

6.1 ASPECTOS CUALITATIVOS

6.1.1 Introducción

La escorrentía es aquella parte de la precipitación que se manifiesta más tarde como corriente de superficie en un río permanente o intermitente. En una determinada hoya hidrográfica la escorrentía se refiere a la que se genera en toda la extensión de la cuenca. Sólo cuando el gasto en los ríos no es afectado por desviaciones o regulaciones artificiales la escorrentía es numéricamente igual al gasto medido en la sección de salida de la hoya. En otras palabras, si en una cuenca existe salida de la hoya. En otras palabras, si en una cuenca existe un sistema de embalses, bocatomas, canales, etc., para determinar la escorrentía en un cierto período de tiempo, es necesario reducir el gasto medido en la sección de salida al estado de régimen natural de la cuenca, teniendo en cuenta la operación del sistema según la magnitud y distribución en el tiempo de los volúmenes embalsados y gastos extraídos por los canales.

El aprovechamiento económico e integral de los recursos hidrológicos superficiales requiere el conocimiento exacto de la magnitud y distribución en el tiempo de la escorrentía en una hoya hidrográfica. El problema del dimensionamiento, diseño y operación de embalses, canales y centrales hidroeléctricas está supeditado a mediciones y predicciones de este factor hidrológico.

6.1.2 Clasificación de la Escorrentía

La escorrentía total en una cuenca puede provenir de cuatro fuentes distintas:

- i) Escorrentía superficial
- ii) Escorrentía subsuperficial o flujo intermedio
- iii) Escorrentía subterránea
- iv) Precipitación directa sobre los cauces y sus afluentes.

Cada una de estas fuentes, sus respectivos componentes y la terminología usada en este respecto, se examinará a continuación.

La escorrentía superficial está constituida por aquella parte de la precipitación que escurre superficialmente sobre el cauce principal de la cuenca. Antes de que esta parte de la precipitación se incorpore a un cauce natural de cualquier magnitud, la lámina de agua que escurre superficialmente se denomina usualmente flujo superficial. La escorrentía superficial está constituida entonces por la precipitación menos la infiltración, la intercepción y el almacenamiento superficial. Durante una lluvia, este elemento de la escorrentía total, es el que se manifiesta más pronto en los cauces y constituye el principal componente en el hidrograma de la crecida producida por la lluvia.

La escorrentía subsuperficial o flujo intermedio es aquella parte de la escorrentía total que se debe a la precipitación que se infiltra, y que luego escurre lateralmente a través de los primeros horizontes de suelo por encima de la napa

subterránea, hasta incorporarse eventualmente a los cauces superficiales de drenaje. La magnitud y distribución en el tiempo de este componente depende en último término de la estructura geológica de la cuenca. Por ejemplo, la presencia de un horizonte relativamente impermeable y cercano a la superficie, favorece extraordinariamente la existencia del flujo subsuperficial. Una parte de la escorrentía subsuperficial puede manifestarse rápidamente en la escorrentía total que se registra en un cauce, mientras que el resto de ella puede tomar un tiempo relativamente largo en incorporarse a un río. De este modo se puede distinguir un flujo subsuperficial "rápido" y otro "lento".

La escorrentía subterránea es aquella parte de la escorrentía total debida a la percolación profunda de la lluvia o del agua de derretimiento de la nieve, que se incorpora de este manera al agua subterránea. Esta, a su vez, puede interceptar el cauce de un río y aportar así parte del flujo subterráneo. La magnitud de la percolación profunda dependerá naturalmente de la importancia de la lluvia, de la estructura geológica de la cuenca y del porcentaje de humedad de los estratos de suelo sobre el acuífero. El aporte de la escorrentía subterránea a la escorrentía total en el río se manifiesta con mucha mayor lentitud que los otros componentes y además su efecto es también más prolongado debido a la lentitud de los escurrimientos subterráneos. En una determinada crecida por lo tanto, el efecto de la escorrentía subterránea no es de gran importancia. La variabilidad del desfase en el tiempo y de la magnitud del aporte dependerá también de la geología de la cuenca.

Finalmente, el cuarto componente de la escorrentía total está constituido por la precipitación que cae directamente sobre los cauces y sus tributarios.

Para el análisis práctico de la escorrentía en una determinada cuenca y debido a los problemas que surgen con relación a la apreciación del flujo intermedio, la escorrentía total puede dividirse en escorrentía directa y flujo base. Se denomina escorrentía directa a aquella que se incorpora rápidamente al río poco después de la lluvia o del derretimiento de nieves.

Por lo tanto se considera que es igual a la suma de la escorrentía superficial, el flujo intermedio rápido y la precipitación sobre los cauces. Como se verá más adelante al hablar del análisis de hidrogramas, otros métodos hidrológicos suponen que todo el flujo intermedio forma parte de la escorrentía directa. La validez de una u otra de estas hipótesis dependerá, como es lógico, de las características geológicas de la hoya en estudio.

El flujo o escorrentía base queda condicionado principalmente por el aporte del agua subterránea al río y constituye, por lo tanto, la escorrentía que se mantiene durante el período sin lluvias. Análogamente, según se indicó más arriba, se considera que el flujo intermedio lento puede o no formar parte del flujo base.

Para completar esta distinción de componentes y sobre todo la terminología usada con relación al fenómeno de la escorrentía, es necesario definir aun otros términos.

Se denomina precipitación o (lluvia) en exceso a aquella parte de la precipitación total que contribuye directamente a la escorrentía superficial. Luego la precipitación en exceso es igual a la precipitación total menos la intercepción, la evapotranspiración, el almacenamiento superficial y la infiltración.

Aquella parte de la precipitación que contribuye enteramente a la escorrentía directa se denomina precipitación (o lluvia) efectiva. En otras palabras, la precipitación efectiva es igual a la precipitación en exceso y aquella parte de la precipitación que se convierte rápidamente en escorrentía superficial.

Todas las consideraciones y definiciones recién dadas con relación a la formación y componentes de la escorrentía total, se pueden esquematizar y sintetizar por medio del diagrama de la figura 6.1.

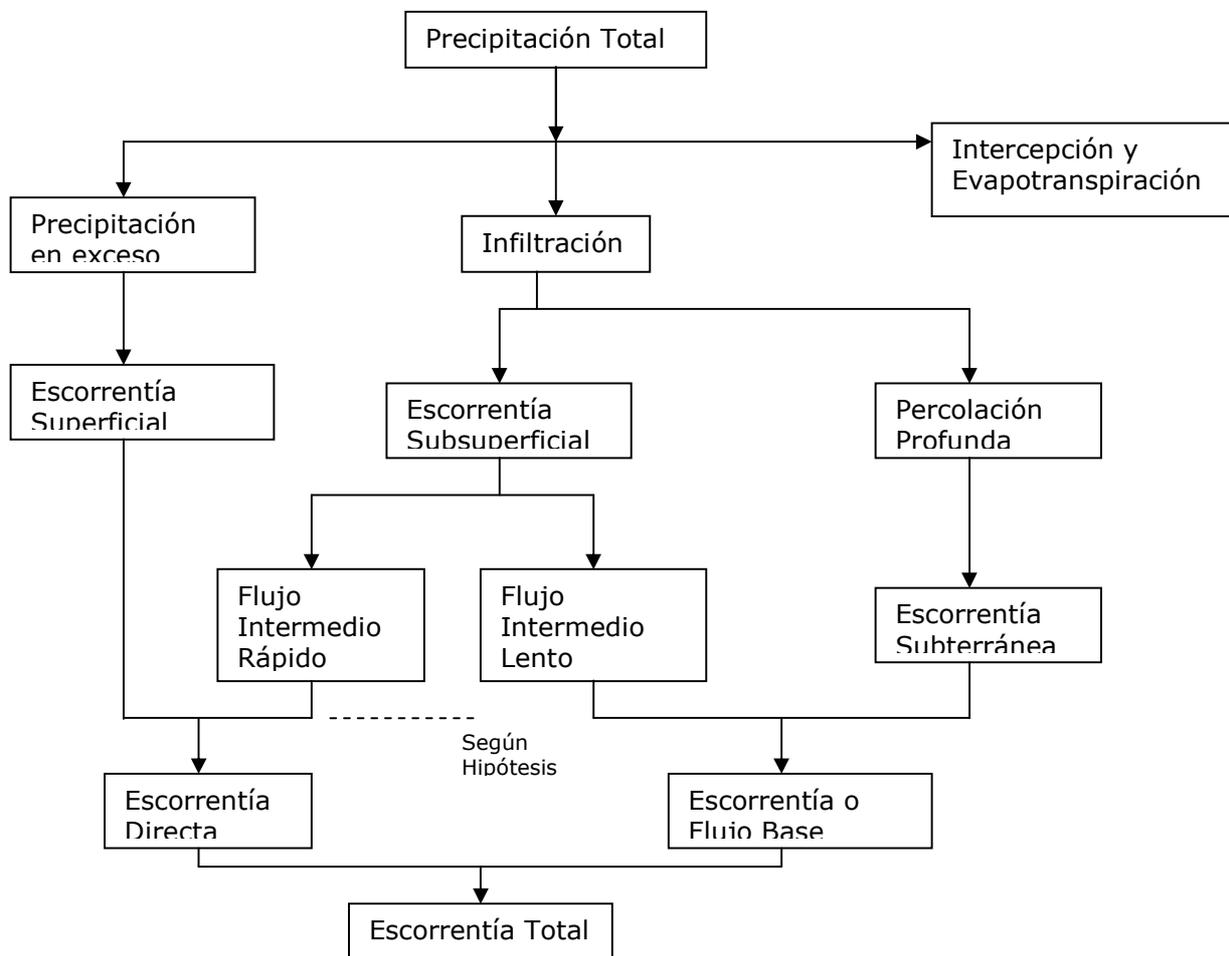


Fig. 6.1: Componentes de la Escorrentía

Las consideraciones recientemente expuestas sobre las distintas fuentes de la escorrentía total son relativamente simplistas e idealizadas. Como se explicará más

adelante en la sección correspondiente al análisis y separación de hidrogramas, pueden existir una serie de malas interpretaciones y una comprensión incompleta del proceso en determinados casos, en que la estructura geológica y/o las características de la precipitación de las cuencas hagan difícil y aún erróneo distinguir todos los componentes de la escorrentía total, tal como se han expuesto más arriba.

En todo caso, el hidrólogo debe tener en cuenta todas estas posibilidades generales y sus características, pero sólo conociendo las condiciones imperantes en cada caso, podrá efectuar el análisis real que corresponda para así extraer las conclusiones que sean realmente válidas de acuerdo a la naturaleza física de los mecanismos que intervienen.

6.1.3 Factores que afectan la Escorrentía

La escorrentía en una cuenca, como elemento importante del ciclo hidrológico, puede considerarse que está afectada por una serie de factores que pueden agruparse en tres grandes grupos: factores climáticos, factores fisiográficos y factores de vegetación.

Los factores climáticos que afectan la escorrentía se refieren al efecto de la precipitación, evaporación y transpiración. En cuanto al efecto de la precipitación, tiene importancia su forma (lluvia, nieve, helada, etc.), tipo (convectiva, orográfica, ciclónica), intensidad, duración, distribución espacial y temporal, frecuencia, y dirección del movimiento de la tormenta. En los procesos de evaporación que intervienen en el ciclo de escorrentía, intervienen el régimen de temperaturas, vientos, humedad, presión atmosférica, calidad del agua y naturaleza de la superficie evaporante. La influencia de la transpiración queda determinada por el régimen de temperatura, radiación solar, vientos, humedad del aire y del suelo y tipos de vegetación.

Los factores fisiográficos puedan a su vez subdividirse en características de la cuenca en general, y características de los cauces. Entre las características de la cuenca influyen sus propiedades geométricas como tamaño, forma, pendiente, orientación, elevación y densidad de drenaje, y sus propiedades físicas como el uso de la tierra, condiciones de infiltración, tipos de suelos, características geológicas (permeabilidad, rendimiento y retención específica) y topográficas (permeabilidad de lagos, pantanos, etc.). La influencia de las características de los cauces se refieren principalmente a sus propiedades hidráulicas, es decir, el tamaño y forma de las secciones, pendientes, rugosidades, longitud de los tributarios y efectos de remansos y torrentes.

Los efectos de la vegetación tienen relación con los procesos de detención, intercepción y transpiración. En este sentido intervienen el tipo de vegetación, su composición, edad, densidad, época del año, etc.

Las características de los principales procesos enumerados más arriba se han

expuesto en los capítulos anteriores, o bien se han dado los antecedentes necesarios para que, bajo ciertas condiciones conocidas se puedan prever sus efectos en el régimen de escorrentía de una cuenca.

6.1.4 Diferencias Tipos de Regímenes de Gastos en un Río

El régimen de gastos de un río puede clasificarse en diferencias tipos, según sea la simplicidad o complejidad del hidrograma de gastos medios mensuales durante un año hidrológico y según el origen de los gastos de crecidas. De esta manera se pueden distinguir los tipos de regímenes que se describen a continuación.

a) Regímenes Simples

Los ríos de régimen simple se caracterizan por tener en su hidrograma anual un sólo máximo y un sólo mínimo. Según el origen de los máximos puede a su vez ser de régimen glacial, nival o pluvial.

Los ríos de régimen glacial se caracterizan por tener pequeños gastos en invierno y crecidas de importancia en primavera y verano. Su alimentación proviene de los deshielos de nieves y glaciares, y por lo tanto, las variaciones de gasto están condicionadas a las variaciones de la radiación solar, produciéndose un incrementado de los gastos en primavera y verano y marcadas fluctuaciones diurnas. Los ríos de régimen glacial justamente por el respaldo de los glaciares, poseen una regularidad bastante marcada de un año a otro.

Los ríos de régimen nival presentan las mismas características de los de régimen glacial, aún cuando su variabilidad de un año a otro es bastante mayor. Esto ocurre debido a que en este tipo de ríos el respaldo de glaciares es magro y en consecuencia los volúmenes de deshielo dependen en gran medida de las cantidades de nieve acumulada durante el invierno. En consecuencia, su régimen presenta una variabilidad similar a la del régimen de precipitaciones en la zona.

Los ríos de régimen pluvial, como el nombre lo indica, tienen su alimentación fundamental en la escorrentía inmediata que producen las lluvias. Por lo tanto, las características de su hidrograma anual dependen del régimen de precipitaciones. En estas condiciones se pueden distinguir ríos de régimen pluvial oceánico y ríos de régimen pluvial tropical. En los primeros el máximo del hidrograma anual se produce en invierno y el mínimo en verano. En estos ríos la evaporación y evapotranspiración juegan un papel importante. Las variaciones de un año a otro pueden ser considerables. Los ríos de régimen pluvial tropical presentan los gastos máximos durante el verano, debido principalmente a la influencia de las precipitaciones convectivas de verano.

b) Regímenes Mixtos

Los ríos de regímenes mixtos corresponden a la suposición de varios regímenes simples, pudiéndose distinguir así los ríos de régimen nivo-glacial, los de régimen nivo-pluvial, etc. El nombre compuesto se confecciona en general con el régimen

principal antecediendo al secundario.

Es de hacer notar en este punto, que un río puede presentar distintos tipos de régimen en las distintas zonas de su cauce. Es así como en Chile, es común que un río tenga régimen nival a la salida de la cordillera, régimen nivo-pluvial en su curso medio, y régimen pluvio-nival cerca de su desembocadura.

c) Regímenes Complejos

Los ríos de régimen complejo, se encuentran comúnmente en las grandes hoyas hidrográficas, en que cada uno de los afluentes aporta su propio tipo de régimen. De esta manera, un río de régimen complejo representa una síntesis de los regímenes de sus afluentes y de las respectivas subcuencas que lo forman.

6.2 PRESENTACION DE DATOS ESTADISTICOS DE ESCORRENTIA

El conjunto de la información obtenida durante una serie de años en una determinada estación fluviométrica, conviene clasificarla y presentarla de una manera sistemática con el objeto de facilitar su análisis y permitir al hidrólogo la obtención de ciertas características y elementos básicos del régimen de escorrentía de la cuenca respectiva.

Antes de examinar las diversas maneras de presentar los datos fluviométricos, es necesario indicar las unidades que usualmente se emplean para expresar los gastos.

En la mayoría de los procedimientos hidrológicos y para el dimensionamiento de obras hidráulicas es conveniente expresar los gastos en metros³/seg o en litros/seg.

En el caso de comparación de los regímenes hidrológicos de diversas hoyas hidrográficas, es conveniente expresar los gastos por unidad de superficie de la cuenca respectiva, es decir, en m³/seg/km² o en lt/seg/Há.

En ciertos estudios hidrológicos, como por ejemplo en el estudio de relaciones precipitación-escorrentía o en balances hidrológicos de cuencas, los gastos suelen expresarse en altura de lámina de agua, medida en centímetros o milímetros, y que corresponde al volumen de agua escurrido durante un cierto período de tiempo, que cubriría la superficie de la cuenca en cierto número de centímetros o milímetros.

A continuación se indican las diversas maneras de expresar la información obtenida en una estación fluviométrica.

1. Gastos medios diarios

Estos gastos se obtienen a partir de la altura limnimétrica media en la estación, durante el día considerado y utilizando la curva de descarga respectiva. En caso que el gasto durante el día varíe considerablemente y la estación sólo tenga medidas

limnimétricas, es necesario tener 2 o 3 lecturas diarias para obtener su promedio significativo. Si en el rango de variación de estas lecturas la curvatura de la curva de descarga es grande, no será posible promediar las alturas limnimétricas para obtener el gasto medio, sino que será necesario promediar los respectivos gastos parciales correspondientes. En caso que la estación fluviométrica posea un limnógrafo será posible obtener un gasto medio diaria más representativo al considerar todas las variaciones que han ocurrido en los gastos instantáneos. Los gastos medios diarios se pueden resumir en tablas o gráficos cronológicos.

2. Gastos medios mensuales

Se obtienen promediando los gastos medios diarios calculados según se indica más arriba. Los gastos medios mensuales se suelen representar en tablas y gráficos cronológicos.

Los gastos medios de un mes determinado varían considerablemente de un año hidrológico a otro. Para resumir la información correspondiente a los gastos medios mensuales de una serie de años de estadísticas, se recurre usualmente a dos procedimientos.

Uno de estos métodos introduce el concepto del año promedio, en que sus gastos medios mensuales son iguales al promedio aritmético de los correspondientes gastos medios mensuales durante el período observado. Este procedimiento conduce lógicamente a una compensación del efecto de los años secos y de los años húmedos, lo que puede inducir a graves errores en los cálculos de regulación y capacidad de embalses. Una solución a este tipo de problema, es escoger tres grupos de años reales que representen respectivamente un año normal, un año seco y un año húmedo. Para cada uno de estos tipos de años se determinan los gastos medios mensuales como promedios aritméticos de los gastos medios mensuales medidos.

Con el objeto de visualizar la variación de los gastos medios mensuales se utilizan las llamadas curvas de variación estacional, en que para cada uno de los meses del año se determina, sobre la base del conjunto de datos observados durante una serie de años, el valor del gasto medio que tiene una cierta probabilidad (10, 25, 50, 75, 90, 95%) de ser igualado o sobrepasado. El método para obtener estos valores es análogo a los ya indicados para el caso de las precipitaciones. Curvas de este tipo se indican en la figura 6.2.

3. Gastos medios anuales o módulos

Se calculan tomando el promedio aritmético de los gastos medios mensuales, ponderando de acuerdo al número real de días de cada mes.

4. El hidrograma

El hidrograma es un gráfico que expresa la variación en el tiempo de los gastos instantáneos o de los gastos medios diarios.

El hidrograma es una manera práctica y efectiva de indicar las características fluviométricas de una cuenca, especialmente en el estudio de crecidas. Debido a que para muchas técnicas y procedimientos hidrológicos es necesario efectuar un análisis gráfico sobre los hidrogramas, lo recomendable es seleccionar juiciosamente las escalas y dar la necesaria importancia a la exactitud del dibujo. Una selección incorrecta de escala puede distorsionar la impresión visual de las características fluviométricas del río.

Fig. 6.2: CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL

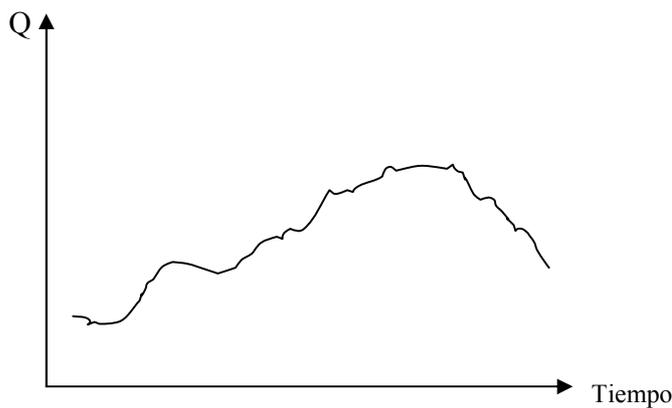
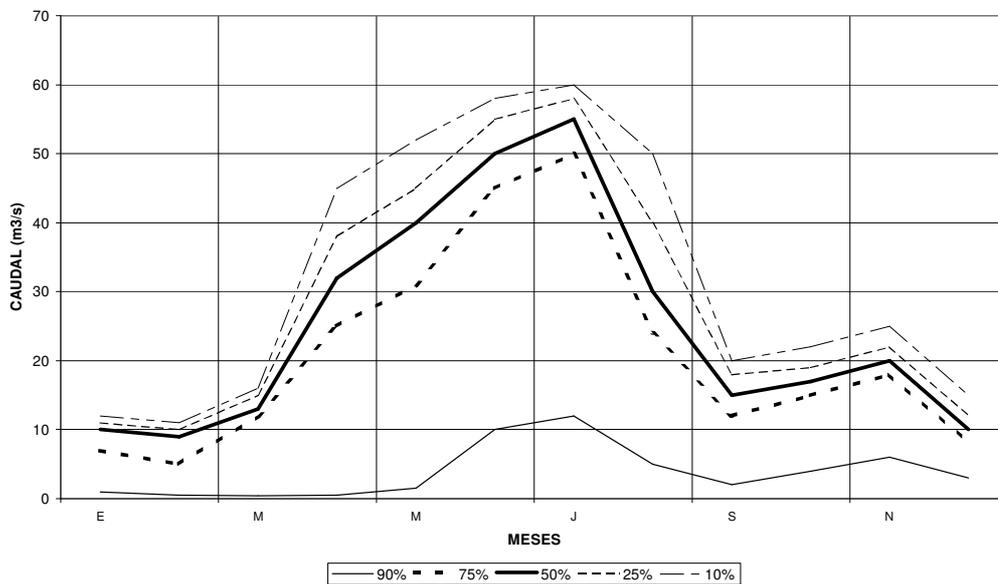


Fig. 6.3: Hidrograma

5. Gastos extremos

Usualmente los registros hidrológicos junto con proporcionar información sobre los gastos medios diarios, mensuales y anuales, incluyen los gastos mínimos y máximos ocurridos en cada mes y el gasto mínimo y máximo ocurrido en el año considerado. Esta información sobre gastos extremos es particularmente importante en el análisis estadístico de las crecidas de un río.

6. Curva de gasto o volúmenes acumulados

Para el estudio y el dimensionamiento de la capacidad de embalses se suele representar la información fluviométrica por medio de una curva de gastos medios mensuales acumulados durante el período de observación de la estación en función del tiempo. Es decir, si $Q = f(t)$ representa el hidrograma durante el período de observación, la curva de gastos acumulados puede expresarse por medio de la relación:

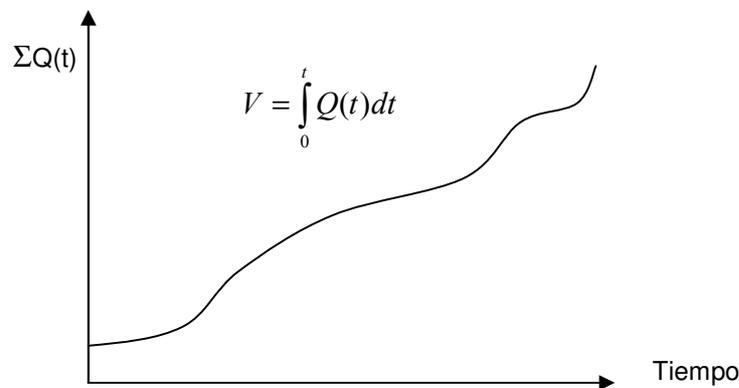


Figura 6.4: Curva de Caudales Acumulados

6.3 CURVAS DE GASTOS CLASIFICADOS O CURVAS DE DURACION Y SU USO

6.3.1 Obtención de la Curva de Duración

Una curva de duración es una distribución de frecuencia acumulada que indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos. Este tipo de curvas permite combinar en una sola figura las características fluviométricas de un río en todo su rango de caudales independientemente de su secuencia de ocurrencia en el tiempo

Para dibujar una curva de duración los gastos medios diarios, semanales, mensuales o de cualquier otro intervalo de tiempo, se ordenan de acuerdo a su magnitud y luego se calcula el porcentaje de tiempo durante el cual ellos fueron igualados o excedidos. Mientras mayor sea el período de tiempo que cubren los datos con los cuales se construye la curva de duración más representativa será esta de las condiciones medias.

Las curvas de duración permiten estudiar las características fluviométricas de los ríos y comparar diferentes cuencas.

En cuanto a los usos de las curvas de duración ellos son múltiples, permiten determinar la seguridad de abastecimiento de agua potable en un intervalo de tiempo determinado. Con una curva de duración se puede calcular, en promedio, el número de días en un año en que el caudal en un río será tal que no permita que los vehículos lo crucen por un vano; esto permite hacer estudios económicos sobre la factibilidad de construcción de un puente o de operación de un balseadero en los días de crecidas. Este tipo de curvas permite también hacer estudios preliminares sobre capacidades de plantas hidroeléctricas, estudios de calidades de agua, y también estudios preliminares de sistema de riego. Más antecedentes sobre el uso de curvas de duración se pueden encontrar en la bibliografía (1).

Los dos principales métodos para construir curvas de duración son (1) el método del año calendario y (2) el método del período total.

En el primero de estos métodos se ordenan los valores para cada año de acuerdo con su magnitud y se les asigna un número de orden. Luego se promedian los caudales para un mismo número de orden y se llevan a un gráfico los caudales en las ordenadas y número de orden o probabilidad de excedencia en abscisas. El método del año calendario da valores menores para los caudales altos y valores mayores para los caudales bajos que el método del período total.

El método del período total, que se considera más preciso que el anterior, agrupa los caudales en clases de acuerdo con su magnitud. Los totales para cada ase acumulan y se les calcula una probabilidad de excedencia. Este método se verá en mayor detalle a continuación.

a) Período de tiempo

Todos los años con registros completos se pueden utilizar para preparar curvas de duración a pesar de que esos años no sean consecutivos. Los años con registros incompletos deben ser excluidos. Se tiene que cumplir además que los años que se utilicen correspondan a condiciones similares en la cuenca en lo que se refiere a almacenamiento artificial; extracciones o cualquier otra influencia de la mano del hombre.

Cuando las condiciones en la cuenca han cambiado (por ejemplo, por regulación artificial) durante el período de mediciones, no tiene ningún significado construir una curva de duración para el período completo. El período a utilizarse para construir la curva dependerá del objetivo del estudio. Si se quieren estudiar las características hidrológicas del régimen natural del río habrá que construir una curva para el período en que se tengan mediciones con este tipo de régimen. Si se desea utilizar la curva como un indicador de los caudales que pueden ocurrir en el futuro de continuar las actuales condiciones habrá que utilizar, en la elaboración de la curva de duración, el período durante el cual el régimen del río ha sido afectado por

condiciones de regulación, extracciones, etc. Cualquiera sea el tipo de curva que se elabore, si ella corresponde a un período de tiempo muy corto o no representativo se puede extender a un período más largo por métodos de correlaciones.

b) Unidad de tiempo

La unidad o intervalo de tiempo (día, semana, mes, etc.) que se utilice para elaborar una curva de duración es, en gran medida, un compromiso entre la precisión que se desea obtener y el trabajo que se requiere para su preparación. Mientras mayor sea esta unidad de tiempo menor será el número de datos a manejar pero al mismo tiempo la curva será menos representativa de las variaciones reales del caudal en el río. Para la mayoría de los ríos los caudales medios mensuales no son satisfactorios para mostrar esas variaciones. Los caudales medios anuales en ningún caso serán representativos ya que su rango de variación será pequeño y existen muy pocos datos para definir la curva.

En la figura 6.5 se muestran curvas de duración para un mismo río construidas con gastos medios diarios, mensuales y anuales.

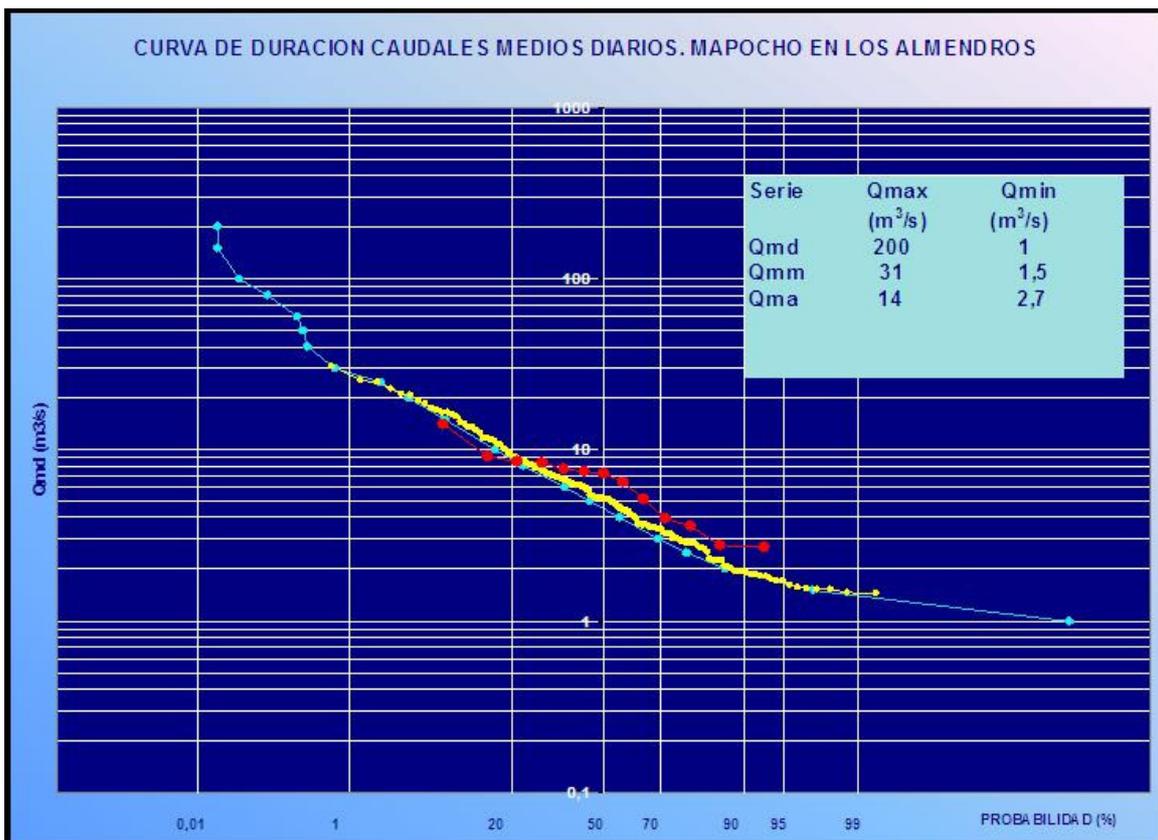


Fig. 6.5: Curvas de Duración

El efecto de variar la unidad de tiempo no es el mismo para todos los ríos. Donde los caudales son casi uniformes, las curvas de duración de gastos medios diarios y gastos medios semanales serán casi idénticas y la curva de duración preparada como gastos medios mensuales no diferirá en forma apreciable de la curva de gastos medios diarios. Por otro lado, si el río tiene crecidas rápidas que duran algunas horas, los tres tipos de curvas antes mencionadas diferirán en forma apreciable entre sí.

c) Intervalos de clase

Para construir la curva de duración se divide el rango de variación de los caudales en 20 a 30 clases bien distribuidas. Para ello, se puede utilizar la tabla 6.1 recomendada por la U.S. Geological Survey.

A manera de ejemplo del uso de esta tabla se ha elaborado una curva de duración para la estación Alhué en Quilamuta (ENDESA). Entre los años hidrológicos 63-64 y 67-68, ambos inclusive, los caudales medios diarios máximos y mínimos fueron 250 y 0.004 m³/seg, respectivamente. De la tabla 6.1 se eligen entonces los intervalos correspondientes a 5 ciclos. Con esos valores se forma la tabla 6.2 de acuerdo con los gastos medios diarios registrados en la estación en estudio. En la antepenúltima columna se totaliza el número de días en los 5 años en que el caudal fue igual o mayor que el anotado en la primera columna de la línea siguiente. En la penúltima columna se hace la suma acumulada de la columna anterior pero en orden inverso de modo que se tiene inmediatamente el número de días, en los 5 años, en que el caudal en el río fue mayor que el anotado en la primera columna. Finalmente en la última columna se calcula el porcentaje del tiempo dividiendo por el número total de días considerados (1827). En la figura 6.6 aparece dibujada la curva de duración para Alhué en Quilamuta.

La presentación gráfica de la curva de duración puede hacerse en cualquier tipo de papel. Sin embargo, se recomienda utilizar una escala logarítmica para los caudales ya que en general estos abarcan de 3 a 4 ciclos y una escala aritmética en estas condiciones no permitirá dibujar en forma adecuada los caudales pequeños.

La curva de duración, en general, tiene variaciones rápidas en los extremos de modo que una escala aritmética para el porcentaje de tiempo no definiría muy bien la curva en los extremos. Una escala logarítmica para esa variable "estiraría" uno de los extremos pero condensaría el otro. Lo más adecuado parece ser entonces una escala de probabilidades que "estiraría" ambos extremos de la curva y permitiría definirla mejor.

6.3.2 Obtención de curva de duración representativas de períodos largos a partir de registros cortos.

Salvo que las condiciones físicas de la cuenca cambien, una curva de duración será más representativa de las condiciones de escurrimiento en una cuenca mientras mayor sea el período de tiempo que abarquen los datos, si se cuenta con un registro para un período corto de tiempo se puede dibujar una curva de duración

representativa de un período más largo mediante el siguiente método recomendado por el U.S. Geological Survey:

- 1) Se dibuja una curva de duración para la estación (A) en estudio con los registros que ella posea.
- 2) Se elige otra estación (B) de régimen fluviométrico similar y se construye una curva de duración para un período de tiempo concurrente con el de la estación A.

TABLA 6.1

LIMITES DE CLASES PARA ELABORAR UNA CURVA DE DURACION

iError! Marcador no definido.	RANGO DE GASTOS MEDIOS DIARIOS				
	1 ciclo	2 ciclos	3 ciclos	4 ciclos	5 ciclos
10	10	10	10	10	10
11	12	15	15	15	15
12	14	20	20	20	20
13	17	25	30	30	30
14	20	30	40	50	50
15	25	40	50	70	70
16	30	50	70	100	100
18	35	60	100	150	150
20	40	80	150	etc.	etc.
22	45	100	etc.		
24	50	150			
26	60	etc.			
28	70				
30	80				
33	100				
36	120				
40	etc.				
45					
50					
55					
60					
65					
70					
75					
80					
90					
100					

TABLA 6.2
CURVA DE DURACION - ALHUE EN QUILAMUTA

Q (m ³ /s)	Número de días en que el caudal es mayor o igual que el anotado en esta línea de la primera columna, pero menor que el anotado en la línea siguiente.						Total días	% del tiempo.
	63-64	64-65	65-66	66-67	67-68	68-69		
0.003		10				10	1.827	100.0
0.005		1				1	1.817	99.4
0.007		2				2	1.816	99.3
0.010		11				11	1.814	99.2
0.015		3				3	1.803	98.4
0.02		12				12	1.800	98.2
0.03		11	2			13	1.788	97.5
0.05		3	4		3	10	1.775	96.7
0.07		13	8		24	45	1.765	96.2
0.10		42	19		27	88	1.720	93.8
0.15		41	45	13	34	133	1.632	89.1
0.2	120	59	81	18	58	336	1.499	81.6
0.3	51	55	34	124	46	310	1.163	63.5
0.5	13	29	25	17	60	144	853	46.5
0.7	18	20	14	15	16	83	709	38.6
1.0	9	13	5	11	2	40	626	34.1
1.5	11	12	4	5	1	33	586	32.0
2	13	13	11	9	60	106	553	30.1
3	16	9	39	35	30	129	447	24.4
5	43	4	28	43	4	122	318	17.3
7	22	1	12	24	1	60	196	10.7
10	23	1	12	18		54	136	7.4
15	4		3	11		18	82	4.46
20	6		2	9		17	64	3.49
30	9		4	7		20	47	2.56
50	2		3	3		8	27	1.47
70	5		3	2		10	19	1.04
100	1		3	1		5	9	0.49
150			3			3	4	0.22
200			1			1	1	0.05
300								
SUMA	366	365	365	365	366	1.827		

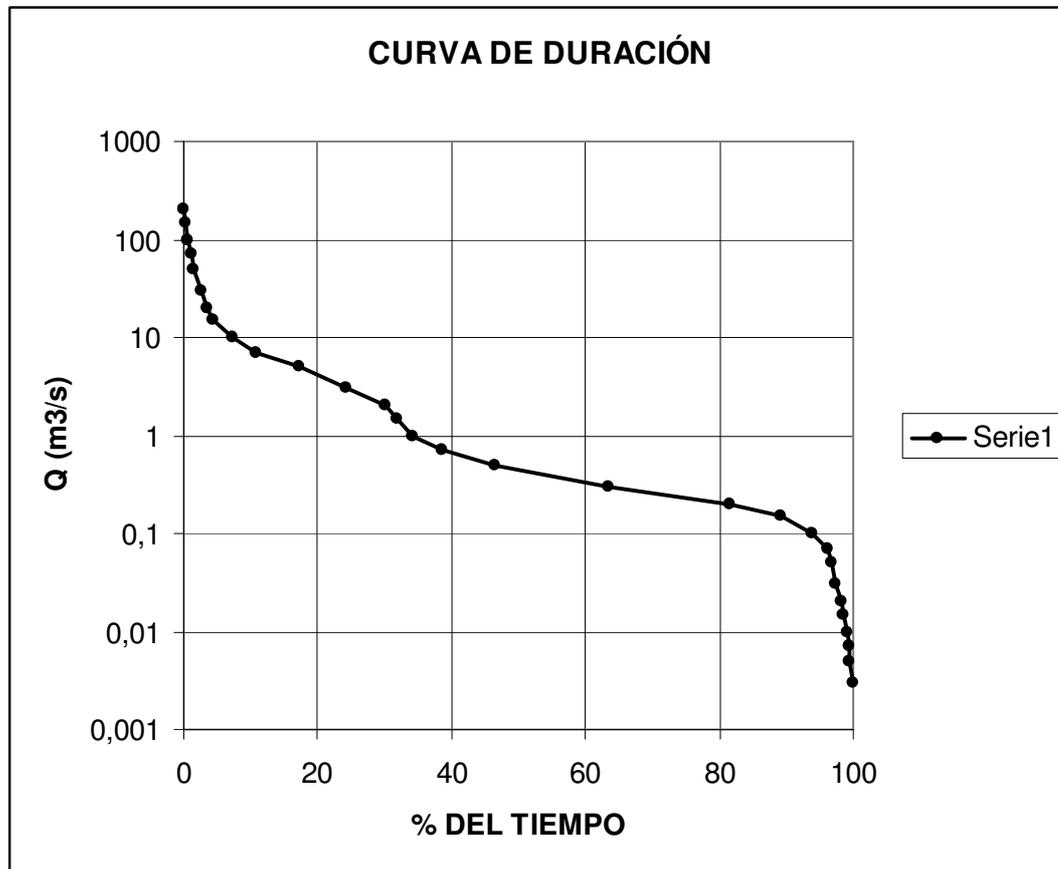


Figura 6.2 Curva de Duración de caudales medios diarios. Alhué en Quilamuta

- 3) A partir de las curvas determinada en (1) y (2) se determinan los caudales para varias probabilidades de excedencia. Estos puntos se llevan a un gráfico y se determina una curva de relación entre ambas estaciones.
- 4) Se construye luego la curva de duración de B para todo el período en que tiene registros.
- 5) Sobre la base de las curvas determinadas en los puntos (3) y (4) se construye la curva de duración de A representativa del período de larga duración. Para ello, se entra a la curva determinada en 4) con una probabilidad de excedencia y se obtiene una caudal para B. Con ese caudal se entra a la curva determinada en 3) y se tiene el caudal para A con la probabilidad de excedencia dada. Repitiendo este procedimiento para varias probabilidades se puede trazar la nueva curva de duración para la estación A.

Este método se basa en suponer que la curva determinada en el punto 3) es válida tanto para el período corto como para el período largo.

La selección de la estación de registros más largo debe hacerse considerando que debe tener condiciones climáticas y fisiográficas similares a la de la cuenca en estudio. Es por ello que generalmente es preferible seleccionar una estación en el mismo río. Además, la estación seleccionada y la estación en estudio deber tener un período concurrente de registros suficiente como para poder establecer una curva de relación aceptable. Otro factor que es conveniente considerar al seleccionar la estación es su distancia a la estación en estudio. A igualdad de otros factores, estaciones cercanas darán mejores relaciones que estaciones más alejadas.

6.3.3 Estimación de Curvas de Duración

En muchas oportunidades se requieren curvas de duración en ríos que no tienen datos fluviométricos. Cuando la parte baja de la curva (caudales pequeños) no es de gran interés se puede recurrir a la transposición desde cuencas vecinas de curvas de duración por unidad de área. Sin embargo, si interesa la distribución de los caudales chicos la transposición puede no ser aceptable ya que ellos dependen de las características geológicas de la cuenca.

El U.S. Geological Survey ha desarrollado un método para determinar curvas de duración para cuencas sin registros sobre la base de aforos esporádicos realizados en la época de estiaje en conjunto con curvas de duración para otras cuencas. En la bibliografía se puede encontrar una explicación detallada de este método (1).

6.4 MÉTODOS DE ESTIMACION DE CAUDALES. RELACIONES PRECIPITACION-ESCORRENTIA. RENDIMIENTO HIDROLOGICO DE CUENCAS.

6.4.1 Antecedentes Generales

Desde el punto de vista de cuantificar las disponibilidades de agua en la

cuenca, con el fin de evaluar las potencialidades de utilización del recurso, es necesario poder cuantificar el rendimiento hidrológico de una cuenca, en términos de la escorrentía que ella produce, su distribución en el tiempo y su variabilidad. Para ello es necesario disponer de mediciones de caudales en la sección de salida de la cuenca de interés. Estas estadísticas fluviométricas constituyen una información básica imprescindible para diseñar y operar las obras de aprovechamiento de agua.

Además de constituir una muestra histórica, las estadísticas fluviométricas de una estación, constituyen una muestra estadística que puede utilizarse para estimar probabilísticamente la magnitud y distribución de futuros caudales.

Resulta entonces indispensable que estas estadísticas sean consistente a lo largo del tiempo, y además, en vista de las inferencias probabilísticas que con ellas se pueden hacer deben tener una longitud suficiente.

En la práctica, es usual que el hidrólogo no disponga, en el lugar del río que se requiere, de estadísticas fluviométricas de suficiente longitud, de tal forma que no resulta posible hacer inferencias probabilísticas, en cuanto a magnitudes de futuros caudales, con ellas. O bien, las estadísticas que existen pueden presentar inconsistencias a lo largo del tiempo. En otras ocasiones no se dispone de ningún tipo de información fluviométrica.

En estas circunstancias la hidrología se ha preocupado siempre de tratar de proveer métodos que permitan suplir insuficiencias de mediciones fluviométricas, además de métodos de análisis de consistencia de las mismas. En los puntos siguientes de este capítulo, se examinan los principales métodos disponibles, en primer lugar para analizar consistencia de estadísticas fluviométricas, y enseguida suplir insuficiencias y extender registros fluviométricos.

6.4.2 Análisis de Estadísticas Fluviométricas

Los registros fluviométricos, al igual que en el caso de las precipitaciones, deben analizarse en cuanto a consistencia con el fin de asegurarse que ellos representan una muestra estadística homogénea. Las inconsistencias pueden deberse a distintas causas, entre las que cabe mencionar: cambios en los métodos de recolección de los datos, cambios en la ubicación de la estación de aforo, cambios de almacenamiento artificial en la cuenca, cambios en los usos del agua en la cuenca, etc.

El método de las curvas doble acumuladas, explicado en el capítulo de precipitación, es también aplicable para análisis de estadísticas fluviométricas. Sin embargo, en este caso es preciso tener en cuenta algunas recomendaciones adicionales.

En la elaboración del patrón, que deberá estar formado en lo posible por el promedio de un número suficiente de estaciones fluviométricas de régimen similar, se recomienda convertir los caudales a magnitudes que sean comparables. Para esto se puede recurrir a gastos específicos (gastos por unidad de área), procede en esta

forma, se le estará dando una mayor importancia relativa a aquellas cuencas con mayor área.

El análisis subsiguiente se realiza en forma análoga al caso de estadísticas de precipitación, teniendo en cuenta todas las recomendaciones dadas (1), (2).

A diferencia de las precipitaciones, no se recomienda usar la curva doble acumulada para corregir los datos de caudales. En general, una curva doble acumulada en el caso de caudales, sólo servirá para determinar los períodos de tiempo en los cuales los caudales pueden presentar inconsistencias. La corrección o ajuste de estos períodos sólo deberá hacerse una vez que se comprueban las causas de estas inconsistencias. Estas causas deben buscarse entre los siguientes factores, los que a su vez determinan la forma de corrección de la estadística:

- a) Determinación errónea de la curva de descarga en algunos períodos, o algún otro tipo de error de traducción, en este caso, una retraducción de la estadística podría solucionar las inconsistencias.
- b) La inconsistencia podría ser provocada por extracciones no consideradas aguas arriba de la sección en estudio; agregando las extracciones a los caudales medidos podría solucionarse el problema.
- c) Inconsistencias bastantes significativas podrían deberse a cambios considerables en el uso de la tierra, tales como incorporación de nuevas zonas agrícolas, tala de bosques, grandes urbanizaciones, etc. En caso de detectarse que estos cambios pudieran haber influido significativamente en el régimen de escorrentía de la cuenca, se recomienda utilizar únicamente los registros representativos de la situación actual. Si esto último ocasiona que la estadística disponible se acorta en demasía, puede recurrirse a alguno de los métodos de extensión de estadísticas que se citan más adelante en este capítulo.

6.4.3 Métodos de Estimación de la Escorrentía

6.4.3.1 Análisis Teórico

En el capítulo 2 se planteó y analizó la ecuación general de balance hidrológico para una cuenca. Para estimar la escorrentía en la sección de salida, sería factible aplicar esta ecuación, o una simplificación de ella, si todos los demás términos de ella fuesen cuantificables. En el caso general esto no es posible, por lo cual es necesario buscar relaciones más sencillas que tomen en cuenta los factores más importantes involucrados en la ecuación de balance hidrológico.

Si existiese una cuenca ideal en que se cumpliera que ella fuese completamente impermeable, sin detención ni almacenamiento superficial, la escorrentía (E_s) para un cierto lapso de tiempo, sería igual a la precipitación media (P) durante el mismo lapso de tiempo. En la práctica, la escorrentía en una cuenca sin regulación artificial, será siempre menor que la precipitación, debido a las "pérdidas" por evaporación, evapotranspiración, infiltración, etc. En el caso más general, para

períodos de tiempo prolongados (períodos estacionales o años), la relación entre escorrentía y precipitación puede escribirse como:

$$E_s = P - D$$

en que D es lo que suele llamarse déficit de escorrentía, que engloba todas las pérdidas que aparecen en la ecuación de balance hidrológico. La relación anterior es en general del tipo indicado en la figura 6.7.

Se observa en la mayoría de los casos, que pasado un cierto límite (P_1 en la figura 6.7), el déficit de escorrentía se hace constante (D_{\max}). Esto se debe a que pasado este límite se copan las fuentes de "pérdidas" en la cuenca, tales como saturación del subsuelo, que impide excesos de retención de agua en él; satisfacción de las demandas de evapotranspiración potencial, etc. De esta forma pasado este límite toda la precipitación adicional se manifiesta como escorrentía superficial en la sección de salida.

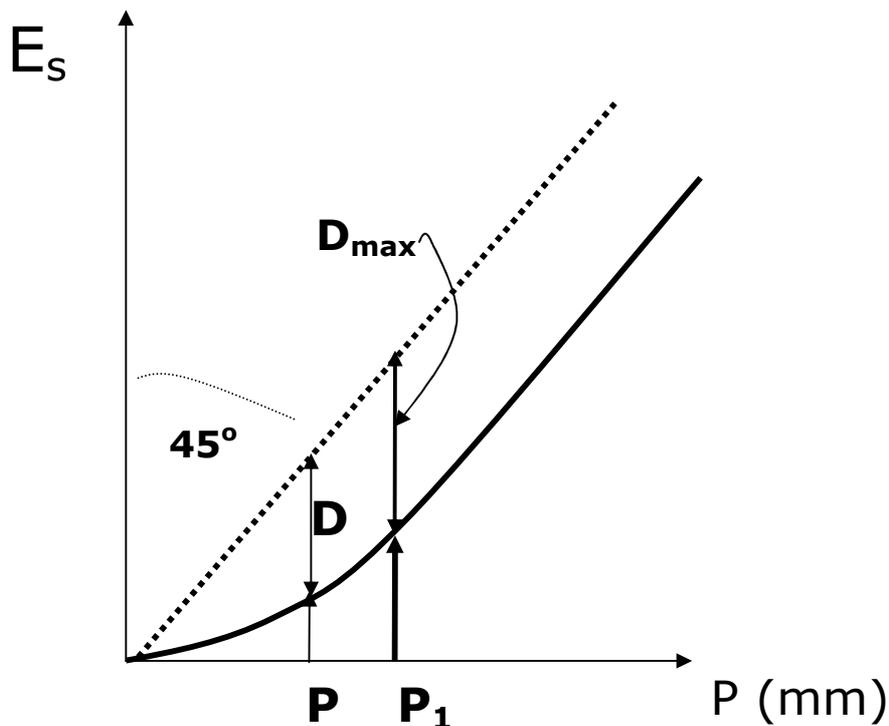


Fig. 6.7

Además en el análisis anterior puede incorporarse el efecto de las condiciones iniciales existentes en la cuenca al comienzo del intervalo de tiempo en estudio. Es así como, si el intervalo de tiempo anterior hubiese sido muy húmedo, se puede esperar que las condiciones de humedad remanente en el suelo sean altas, y por consiguiente la escorrentía alcanzaría su déficit máximo antes de P_1 (fig. 6.7); a la inversa podría

esperarse el déficit máximo se alcanzaría después de P1. De esta forma, puede esperarse una situación similar a la que se presenta en la escorrentía no es única, sino que constituye un conjunto de curvas en función de las condiciones iniciales del período.

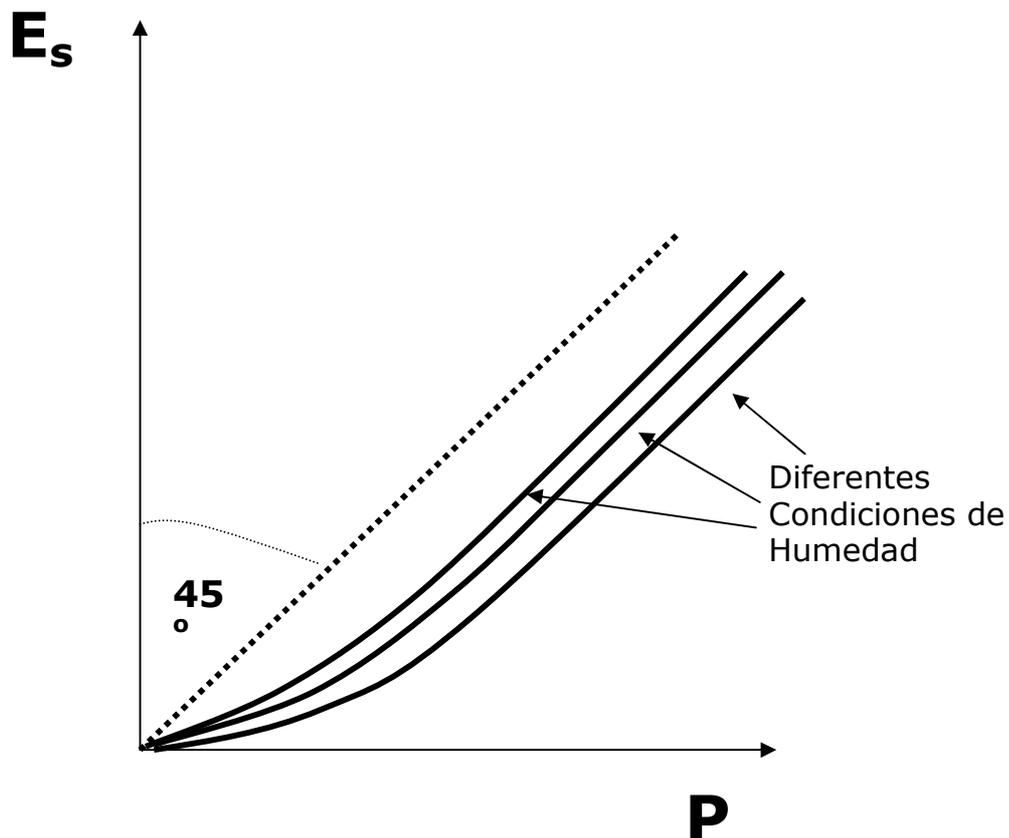


Fig. 6.8: Relación Precipitación-Escorrentía para diferentes condiciones de humedad

Los análisis anteriores llevan a uno de los grupos de métodos que es posible utilizar para hacer estimaciones de escorrentía, que genéricamente se denominan relaciones precipitación - escorrentía (ver punto 6.4.3.2)

Otro grupo de métodos, son aquellos en los cuales las estimaciones se hacen basadas en estadísticas fluviométricas de otras cuencas hidrográficas de características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas similares a la cuenca en estudio, o bien con estadísticas fluviométricas existentes en otros puntos de la misma cuenca.

Finalmente otro método de estimación de escorrentía, es utilizando modelos de simulación hidrológica, los que tratan de representar mediante elementos de cómputo de decisiones lógicas, las distintas fases del ciclo de escorrentía en una cuenca.

6.4.3.2 Relaciones Precipitación-Escorrentía

Existen dos tipos fundamentales de relaciones precipitación-escorrentía; aquellas que se pueden llamar fórmulas empíricas en las cuales la escorrentía se expresa como función de la precipitación, o de la precipitación y otros parámetros meteorológicos, y que han sido propuestas sobre la base de estudios de rendimiento hidrológico de un conjunto de cuencas en diversas partes del mundo. El segundo tipo engloba relaciones más generales, que es factible usar y establecer para cada estudio en particular, y para las cuales es preciso ajustar los coeficientes requeridos en cada caso.

Es de hacer notar que en este punto sólo se mencionan aquellas relaciones precipitación-escorrentía que se utilizan en la estimación de rendimiento hidrológico de cuencas. Existen otros tipos de relaciones precipitación-escorrentía específicos con fines de pronósticos, con fines de estimación de valores extremos, etc. las que se tratan en el capítulo correspondiente.

a) Fórmulas Empíricas

Existen dos tipos de fórmulas empíricas, aquellas en que el único parámetro que utilizan es la precipitación, y aquellas en que además de la precipitación incorporan algún parámetro tal como la temperatura como estimador de las "pérdidas" por evapotranspiración. Del primer tipo se citan como ejemplo la Fórmula de Grunsky y la Fórmula de Peñuelas, mientras que entre las del segundo tipo están las fórmulas de Turc y Coutagne. Estas fórmulas son básicamente para estimar escorrentía total anual.

Fórmula de Grunsky

Fórmula propuesta en Estados Unidos por el hidrólogo norteamericano del mismo nombre, a principios de siglo. Expresa que la escorrentía (E_s), se puede estimar como:

$$E_s = 0,4P^2 \quad (\text{m}) \quad \text{para } P \leq 1,25 \text{ m.}$$

Para $P > 1,25$ toda la precipitación escurre, de tal forma que según la figura 6.7, $D_{\text{max}} = 625 \text{ mm}$.

Fórmula de Peñuelas

Establecida para la zona central de Chile por el Ingeniero A. Quintana alrededor de 1930, y basándose fundamentalmente en mediciones hechas en el Lago Peñuelas (provincia de Valparaíso)

$$E_s = 0,5 P^2 \quad (\text{m}) \quad \text{para } P \leq 1,00 \text{ m.}$$

Para $P > 1,00 \text{ m}$, toda la precipitación escurre, de tal forma que según la figura 6.7, $D_{\text{max}} = 500 \text{ mm}$.

Fórmula de Coutagne

Esta fórmula, propuesta en Francia, establece que el déficit de escorrentía (D) puede estimarse como:

$$1 \quad D = P - \lambda P^2 \quad (\text{m})$$

En consecuencia:

$$2 \quad Es = P - D = \lambda P^2 \quad (\text{m})$$

en que:

$$3 \quad \lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T}$$

Siendo T la temperatura media anual en (°C)

La relación anterior, según el autor, es válida para valores de P en el rango:

$$4 \quad \frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$$

Para valores de $P \leq 1/8\lambda$, se tiene que $D=P$, es decir no hay escorrentía. Para valores de $p \geq 1/2\lambda$, el déficit de escorrentía es independiente de P, siendo:

$$D = 0,2 + 0,035 T$$

Fórmula de Turc.

Esta fórmula establece una relación para el déficit de escorrentía como función de la precipitación y la temperatura media anual (°C). Ella fue obtenida a partir de observaciones efectuada en 254 cuencas de climas y características diferentes en todo el planeta.

$$5 \quad D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

para D y P en milímetros, en que:

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

En consecuencia:

$$Es = P - D \quad (\text{mm})$$

Es indudable que la utilización de las fórmulas anteriores u otras que pueden

encontrarse en la bibliografía, debe realizarse con sumo cuidado. En la mayoría de los casos este tipo de fórmulas ha sido deducido para condiciones muy específicas en cuanto a clima características de la cuenca, que no son aplicables para la cuenca en estudio. En otros casos, las condiciones de deducción, o bien la bondad de los ajustes experimentales logrados, no son perfectamente conocidos, de tal forma que no resulta posible evaluar las posibilidades de aplicación de una fórmula en particular.

En todo caso, aún cuando se utilice alguna fórmula empírica, los resultados obtenidos sólo pueden considerarse una primera aproximación o indicativos de los órdenes de magnitud de la escorrentía. Es de hacer notar, que siempre será un problema, para utilizar este tipo de fórmulas, la determinación correcta de la precipitación media sobre la cuenca en estudio, ya que en estos casos de absolutamente imprescindible que el índice de precipitación sea efectivamente la precipitación media de la cuenca.

b) Relaciones Generales

Para poder establecer algún tipo de relación entre la escorrentía y la precipitación; o entre la escorrentía, la precipitación y algunos otros índices de interés para un estudio específico en una cuenca, es absolutamente indispensable contar con alguna información concurrente en el tiempo de escorrentía, precipitación, y cualquier otro índice que se quiera usar. Lo anterior es imprescindible para poder utilizar esta información concurrente en el tiempo, con el fin de ajustar los coeficientes de la relación por las técnicas usuales vistas en el capítulo de correlaciones y regresiones.

Suponiendo que se tiene alguna información de este tipo, es posible tratar de establecer relaciones entre el volumen anual o mensual de escorrentía y la precipitación durante ese período. El caso más sencillo consiste en buscar una relación gráfica entre volumen anual de escorrentía y precipitación total anual.

Debido a la multiplicidad de factores que se interrelacionan para condicionar la escorrentía de una cuenca, una relación directa y única entre precipitación y escorrentía usualmente no constituye una correlación satisfactoria. Este hecho es particularmente importante si el lapso de tiempo a que se refiere a la relación es menor que un año hidrológico.

En efecto, el volumen de escorrentía en un lapso de tiempo determinado, no sólo depende de la precipitación en cantidad, intensidad y distribución, sino también de la evapotranspiración de la cuenca durante el período y muy especialmente de las condiciones iniciales en la cuenca (específicamente del déficit de humedad en los suelos al comienzo del período). Una determinación directa de este déficit de humedad inicial es extremadamente difícil, por no decir imposible desde un punto de vista índices de condiciones iniciales. La elección de estos parámetros índices dependerá de la precisión requerida, de los datos disponibles y del período de tiempo al que se refiere la escorrentía.

Adicionalmente hay que reconocer que cuantificar la precipitación media sobre una cuenca, para un determinado lapso de tiempo, es también una tarea difícil, ya

que los métodos de estimación de precipitación media proporcionan aproximaciones que sólo en los casos en que la red pluviométrica es completa, pueden ser adecuadas. En consecuencia es normal que los datos pluviométricos disponibles deban considerarse como índices de precipitación.

En resumen, y desde el punto de vista práctico, se puede decir que el volumen de escorrentía producido durante un cierto período de tiempo puede relacionarse estadísticamente (en forma gráfica o analítica), con algún índice de precipitación durante ese período, algún índice de evapotranspiración durante ese período y algún índice de las condiciones iniciales de la cuenca.

Es decir:

$$Es = f(I_p, I_{ET}, I_{CI})$$

en que $I_p =$ índice de precipitación
 $I_{ET} =$ índice de evapotranspiración
 $I_{CI} =$ índice de condiciones iniciales

Como índice de evapotranspiración, suele utilizarse en la práctica registros de temperatura o registros de evapotranspiración en algún evaporímetro. Es común, sin embargo, que no pueda incluirse un índice de evapotranspiración, debido a falta de información suficiente.

El índice de precipitación que se use para la relación precipitación-escorrentía, puede ser la estadística de precipitación que se disponga en algún pluviómetro de la cuenca. Sin embargo, puede recurrirse a un índice de precipitación formado por las estadísticas pluviométricas de varios pluviómetros, ponderadas de acuerdo a la ubicación de éstos dentro de la cuenca. La ponderación que a ellos se de, puede provenir también del ajuste estadístico que se haga para la relación precipitación-escorrentía. En general el índice de precipitación podría tomar la forma:

$$I_{pt} = aP1_t + bP2_t + cP3_t + \dots zPn_t$$

en que Pi_t sería la precipitación en el tiempo t para el pluviómetro i . Es decir, una combinación lineal de las mediciones en varios pluviómetros.

Es conveniente hacer notar aquí, que en la elaboración de cada uno de los índices es preciso tener en cuenta el uso que se le va a dar a la relación precipitación-escorrentía elaborada. Es usual, desde el punto de vista de rendimiento hidrológico de cuencas, que la relación precipitación-escorrentía se vaya a usar para extender una estadística de escorrentía muy corta, de modo de poder hacer un análisis de frecuencia con ella, y poder inferir ciertos resultados de rendimiento de la cuenca en términos probabilísticos. Si es así, es preciso incluir como índices sólo variables para las cuales se tengan mediciones completas durante el período de extensión. Normalmente este tipo de consideraciones limitará el número de pluviómetros que pueden incluirse en un índice de precipitación como el expuesto más atrás. De más

está decir que lo dicho es también válido para cualquier otro índice que pretenda incluirse en la relación.

Con respecto a un índice de condiciones iniciales, se suele usar "índice de precipitación anterior", IPA. Este índice podría ser del tipo:

$$I_{CI} = IPA = aI_{pt-1} + bI_{pt-2} + cI_{pt-3}$$

en que este caso el índice de condiciones iniciales se ha expresado como una combinación lineal de los valores del índice de precipitación ocurrido en el intervalo de tiempo anterior y dos o tres intervalos de tiempo anteriores. En este caso también, los coeficientes a , b y c deben determinarse estadísticamente.

Como índice de condiciones iniciales, es posible utilizar también un "índice de temperatura anterior", o alguna medición o índice de nivel freático en el período de tiempo inmediatamente anterior.

Las consideraciones hechas anteriormente se pueden resumir en que desde un punto de vista práctico y realista, las relaciones precipitación-escorrentía para períodos largos de tiempo (años, meses o estaciones), debe obtenerse por medio de variables o parámetros índices que tengan en cuenta los factores más importantes que condicionan la escorrentía en una cuencas. Estas variables y parámetros se relacionan con la escorrentía por medio de correlaciones múltiples que pueden expresarse analíticamente o bien por medio de gráficos coaxiales. En ambos casos, ya sea para determinar los coeficientes estadísticos de regresión o para determinar la forma y ubicación de la curva en un gráfico coaxial, de evidentemente hacerse uso de los datos medidos de gastos, precipitación, etc.

En el caso de las relaciones precipitación-escorrentía para un período mensual o anual, el número de variables independientes puede simplificarse sin una pérdida sensible de precisión y generalidad. En estos casos suelen emplearse correlaciones analíticas múltiples que se linealizan para mayor simplicidad en el uso y en su obtención. Algunas ecuaciones de este tipo se indican a continuación:

$$Es_t = aI_{pt} + bIPA_t + d$$

$$Es_t = aI_{pt} + bIPA_t + cI_{ETt} + d$$

$$Es_t = aI_{pt} + bN_{t-1} + cT_t + d$$

en que:

- Es_t = escorrentía en el período t .
- I_{pt} = índice de precipitación en el período t .
- IPA_t = índice de precipitación anterior en el período t .
- I_{ETt} = índice de evapotranspiración en el período t .
- N_{t-1} = nivel freático al final del período $t-1$
- T_t = temperatura media durante el período t .

a,b,c,d= coeficientes determinados estadísticamente por métodos de regresión múltiple.

Las formas de las ecuaciones anteriores permiten también correlaciones gráficas, en los casos en que se tengan no más de dos variables independientes.

6.4.3.3 Métodos de Estimación Basados en Estadísticas Fluviométricas

Existen dos procedimientos generales de estimación de datos de escorrentía basados en mediciones fluviométricas en otras cuencas similares o en otros puntos de la misma cuenca. El primero es por transposición de caudales por unidad de área; el segundo consiste en establecer correlaciones para períodos concurrentes en el tiempo entre la estación que se desea extender, y otra estación fluviométrica que tenga un período más largo de registros.

a) Transposición de Caudales

En el caso que la estación fluviométrica no coincida con el lugar donde se requiere información de escorrentía, puede suponerse que los gastos específicos (o gasto por unidad de área) de las cuencas respectivas son aproximadamente iguales, es decir, los gastos en los dos puntos serán proporcionales a las áreas de las cuencas. Esta suposición es válida siempre que las diferencias entre las cuencas no sea demasiado grande con respecto a su geología, geomorfología, tiempo de vegetación y características climáticas y meteorológicas.

Un método similar puede emplearse cuando no se tienen datos fluviométricos en la cuenca en estudio. En este caso el régimen fluviométrico de una cuenca vecina similar con registros de duración suficiente, puede suponerse análogo y transferido a la zona en que no se dispone de estadísticas. Si las precipitaciones son diferentes en magnitud, se pueden transferir los gastos específicos por unidad de precipitación en el período de tiempo considerado. Es decir, para dos cuencas vecinas y similares se puede suponer que:

$$\frac{Q_1}{P_1 A_1} = \frac{Q_2}{P_2 A_2}$$

6
en que:

Q= gasto medio en cierto período de tiempo (mes o año)

A= área de la cuenca

P= precipitación media sobre la cuenca en el período o índice de precipitación considerado para el período.

Luego el gasto estimado en la cuenca en estudio será igual a:

$$7 \quad Q_1 = \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \left(\frac{P_1}{P_2} \right) Q_2$$

siempre que P_1 y P_2 sean diferentes de cero.

Este tipo de transposición de datos de gastos debe efectuarse con suma cautela y discernimiento, teniendo en cuenta la exposición de las cuencas, su geología, geomorfología, vegetación, clima, etc. Es evidente que mientras menor sea el período de tiempo al que se refieren los gastos medios que se están transfiriendo de una cuenca a otra, mayor será la posibilidad de error, ya que si, por ejemplo, los gastos medios anuales pueden ser proporcionales a las áreas y a las precipitaciones anuales, pueden existir amplias variaciones de una cuenca a otra con respecto a los gastos medios mensuales. Esta consideración debe tenerse en cuenta en todos los procedimientos de estimación y extensión de registros fluviométricos.

b) Correlaciones con Otras Estaciones Fluviométricas

Cuando se desea extender una estadística fluviométrica de una cierta estación, es posible establecer una correlación con otra estación fluviométrica cercana y de características similares, durante el período de tiempo en que existen registros concurrentes en ambas. Las correlaciones establecidas se utilizan, para extender las estadísticas de la estación en estudio. La estación que se utilice como base de extensión deberá naturalmente tener una estadística de mayor longitud que la en estudio, y podrá estar en el mismo cauce o en una cuenca vecina, pero siempre deberá poseer un régimen fluviométrico similar al de la estación en estudio.

En problemas de evaluación de recursos hidrológicos, en general bastará con intervalos de tiempo mensuales; en muchos caso incluso es suficiente con intervalos estacionales o anuales. Se puede decir que normalmente las correlaciones entre estadísticas fluviométricas resultan con menor dispersión cuanto mayor sea el intervalo de tiempo a que se refieren los valores. Es así como una correlación entre gastos medios anuales será en general mejor que una entre gastos medios estacionales y aún mejor que entre gastos medios mensuales. Para intervalos de tiempo inferiores a un mes, pueden también intentarse correlaciones, aún cuando en estos casos no se obtienen generalmente resultados aceptables. La razón de esto, es que mientras menor sea la unidad de tiempo, mayor importancia adquieren variables como las siguientes: intensidad de la precipitación, grado de humedad del suelo al comenzar la precipitación, etc.

Las correlaciones entre estadísticas fluviométricas se establecen generalmente como correlaciones simples (ver definiciones capítulo 4), y en consecuencia se prefieren los procedimientos gráficos de ajustes de las curvas o rectas. Es común en problemas de evaluación de recursos de agua, intentar extender estadísticas de gastos medios mensuales. Para esto se grafican los valores medidos en la estación en estudio en función de los valores medidos en la estación base de extensión, para cada mes y para todo el período concurrente de tiempo en que se tengan registros. Las curvas o rectas de relación determinadas gráficamente sirven para ampliar las estadísticas de la estación en estudio.

La implementación de este método puede verse dificultada por el hecho de que la estación en estudio puede tener información insuficiente como para definir claramente las relaciones de algunos meses. Esta dificultad puede a veces subsanarse teniendo en cuenta que en la mayoría de las correlaciones las pendientes de las rectas de regresión tienden para los diferentes meses, a seguir un orden cíclico, tal como muestra el ejemplo esquemático de la figura 6.9.

Fig. 6.9: Correlaciones Mensuales

El hecho anterior ha sido comprobado en Chile por diversos hidrólogos, y permite ayudar a definir las rectas de regresión para aquellos meses que cuentan con poca información, siempre que se haya podido determinar en forma más o menos precisa la relación existente para el mes anterior y posterior.

El método de correlaciones mes a mes recién descrito es generalmente aplicado en conjunto con una correlación anual en entre ambas estaciones. Como ya se dijo esta relación presenta normalmente una menor dispersión que las correlaciones mensuales, y puede en consecuencia definirse en mejor forma. Siguiendo este procedimiento, puede entonces usarse la correlación anual para

extender los valores anuales de la escorrentía en la estación en estudio; enseguida se utilizan las correlaciones mensuales para sintetizar los valores mensuales de modo que su suma sea igual al valor anual obtenido de la primera correlación. Este ajuste se puede hacer prorrateando porcentualmente la diferencia entre el valor de la suma de los caudales mensuales y el caudal anual sintetizado, entre los distintos meses, de tal forma de ajustar la suma de la escorrentía de los meses al valor total anual sintetizado.

Para el trazado mismo de las curvas o rectas de la relación puede recurrirse a procedimientos gráficos o analíticos de ajuste.

En los casos en que el período concurrente de tiempo en que se dispone de registros en ambas estaciones es muy breve, se puede recurrir a establecer una correlación única con todos los valores mensuales, y luego establecer una curva de variación estacional siguiendo el procedimiento recomendado por el U.S. Geological Survey (Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, 1974).