

CATIE Centro Agronómico Tropical
de Investigación y Enseñanza

**Curso de Especialización
Gestión de Cuencas Hidrográficas**



**Cálculos hidrológicos e hidráulicos
en Cuencas Hidrográficas**

Máximo Villón Béjar

Cálculos hidrológicos e hidráulicos en cuencas hidrográficas

Definición

La cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido.

Delimitación

La delimitación de una cuenca, se hace sobre un plano o mapa a curvas de nivel (como el mapa de Costa Rica a escala 1:50000), siguiendo las líneas del divortium acuarum (parteaguas), la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, que en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida, llamado estación de aforo.

En la figura 1 se muestra la delimitación de una cuenca.



Figura 1. Delimitación de una cuenca

La frontera de una cuenca topográfica y su correspondiente cuenca de agua subterránea, no necesariamente tienen la misma proyección horizontal, por lo que se puede realizar una delimitación topográfica (como se explicó anteriormente), o una delimitación real, que corresponde a la delimitación considerando el aporte de las aguas subterráneas.

Una cuenca se puede clasificar atendiendo a su tamaño, en cuenca grande y cuenca pequeña.

Cuenca grande, es aquella cuenca en la que predominan las características fisiográficas de la misma (pendiente, elevación, área, cauce). Una cuenca, para fines prácticos, se considera grande, cuando el área es mayor de 250 Km².

Cuenca pequeña, es aquella cuenca que responde a las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración, y en la cual las características físicas (tipo de suelo, vegetación) son más importantes que las del cauce. Se considera cuenca pequeña aquella cuya área varíe desde unas pocas hectáreas hasta un límite, que para propósitos prácticos, se considera 250 Km².

No necesariamente se analiza con el mismo criterio una cuenca pequeña que una grande. Para una cuenca pequeña, la forma y la cantidad de escurrimiento están influenciadas principalmente por las condiciones físicas del suelo; por lo tanto, el estudio hidrológico debe enfocarse con más atención a la cuenca misma, para una cuenca muy grande el efecto de almacenaje del cauce es muy importante, por lo cual deberá dársele también atención a las características de éste último.

Con el fin de establecer grupos de cuencas hidrológicamente semejantes, se estudian una serie de características físicas en cada cuenca, entre las que se tienen:

- superficie
- topografía
- altitudes características
- geología y suelos
- cobertura

Superficie de la cuenca

Se refiere al área proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular, se obtiene después de delimitar la cuenca.

Cálculo del área de una cuenca

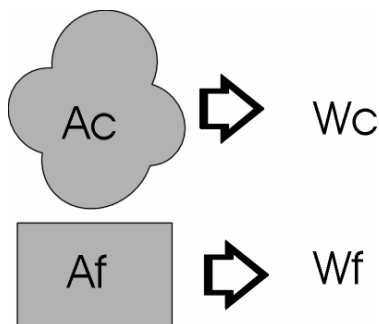
Debido a que la forma de la cuenca es muy irregular, el cálculo del área de la cuenca no se puede realizar por fórmulas geométricas. Sin embargo, existen los siguientes métodos para su cálculo:

- Uso de la balanza analítica
- Uso del planímetro

Uso de la balanza analítica

El proceso para el cálculo es como sigue:

1. Dibujar la cuenca sobre una cartulina que tenga una densidad uniforme, cuya área a calcular es A_c .
2. Dibujar con la misma escala, una figura geométrica conocida (cuadrado, rectángulo, etc) cuya área que se puede calcular geométricamente es A_f .
3. Recortar y pesar por separado las figuras



obteniendo el peso W_c de la cuenca, y W_f peso de la figura.

4. Aplicar la regla de tres:

$$A_f \longrightarrow W_f$$

$$A_c \longrightarrow W_c$$

de donde, se tiene:

$$A_c = \frac{A_f \times W_c}{W_f}$$

donde:

A_c = área de la cuenca a calcular

A_f = área de la figura calculada geométricamente

W_c = peso de la cuenca

W_f = peso de la figura

Uso del planímetro

El planímetro (figura 2) es un instrumento integrador, por medio del cual, se puede determinar el área de una figura de forma irregular.

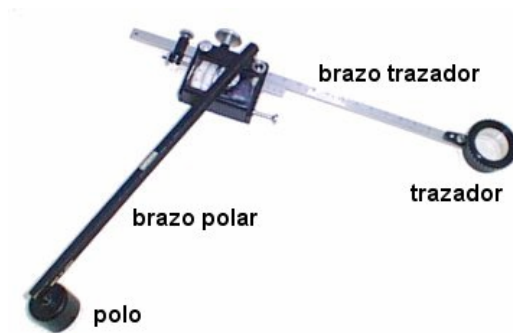
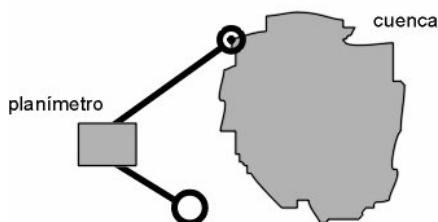


Figura 2 Planímetro

Para esto, basta con recorrer el perímetro de dicha figura, mediante una lupa de que está dotado el planímetro; el movimiento de la lupa es transmitido a un tambor graduado, siendo el área de la figura proporcional al número de revoluciones del tambor, expresadas en *unidades de vernier*.



Elementos del planímetro

Los elementos del planímetro según se muestran en la figura 3, son:

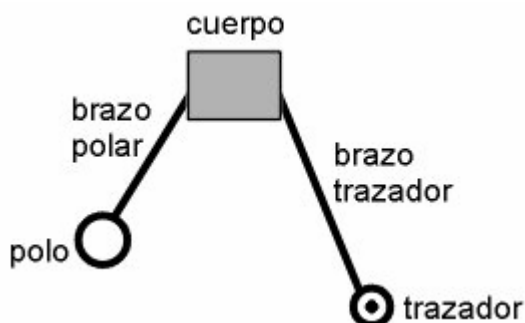


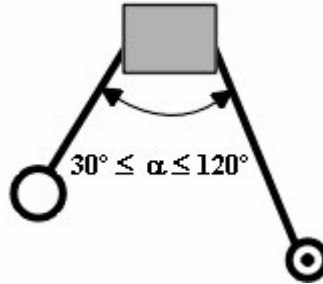
Figura 3. Elementos del planímetro

1. **Trazador**, el cual consta de una lupa, sirve para recorrer el perímetro de la figura del cual se desea calcular su área.
2. **Brazo trazador**, une el cuerpo del planímetro con el trazador, puede ser fijo o móvil.
3. **Cuerpo**, es donde se realizan las lecturas, consta de un disco, un rodillo giratorio y un vernier.
4. **Brazo polar**, une el cuerpo del planímetro con el polo, puede ser fijo o móvil.

5. **Polo**, es un apoyo fijo, alrededor del cual se realizan los giros cuando se realiza la lectura.

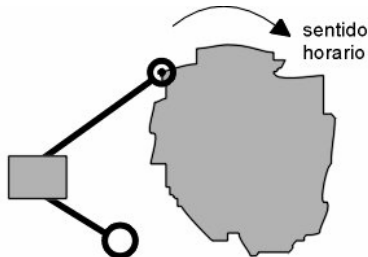
Cuando se efectúan las lecturas con el planímetro, se deben tener las siguientes precauciones:

1. Por recomendación de los fabricantes, el ángulo α que se forma entre los brazos trazador y polar, debe estar entre 30° y 120° , es decir:



Si esto no es posible, puede:

- cambiar la posición del polo
 - dividir la superficie en área más pequeñas, y calcular éstas en forma separada
2. Cuando se recorre el perímetro de la figura, el polo se debe desplazar en sentido horario.



3. Evitar que la superficie donde se desplaza el cuerpo del planímetro sea liza, para que el rodillo ruede y no se deslice sin marcar.

Lectura en un planímetro

Las lecturas en un planímetro se expresan en unidades de vernier (*UV*) y consta de 4 dígitos, como se indica:

Lectura en disco (1)	Lectura en rodillo (2)	Lectura en rodillo (3)	Lectura en vernier (4)
-------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

1. **Lectura en el disco**, se toma el valor que está antes de la marca, en el caso de la figura 4, el primer dígito de la lectura es 6.

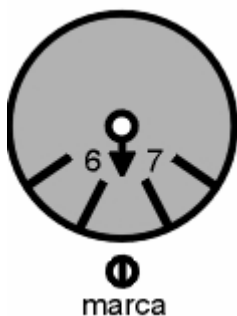


Figura 4 Lectura en el disco

2. **Lectura en el rodillo**, se toma el valor que está antes de la marca, pero corresponde a las divisiones mayores. En la figura 5, el segundo dígito de la lectura es 4.

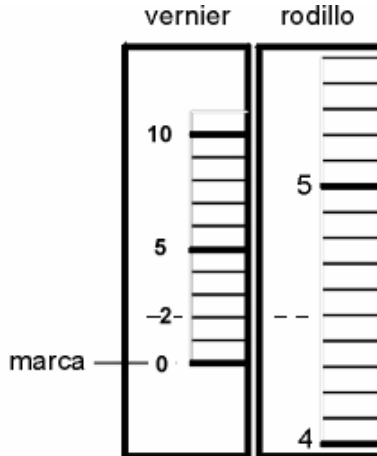


Figura 5 Lectura en el rodillo y vernier

3. **Lectura en el rodillo**, se toma el valor que está antes de la marca, pero corresponden a las divisiones menores. En la figura 5, el tercer dígito de la lectura es 3.
4. **Lectura en el vernier**, se toma el valor en la escala del vernier, que esté en línea recta, con la escala de las divisiones menores del rodillo. En la figura 5 el cuarto dígito de la lectura es 2.

∴ La lectura para un planímetro que tenga lectura en disco, rodillo y vernier de las figuras 4, y 5 es: **6432**.

En el mercado, se pueden conseguir también planímetros digitales, como el que se muestra en la figura 6.



Figura 6 Planímetro digital Planix 5

Procedimiento para calcular el área de una cuenca usando el planímetro

1. Colocar el trazador, en un punto cualquiera del perímetro de la figura a calcular su área.
2. Leer en el cuerpo del planímetro, las unidades de vernier iniciales (UV_i).
3. Desplazar el trazador por el perímetro de la figura, siguiendo el sentido horario, hasta llegar al punto de inicio.
4. Leer en el cuerpo del planímetro las unidades de vernier finales (UV_f).
5. Calcular las unidades de vernier, correspondiente al área a calcular UV :
$$UV = UV_f - UV_i$$
6. Repetir el proceso unas tres veces, y calcular para cada una de ellos las unidades de vernier (UV_1 , UV_2 , UV_3), verificar que estos tres valores sean parecidos; si uno de los valores de las unidades de vernier, es muy diferente a los otros, se puede

descartar. Si todos fueran diferentes, el planímetro puede estar descalibrado.

7. Calcular las unidades de vernier UV_c que corresponde a la cuenca:

$$UV_c = \frac{UV_1 + UV_2 + UV_3}{3}$$

8. Dibujar una figura conocida (por ejemplo en rectángulo), calcular sus unidades de vernier UV_f , siguiendo el proceso indicado, y por procedimiento geométrico calcular su área A_f .

9. Aplicar la regla de tres:

$$\begin{array}{ccc} A_f & \longrightarrow & UV_f \\ A_c & \longrightarrow & UV_c \end{array}$$

luego:

$$A_c = \frac{A_f \times UV_c}{UV_f}$$

donde:

A_c = área de la cuenca a calcular

A_f = área de la figura calculada geométricamente

UV_c = unidades de vernier de la cuenca

UV_f = unidades de vernier de la figura

Perímetro de la cuenca

Se refiere al borde de la forma de la cuenca proyectada en un plano horizontal (figura 7), es de forma muy irregular, se obtiene después de delimitar la cuenca.



Figura 7 Perímetro de una cuenca

Cálculo del perímetro de una cuenca

Debido a que la forma de la cuenca es muy irregular, el cálculo del perímetro de la cuenca no se puede realizar por fórmulas geométricas.

Sin embargo existen los siguientes métodos para su cálculo:

- Uso de un mecate (hilo)
- Uso del curvímeter

Uso de un mecate (hilo o pabito)

El proceso de cálculo, es como sigue:

1. Con un mecate se bordea el perímetro de la cuenca, y se obtiene L_c (longitud de la cuenca medida en una regla), el cual corresponde al perímetro de la cuenca P_c .
2. Con la misma escala que está dibujada la cuenca, se dibuja una línea de dimensiones conocidas y se obtiene su longitud L_l (medida con la regla), el cual tiene un perímetro P_l .

3. Aplicar la regla de tres:

$$\begin{array}{ccc} Pc & \longrightarrow & Lc \\ Pl & \longrightarrow & Ll \end{array}$$

luego:

$$Pc = \frac{Pl \times Lc}{Ll}$$

donde:

Pc = perímetro de la cuenca a calcular

Pl = perímetro de la línea conocida

Lc = longitud de la cuenca medida con mecate

Ll = longitud de la línea medida con mecate

Uso del curvómetro

El curvómetro (figura 8), es un instrumento que consta de una rueda móvil, y que permite medir longitudes de forma muy irregular, como son perímetro de una cuenca, longitudes del cauce de un río, sus tributarios, y longitud de las curvas de nivel.

El uso del curvómetro para el cálculo del perímetro es muy similar al del mecate, en vez de bordear el perímetro con un mecate, lo hacemos con el curvómetro, la ecuación para su cálculo es:



Figura 8 Curvómetro

$$P_c = \frac{P_l \times L_c}{L_l}$$

donde:

P_c = perímetro de la cuenca a calcular

P_l = perímetro de la línea conocida

L_c = longitud del perímetro de la cuenca medida con el curvímetero

L_l = longitud de la línea medida con el curvímetero

Pendiente del cauce

El conocimiento de la pendiente del cauce principal de una cuenca, es un parámetro importante, en el estudio del comportamiento del recurso hídrico, como por ejemplo, para la determinación de las características óptimas de su aprovechamiento hidroeléctrico, o en la solución de problemas de inundaciones.

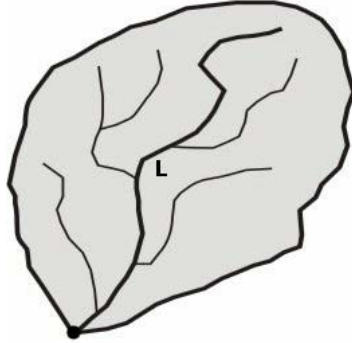
En general, la pendiente de un tramo de un cauce de un río, se puede considerar como el cociente, que resulta de dividir, el desnivel de los extremos del tramo, entre la longitud horizontal de dicho tramo.

Existen varios métodos para obtener la pendiente de un cauce, entre los que se pueden mencionar:

Método I. Pendiente uniforme

Este método considera la pendiente del cauce, como la relación entre el desnivel que hay entre los extremos del cauce y la proyección horizontal de su longitud, es decir:

$$S = \frac{H}{L} \quad \dots (1)$$



donde:

S = pendiente

H = diferencia de cotas entre los extremos del cauce, en Km

L = longitud del cauce, en Km

Este método se puede utilizar en tramos cortos.

Método II. Compensación de áreas

Una manera más real de evaluar la pendiente de un cauce, es compensándola, es decir, elegir la pendiente de una línea que se apoya en el extremo final del tramo por estudiar, y que tiene la propiedad de contener la misma área (abajo y arriba), respecto al perfil del cauce (figura 9).

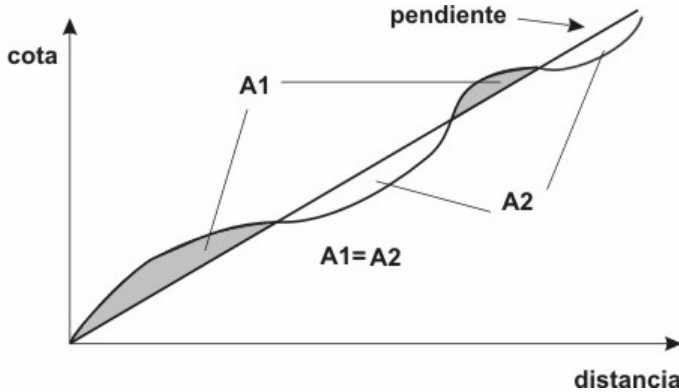


Figura 9 Pendiente del cauce por compensación de áreas

El proceso para su cálculo, es como sigue:

1. Trazar el perfil longitudinal del cauce.
2. Trazar una línea apoyada en el extremo final, y que divida el perfil longitudinal en áreas por encima y por debajo de ella.
3. Calcular con un planímetro las áreas por encima (**A1**) y por debajo de la línea (**A2**).
4. Si estas áreas son aproximadamente iguales, es decir **A1 = A2**, la línea trazada representa la pendiente del cauce, sino repetir los paso 2 y 3.

Método III. Ecuación de Taylor y Schwarz

Este método, considera que un río está formado por **n** tramos (figura 10), cada uno de ellos con pendiente uniforme.

La ecuación de Taylor y Schwarz, para **n** tramos de igual longitud, es:

$$S = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad \dots (2)$$

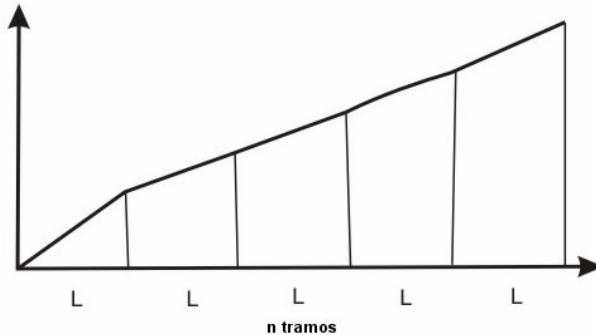


Figura 10 N tramos de la longitud de un cauce

donde:

n = número de tramos iguales, en los cuales se subdivide el perfil

$S_1, S_2, \dots, S_n$ = pendiente de cada tramo, según $S = \frac{H}{L}$

S = pendiente media del cauce

La ecuación (2), tiene una mejor aproximación, cuanto más grande sea el número de tramos, en los cuales se subdivide el perfil longitudinal del río a analizar.

Por lo general, se espera en la práctica, de que los tramos sean de diferentes longitudes, en este caso, Taylor y Schwarz recomiendan utilizar la siguiente ecuación:

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S_i^2}} \right]^2 \quad \dots (3)$$

donde:

S = pendiente media del cauce

L_i = longitud del tramo i

S_i = pendiente del tramo i

Problema 1:

En la tabla 1 (columnas 1 y 2), se muestran los datos del levantamiento topográfico del perfil longitudinal del eje de un cauce. Determinar su pendiente utilizando el método de Taylor y Schwarz.

Tabla 1 Levantamiento perfil longitudinal de un cauce

Progresiva (1)	Cota (2)	Desnivel (3)	S (4)	(5)
Km 0+ 000	660			
Km 0+ 400	668			
Km 0+ 800	678			
Km 1+ 200	690			
Km 1 + 600	705			
Km 2+ 000	725			
			Σ	

Problema 2:

1. En el plano de la figura 11 cuya escala es 1: 100.000, se muestra una región donde las cotas están cada 100 m.

Se pide:

- Dibujar la red de drenaje, hasta su desembocadura al mar.
- Delimitar la cuenca, tomar como punto de aforo el señalado por ● (de cota 50 m.s.n.m.)
- Identifique el área de un posible vaso de almacenamiento (achúrelo)
- Dibujar el perfil longitudinal del curso principal y calcular su pendiente utilizando la fórmula:

$$S = \frac{H}{L}$$

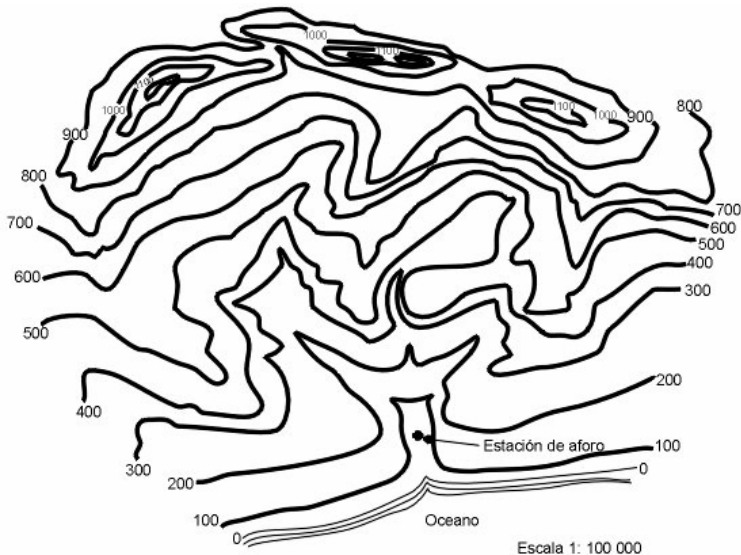


Figura 11 Plano problema 2

Cálculo de la precipitación media sobre una zona

En general, la altura de precipitación que cae en un sitio dado, difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos.

Los pluviómetros registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en la que está instalada el aparato. Para muchos problemas hidrológicos, se requiere conocer la altura de precipitación media de una zona, la cual puede estar referida a la altura de precipitación diaria, mensual, anual, media mensual, media anual.

Altura de precipitación diaria, es la suma de las lecturas observadas en un día.

Altura de precipitación media diaria, es el promedio aritmético de las lecturas observadas en un día.

Altura de precipitación mensual, es la suma de las alturas diarias, ocurridas en un mes.

Altura de precipitación media mensual, es el promedio aritmético de las alturas de precipitación mensual, correspondiente a un cierto número de meses.

Altura de precipitación anual, es la suma de las alturas de precipitación mensual, ocurridas en un año.

Altura de precipitación media anual, es el promedio aritmético de las alturas de precipitación anual, correspondiente a un cierto número de años.

Para calcular la precipitación media de una tormenta o la precipitación media anual, existen tres métodos de uso generalizado:

Promedio aritmético

Consiste en obtener el promedio aritmético, de las alturas de precipitaciones registradas, de las estaciones localizadas dentro de la zona o cuenca:

$$P_{med} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad \dots (4)$$

donde :

P_{med} = precipitación media de la zona o cuenca

P_i = precipitación de la estación i

n = número de estaciones dentro de la cuenca

La precisión de este criterio, depende de la cantidad de estaciones disponibles, de la forma como están localizadas, y de la distribución de la lluvia estudiada. Es el método más sencillo, pero sólo da buenos resultados cuando el número de pluviómetros es grande.

Polígono de Thiessen

Para este método, es necesario conocer la localización de las estaciones en la zona bajo estudio, ya que para su aplicación, se requiere delimitar la zona de influencia de cada estación, dentro del conjunto de estaciones.

El método consiste en:

1. Ubicar las estaciones, dentro y fuera de la cuenca.
2. Unir las estaciones formando triángulos, procurando en lo posible que estos sean acutángulos (ángulos menores de 90°).
3. Trazar las mediatrices de los lados de los triángulos (figura 12) formando polígonos. (Por geometría elemental, las mediatrices correspondientes a cada triángulo, convergen en un solo punto. En un triángulo acutángulo, el centro de mediatrices, está ubicada

dentro del triángulo, mientras que en un obtusángulo, está ubicada fuera del triángulo).

4. Definir el área de influencia de cada estación, cada estación quedará rodeada por las líneas del polígono (en algunos casos, en parte por el parteaguas de la cuenca). El área encerrada por los polígonos de Thiessen y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente.
5. Calcular el área de cada estación.
6. Calcular la precipitación media, como el promedio pesado de las precipitaciones de cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente, es decir:

$$P_{med} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i P_i \quad \dots (5)$$

donde :

P_{med} = precipitación media

A_T = área total de la cueca

A_i = área de influencia parcial del polígono de Thiessen correspondiente a la estación ***i***

P_i = precipitación de la estación ***i***

n = número de estaciones tomadas en cuenta

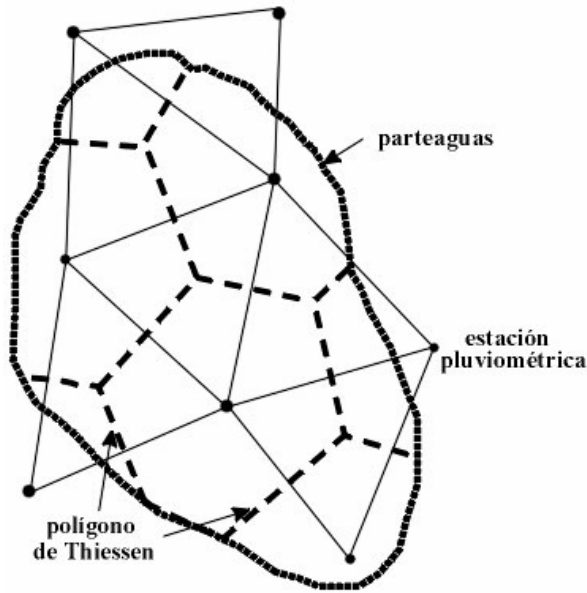


Figura 12. Polígono de Thiessen

Isoyetas

Para este método, se necesita un plano de isoyetas de la precipitación registrada, en las diversas estaciones de la zona en estudio. Las isoyetas son curvas que unen puntos de igual precipitación (figura 13). Este método es el más exacto, pero requiere de un cierto criterio para trazar el plano de isoyetas. Se puede decir que si la precipitación es de tipo orográfico, las isoyetas tenderán a seguir una configuración parecida a las curvas de nivel. Por supuesto, entre mayor sea el número de estaciones dentro de la zona en estudio, mayor será la aproximación con lo cual se trace el plano de isoyetas.

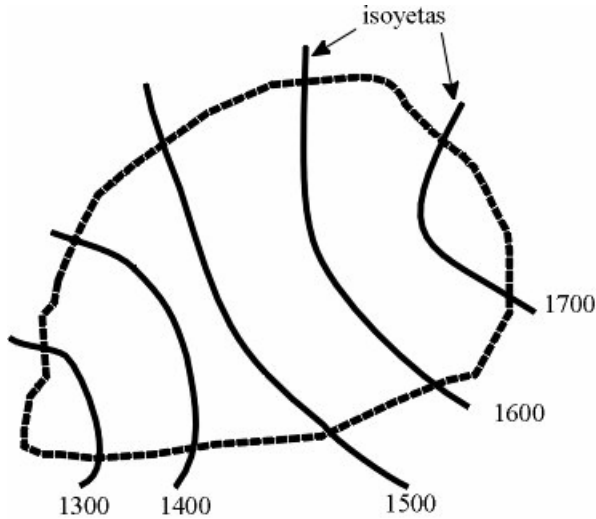


Figura 13. Isoyetas

El método consiste en:

1. Ubicar las estaciones dentro y fuera de la cuenca.
2. Trazar las isoyetas, interpolando las alturas de precipitación entre las diversas estaciones, de modo similar a cómo se trazan las curvas de nivel.
3. Hallar las áreas $A_1, A_2, \dots, A_n$ entre cada 2 isoyetas seguidas.
4. Si $P_0, P_1, \dots, P_n$ son las precipitaciones representadas por las isoyetas respectivas, calcular la precipitación media utilizando:

$$P_{med} = \frac{\frac{P_0 + P_1}{2} A_1 + \dots + \frac{P_{n-1} + P_n}{2} A_n}{A_1 + \dots + A_n}$$

$$P_{med} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n \frac{P_{i-1} + P_i}{2} A_i \quad \dots (6)$$

donde :

P_{med} = precipitación media

A_T = área total de la cuenca

P_i = altura de precipitación de las isoyetas i

A_i = área parcial comprendida entre las isoyetas P_{i-1} y P_i

n = número de áreas parciales

Problema 3:

En la zona de Guanacaste, se tiene una cuenca de 314.78 Km² que se muestra en la figura 14. En 8 estaciones ubicadas dentro y fuera de la cuenca, se ha medido la precipitación anual cuya información se indica en la tabla 2. Calcular la precipitación promedio utilizando el promedio aritmético, polígono de Thiessen e isoyetas.

Tabla 2 Precipitación anual en mm

Estación	Precipitación (mm)
1	2331
2	1820
3	1675
4	1868
5	1430
6	1497
7	1474
8	1638

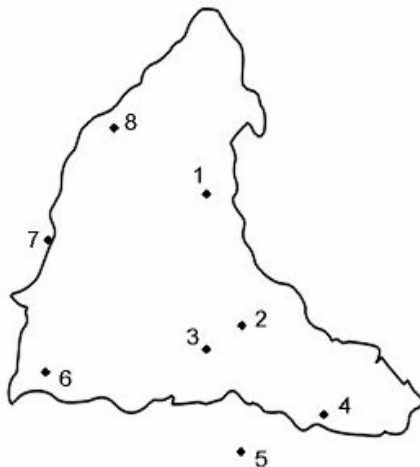


Figura 14 Ubicación de las estaciones en la cuenca

Elementos fundamentales del análisis de las tormentas

Durante el análisis de las tormentas hay que considerar:

- a) **La intensidad**, es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. Lo que interesa particularmente de cada tormenta, es la intensidad máxima que se haya presentado, ella es la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo. De acuerdo a esto la intensidad se expresa así:

$$i_{\text{máx}} = P/t$$

donde :

$i_{\text{máx}}$ = intensidad máxima, en mm/hora

P = precipitación en altura de agua, en mm

t = tiempo, en horas

- b) **La duración**, corresponde al tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta. Aquí conviene definir el **período de duración**, que es un determinado período de tiempo, tomado en minutos u horas, dentro del total que dura la tormenta.

Tiene mucha importancia en la determinación de las intensidades máximas.

Ambos parámetros, se obtienen de un pluviograma como se muestra en la figura 15.

- c) **La frecuencia**, es el número de veces que se repite una tormenta, de características de intensidad y duración definidas en un período de tiempo más o menos largo, tomado generalmente en años.

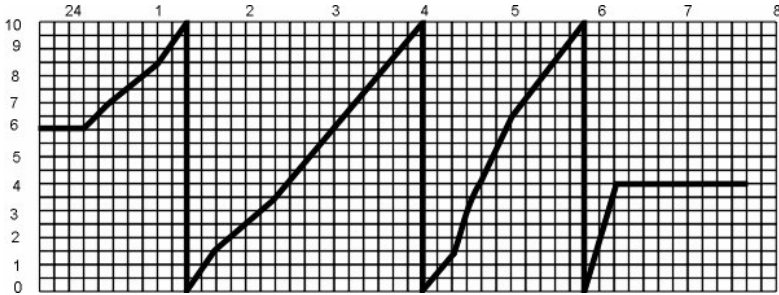


Figura 15. Registro de un pluviógrafo

- d) **Periodo de retorno**, intervalo de tiempo promedio, dentro del cual un evento de magnitud x , puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. Representa el inverso de la frecuencia, es decir:

$$T = \frac{1}{f}$$

Así se puede decir por ejemplo, que para la localidad de Cartago, se presentará una tormenta de intensidad máxima igual a 60 mm/hr, para una duración de 30 min, y un período de retorno de 10 años.

El hietograma y la curva masa de precipitación

La intensidad de la precipitación, varía en cada instante durante el curso de una misma tormenta, de acuerdo a las características de ésta. Es absolutamente indispensable, cuando se hace el análisis de las tormentas, determinar estas variaciones, porque de ellas dependen muchas de las condiciones, que hay que fijar para las obras de ingeniería hidráulica, para las que se hacen principalmente esta clase de estudios. Esto se consigue mediante dos gráficos: el hietograma y la curva masa de precipitación.

Hietograma

Es un gráfico de forma escalonada como un histograma, que representa la variación de la intensidad expresada en mm/hora de la tormenta, en el transcurso de la misma expresada en minutos u horas. En la figura 16, se puede ver esta relación que corresponde a una tormenta registrada por un pluviograma.

Mediante este hietograma es muy fácil decir a que hora, la precipitación adquirió su máxima intensidad y cual fue el valor de ésta. En la figura 16, se observa que la intensidad máxima de la tormenta, es de 6 mm/hr, y se presentó a los 500 min, 700 min y 800 min, de iniciado la tormenta. Matemáticamente este gráfico representa la relación:

$$i = \frac{dP}{dt}$$

donde:

i = intensidad

P = precipitación

t = tiempo

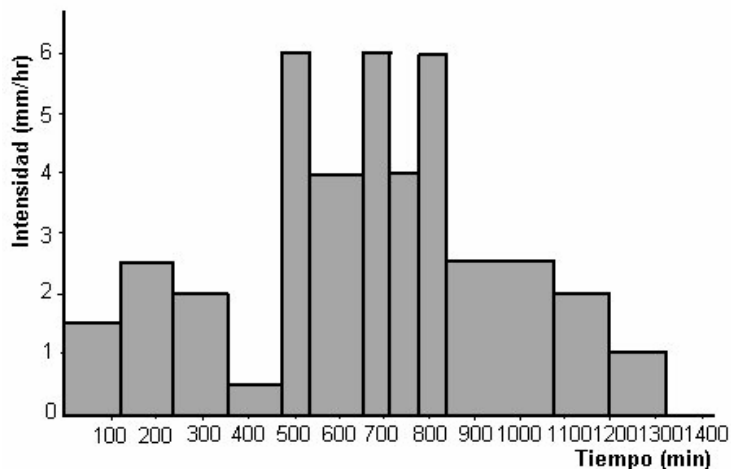


Figura 16. Hietograma de precipitación

Curva masa de precipitación

La curva masa de precipitación (figura 17), es la representación de la precipitación acumulada vs el tiempo. Se extrae directamente del pluviograma.

La curva masa de precipitación, es una curva no decreciente, la pendiente de la tangente en cualquier punto, representa la intensidad instantánea en ese tiempo.

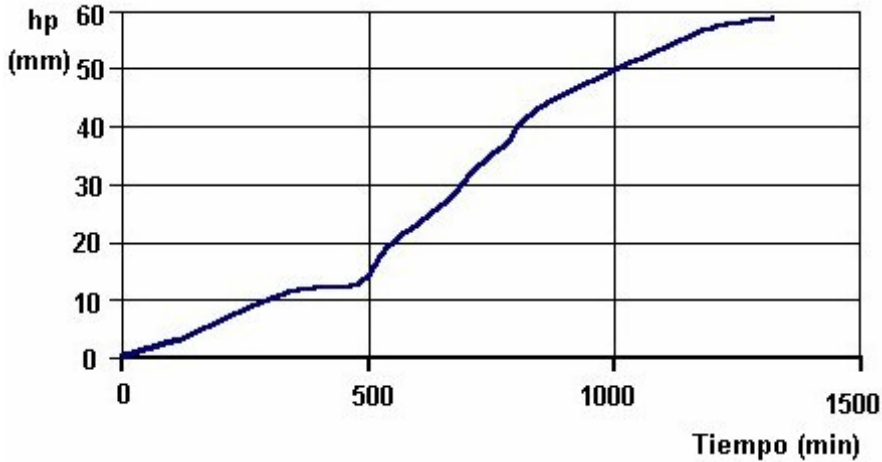


Figura 17. Curva masa de precipitación

Matemáticamente la curva masas de precipitación, representa la función $P = f(t)$ expresada por:

$$P = \int_0^{t_1} i \, dt$$

que se deduce de la relación: $i = \frac{dP}{dt}$

Proceso para el análisis de una tormenta registrada por un pluviograma

Para realizar el análisis de una tormenta, registrada por un pluviograma, hacer lo siguiente:

1. Conseguir el registro de un pluviograma.
2. Realizar una tabulación con la información obtenida del pluviograma, en forma similar a la mostrada en la tabla 3, donde sus columnas son:
 - (1) **Hora:** se anota las horas en que cambia la intensidad, se reconoce por el cambio de la pendiente, de la línea que marca la precipitación.

- (2) **Intervalo de tiempo**: es el intervalo de tiempo entre las horas de la columna (1).
- (3) **Tiempo acumulado**: es la suma sucesiva de los tiempos parciales de la columna (2).
- (4) **Lluvia parcial**: es la lluvia caída en cada intervalo de tiempo.
- (5) **Lluvia acumulada**: es la suma de las lluvias parciales de la columna (4).
- (6) **Intensidad**: es la altura de precipitación referida a una hora de duración, para cada intervalo de tiempo. Su cálculo se realiza mediante una regla de tres simple, obteniéndose:

$$\frac{\text{columna (4)} \times 60}{\text{columna (2)}}$$

3. Dibujar el hietograma (figura 16), esto se consigue ploteando las columnas (3) vs (6).

El hietograma permite apreciar más objetivamente como varía la intensidad durante la tormenta.

4. Dibujar la curva masa de precipitaciones (figura 17), esto se consigue ploteando las columnas (3) vs (5).
5. Calcular la intensidad máxima para diferentes periodos de duración. Los periodos de duración más utilizados son: 10 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min y 240 min.

Tabla 3 Análisis del pluviograma de una tormenta

Hora (1)	Intervalo de tiempo (min) (2)	Tiempo acumulado (min) (3)	Lluvia parcial (mm) (4)	Lluvia acumulada (mm) (5)	Intensidad (mm/hr) (6) (4)×60/(2)
4					
	120	120	3	3	1.5
6					
	120	240	5	8	2.5

Problema 4:

A partir del registro del pluviograma que se muestra en la figura 18, realizar el análisis de la tormenta, y obtener:

- El hietograma.
- La curva masa de precipitación.
- Las intensidades máximas, para duraciones de 10 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min y 240 min.

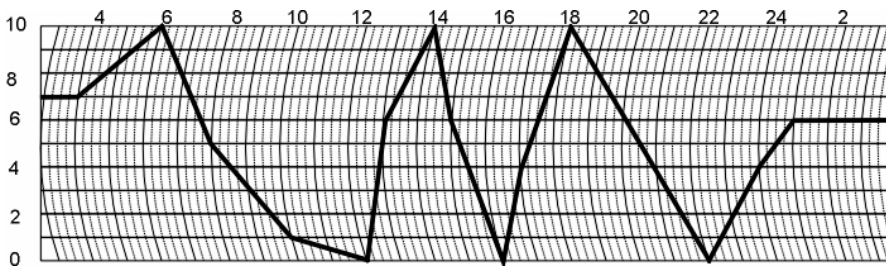


Figura 18. Pluviograma de una tormenta

Análisis de frecuencia de las tormentas

Para el análisis de las frecuencias de las tormentas, hacer lo siguiente:

1. Analizar todas las tormentas caídas en el lugar, siguiendo el proceso ya indicado, es decir, para cada tormenta hallar la intensidad máxima, para diferentes duraciones.
2. Tabular los resultados en orden cronológico, tomando la intensidad mayor de cada año para cada período de duración (10 min, 30 min, 60 min, 120 min, y 240 min), en una tabla similar a la 4.

Tabla 4 Intensidad máxima para períodos de duración de 10, 30, 60, 120 y 240 min

Año	Período de duración (min)				
	10	30	60	120	240
1973	102	81	64	42	18
1974	83	70	50	33	16
1975	76	61	42	29	20
1976	80	72	45	32	11
1977	61	58	36	28	14
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
2001	105	83	65	50	23

3. Ordenar en forma decreciente e independiente del tiempo, los valores de las intensidades máximas correspondientes a cada uno de los períodos de duración (tabla 5). Para cada valor, calcular su período de retorno utilizando la fórmula de Weibull:

$$T = \frac{n+1}{m}$$

donde :

T = período de retorno

m = número de orden

n = número total de observaciones, en este caso número de años

Tabla 5 Relación entre período de retorno, duración e intensidades máximas

Nº de Orden	Período de retorno	Período de duración (min)				
m	$T = \frac{n+1}{m}$	10	30	60	120	240
1	30	105	83	65	50	23
2	15	102	81	64	42	20
3	10	83	72	50	28	18
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
n = 29	.	.	.	.	.	.

4. Construir las curvas intensidad - duración - período de retorno (*i* - *d*- *T*)

Para la elaboración de estas curvas, hacer lo siguiente:

- Trazar los ejes coordenados; en el eje **X**, colocar las duraciones (en min), mientras que en el eje **Y**, colocar los valores de las intensidades (en mm/hr).
- Para un período de retorno **T** (en años) ubicar los pares (duración, intensidad), para ese período de retorno **T**.
- Trazar una curva que una los puntos (duración, intensidad).
- Repetir los dos últimos pasos para otros valores de **T**.

En la figura 19, se muestran 3 curvas para períodos de retorno de 10, 15, y 30 años.

Las curvas intensidad-duración-período de retorno, son complicadas de obtener, por la gran cantidad de información que hay que procesar, pero son sumamente útiles para la obtención de la intensidad máxima, para una duración y un período de retorno dado.

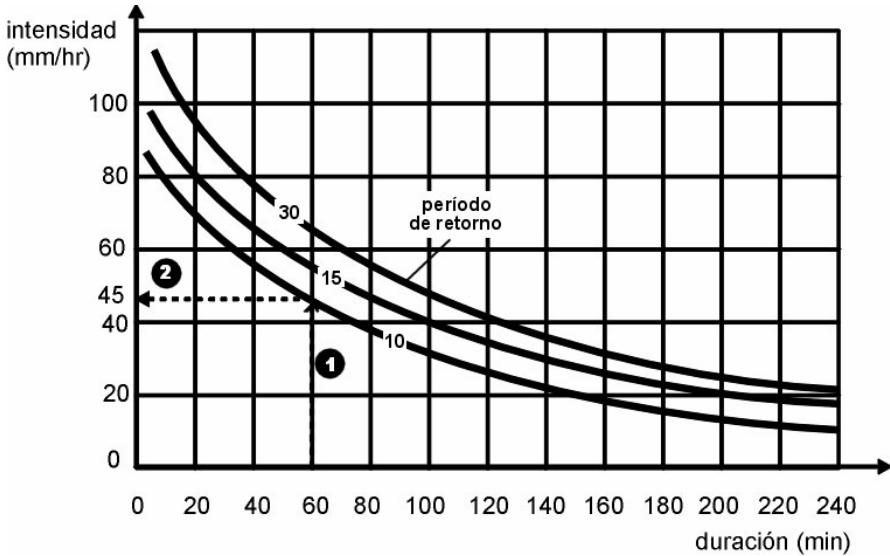


Figura 19 Curva intensidad - duración - período de retorno

El valor de la intensidad máxima se usa por ejemplo, en la ecuación del cálculo del caudal máximo utilizando el método racional, la cual es:

$$Q = \frac{CIA}{360}$$

donde:

Q = caudal máximo, m^3/s

C = coeficiente de escorrentía

I = intensidad máxima, en mm/hr, para una duración igual al tiempo de concentración y un período de retorno dado

A = área de la cuenca, has

Problema 5:

Utilizando la figura 19, hallar la intensidad máxima para una duración de 60 min y un período de retorno de 10 años.

Curvas intensidad – duración – período de retorno

Vahrson Wilhelm y Alfaro Marvin (1992), desarrollaron una investigación sobre las intensidades máximas para los principales centros urbanos de Costa Rica; el estudio lo realizaron para las ciudades de: San José, Cartago, Alajuela, Puntarenas, Limón, y Liberia.

En este proyecto, el registro en la mayoría de los casos fue de 21 años, obteniéndose registro de intensidades, para duraciones desde 5 hasta 720 min, y para períodos de retorno de 2 hasta 200 años, utilizando la distribución Gumbel.

De este estudio, se obtuvieron para cada ciudad, las ecuaciones, tablas y gráficos, que relacionan la intensidad máxima (i_{max}) en mm/hr, con la duración (D) en min, y el período de retorno (T) en años.

En la tabla 6, se muestran las ecuaciones obtenidas, para duraciones entre 5 y 120 min.

Tabla 6 Ecuaciones para calcular las intensidades máximas para las ciudades principales de Costa Rica

Ciudad/Ecuación
Alajuela: $I_{max} = 209.844 - 38.7305 \times \ln(D) + [42.614 - 24.6041 \times \ln(\ln(D))] \times \ln(T)$
Liberia: $I_{max} = 200.556 - 35.9234 \times \ln(D) + [44.1334 - 7.49972 \times \ln(D)] \times \ln(T)$
Limón: $I_{max} = 155.052 - 25.8865 \times \ln(D) + [21.7857 - 3.13747 \times \ln(D)] \times \ln(T)$
San José

$$I_{\max} = 166.097 - 29.6018 \times \ln(D) + [20.3018 - 2.79158 \times \ln(D)] \times \ln(T)$$

Cartago:

$$I_{\max} = 156.892 - 28.4612 \times \ln(D) + [42.2027 - 8.0731 \times \ln(D)] \times \ln(T)$$

Puntarenas:

$$I_{\max} = 175.645 - 29.5811 \times \ln(D) + [43.0524 - 5.32126 \times \ln(D)] \times \ln(T)$$

donde:

$i_{\max}$ = intensidad máxima, en mm/hr

D = duración, en min

T = período de retorno, en años

Medición del escurrimiento (aforos)

La hidrometría, es la rama de la hidrología que estudia la medición del escurrimiento. Para este mismo fin, es usual emplear otro término denominado **aforo**. Aforar una corriente, significa determinar a través de mediciones, el caudal que pasa por una sección dada y en un momento dado.

Existen diversos métodos, para determinar el caudal de una corriente de agua, cada uno aplicable a diversas condiciones, según el tamaño de la corriente o según la precisión con que se requieran los valores obtenidos. Los métodos más utilizados son:

- Aforos con flotadores
- Aforos volumétricos
- Aforos químicos
- Aforos con vertederos
- Aforos con correntómetro o molinete
- Aforos con medidas de la sección y la pendiente

Aforos con flotadores

Una forma sencilla de aproximar el valor del caudal de un cauce, es realizar el aforo con flotadores (figura 20).

Por este método, se mide la velocidad superficial (v) de la corriente y el área de la sección transversal (A), luego con estos valores aplicando la ecuación de continuidad, se calcula el caudal con la formula:

$$Q = v \times A \quad \dots (7)$$

Para realizar este aforo, se debe escoger en lo posible un tramo recto del cauce de longitud L .

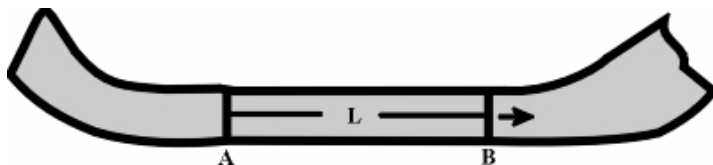


Figura 20 Tramo de un río adecuado para aforo con flotadores

Medida de la velocidad superficial de la corriente

El procedimiento para medir la velocidad es como sigue:

- Medir la longitud (L) del tramo **AB**.
- Medir con un cronómetro el tiempo (T), que tarda en desplazarse el flotador (botella lastrada, madera, cuerpo flotante natural) en el tramo **AB**.
- Calcular la velocidad superficial:

$$v = \frac{L}{T}$$

Cálculo del área promedio del tramo

Para el cálculo del área hacer lo siguiente:

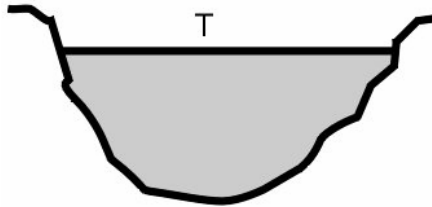
- Calcular el área en la sección **A** (A_A)
- Calcular el área en la sección **B** (A_B)
- Calcular el área promedio

$$A = \frac{A_A + A_B}{2}$$

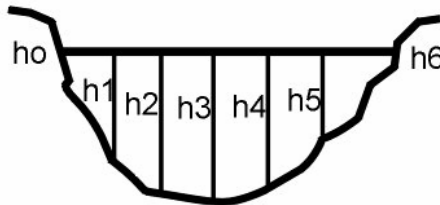
Cálculo del área en una sección

Para calcular el área en cualquiera de las secciones, hacer lo siguiente:

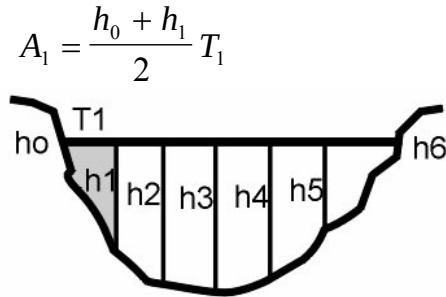
- Medir el espejo de agua (T).



- Dividir (T), en cinco o diez partes (midiendo cada 0.20, 0.30, 0.50, etc), y en cada extremo medir su profundidad.



- Calcular el área para cada tramo, usando el método del trapecio.



- Calcular el área total de una sección:

$$A_A = \sum A_i$$

Nota: Este método es el más inexacto, pero da una aproximación inicial del caudal.

Aforo volumétrico

Este método consiste en hacer llegar la corriente (figura 21), a un depósito o recipiente de volumen (V) conocido, y medir el tiempo (T) que tarda en llenarse dicho depósito.

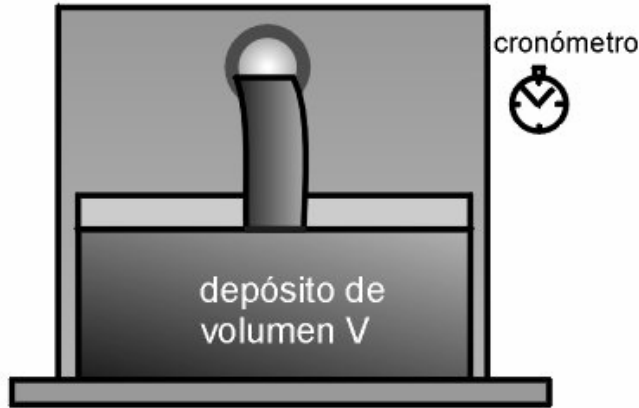


Figura 21 Aforo volumétrico

Para calcular el caudal, hacer:

- Calcular o medir el volumen del depósito o recipiente (V).
- Con un cronómetro, medir el tiempo (T), requerido para llenar el depósito.
- Calcular el caudal con la ecuación:

$$Q = \frac{V}{T} \quad \dots (8)$$

donde:

Q = caudal, en l/s ó m^3/s

V = volumen del depósito, en l o m^3

T = tiempo en que se llena el depósito, en s

Este método es el más exacto, pero es aplicable solo cuando se miden caudales pequeños. Por lo general, se usa en los laboratorios para calibrar diferentes estructuras de aforo, como sifones, vertederos, aforador Parshall, etc.

Las medidas con recipiente, se deben repetir 3 veces, y en caso de tener resultados diferentes, sacar un promedio, ya que se puede cometer pequeños errores al introducir el recipiente bajo el chorro.

Aforo con vertederos

Este método consiste en interponer una cortina en el cauce con el fin de represar el agua y obligarla a pasar por una escotadura (vertedero) practicado en la misma cortina (figura 22).

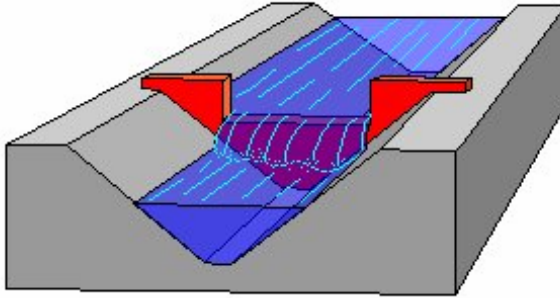


Figura 22 Aforo con vertedero

Los vertederos, son los dispositivos más utilizados para medir el caudal en canales abiertos, ya que ofrecen las siguientes ventajas:

- Se logra precisión en los aforos.
- La construcción de la estructura es sencilla.
- No son obstruidos por los materiales que flotan en el agua.
- La duración del dispositivo es relativamente larga.

Para utilizar este tipo estructura, sólo se requiere conocer la carga del agua sobre la cresta del vertedero, y para la obtención del caudal, utilizar su ecuación de calibración. La carga h , sobre el vertedero se debe medir a una distancia de $3h$ a $4h$ aguas arriba del vertedero.

Existen varias fórmulas halladas en forma experimental, siendo las siguientes, las que se más se usan en aforos de cursos de agua:

- Vertedero rectangular, de cresta aguda, con contracciones (figura 23):

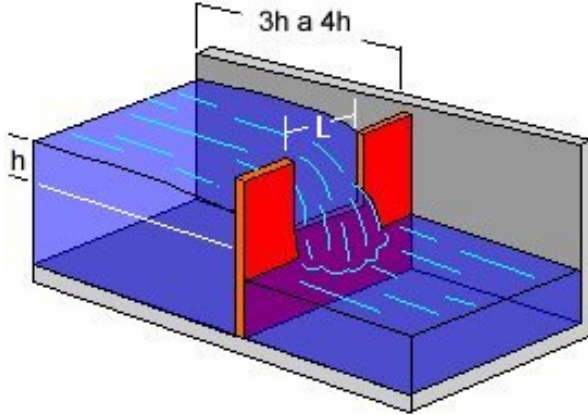


Figura 23 Vertedero rectangular, de cresta aguda con contracciones

La ecuación de Francis para este tipo de vertedero es:

$$Q = 1.84(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad \dots (9)$$

donde:

Q = caudal, en m^3 / s

L = longitud de cresta, en m

h = carga sobre el vertedero, en m, medida de $3h$ a $4h$

n = número de contracciones (1 ó 2)

- Vertedero rectangular, de cresta aguda, sin contracciones (figura 24):

La ecuación de Francis para este tipo de vertedero es:

$$Q = 1.84Lh^{\frac{3}{2}} \quad \dots (10)$$

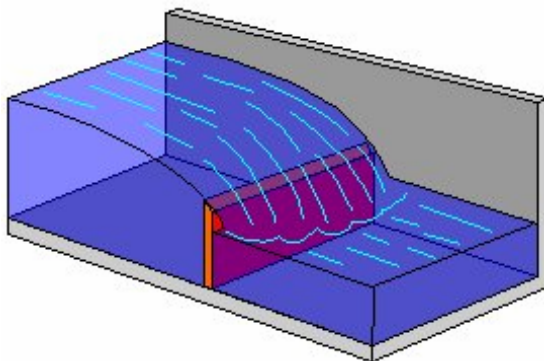


Figura 24 Vertedero rectangular, de cresta aguda sin contracciones

donde:

Q = caudal, en m^3 / s

L = longitud de cresta, en m

h = carga sobre el vertedero, en m

- Vertedero triangular, de cresta aguda (figura 25):

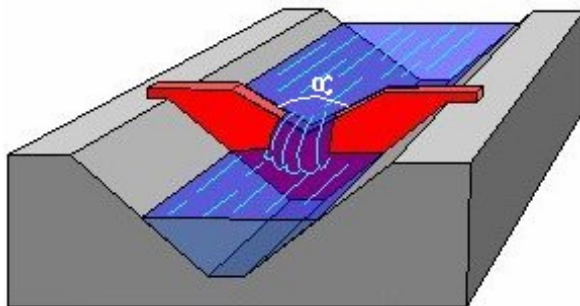


Figura 25 Vertedero triangular, de cresta aguda

La ecuación para un ángulo $\alpha = 90^\circ$, de la cresta del vertedero, es:

$$Q = 1.4h^{\frac{5}{2}} \dots (11)$$

donde:

Q = caudal, en m^3/s

h = carga en el vertedero, en m

Aforos con correntómetros o molinetes

Para este método, se emplea el correntómetro o molinete. Estos son aparatos que miden la velocidad, en un punto dado del curso del agua. Esta velocidad es medida en los instrumentos, por medio de un órgano móvil, que detecta la velocidad de la corriente y transmite las indicaciones de un interruptor encargado de cerrar un circuito eléctrico, cuando ha dado un cierto número de vueltas, sobre un contador o contómetro (de impulsiones de sonido, señales luminosas, digitales, etc).

Hay muchos tipos de correntómetros; unos son de eje vertical (figura 26), sin hélice, donde el elemento móvil son pequeñas copas (como en un anemómetro), otros son de eje horizontal y el elemento móvil es una hélice, como los correntómetros OTT que se muestra en la figura 27.



Figura 26 Molinete de eje vertical

Los correntómetros, son vendidos con un certificado de calibración, sobre el que figura la fórmula que debe utilizarse, para calcular las velocidades, a partir del número de vueltas por segundo de la hélice determinada, la cual, puede ponerse bajo la forma:

$$v = a \times n + b$$

donde:

v = velocidad de la corriente, en m/s

n = número de vueltas de la hélice por segundo

a = paso real de la hélice, en m

b = velocidad llamada de frotamiento, en m/s



Figura 27 Correntómetro de eje horizontal

Cabe señalar que en realidad la velocidad se mide indirectamente, ya que en la práctica lo que se mide es el tiempo que emplea la hélice, para dar un cierto número de revoluciones, y mediante una fórmula propia para cada hélice se calcula la velocidad. Por ejemplo, para un correntómetro OTT-Meter N° 7569, del **Minae**, la fórmula para la hélice obtenida en el laboratorio, es la siguiente:

$$\text{Para } n < 0.57 \quad \rightarrow \quad v = 0.2358 \times n + 0.025$$

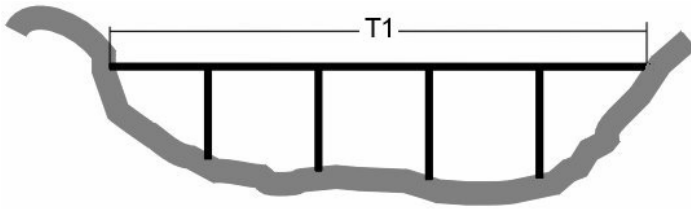
$$\text{Para } n \geq 0.57 \quad \rightarrow \quad v = 0.2585 \times n + 0.012$$

Proceso para realizar el aforo

1. Calcular el área de la sección transversal

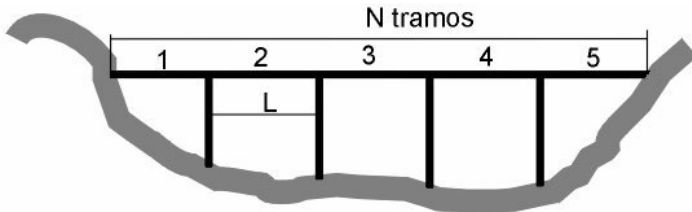
Para iniciar un aforo, es necesario dividir la sección transversal (área hidráulica), en franjas, para esto:

- Medir el ancho del río (longitud de la superficie libre de agua o espejo de agua T_1)



- Dividir el espejo de agua T_1 , en un número N de tramos (por lo menos $N = 10$), siendo el ancho de cada tramo:

$$L = \frac{T_1}{N}$$

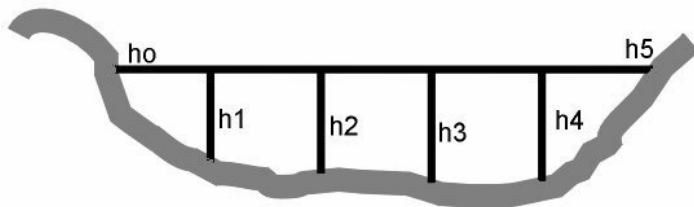


Según, el Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano, la distancia mínima entre verticales, se muestra en la tabla 7.

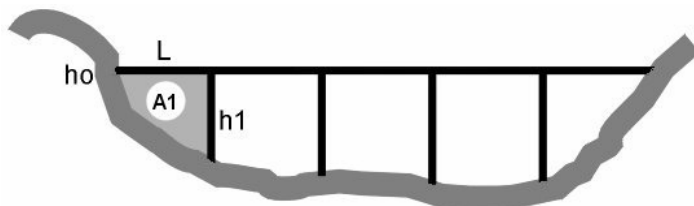
Tabla 7 Distancias mínimas entre verticales recomendadas

Ancho total mínimo del río (m)	Distancia entre verticales (m)
Menos de 2	0.20
2 – 3	0.30
3 – 4	0.40
4 – 8	0.50
8 – 15	1.0
15 – 25	2.0
25 – 35	3.0
35 – 45	4.0
45 – 80	5.0
80 – 160	10.0
160 – 350	20.0

- Medir en cada vertical, la profundidad h , puede suceder que en los márgenes la profundidad sea cero o diferente de cero.



- El área de cada tramo, se puede determinar como el área de un trapecio. Si la profundidad en algunos de los extremos es cero, se calcula como si fuera un triángulo.



Ejemplo:

$$A_1 = \frac{h_0 + h_1}{2} \times L$$

donde:

A_1 = área del tramo 1

h_0, h_1 = profundidades en los extremos del tramo

L = ancho de la superficie del tramo

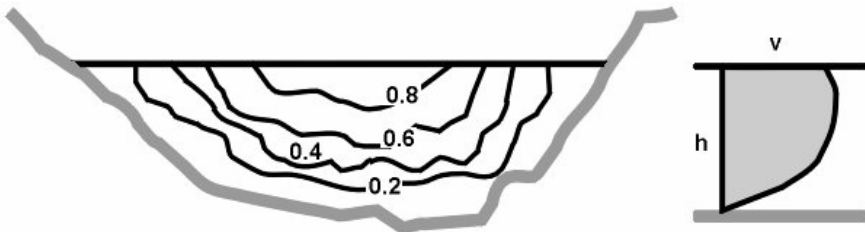
Si $h_0 = 0$, la figura es un triángulo, siendo su área:

$$A_1 = \frac{h_1}{2} \times L$$

2. Calcular la velocidad

Calcular la velocidad puntual

La velocidad en una sección de una corriente varía tanto transversalmente como con la profundidad, como se muestra en la figura.



Las velocidades, se miden en distintos puntos en una vertical; la cantidad de puntos, depende de las profundidades del cauce y del tamaño del correntómetro.

Para calcular la velocidad en un punto, hacer:

- Colocar el instrumento (correntómetro o molinete) a esa profundidad.
- Medir el número de revoluciones (NR) y el tiempo (T en segundos), para ese número de revoluciones.
- Calcular el número de revoluciones por segundo (n), con la ecuación:

$$n = \frac{NR}{T}$$

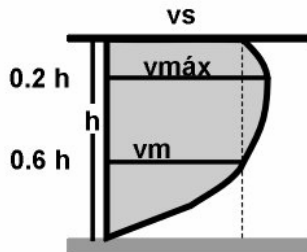
- Calcular la velocidad puntual en m/s, usando la ecuación proporcionada por el fabricante del equipo, por ejemplo, el correntómetro A-OTT 1-105723 del **Senara**, tiene las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } n < 0.99 \rightarrow v = 0.2507 \times n + 0.015 \quad m/s$$

$$\text{Si } n \geq 0.99 \rightarrow v = 0.99 \times n + 0.008 \quad m/s$$

Calcular la velocidad promedio en una vertical

La distribución de velocidades en una vertical, tiene la forma de una parábola, como se muestra en la figura.



En la figura se observa:

v_s = velocidad superficial

$v_{m\acute{a}x}$ = ubicada a 0.2 de la profundidad, medido con respecto a la superficie del agua

v_m = velocidad media en la vertical, la cual tiene varias formas de cálculo

La relación entre la velocidad media y superficial es:

$$v_m = C \times v_s$$

donde:

C varía de 0.8 a 0.95, generalmente se adopta igual a 0.85

La velocidad media v_m , en una vertical se puede calcular de las siguientes maneras:

Midiendo la velocidad en un punto

$$v_m = v_{0.6}$$

donde:

$v_{0.6}$ = velocidad medida a una profundidad de 0.6 de la profundidad total, medida con respecto a la superficie libre

Esto se emplea, cuando la profundidad del agua es pequeña, o hay mucha vegetación a 0.8 de la profundidad.

Midiendo la velocidad en dos puntos

$$v_m = \frac{v_{0.2} + v_{0.8}}{2}$$

donde:

$v_{0.2}$ = velocidad medida a 0.2 de la profundidad, con respecto a la superficie

$v_{0.8}$ = velocidad medida a 0.8 de la profundidad, con respecto a la superficie

Midiendo la velocidad en tres puntos

$$v_m = \frac{v_{0.2} + v_{0.6} + v_{0.8}}{3} \quad \text{ó} \quad v_m = \frac{v_{0.2} + 2v_{0.6} + v_{0.8}}{4}$$

donde:

$v_{0.2}$ = velocidad medida a 0.2 de la profundidad, con respecto a la superficie

$v_{0.6}$ = velocidad medida a 0.6 de la profundidad, con respecto a la superficie

$v_{0.8}$ = velocidad medida a 0.8 de la profundidad, con respecto a la superficie

Calcular la velocidad promedio de un tramo

La velocidad promedio de cada tramo, se calcula como la semisuma de las velocidades medias, de las verticales que delimitan el tramo, es decir:

$$vp_2 = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

donde:

vp = velocidad promedio del tramo

v_1, v_2 = velocidades medias de las verticales

3. Calcular el caudal

Método del área y velocidad promedio

Procedimiento:

- Calcular para cada vertical la velocidad media, usando el método de uno, dos o tres puntos.
- Determinar la velocidad promedio de cada tramo, como el promedio de dos velocidades medias, entre dos verticales consecutivas, es decir:

$$v_{pl} = \frac{v_{m0} + v_{m1}}{2}$$

- Determinar el área que existe entre dos verticales consecutivas, utilizando la fórmula del trapecio, es decir:

$$A_1 = \frac{h_0 + h_1}{2} \times L$$

- Determinar el caudal que pasa por cada tramo utilizando la ecuación de continuidad, multiplicando la velocidad promedio del tramo por el área del tramo, es decir:

$$Q_1 = v_1 \times A_1$$

- Calcular el caudal total que pasa por la sección, sumando los caudales de cada tramo, es decir:

$$Q = \sum Q_i$$

Caudales máximos

Para diseñar:

- Las dimensiones de un cauce
- Sistemas de drenaje
 - agrícola
 - aeropuerto
 - ciudad
 - carretera
- Muros de encauzamiento para proteger ciudades y plantaciones
- Alcantarillas
- Vertedores de demasías
- Luz en puentes

Se debe calcular o estimar el caudal de diseño, que para esos casos, son los caudales máximos.

La magnitud del caudal de diseño, es función directa del período de retorno que se le asigne, el que a su vez depende de la importancia de la obra y de la vida útil de ésta.

Período de retorno de una avenida

Para el caso de un caudal de diseño, el período de retorno se define, como el intervalo de tiempo dentro del cual un evento de magnitud Q , puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio.

Si un evento igual o mayor a Q , ocurre una vez en T años, su probabilidad de ocurrencia P , es igual a 1 en T casos, es decir:

$$P = \frac{1}{T} \quad \text{ó} \quad T = \frac{1}{P}$$

donde:

P = probabilidad de ocurrencia de un caudal $\geq Q$

T = período de retorno

En la tabla 8, se muestran períodos de retorno recomendados para estructuras menores.

Tabla 8. Período de retorno de diseño recomendado para estructuras menores

Tipo de estructura	Período de Retorno (años)
Puente sobre carretera importante	50 – 100
Puente sobre carretera menos importante o alcantarillas sobre carretera importante	25
Alcantarillas sobre camino secundario	5 – 10
Drenaje lateral de los pavimentos, donde puede tolerarse encharcamiento con lluvia de corta duración	1 – 2
Drenaje de aeropuertos	5
Drenaje urbano	2 - 10
Drenaje Agrícola	5 – 10
Muros de encauzamiento	2 – 50 *

*Puede aumentar si estas obras protegen poblados de importancia.

Método directo

Este es un método hidráulico, llamado de *Sección y Pendiente*, en el cual el caudal máximo se estima después del paso de una avenida, con base en datos específicos obtenidos en el campo. Los trabajos de campo incluyen:

1. Selección de un tramo del río representativo, suficientemente profundo, que contenga al nivel de las aguas máximas.

2. Levantamiento de secciones transversales en cada extremo del tramo elegido, y determinar:

A_1, A_2 = áreas hidráulicas

P_1, P_2 = perímetros mojados

R_1, R_2 = radios hidráulicos $\left(R_1 = \frac{A_1}{P_1} \right)$

$$A = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

3. Determinar la pendiente S , de la superficie libre de agua con las huellas de la avenida máxima en análisis.
4. Elegir el coeficiente de rugosidad n de Manning de acuerdo a las condiciones físicas del cauce (tabla 9). En la figura 27, se muestran algunas fotos de rugosidades para canales naturales, calculados por the U.S Geological Survey y presentado por Barnes en su libro *Roughness Characteristics of Natural Channels*.
5. Aplicar la fórmula de Manning

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad \dots (12)$$

donde:

Q = caudal máximo, m^3/s

n = coeficiente de rugosidad

A = área hidráulica promedio, m^2

R = radio hidráulico promedio, m

S = pendiente, m/m

Tabla 9 Valores de n dados por Horton para ser usados en las fórmulas de Kutter y de Manning

Superficie	Condiciones de las paredes			
	Perfectas	Buenas	Medianas	Malas
Tubería hierro forjado negro comercial	0.012	0.013	0.014	0.015
Tubería fierro forjado galvanizado comercial	0.013	0.014	0.015	0.017
Tubería de latón o vidrio	0.009	0.010	0.011	0.013
Tubería acero remachado en espiral	0.013	0.015*	0.017*	
Tubería de barro vitrificado	0.010	0.013*	0.015	0.017
Tubos comunes de barro para drenaje	0.011	0.012*	0.014*	0.017
Tabique vidriado	0.011	0.012	0.013	0.015
Tabique con mortero de cemento; albañales de tabique	0.012	0.013	0.015*	0.017
Superficies de cemento pulido	0.010	0.011	0.012	0.013
Superficies aplanadas con mortero de cemento	0.011	0.012	0.013*	0.015
Tuberías de concreto	0.012	0.013	0.015*	0.016
Tuberías de duela	0.010	0.011	0.012	0.013
<i>Acueductos de tablón:</i>				
Labrado	0.010	0.012*	0.013	0.014
Sin labrar	0.011	0.013*	0.014	0.015
Con astillas	0.012	0.015*	0.016	
Canales revestidos con concreto	0.012	0.014*	0.016*	0.018
Superficie de mampostería con cemento	0.017	0.020	0.025	0.030
Superficie de mampostería en seco	0.025	0.030	0.033	0.035
Acueducto semicirculares metálicos, lisos	0.011	0.012	0.013	0.015
Acueducto semicirculares	0.0225	0.025	0.0275	0.030

metálicos corrugados				
<i>Canales y zanjas:</i>				
En tierra, alineados y uniformes	0.017	0.020	0.0225	0.025*
En roca, lisos y uniformes	0.025	0.030	0.033*	0.035
En roca, con salientes y sinuosos	0.035	0.040	0.045	
Sinuosos y de escurrimiento lento	0.0225	0.025*	0.0275	0.030
Degradados en tierra	0.025	0.0275*	0.030	0.033
Con lecho pedregoso y bordos de tierra enhierbados	0.025	0.030	0.035*	0.040
Plantilla de tierra, taludes ásperos	0.028	0.030*	0.033*	0.035
<i>Corrientes naturales:</i>				
(1) Limpios, bordos rectos, llenos, sin hendeduras ni charcos profundos.	0.025	0.0275	0.030	0.033
(2) Igual al (1) pero con algo de hierba y piedra.	0.030	0.033	0.035	0.040
(3) Sinuoso, algunos charcos y escollos, limpio	0.033	0.035	0.040	0.045
(4) Igual al (3), de poco tirante, con pendiente y sección menos eficiente.	0.040	0.045	0.050	0.055
(5) Igual al (3), algo de hierba y piedras.	0.035	0.040	0.045	0.050
(6) Igual al (4), secciones pedregosas.	0.045	0.050	0.055	0.060
(7) Ríos con tramos lentos, cauce enhierbado o con charcos profundos.	0.050	0.060	0.070	0.080
(8) Playas muy enyerbadas.	0.075	0.100	0.125	0.150

(*) Valores de uso común en proyectos

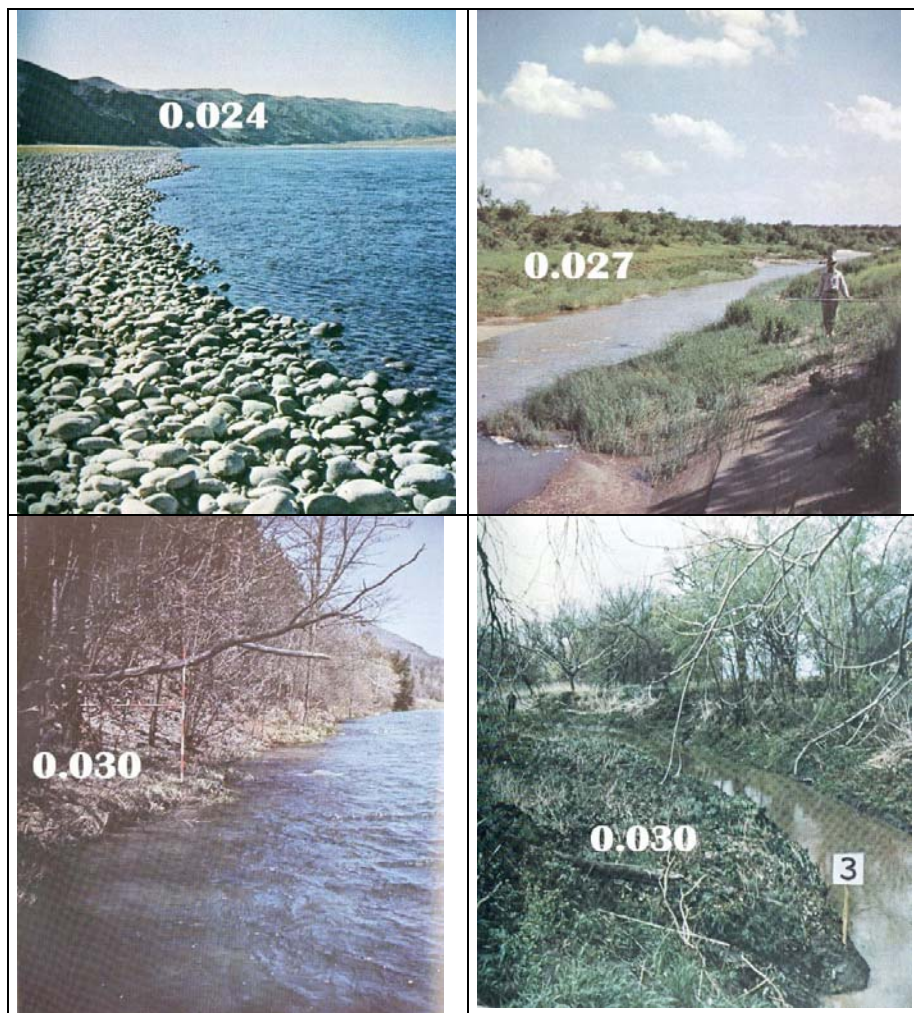


Figura 27 Rugosidades de canales naturales

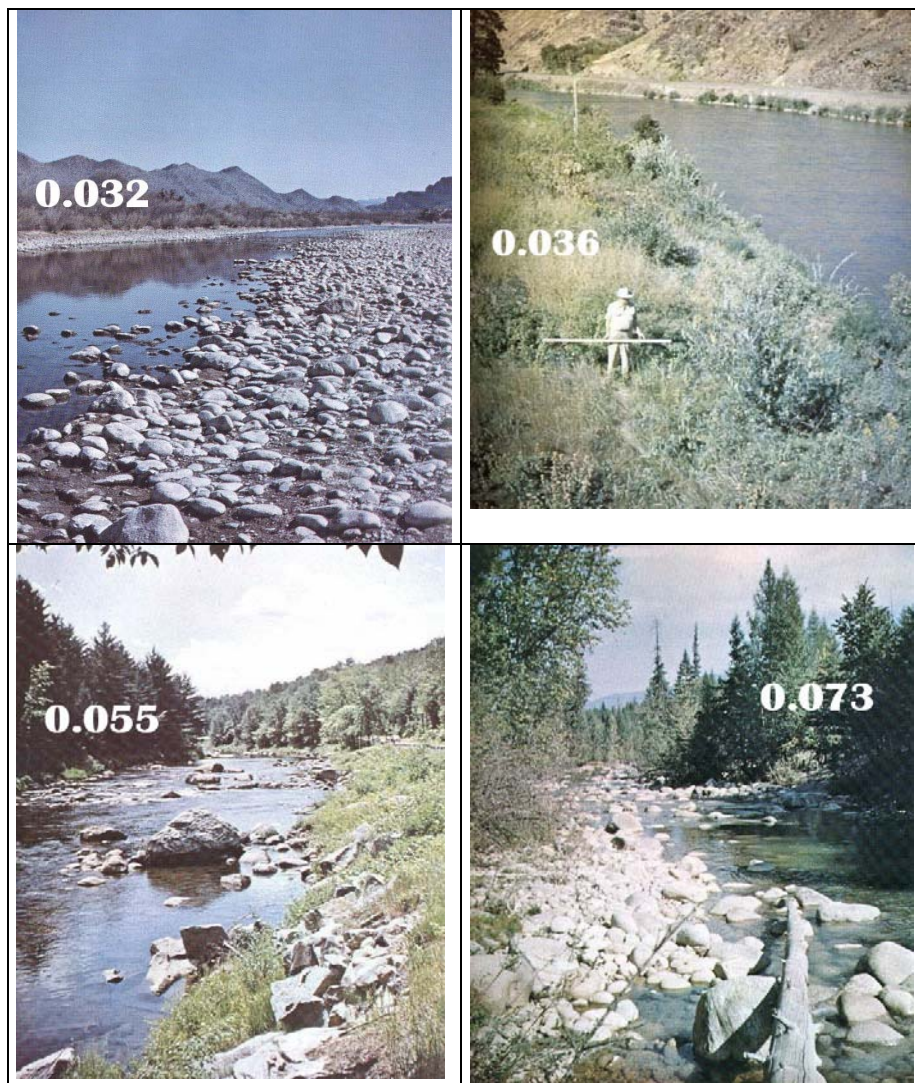


Figura 27 Rugosidades de canales naturales (continuación)

Métodos empíricos

Existe una gran variedad de métodos empíricos, en general todos se derivan del método racional.

Debido a su sencillez, los métodos empíricos tienen gran difusión, pero pueden involucrar grandes errores, ya que el proceso de escurrimiento, es muy complejo como para resumirlo en una fórmula de tipo directo, en la que solo intervienen el área de la cuenca y un coeficiente de escurrimiento.

Método racional

El uso de este método, tienen una antigüedad de más de 100 años, se ha generalizado en todo el mundo. En mayo de 1989, la universidad de Virginia, realizó una Conferencia Internacional, en conmemoración del Centenario de la Fórmula Racional.

El método puede ser aplicado a pequeñas cuencas de drenaje agrícola, aproximadamente si no exceden a 1300 has ó 13 km².

En el método racional, se supone que la máxima escorrentía ocasionada por una lluvia, se produce cuando la duración de ésta es igual al tiempo de concentración (t_c). Cuando así ocurre, toda la cuenca contribuye con el caudal en el punto de salida. Si la duración es mayor que el t_c , contribuye asimismo toda la cuenca, pero en ese caso la intensidad de la lluvia es menor, por ser mayor su duración y, por tanto, también es menor el caudal.

Si la duración de la lluvia es menor que el t_c la intensidad de la lluvia es mayor, pero en el momento en el que acaba la lluvia, el agua caída en los puntos mas alejados aún no ha llegado a la salida; sólo contribuye una parte de la cuenca a la escorrentía, por lo que el caudal será menor.

Aceptando este planteamiento, el caudal máximo se calcula por medio de la siguiente expresión, que representa la fórmula racional:

$$Q = \frac{CIA}{360} \quad \dots (13)$$

donde:

Q = caudal máximo, en m^3/s

C = coeficiente de escorrentía, que depende de la cobertura vegetal, la pendiente y el tipo de suelo, sin dimensiones

I = intensidad máxima de la lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración, y para un período de retorno dado, en mm/hr

A = área de la cuenca, en has

El coeficiente $1/360$ corresponde a la transformación de unidades.

Para el caso en que el área de la cuenca esté expresado en Km^2 la formula es:

$$Q = \frac{CIA}{3.6}$$

siendo los demás parámetros con las mismas unidades.

A continuación se indican los distintos factores de esta fórmula:

Tiempo de concentración (t_c)

Se denomina tiempo de concentración, al tiempo transcurrido, desde que una gota de agua cae, en el punto mas alejado de la cuenca hasta que llega a la salida de ésta (estación de aforo). Este tiempo es función de ciertas características geográficas y topográficas de la cuenca.

El tiempo de concentración debe incluir los escurrimientos sobre terrenos, canales, cunetas y los recorridos sobre la misma estructura que se diseña.

Todas aquellas características de la cuenca tributaria, tales como dimensiones, pendientes, vegetación, y otras en menor grado, hacen variar el tiempo de concentración.

Existen varias formas de hallar el tiempo de concentración t_c , de una cuenca.

Formulas de Kirpich

Según Kirpich, la fórmula para el cálculo del tiempo de concentración es:

$$t_c = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad \dots (14)$$

donde:

t_c = tiempo de concentración, en min

L = máxima longitud del recorrido, en m

H = diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal, en m

Determinación del coeficiente de escorrentía (C)

La escorrentía, es decir, el agua que llega al cauce de evacuación, representa una fracción de la precipitación total. A esa fracción se le denomina coeficiente de escorrentía, que no tiene dimensiones y se representa por la letra C .

$$C = \frac{V_{\text{escorrentía superficial total}}}{V_{\text{precipitado total}}}$$

El valor de C depende de factores topográficos, edafológicos, cobertura vegetal, etc.

En la tabla 10 se presentan valores del coeficiente de escorrentía en función de la cobertura vegetal, pendiente y textura.

En la tabla 11, se muestran coeficientes de escorrentía para zonas urbanas, los cuales son bastante conservadores, para que puedan ser usados para diseño.

Tabla 10 Valores del coeficiente de escorrentía (Fuente: Manual de Conservación del suelo y del agua, Chapingo, México, 1977)

Tipo de vegetación	Pendiente (%)	Textura		
		Franco arenosa	Franco arcillolimosa franco limosa	Arcillosa
Forestal	0 - 5	0.10	0.30	0.40
	5 - 10	0.25	0.35	0.50
	10 - 30	0.30	0.50	0.60
Praderas	0 - 5	0.10	0.30	0.40
	5 - 10	0.15	0.35	0.55
	10 - 30	0.20	0.40	0.60
Terrenos cultivados	0 - 5	0.30	0.50	0.60
	5 - 10	0.40	0.60	0.70
	10 - 30	0.50	0.70	0.80

Cuando la cuenca se compone de superficies de distintas características, el valor de **C** se obtiene como una media ponderada, es decir:

$$C = \frac{C_1 A_1 + C_2 A_2 + \dots + C_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \dots (15)$$

donde:

C = coeficiente de escorrentía ponderado

C_i = coeficiente de escorrentía para el área A_i

A_i = área parcial i

n = número de áreas parciales

Tabla 11 Valores de C para zonas urbanas.

Tipo de área drenada	Coefficiente C
Áreas comerciales	
Céntricas	0.7 – 0.95
Vecindarios	0.5 – 0.7
Áreas residenciales	
Familiares simples	0.30 – 0.50
Multifamiliares separadas	0.40 – 0.60
Multifamiliares concentrados	0.60 – 0.75
Semi-urbanos	0.25 – 0.40
Casas de habitación	0.50 – 0.70
Áreas industriales	
Densas	0.60 – 0.90
Espaciadas	0.50 – 0.80
Parques, cementerios	0.10 – 0.25
Campos de juego	0.10 – 0.35
Patios de ferrocarril	0.20 – 0.40
Zonas suburbanas	0.10 – 0.30
Calles	
Asfaltadas	0.70 – 0.95
De concreto hidráulico	0.80 – 0.95
Adoquinadas	0.70 – 0.85
Estacionamientos	0.75 – 0.85
Techados	0.75 – 0.95

Problema 6:

En una zona de Limón una compañía bananera cuenta con 350 has. En ella el 45 % del área es una zona de bosque, que tiene una pendiente promedio del 6% y una textura franco limosa. El resto del área está sembrada de banano y tiene una pendiente promedio del 5%. El 30% del área sembrada tiene una textura franco arenosa y el resto es arcilloso.

Sabiendo que la distancia máxima de la cuenca es de 2000 m, con un desnivel de 15 m, entre el sitio más alejado y el punto más bajo, determinar el caudal de diseño para construir el dren, usando el método racional, para un período de retorno de 10 años.

Nota: Para el cálculo de $I_{\text{máx}}$ utilizar:

1. La fórmula de Vahrson.
2. La curva intensidad - duración - período de retorno de la figura 19

Evaporación

La evaporación es una etapa permanente del ciclo hidrológico. Hay evaporación en todo momento y en toda superficie húmeda. Considerada un fenómeno puramente físico, la evaporación es el paso del agua del estado líquido al estado gaseoso; sin embargo hay otra evaporación provocada por la actividad de las plantas, el cuál recibe el nombre de transpiración.

Evaporación total: evapotranspiración (evaporación + transpiración)

Factores meteorológicos que afectan la evaporación

Dentro de los factores meteorológicos que afectan a la evaporación, se tienen a:

- radiación solar
- temperatura del aire
- presión de vapor
- viento
- presión atmosférica

Debido a que la radiación solar es el factor mas importante, la evaporación varía con la latitud, época del año, hora del día y condición de nubosidad.

Evapotranspiración

La evapotranspiración está constituida por las pérdidas totales, es decir: evaporación de la superficie evaporante (del suelo y agua) + transpiración de las plantas.

El término **evapotranspiración potencial** fue introducido por Thornthwaite, y se define como la pérdida total del agua, que ocurriría si en ningún momento existiera deficiencia de agua en el suelo, para el uso de la vegetación.

Se define como el **uso consuntivo**, la suma de la evapotranspiración y el agua utilizada directamente para construir los tejidos de las plantas.

Como el agua para construir los tejidos, comparada con la evapotranspiración es despreciable, se puede tomar:

$$\text{Uso consuntivo} \approx \text{evapotranspiración}$$

En los proyectos de irrigación, interesa hacer cálculos previos de las necesidades de agua de los cultivos. Estas necesidades de agua, que van a ser satisfechas mediante el riego, viene a constituir la evapotranspiración o el uso consuntivo.

Para el cálculo de estas cantidades de agua se han desarrollado métodos basados en datos meteorológicos, de los cuales los mas conocidos son el Thornthwaite y el de Blaney –Clidde.

Método de Thornthwaite

Fue desarrollada en los Estados Unidos, se puede aplicar con relativa confianza en regiones húmedas como Costa Rica. Para su cálculo se requieren datos de temperaturas medias mensuales.

Para el cálculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite, hacer lo siguiente:

1. Calcular la evapotranspiración mensual e , en mm por mes de 30 días de 12 horas de duración.

$$e = 16 \left(10 \frac{t}{I} \right)^a \quad \dots (16)$$

donde :

e = evapotranspiración mensual en mm por mes de 30 días, y 12 horas de duración

t = temperatura media mensual en °C

$$I = \sum i \quad I = \text{índice térmico anual} \quad \dots (17)$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad i = \text{índice térmico mensual} \quad \dots (18)$$

$$a = 0.6751 \times 10^{-6} I^3 - 0.771 \times 10^{-4} I^2 + 0.01792 I + 0.49239 \quad \dots (19)$$

a = exponente que varía con el índice anual de calor de la localidad

2. Corregir el valor de e , de acuerdo con el mes considerado y a la latitud de la localidad que determinan las horas de sol, cuyos valores se obtienen de la tabla 12.

Ejemplo, como Costa Rica se encuentra a 10° latitud norte, de la tabla 12, el factor de corrección para el mes de enero es 0.98, febrero 0.91 y así sucesivamente, luego:

$$e_c = f \times e \quad \dots (20)$$

donde:

e_c = evapotranspiración mensual corregida, en mm

f = factor de corrección

e = evapotranspiración mensual sin corregir, en mm

Problema 7:

En la estación Tilarán N° 076002, con latitud 10° 28' N, en Costa Rica, cuya elevación es 562 m.s.n.m, se tienen datos de temperaturas medias mensuales, para el período 1961 – 2004, las cuales se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Temperaturas medias mensuales de la estación Tilarán

Mes	E	F	M	A	M	J
T (°C)	22.39	22.60	23.31	23.95	24.39	23.51
Mes	J	A	S	O	N	D
T (°C)	23.7	23.42	23.59	23.42	22.91	22.71

Utilizando el método de Thornthwaite estimar la evapotranspiración de referencia diaria.

Balance hidrológico

El balance hídrico mensual de un proyecto, resulta de gran interés práctico como por ejemplo para elaborar el calendario agrícola, previsión de pequeños embalses, etc. Su cálculo se puede realizar a partir de los valores de la evapotranspiración corregida, haciendo intervenir además la precipitación media mensual.

Problema 8:

En Cañas Costa Rica, se tiene un proyecto de riego de 1200 has, el cual cuenta con un registro de 20 años de temperaturas medias mensuales, en °C y precipitaciones medias mensuales en mm de la estación 76008 Taboga, con latitud 10° 21' N, como se muestra en la tabla 14.

Usted, está encargado del proyecto de irrigación y con base en el déficit de sequía del balance hídrico obtenido, utilizando el método de Thornhwaite, debe indicar en que meses se debe aplicar el riego.

Tabla 14 Registro de temperaturas y precipitaciones medias mensuales en la estación Taboga

Meses (1)	T °C (2)	P (mm) (3)	Meses (1)	T °C (2)	P (mm) (3)
E	23.1	34.04	J _L	23.6	182.7
F	23.5	9.26	A	23.6	233.2
M	24.3	9.45	S	23.4	326.8
A	25.2	42.9	O	23.2	356.6
M	24.8	161.3	N	23.1	161.4
J _N	24.2	210.3	D	22.8	64.1

Tabla 12 Factor de corrección f, por duración media de las horas de sol expresada en unidades de 30 días, con 12 horas de sol cada una

Latitud		E	F	M	A	M	J _N	J _L	A	S	O	N	D
Norte	50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70
	45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
	40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
	35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
	30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
	25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.71	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
	20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
	15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
	10	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
	5	1.00	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
	0	1.02	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
Sur	5	1.04	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
	10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
	15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
	20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
	25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
	30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
	35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
	40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
	45	1.31	1.10	1.07	0.91	0.81	0.71	0.78	0.90	0.99	1.17	1.26	1.36
	50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41