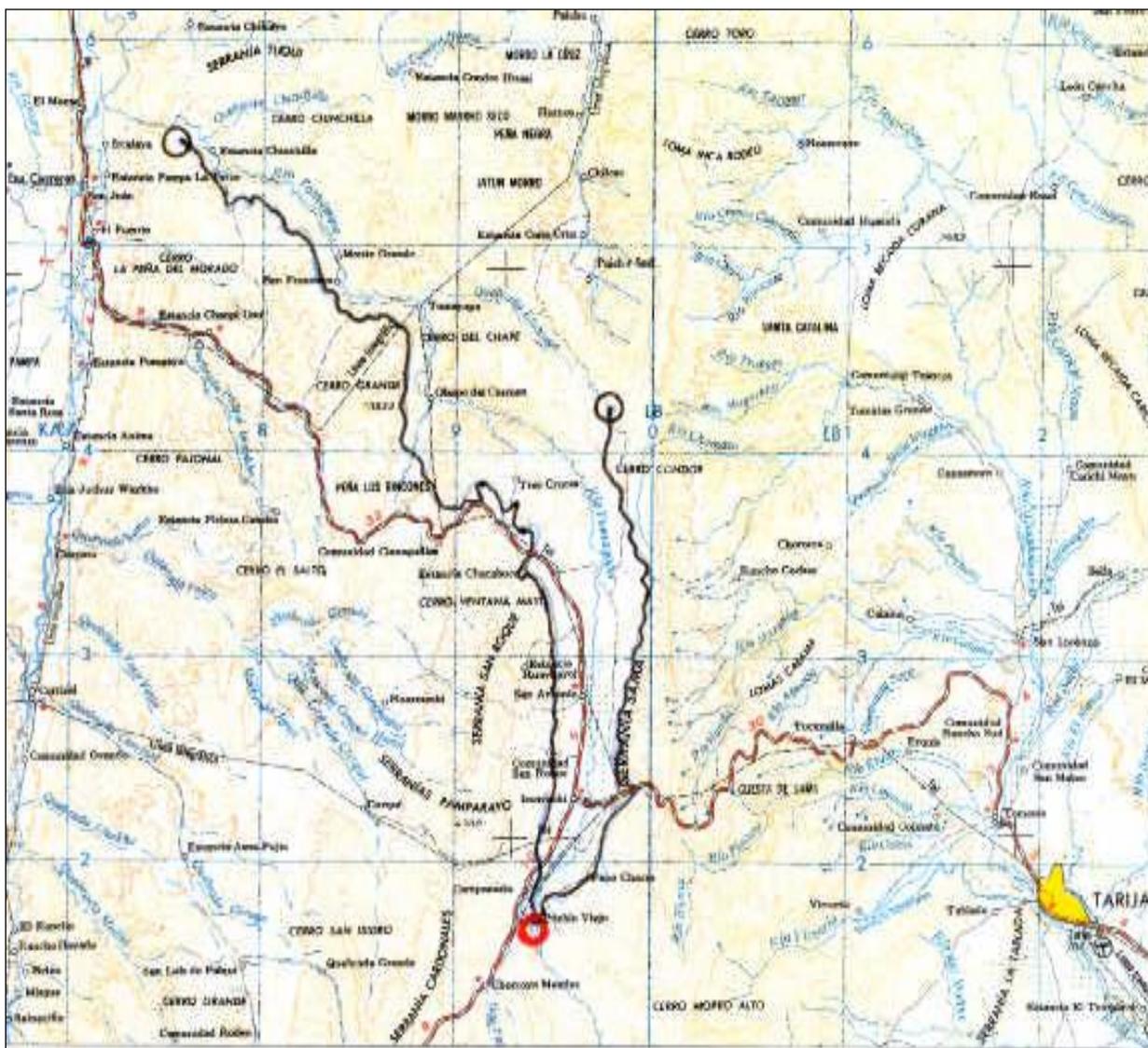
El proyecto en su integridad se encuentra en la zona Nor Occidental, del Departamento de Tarija, dentro de la provincia Méndez y correspondiente a la 2da. Sección de El Puente

FIGURA 1.1. UBICACIÓN DE LA PRESA EL MOLINO Y SU CUENCA DE APORTE



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004:

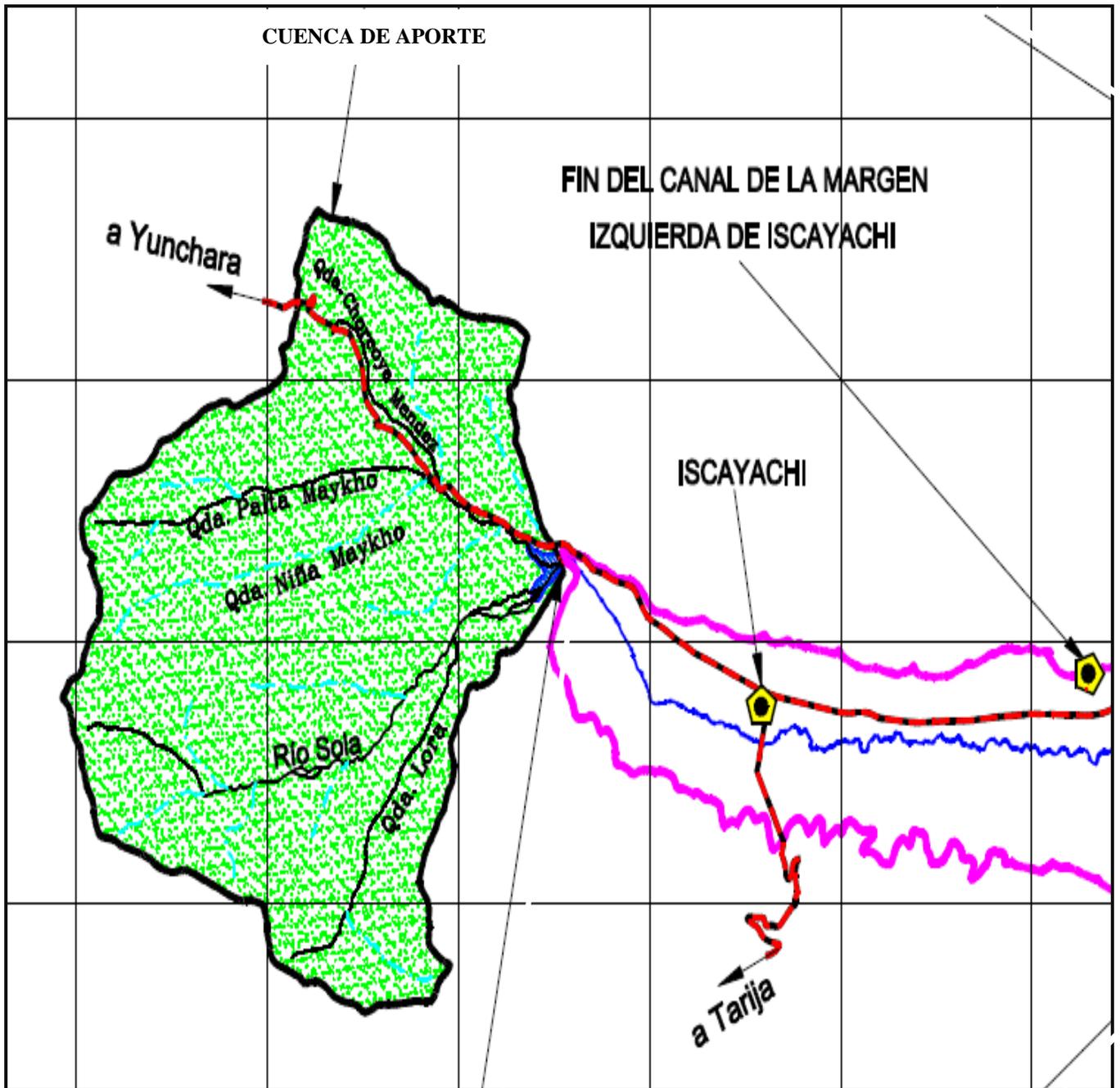
FIG. 1.2. UBICACIÓN DEL PROYECTO



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo VI: Geología y Geotecnia

La principal vía de acceso a la zona del proyecto constituye el camino troncal de Tarija – Iscayachi – El Puente y el desvío de Iscayachi a Tojo. Caminos secundarios son los que se dirigen a las poblaciones de Tomayapo, por la quebrada del Obispo y hacia Paichu, por la población de El Molino. Existen varios pueblos menores como San Antonio, El Molino, Campanario, Pueblo Nuevo.

FIG. 1.3. CUENCA DE APORTE



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología

1.3 . EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

No se han utilizado, cálculos con otros métodos de laminación los cuales podrían hacer que el vertedero de excedencias de la presa sea diseñado de manera eficiente y económicamente.

1.3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad el estudio se ejecutó y fue construido de acuerdo al Estudio a Diseño final con algunas modificaciones y se encuentra en funcionamiento hace dos años.

Se identificará el cálculo de laminación del vertedero excedencias de la presa que fue diseñado y construido con un solo método de laminación, con los nuevos métodos de laminación.

Se encuentra poca información de las estaciones pluviométricas para realizar el hidrograma de crecidas del cauce principal, tampoco no existen datos de aforo de caudales en el cauce principal.

Se realizará la investigación de otros métodos de cálculo de laminación en el vertedero de excedencias.

1.3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Existen otro o algún método de laminación que pueda hacer que el vertedero de excedencias de la presa sea más eficiente y más económico?

1.3.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿El estudio a diseño final Presa El Molino tiene una limitante en el método de laminación?

R. Sí porque solamente se diseñó el vertedero hidráulico con un solo método de laminación.

¿Se realizará la investigación de nuevos métodos de laminación?

R. Sí se realizará la investigación de los siguientes métodos de laminación.

- a) *Laminación con el método piscina nivelada.*
- b) *Laminación con el método Muskingum-Cunge.*
- c) *Laminación con el método Muskingum.*
- d) *Laminación Runge – Kuta.*

¿Existen diseños hidráulicos con estos nuevos métodos de laminación en nuestro medio?

R. Poco se conoce sobre estos nuevos métodos de laminación y en nuestro medio no se diseña con estos métodos

1.4. OBJETIVO DE INVESTIGACIÓN

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la comparación de los resultados obtenidos por los métodos de laminación para diferentes periodos de retorno.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar la hidrología
- b) Calcular el caudal máximo de crecida
- c) Analizar cada uno de los métodos de laminación.
- d) Determinar el tirante máximo para cada método de laminación en el vertedero.
- e) Verificar cuál de los métodos de laminación es el que mejor se adecua al hidrógrama de crecidas en la presa El Molino.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La utilización de varios métodos de cálculo de laminación justifica que no solamente se puede utilizar un sólo método.

La utilización de varios métodos de laminación hace que conozcamos el comportamiento de los hidrogramas.

1.6. MARCO DE REFERENCIA

A continuación se presenta el marco de referencia de los métodos de laminación de acuerdo al libro de Hidrología Aplicada McGraw-hill, Chow, V.T.

CUADRO 1.1.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOS DE LAMINACIÓN APLICADOS A LA PRESA EL MOLINO	
Cálculos	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> ∇ Laminación con el método piscina nivelada. ∇ Laminación con el método Muskingum-Cunge ∇ Laminación con el método Muskingum. ∇ <i>Laminación Runge – Kuta</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ∇ Se analizará los métodos de laminación ∇ Comparación de los métodos de laminación ∇ Para los periodos de retorno: T=50ños, 100años, 500años y 100años ∇ Comparación de los métodos de laminación para cada uno de los periodos de retorno mencionados

Fuente.: Hidrologia Aplicada McGraw-hill, Chow, V.T.

1.6.1. MARCO TEÓRICO

En nuestro medio poco se conoce de otros métodos de laminación, se realizará la consulta bibliográfica de los siguientes libros, Hidrología Aplicada McGraw-hill, Chow, V.T., Diseño de pequeñas presas e Internet.

1.6.2. MARCO CONCEPTUAL

Dentro del análisis de los métodos de laminación una variable conocida será el tipo de cuenca con la cual se realizará su diseño hidráulico del vertedero de excedencias de la presa en función del hidrógrama de entrada.

Cuenca.- Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Hidrógrama Unitario.- El Hidrógrama Unitario es el hidrógrama de escorrentía directa causado por una lluvia efectiva unitaria (1 cm ó 1 mm, por ejemplo), de intensidad constante a lo largo de la duración efectiva y distribuida uniformemente sobre el área de drenaje (Sherman, 1932).

Almacenamiento $S(t)$.- Un embalse es una acumulación artificial de agua en un ambiente natural. Es producto de una acción humana ejecutada para acopiar agua para fines de su uso y/o consumo. Se diferencia así de las acumulaciones naturales (lagos, lagunas y pantanos). Un embalse por lo general se genera construyendo un cierre interceptando un curso de agua (presa o dique), aunque los hay “laterales”, es decir fuera de cauce, aprovechando depresiones naturales del terreno, hacia las cuales se conduce el agua por canales, tuberías o túneles.

Caudal de entrada $I(t)$.- Es la cantidad de agua que ingresa por las precipitaciones y caudal del cauce.

Caudal de salida $Q(t)$.- Es la cantidad de agua que sale a través del vertedero de excedencias.

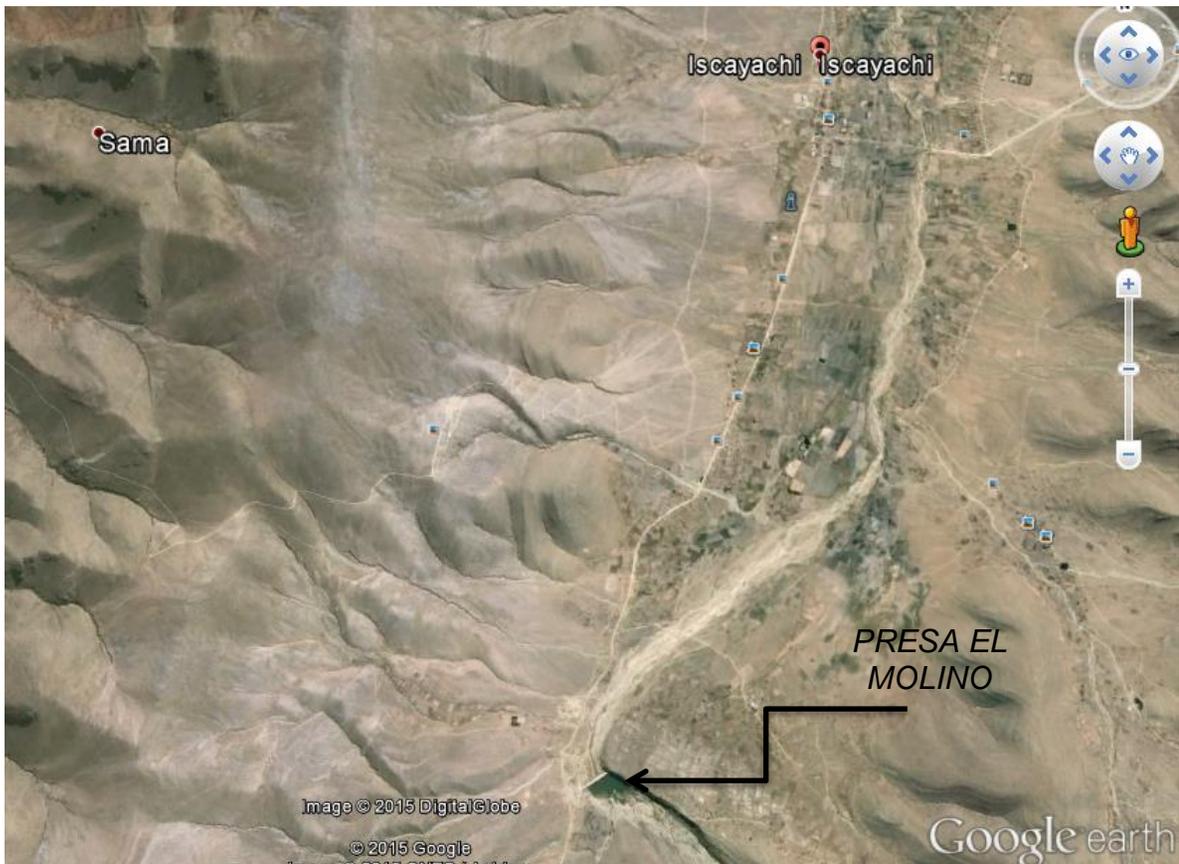
Laminación.- Laminación es el tránsito de avenidas en vasos en un procedimiento que sirve para determinar el hidrógrama de salida de una presa dado un hidrógrama de entrada.

Vertedero de excedencias.- Los vertederos son estructuras hidráulicas diseñadas para evacuar las aguas en crecidas de los ríos, también su ubicación porque con esta estructura se garantizaría la protección de la presa los vertederos se pueden ubicar en distintas partes de la presa se pueden encontrar en el cuerpo de la presa o que se encuentren fuera de la presa o también que se encuentren en los lados laterales de la presa. Existen distintos tipos de vertederos.

1.6.3. MARCO ESPACIAL

La investigación se realizará en la presa El Molino su ubica próxima a la comunidad de Pueblo Nuevo, en las proximidades del centro poblado de Iscayachi perteneciente a la provincia Méndez departamento de Tarija.

FIG. 1.4. IMAGEN SATELITAL PRESA EL MOLINO



Fuente.: google earth. 2014

1.6.4. MARCOTEMPORAL

Esta investigación se realizará en el periodo de junio del 2014 a junio del 2015.

1.7. HIPÓTESIS DEL TRABAJO

Es una proposición de carácter afirmativo enunciada para responder tentativamente a un problema.

Se plantea con el fin de explicar hechos o fenómenos que caracterizan o identifican al objeto de conocimiento.

1.8. HIPÓTESIS DE PRIMER GRADO

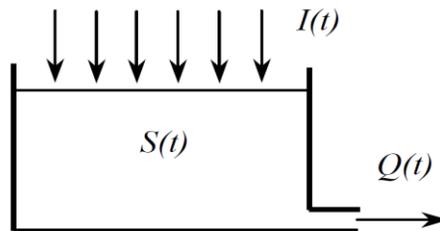
Laminación es el tránsito de avenidas en vasos en un procedimiento que sirve para determinar el hidrógrama de salida de una presa dado un hidrógrama de entrada.

1.9. HIPÓTESIS DE SEGUNDO GRADO

Laminación es:

La cantidad de agua almacenada en una cuenca, $S(t)$, puede relacionarse con los caudales de entrada, $I(t)$ y de salida, $Q(t)$, de la cuenca (Figura 1.1), a través de la ecuación integral de continuidad:

FIGURA 1.1.: REPRESENTACIÓN SIMPLIFICADA DE UN SISTEMA HIDROLÓGICO



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

1.10. HIPÓTESIS DE TERCER GRADO

Don de:

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

Conociendo $I(t)$, no podemos obtener $Q(t)$ si no se conoce una segunda relación llamada función de almacenamiento, que en general es:

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

2

.....

Estas dos ecuaciones nos brindan una combinación de dos ecuaciones con dos incógnitas que pueden resolverse, por ejemplo, por el método de diferencias finitas. La forma de la ecuación de almacenamiento depende de la naturaleza del sistema analizado. Existen varios métodos que se diferencian entre sí en la manera de considerar la función de almacenamiento.

- Método del embalse a nivel: el almacenamiento es función no lineal de Q .

$$S = f(Q)$$

- Método de Muskingum: el almacenamiento es función lineal de I y Q .

$$S = f(I, Q)$$

- Modelos de depósitos o embalses lineales: el almacenamiento es función lineal de Q .

$$S = kQ$$

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TÉORICO

2.1. SIGNIFICADO E IMPORTANCIA DE LA LAMINACIÓN

Es el tránsito de avenidas en vasos es un procedimiento que sirve para determinar el hidrograma de salida de una presa dado un hidrograma de entrada. Algunas de sus aplicaciones son:

- a) Conocer la evolución de los niveles en el vaso y los gastos de salida por la obra de exedencias, para saber si la estrategia de operación de las compuertas del vertedero es adecuada y así, al presentarse una avenida, no se ponga en peligro la presa, bienes materiales o vidas humanas agua abajo.
- b) Dimensionar la obra de exedencias
- c) Fijar el NAME y las dimensiones de las obras de desvío y antaguías.

Ataguías.- Macizo de tierra arcillosa u otro material impermeable, para atajar el paso del agua durante la construcción de una obra hidráulica.

2.2. HIDROGRAMA

Hidrograma Unitario.- Hidrograma de volumen unidad producido por una lluvia directa unitaria, distribuida uniformemente sobre el área de la cuenca en un período determinado de tiempo. (Sherman, 1932).

Hidrograma que produce una tormenta de una hora de duración con una intensidad tal que la esorrentía sea uniforme en el tiempo sea igual a 1 mm por hora.

Principio de constancia del tiempo de base.- Para una cuenca receptora dada, la duración de la esorrentía superficial correspondiente a lluvias de la misma duración es constante e independiente de la precipitación. Debe cumplirse $D_c < 1/3 t_c$.

Principio de proporcionalidad o afinidad.- Para una cuenca receptora dada, dos chaparrones de intensidad uniforme y la misma duración, pero volúmenes distintos, producen caudales proporcionales a dichos volúmenes. $I_2/I_1 = q_2/q_1$

Principio de superposición o de independencia.- La distribución temporal de la escorrentía superficial correspondiente a un aguacero tipo es independiente de las precipitaciones de períodos anteriores.

Principio de linealidad.- El hidrograma de una lluvia de duración superior a la duración característica ($D > D_c$) puede obtenerse como suma de los hidrográmas correspondientes a los aguaceros tipo.

En consecuencia, conocido el hidrograma para una lluvia de duración e intensidad dada, uniforme en el espacio y el tiempo sobre la cuenca, es posible obtener el hidrograma de una lluvia cualquiera compleja.

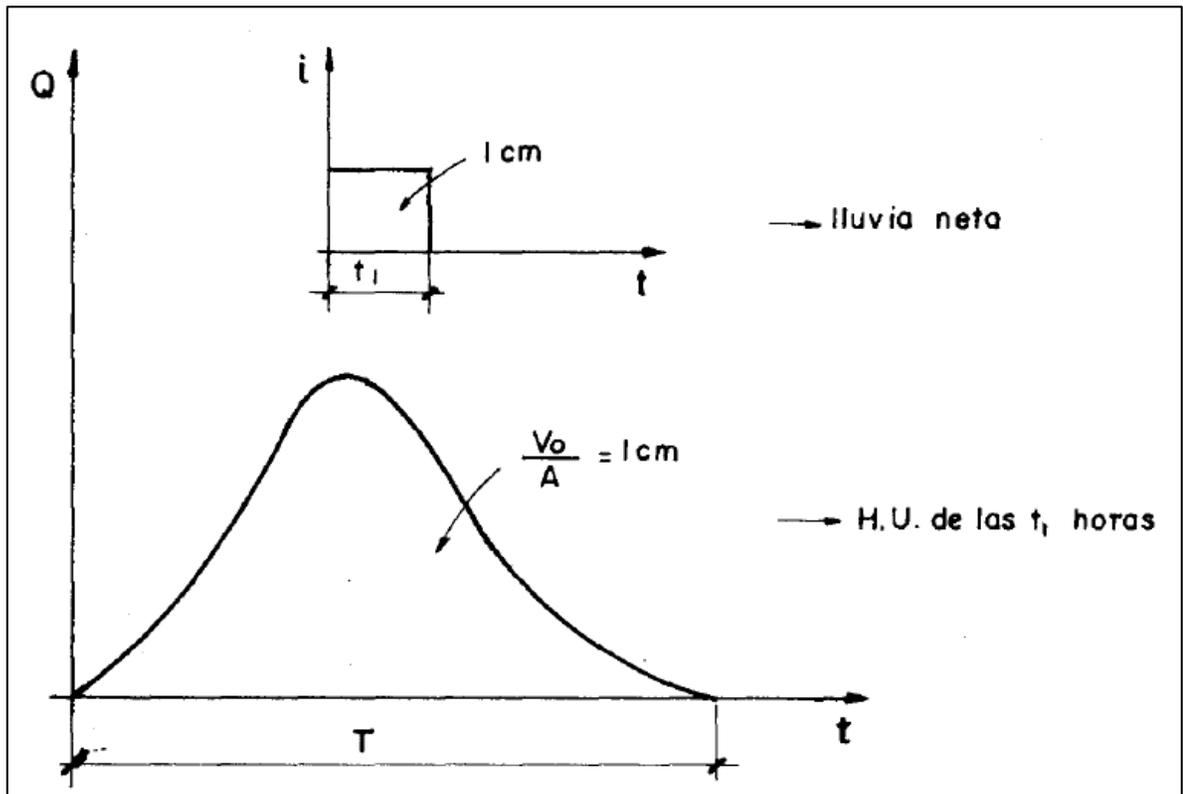
Lluvia-escorrentía: sistema lineal e invariante en el tiempo.

No linealidad: condiciones iniciales diferentes.

No proporcional: el caudal no responde proporcionalmente a las precipitaciones (freática distinta, intercepción en depresiones).

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

FIG. 2.1 HIDROGRAMA UNITARIO



Fuente: Hidrología para estudiantes de Ingeniería civil: Wendor Chereque Morán

Intensidad de lluvia similar a la que permitió la obtención del hidrograma. Linealidad, uniformidad espacial de las lluvias, subdivisión en subcuencas, tampoco funciona muy bien en cuencas muy pequeñas.

2.2.1 OBTENCIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO

El Hidrograma Unitario se obtiene a partir de:

- Una tormenta y su caudal resultante
- Basado en fórmulas teóricas o empíricas (HU sintéticos)

Se obtiene del hidrograma unitario a partir de una sola tormenta mediante los siguientes pasos metodológicos.

1. Analizar el hidrograma y separar el flujo base.
2. Medir el volumen total de escurrimiento directo bajo el hidrograma y convertir esto en lámina (cm) sobre la cuenca.
3. Convertir la lluvia total a lluvia en exceso a través de métodos de infiltración y evaluar duración para el hidrograma de escurrimiento directo y el HU.
4. Dividir las ordenadas del hidrograma del escurrimiento directo por el volumen en cm. y graficar estos resultados como el HU de la cuenca. Se considera al tiempo base para tormentas de igual duración y así esto no cambiará.
5. Chequear que el volumen del hidrograma unitario sea = 1cm y ajustar gráficamente las ordenadas.

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

2.2.2 HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO

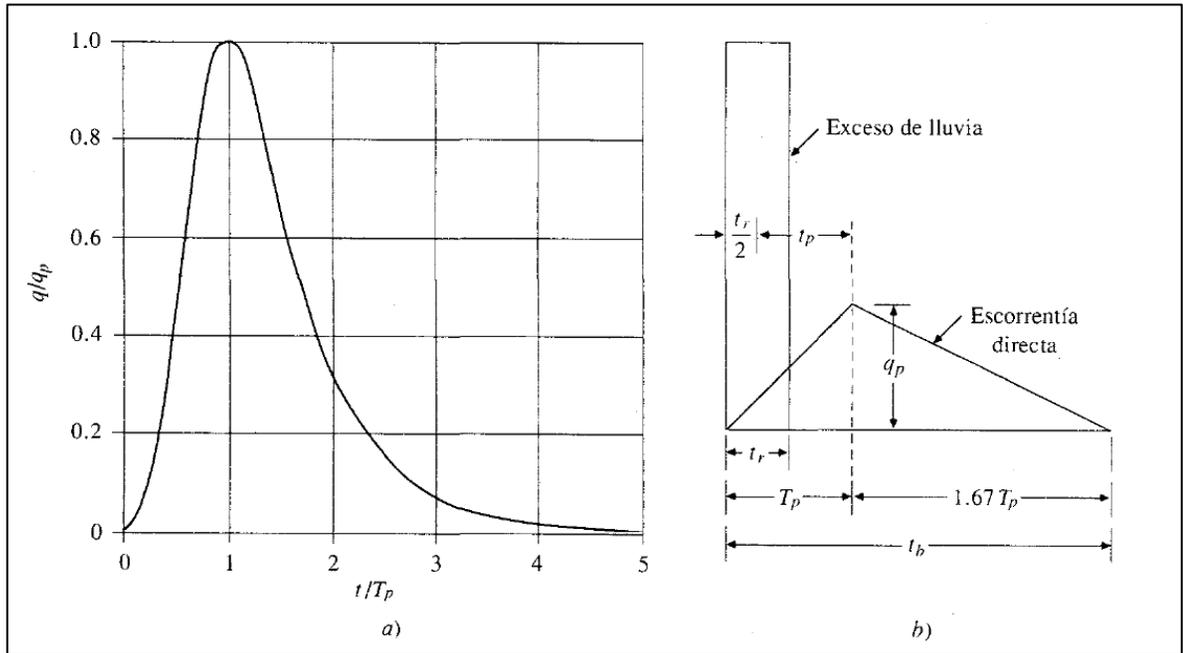
Obtención de hidrogramas unitarios a partir de datos geomorfológicos e hidrológicos:

- Distancias a diversos puntos de la cuenca.
- Ramificación de la red de drenaje.
- Forma de la red.
- Pendientes, etc.

2.2.3 HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR S.C.S

En este hidrograma unitario el caudal se expresa como relación caudal q con respecto al caudal pico q_p , y el tiempo por la relación del tiempo t con respecto al tiempo de ocurrencia del pico T_p en el hidrograma unitario como muestra en la figura 2.2.

FIG. 2.2 HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR S.C.S.



Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

Hidrogramas unitarios sintéticos del Soil Conservation Service. A) Hidrograma adimensional y b) Hidrograma Unitario Triangular

$$q_p = 2.08 A / T_p$$

$$T_p = D/2 + t_r$$

$$t_r = 0.6 t_c$$

$$T_p = D/2 + 0.6t_c$$

$$T_b = 2.67T_p$$

Donde:

q_p : caudal pico ($m^3/s \cdot cm$)

A: área de drenaje (km^2)

T_p : tiempo al pico (hrs)

t_r : tiempo de retardo (hrs)

t_c : tiempo de concentración de la cuenca (hrs)

Tiempo de concentración.- Tiempo que tarda una gota de agua depositada en el lugar más extremo de una cuenca en alcanzar el punto de desagüe de la misma.

Tiempo requerido para que, con lluvia uniforme, el 100 % del área de la cuenca esté contribuyendo efectivamente a la escorrentía directa en el punto de control.

$$t_c = 0,3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76}$$

Fórmula Témez:

$t_c = (h)$

L= Longitud del curso principal (km)

J= Pendiente del curso principal

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

2.2.4 HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO DE SNYDER

Snyder realizó estudios en cuencas de los Montes Apalaches (EEUU), con áreas de 30 a 30000 km² y encontró relaciones sintéticas de un hidrograma unitario estándar (Figura 1.5a) a partir de las cuales pueden calcularse las características de un hidrograma unitario requerido (Figura 1.5b). Para una duración de lluvia efectiva determinada, los parámetros del hidrograma unitario requerido son:

1. Retardo de la cuenca, t_{pR} : diferencia de tiempo entre el centroide del hietograma efectivo y el pico del hidrograma unitario
2. Caudal punta o pico por unidad de área de la cuenca, q_{pR}
3. Tiempo base, t_b
4. Ancho W_{50} [T] del hidrograma unitario al 50 % del caudal pico
5. Ancho W_{75} [T] del hidrograma unitario al 75 % del caudal pico

Snyder definió el hidrograma unitario estándar como aquél que cumple que:

$$t_r = \frac{t_p}{5.5}$$

donde t_r es la duración de la lluvia efectiva y t_p el tiempo de retardo, ambos del hidrograma unitario estándar. Además encontró que para un hidrograma unitario estándar el tiempo de retardo es:

$$t_p = 0,75C_t (LL_c)^{0,3} (h)$$

Donde L es la longitud del cauce principal hasta la divisoria de aguas arriba [km], L_c es la distancia desde la salida de la cuenca hasta el punto del cauce principal más cercano al centroide del área de la cuenca [km] y C_t es un coeficiente que varía entre 1,35 (pendientes altas) y 1,65 (pendientes bajas). También para el hidrograma unitario estándar se encontró que el caudal pico por unidad de área es:

$$q_p = \frac{2,75C_p}{t_p} (m^3 / s * km^2)$$

Donde $C_2 = 2.75$ (640 para el sistema inglés de unidades) y C_p es un coeficiente basado en cuencas instrumentadas en la misma región.

Donde C_p es un coeficiente que varía entre 0,56 y 0,69. Para calcular los coeficientes C_t y C_p de una cuenca instrumentada se sigue el siguiente procedimiento:

- Se miden L y L_c de un mapa de la cuenca.
- De un hidrograma unitario deducido con una lluvia efectiva y un hidrograma de caudales,

Que será nuestro "hidrograma unitario requerido", se obtiene t_R , t_{pR} y q_{pR} .

- Si $t_{pR} \approx 5,5 t_R$, entonces se considera $t_{pR} = t_p$, $q_{pR} = q_p$ y se calculan C_t y C_p de las ecuaciones

Correspondientes.

- Si t_{pR} es muy distinto de $5,5 t_R$, el tiempo de retardo estándar es

$$t_p = t_{pR} + \frac{t_r - t_R}{4}$$

Resuelve junto con $t_p = 5,5 t_r$ para calcular t_r y t_p , luego se calculan C_t y C_p con $t_{pR} = t_p$ y $q_{pR} = q_p$

Las restantes relaciones necesarias para encontrar el hidrograma unitario correspondiente a nuestra cuenca son:

$$q_{pR} = \frac{q_p t_p}{t_{pR}}$$

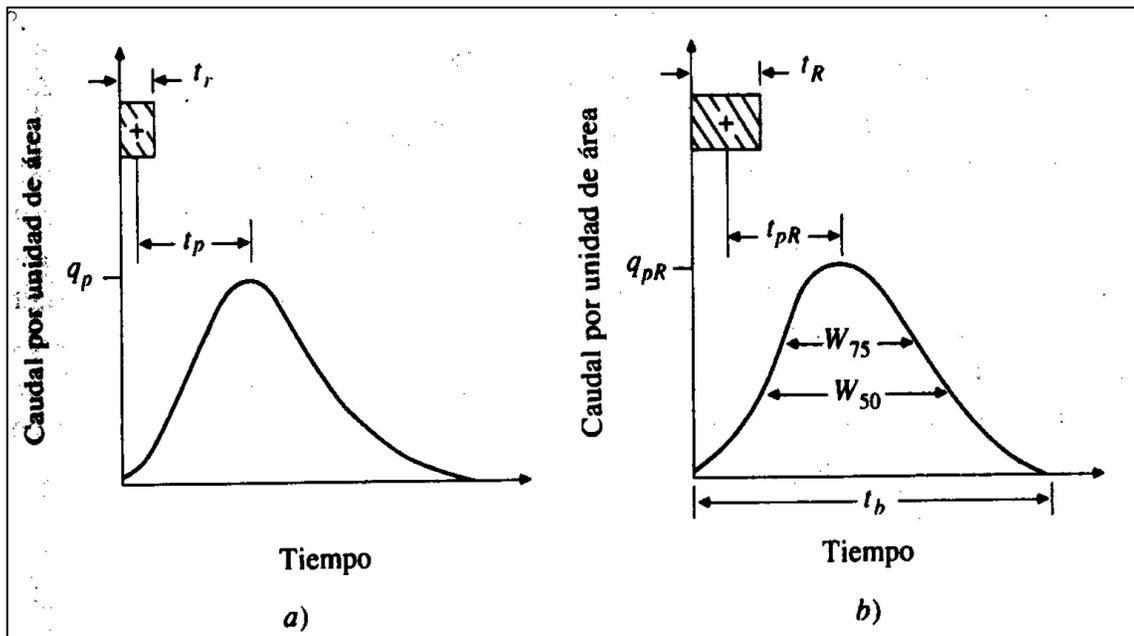
$$t_p = \frac{5,56}{q_{pR}}$$

$$W_{50} = 2,14 q_{pR}^{-1,08}$$

$$W_{75} = 1,22 q_{pR}^{-1,08}$$

Se acostumbra distribuir el ancho W de manera tal que quede una tercera parte antes del tiempo al pico y dos terceras partes después del tiempo al pico.

FIGURA 2.3: HIDROGRAMA UNITARIO ESTÁNDAR (TP = 5,5 TR)



Fuente: Hidrología Aplicada: Ven Te Chow

Hidrograma unitario sintéticos de Sneyder A) Hidrograma unitario estándar ($t_p = 5.5t_r$).
y b) Hidrograma unitario requerido ($t_{pR} \neq 5.5 t_R$)

Espey, Altman y Graves (1977) han adaptado estas relaciones para hidrogramas unitarios de 10 minutos de duración, basándose en datos experimentales de 41 cuencas con tamaños desde 0,04 hasta 43 km² y con porcentajes de impermeabilidad del 2 al 100%.

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

2.3 TIPOS DE LAMINACIÓN

Existen varios métodos de laminación y se nombrará cada uno de ellos a continuación.

Propagación de sistema agregado o hidrológico

- Piscina Nivelada o Propagación de embalse a nivel.
- Propagación en cauces. Método de Muskingum.
- Modelo de embalse lineal.
- Runge – Kutta.

Propagación distribuida o hidráulica

- Propagación mediante el método de la onda cinemática.
- Método de Muskingum-Cunge.
- Propagación mediante el método de la onda difusiva.
- Propagación mediante el método de la onda dinámica.

Conceptos y especificación de métodos realizados en el análisis comparativo aplicados en La Presa El Molino y otros métodos que no se están utilizando en el analisis comparativos pero que es importante mencionarlos.

Como:

- Modelo de embalse lineal
- Propagación mediante el método de la onda cinemática

- Propagación mediante el método de la onda difusiva.
- Propagación mediante el método de la onda dinámica.

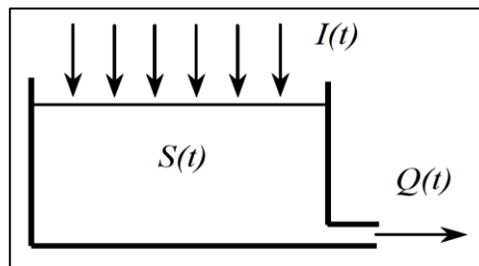
Son los métodos que no fueron desarrollados en el análisis de investigación.

Propagación de sistema agregado o hidrológico

Como ya hemos visto, en un sistema hidrológico la entrada, $I(t)$, la salida, $Q(t)$ y el almacenamiento $S(t)$, se relacionan por la ecuación de continuidad:

$$\frac{ds}{dt} = I(t) - Q(H)$$

FIGURA 2.4.: REPRESENTACIÓN SIMPLIFICADA DE UN SISTEMA HIDROLÓGICO



Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

Conociendo $I(t)$, no podemos obtener $Q(t)$ si no se conoce una segunda relación llamada función de almacenamiento, que en general es:

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

Estas dos ecuaciones nos brindan una combinación de dos ecuaciones con dos incógnitas que pueden resolverse, por ejemplo, por el método de diferencias finitas. La forma de la ecuación de almacenamiento depende de la naturaleza del sistema analizado. Existen

varios métodos que se diferencian entre sí en la manera de considerar la función de almacenamiento:

- Método del embalse a nivel: el almacenamiento es función no *lineal* de Q

$$S = f(Q)$$

- Método de Muskingum: el almacenamiento es función *lineal* de I y Q

$$S = f(I, Q)$$

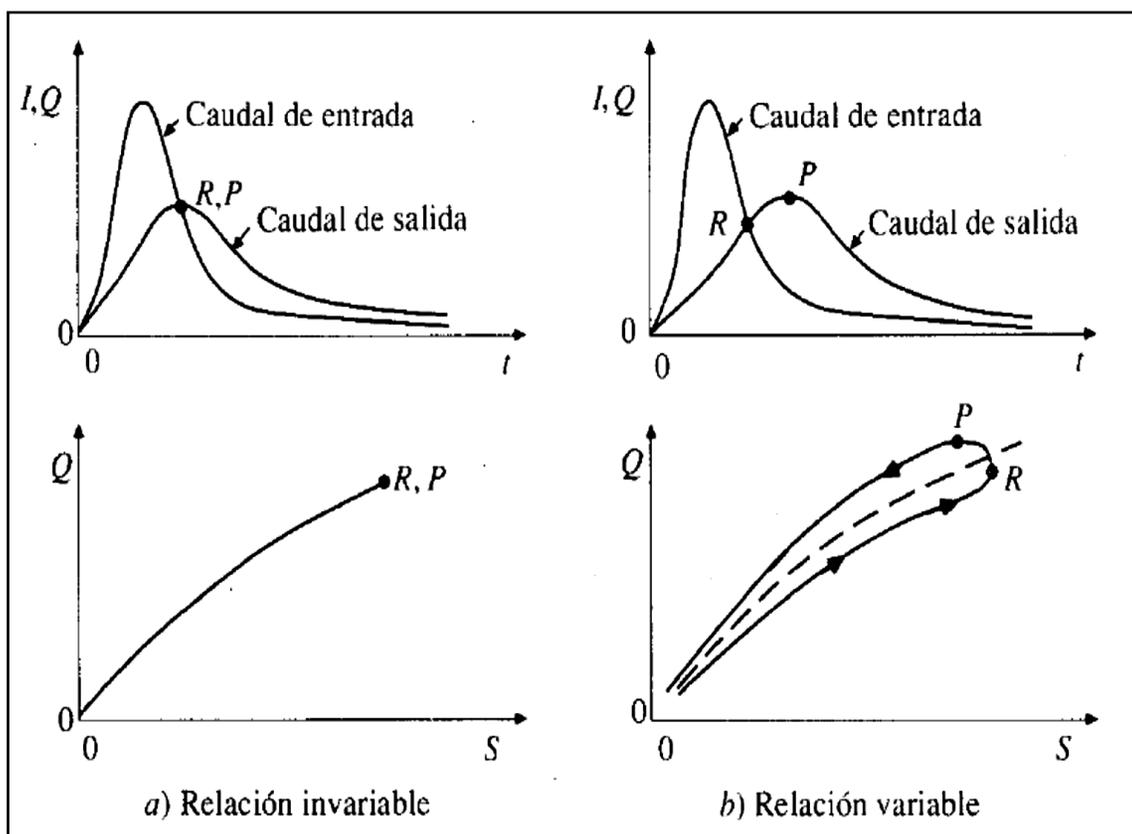
- Modelos de depósitos o embalses lineales: el almacenamiento es función lineal de Q

$$S = kQ$$

La relación que existe entre el almacenamiento, S y el caudal de salida, Q, es invariable cuando se tiene un embalse con superficie de agua horizontal. En este caso, S es función únicamente de la altura de la lámina de agua en el embalse y Q es función de la altura de agua sobre la estructura de control, de manera tal que combinando ambas relaciones, se llega a una relación única entre S y Q: $S = f(Q)$, como se muestra en la Figura 2.5a).

La relación entre S y Q suele ser variable cuando se trata de embalses largos y angostos y de canales o cauces de ríos, ya que la superficie del agua suele tener una pendiente debido a los efectos de remanso. En este caso, S dependerá del nivel variable a lo largo del sistema y ya no existe una función única entre la altura de la lámina de agua y Q, lo que finalmente conduce a una relación variable entre S y Q, formando un bucle como se muestra en la Figura 2.5.: b)

FIGURA 2.5: TRANCITO AGREGADO DE CRECIENTE.

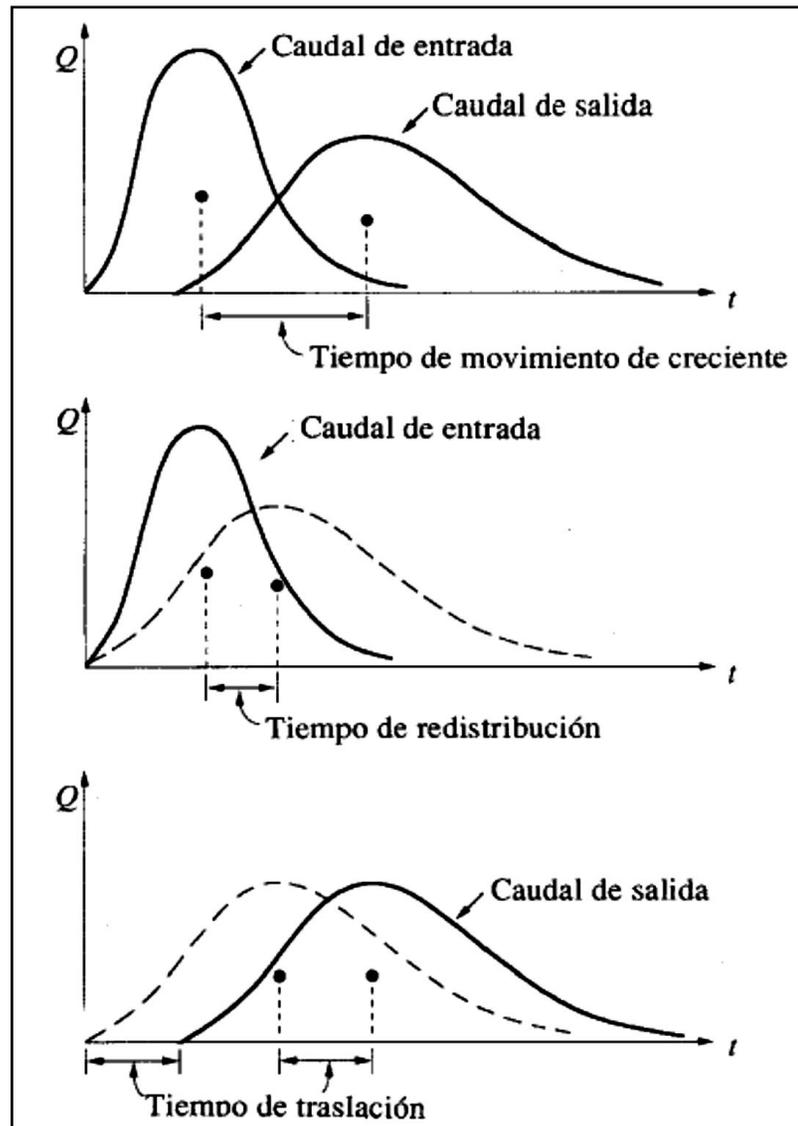


Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

Relación entre el caudal y el almacenamiento. El efecto del almacenamiento sobre el hidrógrama de salida es, por un lado, el de modificar la forma del hidrógrama, retrasando el tiempo al pico, aumentando el tiempo base y disminuyendo el caudal punta y por otro lado, el de retrasar el comienzo del hidrógrama, especialmente si se trata de cauces muy largos, donde la onda de avenida debe viajar una distancia considerable.

De esta manera, el tiempo de movimiento de la avenida puede considerarse compuesto por un tiempo de redistribución, provocado por el cambio en la forma del hidrógrama, más un tiempo de traslación, provocado por el viaje de la onda de avenida a lo largo del cauce, tal como se muestra en la Figura 2.6.

FIGURA 2.6: TIEMPO DE MOVIMIENTO DE UNA AVENIDA.



Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

2.3.1 LAMINACIÓN MÉTODO PISCINA NIVELADA, PROPAGACIÓN DE EMBALSE A NIVEL O PULS (PULSO)

El modelo más representativo para simular tránsitos en embalses es el de piscina nivelada o Puls.

El procedimiento para calcular un hidrógrama de caudal a la salida de un embalse con una superficie de agua horizontal se lo conoce como método del embalse a nivel. Si se

considera la variación entre los caudales de entrada y de salida a lo largo de un intervalo de tiempo es lineal, lo que es aproximado a la realidad siempre y cuando se tengan en cuenta intervalos de tiempo pequeños, digamos menores a 0,1 veces el tiempo al pico del hidrógrama de entrada, la variación en el almacenamiento en el intervalo puede encontrarse haciendo:

$$S_2 - S_1 = \frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t$$

Donde I_1 e I_2 son los caudales de entrada, Q_1 y Q_2 son los caudales de salida y S_1 y S_2 son los almacenamientos correspondientes a los instantes inicial y final del intervalo, respectivamente.

En esta ecuación, las incógnitas son Q_2 y S_2 . Agrupando las incógnitas por un lado y los datos por el otro podemos obtener:

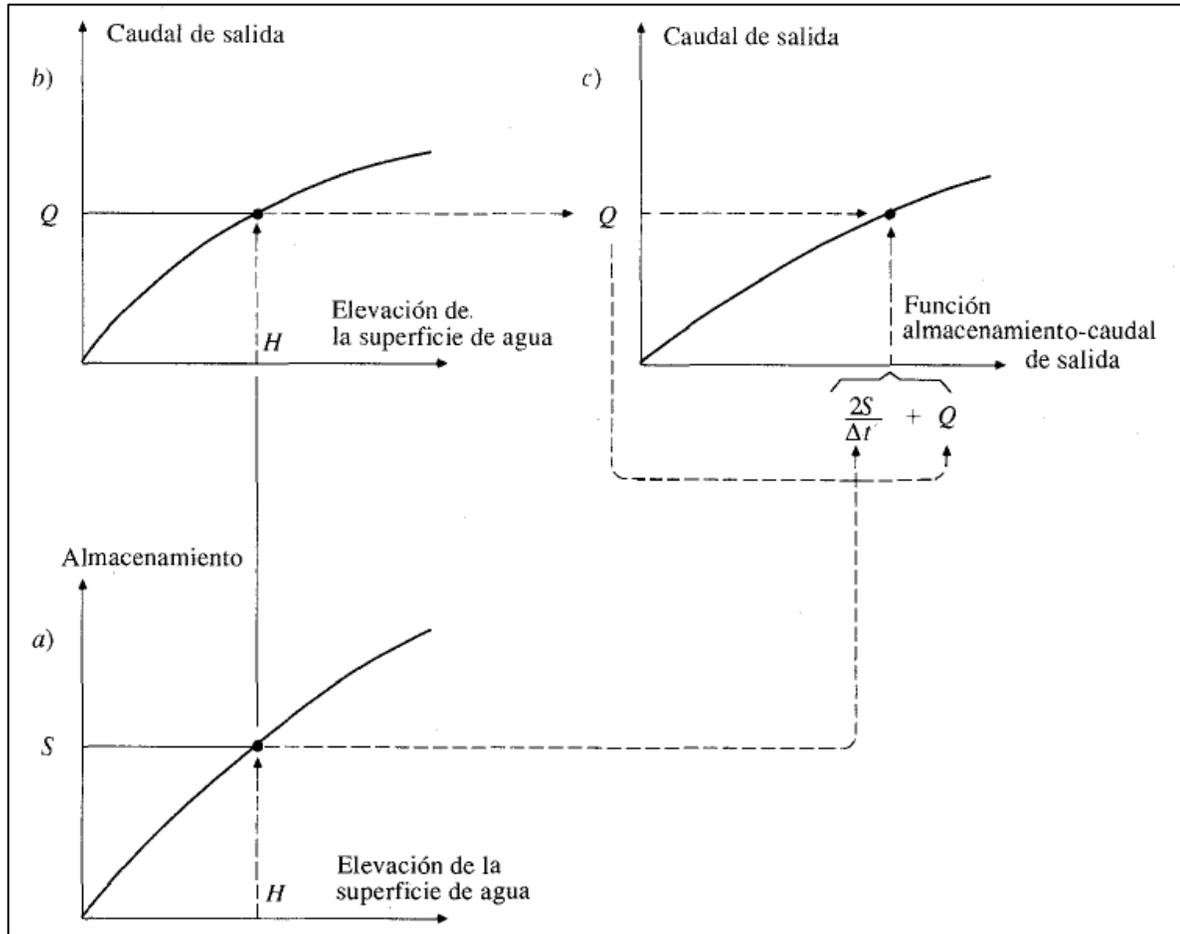
$$\left(\frac{2S_2}{\Delta t} + Q_2 \right) = (I_1 + I_2) + \left(\frac{2S_1}{\Delta t} - Q_1 \right)$$

que puede resolverse conociendo la relación entre S y Q , que ya sabemos que es invariable. La relación entre S y Q se obtiene a partir de:

- La relación entre altura y almacenamiento, $S = f(H)$, obtenida a través de levantamientos topográficos o bien de mapas cartográficos.
- La relación entre altura y caudal de salida, $Q = f(H)$, que son ecuaciones que dependen del tipo de vertedero o estructura de salida (con o sin compuertas).

En la Figura 2.7 se muestra la manera de obtener una relación entre $2S/\Delta t + Q$, utilizando ambas relaciones.

FIGURA 2.7: FORMA PARA OBTENER UNA RELACIÓN ENTRE S Y Q PARA SER UTILIZADA EN EL MÉTODO DE PICINA NIVELADA



Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

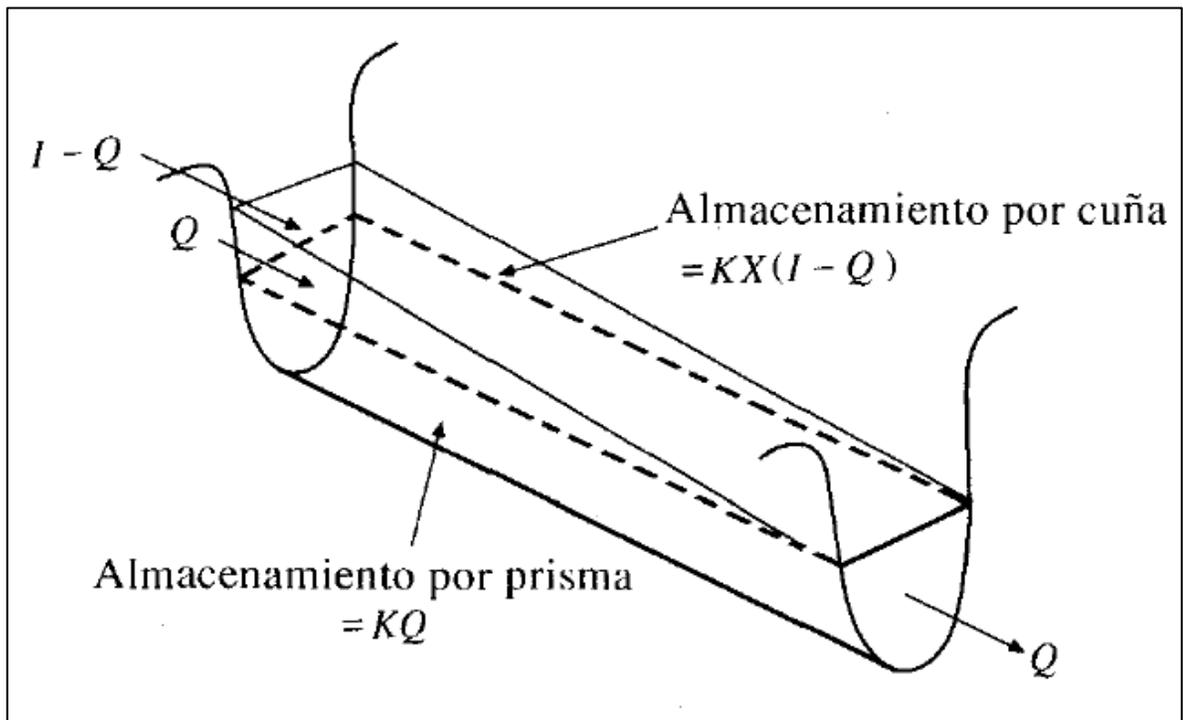
2.3.2 LAMINACIÓN MÉTODO MUSKINGUM

El método de Muskingum fue presentado por McCarthy (1938) y maneja relaciones caudal almacenamiento variables. Este método modela el almacenamiento en un cauce mediante la combinación de dos tipos de almacenamientos, tal como se muestra en la Figura 2.9:

- Un almacenamiento prismático, formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo del cauce prismático.

- Un almacenamiento en cuña, formado por la diferencia entre los caudales de entrada y salida, o bien, por la pendiente de la lámina de agua en el tramo considerado.

FIGURA 2.8: ALMACENAMIENTOS POR PRISMA Y POR CUÑA EN UN TRAMO DE CAUCE.



Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

Durante el avance de la avenida el caudal de entrada es mayor que el de salida y se forma lo que se denomina cuña positiva y durante la recesión el caudal de entrada es menor al caudal de salida, formándose una cuña negativa.

El volumen de almacenamiento prismático es proporcional al caudal de salida, ya que se supone que el caudal de salida es proporcional al área de la sección del cauce:

$$S_p = KQ$$

El valor de K se considera igual al tiempo de tránsito de la onda de avenida a través del tramo. El volumen de almacenamiento por cuña es proporcional a la diferencia entre las entradas y las salidas:

$$S_c = KX(I - Q)$$

Donde X es un factor de ponderación tal que puede tomar valores entre 0 y 0,5, en función de la forma de almacenamiento en cuña. Cuando X = 0, no existe cuña, no hay curva de remanso y el almacenamiento en el cauce será tipo embalse: S = KQ. En este caso se produciría la máxima atenuación posible. Cuando X = 0,5; se dice que la cuña está completamente desarrollada y no existiría atenuación alguna del pico. En cauces naturales muy caudalosos y de baja pendiente, X suele ser próximo a 0 y será más cercano a 0,5 cuanto más pendiente y menos caudal tenga el cauce. En ríos españoles, en general poco caudalosos, se puede tomar como media un valor de 0,3 a 0,35.

El almacenamiento total en el tramo de cauce considerado sería entonces:

$$S = KQ + KX(I - Q)$$

Que puede reordenarse como:

$$S = K[XI + (I - X)Q]$$

Esta ecuación representa el modelo lineal de almacenamiento para la propagación de avenidas en cauces por el método de Muskingum. Si analizamos el volumen de almacenamiento en dos instantes, 1 y 2, al comienzo y al final de un intervalo de tiempo Δt , éstos pueden determinarse como:

$$S_1 = K[XI_1 + (I - X)Q_1]$$

$$S_2 = K[XI_2 + (I - X)Q_2]$$

La variación en el almacenamiento a través del tramo sería la diferencia entre ambos almacenamientos:

$$S_2 - S_1 = K\{[XI_2 + (1 - X)Q_2] - [XI_1 + (1 - X)Q_1]\}$$

Utilizando la ecuación de continuidad, la variación en el almacenamiento es igual a:

$$S_2 - S_1 = \frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t$$

Sustituyendo obtenemos:

$$K[X(I_2 - I_1) + (1 - X)(Q_2 - Q_1)] = \frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t$$

y despejando Q2 nos queda:

$$Q_2 = \frac{KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - X) + \frac{\Delta t}{2}} I_1 + \frac{-KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - X) + \frac{\Delta t}{2}} I_2 + \frac{K(1 - X) - \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - X) + \frac{\Delta t}{2}} Q_1$$

o bien:

$$Q_2 = C_1 I_1 + C_2 I_2 + C_3 Q_1$$

Donde:

$$C_1 = \frac{KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - X) + \frac{\Delta t}{2}}; \quad C_2 = \frac{-KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - X) + \frac{\Delta t}{2}}; \quad C_3 = \frac{K(1 - X) - \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - X) + \frac{\Delta t}{2}}$$

Se verifica que la suma de C₁, C₂ y C₃ debe ser igual a 1.

Obtención de K y X a partir de información de campo

Si se encuentran disponibles los hidrógramas de entrada y salida observados para un tramo de un río, pueden determinarse los valores de K y X, utilizando la siguiente metodología:

- 1) Se asumen varios valores de X.
- 2) Utilizando la información de los caudales de entrada y de salida, se calculan los valores del numerador y del denominador de la siguiente expresión de K, deducida de una ecuación anterior:

$$K = \frac{\frac{\Delta t}{2} [(I_2 + I_1) - (Q_2 + Q_1)]}{X(I_2 - I_1) + (1 - X)(Q_2 - Q_1)}$$

- 3) Los valores calculados del numerador y denominador se colocan en un gráfico como ordenadas y abscisas, respectivamente, lo que producirá una curva en forma de lazo. El valor de X que produzca un lazo lo más parecido posible a una recta única se utiliza para calcular el valor de K, que es la pendiente de dicha recta.

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

2.3.3 MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE

Cunge (1969) propuso un método basado en el de Muskingum, pero que tiene en cuenta algunos conceptos tomados de la aproximación de la onda cinemática. La ecuación de Muskingum, en la notación utilizada para la onda cinemática, puede escribirse como:

$$Q_{X1}^1 = C_1 Q_{X0}^1 + C_2 Q_{X0}^0 + C_3 Q_{X1}^0$$

En la cual, los coeficientes C1, C2 y C3 dependen de los parámetros K y X. Cunge demostró que cuando K y Δt se toman como constantes, ésta es una solución aproximada de las ecuaciones de onda cinemática, siendo los valores de K y X iguales a:

$$K = \frac{\Delta x}{c_k}$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B c_k S_0 \Delta x} \right)$$

Donde X es la longitud del tramo considerado, C_k es la celeridad de la onda de avenida correspondiente a Q y B, es el ancho de la superficie de agua y S_0 , la pendiente media de dicho tramo de cauce.

Este método tiene la ventaja de que la solución se obtiene a través de una ecuación algebraica lineal, lo que permite que el hidrógrama pueda obtenerse sólo en las secciones requeridas en lugar de todos los puntos de la malla como requiere el modelo de onda cinemática, lo que también producirá una menor atenuación numérica.

En España se acostumbra calcular el factor K, considerando válida la aproximación de la onda cinemática y la ecuación de resistencia de Manning, por lo cual, la celeridad, C_k sería igual a 5/3 la velocidad de la onda de avenida. Si calculamos la velocidad de la onda como $\Delta x/T$, donde T es un tiempo de concentración del fluido en el tramo y utilizamos para calcularlo la fórmula de Témez, se llega a la siguiente ecuación para K:

$$K = 0,6 T_c = 0,18 \left(\frac{\Delta x}{S_0^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Donde X debe introducirse en km, S_0 en m/m y K quedaría expresado en horas.

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

2.3.4 MÉTODO DE RUNGE –KUTTA

Un método alternativo para el tránsito de piscina nivelada puede desarrollarse resolviendo las ecuaciones de continuidad por medio de un método numérico tal Como el método de Runge-Kutta.

El método de Runge-Kutta es más complicado que el método descrito en la sección previa, pero no requiere del cálculo de la función especial de *almacenamiento-caudal de salida* y está relacionado en una forma más cercana con la hidráulica de flujo a través del embalse. Pueden adoptarse varios esquemas de Runge-Kutta de diferente orden (Camahan, Et Al., 1969). Aquí se describe un esquema de tercer orden; éste parte cada

intervalo de tiempo en tres incrementos y calcula valores sucesivos de la elevación de la superficie del agua y el caudal de salida del embalse para cada incremento.

La ecuación de continuidad se expresa como:

$$\frac{ds}{dt} = I(t) - Q(H)$$

Donde S es el volumen de agua almacenado en el embalse; I(t) es el flujo de entrada al embalse como función del tiempo; y Q(H) es el flujo de Salida del embalse, que se determina mediante la cabeza o elevación (H) en el embalse. El cambio en el volumen, ds, debido al cambio en la elevación, dH, puede expresarse como

$$ds = A(H) * dH$$

donde A(H) es el área de la superficie de agua correspondiente a la elevación H. La ecuación de continuidad entonces puede reescribirse como

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I(t) - Q(h)}{A(H)}$$

La solución se extiende hacia adelante utilizando pequeños incrementos de la variable independiente, el tiempo, usando valores conocidos de la variable dependiente H. Para un esquema de tercer orden, existen tres incrementos en cada intervalo de tiempo Δt y se hacen tres aproximaciones sucesivas para el cambio en la cabeza de elevación, dH.

La figura 2.9. ilustra como se definen los tres valores aproximados ΔH_1 , ΔH_2 y ΔH_3 para el j-ésimo intervalo. La pendiente, dH/dt, aproximada por $\Delta H/\Delta t$, se evalúa primero en (H_j, t_j) luego en $(H_j + \Delta H_1/3, t_j + \Delta t/3)$ y finalmente en $(H_j + 2\Delta H_2/3, t_j + 2\Delta t/3)$. En las ecuaciones,

Las siguientes ecuaciones son:

$$\Delta H_1 = \frac{I(t_j) - Q(H_j)}{A(H_j)} \Delta t$$

$$\Delta H_2 = \frac{I\left(t_j + \frac{\Delta t}{3}\right) - Q\left(H_j + \frac{\Delta H_1}{3}\right)}{A\left(H_j + \frac{\Delta H_1}{3}\right)} \Delta t$$

$$\Delta H_3 = \frac{I\left(t_j + \frac{2\Delta t}{3}\right) - Q\left(H_j + \frac{2\Delta H_2}{3}\right)}{A\left(H_j + \frac{2\Delta H_2}{3}\right)} \Delta t$$

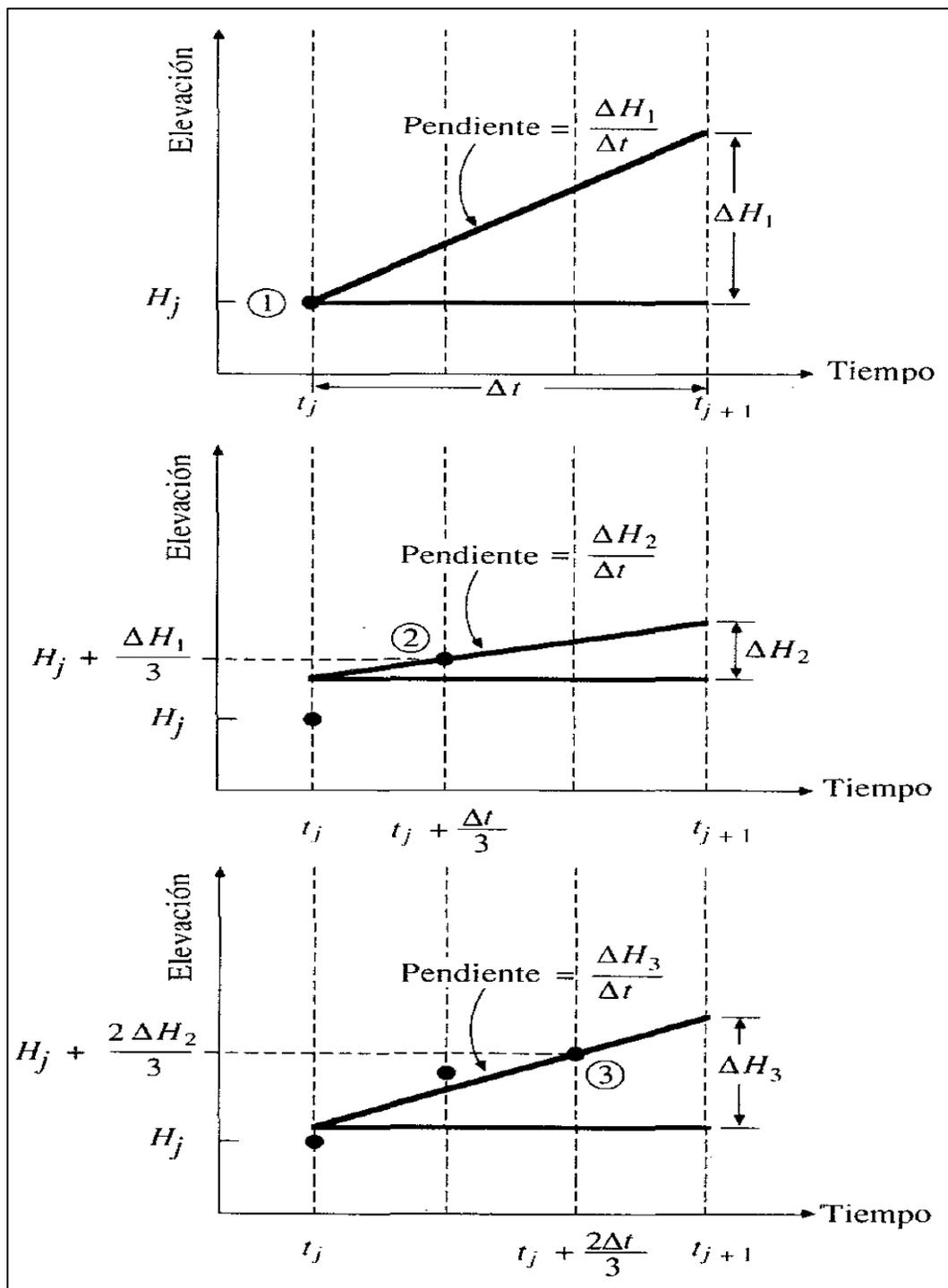
El valor de H_{j+1} está dado por:

$$H_{j+1} = H_j + \Delta H$$

Donde

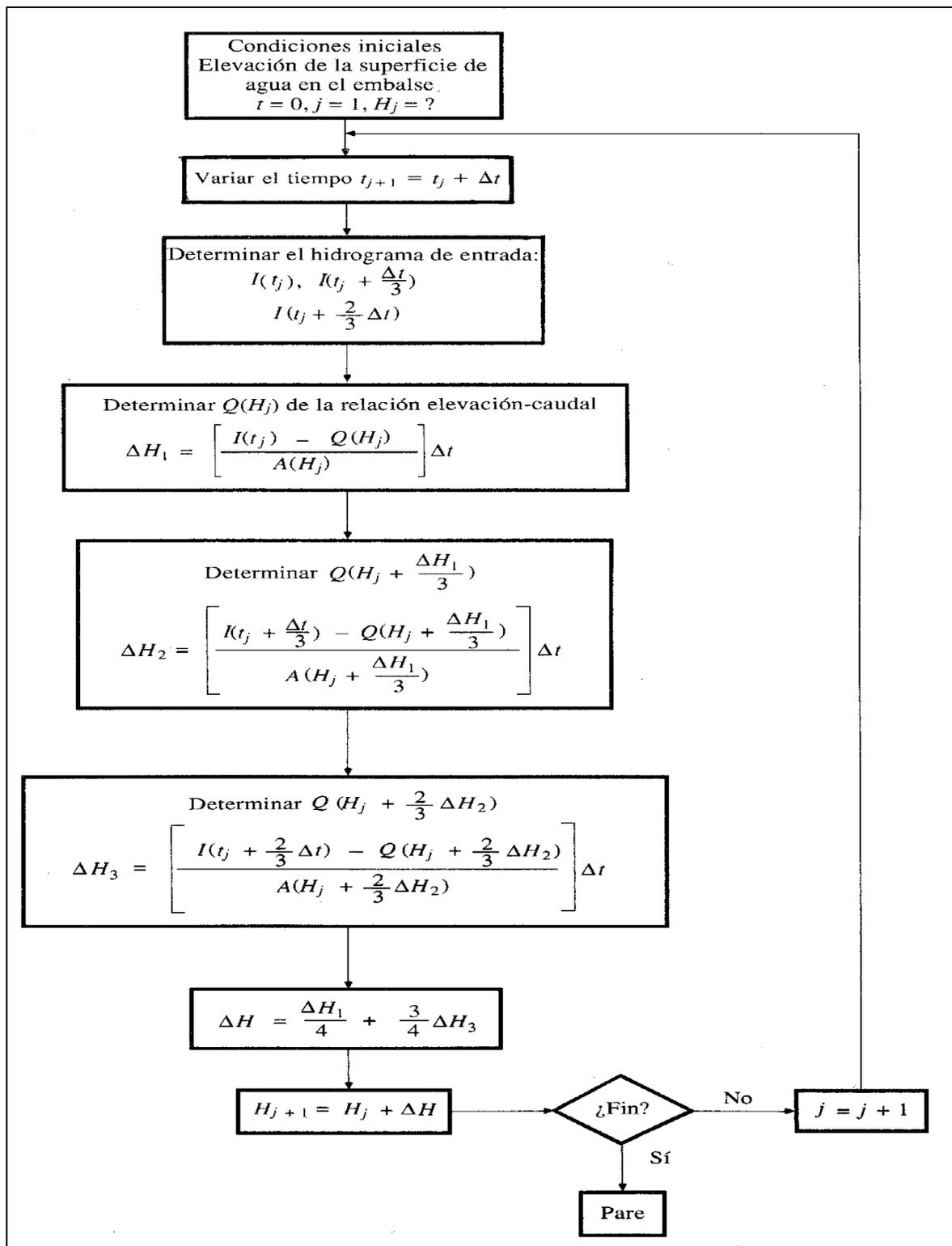
$$\Delta H = \frac{\Delta H_1}{4} + \frac{3\Delta H_3}{4}$$

FIGURA 2.9. PASOS A DEFINIR LOS INCREMENTOS DE ELEVACION



Fuente: Hidrología Aplicada Ven te Chow.

FIGURA 2.10 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL MÉTODO DE TERCER ORDEN DE RUNGE - KUTTA



Fuente: Hidrología Aplicada Ven te Chow.

Diagrama de flujo para el tránsito de embalses en detención utilizando la técnica de Runge – kutta de tercer orden.

MODELO DE EMBALSE LINEAL

Un embalse lineal es aquel en el cual el almacenamiento está linealmente relacionado con su caudal de salida mediante una constante de almacenamiento k , que tiene dimensiones de tiempo:

$$S = kQ$$

El concepto de embalse lineal fue introducido por primera vez por Zoch en 1934 en un análisis de la relación entre lluvia y escorrentía. Un embalse lineal único es equivalente a considerar el modelo de Muskingum con $X = 0$.

El comportamiento de una cuenca puede representarse por medio de una serie de n embalses lineales idénticos, cada uno de ellos con una misma constante de almacenamiento k (Nash 1957). Transitando un flujo de entrada de volumen unitario a través de los n embalses lineales, puede deducirse un modelo matemático para el hidrógrama unitario instantáneo de la serie. La integral de convolución en forma continua puede expresarse como:

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau)u(t - \tau)d\tau$$

La función impulso-respuesta para un embalse lineal fue deducida como:

$$u(t - \tau) = \frac{1}{k} e^{-\left(\frac{t-\tau}{k}\right)}$$

por lo que el caudal de salida del primer embalse lineal, considerando una entrada $I(\tau) = 1$ y un caudal inicial $Q_0 = 0$, estará dado por:

$$Q_1(t) = \int_0^t \frac{1}{k} e^{-\left(\frac{t-\tau}{k}\right)} d\tau$$

Si este caudal se usa como entrada para el segundo embalse lineal, su caudal de salida puede obtenerse como:

$$Q_2(t) = \int_0^t \frac{1}{k} e^{-\frac{t}{k}} \frac{1}{k} e^{-\left(\frac{t-\tau}{k}\right)} d\tau = \frac{1}{k^2} e^{-\frac{t}{k}}$$

Si este caudal se usa como entrada para el tercer embalse lineal y así sucesivamente para n embalses lineales, el caudal de salida del embalse n será:

$$Q_n(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{k}}$$

Siendo $\rho(n) = (n - 1)!$ Cuando n no es un número entero, el valor de Γ puede obtenerse de tablas de la función gamma (Abramowitz y Stegun 1965). La ecuación obtenida de $Q_n(t)$ puede considerarse como el hidrógrama unitario instantáneo de la serie de n embalses lineales y también es conocida como la función de probabilidad gamma. Puede comprobarse que la integral de esta ecuación para t desde 0 hasta infinito es igual a 1. También puede demostrarse que el primer y segundo momentos del HUI alrededor del origen $t = 0$ son:

$$M_1 = nk \quad \text{y} \quad M_2 = n(n + 1)k^2$$

El primer momento, M_1 es el tiempo de retardo del centroide del HUI y debe ser equivalente a la diferencia de tiempo entre los centroides de las áreas del hietograma de lluvia neta y el hidrógrama de escorrentía directa (Chow 1994).

Utilizando los conceptos anteriores, teniendo como datos el hietograma de lluvia neta y su correspondiente hidrógrama de escorrentía directa de una cuenca, podría calcularse los parámetros n y k correspondientes a dicha cuenca y con los cuales puede obtenerse su HUI.

El cálculo de n y k se realiza a través de la resolución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$M_{Q1} - M_{I1} = nk$$

$$M_{Q2} - M_{I2} = n(n + 1)k^2 + 2nkM_{I1}$$

Donde M_{I1} y M_{I2} son el primer y segundo momentos, respectivamente, del hietograma de precipitación neta dividido por la lluvia efectiva total y M_{Q1} y M_{Q2} son el primer y segundo momentos, respectivamente, del hidrógrama de escorrentía directa dividido por la escorrentía directa total.

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

PROPAGACIÓN DISTRIBUIDA O HIDRÁULICA

Los métodos hidráulicos de propagación se basan en la resolución de las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento para flujo no permanente unidimensional, también conocidas como ecuaciones de Saint-Venant. La ecuación de conservación de la masa o de continuidad está dada, en su forma no conservativa, es decir, para un ancho unitario de flujo, por:

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

y la ecuación que expresa la conservación de la cantidad de movimiento, también en forma no conservativa, es:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

En ambas ecuaciones, V es la velocidad media del flujo en una sección transversal, y es el calado o nivel de agua en dicha sección, g es la aceleración gravitatoria, S_0 es la pendiente de fondo del tramo de cauce considerado, S_f es la pendiente de fricción de dicho tramo de cauce y x y t son las variables independientes, el espacio y el tiempo, respectivamente.

Las hipótesis que se tienen en cuenta para la validez de las ecuaciones de Saint-Venant son las siguientes:

- 1.- El flujo es unidimensional: el calado y la velocidad varían sólo en la dirección longitudinal; la velocidad es constante y la superficie del agua horizontal en cualquier sección transversal perpendicular al eje del cauce.
2. El flujo varía gradualmente a lo largo del canal, lo que implica que la distribución de presiones es hidrostática y que las aceleraciones verticales son despreciables.
3. El eje del cauce es una línea recta.
4. La pendiente del fondo es pequeña y el lecho es fijo, lo que implica que no hay erosión ni sedimentación.
5. Los coeficientes de resistencia para flujo uniforme permanente turbulento son aplicables, por ejemplo, se utiliza la ecuación de Manning para describir el efecto de la resistencia.
6. El fluido es incompresible y de densidad constante.

Cada uno de los términos con los que cuenta la ecuación de cantidad de movimiento tiene en cuenta alguno de los procesos físicos que gobiernan la movimiento del fluido:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g S_0 + g S_f = 0$$

Aceleración local	Aceleración convectiva	Fuerza de presión	Fuerza de gravedad	Fuerza de fricción
-------------------	------------------------	-------------------	--------------------	--------------------

- Aceleración local: variación de cantidad de movimiento debido al cambio de velocidad con el tiempo.

- Aceleración convectiva: variación de cantidad de movimiento debido al cambio de velocidad a lo largo del canal.
- Fuerza de presión: variación en la presión producida por un cambio en la profundidad del agua.
- Fuerza de gravedad: fuerza que mueve al fluido, proporcional a su peso y a la pendiente del lecho.
- Fuerza de fricción: resistencia a la fricción ocasionada por las paredes del cauce.

Los dos términos de aceleración representan el efecto de las fuerzas de inercia en el flujo. Los efectos de remanso pueden incorporarse en la propagación distribuida a través de los tres primeros términos de la ecuación de la cantidad de movimiento.

Los métodos hidrológicos no poseen mecanismos hidráulicos para describir la propagación aguas arriba de los cambios de flujo de cantidad de movimiento porque están basados sólo en la ecuación de continuidad.

La clasificación de los modelos de propagación distribuida se realiza en función del número de términos de la ecuación de la cantidad de movimiento que se utilizan para el cálculo.

El modelo de la onda cinemática desprecia los términos de aceleración y el de presión, por lo que la ecuación de la cantidad de movimiento quedaría como:

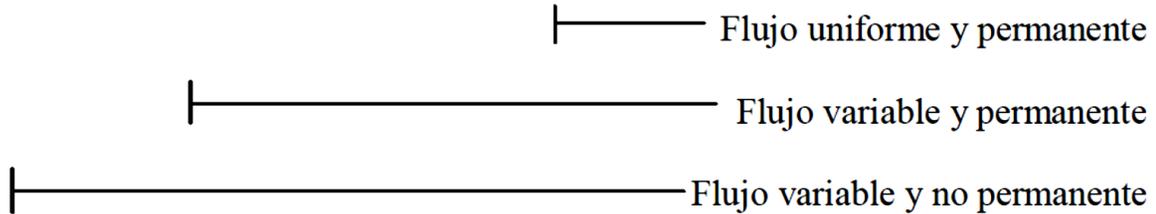
$$S_0 = S_f$$

El modelo de la onda difusiva desprecia los términos de aceleración y la ecuación de la cantidad de movimiento queda:

$$\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f = 0$$

Finalmente, el modelo de la onda dinámica considera todos los términos de la ecuación. La ecuación de conservación de cantidad de movimiento puede escribirse también en formas que tienen en cuenta si el flujo es permanente o no permanente y uniforme o variable.

$$-\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x} + S_0 = S_f$$



Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

PROPAGACIÓN MEDIANTE EL MODELO DE LA ONDA CINEMÁTICA

Como se vio anteriormente, en el modelo de la onda cinemática, la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento queda expresada como:

$$S_0 = S_f$$

Donde S_0 es la pendiente del fondo del cauce en el tramo considerado, calculable a partir de información topográfica o batimétrica y S_f es la pendiente de fricción o de la línea de energía del flujo, calculable a partir de alguna fórmula de resistencia, como por ejemplo la de Manning.

Si expresamos la velocidad media del flujo a través de la ecuación de Manning, el caudal sería igual a:

$$Q = AV = A \frac{R_h^{2/3} S_0^{1/2}}{n} = A^{5/3} \cdot \frac{S_0^{1/2}}{nP^{2/3}}$$

Donde A es el área de la sección transversal y P es el perímetro mojado. Despejando A, tenemos:

$$A = \left(\frac{nP^{2/3}}{S_0^{1/2}} \right)^{3/5} Q^{3/5} = \alpha Q^B$$

Donde hemos llamado:

$$\alpha = [nP^{2/3}/S_0^{1/2}]^{3/5} \text{ y } \beta = 3/5$$

Si derivamos A con respecto al tiempo, nos queda:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha\beta Q^{\beta-1} \frac{\partial Q}{\partial t}$$

que sustituyendo en la ecuación de la continuidad en forma conservativa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

nos da:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha\beta Q^{\beta-1} \frac{\partial Q}{\partial t} = 0$$

Las ondas cinemáticas son resultado de cambios en el caudal, Q. La derivada total del caudal

con respecto al espacio, x, es igual a:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x}$$

Comparando esta ecuación con la de la continuidad en su forma conservativa, vemos que son idénticas si:

$$\frac{dQ}{dx} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\alpha\beta Q^{\beta-1}}$$

Con lo que queda demostrado que:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dQ}{dA} = c_k$$

que es la celeridad de la onda cinemática. Ésto significa que un observador moviéndose a una velocidad c_k , vería que $dQ/dx = 0$, es decir, que el caudal es constante. Estas dos últimas ecuaciones son las ecuaciones características para una onda cinemática, es decir, dos ecuaciones diferenciales ordinarias que son matemáticamente equivalentes a las ecuaciones de la continuidad y de la cantidad de movimiento.

Si derivamos el caudal, Q , con respecto al área, A , utilizando la ecuación de Manning, considerando n , S_0 y P constantes, lo que es aproximadamente cierto cuando se trata de cauces mucho más anchos que profundos, podemos encontrar que la celeridad, c_k es igual a:

$$c_k = \frac{dQ}{dA} = \frac{5}{3} \left(\frac{S_0^{1/2}}{nP^{2/3}} \right) A^{2/3} \frac{A}{A} = \frac{5}{3} \left(\frac{S_0^{1/2}}{nP^{2/3}} \right) \frac{A^{5/3}}{A} = \frac{5}{3} \frac{Q}{A} = \frac{5}{3} V$$

Es decir, que la celeridad de la onda cinemática es superior a la velocidad media del flujo y utilizando la ecuación de Manning, igual a $5/3$ la velocidad media del flujo.

Solución analítica de la onda cinemática

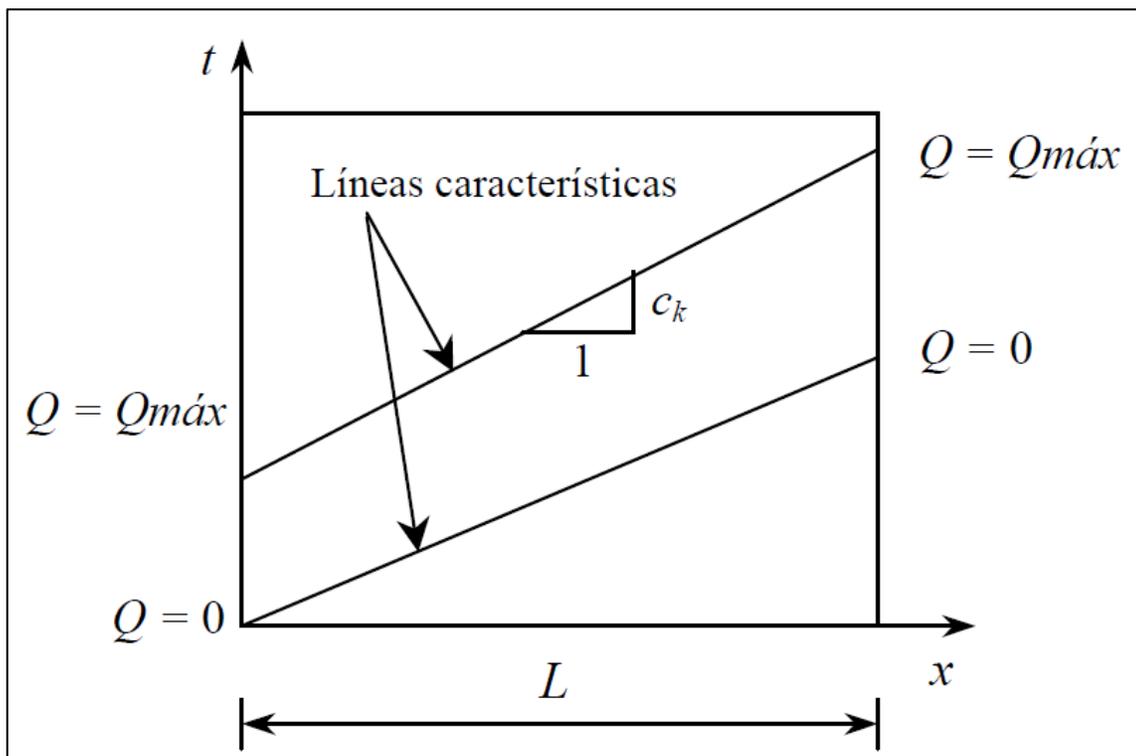
Para resolver el valor de Q en función del tiempo, a una distancia L del extremo aguas arriba del cauce, es necesario conocer las condiciones iniciales, es decir, el valor de Q en todo punto del espacio para $t = 0$ y las condiciones de contorno, es decir, el valor de Q en todo instante de tiempo para $x = 0$. Las condiciones iniciales podrían ser las de un caudal base uniforme a todo lo largo del cauce analizado en el instante $t = 0$ y las condiciones de contorno podrían ser las de un hidrógrama de entrada en el extremo aguas arriba del cauce, en el punto $x = 0$.

Las ecuaciones características nos dicen que $dQ/dx = 0$, es decir, que el caudal es constante si nos movemos a una velocidad igual a la celeridad de la onda:

$$c_k = \frac{dx}{dt}$$

Lo que se intenta esquematizar en la Figura 2.11

FIGURA 2.11: TRÁNSITO DE UNA ONDA CINEMÁTICA A LO LARGO DE UN CAUCE DE LONGITUD L.



Fuente: Leonardo S. Nadia (2003)

Quiere decir, que en el modelo de la onda cinemática el caudal no se atenúa nunca. Si integramos la ecuación de la celeridad a todo lo largo del cauce, nos queda:

$$\int_0^L dx = \int_{t_0}^t c_k dt \Rightarrow L = c_k (t - t_0)$$

Luego el tiempo en el cual un caudal Q transitará desde el extremo aguas arriba del cauce hasta el extremo aguas abajo será:

$$t = t_0 + \frac{L}{c_k}$$

En este caso particular las líneas características son rectas porque hemos considerado que el caudal no varía a lo largo del tramo del cauce, pero si existiera un caudal lateral de entrada o salida, estas líneas serían curvas.

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

SOLUCIÓN ANALÍTICA LINEAL PARA LA ONDA CINEMÁTICA

La solución analítica para la onda cinemática consiste en resolver numéricamente, en cada uno de los puntos de una malla $x-t$, la ecuación:

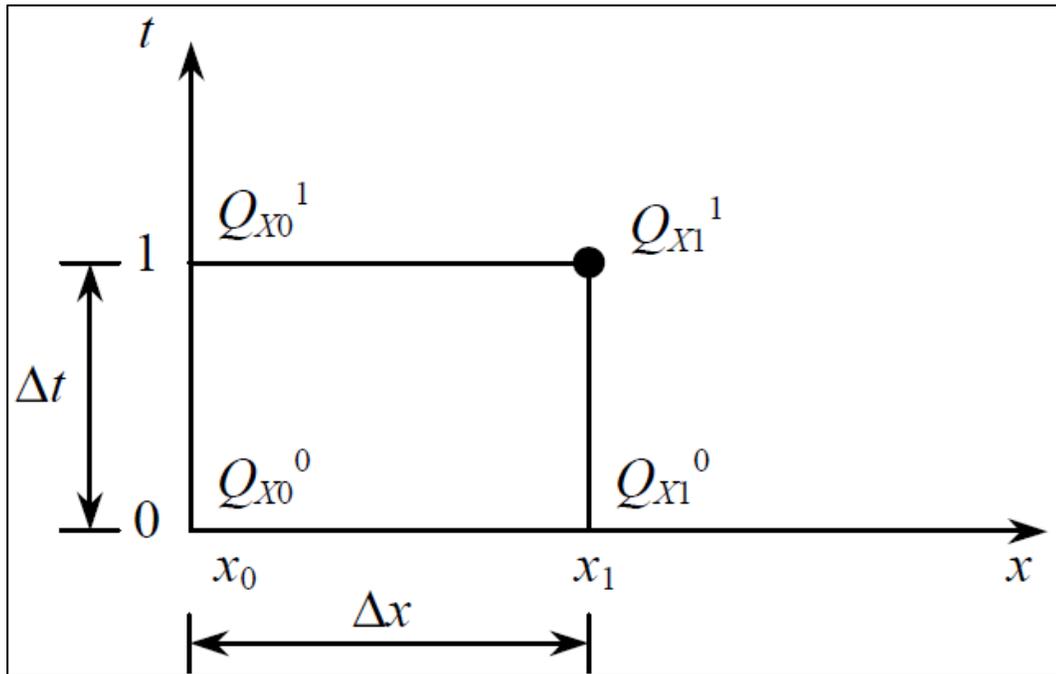
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \beta Q^{\beta-1} \frac{\partial Q}{\partial t} = 0$$

para unos parámetros α y β dados de un canal y unas determinadas condiciones iniciales y de contorno. Utilizando aproximaciones por diferencias finitas, para resolver el flujo en una malla $x-t$ tal como la mostrada en la Figura 2.12, la ecuación anterior quedaría:

$$\frac{Q_{X1}^1 - Q_{X0}^1}{\Delta x} + \alpha \beta \left(\frac{Q_{X0}^1 + Q_{X1}^0}{2} \right)^{\beta-1} \left(\frac{Q_{X1}^1 - Q_{X1}^0}{\Delta t} \right) = 0$$

en la cual se resolvería el valor de Q_{X1}^1 en función de los valores conocidos, bien de las condiciones iniciales y de contorno o bien de los valores obtenidos en instantes de tiempo y espacio anteriores, Q_{X1}^0 y Q_{X0}^1 .

FIGURA 2.12: ESQUEMA EN DIFERENCIAS FINITAS PARA RESOLVER LA ECUACIÓN DE LA ONDA CINEMÁTICA.



Fuente: Leonardo S. Nadia (2003)

Este esquema de diferencias finitas mostrado es el llamado de diferencias finitas hacia atrás y necesita para ser resuelto sólo valores de aguas arriba. Por este motivo, el modelo es insensible a la influencia del flujo aguas abajo. Este esquema también se llama explícito, porque cada valor de la incógnita Q_{x1}^1 se calcula uno a uno en cada punto de la malla, y cuyo valor quedaría dado por:

$$Q_{x1}^1 = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{x0}^1 + \alpha\beta Q_{x1}^0 \left(\frac{Q_{x0}^1 + Q_{x1}^0}{2} \right)^{\beta-1} \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha\beta \left(\frac{Q_{x0}^1 + Q_{x1}^0}{2} \right)^{\beta-1} \right]}$$

Para que un esquema explícito sea estable, el tamaño de la malla de cálculo debe cumplir en todo momento con la condición de Courant-Friedrichs, que es necesaria pero no suficiente y está dada por:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_k}$$

SOLUCIÓN ANALÍTICA NO LINEAL PARA LA ONDA CINEMÁTICA

En el esquema no lineal, se resuelve por diferencias finitas la ecuación:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

utilizando la aproximación:

$$A = \alpha Q^\beta$$

para resolver A, quedando:

$$\frac{Q_{X1}^1 - Q_{X0}^1}{\Delta x} + \left(\frac{\alpha Q_{X1}^{1\beta} - \alpha Q_{X1}^{0\beta}}{\Delta t} \right) = 0$$

Reordenando de tal manera que en el lado izquierdo quede la incógnita:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{X1}^1 + \alpha Q_{X1}^{1\beta} = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{X0}^1 + \alpha Q_{X1}^{0\beta}$$

Que es una solución no lineal de la incógnita Q_{X1}^1 .

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

PROPAGACIÓN MEDIANTE EL MODELO DE LA ONDA DIFUSIVA

En el modelo de la onda difusiva, la ecuación de continuidad puede escribirse:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{A}{b} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

y la ecuación de la cantidad de movimiento sería, despreciando los términos de inercia:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f$$

Combinando ambas ecuaciones se puede llegar a una ecuación diferencial única de tipo parabólico análoga en estructura y forma a la ecuación de difusión del calor. Necesita dos condiciones de contorno, aguas arriba y aguas abajo, permite representar la laminación y es válida para todo tipo de cauces y flujos (supercrítico y subcrítico).

Es un modelo adecuado para casos en que los hidrógramas tienen subidas suaves, es decir, sin mucha inercia.

PROPAGACIÓN MEDIANTE EL MODELO DE LA ONDA DINÁMICA

En este caso, se usan todos los términos de la ecuación de la cantidad de movimiento y la forma de la solución cambia a tipo hiperbólico. Este modelo tiene en cuenta todas las fuerzas que actúan en el fluido y también necesita de condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo.

El aumento de tiempo de cálculo con respecto al modelo de la onda difusiva no es muy grande, por lo cual normalmente se prefiere trabajar con las ecuaciones completas.

Fuente: Hidrología Aplica: Ven Te Chow

2.4. LIMITACIÓN DE LOS MÉTODOS DE LAMINACIÓN

Los métodos de laminación o propagación de caudales nos limitan tanto por no tener mucha información de éstos tales como:

- Modelo de embalse lineal

Este método es un método fue modelado solamente para embalses, pero limitado su manejo por no conocer mucho sobre este método y no hay referencias para el huso del metodo.

Existe otros métodos pero que son más propiamente dichos de huso en propagación de causes (para ríos) a continuación se nombrará los métodos:

- Propagación mediante el método de la onda cinemática.
- Método de Muskingum-Cunge.
- Propagación mediante el método de la onda difusiva.
- Propagación mediante el método de la onda dinámica.

De estos métodos el que tiene una relación directa es el Muskingum-Cunge, con el método de Muskingum que también puede utilizarse en propagación de embalses con ciertas condiciones.

Los métodos utilizados en el proyecto son:

Propagación de embalse a nivel o llamado también como piscina nivelada.- Este método es el más conocido en nuestro medio y el más utilizado.

Propagación de embaces por el método Muskingum.- Este método no se conoce mucho pero parte de coeficientes que están basados en la hidrología y característica del vaso.

Método de Muskingum-Cunge.- Este método está relacionado en el método de la onda cinemática.

Los métodos de la onda difusiva, el método de la onda dinámica no se los utilizó por no tener información de éstos para aplicar en propagación de caudales en embalses.

2.5. IMPORTANCIA DEL VERTEDERO

La determinación del tipo de vertedero es importante para su diseño. Los vertederos son estructuras hidráulicas diseñadas para evacuar las aguas en crecidas de los ríos, también su ubicación porque con esta estructura se garantizaría la protección de la presa, los vertederos se pueden ubicar en distintas partes de la presa se pueden encontrar en el cuerpo de la presa fuera de la presa o también en los laterales de la presa. Existen distintos tipos de vertederos

- a) **Los tipos de lámina vertiente en los vertederos.** Cuando el aire atmosférico rodea completa y externamente a la lámina vertiente y ésta se despega totalmente de la cara de aguas abajo del vertedero, se dice que éste es de lámina libre.

En el caso de un vertedero rectangular, sin contracciones laterales, esto es, con longitud de cresta igual al ancho de la plantilla del canal de acceso, el espacio situado bajo la lámina de agua estará incomunicado con la atmósfera exterior, y el escurrimiento puede tomar una de las siguientes formas:

Lámina libre. Ya descrita anteriormente. Se obtiene mediante la instalación de orificios de ventilación en las paredes del canal.

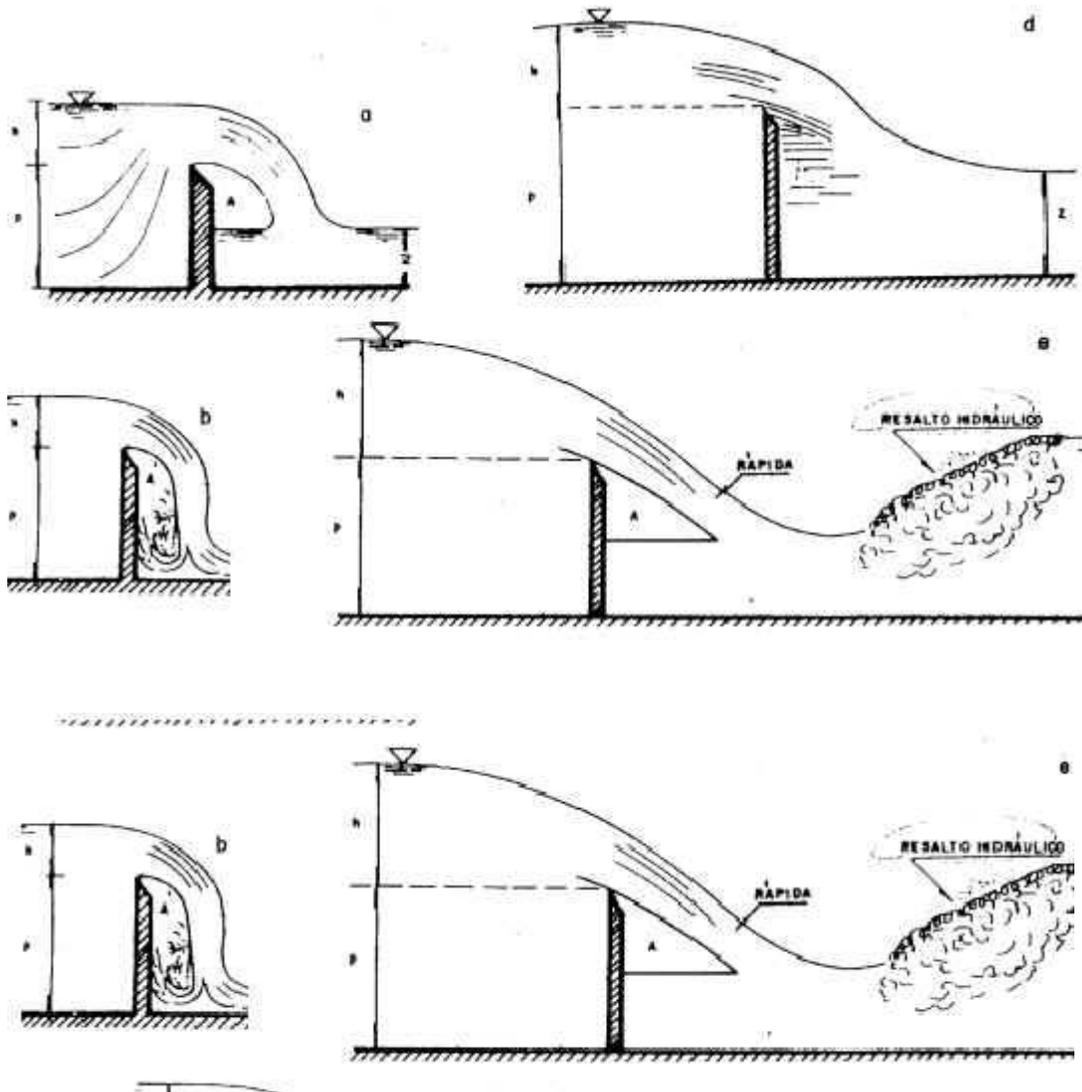
Lámina abatida. Se presenta cuando la ventilación es insuficiente, lo cual permite el enrarecimiento del aire situado debajo de la lámina, disminuyendo su presión. Debido a la presión atmosférica que actúa sobre ella, tiende a adherirse al vertedero.

Lámina adherente. Es el caso de menor aireación de la lámina vertiente; es decir, la ventilación por debajo de la lamina vertiente es nula. Se presenta para pequeñas cargas H , en cuyo caso la velocidad es insuficiente para despegar la lámina.

Lámina ahogada inferiormente. Ocurre al aumentar la carga de un vertedero de lámina adherente, sin que el aire pueda entrar por debajo del manto inferior de la lámina, como se muestra en la figura.2.13 b el espacio A se llena de agua, constituyendo una zona muerta y turbulenta, sin participar en el escurrimiento general.

2.5.1. TIPOS DE VERTEDERO

FIGURA.2.13 TIPOS DE VERTEDEROS



Fuente: Hidráulica General, Gilberto Sotelo Ávila

Cuando, en un vertedero de lámina libre, la carga es bastante grande se produce una rápida al pie de la placa del vertedero (una rápida) o rápido es un flujo de gran velocidad, con lámina deprimida, que normalmente se presenta en un canal cuando este cambia de pendiente suave a una pendiente fuerte); posteriormente, un poco aguas abajo, el flujo adquiere su velocidad normal y, dadas las condiciones de régimen subcrítico aguas abajo, se forma un resalto hidráulico, como se ve en la figura.

Clasificación de los vertederos. Los vertederos se clasifican de acuerdo a diversos aspectos:

- Vertederos de pared delgada (e/h menor 0.67)
- Vertederos de pared gruesa o de cresta ancha (e/h menor o igual 0.67)

FIGURA. 2.14 PARED DE VERTEDERO

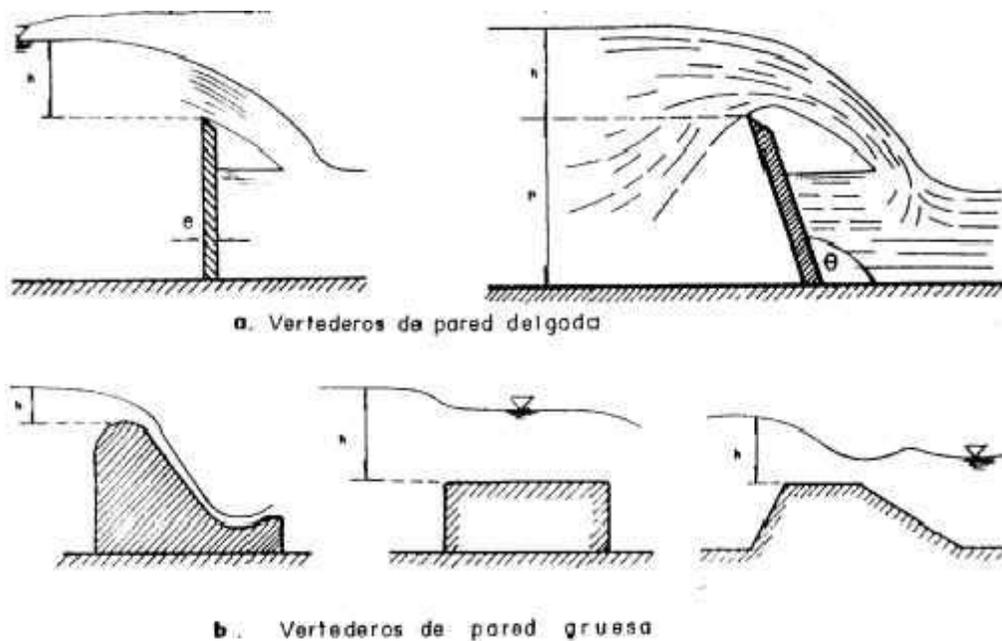
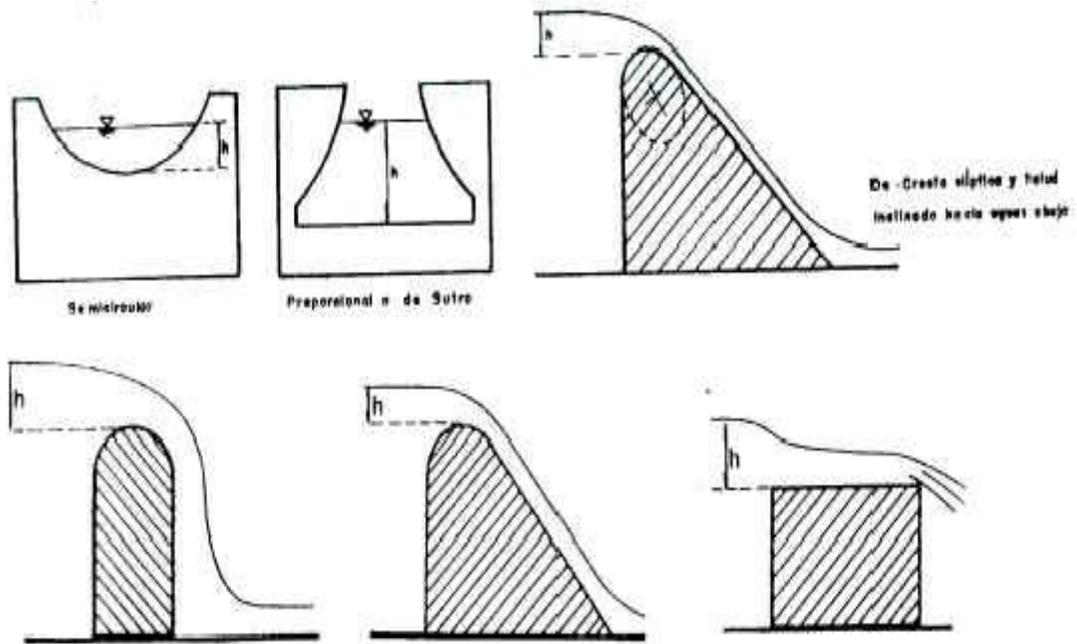
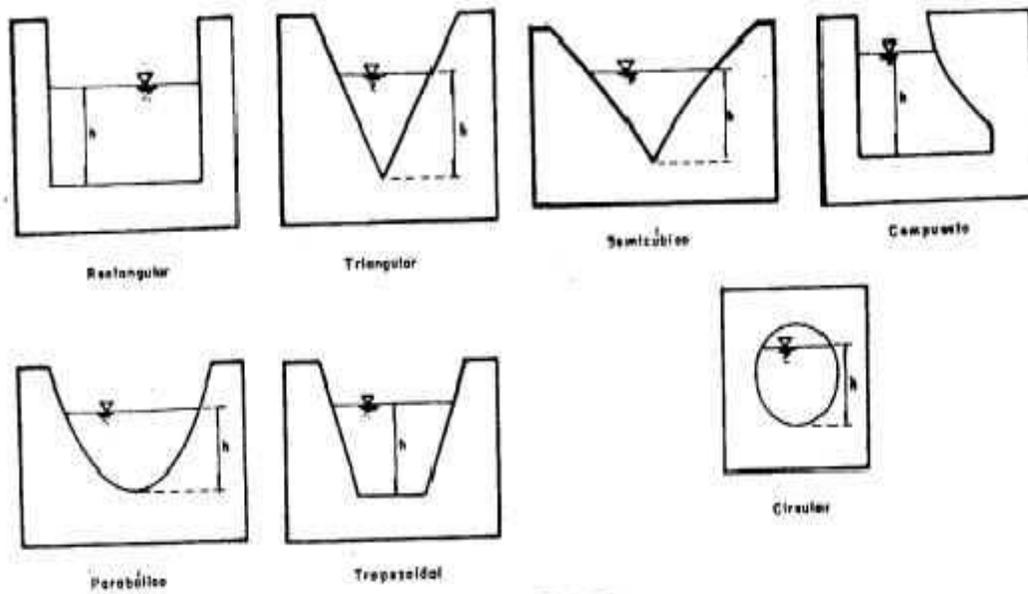


FIG. 2.15. SEGÚN SU FORMA GEOMÉTRICA





Fuente: Fundamentos para la practica de Laboratorio de Hidráulica; Ramiro Marbello Perez

Vertederos de pared delgada:

Rectangulares de arista viva

Crager

Triangulares de cresta redondeada y talud vertical

Trapezoidales cresta redondeada y talud inclinado

Circulares de cresta elíptica y talud inclinado

Semicirculares

Parabólicos

Simétricos

Asimétricos

Exponenciales

Vertederos de pared gruesa:

Vertedero Cimacio o de

Él más importante de los vertederos de pared gruesa es aquel cuyo perfil coincide con la forma del perfil inferior de lámina vertiente, perfectamente ventilada, sobre un vertedero hipotético de pared delgada. A este tipo se le conoce con el nombre de cimacio y fue

W.P. Creager el primero en idearlo, éste es el tipo de vertedero que se eligió para el proyecto.

Parámetros básicos

Se ha observado que para cualquier vertedero la superficie del agua sobre la cresta e inmediatamente atrás de ella, asume la forma de una curva, originando una superficie de contracción, llamada curva de remanso. Se define la carga H como la distancia vertical entre la cresta del vertedero y la superficie del agua en un punto donde ésta no sea afectada por la curvatura.

Se recomienda que H se mida a una distancia igual o superior a $5H$, otros autores recomiendan que esta distancia sea por lo menos $6H$, en general puede dejarse a criterio del ingeniero buscando en todos los casos el mayor remanso.

2.5.2. DISEÑO HIDRÁULICO DEL VERTEDERO

El diseño hidráulico es del vertedero de excedencias se diseñara para una sola longitud

El diseño del vertedero esta en función del caudal pico.

El cálculo se muestra en el Anexo N° 5 Se adopto el perfil Creager donde la longitud es de 60.0 m y la altura de la cresta es de 2.0 m

2.6. QUÉ ES EL CAUDAL MÁXIMO Y DE DISEÑO

TRANSFORMACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA

Una vez que se ha estudiado el régimen de precipitaciones de una cuenca, obtenido una lluvia de diseño asociada a un determinado periodo de retorno y estimado las pérdidas con alguno de los modelos disponibles, de manera tal de encontrar la lluvia

neta o efectiva, el paso siguiente es transformar esa lluvia efectiva en escorrentía o caudal.

Esta transformación puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos. El más popular es el del hidrograma unitario, introducido por Sherman en los años '30. También es posible la utilización de modelos de depósito y, si el nivel de información es el adecuado, también se pueden usar modelos basados en las ecuaciones del movimiento del fluido

El método del hidrograma unitario se basa en dos hipótesis:

- a) La respuesta de la cuenca ante el proceso de escorrentía sigue un comportamiento lineal. Ésto significa que son aplicables los principios de proporcionalidad y superposición.
- b) No se tiene en cuenta la variabilidad temporal de las características de la cuenca, de manera que una misma lluvia efectiva produce siempre el mismo hidrógrama de escorrentía directa.

Las condiciones que deben cumplirse en virtud de estas hipótesis son:

- a) La lluvia efectiva tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva: esta condición exige que las tormentas sean de corta duración, ya que la tasa de lluvia efectiva sería mayor y aproximadamente constante en el tiempo, produciendo un hidrograma mejor definido, con pico único y tiempo base corto.
- b) La lluvia efectiva está uniformemente distribuida a través de toda el área de drenaje: en virtud de esta condición, el área de drenaje no deberá ser muy grande o bien deberá ser subdividida en subcuencas de modo que se cumpla esta suposición. El orden de magnitud del límite superior que se maneja es de 300 a 400 km².
- c) El tiempo base del hidrógrama de escorrentía directa resultante de una lluvia efectiva de una duración dada es constante. Para que el comportamiento de la

cuenca sea considerado lineal, es necesario asumir que los hidrógramas de escorrentía superficial generados por lluvias netas de igual duración tienen el mismo tiempo base, independientemente de la intensidad de dichas lluvias netas. Esta consideración se extiende también, lógicamente, al tiempo de punta. La información hidrológica real no es completamente lineal, pero los resultados obtenidos suponiéndola lineal son lo suficientemente aproximados para fines prácticos.

CAUDAL DE DISEÑO

El caudal de diseño es fundamental para determinar las dimensiones del vertedero en función de un hidrograma de salida determinado por la laminación.

CAPÍTULO III:
INFORMACIÓN DISPONIBLE

ESTUDIOS DEL PROYECTO PRESA EL MOLINO

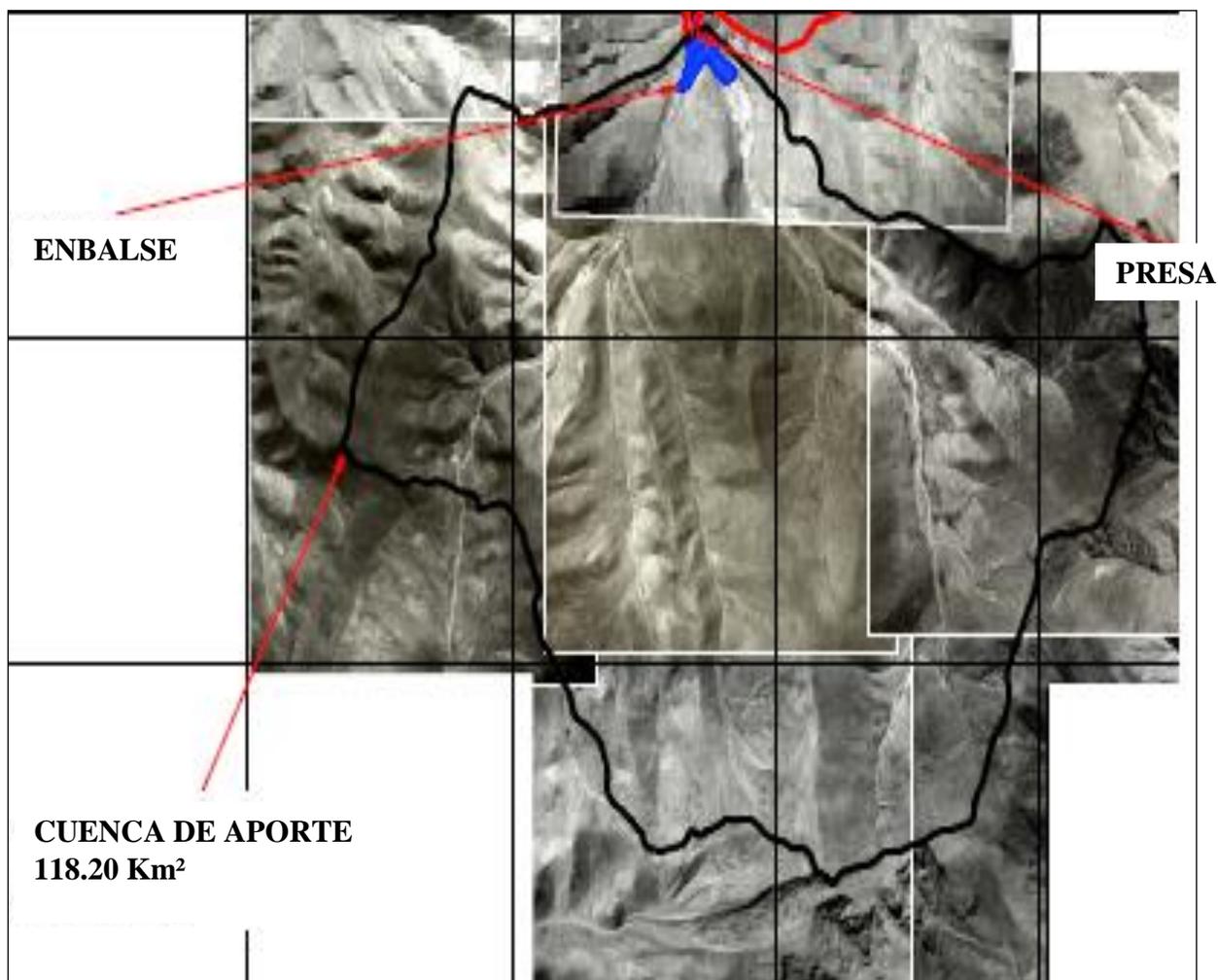
3.1 INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA

AEROFOTOGRAMETRÍA

Para tener una visión integral de la zona del proyecto, el Estudio mencionado realizó una composición de fotografías aéreas adquiridas por el Instituto Geográfico Militar (IGM) que cubre:

- Cuenca de aporte.
- Sitio de presa.

IMAGEN. 3.1 AÉREO FOTOGRAFÍA DE LA CUENCA



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo II: Topografía

3.1.1 CURVAS DE NIVEL

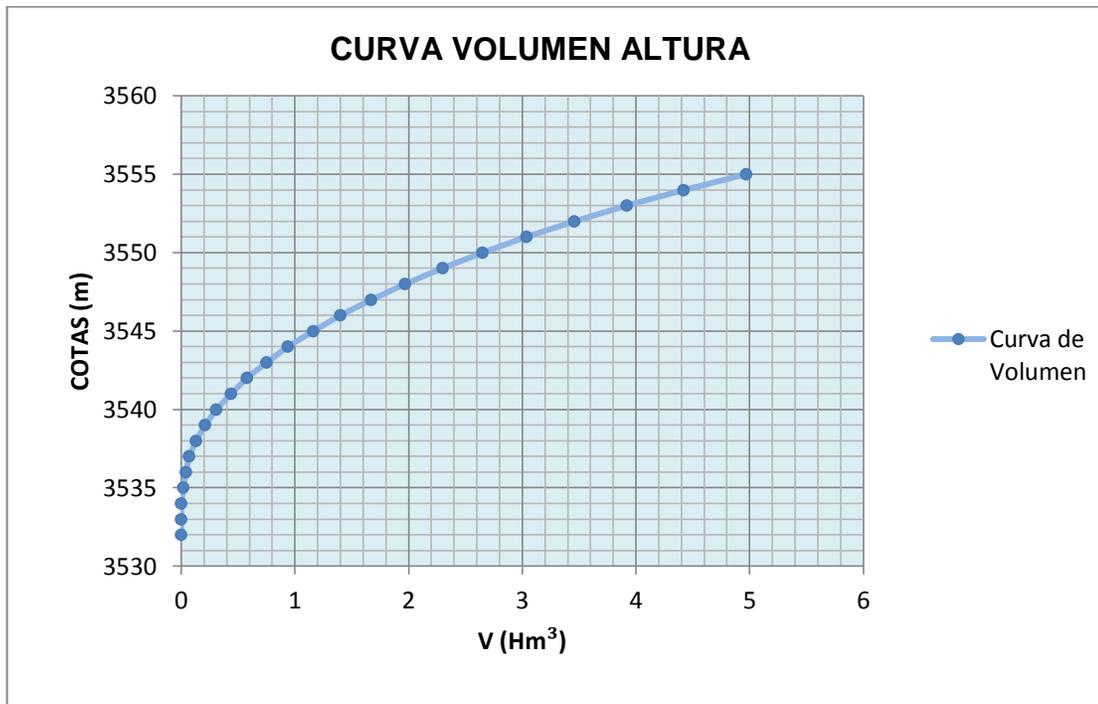
Las curvas de nivel determinan con exactitud las alturas en el vaso que serían muy importantes para determinar el volumen de agua en el vaso de almacenamiento de la presa y también el emplazamiento del cuerpo de la presa, se determina con altimetría y planimetría o con equipos sofisticados como la estación total y los GPSs.

CUADRO N° 3.1 TOPOGRAFÍA DEL EMBALSE DE DISEÑO

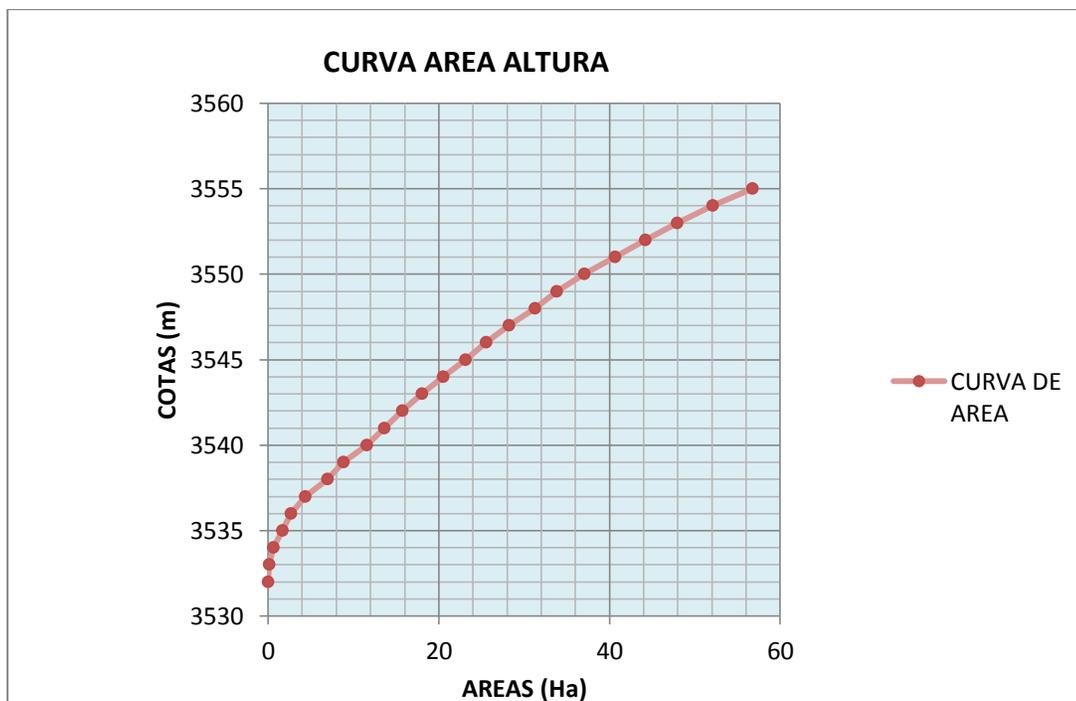
Cotas	Área		Volumen parcial		Altura (m)	Volumen Acumulado		Área %	Volumen %
	m ²	Has	m ³	Hm ³		m ³	hm ³		
3532	0	0	0	0	0	0	0,00	100	0,00
3533	859,11	0,09	429,56	0,00043	1	429,56	0,00	99,85	0,01
3534	6311,03	0,63	3585,07	0,00359	2	4014,63	0,00	98,89	0,08
3535	16635,00	1,66	11473,02	0,01147	3	15487,64	0,02	97,07	0,31
3536	26439,03	2,64	21537,02	0,02154	4	37024,66	0,04	95,34	0,75
3537	43414,09	4,34	34926,56	0,03493	5	71951,22	0,07	92,35	1,45
3538	69669,46	6,97	56541,78	0,05654	6	128492,99	0,13	87,72	2,59
3539	88497,71	8,85	79083,59	0,07908	7	207576,58	0,21	84,40	4,18
3540	115562,26	11,56	102029,99	0,10203	8	309606,56	0,31	79,62	6,23
3541	136238,58	13,62	125900,42	0,1259	9	435506,98	0,44	75,98	8,77
3542	157134,02	15,71	146686,30	0,14669	10	582193,28	0,58	72,30	11,72
3543	180239,40	18,02	168686,71	0,16869	11	750879,99	0,75	68,22	15,12
3544	204880,58	20,49	192559,99	0,19256	12	943439,98	0,94	63,88	18,99
3545	231183,22	23,12	218031,90	0,21803	13	1161471,88	1,16	59,24	23,38
3546	255373,55	25,54	243278,39	0,24328	14	1404750,27	1,40	54,97	28,28
3547	282338,93	28,23	268856,24	0,26886	15	1673606,51	1,67	50,22	33,69
3548	312572,97	31,26	297455,95	0,29746	16	1971062,46	1,97	44,89	39,68
3549	338151,90	33,82	325362,44	0,32536	17	2296424,89	2,30	40,38	46,23
3550	370273,32	37,03	354212,61	0,35421	18	2650637,50	2,65	34,72	53,36
3551	406315,90	40,63	388294,61	0,38829	19	3038932,11	3,04	28,36	61,18
3552	441595,16	44,16	423955,53	0,42396	20	3462887,64	3,46	22,14	69,71
3553	479360,42	47,94	460477,79	0,46048	21	3923365,43	3,92	15,48	78,98
3554	520900,52	52,09	500130,47	0,50013	22	4423495,90	4,42	8,16	89,05
3555	567169,94	56,72	544035,23	0,54404	23	4967531,13	4,97	0,00	100,00

Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo II: Topografía

CUADRO 3.2 CURVAS DE CAPACIDAD ALTURA VRS. ÁREA, VOLUMEN



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo II: Topografía



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo II: Topografía

3.2 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

La cuenca vertiente es la del río Tomayapo en sus nacientes, que luego discurre hasta desembocar en el río San Juan del Oro, que es importante tributario del río Pilcomayo.

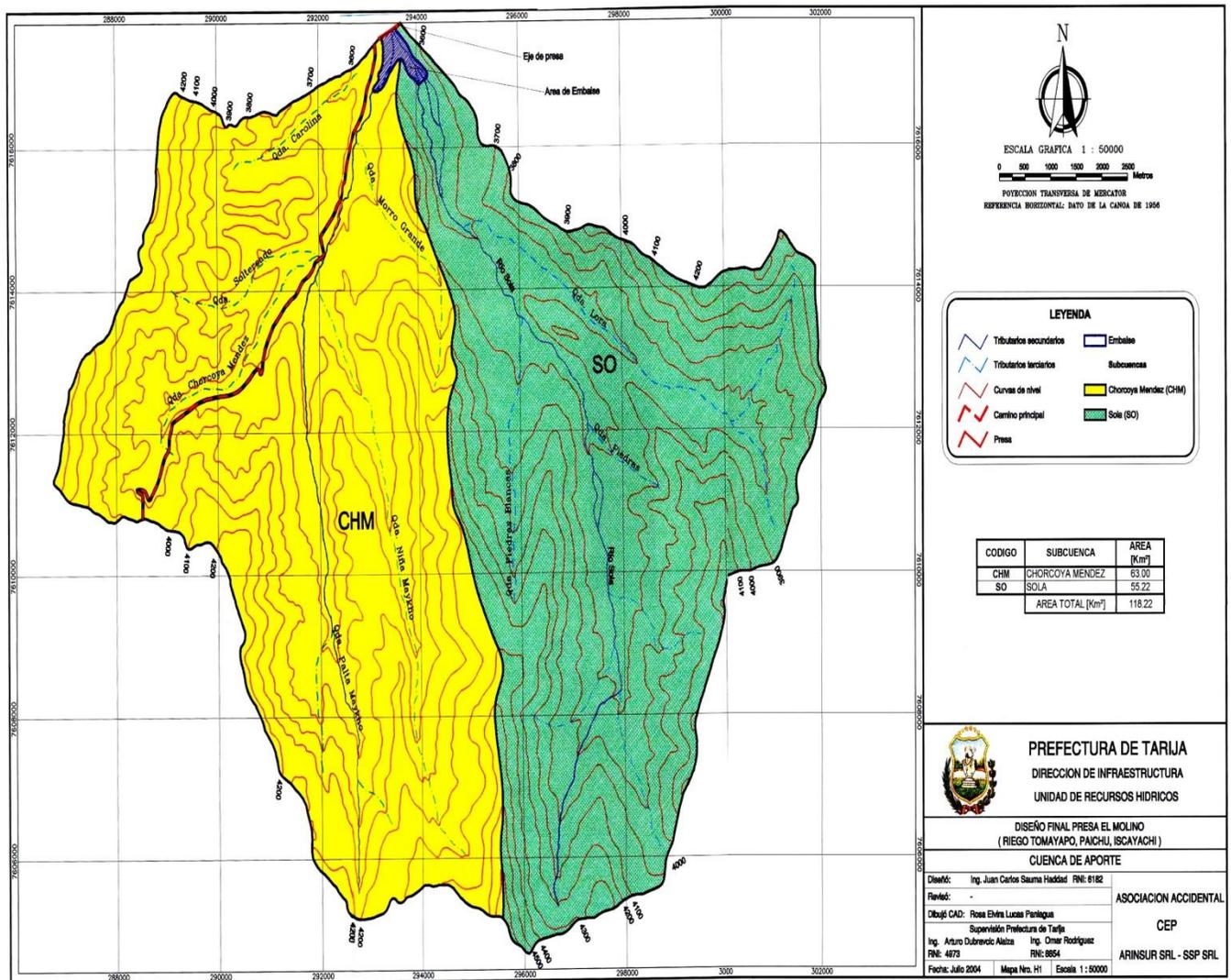
La presa está ubicada aguas abajo de la confluencia de las quebradas Sola, Lora, Chorcoya y Palta Maykho. El mapa N° 3.1 presenta la cuenca de aporte que tiene las siguientes características geométricas más importantes:

CUADRO N° 3.3 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

Cuenca (-)	Código (-)	Área Km ²	Long. Río (L) (Km)	Pendiente media (%)
Sola - Chorcoya	-	118,22	14,992	4,63

Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología subtítulo. 3

MAPA N° 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DE APORTE



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología Estudios básicos.

3.2.2 PRECIPITACIONES

Los registros del SENAMHI no son continuos y presentan diferentes vacíos. Por tanto, para elaborar las series de tiempo que permitan realizar cálculos, se eliminaron los años hidrológicos con importante falta de información.

Los registros disponibles son: I) Estación El Molino (22 años), II) Campanario (16 años) y III) Sama – Iscayachi (13 años).

3.2.3 PRECIPITACIONES MEDIAS

Considerando que las tres estaciones están fuera de la cuenca de aporte, el Estudio Diseño Final Presa El Molino, definió las precipitaciones medias ponderadas considerando sólo a las estaciones Campanario y El Molino con factores de peso de 0.7 y 0.3 respectivamente. Los factores de ponderación interpretan la proximidad de la estación Campanario a la cuenca de aporte, pero también el efecto de la serranía de Sama en las precipitaciones a través de la estación El Molino. La serie de tiempos compuesta incluye 15 años hidrológicos. Los valores de la estación Sama – Iscayachi, se utilizaron como control.

La variabilidad de las precipitaciones es importante y las series presentan un desvío estándar apreciable. Ésto significa que la disponibilidad de agua no puede determinarse sólo en términos de valores medios. La amplitud de los registros muestra que existe una gran diferencia entre los valores de un año seco y uno húmedo. Las primeras lluvias se presentan en el mes de Agosto.

3.2.4 PRECIPITACIONES MÁXIMAS

Las precipitaciones máximas determinarán los caudales máximos por los diferentes métodos de cálculo de hidrogramas.

Para el análisis de crecidas se utilizarón los registros de precipitación máxima en 24 Hrs.

De las estaciones:

- a) Campanario
- b) El Molino
- c) Sama – Iscayachi
- d) Tomayapo

3.2.5 CAUDALES MEDIOS

No existe información sobre caudales. Por tanto, se determinaron los caudales medios anuales y mensuales mediante la modelación matemática respectiva. La metodología utilizada consiste en determinar primero los aportes anuales, para luego estimar la distribución mensual del aporte. Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, pues se presentaron coeficientes medios anuales de escorrentía negativos para varios años hidrológicos estudiados. Esto se debe a que el aporte no es uniforme en el tiempo y se concentra en unos pocos meses del año que corresponden al verano. En este contexto, se elaboró un modelo conceptual para determinar los caudales medios anuales y su distribución mensual sobre la base de las siguientes hipótesis:

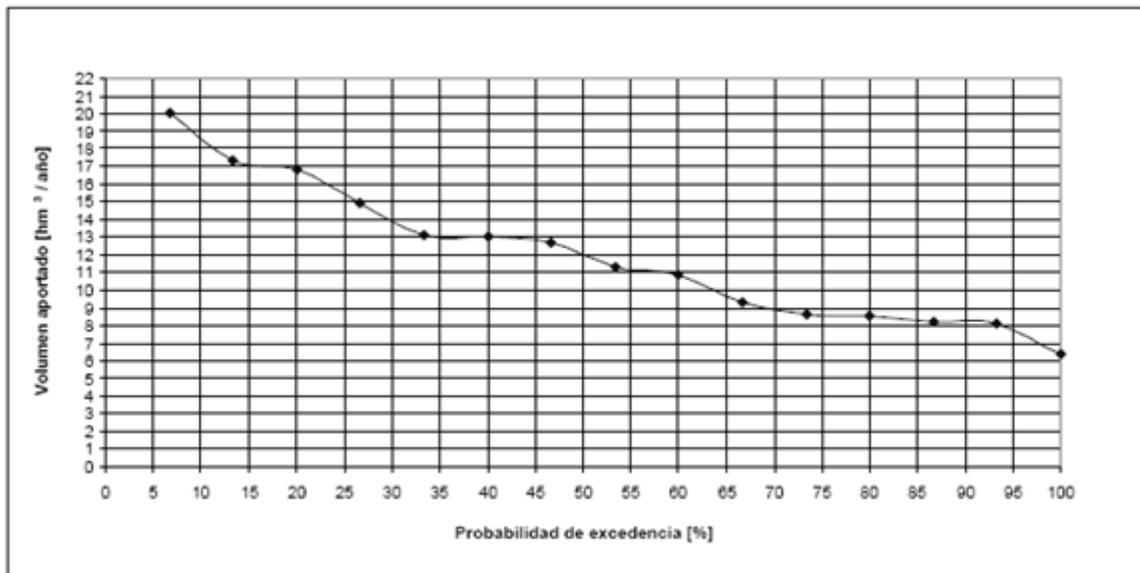
- a) El coeficiente medio anual de escorrentía superficial de la cuenca es 0.46. El valor surge de cálculo en función de los parámetros de la cuenca en función de la cobertura vegetal y otros por fórmulas empíricas que es 0.46.

- b) Existe un aporte subsuperficial importante, producto del almacenamiento en el importante aluvión de las quebradas Sola, Lora, Chorcoya y Palta Maykho. Se hicieron aforos del aporte subsuperficial en Octubre 2003 y el caudal aforado fue 55 l/s. Los aportes para los diferentes años hidrológicos se determinaron considerando un factor de ajuste proporcional a la precipitación anual con respecto a la precipitación del año de aforo. Sólo se consideró en el cálculo el aporte de las quebradas Sola y Lora, pues en estas subcuencas no existe una actividad agropecuaria importante. Sin embargo, en las subcuencas Chorcoya y Palta Maykho, los campesinos utilizan el agua del subálveo para regar y por tanto este aporte no fue considerado para evitar conflictos por el uso del agua.

- c) El caudal disponible, es la suma del aporte superficial y el subsuperficial y por la conformación hidrogeológica de la cuenca vertiente, se asume que el caudal total medio mensual es directamente proporcional a la precipitación y así es posible distribuir en el tiempo la escorrentía media anual.

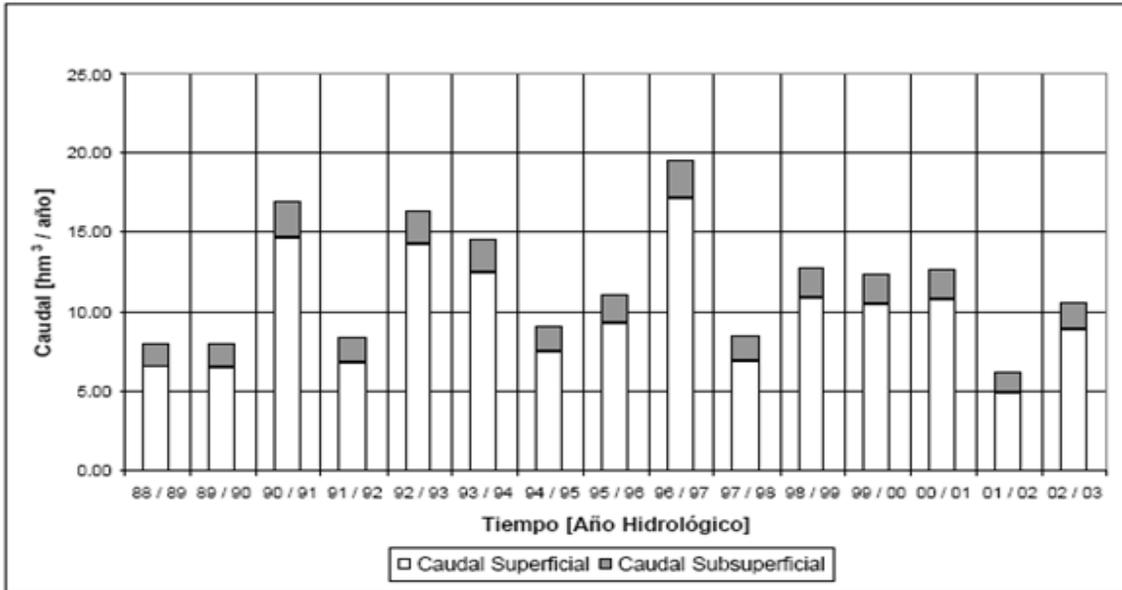
Se determinó en el estudio hidrológico, del Diseño final de la Presa El Molino el volumen anual aportado con diferentes probabilidades de excedencia. Los resultados del cálculo se presentan en los gráficos No. 3 y 4. En el gráfico No. 5 se muestra la distribución mensual de la esorrentía. El presente estudio hidrológico estima un volumen anual disponible con 53% de probabilidad de excedencia en 11.28 hm³ / año. Cuando se considera un 85% de garantía, el valor se reduce a 8.25 hm³ / año y con un 95% de garantía se tienen 8.11 hm³ / año. También se debe mencionar que la cuenca de Paichu y la cuenca de Tomayapo aguas abajo del sitio de cierre, captan agua superficial no regulada en la época de lluvias. Este aporte, si bien no es importante, tampoco es despreciable y el presente estudio lo considera como un factor de seguridad. Se muestra a continuación los cuadros mencionados

GRÁFICO N° 3.1 DISPONIBILIDAD ANUAL DE AGUA



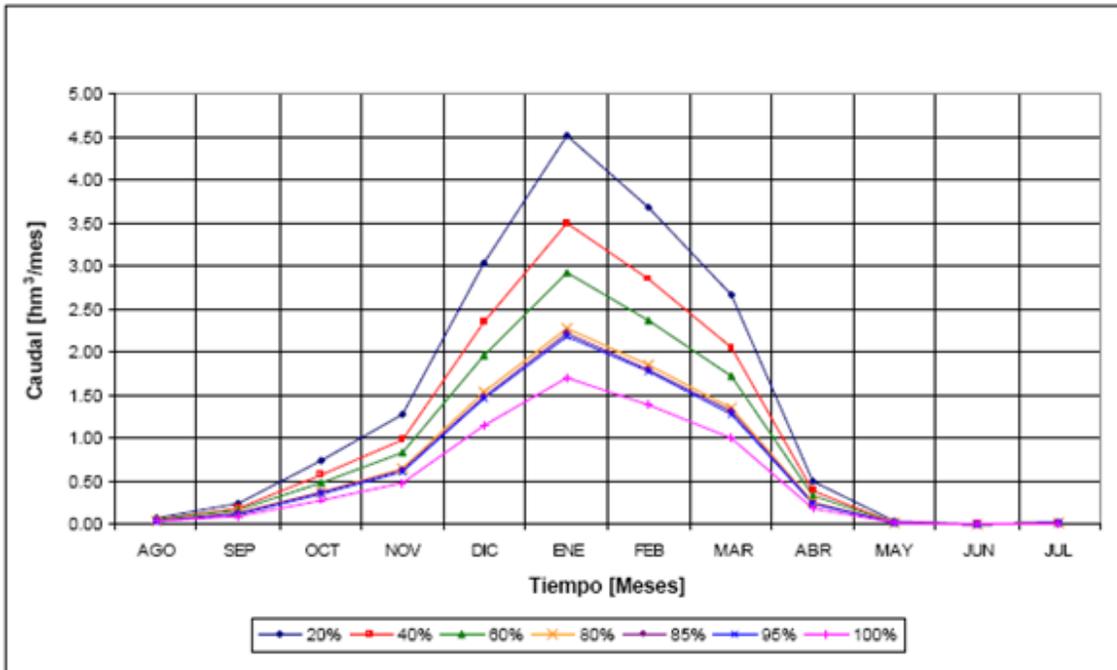
Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología

GRÁFICO N°3.2 CAUDALES MEDIOS ANUALES



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología.

GRÁFICO N°3.3 CAUDALES MEDIOS MENSUALES CON DIFERENTE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA



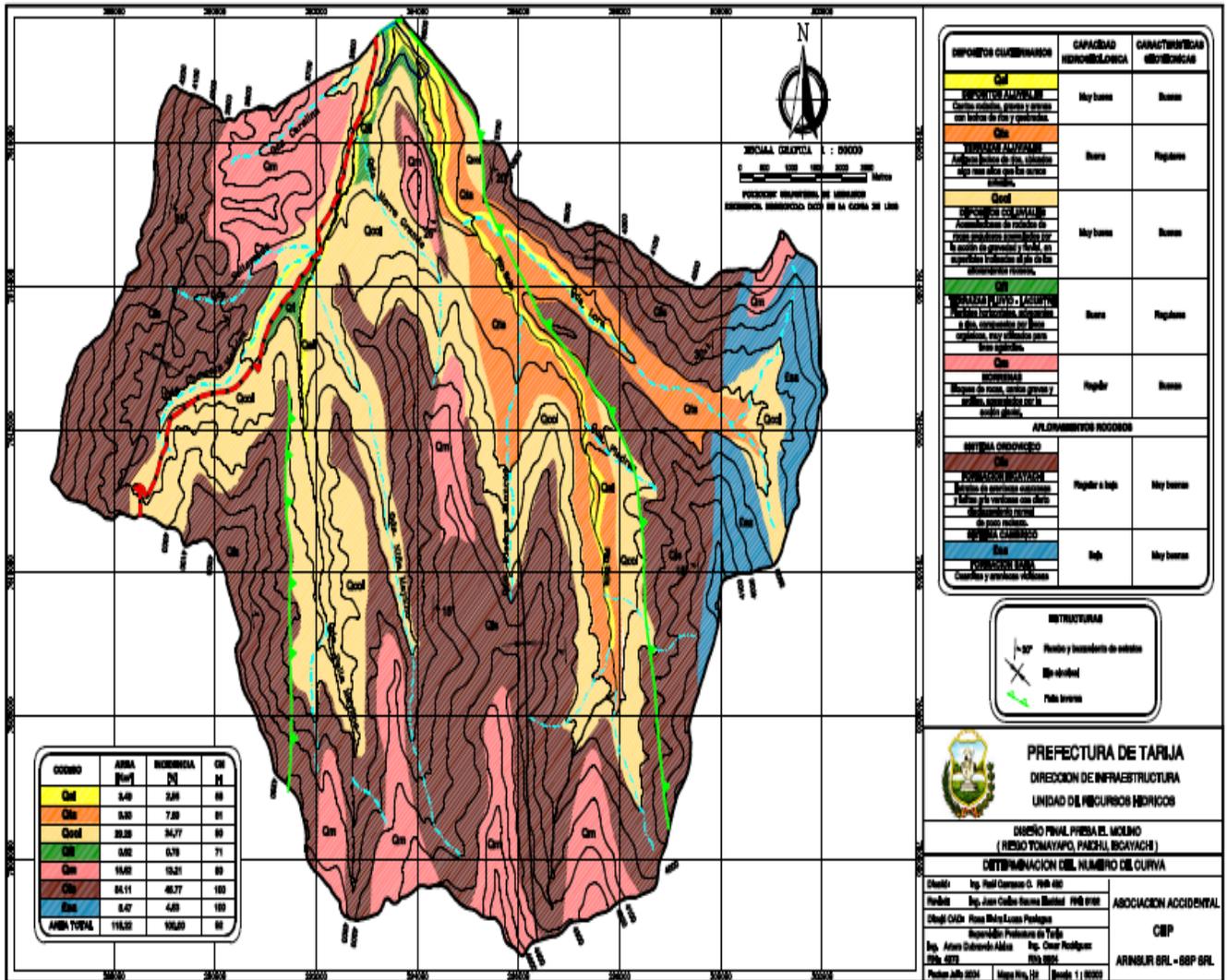
Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología

3.2.6 CAUDALES MÁXIMOS

Para el análisis de crecidas, se utilizaron los registros de precipitaciones máximas en 24 horas.

La cuenca de aporte presenta cobertura vegetal mínima y típica de la cordillera oriental y en el mapa N°3.2 se presenta la conformación geológica de la cuenca de aporte. Para cada precipitación extrema se determinó la precipitación efectiva, utilizando el método del Soil Conservation Service del número de curva (CN). Para determinar el CN de la cuenca de aporte se trabajó sobre el mapa N°3.2 de conformación geológica del área de estudio. En función de cada unidad geológica, se asignaron los valores de CN a cada zona y se obtuvo el CN para la cuenca utilizando como factor de ponderación el área de cada zona geológica similar. El valor final obtenido es elevado e igual a 92, que interpreta el comportamiento ante lluvias intensas del complejo suelo – vegetación en la transformación de precipitaciones en escorrentía superficial para crecidas.

MAPA 3.2 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DEL CURVA



Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología

La determinación de los valores extremos se realizó utilizando la ley de Gumbel y las precipitaciones con diferente recurrencia se presentan en el cuadro Nro. 3.2, debido a que no existen registros de caudales de crecida en el río Tomayapo, para definir los hidrógramas de crecida se utilizaron los métodos de Snyder y del Soil Conservation Service.

Los tiempos de concentración para la cuenca de aporte determinados por el Estudio Diseño Final Presa El Molino, se presentan en el cuadro 3.4:

CUADRO N° 3.4 ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Método	Lc (Km)	DH (m)	S (m/m)	CN (-)	V (m/s)	Tc (Horas)
California	14,992	694,94	-	-	-	1,84
Buereau of Reclamation	14,992	694,94	-	-	-	1,74
Kirpich	14,992	-	0,0463	-	-	1,74
Velocidad	14,992	-	-	-	2,3	1,81

Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología cuadro 12.

Con estos datos se estimaron los parámetros fundamentales que definen los hidrógramas unitarios para diferentes recurrencias.

Los caudales máximos que se muestran en el cuadro 3.2 determinados en estas condiciones para diferentes recurrencias y por cada método son:

CUADRO N° 3.5 CAUDALES MÁXIMOS

Recurrencia (años)	Snyder (m ³ /s)	SCS (m ³ /s)	Caudal promedio (m ³ /s)
100	248,41	286,79	268
500	312,87	361,21	337
1000	340,87	393,54	367

Fuente: Diseño Final Presa El Molino 2004. Tomo III: Hidrología, subtítulo 6.

Los hidrógramas para el caudal promedio, con una duración igual al tiempo de concentración y diferentes recurrencias.

CAPÍTULO IV:
ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS
MÉTODOS

Se realizará un resumen de cuadros de los resultados obtenidos por los métodos de laminación para diferentes periodos de retorno, $T=50$ años, $T=100$ años, $T=500$ años, $T=1000$ años.

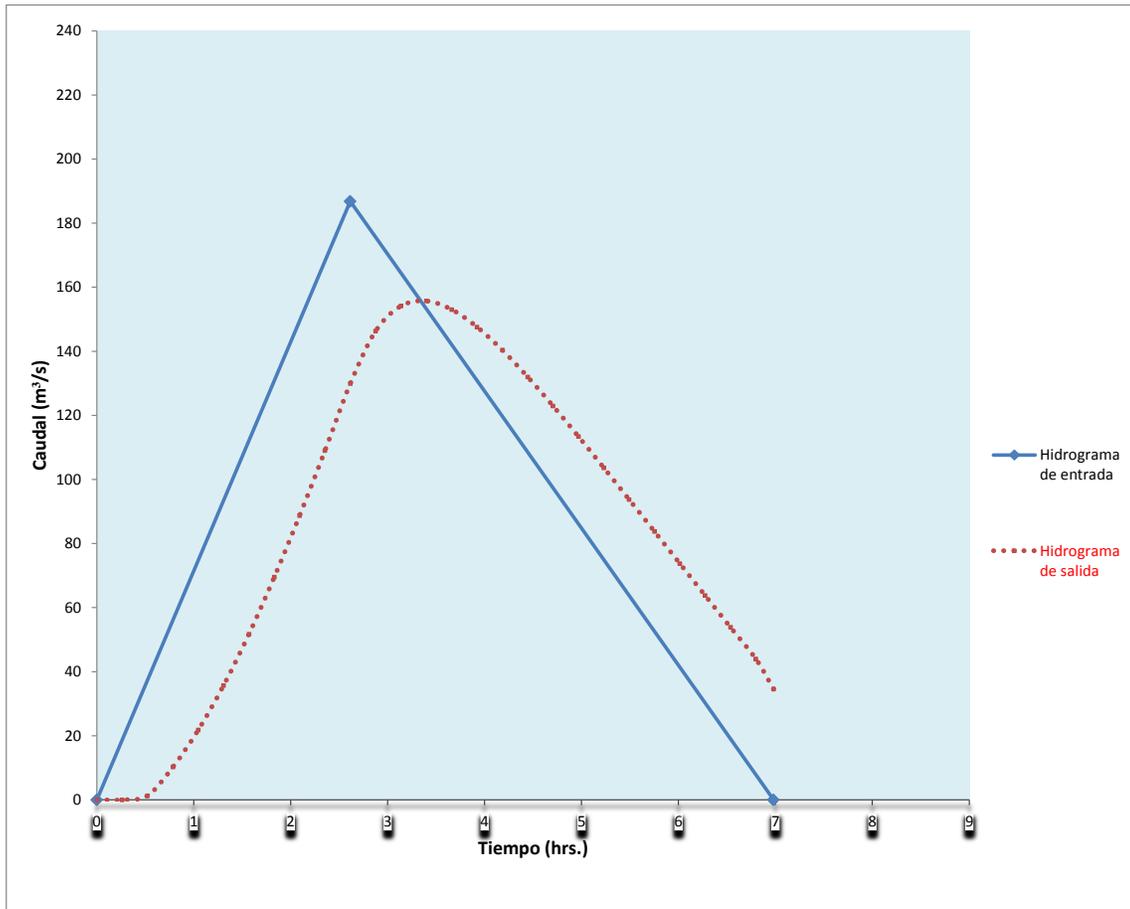
Los análisis de métodos de laminación que se estudió fueron aplicados a la Presa El Molino realizando los datos obtenidos del EDF. Presa El Molino “realizó en el 2004” de este estudio se obtuvo varios parametros y datos para realizar los cálculos de los métodos de laminación los métodos fueron: Piscina Nivelada o Embalse a nivel, Muskingum Cunge, Muskingum y Runge – Kutta o Método Numérico

Los métodos de laminación realizados y analizados son los siguientes:

- Piscina Nivelada, Embalse a Nivel o Puls
- Runge - Kutta o Método Numérico

4.1. LAMINACIÓN MÉTODO PISCINA NIVELADA O PROPAGACIÓN DE EMBALSE A NIVEL

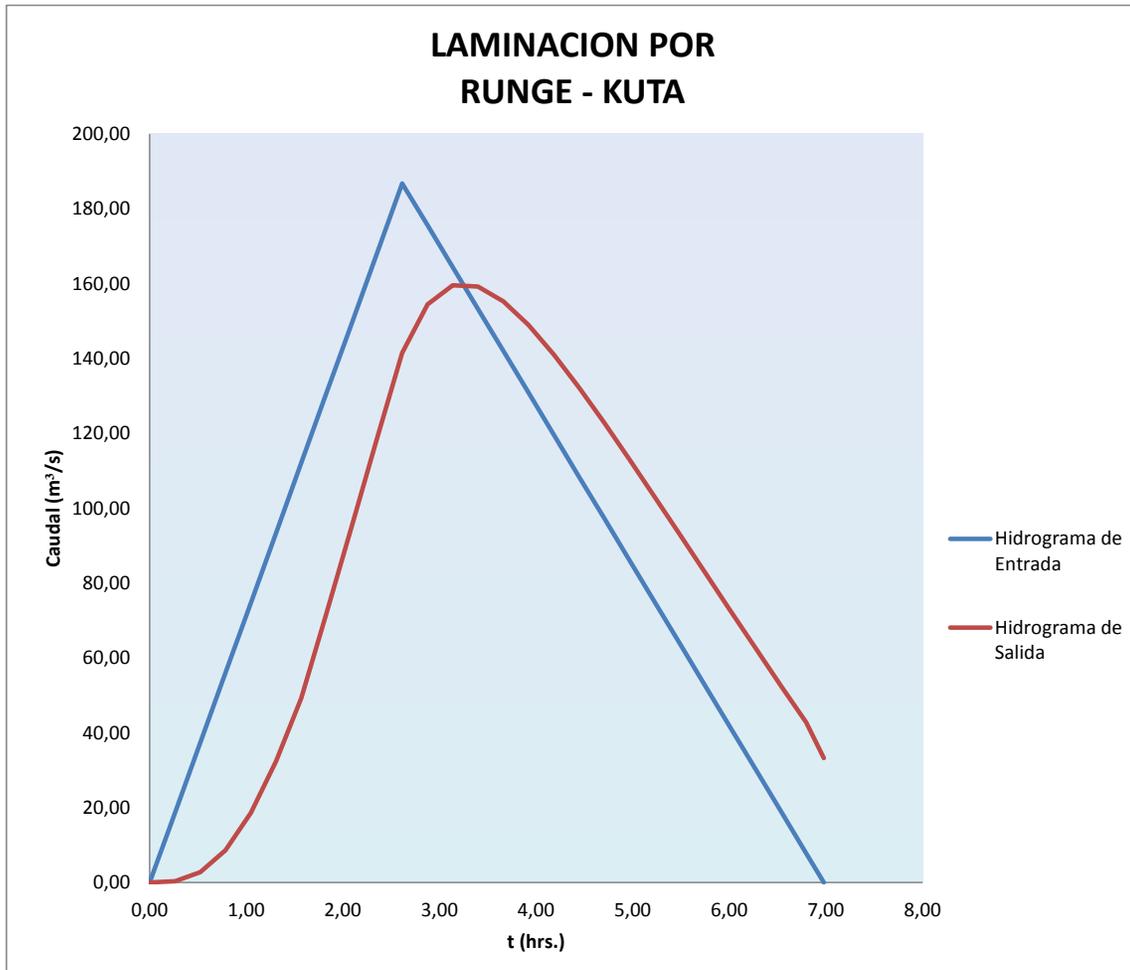
GRÁFICA 4.1 PISCINA NIVELADA T=50AÑOS



Fuente: Resultado del análisis de Laminación: Anexo 3.

4.2. LAMINACIÓN MÉTODO RUNGE KUTTA

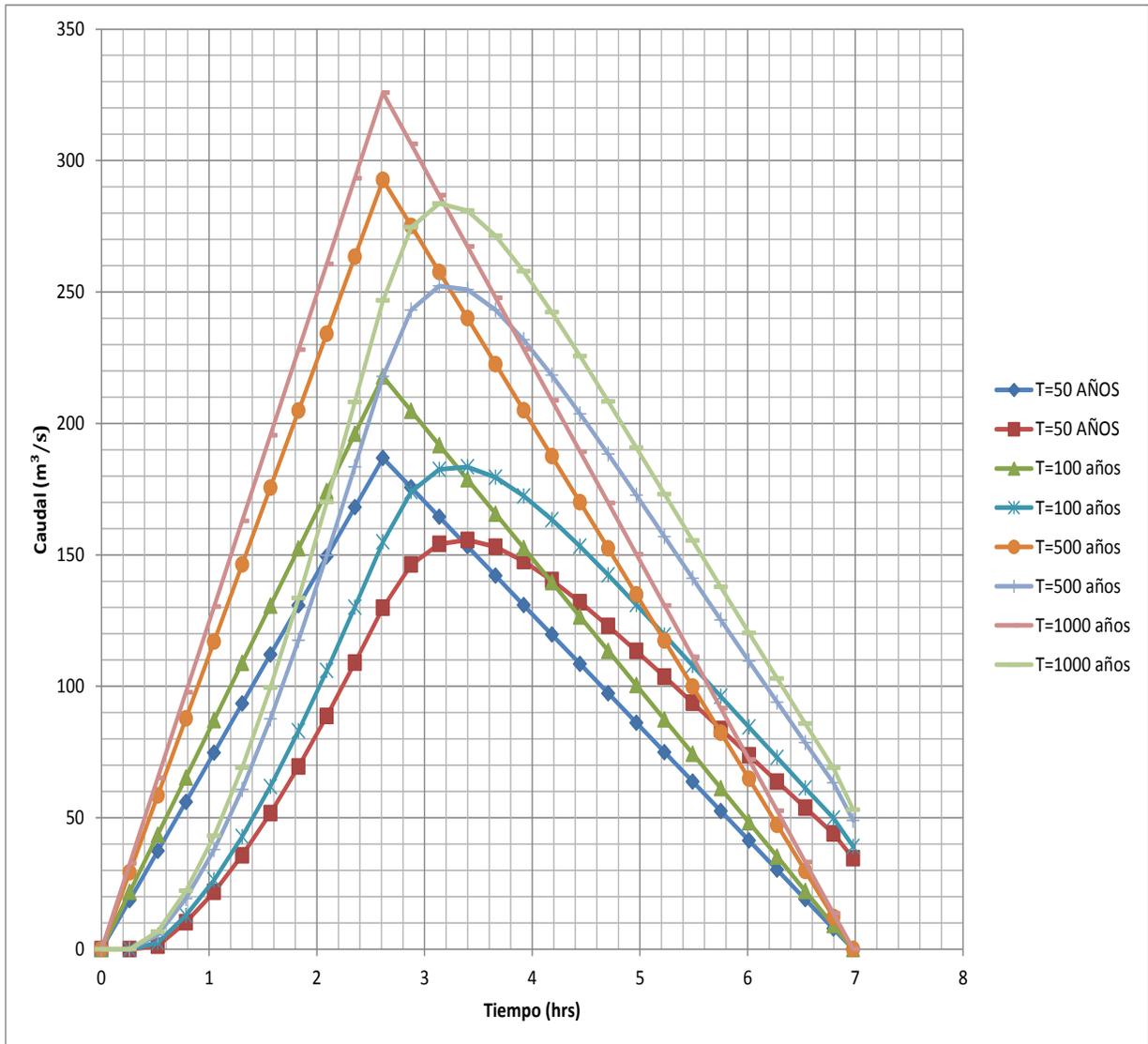
GRÁFICA 4.2 RUNGE KUTTA T=50 ÑOS



Fuente: Resultado del análisis de Laminación : Anexo 4.

4.3. LAMINACIÓN PISCINA NIVELADA T= 50, 100, 500 Y 1000 AÑOS

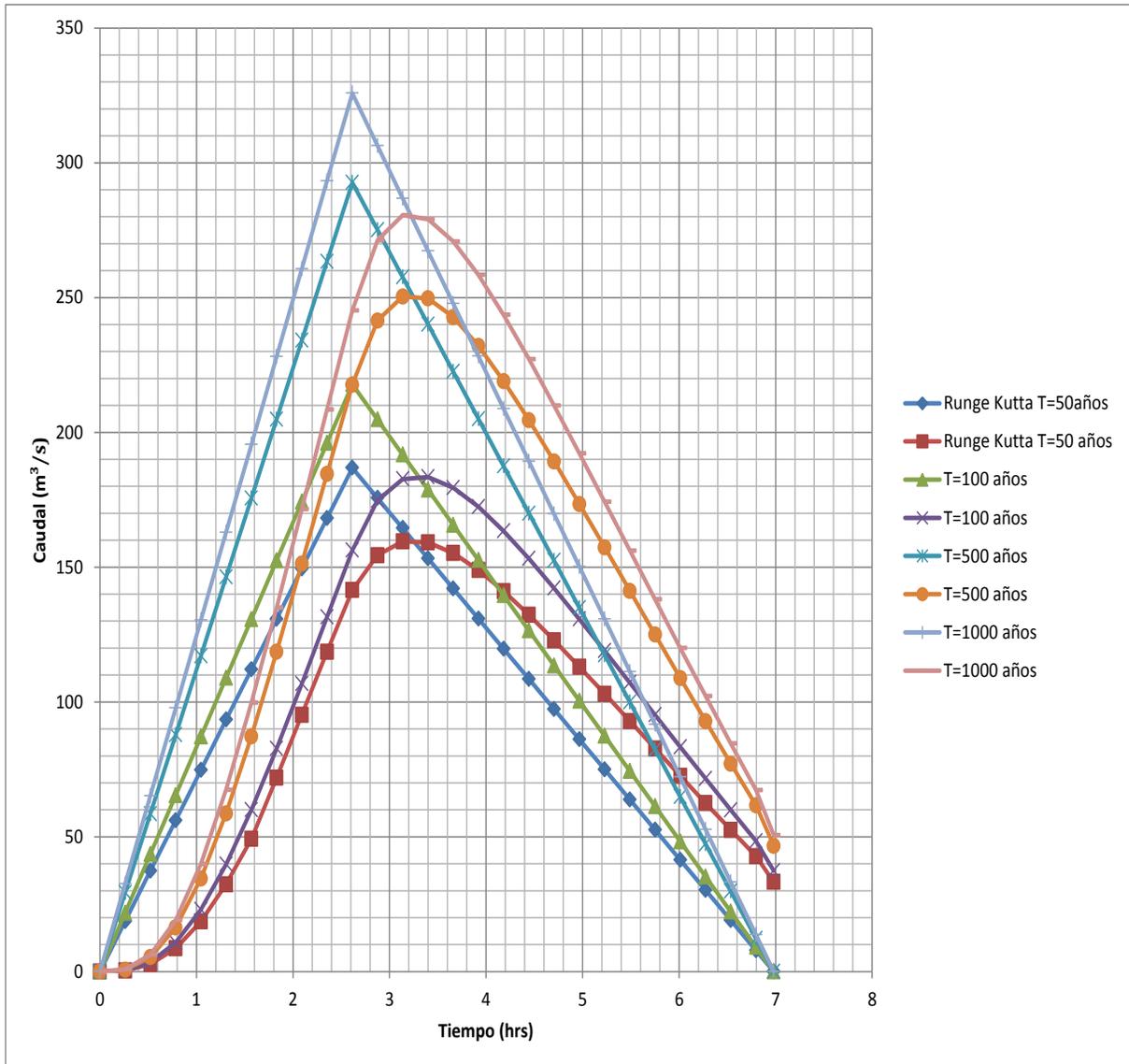
GRÁFICA 4.3 LAMINACIÓN PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO



Fuente: Resultado del análisis de Laminación: Anexo 3.

4.4. LAMINACIÓN MÉTODO RUNGE – KUTTA T= 50, 100, 500 Y 1000 AÑOS

GRÁFICA 4.4 LAMINACIÓN PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO



Fuente: Resultado del análisis de. Laminación : Anexo 3.

4.5. ANÁLISIS DE HIDROGRAMA UNITARIO

Los hidrogramas fueron calculados con los métodos de SCS. (Servicio de conservación de suelos, de los EE.UU) y el hidrograma sintético de Snyder como se muestra en el cuadro 4.1

CUADRO 4.1 HIDROGRAMAS

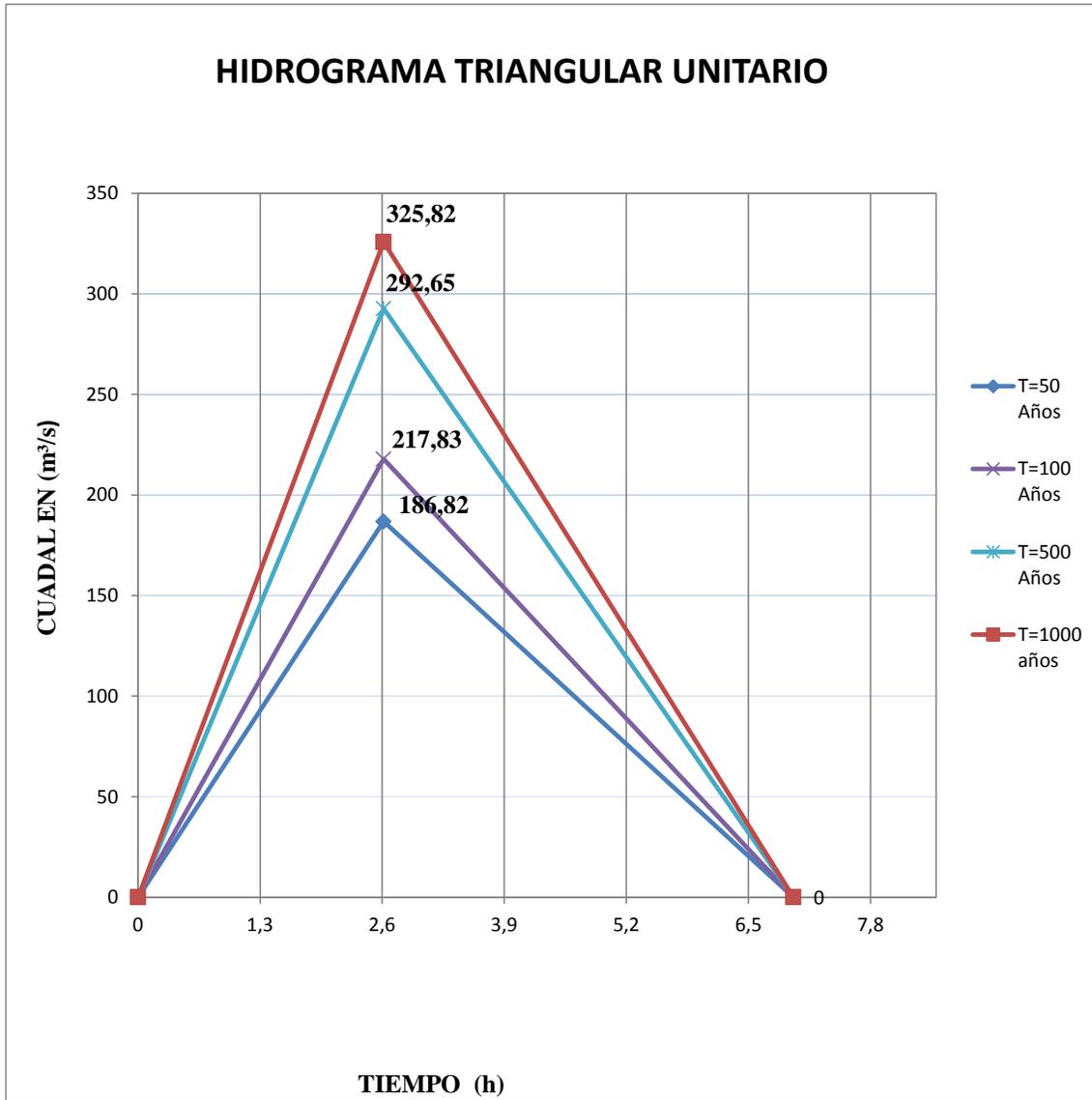
Recurrencia (años)	SCS (m³/s)
50	186,82
100	217,83
500	292,65
1000	325,82

Fuente: Comparación de los métodos de laminación: Cálculos realizados.

Los hidrograma para el caudal promedio, con una duración igual al tiempo de concentración y diferentes recurrencia.

4.5.1 HIDROGAMA UNITARIO TRIANGULAR SCS

GRÁFICA 4.6 H. TRIANGULAR SCS.



Fuente: Cálculo de Hidrogramas en la presa El Molino: Cálculos realizados.

Como se puede apreciar los resultados gráfico 4.3 y gráfico 4.4 de los hidrogramas de entrada y los hidrogramas de salida de los metodos de Piscina Nivelana y Runge Kutta, los resultados son similares por lo que se adoptó por los dos métodos de laminación.

¿Por qué se adoptó el método de Piscina Nivelada y Runge - Kutta?

Porque su resultado analítico es más coherente en un estudio de hidrogramas de entrada y salida, los métodos analizados son métodos que se utilizan en la operación de embalses, estos métodos que más se utilizan para diseños de proyectos de presas.

Los otros métodos como el Muskingum y el Muskingum-Cunge no se adoptaron por el motivo de que estos métodos no tienen mucha bibliografía y poco se conoce sobre éstos, estos métodos se los utiliza con más precisión en crecientes de ríos y no en embalses.

Se muestra el cuadro de resumen de los Datos Cálculos y Resultados en los cuadros 4.2, 4.3 y 4.4 que se muestra a continuación:

4.6. CUADRO COMPARATIVO DE DATOS

	Piscina Nivelada	Muskingum	Muskingum - Cunge	Runge - Kutta
Hidrograma de entrada	si			si
Tiempo Pico				
Tiempo de concentración				
Longitud del tramo en el Vaso				
Velocidad del pico de la avenida				
Parametro de Almacenamiento K				
Ecuación de Continuidad	si			si
Regulación del Embalce	si			si
Area del espejo del Vaso	si			si

Fuente: Comparación de los métodos de laminación en la presa El Molino: Cálculos realizados

4.7 CUADRO COMPARATIVO DE CÁLCULOS

	Caudal de entrada (m ³ /seg.)	Caudal de salida (m ³ /seg.)	Tiempo Pico (Hrs)	Métodos que no se realizó su análisis de cálculo

Piscina Nivelada o propagación de embalse a nivel	186.8	157.72	2.614	
Muskingum	X	X	X	
Muskingum - Cunge	X	X	X	
Runge – Kutta	186.781	9.764	2.614	
Modelo de embalse lineal	X	X	X	Los cálculos se realizan mediante el almacenamiento y su caudal de salida $S=k*Q$ en función de un H. Unitario
Propagación mediante el método de la Onda Cinemática	X	X	X	Los cálculos se realizan mediante la Celeridad que está en función de ecuación de continuidad $C_k = 5Q/3A$
Propagación mediante el método de la Onda Difusiva	X	X	X	Es un modelo adecuado para casos en que los hidrogramas tienen subidas suaves es decir de pendiente hidráulica suave
Propagación mediante el método de la Onda Dinámica	X	X	X	El modelo toma en cuenta todas las fuerzas que actúan en el fluido

Fuente: Comparación de los métodos de laminación en la presa El Molino: Cálculos realizados

	Caudal de entrada (m ³ /seg.)	Caudal de salida (m ³ /seg.)	Métodos que no se realiza sus analisis
Piscina Nivelada o propagación de embalse a nivel	186.82	155.70	
Muskingum			
Muskingum - Cunge			
Runge - Kutta	186.82	159.56	
Modelo de embalse lineal	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Cinemática	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Difusiva	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Dinámica	X	X	◀

Fuente: Comparación de los métodos de laminación en la presa El Molino: Cálculos realizados.

4.9. CUADRO COMPARATIVO DE RESULTADOS T=100 AÑOS

	Caudal de entrada (m ³ /seg.)	Caudal de salida (m ³ /seg.)	Métodos que no se realizó sus análisis
Piscina Nivelada o propagación de embalse a nivel	217.83	183.46	
Muskingum			
Muskingum - Cunge			
Runge - Kutta	217.83	183.46	
Modelo de embalse lineal	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Cinemática	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Difusiva	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Dinámica	X	X	◀

Fuente: Comparación de los métodos de laminación en la presa El Molino: Cálculos realizados.

4.10. CUADRO COMPARATIVO DE RESULTADOS T=500 AÑOS

	Caudal de entrada (m ³ /seg.)	Caudal de salida (m ³ /seg.)	Métodos que no se realizó sus análisis
Piscina Nivelada o propagación de embalse a nivel	292.65	252.30	
Muskingum			
Muskingum - Cunge			
Runge - Kutta	292.65	250.43	
Modelo de embalse lineal	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Cinemática	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Difusiva	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Dinámica	X	X	◀

Fuente: Comparación de los métodos de laminación en la presa El Molino: Cálculos realizados.

4.11. CUADRO COMPARATIVO DE RESULTADOS T=1000 AÑOS

	Caudal de entrada (m ³ /seg.)	Caudal de salida (m ³ /seg.)	Métodos que no se realizó sus análisis
Piscina Nivelada o propagación de embalse a nivel	325.82	283.68	
Muskingum			
Muskingum - Cunge			
Runge - Kutta	325.82	280.56	
Modelo de embalce lineal	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Cinemática	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Difusiva	X	X	◀
Propagación mediante el método de la Onda Dinámica	X	X	◀

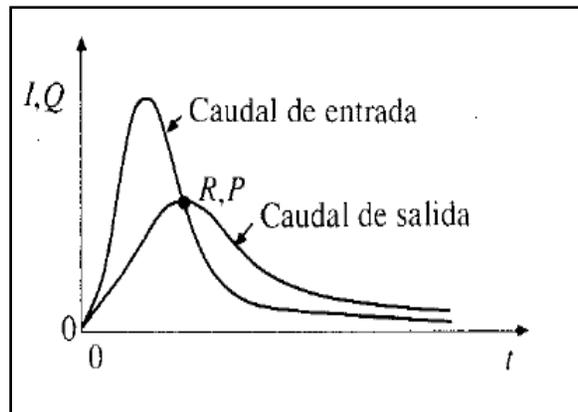
Fuente: Comparación de los métodos de laminación en la presa El Molino: Cálculos realizados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Como ocurre en todos los estudios hidrológicos la confiabilidad de los resultados que se obtienen en el cálculo de crecientes depende del método que se emplea, de la correcta utilización de los coeficientes empíricos y de la calidad de la información disponible.
- Los hidrogramas unitarios estudiados como el Triangular S.C.S y Hidrograma sintético Snyder son hidrogramas que desarrollan de distinta manera de poder calcular, utilizan parámetros similares como área de la cuenca, precipitaciones, longitud del cauce, pendiente, etc.
- Los resultados de los cálculos de los hidrogramas Triangular S.C.S. se utilizo para calcular la laminación para los dos métodos tanto como para Piscina Nivelada y Runge Kutta
- El proyectista verá como utilizar estos cálculos de manera muy representativa al estudio que se vaya a seralizar tomamdo al hidrogramas Triangular S.C.S. o Hidrograma sintético Snyder.
- El proposito de realizar una laminación en estudios en vasos de almacenamientos es para determinar las evacuaciones de aguas excedentes sobre estructuras de gravedad y otras.
- Los métodos de laminación analizados nos dan resultados aproximados de caudal de salida porque cada método utiliza distintos parametros para el cálculo en el desarrollo de su análisis.
- La laminación por el método de Piscina Nivelada o propagación de embalse a nivel, es el método que nos arroja resultados en la forma de laminar un embalse.
- La laminación por el método de Runge - Kutta, es el método que nos arroja resultados en la forma de laminar un embalse.
- Lo anterior significa que el diseño del vertedero hidráulico se puede realizar con el tirante de la laminación sobre el vertedero garantizando la seguridad de la Presa.
- La laminación por el método Muskingum, no se realizó porque sirven para laminar ríos.

- La laminación por el método Muskingum - Cunge, no se realizó por que sirven para laminar ríos.
- La laminación por el método Runge - Kutta, este método arroja resultados de caudal de salida similares al método de piscina nivelada, para sus diferentes periodos de retorno.
- Los hidrogramas de laminación de los métodos analizados arrojan resultados similares al del hidrograma ideal de laminacion como se muestra en la figura.
El método que más se aproxima a la figura es el método de Piscina Nivelada y Runge - Kutta.
- No siempre los métodos de laminación coinciden entre ellos, los métodos son variables en función de sus parámetros de cálculo.



RECOMENDACIONES

- Realizar cálculos de propagación de caudales con los métodos más conocidos por lo que ya trajo buenos resultados en nuestro medio.
- Utilizar varios métodos de cálculo de hidrogramas para estimar cual de los resultados serán los mejores y se adaptan para su cuenca.
- Para realizar la laminación en embalses se recomienda el método de Piscina Nivelada.
- Para realizar la laminación en embalses se recomienda el método de Runge Kutta.
- No se recomienda realizar la laminación en embalses con métodos para laminar ríos.

- En la elaboración del desarrollo del cálculo de los métodos de laminación se pudo observar que el método de laminación de Piscina nivelada y Runge Kutta es el método que resulta más satisfactorio por lo que se recomienda analizar y utilizar éste método para realizar estudios a diseño final en Presas.