



U 1289

C.1
U.1

Marcel González S.

- 1 -

GENERALIDADES SOBRE LA IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA HIDROLOGIA*

1.- Importancia de la Hidrología.-

El agua es uno de los recursos naturales más preciados por el hombre. Su multiplicidad de usos y la diversidad de actividades y problemas en que interviene, la convierten en un elemento vital para la existencia de vida en la Tierra y para asegurar el desarrollo social y económico de los pueblos.

El incremento de la población y las modalidades de la vida moderna, han provocado en las últimas décadas una fuerte demanda de recursos hidrológicos. Esta demanda ha ido incrementando a tasas crecientes y se estima que en 1985 el consumo de agua en el mundo se habrá duplicado.

Se ha desencadenado entre diversos sectores productivos una intensa competencia en la distribución espacial y temporal del agua, para asegurar un adecuado suministro para sus respectivos usos. Ello ha llevado a la necesidad de desarrollar programas y proyectos regionales para el control y aprovechamiento integral de los recursos de agua; ejemplo de ello es la programación y ejecución de proyectos hidráulicos de aprovechamiento y uso múltiple y el planeamiento y operación de grandes sistemas hidráulicos interconectados a nivel de cuenca hidrográfica.

Por otro lado, la expansión urbana en todos los países del mundo, los grandes problemas de drenaje en regiones agrícolas intensamente explotadas y la construcción de grandes embalses aguas arriba de concentraciones industriales o urbanas, ha llevado a buscar nuevas soluciones y criterios de diseño para el control y evacuación de crecidas.

La intensificación en el aprovechamiento de las fuentes naturales, el reuso del agua y la competencia por su distribución espacial y temporal, ha provocado serios problemas de contaminación y calidad que se manifiestan más claramente en la utilización industrial y urbana de los recursos hidráulicos

* Clases dictadas por el Prof. Ing. Sr. Basilio Espíldora C.

El agua, por lo tanto, se ha convertido hoy en día en un recurso, que aunque renovable, debe satisfacer una importante y creciente demanda en cantidad y calidad, proveniente de una variedad de actividades altamente competitivas y en las que se requiere asegurar también, y con cierta probabilidad, la eliminación parcial o total de los efectos nocivos o catastróficos provocados por los excesos de agua. El importante valor socio-económico del agua implica la necesidad de un desarrollo y control óptimo y acelerado de los recursos hídricos, para poder hacer frente a los urgentes problemas recién mencionados.

La Hidrología participa en la solución de estos problemas por medio de la búsqueda del desarrollo de nuevos y mejores conocimientos sobre la distribución, existencia y comportamiento del agua en la Tierra, permitiendo de esta manera evaluar y utilizar más eficientemente los recursos hidrológicos y al mismo tiempo interviniendo en el diseño óptimo y seguro de las obras hidráulicas necesarias para un aprovechamiento del agua de acorde a las necesidades actuales y futuras.

En los últimos años ha habido un importante incremento de los conocimientos científicos y tecnológicos relacionados con el agua, convirtiéndose la Hidrología en una ciencia altamente interdisciplinaria. Este hecho hace relativamente difícil su enseñanza, haciendo cada vez más urgente la necesidad de compendiar e interrelacionar sus múltiples aspectos.

Para puntualizar la importancia que se da hoy día a la Hidrología, parece necesario mencionar la iniciación en 1965 del Decenio Hidrológico Internacional (DHI). El DHI es un programa internacional patrocinado por la UNESCO y otros organismos de las Naciones Unidas, cuyo propósito es promover y coordinar programas a largo plazo de cooperación e intercambio internacional, con el objeto de desarrollar nuevos conocimientos científicos en el campo de la Hidrología, que permitan elaborar tecnologías nuevas para hacer frente a la demanda actual y futura de recursos hidrológicos.

Nuestro país no ha estado ajeno a estas tendencias y necesidades y está participando activamente en el DHI a través de un Comité Chileno en el que están representadas diversas instituciones relacionadas a la hidrología nacional y al aprovechamiento de los recursos hídricos. Es así que estos organismos han elaborado un Programa especial para ser desarro-

llado durante el Decenio (1965-1974) y que está orientado a la investigación hidrológica pura y aplicada y al desarrollo de instalaciones y nuevas técnicas que permitan un mejor conocimiento de nuestros recursos hídricos y posibiliten su óptima utilización; nuestras necesidades de desarrollo urbano, agrícola e industrial así lo requiere.

2.- Definiciones y alcances de la Hidrología.-

Etimológicamente la Hidrología es la ciencia que tiene relación con el agua. Es considerada, por la Asociación Internacional de Hidrología Científica, como una Ciencia de la Tierra y parte de la Geografía Física, por cuanto trata principalmente con el agua en la corteza terrestre. Diversos autores e investigadores han propuesto diferentes definiciones de la Hidrología. Algunas de ellas se incluyen a continuación con el propósito de proporcionar un concepto moderno general sobre los objetivos, procedimientos y aplicaciones de esta ciencia.

Mead, en 1904, consideraba a la Hidrología como "la ciencia del agua que constituye la base de todos los problemas de ingeniería hidráulica". En 1931, el célebre hidrólogo norteamericano Robert E. Horton, amplió esta definición cuando declaró que: "como una ciencia pura, la Hidrología trata de la existencia, distribución y circulación del agua dentro y sobre las capas superficiales de la corteza terrestre".

El diccionario Merriam-Webster en su edición de 1961, incluye la siguiente definición: "Hidrología es la ciencia que trata de las propiedades, distribución, existencia y circulación del agua; específicamente, el estudio del agua en la superficie de la tierra, en el suelo, estratos rocosos y en la atmósfera, particularmente en relación con los procesos de evaporación y precipitación.

En 1962 el Consejo Federal para la Ciencia y la Tecnología de EE.UU. ha proporcionado una definición general y moderna de la Hidrología: "La Hidrología es la ciencia que trata de las aguas de la Tierra, su existencia, circulación y distribución, sus propiedades físicas, químicas y sus reacciones con el medio ambiente, incluyendo su relación con los organismos vivos".

Las definiciones anteriores permiten visualizar las múltiples interrelaciones de la Hidrología con otras ciencias que le son afines. Por ejemplo, entre las ciencias de la Tierra cabe mencionar las interrelaciones con la Meteorología, Climatología, Geografía Física, Geología, Geomorfología, Oceanografía, Limnología, Criología, Potamología, etc. Además debe mencionarse las interrelaciones de la Hidrología con otras disciplinas como la Agronomía, la Mecánica y la Física de Suelos, la Hidráulica y la Mecánica de Fluidos, la Estadística Matemática, el Análisis Matemático, el Análisis de Sistemas y la Ingeniería. En todo caso los métodos y procedimientos de la Hidrología le son propios y en general sólo aplicables a sus fines y objetivos.

Sin embargo no debe considerarse a la Hidrología como una ciencia pura solamente. En efecto, la principal aplicación de la Hidrología es a la Ingeniería en general y a la Ingeniería Hidráulica en particular.

Los análisis y estudios hidrológicos relacionados, por ejemplo con: los caudales medios disponibles (diarios, mensuales, anuales), la magnitud y distribución en el tiempo y el espacio de las crecidas, la previsión de caudales a corto y mediano plazo, la estimación y métodos de control de la evaporación y la evapotranspiración, la determinación de caudales subterráneos y la identificación de zonas de recarga de agua subterránea y su respectiva magnitud, etc., le permiten al ingeniero elaborar el diseño y dimensionamiento de obras hidráulicas (o de obras civiles afectadas por el agua como caminos, puentes, puertos, algunos edificios, etc.), establecer sus condiciones de construcción, operación y explotación y conocer y elegir la seguridad (hidrológica) del proyecto.

La Hidrología permite contestar también los siguientes tipos de pregunta: ¿Cuáles son los recursos hídricos de una hoya hidrográfica o región; son ellos adecuados en cuanto a su distribución espacial, temporal y grado de probabilidad de ocurrencia, para permitir el desarrollo agrícola, urbano e industrial de la zona? ¿Cuáles son los factores y caracterís-

ticas hidrológicas de una región que determinan y posibilitan la evaluación económica, el diseño, construcción, operación y mantención de obras de aprovechamiento, control y evacuación de los recursos de agua de la zona? ¿Cuáles son los efectos físicos, económicos, legales y de calidad de ciertos cambios en el uso de la tierra (re o deforestación, obras de riego y drenaje, urbanización, explotación intensiva de acuíferos) y sus efectos en la circulación y disponibilidades de agua en la región considerada? ¿Qué tipo de obras hidráulicas y qué características deben tener, para aprovechar los recursos de aguas económicamente disponibles y para satisfacer demandas competitivas en el tiempo y en el espacio y en cantidad y calidad?

3.- El Ciclo Hidrológico.-

La Hidrología estudia y evalúa científicamente cada una de las partes y las interrelaciones de los distintos procesos que componen el ciclo hidrológico.

Con el objeto de visualizar la forma en que el hidrólogo debe proceder para establecer relaciones cuantitativas que le permitan reproducir estadísticas hidrológicas o efectuar evaluaciones y predicciones de variables hidrológicas tales como precipitación, caudales de un río, niveles de agua subterránea, evaporación, etc., se incluye en este capítulo una revisión general y completa del llamado ciclo hidrológico, pero sin entrar en los detalles mismos de los fenómenos componentes, sino más bien en su naturaleza e interrelaciones.

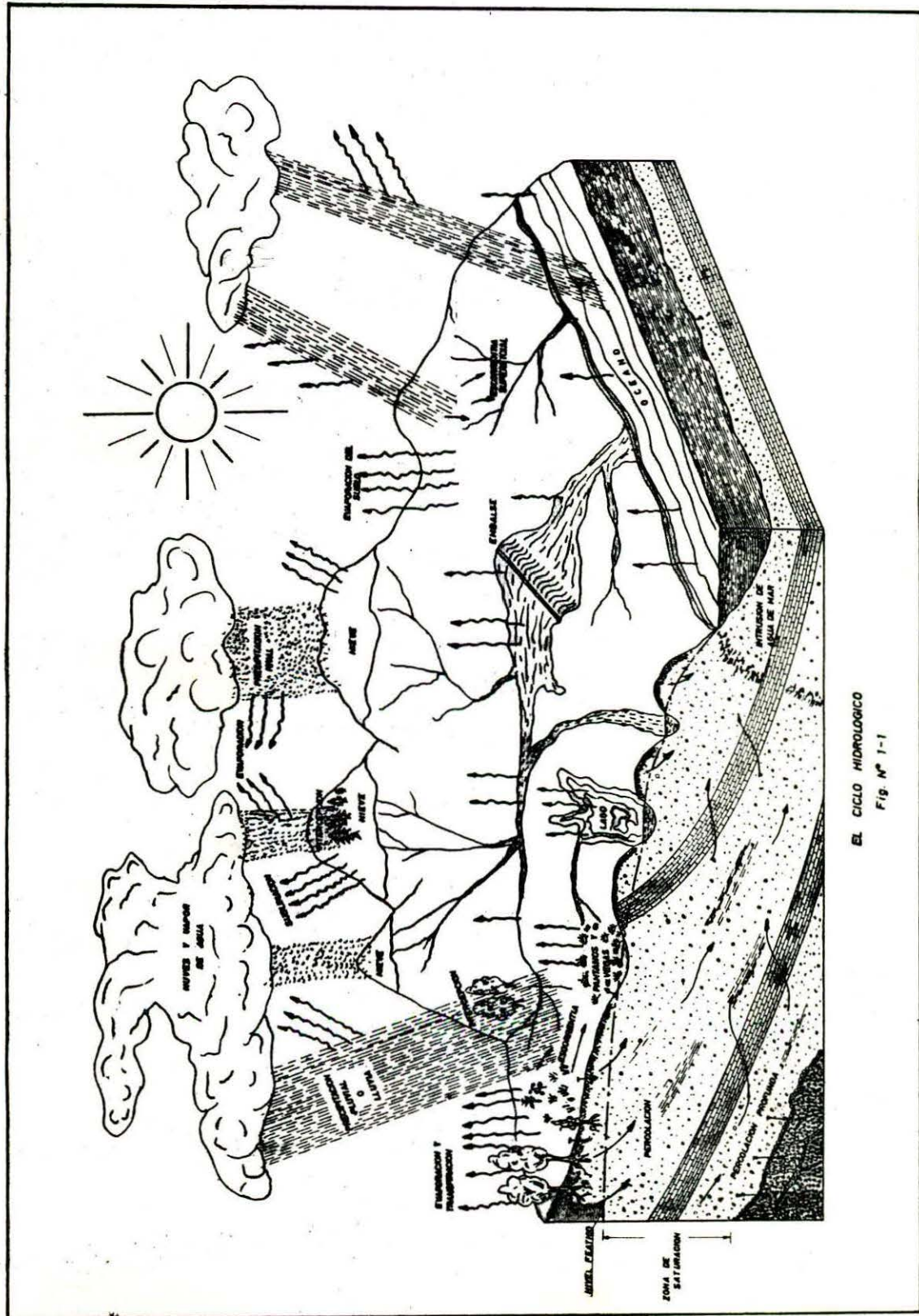
El ciclo hidrológico es un término más bien académico, pero útil, que corresponde a un modelo o idealización del movimiento, distribución y circulación general del agua en la Tierra. De acuerdo a este concepto, el ciclo hidrológico abarca no solamente el movimiento y distribución del agua dentro de las masas continentales (escorrentía, infiltración, percolación, etc.), sino también el movimiento y circulación desde la hidrósfera a la atmósfera (evaporación), desde la atmósfera a la litósfera (precipitación) y desde esta última nuevamente a la hidrósfera y la atmósfera (escorrentía, evaporación, transpiración).

Desde un punto de vista global, el ciclo hidrológico es un proceso continuo, pero que contiene elementos de azar y variaciones no continuas o discretas al considerar extensiones

o territorios más reducidos. Por ejemplo, en el caso de una cuenca hidrográfica, la precipitación no puede ser considerada como un proceso continuo sino discreto en el tiempo. Sin embargo subsisten procesos continuos, como la evaporación y evapotranspiración, que ocurren en todo momento pero con cambios graduales de sus tasas de acuerdo a las variaciones de la energía solar. En resumen, lo que constituye una función o proceso continuo desde el punto de vista global, posee una distribución discreta desde el punto de vista local. Este hecho es importante porque al mismo tiempo que hace diferente el estudio hidrológico desde el punto de vista local, lo facilita desde el punto de vista del análisis estadístico.

Con el objeto de relacionar la definición general del ciclo hidrológico a una cuantificación de sus elementos, es preciso efectuar una serie de idealizaciones, que a su vez permiten comprender la génesis y la metodología que debe seguir el hidrólogo para resolver los problemas aplicando ciertos procedimientos.

En primer lugar, se hace referencia a la Fig. 1.1 que describe en forma pictórica e idealizada los diferentes procesos contenidos en el ciclo hidrológico. Esta primera idealización indica cómo el vapor de agua almacenado en la atmósfera puede condensarse e incorporarse a la superficie de la Tierra a través del proceso de precipitación pluvial o nival. Esta precipitación cae sobre los océanos, ríos, lagos, vegetación, montañas y superficie del suelo. Parte de la precipitación que cae sobre la superficie del suelo puede escurrir superficialmente hasta incorporarse a los ríos y lagos y de allí eventualmente llegar al mar, o bien quedar almacenada en las depresiones superficiales del terreno. Otra parte de la precipitación se infiltra pudiendo quedar retenida en la zona de raíces de las plantas o bien percolar más profundamente para incorporarse a las napas subterráneas o bien escurrir a través de grietas en los estratos profundos de rocas. Esta agua infiltrada puede también escurrir e incorporarse a lagos y ríos hasta llegar directa o indirectamente al mar. Finalmente se observan los procesos de evaporación desde las superficies de agua libre (lagos, ríos, océanos), la evaporación del agua almacenada por el follaje de las plantas (intercepción), la sublimación de la nieve y la transpiración de las plantas proveniente de parte del agua absorbida por sus sistemas radiculares. Debido a estos últimos procesos, el vapor de agua que se genera, se incorpora a la atmósfera y de esta manera el ciclo se cierra. Nótese también en el diagrama, los procesos de evaporación de la precipitación antes de que ésta alcance la superficie de la Tierra, y la interconexión entre los escurrimientos superficiales y subterráneos.



Esta imagen gráfica del ciclo hidrológico permite efectuar en forma limitada una especie de inventario de los fenómenos que ocurren, con el objeto de poder identificar cada uno de los elementos o fenómenos que estudia la Hidrología Física. En esta primera idealización no es fácil puntualizar la forma del ciclo ni las relaciones entre cada uno de los elementos componentes. Además, no toda el agua precipitada sigue todos los caminos descritos, ya que existen una serie de corto-circuitos para llevar por vías más directas al mar y/o a la atmósfera. La variable tiempo introduce también algunas complicaciones como es el caso de la precipitación nival que permanece algún tiempo acumulada antes de continuar con un ciclo más directo. Finalmente, el esquema de la Fig.1.1 no permite considerar procesos más complejos como crecidas o períodos húmedos y sequías o períodos secos.

Para lograr gran parte de estos objetivos y levantar alguna de estas limitaciones, se puede recurrir a otras etapas de idealización, en que se abandona la forma pictórica. No es el objeto de estos apuntes entrar a describir y explicar estas relaciones. Baste decir que ellas se basan en diagramas de flujo del ciclo hidrológico en que se distinguen elementos de embalse y translación de aguas y que permiten establecer relaciones conceptuales entre sus diferentes componentes y poder así resolver determinados problemas aplicando los procedimientos de análisis y síntesis hidrológica.

DETERMINACION DE GASTOS MAXIMOS PARA EL DISEÑO DE ALCANTARILLADOS
DE AGUAS LLUVIA EN CUENCAS URBANAS^(*)

1.- Introducción:-

El ingeniero abocado al problema de diseñar una red de alcantarillado de aguas lluvia en una cuenca urbana, debe disponer de los antecedentes necesarios que le permitan determinar el gasto de diseño que la red debe ser capaz de evacuar.

En cuencas urbanas no se dispone comúnmente de estadísticas o registros de caudales que permitan elegir directamente el gasto de diseño a utilizar y su correspondiente probabilidad de ocurrencia. Por este motivo debe recurrirse a procedimientos indirectos para su determinación. Dichos procedimientos suelen ser métodos empíricos o semiempíricos, y comúnmente se basan en la determinación de lluvias de diseño, por ser la precipitación el origen o variable independiente del régimen de gastos en la cuenca.

La mejor manera de determinar y caracterizar una lluvia de diseño, que permita posteriormente estimar el gasto máximo de la crecida a que da origen, es mediante las llamadas curvas de intensidad - duración - frecuencia.

A continuación se explican los procedimientos para obtener las curvas de intensidad-duración-frecuencia y su uso en la determinación de gastos de diseño, y otros procedimientos para estimar los gastos de diseño. Se incluye además una bibliografía relativa a estos temas

2.- Curvas de intensidad - duración - frecuencia (IDF):-

2.1 Generalidades.-

Las curvas IDF son una relación gráfica (o analítica) entre la intensidad media de la lluvia en mm/hora y su duración en minutos, para diversas probabilidades de ocurrencia o excedencia que se mide en años o %. Gráficamente la relación se expresa como lo indica la Fig. 1.

(*) Clases dictadas por el Prof. Ing. Basilio Espíldora C.

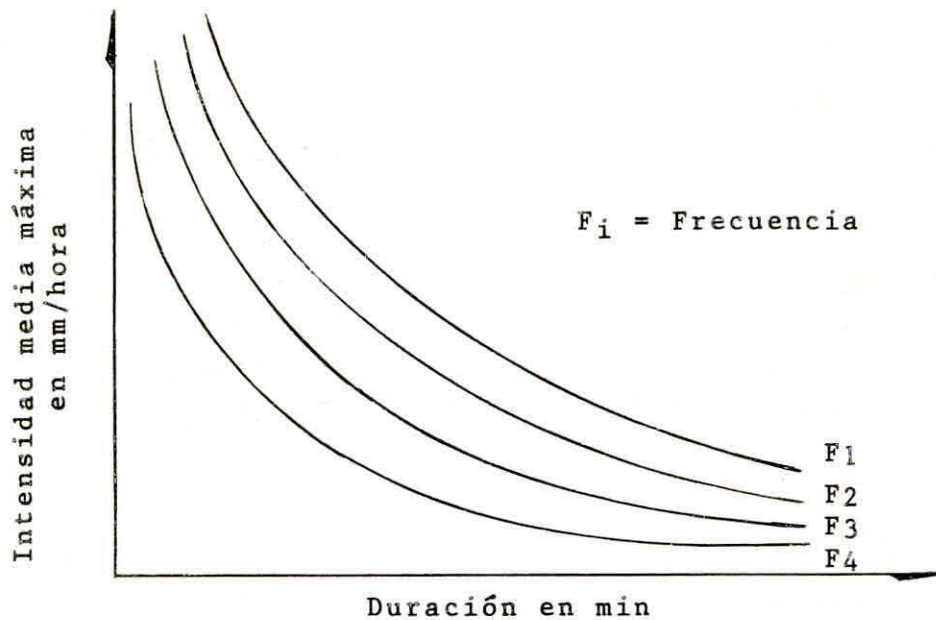


Figura 1

Es decir, se tendrá una probabilidad F_2 de que en un intervalo de tiempo de D_1 minutos (Duración), ocurra una intensidad media igual o superior a I_1 mm/hora.

Para determinar las curvas IDF debe disponerse de datos de precipitación registrados por un pluviógrafo(*) durante un tiempo razonablemente largo.

Con el objeto de explicar el procedimiento para obtener las curvas IDF en base a los datos de cierta estación pluviográfica, es conveniente tratar primero separadamente cada uno de los elementos de dicha relación, es decir, lo relativo al cálculo de frecuencias o probabilidades de excedencia y luego lo correspondiente a la relación entre la intensidad de una lluvia y su duración.

2.2 Frecuencia de las lluvias:-

En estudios hidrológicos, es muchas veces necesario estimar la frecuencia con que se produce cierta magnitud de un evento hidrológico. Es decir, interesa conocer, por ejemplo, la mayor lluvia que puede ocurrir con cierta frecuencia (o probabilidad), o con qué frecuencia podría producirse una lluvia de cierta intensidad(**).

(*) Un pluviógrafo es un instrumento que registra la cantidad de agua caída (en mm) versus el tiempo. En un pluviógrafo de registro semanal se puede discriminar fácilmente hasta los 30 min.

(**) Análogamente podrá hacerse el análisis para los gastos máximos y mínimos de un determinado río, o con cualquiera otra variable hidrológica.

El intervalo promedio de tiempo dentro del cual la magnitud "x" de un evento hidrológico, se iguala o se excede, se designa con el nombre de intervalo de recurrencia, período de retorno o simplemente frecuencia. Es decir si nos referimos a la precipitación como evento hidrológico, el período de retorno o frecuencia es el número de años durante los cuales, en promedio, una lluvia de cierta magnitud sucederá por lo menos una sola vez. Por ejemplo, una lluvia de 1 hora de duración y 10 años de frecuencia tiene tal magnitud que puede esperarse que en promedio se iguale o se exceda 10 veces en 100 años. Lógicamente es posible que esa lluvia ocurra dos o más veces dentro de cualquier período de 10 años, e incluso dos o más de estos chubascos pueden producirse dentro de un mismo año. El período de retorno, entonces, daría más bien una idea de la magnitud del evento, que de su probabilidad real de periodicidad o recurrencia.

Se ve claramente que si un evento hidrológico, de magnitud igual o mayor que "x", ocurre en promedio una vez en T años (período de retorno), su probabilidad de excedencia, P, es igual a

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T}$$

y además

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} = \frac{1}{1 - P(X \leq x)}$$

en que $P(X \leq x)$ es la probabilidad que ocurra un evento de magnitud menor o igual a "x".

Para estimar el período de retorno de un evento hidrológico de cierta magnitud, a partir de datos observados, se han propuesto una serie de fórmulas, muchas de ellas empíricas y otras determinadas por métodos analíticos. Como ilustración, algunas de las más usadas se incluyen en la Tabla I.

T A B L A I

NOMBRE	FECHA	FORMULA
California	1923	$\frac{N}{m}$
A. Hazen	1930	$\frac{2N}{2m-1}$
Weibull	1939	$\frac{N+1}{m}$
Chegodayev	1955	$\frac{N+0.4}{m-0.3}$
Blom	1958	$\frac{N+1/4}{m-3/8}$
Gringorten	1963	$\frac{N+0.12}{m-0.44}$

En que m = número de orden de la magnitud considerada, cuando los datos se ordenan de mayor a menor.

N = número de años observados, o número de observaciones.

Por ejemplo, para determinar los períodos de retorno de las intensidades de lluvia, de cierta duración, se ordenan los valores observados en orden descendente y a cada valor se le asigna un número de orden (número uno al mayor, etc.). El período de retorno que corresponde a cierta intensidad de lluvia se calculará entonces por cualquiera de las fórmulas indicadas en la Tabla I. Todas estas fórmulas dan valores muy similares para períodos de retorno o frecuencias intermedias, pero difieren para valores extremos (frecuencias muy altas o muy bajas). Usualmente se utiliza la fórmula de Weibull o la de Allen Hazen.

Las fórmulas para determinar períodos de retorno, permiten representar gráficamente la relación entre la magnitud de un evento y su correspondiente frecuencia. Si tal relación se representa en un sistema de coordenadas con ejes aritméticos, la curva tendrá la forma que indica la Fig. 2.

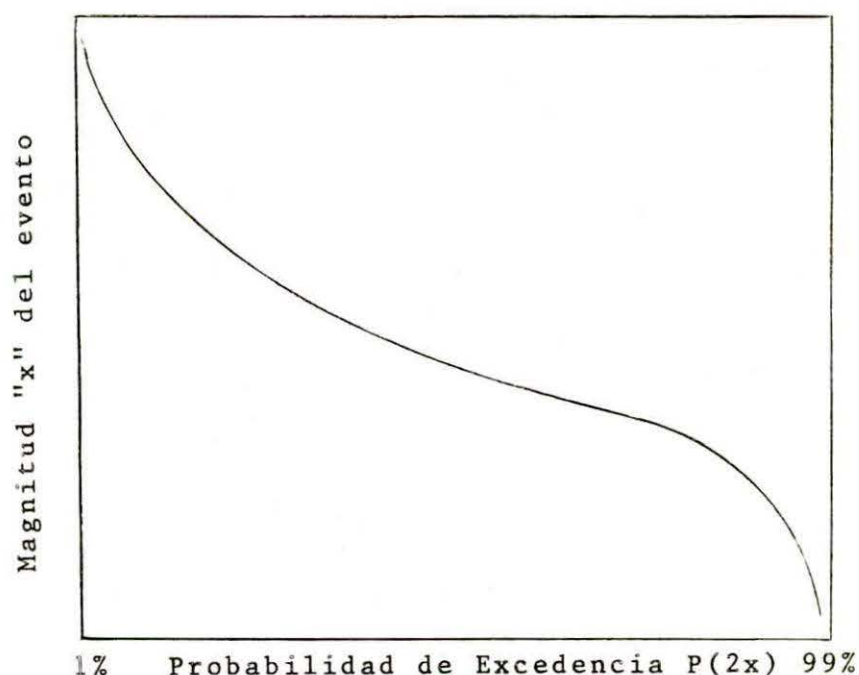


Figura 2

Es necesario recordar que la curva indicada en la figura representa lo que en estadística se conoce con el nombre de curva de frecuencia acumulada y que corresponde a la curva integral de la curva de distribución de frecuencias de la serie de datos estadísticos.

La "curva de frecuencia acumulada", que corresponde a la relación entre el período de retorno (o su recíproco, la probabilidad) y la magnitud del evento considerado (intensidad de lluvias, lluvia anual, gastos máximos, etc.), se representa usualmente en un sistema de ejes coordenados ortogonales llamado "papel de probabilidades", y que se diseña de acuerdo al tipo de distribución de frecuencia que se supone para la estadística hidrológica considerada. En este gráfico, el eje de probabilidades, está diseñado de tal manera que la relación T vs x (o P vs x) aparezca como una línea recta, facilitándose de esta manera la interpolación y la extrapolación de datos. Existen una diversidad de "papel de probabilidades", según el tipo de distribución de frecuencias que se considere. El más usado en Chile es el basado en la teoría de Allen Hazen en que se supone una distribución normal gaussiana. En caso que la distribución de valores no sea gaussiana, se puede demostrar que si el valor normal de la estadística queda mejor representado por el medio geométrico (y no por el medio aritmético), los loga-

ritmos de los valores tienen una distribución normal y por lo tanto es aplicable la teoría de Allen Hazen y su papel de probabilidades. En este caso la relación T vs x (o P vs x) sería una recta en un "papel logarítmico-probabilidad" (el eje de las ordenadas tiene una graduación logarítmica).

Sin embargo, si se está efectuando un estudio de frecuencias de lluvias (o gastos) máximas, la distribución estadística que corresponde al conjunto de valores constituye una serie de valores extremos que tiene una distribución especial que no es logarítmica normal. En este caso correspondería utilizar, por ejemplo, el papel Gumbel de probabilidades.

2.3 La intensidad de la lluvia. Relación Intensidad - Duración:-

La intensidad de la lluvia, usualmente expresada en mm/hora, es un elemento esencial para el ingeniero hidráulico que no cuenta con datos directos de gasto para dimensionar sus obras.

Cuando sólo se dispone de un pluviómetro en una estación, es evidente que en general sólo se podrá conocer la intensidad media en 24 horas. Como se comprenderá, esta información puede inducir a grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son en general las más intensas.

Es natural entonces que las determinaciones de intensidad de lluvia se hagan a partir de los registros proporcionados por pluviógrafos. A no ser que se cuente con un pluviógrafo de velocidad, que registra directamente la intensidad instantánea de la lluvia, los pluviógrafos registran la altura de agua acumulada y por lo tanto la pendiente a la curva que proporciona el registro del pluviógrafo o pluviograma, corresponde a la intensidad de la lluvia en el instante considerado.

Si la intensidad de la lluvia se expresa por medio de la relación:

$$i = \frac{\Delta P}{\Delta t} \text{ mm/hora}$$

donde ΔP es la precipitación en mm caída en un intervalo Δt considerado; se ve claramente que mientras menor sea este intervalo de referencia, mayor tiende a ser la intensidad correspondiente.

En el pluviograma de una lluvia determinada, se pueden distinguir teóricamente infinitos intervalos de una duración Δt cualquiera. Durante y para cada uno de estos intervalos o duraciones, se puede determinar la intensidad media de la precipitación. Existirá uno de estos intervalos de igual duración en que la intensidad de la lluvia es máxima y es evidente que este valor será el de mayor interés desde el punto de vista de los gastos máximos que eventualmente se producen. Por lo tanto, la relación intensidad - duración que interesa, deberá referirse a la intensidad media máxima que corresponde a cada intervalo elegido. (La calificación de "media máxima" se refiere a que la intensidad es media en el intervalo y, a su vez, es máxima en la duración total de la lluvia considerada).

Por ejemplo, si se elige un intervalo de duración 5 minutos, para determinar la intensidad media máxima para esta duración ($I_{5\text{m}\text{áx}}$), debe buscarse en el pluviograma de la lluvia que se está analizando, el mayor incremento de precipitación (en mm) que cayó en 5 minutos cualquiera dentro de la duración total de la lluvia. Esta altura de agua se divide por 5 min y se multiplica por 60 para convertir el valor a mm/hora. Luego se procede igual para intervalos de otra duración, usualmente de 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120 y 180 minutos^(*). De esta manera, para una lluvia determinada, se tiene la información referente a la variación de la intensidad (media máxima) con la duración.

Como ejemplo de la manera de presentar el cálculo de intensidades medias máximas para distintas duraciones dentro de una determinada lluvia o chubasco, se incluye a continuación la Tabla II y la Fig. 3.

(*) Para duraciones menores de 30 minutos debe disponerse de pluviógrafos de registro diario.

T A B L A I I

Lluvia del 23 de Junio de 1954 registrada en la es-
tación pluviográfica NN

Comienzo = 16:45 hrs

Duración total = 3 horas

fin = 19:45

Agua caída = 47.8 mm

Duración consi- derada o inter- valo Δt de re- ferencia (min)	Altura de agua máxima caída en Δt (mm)	Principio y fin del intervalo (hora)	Int. media máx $I_m = \frac{\Delta P}{\Delta t}$ (mm/hora)
5	10.9	16:55 - 17:00	131
10	19.7	16:55 - 17:05	118
15	26.3	16:50 - 17:05	105
20	30.2	16:46 - 17:06	91
25	35.0	16:46 - 17:11	84
30	38.2	16:46 - 17:16	76
40	42.0	16:46 - 17:26	63
50	43.0	16:46 - 17:35	52
60	44.1	16:45 - 17:45	44
90	45.3	16:47 - 18:17	30
120	46.8	16:45 - 18:45	23
180	47.8	16:45 - 19:45	16

Claramente se observa que a mayor duración correspon-
de una menor intensidad media máxima. Gráficamente la rela-
ción es del tipo que indica la Fig. 3.

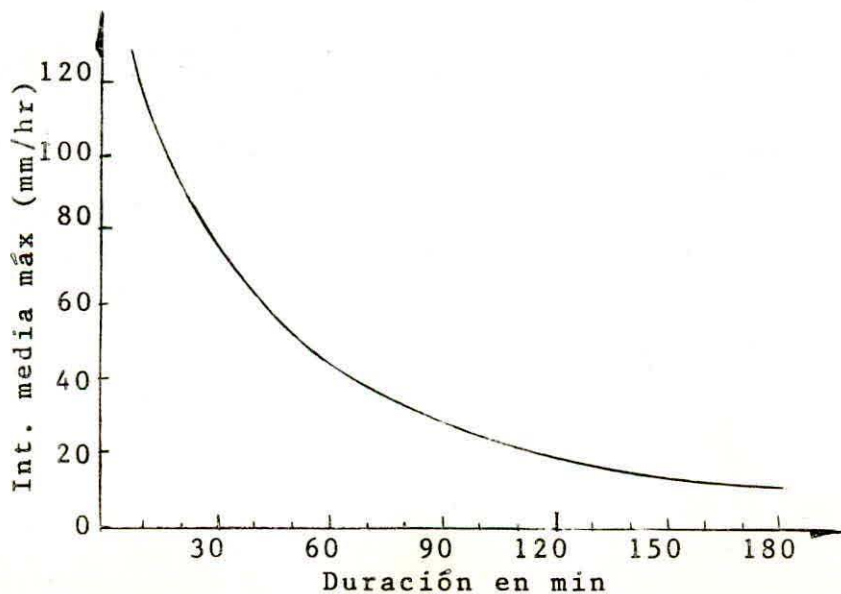


Figura 3

2.4 Relación Intensidad - Duración - Frecuencia:-

Tal como se esquematizó en la Fig. 1, para determinar la relación IDF deberá asignarse una frecuencia o probabilidad a la relación intensidad - duración. Dicha probabilidad no se refiere a la de toda la lluvia, sino a cada uno de los puntos de una curva I-D que, como se explicará a continuación, corresponden a puntos obtenidos de episodios diferentes de lluvia.

Para obtener las relaciones I-D-F de un lugar, deberán considerarse todas las lluvias observadas en la estación pluviográfica correspondiente. Para cada una de estas lluvias se determina, tal como se explicó en el punto 2.3, las intensidades medias máximas correspondientes a distintas duraciones Δt . Para determinar la distribución de frecuencia que corresponde a las intensidades medias máximas de cada duración, existen dos procedimientos:

- Para cada una de las duraciones seleccionadas se elige la mayor intensidad media máxima que ocurrió en cada uno de los años observados, despreciando los otros valores del mismo año, aunque estos puedan ser mayores que los máximos elegidos en los otros años. (La serie de valores así obtenidos se denomina serie de máximos anuales).
- Para cada una de las duraciones seleccionadas se eligen todas las intensidades medias máximas mayores que cierto valor mínimo práctico. Se podrán tener así dos o más valores que corresponden a una misma lluvia, o años en que no se eligió ningún valor. La serie que resulta se denomina serie de duración parcial.

Cualquiera que sea el procedimiento elegido, los valores así obtenidos se ordenan de mayor a menor (sin tener en cuenta su orden cronológico), para cada una de las duraciones consideradas. Los resultados se pueden ordenar en una Tabla del siguiente tipo:

T A B L A I I I

Clasificación de Intensidades medias máximas para el período
1939 - 1967 en la Estación NN

N° orden	Δt min									Frecuen cia $F = \frac{m}{N+1}$
	5	10	15	25	30	45	60	120	180	
1	a ₁ ⁵	a ₁ ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a ₁ ¹⁸⁰	F ₁
2	a ₂ ⁵	a ₂ ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a ₂ ¹⁸⁰	F ₂
3	a ₃ ⁵	a ₃ ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a ₃ ¹⁸⁰	°
4	a ₄ ⁵	a ₄ ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a ₄ ¹⁸⁰	°
°	°	°							°	°
°	°	°							°	°
°	°	°							°	°
°	°	°							°	°
m	a _m ⁵	a _m ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a _m ¹⁸⁰	F _m

Luego, para cada intervalo de duración Δt se determina el período de retorno o la probabilidad de excedencia de las correspondientes intensidades medias máximas, de acuerdo a cualquiera de las fórmulas incluídas en la Tabla I (ver última columna de Tabla III).

Si para formar los valores de la Tabla III se ha utilizado el criterio de la serie de excedencias anuales (1er procedimiento), se obtiene la probabilidad de igualar o sobrepasar una intensidad (que corresponde a cierta duración), en cualquiera de los años. Si se trabaja con una serie de duración parcial (2º procedimiento), se obtiene la frecuencia o el número de veces en un período dado (años de estadística) en que una intensidad de cierta duración se iguala o se sobrepasa.

Los valores de la Tabla III se llevan a un gráfico y dan origen a las curvas de intensidad - duración - frecuencia (como parámetro).

Varios hidrólogos, en diferentes partes del mundo, han propuesto una serie de fórmulas para representar analíticamente la relación intensidad - duración - frecuencia. Estas fórmulas se resumen en la siguiente Tabla:

T A B L A I V

<u>Nombre Fórmula</u>	<u>Año</u>	<u>Fórmula para I_{max}</u>
Talbot	1904	$\frac{a}{t + b}$
Meyer	1917	$\frac{at}{t + b}$
Bernard	1932	$\frac{K F^x}{t^n}$
Grisollet	1948	$\frac{a}{(t + b)^n}$
"	1948	$\frac{a}{(t + b)(F + c)}$

donde t es la duración en minutos, F es la frecuencia o período de retorno y a, b, c, n, x son parámetros que se determinan estadísticamente.

Excepto por la fórmula de Bernard y la segunda relación propuesta por Grisollet, los parámetros a, b y n no sólo dependen del lugar sino que del período de retorno considerado. Todo intento de transposición de estos parámetros, de un lugar a otro, sólo se puede permitir cuando las dos regiones son hidrometeorológicamente homogéneas.

3.- Determinación del gasto de diseño por el método llamado "de la fórmula racional".-

Se han propuesto diversas fórmulas empíricas y semi-empíricas para estimar gastos máximos en base a la intensidad de lluvia. Una de estas fórmulas es la llamada: "fórmula racional", que tiene la siguiente expresión:

$$Q_{\text{máx}} = C I A$$

en que

$Q_{\text{máx}}$ = gasto máximo en lts/seg/Ha.

C = coeficiente de escorrentía, que expresa la relación entre el gasto máximo por unidad de área y la intensidad media máxima de la lluvia durante un período de tiempo igual al tiempo de concentración de la cuenca. (Representa por lo tanto el porcentaje de lluvia que puede escurrir).

I = intensidad media máxima de la lluvia en lts/seg/Ha (*) durante el tiempo de concentración de la cuenca.

A = superficie de la cuenca en hectáreas.

Se define como tiempo de concentración de la cuenca, al mayor tiempo que demora en llegar al punto donde se está calculando el gasto, la partícula de agua que cae más alejada de dicho punto.

La "fórmula racional" está basada en una serie de hipótesis que implican diversas limitaciones que es necesario tener en cuenta al utilizarla. Dichas hipótesis son las siguientes:

- a) Se supone que el gasto máximo, que produce cierta intensidad de lluvia, ocurre cuando dicha intensidad (media) se mantiene por lo menos durante un período igual al tiempo de concentración de la cuenca, ya que sólo entonces estaría contribuyendo toda la cuenca a la escorrentía.
- b) La relación lluvia - gasto es lineal.
- c) La máxima intensidad de lluvia ocurre dentro del período o tiempo de concentración.

(*) 1 mm/hora = 2,78 lts/seg/Ha.

- d) La probabilidad de ocurrencia de los gastos máximos es la misma que la de las intensidades de lluvia correspondiente.
- e) El coeficiente de escorrentía de una cuenca es independiente del tipo y probabilidad de la lluvia.

Estas hipótesis limitan el uso del método a cuencas urbanas relativamente pequeñas, preferentemente menores que 15 Km². A pesar de estas limitaciones y de otras que se analizarán al tratar cada uno de los términos de la "fórmula racional", la experiencia acumulada en su uso y en los parámetros que intervienen, la simpleza de la relación y la posibilidad de aplicar la experiencia y criterio del proyectista, ha representado un avance positivo en la evaluación de gasto de diseños, cuando este método se aplica en los casos que corresponde y teniendo plena conciencia de sus limitaciones e hipótesis.

Se tratan a continuación cada uno de los términos que intervienen en la "fórmula racional" y se explica cómo se eligen y determinan para la aplicación del método.

3.1 Determinación del Coeficiente de Escorrentía:-

El coeficiente de escorrentía de la "fórmula racional" es el elemento menos susceptible de una determinación precisa y para su elección se requiere un conocimiento detallado del área y una considerable experiencia y juicio práctico. Este coeficiente implícitamente debe tener en cuenta una diversidad de factores tanto climáticos como fisiográficos que influyen en la relación lluvia - gasto. Estos factores se refieren a los siguientes aspectos: pérdidas por intercepción de la lluvia por la vegetación; pérdidas a la escorrentía superficial debido a la relación entre la capacidad de infiltración del suelo y la intensidad de la lluvia, pérdidas por retención y detención en depresiones del terreno y pérdidas por evaporación y evapotranspiración. En la realidad, por lo tanto, el coeficiente de escorrentía no sólo varía según las condiciones climáticas y estacionales sino que dentro del período de una determinada lluvia. Sin embargo, en la práctica, comúnmente se utilizan coeficientes constantes que sólo dependen del tipo de terreno y de urbanización. La Tabla IV indica los valores usualmente empleados.

T A B L A V

Valores del Coeficiente de Escorrentía según el tipo de zona

(Fuente "Design & Construction of Sanitary and Storm Sewer",
Manual N°37 de la ASCE)

<u>Descripción del área</u>	<u>Coeficiente de Escorrentía</u>
Comerciales Céntricas	0,70 - 0,95
Comerciales Suburbanas	0,50 - 0,70
<u>Residenciales:</u>	
Edificación unifamiliar	0,30 - 0,50
Unidades Múltiples separadas	0,40 - 0,60
Unidades Múltiples agregadas	0,60 - 0,75
Zona Residencial suburbana	0,25 - 0,40
Áreas de Edificios de Departamentos	0,50 - 0,70
<u>Industrial:</u>	
Áreas con poca densidad	0,50 - 0,80
Áreas con alta densidad	0,60 - 0,90
Parques y cementerios	0,10 - 0,25
Áreas de juegos y esparcimiento	0,20 - 0,35
Pacios de estaciones de FF.CC.	0,20 - 0,40
Áreas no urbanizadas ni habilitadas	0,10 - 0,30

En el caso de querer determinar un coeficiente de escorrentía compuesto, teniendo en cuenta los diferentes tipos de superficies que pueden presentarse en el área, se pueden utilizar los valores de la Tabla V.

T A B L A V I

Valores del Coeficiente de Escorrentía según el tipo de
Superficie

(Fuente "Design & Construction of Sanitary and Storm Sewer",
Manual N°37 de la ASCE)

<u>Tipo de Superficie</u>	<u>Coeficiente de Escorrentía</u>
<u>Calzadas:</u>	
Asfalto	0,70 - 0,95
Concreto	0,80 - 0,95
Ladrillo	0,70 - 0,85
Aceras y pasajes	0,75 - 0,85
Techos	0,75 - 0,95
<u>Prados en suelos arenosos:</u>	
Planos ($\leq 2\%$)	0,05 - 0,10
Medios (2% a 7%)	0,10 - 0,15
de gran pendiente ($> 7\%$)	0,15 - 0,20
<u>Prados en suelos arcillosos:</u>	
Planos ($< 2\%$)	0,13 - 0,17
Medios (2% a 7%)	0,18 - 0,22
de gran pendiente ($> 7\%$)	0,25 - 0,35

Para la determinación de coeficientes de escorrentía para la aplicación del método en cuencas agrícolas pequeñas (menos de 15 Km²) se pueden utilizar los valores medios de la Tabla VI.

T A B L A V I I

Coefficientes de Escorrentía en Cuencas Agrícolas Pequeñas

(Fuente: "Handbook of Applied Hydrology", Ven Te Chow).

Tipo de Suelo	Coeficiente de Escorrentía		
	Terrenos Cultivados	Praderas	Terrenos Boscosos
Suelos arenosos o con altas tasas de infiltración	0,20	0,15	0,10
Suelos francos o limosos con tasas de infiltración medias	0,40	0,35	0,30
Suelos arcillosos o con estratos endurecidos (panes) cercanos a la superficie, o suelos poco profundos sobre roca; suelos con tasas de infiltración bajas	0,50	0,45	0,40

Se han propuesto métodos para tener en cuenta las condiciones iniciales de la cuenca (estado de humedad de los suelos, etc.) y una modificación del coeficiente de escorrentía dentro de una lluvia, pero el tipo de información que se requiere (configuración espacial y temporal de la lluvia de diseño, zonificación de los tiempos de concentración dentro de la cuenca, características de la cuenca), no se dispone usualmente en la práctica y lo laborioso e incierto de los procedimientos no justifican en la práctica estos cambios que usualmente no son significativos.

3.2 Determinación de la intensidad de la lluvia:-

Como ya se indicó, el método de la "fórmula racional" presupone que el gasto máximo es producido por aquella intensidad de lluvia que se mantiene por lo menos durante un período igual al tiempo de concentración de la cuenca. Por lo tanto, al utilizar la curva intensidad - duración - frecuencia para el lugar, deberá elegirse una probabilidad de diseño y en la curva correspondiente se determinará la intensidad media máxima que corresponde a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. A continuación se explican los criterios que deben seguirse para elegir dicha probabilidad y el valor del tiempo de concentración.

3.2.1 Elección de la probabilidad de diseño:-

La probabilidad de diseño que se escoja determinará el grado de protección que se le exigirá al sistema de drenes de aguas lluvia, el que a su vez deberá ser compatible con la magnitud de los daños que se deseen prevenir. A este respecto, en proyectos de alcantarillados de aguas lluvia, no siempre se justifica entrar a estudios de beneficio - costo para determinar dicha probabilidad, sino que usualmente su elección se basa en criterios prácticos de acuerdo a una experiencia anterior, ya que no pueden existir normas rígidas al respecto.

En otros países las oficinas de ingeniería adoptan los siguientes criterios para la elección de probabilidades de diseño:

- Alcantarillados de aguas lluvia en zonas residenciales: 2 a 10 años de período de retorno, siendo 5 años el valor más usado.
- Para alcantarillado de aguas lluvia en zonas comerciales, industriales o de alto valor: 10 a 50 años de período de retorno, según justificación económica.
- Para obras de protección de crecidas: 50 años o más.

Debe reconocerse que el costo de los alcantarillados de aguas lluvia no es proporcional a la probabilidad de diseño. Por ejemplo sistemas diseñados para una probabilidad de 1 en 10 años cuestan entre 6% y 11% más que los sistemas diseñados para un período de retorno de 5 años.

3.2.2 Determinación del tiempo de concentración:-

Si la intensidad de la lluvia fuera permanentemente uniforme en el tiempo, el tiempo de concentración sería igual al tiempo de equilibrio, a partir del cual la tasa del gasto es igual a la intensidad de la lluvia. El tiempo de concentración es generalmente mayor que el tiempo de desfase del gasto máximo, pero para cuencas pequeñas con una red de drenaje superficial simple, ambos tiempos son aproximadamente iguales.

El tiempo de concentración dependerá de la topografía de la cuenca, de las características de la red de drenaje,

del tipo de superficies y su distribución dentro de la cuenca y de las condiciones iniciales de la cuenca.

En cuencas urbanas y en el diseño de redes de alcantarillado de aguas lluvia, el tiempo de concentración se compone del tiempo necesario para que las partículas más distantes (o el flujo superficial) se incorpore a un determinado sumidero o tiempo de entrada, y el tiempo que demora el agua dentro de un colector hasta llegar a un determinado punto de él en donde se está calculando el gasto de diseño, o tiempo de flujo.

El tiempo de entrada puede calcularse teóricamente en base a la hidráulica de la lámina de agua que escurre más o menos uniformemente sobre el terreno hasta incorporarse a un sumidero. Sin embargo, la naturaleza de este tipo de escurrimiento y el tipo y cantidad de variables que influyen, hacen que estos procedimientos sean engorrosos y poco seguros. En la práctica el tiempo de entrada puede estimarse en base a ábacos semiempíricos como el de la Fig. 4 o utilizando valores generales más o menos fijos que recomiende la experiencia previa.

A este respecto es común utilizar tiempos de entrada que varíen entre 5 y 30 minutos, siendo los más comunes entre 5 y 15 minutos. Ello dependerá de la densidad y tipo de edificación, de la distancia y distribución de sumideros y colectores, de la pendiente y de la probabilidad de la lluvia.

El tiempo de flujo se determina hidráulicamente (fórmula de Manning, por ejemplo) de las propiedades geométricas, topográficas e hidráulicas del colector considerado, suponiendo que éste escurre a máxima capacidad.

Debe dejarse en claro que la posición cronológica del intervalo que corresponde al tiempo de concentración, durante el cual se calcula la intensidad de diseño, está relacionada con la posición de la intensidad máxima, y no con el comienzo de la lluvia; para determinar dicha posición debe conocerse o suponerse la variación de la intensidad con el tiempo, para la lluvia de diseño considerada. Debe tenerse una clara conciencia de este hecho para evitar una aplicación errada del "método racional" y de algunas de sus variaciones.

Finalmente, en la aplicación del método racional en el dimensionamiento de alcantarillados de aguas lluvia, debe tenerse en cuenta que de acuerdo a la ubicación y distribución preliminar de la red de colectores que se desea dimensionar, y a la irregularidad de las subzonas que así se delimitarían en la cuenca, aquellas subáreas que tienen un tiempo de concentración corto (y por lo tanto les corresponderá una mayor intensidad de diseño), pueden ocasionar en un punto de diseño de un colector, un mayor gasto máximo que el que pueden aportar a ese punto la totalidad del área u otras subáreas que tengan una superficie mayor, pero que por tener un tiempo de concentración también mayor, la intensidad de diseño sea mucho más pequeña. Este hecho es muy importante, pues en los puntos de unión de dos o más colectores, habrá que considerar la combinación de subáreas que dé el gasto más desfavorable. Debe tenerse en cuenta además que en la aplicación del "método racional" no rige la ley de los nudos en los puntos de unión de varios colectores, ya que este procedimiento sólo da el valor del gasto máximo pero no el tiempo en que ocurre y éstos pueden ser diferentes según sea el colector que se considere en el nudo de diseño.

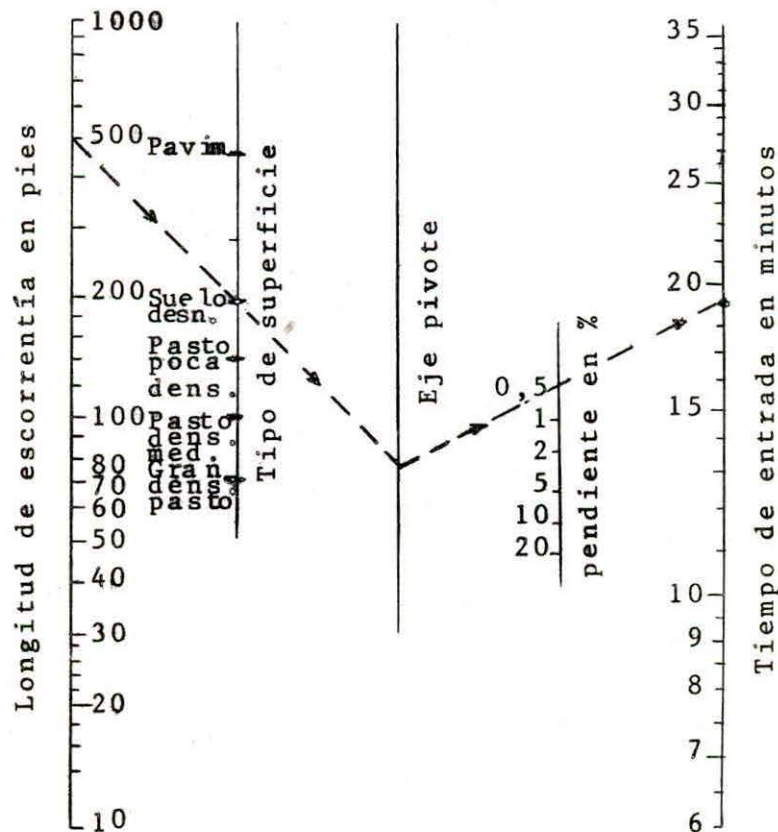


Figura 4

4.- Método de Izzard (1944 y 1946).-

C.F. Izzard desarrolló un método basado en estudios experimentales y en relaciones teóricas, que permite construir o sintetizar hidrogramas de flujo superficial sobre superficies planas y uniformes. El método es apto para el diseño de obras de drenaje superficial en aeropuertos, parques, carreteras y ciertas zonas urbanas.

Entendemos por flujo superficial, al escurrimiento superficial en forma aproximada de lámina que ocurre sobre una superficie más o menos plana y uniforme. Dicho flujo superficial, ocasionado por una determinada lluvia, se incorpora eventualmente a un cauce superficial de drenaje natural o artificial, desde donde a través de sumideros puede introducirse en colectores especiales que aseguren la protección contra inundaciones del sector considerado.

En base a las experiencias mencionadas, Izzard propuso una curva adimensional para la rama ascendente del hidrograma de flujo superficial, según se indica en la Fig.5 y en la Tabla VIII.

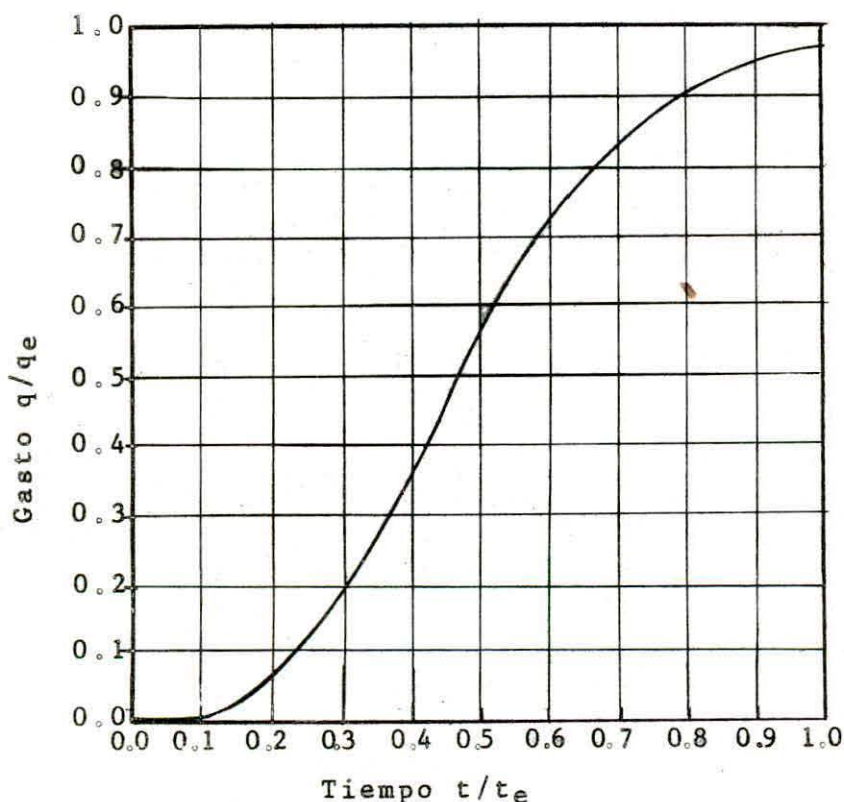


Fig. 5

T A B L A V I I I

t/t_e	q/q_e
0,0	0,000
0,1	0,020
0,2	0,055
0,3	0,180
0,4	0,370
0,5	0,550
0,6	0,715
0,7	0,825
0,8	0,900
0,9	0,950
1,0	0,970

En que:

- q = gasto por unidad de ancho del flujo superficial, en el instante "t" después de comenzada la lluvia efectiva.
- q_e = gasto por unidad de ancho del flujo superficial, en el estado de equilibrio, suponiendo que la lluvia tiene una duración indefinida.
- t_e = tiempo en el cual se produce la condición de equilibrio, es decir, se logra una tasa constante del gasto.

Experimentalmente se comprobó que:

$$q_e = \frac{iL}{3,60 \times 10^6} \quad [m^2/seg] \quad (1)$$

donde

- i = intensidad de la lluvia efectiva en mm/hora.
- L = longitud de la pendiente considerada (en mts) sobre la cual se genera la escorrentía superficial.

Se entiende por lluvia efectiva a aquella parte de la precipitación que da origen a la escorrentía superficial. Por lo tanto para determinarla habrá que descontar a la lluvia bruta medida, las pérdidas por infiltración, retención superficial, intercepción y evapotranspiración.

Al caer la lluvia sobre una superficie inclinada, en cuyo extremo inferior suponemos que estamos midiendo el gasto "q", existirá un cierto volumen de agua que temporalmente está almacenada en dicha pendiente como una lámina de agua "en camino" que eventualmente se convertirá en el gasto "q". Dicho volumen transitorio de agua en camino, se denomina volumen de detención superficial.

De acuerdo a las experiencias de Izzard, la relación entre el tiempo en el cual se producen las condiciones de equilibrio, el gasto de equilibrio y el volumen de detención de equilibrio (V_e) es la siguiente:

$$t_e = \frac{1}{30} \frac{V_e}{q_e} \quad \text{min} \quad (2)$$

Además se encontró que:

$$\frac{V}{V_e} = \left(\frac{q}{q_e}\right)^n \quad (3)$$

en que n tiene un valor medio de 1/3, pero varía de 0,20 para pavimentos suaves, a 0,40 para superficies cubiertas con pastos cortos.

Para determinar el valor del volumen de detención en equilibrio (V_e), debe suponerse una relación entre la altura de la lámina de agua (D_e) que escurre en equilibrio sobre la superficie y el correspondiente gasto de equilibrio. Dicha relación, para el caso de flujo laminar, es la siguiente:

$$D_e = \frac{V_e}{L} = k q_e^{1/3} \quad (4)$$

Como

$$q_e = \frac{iL}{3,6 \times 10^6}$$

$$V_e = 0,00653 k L^{4/3} e^{1/3} \quad (5)$$

en que experimentalmente se demostró que:

$$k = \frac{2,76 \times 10^{-5} i + c}{S}$$

donde

i = intensidad de la lluvia efectiva en mm/hora
S = pendiente del terreno en mts/mts para $S \leq 0,04$
c = parámetro que depende del tipo de superficie de acuerdo a la siguiente tabla.

T A B L A I X

Tipo de Superficie	C
Pavimentos asfálticos lisos	0,0070
Pavimentos con brea y arena	0,0075
Pavimentos de concreto normales	0,0120
Pavimentos con brea y grava	0,0170
Prados muy cortos	0,046
Prados y céspedes	0,060

Con los valores determinados según las relaciones anteriores se puede determinar el gasto por unidad de ancho para cualquier tiempo "t" después de comenzada la lluvia efectiva. Para ello basta conocer la intensidad de dicha lluvia, la longitud, pendiente y tipo de la superficie de la escorrentía, calcular los valores de tiempo, gasto y volumen de detención de equilibrio y multiplicando estos valores por las relaciones adimensionales, determinar la rama ascendente del hidrograma de escorrentía superficial. Esta rama ascendente ocurre mientras dura la lluvia efectiva. A continuación se analiza la determinación de la rama descendente o recesión del hidrograma, una vez que la lluvia efectiva ha cesado.

Una vez producido el cese de la lluvia efectiva, se ha observado que el gasto aumenta bruscamente en aproximadamente un 15% del gasto de equilibrio. Ello se debe a que durante la lluvia, el impacto de las gotas crean una resistencia adicional al flujo que hace aumentar la detención superficial para un cierto gasto; luego al cesar la lluvia, ese excedente de detención superficial produce un aumento del gasto.

Si llamamos V_0 el volumen de detención que corresponde al gasto de equilibrio q_e , cuando ha cesado la lluvia efectiva y t_a es el tiempo desde el comienzo de la recesión del hidrograma a un gasto $a = q/q_e$, se demostró empíricamente que:

$$t_a = \frac{V_0 f(a)}{60 q_e} \quad (7)$$

en que

$$f(a) = 0,5 (a^{-2/3} - 1) \quad (8)$$

El valor " V_0 " se calcula con la expresión (5) haciendo $i = 0$ en la expresión (6).

Para determinar la ubicación cronológica con respecto al comienzo del hidrograma, del comienzo de la recesión, debe tenerse en cuenta que el volumen de detención en exceso en el momento del cese de la lluvia es:

$$V_{exc} = V_e - V_0$$

este volumen en exceso se descarga a una tasa algo mayor que q_e . Luego haciendo referencia a la Fig. 6 se tiene que

$$Z = \frac{V_e - V_0}{q_e} \quad (9)$$

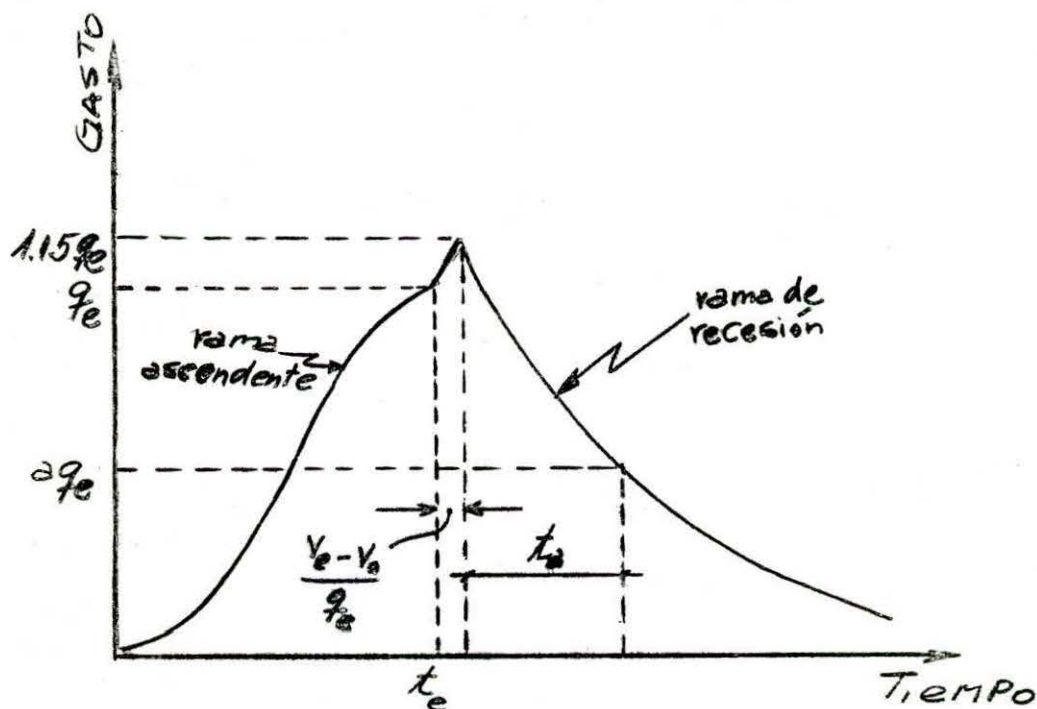


Fig. 6

En resumen, para calcular la parte del hidrograma que ocurre una vez terminada la lluvia efectiva, debe calcularse el tiempo $\bar{t}$ (ver Fig. 6) y el gasto "peak", $1,15 q_e$. Luego para la recesión propiamente tal, se eligen diferentes valores de " t_a " que al dividirlos por el valor V_0/q_e , permiten calcular $f(a)$ (expresión 7) y eventualmente " a " por medio de la expresión (8). Como " a " es el gasto de recesión dividido por el gasto de equilibrio, bastará multiplicar a por q_e para obtener el gasto de recesión que corresponde al tiempo " t_a ".

Con el método de Izzard, recién descrito, se pueden reconstituir (o sintetizar) hidrogramas de flujo superficial para una lluvia efectiva simple y/o compleja, haciendo uso del principio de superposición.

El método es válido sólo si se cumple que

$$ixL \leq 3.750$$

ALGUNOS ASPECTOS DE HIDROLOGIA DE ZONAS URBANAS

BIBLIOGRAFIA SELECCIONADA

(Preparada por Prof. Basilio Espíldora)

A.- TEXTOS

- 1.- "Handbook of Applied Hydrology". Ven Te Chow, Editor.
Mc Graw-Hill Co. 1964.
- 2.- "L'Hydrologie de l'ingenieur". G. Remenieras. Ed.
Eyrolles, Paris, 1965.
- 3.- "Applied Hydrology". R.K. Linsley, M.A. Kohler, y
J.L. Paulhus. Ed. Mc Graw-Hill Co., 1949
- 4.- "Hydrology for Engineers". Linsley, Kohler y
Paulhus. Mc Graw-Hill Co., 1959.
- 5.- "Hydrology". C.O. Wisler y E.F. Brater.
Ed. Wiley, 1963.
- 6.- "Les réseaux d'égouts - Données d'Etablissement et
de calcul". P. Koch. Ed. Dunod, Paris (1954).

B.- ARTICULOS Y PUBLICACIONES VARIAS.

- 1.- "Formulas for Rainfall intensities of long duration".
M. Bernard. Transaction of the American Society of
Civil Engineers (Trans. ASCE), Vol. 96 pp.592-624
(1932).
- 2.- "Military airfields - a Symposium: Design of drainage
facilities". G.A. Hathaway Trans. ASCE Vol. 110 pp.
697-733 (1945).
- 3.- "Frequency analysis of hydrologic data with special
application to Rainfall intensities. V.T. Chow.
Univ. of Illinois. Engineering Experimental Station.
Bulletin Series 414, July, 1953.
- 4.- "Hydrologic determination of waterways areas for the
design of structures in small drainage basins". V.T.
Choe. Univ. Illinois Eng. Exp. Sta. Bull. 462 (1962).

- 5.- "The relation between rainfall and the discharge of sewers in populous districts". E. Kuichling. Trans. ASCE, vol. 20 pp. 1-50, 1889.
- 6.- "Design and construction of sanitary and storm sewers". ASCE Manual of Engineering Practice, N°37 and WPCF Manual Practice N°9, 1960.
- 7.- "On the hydrology of culverts". D.B. Krimgold. Proc. 26th Annual Meeting Highway Research Board, Vol. 26 pp. 214-226 (1946).
- 8.- "A Method of computing urban runoff". W.I. Hicks. Trans. ASCE. Vol. 109 pp. 1217-1253 (1944).
- 9.- "The hydrology of urban runoff". A.L. Tholin y C.I. Keifer. Trans. ASCE. Vol. 125, pp.1308-1379 (1960).
- 10.- "Hydraulics of runoff from developed surfaces". C.F. Izzard. Proc. 26th Annual Meeting of the Highway Research Board. Vol. 26. pp. 129-146 (1946).
- 11.- "Runoff - rational runoff formules". R.L. Gregory y C.E. Arnols. Trans. ASCE. Vol. 96, pp.1038-1099 (1932).
- 12.- "Relation between rainfall and runoff from small urban areas". W.W. Horner y F.L. Flynt. Trans. ASCE. vol. 101, pp.140-183 (1936).
- 13.- "The distribution of intense rainfall and some other factors in the design of storm-water drains". F.A. Marston. Trans. ASCE. Vol 87, pp.535-562 (1924).
- 14.- "Surface runoff determination without using coefficients". W.W. Horner y S.W. Jens. Trans. ASCE Vol.107, pp. 1097-1102 (1942).
- 15.- "Synthetic storm patter for drainage design". C.J. Keifer y H.H. Chu. Proc. ASCE Journal Hydraulics Division. Vol.83 N°HY4 (1957).
- 16.- Publicaciones referentes al Storm Drainage Project of the Johns Hopkins University, Department of Sanitary Engineering and Water Resources.

- 17.- "Surface water drainage research, Progress Report to April, 1959". L.H. Watkins. Dept. of Science Industry Research, Road Research Laboratory. Research Note RN/3515/LHW. London June 1959. También: "The design of urban sewer system, Road Res. Technical Paper 55, London 1962.
- 18.- "Surface and Subsurface drainage facilities for air-fields". pt.13 chapters 1 y 2 in Engineering Manual. U.S. Army Corps of Engineers, June 1955.
- 19.- "Time of concentration for overland flow" W.S. Kerby. Civil Engineering, Vol.29, p.60. March 1959.
- 20.- "Storm water control for a shopping center". E. Forest, Civil Engineering, Vol. 30, p.63, February 1960.
- 21.- "Economics of urban drainage design". W.J. Baner. Proc. ASCE. Journal Hydraulics Division, Vol. 88 N°HY6, pp. 93-114, Nov. 1962.
- 22.- "Storm Sewer design by the inlet method". A.B. Kaltenbach. Publick Works vol. 94, N°1, Jan. 1963.
- 23.- "Unit Hydrographs for sewered areas". P.S. Eagleson. Proc. ASCE. J. Hydraulics Div., Vol.88, N°HY2, March 1962. Discussion: July N°HY4; Sept. HY5; Nov. HY6 en 1962 y vol. 95 N°HY4 July 1963.
- 24.- "Characteristics of the inlet Hydrograph". W. Viessman y J.C. Geyer. Proc. ASCE J. Hydraulics Div. Vol.88 N°HY5 Sept. 1962. Discussions: vol. 89 N°HY2 March 1963 y N°HY4 July 1963.
- 25.- "The prediction of runoff hydrographs for urban watersheds from precipitation data and watershed characteristics". G.E. Willeke. Journal of Geophysical Research, vol. 67 N°9, August 1962.
- 26.- "Etude des averses orageuses de la region parisienne, envisagées du point de vue de leur évacuation par les ouvrages d'assainissement". F. Grisolle. La Météorologie, Juillet, Sept. 1948, p. 175-195.

- 27.- "La violence des orages dans ses relations avec le débit égouts urbains". P. Koch Horville Clanche, Numéro spécial B/1950, p. 679-682.

C.- FUENTES DE INFORMACION EN CHILE

- 1.- Division Hidrología de ENDESA.
- 2.- División de Hidrometría de la Dirección de Riego, M.O.P.
- 3.- Dirección de Obras Sanitarias, M.O.P.
- 4.- Oficina Meteorológica de Chile.



U 1289

C. 1
U. 1

Marcel González S.

- 1 -

GENERALIDADES SOBRE LA IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA HIDROLOGIA*

1.- Importancia de la Hidrología.-

El agua es uno de los recursos naturales más preciados por el hombre. Su multiplicidad de usos y la diversidad de actividades y problemas en que interviene, la convierten en un elemento vital para la existencia de vida en la Tierra y para asegurar el desarrollo social y económico de los pueblos.

El incremento de la población y las modalidades de la vida moderna, han provocado en las últimas décadas una fuerte demanda de recursos hidrológicos. Esta demanda ha ido incrementando a tasas crecientes y se estima que en 1985 el consumo de agua en el mundo se habrá duplicado.

Se ha desencadenado entre diversos sectores productivos una intensa competencia en la distribución espacial y temporal del agua, para asegurar un adecuado suministro para sus respectivos usos. Ello ha llevado a la necesidad de desarrollar programas y proyectos regionales para el control y aprovechamiento integral de los recursos de agua; ejemplo de ello es la programación y ejecución de proyectos hidráulicos de aprovechamiento y uso múltiple y el planeamiento y operación de grandes sistemas hidráulicos interconectados a nivel de cuenca hidrográfica.

Por otro lado, la expansión urbana en todos los países del mundo, los grandes problemas de drenaje en regiones agrícolas intensamente explotadas y la construcción de grandes embalses aguas arriba de concentraciones industriales o urbanas, ha llevado a buscar nuevas soluciones y criterios de diseño para el control y evacuación de crecidas.

La intensificación en el aprovechamiento de las fuentes naturales, el reuso del agua y la competencia por su distribución espacial y temporal, ha provocado serios problemas de contaminación y calidad que se manifiestan más claramente en la utilización industrial y urbana de los recursos hidráulicos

* Clases dictadas por el Prof. Ing. Sr. Basilio Espíldora C.



U 1289

C. 1
U. 1

Marcel González S.

- 1 -

GENERALIDADES SOBRE LA IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA HIDROLOGIA*

1.- Importancia de la Hidrología.-

El agua es uno de los recursos naturales más preciados por el hombre. Su multiplicidad de usos y la diversidad de actividades y problemas en que interviene, la convierten en un elemento vital para la existencia de vida en la Tierra y para asegurar el desarrollo social y económico de los pueblos.

El incremento de la población y las modalidades de la vida moderna, han provocado en las últimas décadas una fuerte demanda de recursos hidrológicos. Esta demanda ha ido incrementando a tasas crecientes y se estima que en 1985 el consumo de agua en el mundo se habrá duplicado.

Se ha desencadenado entre diversos sectores productivos una intensa competencia en la distribución espacial y temporal del agua, para asegurar un adecuado suministro para sus respectivos usos. Ello ha llevado a la necesidad de desarrollar programas y proyectos regionales para el control y aprovechamiento integral de los recursos de agua; ejemplo de ello es la programación y ejecución de proyectos hidráulicos de aprovechamiento y uso múltiple y el planeamiento y operación de grandes sistemas hidráulicos interconectados a nivel de cuenca hidrográfica.

Por otro lado, la expansión urbana en todos los países del mundo, los grandes problemas de drenaje en regiones agrícolas intensamente explotadas y la construcción de grandes embalses aguas arriba de concentraciones industriales o urbanas, ha llevado a buscar nuevas soluciones y criterios de diseño para el control y evacuación de crecidas.

La intensificación en el aprovechamiento de las fuentes naturales, el reuso del agua y la competencia por su distribución espacial y temporal, ha provocado serios problemas de contaminación y calidad que se manifiestan más claramente en la utilización industrial y urbana de los recursos hidráulicos

* Clases dictadas por el Prof. Ing. Sr. Basilio Espíldora C.

El agua, por lo tanto, se ha convertido hoy en día en un recurso, que aunque renovable, debe satisfacer una importante y creciente demanda en cantidad y calidad, proveniente de una variedad de actividades altamente competitivas y en las que se requiere asegurar también, y con cierta probabilidad, la eliminación parcial o total de los efectos nocivos o catastróficos provocados por los excesos de agua. El importante valor socio-económico del agua implica la necesidad de un desarrollo y control óptimo y acelerado de los recursos hídricos, para poder hacer frente a los urgentes problemas recién mencionados.

La Hidrología participa en la solución de estos problemas por medio de la búsqueda del desarrollo de nuevos y mejores conocimientos sobre la distribución, existencia y comportamiento del agua en la Tierra, permitiendo de esta manera evaluar y utilizar más eficientemente los recursos hidrológicos y al mismo tiempo interviniendo en el diseño óptimo y seguro de las obras hidráulicas necesarias para un aprovechamiento del agua de acorde a las necesidades actuales y futuras.

En los últimos años ha habido un importante incremento de los conocimientos científicos y tecnológicos relacionados con el agua, convirtiéndose la Hidrología en una ciencia altamente interdisciplinaria. Este hecho hace relativamente difícil su enseñanza, haciendo cada vez más urgente la necesidad de compendiar e interrelacionar sus múltiples aspectos.

Para puntualizar la importancia que se da hoy día a la Hidrología, parece necesario mencionar la iniciación en 1965 del Decenio Hidrológico Internacional (DHI). El DHI es un programa internacional patrocinado por la UNESCO y otros organismos de las Naciones Unidas, cuyo propósito es promover y coordinar programas a largo plazo de cooperación e intercambio internacional, con el objeto de desarrollar nuevos conocimientos científicos en el campo de la Hidrología, que permitan elaborar tecnologías nuevas para hacer frente a la demanda actual y futura de recursos hidrológicos.

Nuestro país no ha estado ajeno a estas tendencias y necesidades y está participando activamente en el DHI a través de un Comité Chileno en el que están representadas diversas instituciones relacionadas a la hidrología nacional y al aprovechamiento de los recursos hídricos. Es así que estos organismos han elaborado un Programa especial para ser desarro-

llado durante el Decenio (1965-1974) y que está orientado a la investigación hidrológica pura y aplicada y al desarrollo de instalaciones y nuevas técnicas que permitan un mejor conocimiento de nuestros recursos hídricos y posibiliten su óptima utilización; nuestras necesidades de desarrollo urbano, agrícola e industrial así lo requiere.

2.- Definiciones y alcances de la Hidrología.-

Etimológicamente la Hidrología es la ciencia que tiene relación con el agua. Es considerada, por la Asociación Internacional de Hidrología Científica, como una Ciencia de la Tierra y parte de la Geografía Física, por cuanto trata principalmente con el agua en la corteza terrestre. Diversos autores e investigadores han propuesto diferentes definiciones de la Hidrología. Algunas de ellas se incluyen a continuación con el propósito de proporcionar un concepto moderno general sobre los objetivos, procedimientos y aplicaciones de esta ciencia.

Mead, en 1904, consideraba a la Hidrología como "la ciencia del agua que constituye la base de todos los problemas de ingeniería hidráulica". En 1931, el célebre hidrólogo norteamericano Robert E. Horton, amplió esta definición cuando declaró que: "como una ciencia pura, la Hidrología trata de la existencia, distribución y circulación del agua dentro y sobre las capas superficiales de la corteza terrestre".

El diccionario Merriam-Webster en su edición de 1961, incluye la siguiente definición: "Hidrología es la ciencia que trata de las propiedades, distribución, existencia y circulación del agua; específicamente, el estudio del agua en la superficie de la tierra, en el suelo, estratos rocosos y en la atmósfera, particularmente en relación con los procesos de evaporación y precipitación.

En 1962 el Consejo Federal para la Ciencia y la Tecnología de EE.UU. ha proporcionado una definición general y moderna de la Hidrología: "La Hidrología es la ciencia que trata de las aguas de la Tierra, su existencia, circulación y distribución, sus propiedades físicas, químicas y sus reacciones con el medio ambiente, incluyendo su relación con los organismos vivos".

Las definiciones anteriores permiten visualizar las múltiples interrelaciones de la Hidrología con otras ciencias que le son afines. Por ejemplo, entre las ciencias de la Tierra cabe mencionar las interrelaciones con la Meteorología, Climatología, Geografía Física, Geología, Geomorfología, Oceanografía, Limnología, Criología, Potamología, etc. Además debe mencionarse las interrelaciones de la Hidrología con otras disciplinas como la Agronomía, la Mecánica y la Física de Suelos, la Hidráulica y la Mecánica de Fluidos, la Estadística Matemática, el Análisis Matemático, el Análisis de Sistemas y la Ingeniería. En todo caso los métodos y procedimientos de la Hidrología le son propios y en general sólo aplicables a sus fines y objetivos.

Sin embargo no debe considerarse a la Hidrología como una ciencia pura solamente. En efecto, la principal aplicación de la Hidrología es a la Ingeniería en general y a la Ingeniería Hidráulica en particular.

Los análisis y estudios hidrológicos relacionados, por ejemplo con: los caudales medios disponibles (diarios, mensuales, anuales), la magnitud y distribución en el tiempo y el espacio de las crecidas, la previsión de caudales a corto y mediano plazo, la estimación y métodos de control de la evaporación y la evapotranspiración, la determinación de caudales subterráneos y la identificación de zonas de recarga de agua subterránea y su respectiva magnitud, etc., le permiten al ingeniero elaborar el diseño y dimensionamiento de obras hidráulicas (o de obras civiles afectadas por el agua como caminos, puentes, puertos, algunos edificios, etc.), establecer sus condiciones de construcción, operación y explotación y conocer y elegir la seguridad (hidrológica) del proyecto.

La Hidrología permite contestar también los siguientes tipos de pregunta: ¿Cuáles son los recursos hídricos de una hoya hidrográfica o región; son ellos adecuados en cuanto a su distribución espacial, temporal y grado de probabilidad de ocurrencia, para permitir el desarrollo agrícola, urbano e industrial de la zona? ¿Cuáles son los factores y caracterís-

ticas hidrológicas de una región que determinan y posibilitan la evaluación económica, el diseño, construcción, operación y mantención de obras de aprovechamiento, control y evacuación de los recursos de agua de la zona? ¿Cuáles son los efectos físicos, económicos, legales y de calidad de ciertos cambios en el uso de la tierra (re o deforestación, obras de riego y drenaje, urbanización, explotación intensiva de acuíferos) y sus efectos en la circulación y disponibilidades de agua en la región considerada? ¿Qué tipo de obras hidráulicas y qué características deben tener, para aprovechar los recursos de aguas económicamente disponibles y para satisfacer demandas competitivas en el tiempo y en el espacio y en cantidad y calidad?

3.- El Ciclo Hidrológico.-

La Hidrología estudia y evalúa científicamente cada una de las partes y las interrelaciones de los distintos procesos que componen el ciclo hidrológico.

Con el objeto de visualizar la forma en que el hidrólogo debe proceder para establecer relaciones cuantitativas que le permitan reproducir estadísticas hidrológicas o efectuar evaluaciones y predicciones de variables hidrológicas tales como precipitación, caudales de un río, niveles de agua subterránea, evaporación, etc., se incluye en este capítulo una revisión general y completa del llamado ciclo hidrológico, pero sin entrar en los detalles mismos de los fenómenos componentes, sino más bien en su naturaleza e interrelaciones.

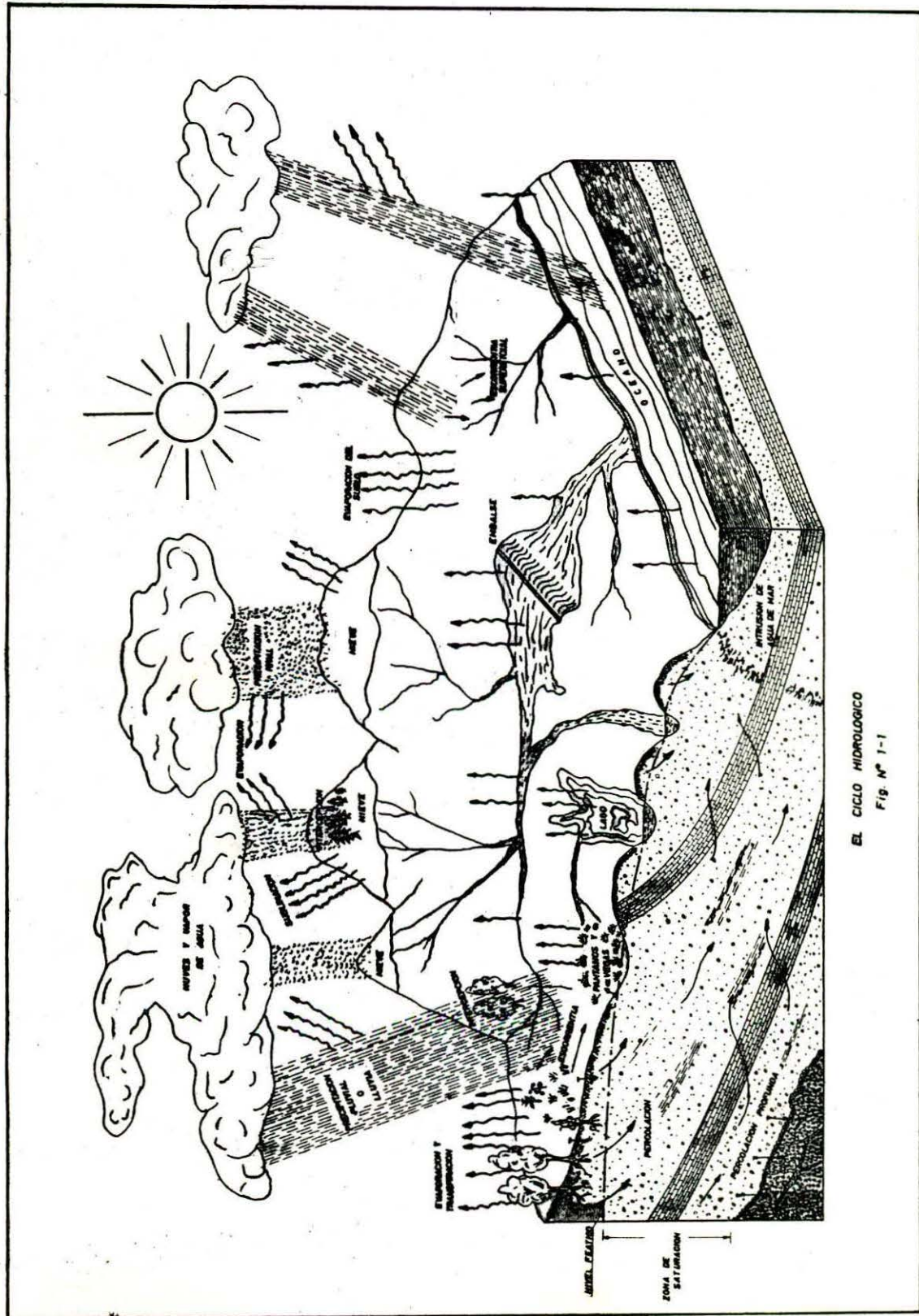
El ciclo hidrológico es un término más bien académico, pero útil, que corresponde a un modelo o idealización del movimiento, distribución y circulación general del agua en la Tierra. De acuerdo a este concepto, el ciclo hidrológico abarca no solamente el movimiento y distribución del agua dentro de las masas continentales (escorrentía, infiltración, percolación, etc.), sino también el movimiento y circulación desde la hidrósfera a la atmósfera (evaporación), desde la atmósfera a la litósfera (precipitación) y desde esta última nuevamente a la hidrósfera y la atmósfera (escorrentía, evaporación, transpiración).

Desde un punto de vista global, el ciclo hidrológico es un proceso continuo, pero que contiene elementos de azar y variaciones no continuas o discretas al considerar extensiones

o territorios más reducidos. Por ejemplo, en el caso de una cuenca hidrográfica, la precipitación no puede ser considerada como un proceso continuo sino discreto en el tiempo. Sin embargo subsisten procesos continuos, como la evaporación y evapotranspiración, que ocurren en todo momento pero con cambios graduales de sus tasas de acuerdo a las variaciones de la energía solar. En resumen, lo que constituye una función o proceso continuo desde el punto de vista global, posee una distribución discreta desde el punto de vista local. Este hecho es importante porque al mismo tiempo que hace diferente el estudio hidrológico desde el punto de vista local, lo facilita desde el punto de vista del análisis estadístico.

Con el objeto de relacionar la definición general del ciclo hidrológico a una cuantificación de sus elementos, es preciso efectuar una serie de idealizaciones, que a su vez permiten comprender la génesis y la metodología que debe seguir el hidrólogo para resolver los problemas aplicando ciertos procedimientos.

En primer lugar, se hace referencia a la Fig. 1.1 que describe en forma pictórica e idealizada los diferentes procesos contenidos en el ciclo hidrológico. Esta primera idealización indica cómo el vapor de agua almacenado en la atmósfera puede condensarse e incorporarse a la superficie de la Tierra a través del proceso de precipitación pluvial o nival. Esta precipitación cae sobre los océanos, ríos, lagos, vegetación, montañas y superficie del suelo. Parte de la precipitación que cae sobre la superficie del suelo puede escurrir superficialmente hasta incorporarse a los ríos y lagos y de allí eventualmente llegar al mar, o bien quedar almacenada en las depresiones superficiales del terreno. Otra parte de la precipitación se infiltra pudiendo quedar retenida en la zona de raíces de las plantas o bien percolar más profundamente para incorporarse a las napas subterráneas o bien escurrir a través de grietas en los estratos profundos de rocas. Esta agua infiltrada puede también escurrir e incorporarse a lagos y ríos hasta llegar directa o indirectamente al mar. Finalmente se observan los procesos de evaporación desde las superficies de agua libre (lagos, ríos, océanos), la evaporación del agua almacenada por el follaje de las plantas (intercepción), la sublimación de la nieve y la transpiración de las plantas proveniente de parte del agua absorbida por sus sistemas radiculares. Debido a estos últimos procesos, el vapor de agua que se genera, se incorpora a la atmósfera y de esta manera el ciclo se cierra. Nótese también en el diagrama, los procesos de evaporación de la precipitación antes de que ésta alcance la superficie de la Tierra, y la interconexión entre los escurrimientos superficiales y subterráneos.



EL CICLO HIDROLÓGICO
Fig. N° 1-1

Esta imagen gráfica del ciclo hidrológico permite efectuar en forma limitada una especie de inventario de los fenómenos que ocurren, con el objeto de poder identificar cada uno de los elementos o fenómenos que estudia la Hidrología Física. En esta primera idealización no es fácil puntualizar la forma del ciclo ni las relaciones entre cada uno de los elementos componentes. Además, no toda el agua precipitada sigue todos los caminos descritos, ya que existen una serie de corto-circuitos para llevar por vías más directas al mar y/o a la atmósfera. La variable tiempo introduce también algunas complicaciones como es el caso de la precipitación nival que permanece algún tiempo acumulada antes de continuar con un ciclo más directo. Finalmente, el esquema de la Fig.1.1 no permite considerar procesos más complejos como crecidas o períodos húmedos y sequías o períodos secos.

Para lograr gran parte de estos objetivos y levantar alguna de estas limitaciones, se puede recurrir a otras etapas de idealización, en que se abandona la forma pictórica. No es el objeto de estos apuntes entrar a describir y explicar estas relaciones. Baste decir que ellas se basan en diagramas de flujo del ciclo hidrológico en que se distinguen elementos de embalse y translación de aguas y que permiten establecer relaciones conceptuales entre sus diferentes componentes y poder así resolver determinados problemas aplicando los procedimientos de análisis y síntesis hidrológica.

DETERMINACION DE GASTOS MAXIMOS PARA EL DISEÑO DE ALCANTARILLADOS
DE AGUAS LLUVIA EN CUENCAS URBANAS (*)

1.- Introducción:-

El ingeniero abocado al problema de diseñar una red de alcantarillado de aguas lluvia en una cuenca urbana, debe disponer de los antecedentes necesarios que le permitan determinar el gasto de diseño que la red debe ser capaz de evacuar.

En cuencas urbanas no se dispone comúnmente de estadísticas o registros de caudales que permitan elegir directamente el gasto de diseño a utilizar y su correspondiente probabilidad de ocurrencia. Por este motivo debe recurrirse a procedimientos indirectos para su determinación. Dichos procedimientos suelen ser métodos empíricos o semiempíricos, y comúnmente se basan en la determinación de lluvias de diseño, por ser la precipitación el origen o variable independiente del régimen de gastos en la cuenca.

La mejor manera de determinar y caracterizar una lluvia de diseño, que permita posteriormente estimar el gasto máximo de la crecida a que da origen, es mediante las llamadas curvas de intensidad - duración - frecuencia.

A continuación se explican los procedimientos para obtener las curvas de intensidad-duración-frecuencia y su uso en la determinación de gastos de diseño, y otros procedimientos para estimar los gastos de diseño. Se incluye además una bibliografía relativa a estos temas

2.- Curvas de intensidad - duración - frecuencia (IDF):-

2.1 Generalidades.-

Las curvas IDF son una relación gráfica (o analítica) entre la intensidad media de la lluvia en mm/hora y su duración en minutos, para diversas probabilidades de ocurrencia o excedencia que se mide en años o %. Gráficamente la relación se expresa como lo indica la Fig. 1.

(*) Clases dictadas por el Prof. Ing. Basilio Espíldora C.

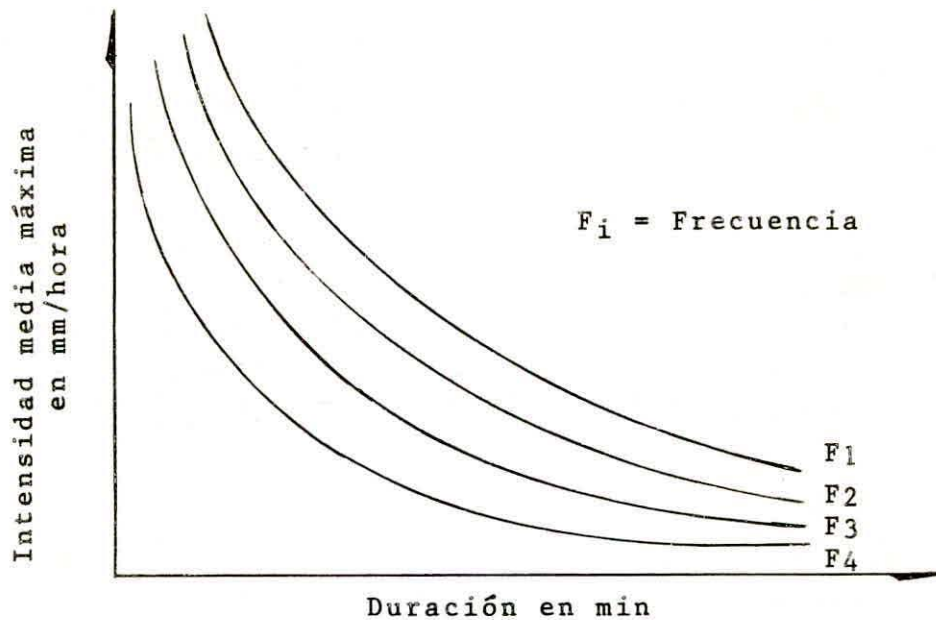


Figura 1

Es decir, se tendrá una probabilidad F_2 de que en un intervalo de tiempo de D_1 minutos (Duración), ocurra una intensidad media igual o superior a I_1 mm/hora.

Para determinar las curvas IDF debe disponerse de datos de precipitación registrados por un pluviógrafo(*) durante un tiempo razonablemente largo.

Con el objeto de explicar el procedimiento para obtener las curvas IDF en base a los datos de cierta estación pluviográfica, es conveniente tratar primero separadamente cada uno de los elementos de dicha relación, es decir, lo relativo al cálculo de frecuencias o probabilidades de excedencia y luego lo correspondiente a la relación entre la intensidad de una lluvia y su duración.

2.2 Frecuencia de las lluvias:-

En estudios hidrológicos, es muchas veces necesario estimar la frecuencia con que se produce cierta magnitud de un evento hidrológico. Es decir, interesa conocer, por ejemplo, la mayor lluvia que puede ocurrir con cierta frecuencia (o probabilidad), o con qué frecuencia podría producirse una lluvia de cierta intensidad(**).

(*) Un pluviógrafo es un instrumento que registra la cantidad de agua caída (en mm) versus el tiempo. En un pluviógrafo de registro semanal se puede discriminar fácilmente hasta los 30 min.

(**) Análogamente podrá hacerse el análisis para los gastos máximos y mínimos de un determinado río, o con cualquiera otra variable hidrológica.

El intervalo promedio de tiempo dentro del cual la magnitud "x" de un evento hidrológico, se iguala o se excede, se designa con el nombre de intervalo de recurrencia, período de retorno o simplemente frecuencia. Es decir si nos referimos a la precipitación como evento hidrológico, el período de retorno o frecuencia es el número de años durante los cuales, en promedio, una lluvia de cierta magnitud sucederá por lo menos una sola vez. Por ejemplo, una lluvia de 1 hora de duración y 10 años de frecuencia tiene tal magnitud que puede esperarse que en promedio se iguale o se exceda 10 veces en 100 años. Lógicamente es posible que esa lluvia ocurra dos o más veces dentro de cualquier período de 10 años, e incluso dos o más de estos chubascos pueden producirse dentro de un mismo año. El período de retorno, entonces, daría más bien una idea de la magnitud del evento, que de su probabilidad real de periodicidad o recurrencia.

Se ve claramente que si un evento hidrológico, de magnitud igual o mayor que "x", ocurre en promedio una vez en T años (período de retorno), su probabilidad de excedencia, P, es igual a

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T}$$

y además

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} = \frac{1}{1 - P(X \leq x)}$$

en que $P(X \leq x)$ es la probabilidad que ocurra un evento de magnitud menor o igual a "x".

Para estimar el período de retorno de un evento hidrológico de cierta magnitud, a partir de datos observados, se han propuesto una serie de fórmulas, muchas de ellas empíricas y otras determinadas por métodos analíticos. Como ilustración, algunas de las más usadas se incluyen en la Tabla I.

T A B L A I

NOMBRE	FECHA	FORMULA
California	1923	$\frac{N}{m}$
A. Hazen	1930	$\frac{2N}{2m-1}$
Weibull	1939	$\frac{N+1}{m}$
Chegodayev	1955	$\frac{N+0.4}{m-0.3}$
Blom	1958	$\frac{N+1/4}{m-3/8}$
Gringorten	1963	$\frac{N+0.12}{m-0.44}$

En que m = número de orden de la magnitud considerada, cuando los datos se ordenan de mayor a menor.

N = número de años observados, o número de observaciones.

Por ejemplo, para determinar los períodos de retorno de las intensidades de lluvia, de cierta duración, se ordenan los valores observados en orden descendente y a cada valor se le asigna un número de orden (número uno al mayor, etc.). El período de retorno que corresponde a cierta intensidad de lluvia se calculará entonces por cualquiera de las fórmulas indicadas en la Tabla I. Todas estas fórmulas dan valores muy similares para períodos de retorno o frecuencias intermedias, pero difieren para valores extremos (frecuencias muy altas o muy bajas). Usualmente se utiliza la fórmula de Weibull o la de Allen Hazen.

Las fórmulas para determinar períodos de retorno, permiten representar gráficamente la relación entre la magnitud de un evento y su correspondiente frecuencia. Si tal relación se representa en un sistema de coordenadas con ejes aritméticos, la curva tendrá la forma que indica la Fig. 2.

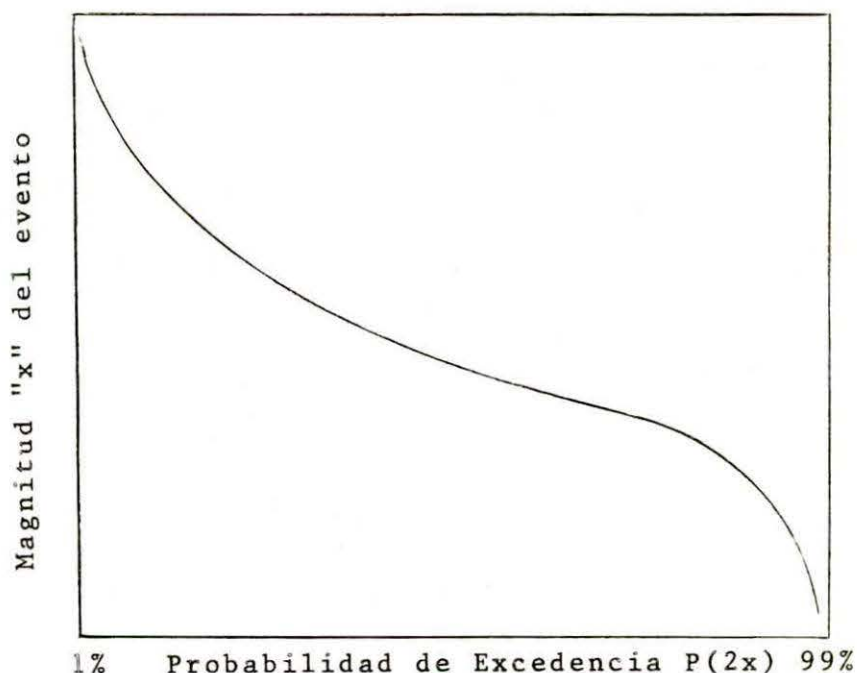


Figura 2

Es necesario recordar que la curva indicada en la figura representa lo que en estadística se conoce con el nombre de curva de frecuencia acumulada y que corresponde a la curva integral de la curva de distribución de frecuencias de la serie de datos estadísticos.

La "curva de frecuencia acumulada", que corresponde a la relación entre el período de retorno (o su recíproco, la probabilidad) y la magnitud del evento considerado (intensidad de lluvias, lluvia anual, gastos máximos, etc.), se representa usualmente en un sistema de ejes coordenados ortogonales llamado "papel de probabilidades", y que se diseña de acuerdo al tipo de distribución de frecuencia que se supone para la estadística hidrológica considerada. En este gráfico, el eje de probabilidades, está diseñado de tal manera que la relación T vs x (o P vs x) aparezca como una línea recta, facilitándose de esta manera la interpolación y la extrapolación de datos. Existen una diversidad de "papel de probabilidades", según el tipo de distribución de frecuencias que se considere. El más usado en Chile es el basado en la teoría de Allen Hazen en que se supone una distribución normal gaussiana. En caso que la distribución de valores no sea gaussiana, se puede demostrar que si el valor normal de la estadística queda mejor representado por el medio geométrico (y no por el medio aritmético), los loga-

ritmos de los valores tienen una distribución normal y por lo tanto es aplicable la teoría de Allen Hazen y su papel de probabilidades. En este caso la relación T vs x (o P vs x) sería una recta en un "papel logarítmico-probabilidad" (el eje de las ordenadas tiene una graduación logarítmica).

Sin embargo, si se está efectuando un estudio de frecuencias de lluvias (o gastos) máximas, la distribución estadística que corresponde al conjunto de valores constituye una serie de valores extremos que tiene una distribución especial que no es logarítmica normal. En este caso correspondería utilizar, por ejemplo, el papel Gumbel de probabilidades.

2.3 La intensidad de la lluvia. Relación Intensidad - Duración:-

La intensidad de la lluvia, usualmente expresada en mm/hora, es un elemento esencial para el ingeniero hidráulico que no cuenta con datos directos de gasto para dimensionar sus obras.

Cuando sólo se dispone de un pluviómetro en una estación, es evidente que en general sólo se podrá conocer la intensidad media en 24 horas. Como se comprenderá, esta información puede inducir a grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son en general las más intensas.

Es natural entonces que las determinaciones de intensidad de lluvia se hagan a partir de los registros proporcionados por pluviógrafos. A no ser que se cuente con un pluviógrafo de velocidad, que registra directamente la intensidad instantánea de la lluvia, los pluviógrafos registran la altura de agua acumulada y por lo tanto la pendiente a la curva que proporciona el registro del pluviógrafo o pluviograma, corresponde a la intensidad de la lluvia en el instante considerado.

Si la intensidad de la lluvia se expresa por medio de la relación:

$$i = \frac{\Delta P}{\Delta t} \text{ mm/hora}$$

donde ΔP es la precipitación en mm caída en un intervalo Δt considerado; se ve claramente que mientras menor sea este intervalo de referencia, mayor tiende a ser la intensidad correspondiente.

En el pluviograma de una lluvia determinada, se pueden distinguir teóricamente infinitos intervalos de una duración Δt cualquiera. Durante y para cada uno de estos intervalos o duraciones, se puede determinar la intensidad media de la precipitación. Existirá uno de estos intervalos de igual duración en que la intensidad de la lluvia es máxima y es evidente que este valor será el de mayor interés desde el punto de vista de los gastos máximos que eventualmente se producen. Por lo tanto, la relación intensidad - duración que interesa, deberá referirse a la intensidad media máxima que corresponde a cada intervalo elegido. (La calificación de "media máxima" se refiere a que la intensidad es media en el intervalo y, a su vez, es máxima en la duración total de la lluvia considerada).

Por ejemplo, si se elige un intervalo de duración 5 minutos, para determinar la intensidad media máxima para esta duración ($I_{5\text{m}\text{áx}}$), debe buscarse en el pluviograma de la lluvia que se está analizando, el mayor incremento de precipitación (en mm) que cayó en 5 minutos cualquiera dentro de la duración total de la lluvia. Esta altura de agua se divide por 5 min y se multiplica por 60 para convertir el valor a mm/hora. Luego se procede igual para intervalos de otra duración, usualmente de 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120 y 180 minutos^(*). De esta manera, para una lluvia determinada, se tiene la información referente a la variación de la intensidad (media máxima) con la duración.

Como ejemplo de la manera de presentar el cálculo de intensidades medias máximas para distintas duraciones dentro de una determinada lluvia o chubasco, se incluye a continuación la Tabla II y la Fig. 3.

(*) Para duraciones menores de 30 minutos debe disponerse de pluviógrafos de registro diario.

T A B L A I I

Lluvia del 23 de Junio de 1954 registrada en la es-
tación pluviográfica NN

Comienzo = 16:45 hrs

Duración total = 3 horas

fin = 19:45

Agua caída = 47.8 mm

Duración consi- derada o inter- valo Δt de re- ferencia (min)	Altura de agua máxima caída en Δt (mm)	Principio y fin del intervalo (hora)	Int. media máx $I_m = \frac{\Delta P}{\Delta t}$ (mm/hora)
5	10.9	16:55 - 17:00	131
10	19.7	16:55 - 17:05	118
15	26.3	16:50 - 17:05	105
20	30.2	16:46 - 17:06	91
25	35.0	16:46 - 17:11	84
30	38.2	16:46 - 17:16	76
40	42.0	16:46 - 17:26	63
50	43.0	16:46 - 17:35	52
60	44.1	16:45 - 17:45	44
90	45.3	16:47 - 18:17	30
120	46.8	16:45 - 18:45	23
180	47.8	16:45 - 19:45	16

Claramente se observa que a mayor duración correspon-
de una menor intensidad media máxima. Gráficamente la rela-
ción es del tipo que indica la Fig. 3.

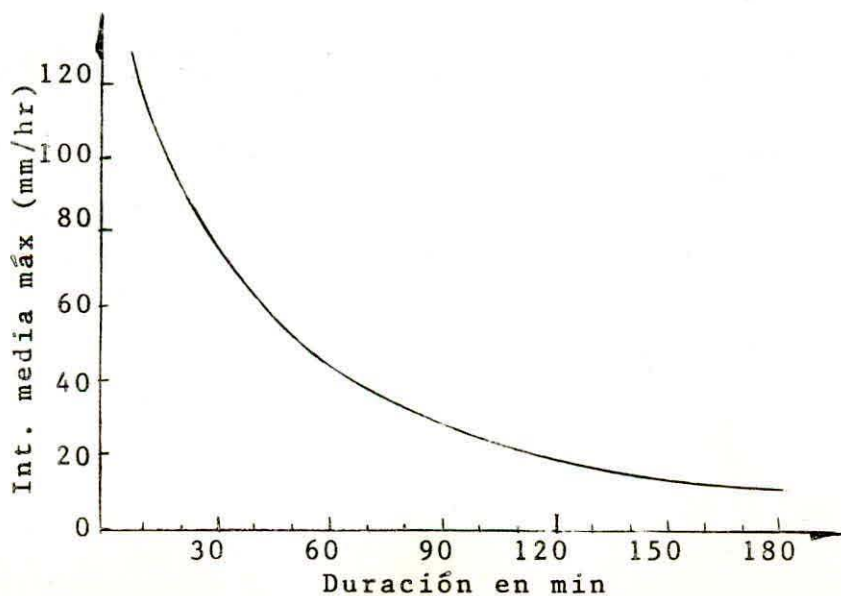


Figura 3

2.4 Relación Intensidad - Duración - Frecuencia:-

Tal como se esquematizó en la Fig. 1, para determinar la relación IDF deberá asignarse una frecuencia o probabilidad a la relación intensidad - duración. Dicha probabilidad no se refiere a la de toda la lluvia, sino a cada uno de los puntos de una curva I-D que, como se explicará a continuación, corresponden a puntos obtenidos de episodios diferentes de lluvia.

Para obtener las relaciones I-D-F de un lugar, deberán considerarse todas las lluvias observadas en la estación pluviográfica correspondiente. Para cada una de estas lluvias se determina, tal como se explicó en el punto 2.3, las intensidades medias máximas correspondientes a distintas duraciones Δt . Para determinar la distribución de frecuencia que corresponde a las intensidades medias máximas de cada duración, existen dos procedimientos:

- Para cada una de las duraciones seleccionadas se elige la mayor intensidad media máxima que ocurrió en cada uno de los años observados, despreciando los otros valores del mismo año, aunque estos puedan ser mayores que los máximos elegidos en los otros años. (La serie de valores así obtenidos se denomina serie de máximos anuales).
- Para cada una de las duraciones seleccionadas se eligen todas las intensidades medias máximas mayores que cierto valor mínimo práctico. Se podrán tener así dos o más valores que corresponden a una misma lluvia, o años en que no se eligió ningún valor. La serie que resulta se denomina serie de duración parcial.

Cualquiera que sea el procedimiento elegido, los valores así obtenidos se ordenan de mayor a menor (sin tener en cuenta su orden cronológico), para cada una de las duraciones consideradas. Los resultados se pueden ordenar en una Tabla del siguiente tipo:

T A B L A I I I

Clasificación de Intensidades medias máximas para el período
1939 - 1967 en la Estación NN

Δt min Nº orden	5	10	15	25	30	45	60	120	180	Frecuen cia $F = \frac{m}{N+1}$
1	a ₁ ⁵	a ₁ ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a ₁ ¹⁸⁰	F ₁
2	a ₂ ⁵	a ₂ ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a ₂ ¹⁸⁰	F ₂
3	a ₃ ⁵	a ₃ ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a ₃ ¹⁸⁰	..
4	a ₄ ⁵	a ₄ ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a ₄ ¹⁸⁰	..
..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
m	a _m ⁵	a _m ¹⁰	..	..	..	..	..	..	a _m ¹⁸⁰	F _m

Luego, para cada intervalo de duración Δt se determina el período de retorno o la probabilidad de excedencia de las correspondientes intensidades medias máximas, de acuerdo a cualquiera de las fórmulas incluídas en la Tabla I (ver última columna de Tabla III).

Si para formar los valores de la Tabla III se ha utilizado el criterio de la serie de excedencias anuales (1er procedimiento), se obtiene la probabilidad de igualar o sobrepasar una intensidad (que corresponde a cierta duración), en cualquiera de los años. Si se trabaja con una serie de duración parcial (2º procedimiento), se obtiene la frecuencia o el número de veces en un período dado (años de estadística) en que una intensidad de cierta duración se iguala o se sobrepasa.

Los valores de la Tabla III se llevan a un gráfico y dan origen a las curvas de intensidad - duración - frecuencia (como parámetro).

Varios hidrólogos, en diferentes partes del mundo, han propuesto una serie de fórmulas para representar analíticamente la relación intensidad - duración - frecuencia. Estas fórmulas se resumen en la siguiente Tabla:

T A B L A I V

<u>Nombre Fórmula</u>	<u>Año</u>	<u>Fórmula para I_{max}</u>
Talbot	1904	$\frac{a}{t + b}$
Meyer	1917	$\frac{at}{t + b}$
Bernard	1932	$\frac{K F^x}{t^n}$
Grisollet	1948	$\frac{a}{(t + b)^n}$
"	1948	$\frac{a}{(t + b)(F + c)}$

donde t es la duración en minutos, F es la frecuencia o período de retorno y a, b, c, n, x son parámetros que se determinan estadísticamente.

Excepto por la fórmula de Bernard y la segunda relación propuesta por Grisollet, los parámetros a, b y n no sólo dependen del lugar sino que del período de retorno considerado. Todo intento de transposición de estos parámetros, de un lugar a otro, sólo se puede permitir cuando las dos regiones son hidrometeorológicamente homogéneas.

3.- Determinación del gasto de diseño por el método llamado "de la fórmula racional". -

Se han propuesto diversas fórmulas empíricas y semi-empíricas para estimar gastos máximos en base a la intensidad de lluvia. Una de estas fórmulas es la llamada: "fórmula racional", que tiene la siguiente expresión:

$$Q_{\text{máx}} = C I A$$

en que

$Q_{\text{máx}}$ = gasto máximo en lts/seg/Ha.

C = coeficiente de escorrentía, que expresa la relación entre el gasto máximo por unidad de área y la intensidad media máxima de la lluvia durante un período de tiempo igual al tiempo de concentración de la cuenca. (Representa por lo tanto el porcentaje de lluvia que puede escurrir).

I = intensidad media máxima de la lluvia en lts/seg/Ha (*) durante el tiempo de concentración de la cuenca.

A = superficie de la cuenca en hectáreas.

Se define como tiempo de concentración de la cuenca, al mayor tiempo que demora en llegar al punto donde se está calculando el gasto, la partícula de agua que cae más alejada de dicho punto.

La "fórmula racional" está basada en una serie de hipótesis que implican diversas limitaciones que es necesario tener en cuenta al utilizarla. Dichas hipótesis son las siguientes:

- a) Se supone que el gasto máximo, que produce cierta intensidad de lluvia, ocurre cuando dicha intensidad (media) se mantiene por lo menos durante un período igual al tiempo de concentración de la cuenca, ya que sólo entonces estaría contribuyendo toda la cuenca a la escorrentía.
- b) La relación lluvia - gasto es lineal.
- c) La máxima intensidad de lluvia ocurre dentro del período o tiempo de concentración.

(*) 1 mm/hora = 2,78 lts/seg/Ha.

- d) La probabilidad de ocurrencia de los gastos máximos es la misma que la de las intensidades de lluvia correspondiente.
- e) El coeficiente de escorrentía de una cuenca es independiente del tipo y probabilidad de la lluvia.

Estas hipótesis limitan el uso del método a cuencas urbanas relativamente pequeñas, preferentemente menores que 15 Km². A pesar de estas limitaciones y de otras que se analizarán al tratar cada uno de los términos de la "fórmula racional", la experiencia acumulada en su uso y en los parámetros que intervienen, la simpleza de la relación y la posibilidad de aplicar la experiencia y criterio del proyectista, ha representado un avance positivo en la evaluación de gasto de diseños, cuando este método se aplica en los casos que corresponde y teniendo plena conciencia de sus limitaciones e hipótesis.

Se tratan a continuación cada uno de los términos que intervienen en la "fórmula racional" y se explica cómo se eligen y determinan para la aplicación del método.

3.1 Determinación del Coeficiente de Escorrentía:-

El coeficiente de escorrentía de la "fórmula racional" es el elemento menos susceptible de una determinación precisa y para su elección se requiere un conocimiento detallado del área y una considerable experiencia y juicio práctico. Este coeficiente implícitamente debe tener en cuenta una diversidad de factores tanto climáticos como fisiográficos que influyen en la relación lluvia - gasto. Estos factores se refieren a los siguientes aspectos: pérdidas por intercepción de la lluvia por la vegetación; pérdidas a la escorrentía superficial debido a la relación entre la capacidad de infiltración del suelo y la intensidad de la lluvia, pérdidas por retención y detención en depresiones del terreno y pérdidas por evaporación y evapotranspiración. En la realidad, por lo tanto, el coeficiente de escorrentía no sólo varía según las condiciones climáticas y estacionales sino que dentro del período de una determinada lluvia. Sin embargo, en la práctica, comúnmente se utilizan coeficientes constantes que sólo dependen del tipo de terreno y de urbanización. La Tabla IV indica los valores usualmente empleados.

T A B L A V

Valores del Coeficiente de Escorrentía según el tipo de zona

(Fuente "Design & Construction of Sanitary and Storm Sewer",
Manual N°37 de la ASCE)

<u>Descripción del área</u>	<u>Coeficiente de Escorrentía</u>
Comerciales Céntricas	0,70 - 0,95
Comerciales Suburbanas	0,50 - 0,70
<u>Residenciales:</u>	
Edificación unifamiliar	0,30 - 0,50
Unidades Múltiples separadas	0,40 - 0,60
Unidades Múltiples agregadas	0,60 - 0,75
Zona Residencial suburbana	0,25 - 0,40
Áreas de Edificios de Departamentos	0,50 - 0,70
<u>Industrial:</u>	
Áreas con poca densidad	0,50 - 0,80
Áreas con alta densidad	0,60 - 0,90
Parques y cementerios	0,10 - 0,25
Áreas de juegos y esparcimiento	0,20 - 0,35
Pacios de estaciones de FF.CC.	0,20 - 0,40
Áreas no urbanizadas ni habilitadas	0,10 - 0,30

En el caso de querer determinar un coeficiente de escorrentía compuesto, teniendo en cuenta los diferentes tipos de superficies que pueden presentarse en el área, se pueden utilizar los valores de la Tabla V.

T A B L A V I

Valores del Coeficiente de Escorrentía según el tipo de
Superficie

(Fuente "Design & Construction of Sanitary and Storm Sewer",
Manual N°37 de la ASCE)

<u>Tipo de Superficie</u>	<u>Coeficiente de Escorrentía</u>
<u>Calzadas:</u>	
Asfalto	0,70 - 0,95
Concreto	0,80 - 0,95
Ladrillo	0,70 - 0,85
Aceras y pasajes	0,75 - 0,85
Techos	0,75 - 0,95
<u>Prados en suelos arenosos:</u>	
Planos ($\leq 2\%$)	0,05 - 0,10
Medios (2% a 7%)	0,10 - 0,15
de gran pendiente ($> 7\%$)	0,15 - 0,20
<u>Prados en suelos arcillosos:</u>	
Planos ($< 2\%$)	0,13 - 0,17
Medios (2% a 7%)	0,18 - 0,22
de gran pendiente ($> 7\%$)	0,25 - 0,35

Para la determinación de coeficientes de escorrentía para la aplicación del método en cuencas agrícolas pequeñas (menos de 15 Km²) se pueden utilizar los valores medios de la Tabla VI.

T A B L A V I I

Coefficientes de Escorrentía en Cuencas Agrícolas Pequeñas

(Fuente: "Handbook of Applied Hydrology", Ven Te Chow).

Tipo de Suelo	Coeficiente de Escorrentía		
	Terrenos Cultivados	Praderas	Terrenos Boscosos
Suelos arenosos o con altas tasas de infiltración	0,20	0,15	0,10
Suelos francos o limosos con tasas de infiltración medias	0,40	0,35	0,30
Suelos arcillosos o con estratos endurecidos (panes) cercanos a la superficie, o suelos poco profundos sobre roca; suelos con tasas de infiltración bajas	0,50	0,45	0,40

Se han propuesto métodos para tener en cuenta las condiciones iniciales de la cuenca (estado de humedad de los suelos, etc.) y una modificación del coeficiente de escorrentía dentro de una lluvia, pero el tipo de información que se requiere (configuración espacial y temporal de la lluvia de diseño, zonificación de los tiempos de concentración dentro de la cuenca, características de la cuenca), no se dispone usualmente en la práctica y lo laborioso e incierto de los procedimientos no justifican en la práctica estos cambios que usualmente no son significativos.

3.2 Determinación de la intensidad de la lluvia:-

Como ya se indicó, el método de la "fórmula racional" presupone que el gasto máximo es producido por aquella intensidad de lluvia que se mantiene por lo menos durante un período igual al tiempo de concentración de la cuenca. Por lo tanto, al utilizar la curva intensidad - duración - frecuencia para el lugar, deberá elegirse una probabilidad de diseño y en la curva correspondiente se determinará la intensidad media máxima que corresponde a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. A continuación se explican los criterios que deben seguirse para elegir dicha probabilidad y el valor del tiempo de concentración.

3.2.1 Elección de la probabilidad de diseño:-

La probabilidad de diseño que se escoja determinará el grado de protección que se le exigirá al sistema de drenes de aguas lluvia, el que a su vez deberá ser compatible con la magnitud de los daños que se deseen prevenir. A este respecto, en proyectos de alcantarillados de aguas lluvia, no siempre se justifica entrar a estudios de beneficio - costo para determinar dicha probabilidad, sino que usualmente su elección se basa en criterios prácticos de acuerdo a una experiencia anterior, ya que no pueden existir normas rígidas al respecto.

En otros países las oficinas de ingeniería adoptan los siguientes criterios para la elección de probabilidades de diseño:

- Alcantarillados de aguas lluvia en zonas residenciales: 2 a 10 años de período de retorno, siendo 5 años el valor más usado.
- Para alcantarillado de aguas lluvia en zonas comerciales, industriales o de alto valor: 10 a 50 años de período de retorno, según justificación económica.
- Para obras de protección de crecidas: 50 años o más.

Debe reconocerse que el costo de los alcantarillados de aguas lluvia no es proporcional a la probabilidad de diseño. Por ejemplo sistemas diseñados para una probabilidad de 1 en 10 años cuestan entre 6% y 11% más que los sistemas diseñados para un período de retorno de 5 años.

3.2.2 Determinación del tiempo de concentración:-

Si la intensidad de la lluvia fuera permanentemente uniforme en el tiempo, el tiempo de concentración sería igual al tiempo de equilibrio, a partir del cual la tasa del gasto es igual a la intensidad de la lluvia. El tiempo de concentración es generalmente mayor que el tiempo de desfase del gasto máximo, pero para cuencas pequeñas con una red de drenaje superficial simple, ambos tiempos son aproximadamente iguales.

El tiempo de concentración dependerá de la topografía de la cuenca, de las características de la red de drenaje,

del tipo de superficies y su distribución dentro de la cuenca y de las condiciones iniciales de la cuenca.

En cuencas urbanas y en el diseño de redes de alcantarillado de aguas lluvia, el tiempo de concentración se compone del tiempo necesario para que las partículas más distantes (o el flujo superficial) se incorpore a un determinado sumidero o tiempo de entrada, y el tiempo que demora el agua dentro de un colector hasta llegar a un determinado punto de él en donde se está calculando el gasto de diseño, o tiempo de flujo.

El tiempo de entrada puede calcularse teóricamente en base a la hidráulica de la lámina de agua que escurre más o menos uniformemente sobre el terreno hasta incorporarse a un sumidero. Sin embargo, la naturaleza de este tipo de escurrimiento y el tipo y cantidad de variables que influyen, hacen que estos procedimientos sean engorrosos y poco seguros. En la práctica el tiempo de entrada puede estimarse en base a ábacos semiempíricos como el de la Fig. 4 o utilizando valores generales más o menos fijos que recomiende la experiencia previa.

A este respecto es común utilizar tiempos de entrada que varíen entre 5 y 30 minutos, siendo los más comunes entre 5 y 15 minutos. Ello dependerá de la densidad y tipo de edificación, de la distancia y distribución de sumideros y colectores, de la pendiente y de la probabilidad de la lluvia.

El tiempo de flujo se determina hidráulicamente (fórmula de Manning, por ejemplo) de las propiedades geométricas, topográficas e hidráulicas del colector considerado, suponiendo que éste escurre a máxima capacidad.

Debe dejarse en claro que la posición cronológica del intervalo que corresponde al tiempo de concentración, durante el cual se calcula la intensidad de diseño, está relacionada con la posición de la intensidad máxima, y no con el comienzo de la lluvia; para determinar dicha posición debe conocerse o suponerse la variación de la intensidad con el tiempo, para la lluvia de diseño considerada. Debe tenerse una clara conciencia de este hecho para evitar una aplicación errada del "método racional" y de algunas de sus variaciones.

Finalmente, en la aplicación del método racional en el dimensionamiento de alcantarillados de aguas lluvia, debe tenerse en cuenta que de acuerdo a la ubicación y distribución preliminar de la red de colectores que se desea dimensionar, y a la irregularidad de las subzonas que así se delimitarían en la cuenca, aquellas subáreas que tienen un tiempo de concentración corto (y por lo tanto les corresponderá una mayor intensidad de diseño), pueden ocasionar en un punto de diseño de un colector, un mayor gasto máximo que el que pueden aportar a ese punto la totalidad del área u otras subáreas que tengan una superficie mayor, pero que por tener un tiempo de concentración también mayor, la intensidad de diseño sea mucho más pequeña. Este hecho es muy importante, pues en los puntos de unión de dos o más colectores, habrá que considerar la combinación de subáreas que dé el gasto más desfavorable. Debe tenerse en cuenta además que en la aplicación del "método racional" no rige la ley de los nudos en los puntos de unión de varios colectores, ya que este procedimiento sólo da el valor del gasto máximo pero no el tiempo en que ocurre y éstos pueden ser diferentes según sea el colector que se considere en el nudo de diseño.

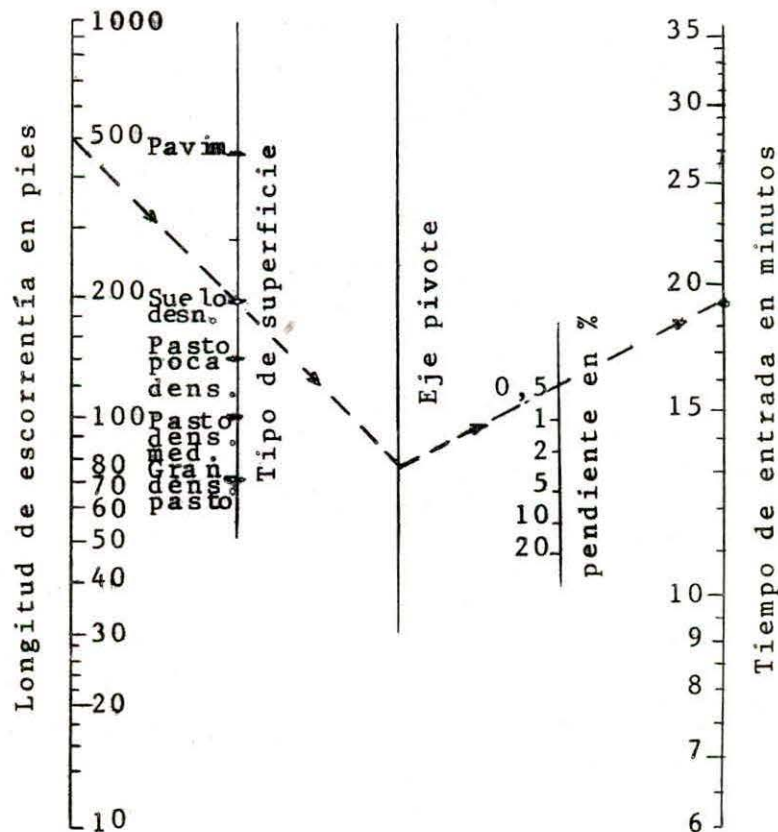


Figura 4

4.- Método de Izzard (1944 y 1946).-

C.F. Izzard desarrolló un método basado en estudios experimentales y en relaciones teóricas, que permite construir o sintetizar hidrogramas de flujo superficial sobre superficies planas y uniformes. El método es apto para el diseño de obras de drenaje superficial en aeropuertos, parques, carreteras y ciertas zonas urbanas.

Entendemos por flujo superficial, al escurrimiento superficial en forma aproximada de lámina que ocurre sobre una superficie más o menos plana y uniforme. Dicho flujo superficial, ocasionado por una determinada lluvia, se incorpora eventualmente a un cauce superficial de drenaje natural o artificial, desde donde a través de sumideros puede introducirse en colectores especiales que aseguren la protección contra inundaciones del sector considerado.

En base a las experiencias mencionadas, Izzard propuso una curva adimensional para la rama ascendente del hidrograma de flujo superficial, según se indica en la Fig.5 y en la Tabla VIII.

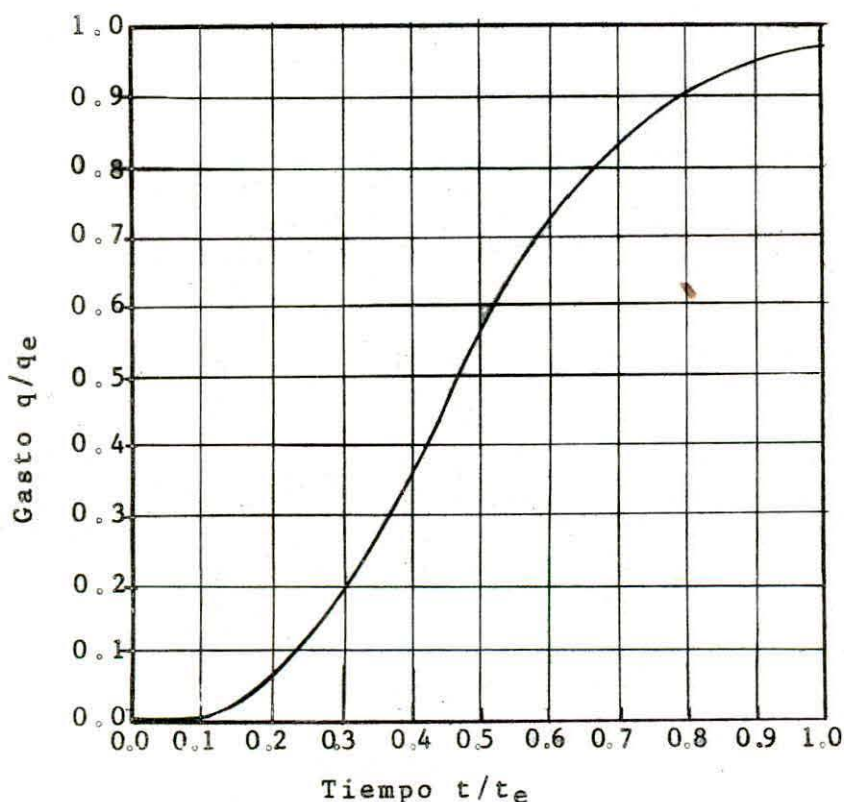


Fig. 5

T A B L A V I I I

t/t _e	q/q _e
0,0	0,000
0,1	0,020
0,2	0,055
0,3	0,180
0,4	0,370
0,5	0,550
0,6	0,715
0,7	0,825
0,8	0,900
0,9	0,950
1,0	0,970

En que:

- q = gasto por unidad de ancho del flujo superficial, en el instante "t" después de comenzada la lluvia efectiva.
- q_e = gasto por unidad de ancho del flujo superficial, en el estado de equilibrio, suponiendo que la lluvia tiene una duración indefinida.
- t_e = tiempo en el cual se produce la condición de equilibrio, es decir, se logra una tasa constante del gasto.

Experimentalmente se comprobó que:

$$q_e = \frac{iL}{3,60 \times 10^6} \quad [m^2/seg] \quad (1)$$

donde

- i = intensidad de la lluvia efectiva en mm/hora.
- L = longitud de la pendiente considerada (en mts) sobre la cual se genera la escorrentía superficial.

Se entiende por lluvia efectiva a aquella parte de la precipitación que da origen a la escorrentía superficial. Por lo tanto para determinarla habrá que descontar a la lluvia bruta medida, las pérdidas por infiltración, retención superficial, intercepción y evapotranspiración.

Al caer la lluvia sobre una superficie inclinada, en cuyo extremo inferior suponemos que estamos midiendo el gasto "q", existirá un cierto volumen de agua que temporalmente está almacenada en dicha pendiente como una lámina de agua "en camino" que eventualmente se convertirá en el gasto "q". Dicho volumen transitorio de agua en camino, se denomina volumen de detención superficial.

De acuerdo a las experiencias de Izzard, la relación entre el tiempo en el cual se producen las condiciones de equilibrio, el gasto de equilibrio y el volumen de detención de equilibrio (V_e) es la siguiente:

$$t_e = \frac{1}{30} \frac{V_e}{q_e} \quad \text{min} \quad (2)$$

Además se encontró que:

$$\frac{V}{V_e} = \left(\frac{q}{q_e}\right)^n \quad (3)$$

en que n tiene un valor medio de 1/3, pero varía de 0,20 para pavimentos suaves, a 0,40 para superficies cubiertas con pastos cortos.

Para determinar el valor del volumen de detención en equilibrio (V_e), debe suponerse una relación entre la altura de la lámina de agua (D_e) que escurre en equilibrio sobre la superficie y el correspondiente gasto de equilibrio. Dicha relación, para el caso de flujo laminar, es la siguiente:

$$D_e = \frac{V_e}{L} = k q_e^{1/3} \quad (4)$$

Como

$$q_e = \frac{iL}{3,6 \times 10^6}$$

$$V_e = 0,00653 k L^{4/3} e^{1/3} \quad (5)$$

en que experimentalmente se demostró que:

$$k = \frac{2,76 \times 10^{-5} i + c}{S}$$

donde

i = intensidad de la lluvia efectiva en mm/hora
S = pendiente del terreno en mts/mts para $S \leq 0,04$
c = parámetro que depende del tipo de superficie de acuerdo a la siguiente tabla.

T A B L A I X

Tipo de Superficie	C
Pavimentos asfálticos lisos	0,0070
Pavimentos con brea y arena	0,0075
Pavimentos de concreto normales	0,0120
Pavimentos con brea y grava	0,0170
Prados muy cortos	0,046
Prados y céspedes	0,060

Con los valores determinados según las relaciones anteriores se puede determinar el gasto por unidad de ancho para cualquier tiempo "t" después de comenzada la lluvia efectiva. Para ello basta conocer la intensidad de dicha lluvia, la longitud, pendiente y tipo de la superficie de la escorrentía, calcular los valores de tiempo, gasto y volumen de detención de equilibrio y multiplicando estos valores por las relaciones adimensionales, determinar la rama ascendente del hidrograma de escorrentía superficial. Esta rama ascendente ocurre mientras dura la lluvia efectiva. A continuación se analiza la determinación de la rama descendente o recesión del hidrograma, una vez que la lluvia efectiva ha cesado.

Una vez producido el cese de la lluvia efectiva, se ha observado que el gasto aumenta bruscamente en aproximadamente un 15% del gasto de equilibrio. Ello se debe a que durante la lluvia, el impacto de las gotas crean una resistencia adicional al flujo que hace aumentar la detención superficial para un cierto gasto; luego al cesar la lluvia, ese excedente de detención superficial produce un aumento del gasto.

Si llamamos V_0 el volumen de detención que corresponde al gasto de equilibrio q_e , cuando ha cesado la lluvia efectiva y t_a es el tiempo desde el comienzo de la recesión del hidrograma a un gasto $a = q/q_e$, se demostró empíricamente que:

$$t_a = \frac{V_0 f(a)}{60 q_e} \quad (7)$$

en que

$$f(a) = 0,5 (a^{-2/3} - 1) \quad (8)$$

El valor " V_0 " se calcula con la expresión (5) haciendo $i = 0$ en la expresión (6).

Para determinar la ubicación cronológica con respecto al comienzo del hidrograma, del comienzo de la recesión, debe tenerse en cuenta que el volumen de detención en exceso en el momento del cese de la lluvia es:

$$V_{exc} = V_e - V_0$$

este volumen en exceso se descarga a una tasa algo mayor que q_e . Luego haciendo referencia a la Fig. 6 se tiene que

$$Z = \frac{V_e - V_0}{q_e} \quad (9)$$

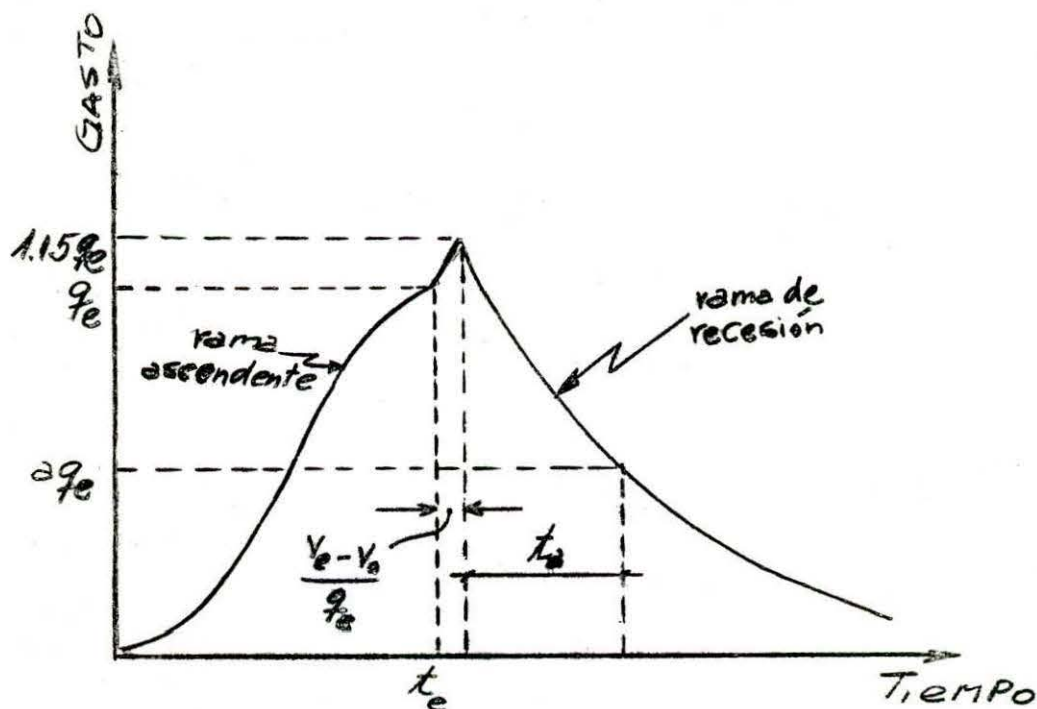


Fig. 6

En resumen, para calcular la parte del hidrograma que ocurre una vez terminada la lluvia efectiva, debe calcularse el tiempo t_e (ver Fig. 6) y el gasto "peak", $1,15 q_e$. Luego para la recesión propiamente tal, se eligen diferentes valores de " t_a " que al dividirlos por el valor V_0/q_e , permiten calcular $f(a)$ (expresión 7) y eventualmente " a " por medio de la expresión (8). Como " a " es el gasto de recesión dividido por el gasto de equilibrio, bastará multiplicar a por q_e para obtener el gasto de recesión que corresponde al tiempo " t_a ".

Con el método de Izzard, recién descrito, se pueden reconstituir (o sintetizar) hidrogramas de flujo superficial para una lluvia efectiva simple y/o compleja, haciendo uso del principio de superposición.

El método es válido sólo si se cumple que

$$ixL \leq 3.750$$

ALGUNOS ASPECTOS DE HIDROLOGIA DE ZONAS URBANAS

BIBLIOGRAFIA SELECCIONADA

(Preparada por Prof. Basilio Espíldora)

A.- TEXTOS

- 1.- "Handbook of Applied Hydrology". Ven Te Chow, Editor. Mc Graw-Hill Co. 1964.
- 2.- "L'Hydrologie de l'ingenieur". G. Remenieras. Ed. Eyrolles, Paris, 1965.
- 3.- "Applied Hydrology". R.K. Linsley, M.A. Kohler, y J.L. Paulhus. Ed. Mc Graw-Hill Co., 1949
- 4.- "Hydrology for Engineers". Linsley, Kohler y Paulhus. Mc Graw-Hill Co., 1959.
- 5.- "Hydrology". C.O. Wisler y E.F. Brater. Ed. Wiley, 1963.
- 6.- "Les réseaux d'égouts - Données d'Etablissement et de calcul". P. Koch. Ed. Dunod, Paris (1954).

B.- ARTICULOS Y PUBLICACIONES VARIAS.

- 1.- "Formulas for Rainfall intensities of long duration". M. Bernard. Transaction of the American Society of Civil Engineers (Trans. ASCE), Vol. 96 pp.592-624 (1932).
- 2.- "Military airfields - a Symposium: Design of drainage facilities". G.A. Hathaway Trans. ASCE Vol. 110 pp. 697-733 (1945).
- 3.- "Frequency analysis of hydrologic data with special application to Rainfall intensities. V.T. Chow. Univ. of Illinois. Engineering Experimental Station. Bulletin Series 414, July, 1953.
- 4.- "Hydrologic determination of waterways areas for the design of structures in small drainage basins". V.T. Choe. Univ. Illinois Eng. Exp. Sta. Bull. 462 (1962).

- 5.- "The relation between rainfall and the discharge of sewers in populous districts". E. Kuichling. Trans. ASCE, vol. 20 pp. 1-50, 1889.
- 6.- "Design and construction of sanitary and storm sewers". ASCE Manual of Engineering Practice, N°37 and WPCF Manual Practice N°9, 1960.
- 7.- "On the hydrology of culverts". D.B. Krimgold. Proc. 26th Annual Meeting Highway Research Board, Vol. 26 pp. 214-226 (1946).
- 8.- "A Method of computing urban runoff". W.I. Hicks. Trans. ASCE. Vol. 109 pp. 1217-1253 (1944).
- 9.- "The hydrology of urban runoff". A.L. Tholin y C.I. Keifer. Trans. ASCE. Vol. 125, pp.1308-1379 (1960).
- 10.- "Hydraulics of runoff from developed surfaces". C.F. Izzard. Proc. 26th Annual Meeting of the Highway Research Board. Vol. 26. pp. 129-146 (1946).
- 11.- "Runoff - rational runoff formules". R.L. Gregory y C.E. Arnols. Trans. ASCE. Vol. 96, pp.1038-1099 (1932).
- 12.- "Relation between rainfall and runoff from small urban areas". W.W. Horner y F.L. Flynt. Trans. ASCE. vol. 101, pp.140-183 (1936).
- 13.- "The distribution of intense rainfall and some other factors in the design of storm-water drains". F.A. Marston. Trans. ASCE. Vol 87, pp.535-562 (1924).
- 14.- "Surface runoff determination without using coefficients". W.W. Horner y S.W. Jens. Trans. ASCE Vol.107, pp. 1097-1102 (1942).
- 15.- "Synthetic storm patter for drainage design". C.J. Keifer y H.H. Chu. Proc. ASCE Journal Hydraulics Division. Vol.83 N°HY4 (1957).
- 16.- Publicaciones referentes al Storm Drainage Project of the Johns Hopkins University, Department of Sanitary Engineering and Water Resources.

- 17.- "Surface water drainage research, Progress Report to April, 1959". L.H. Watkins. Dept. of Science Industry Research, Road Research Laboratory. Research Note RN/3515/LHW. London June 1959. También: "The design of urban sewer system, Road Res. Technical Paper 55, London 1962.
- 18.- "Surface and Subsurface drainage facilities for air-fields". pt.13 chapters 1 y 2 in Engineering Manual. U.S. Army Corps of Engineers, June 1955.
- 19.- "Time of concentration for overland flow" W.S. Kerby. Civil Engineering, Vol.29, p.60. March 1959.
- 20.- "Storm water control for a shopping center". E. Forest, Civil Engineering, Vol. 30, p.63, February 1960.
- 21.- "Economics of urban drainage design". W.J. Baner. Proc. ASCE. Journal Hydraulics Division, Vol. 88 N°HY6, pp. 93-114, Nov. 1962.
- 22.- "Storm Sewer design by the inlet method". A.B. Kaltenbach. Publick Works vol. 94, N°1, Jan. 1963.
- 23.- "Unit Hydrographs for sewered areas". P.S. Eagleson. Proc. ASCE. J. Hydraulics Div., Vol.88, N°HY2, March 1962. Discussion: July N°HY4; Sept. HY5; Nov. HY6 en 1962 y vol. 95 N°HY4 July 1963.
- 24.- "Characteristics of the inlet Hydrograph". W. Viessman y J.C. Geyer. Proc. ASCE J. Hydraulics Div. Vol.88 N°HY5 Sept. 1962. Discussions: vol. 89 N°HY2 March 1963 y N°HY4 July 1963.
- 25.- "The prediction of runoff hydrographs for urban watersheds from precipitation data and watershed characteristics". G.E. Willeke. Journal of Geophysical Research, vol. 67 N°9, August 1962.
- 26.- "Etude des averses orageuses de la region parisienne, envisagées du point de vue de leur évacuation par les ouvrages d'assainissement". F. Grisolle. La Météorologie, Juillet, Sept. 1948, p. 175-195.

- 27.- "La violence des orages dans ses relations avec le débit égouts urbains". P. Koch Horville Clanche, Numéro spécial B/1950, p. 679-682.

C.- FUENTES DE INFORMACION EN CHILE

- 1.- Division Hidrología de ENDESA.
- 2.- División de Hidrometría de la Dirección de Riego, M.O.P.
- 3.- Dirección de Obras Sanitarias, M.O.P.
- 4.- Oficina Meteorológica de Chile.

