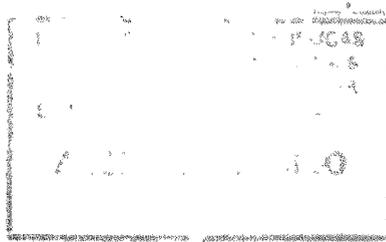


REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA



Sup-2077
c.1

NOCIONES DE HIDROLOGIA E HIDRAULICA PARA HIDROMENSORES

ING. HUMBERTO PEÑA T.

ING. REGGINA CABRERA G.

SANTIAGO, Julio 1982

I N D I C E

MATERIA	Pág.
I. HIDROLOGIA	1
1. La Hidrología y el Ciclo Hidrológico	1
2. Estudio del Hidrograma	2
3. Uso de la información Fluviométrica	3
4. La Red Hidrométrica Nacional	4
4.1 El Departamento de Hidrología	4
4.2 Desarrollo de la Red Hidrométrica Nacional	5
4.3 Definición de la Red Hidrométrica Nacional Optima	5
4.4 Jerarquización	5
4.5 Criterio de diseño de la RHNO	6
II HIDRAULICA	7
1. Clasificación de los Esgurrimientos	7
2. Campo de Velocidades	9
3. Ecuaciones Fundamentales	13
3.1 Teorema de Bernoulli	13
3.2 Ecuación de continuidad	16
4. Esgurrimientos de Río y Torrente	16
5. Eje Hidráulico	19
6. Cálculo de la altura normal	24
7. Teoría de la Curva de Descarga	25

NOCIONES DE HIDROLOGIA E HIDRAULICA PARA HIDROMENSORES

I. HIDROLOGIA

1. La Hidrología y el Ciclo Hidrológico

- 1.1 La Hidrología es la rama de la geografía física que trata del origen, distribución y propiedades de las aguas terrestres.
- 1.2 El movimiento, distribución y circulación general del agua en la Tierra se idealiza mediante el Ciclo Hidrológico (Figura N° 1).
- 1.3 El Ciclo Hidrológico es un proceso continuo, sin embargo es muy irregular en el tiempo y en el espacio, es así como existen zonas áridas y húmedas, y períodos de sequía y de crecidas.
- 1.4 En la figura N° 2 se muestra una visión más conceptual y más apta para un enfoque cuantitativo del Ciclo Hidrológico.
- 1.5 La Hidrología se preocupa fundamentalmente de la parte del Ciclo Hidrológico que se desarrolla en la tierra, sin considerar los procesos atmosféricos propiamente tales y el almacenamiento en los océanos. A esa parte se le llama el Ciclo de Escorrentía.
- 1.6 Aunque existen muchos y muy complejos procesos en el Ciclo de Escorrentía, pueden identificarse 4 fases fundamentales: precipitación, evaporación, escurrimiento superficial y escurrimiento subterráneo.
- 1.7 Para el conocimiento del Ciclo de Escorrentía la única fase que puede medirse con una alta precisión es la escorrentía superficial, de ahí, la gran importancia de los controles fluviométricos.
- 1.8 En Ingeniería Hidrológica interesa fundamentalmente el aspecto cuantitativo del Ciclo de Escorrentía. Con este fin utiliza frecuentemente ecuaciones de balance hidrológico (Figura N° 2).
- 1.9 La unidad básica para aplicar las relaciones de balance que se deducen en el Ciclo de Escorrentía es la cuenca u hoya hidrográfica.
- 1.10 La cuenca (o subcuenca) es una superficie drenada de tal modo que toda la escorrentía que se genera en ella se descarga a través de una salida única.
- 1.11 La ecuación de balance hidrológico en una cuenca, referida a cierto intervalo de tiempo, queda expresada por la siguiente relación:

$$P + Q_{sa} + Q_{za} = E + ET + I + Q_{se} + Q_{ze} + \Delta S_1 + \Delta S_s + \Delta S_z + \Delta S_n$$

P = precipitación media

CICLO HIDROLOGICO

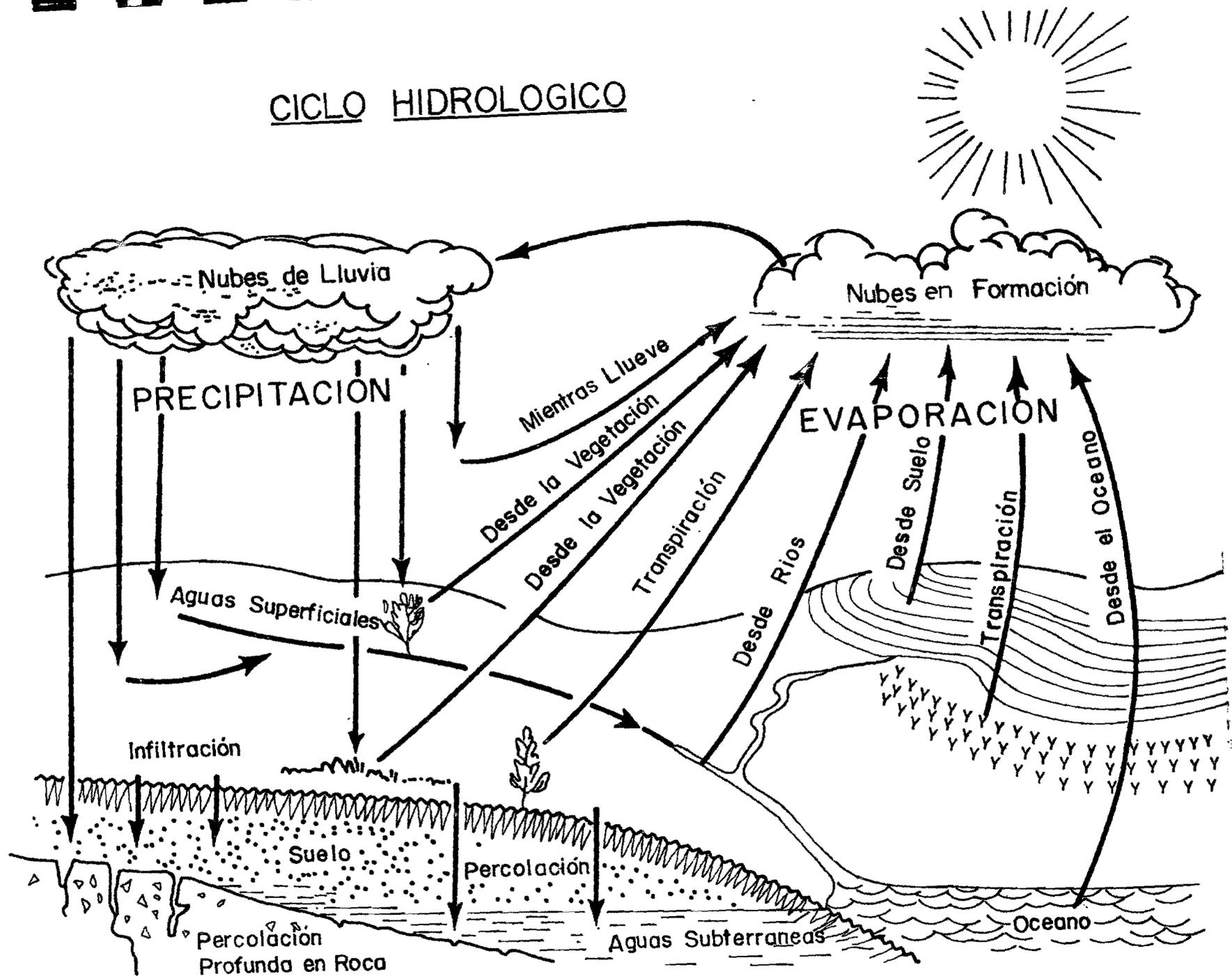
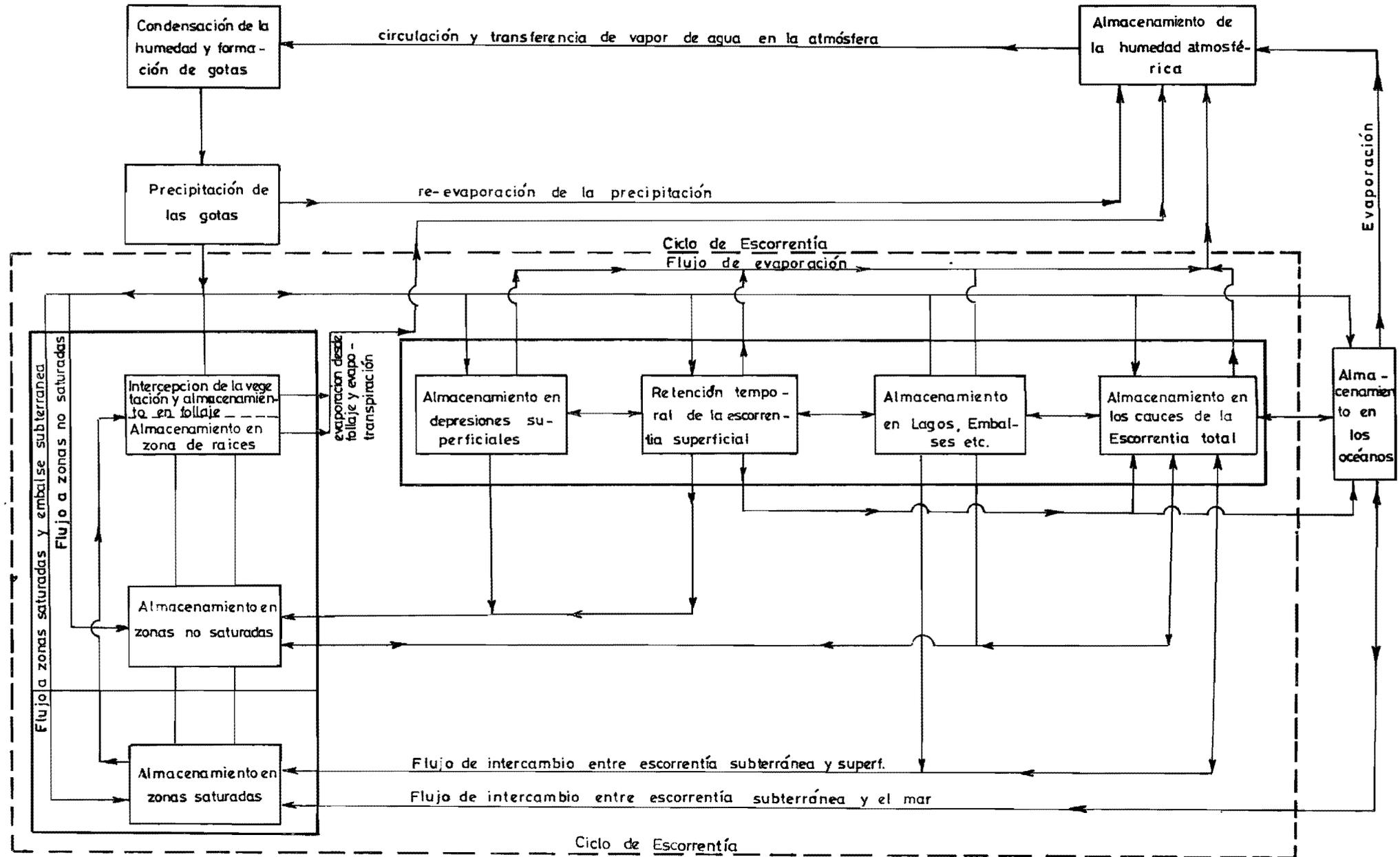


FIGURA Nº1

FIGURA Nº 2

Diagrama de flujo del ciclo hidrológico



Q_{sa}	=	gastos superficiales afluentes a la cuenca o subsistema (naturales y/o artificiales).
Q_{za}	=	gastos subterráneos afluentes
E	=	Evaporación media desde superficies de agua libre
ET	=	Evapotranspiración media
I	=	retención por intercepción de la precipitación en la vegetación
Q_{se}	=	gastos superficiales efluentes de la cuenca
Q_{ze}	=	gastos subterráneos efluentes
ΔS_L	=	variación en el período, de los volúmenes de agua almacenada superficialmente (lagos, embalses, lagunas, depresiones superficiales del terreno, etc.)
ΔS_S	=	variación del volumen de agua almacenada en los suelos no saturados (en forma de humedad del suelo).
ΔS_Z	=	variación del almacenamiento subterráneo en los acuíferos.
ΔS_N	=	variación del agua almacenada en nieves y glaciares.

- 1.12 Frecuentemente se plantean ecuaciones simplificadas de balances en distintos subsectores. Por ejemplo en la Figura N° 3, se entregan relaciones de balance para una zona de riego, a una escala de tiempo mensual.
- 1.13 Las mediciones hidrométricas deben permitir el estudio del balance hidrológico de las unidades naturales (cuencas, subcuencas, etc.) más importantes del país. Para ello, deben determinarse todos los caudales salientes y entrantes a dichas unidades: no sólo parte de ellos.

2. Estudio del Hidrograma

- 2.1 Se llama hidrograma al gráfico del caudal en función del tiempo.
- 2.2 La distribución a lo largo del año de los caudales y su relación con las precipitaciones definen el régimen hidrológico de una cuenca.
- 2.3 Los regímenes hidrológicos más característicos son los regímenes glacial, nivo-glacial, nival, nivo-pluvial, pluvial y de aguas subterráneas. En la figura N° 4 se aprecian sus principales características.

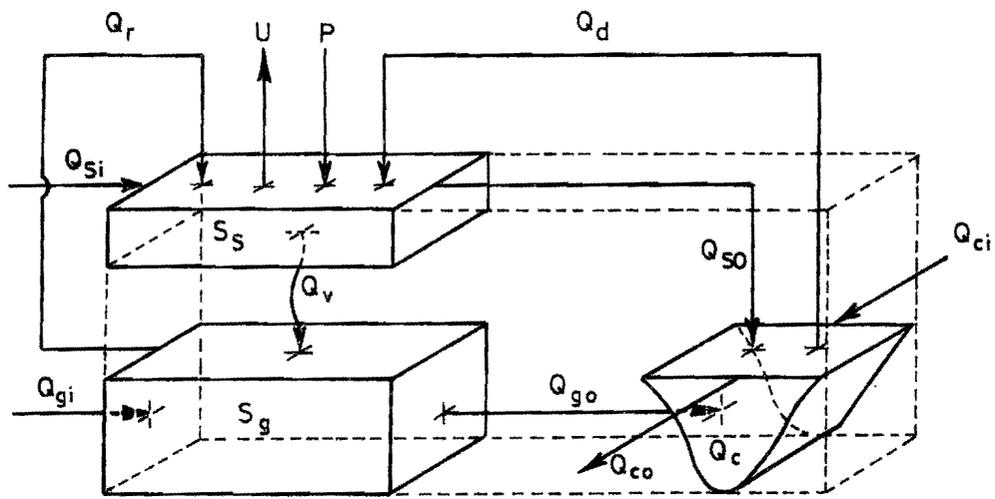


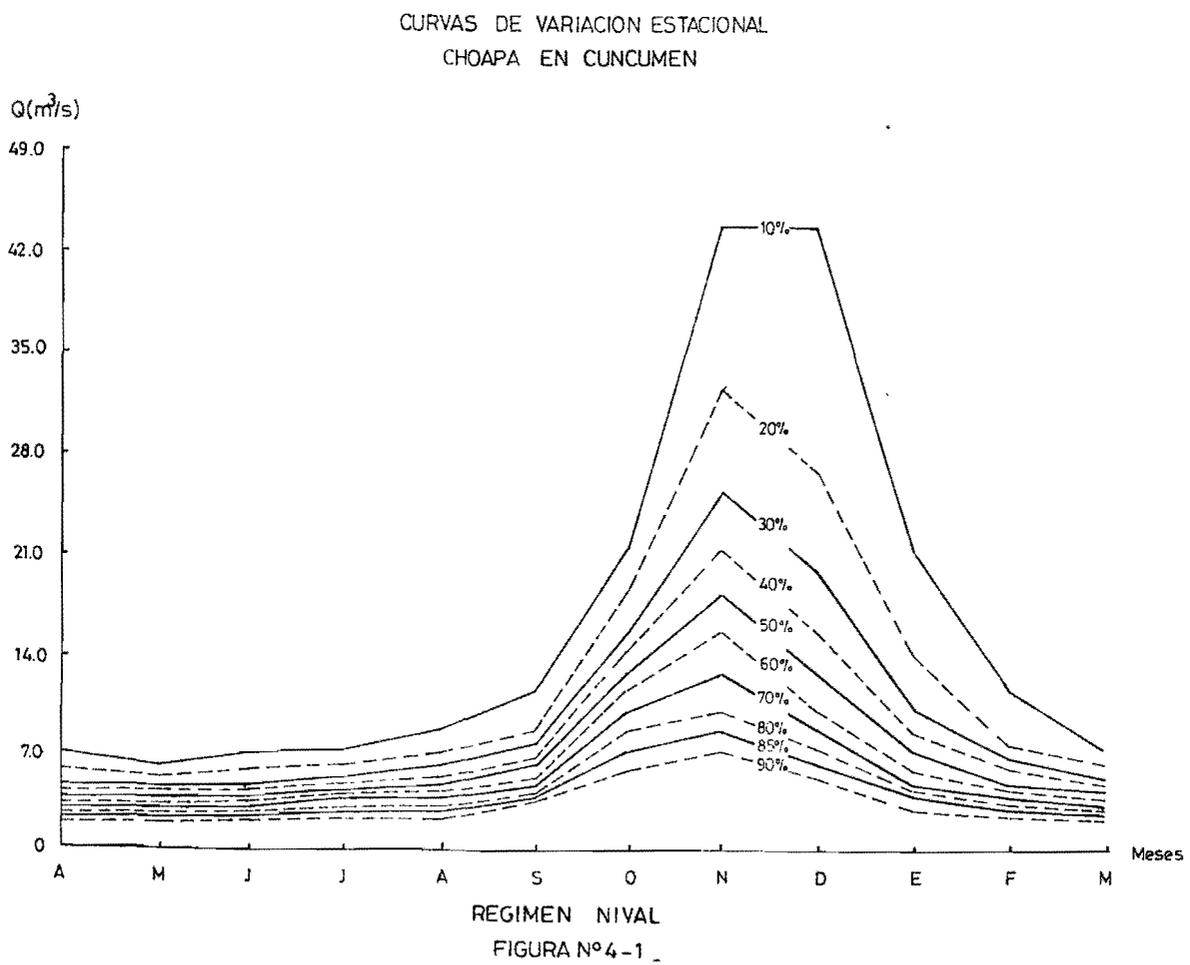
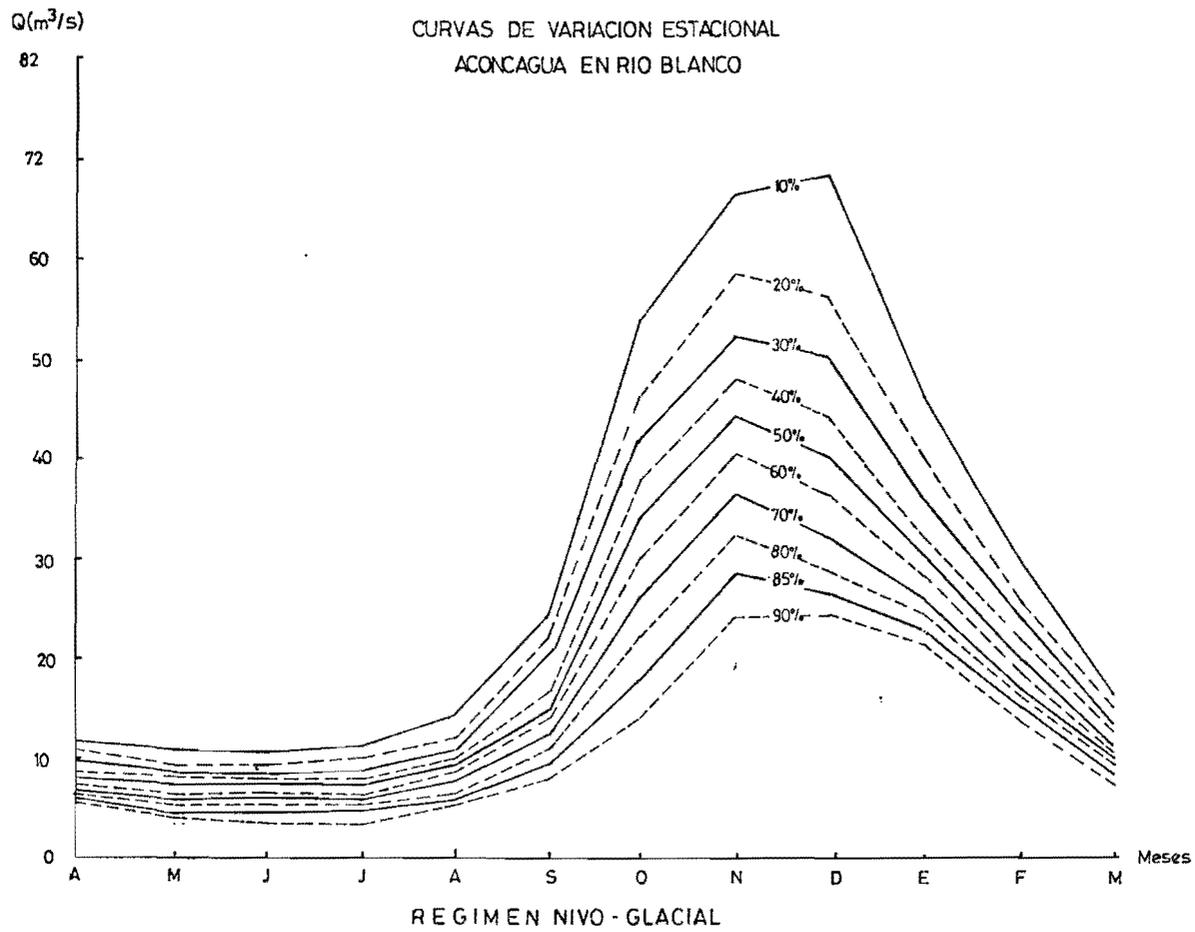
Figura N° 3 EJEMPLO DE BALANCE EN ZONA DE RIEGO (Escala Mensual)

- a) Balance global : $Q_{ci} + Q_{si} + Q_{ri} + P - U - Q_{co} = \Delta S_s + \Delta S_g$
 b) Balance en el suelo : $Q_{si} + Q_r + Q_d + P - U - Q_{so} - Q_v = \Delta S_s$
 c) Balance agua subterránea: $Q_{ri} + Q_v - Q_{go} = \Delta S_g$
 d) Balance en el río : $Q_{ci} + Q_{so} + Q_{go} - Q_d - Q_{co} = 0$

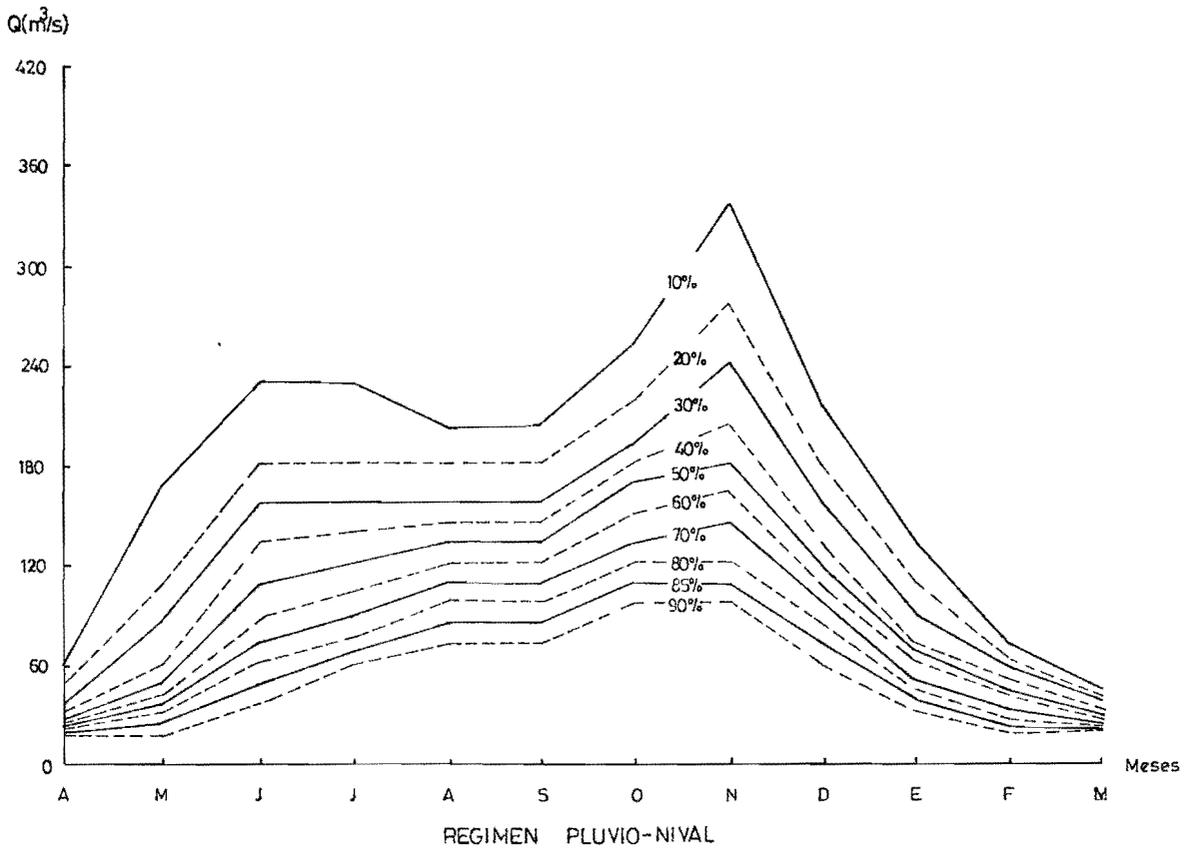
Simbología:

P = Precipitación
 U = evapotranspiración
 Q_{ri} = Caudal subterráneo afluente a la cuenca
 Q_{si} = Caudal superficial afluente directamente a la zona de riego
 Q_d = Caudal derivado por canales
 Q_v = Caudal de percolación a la napa subterránea

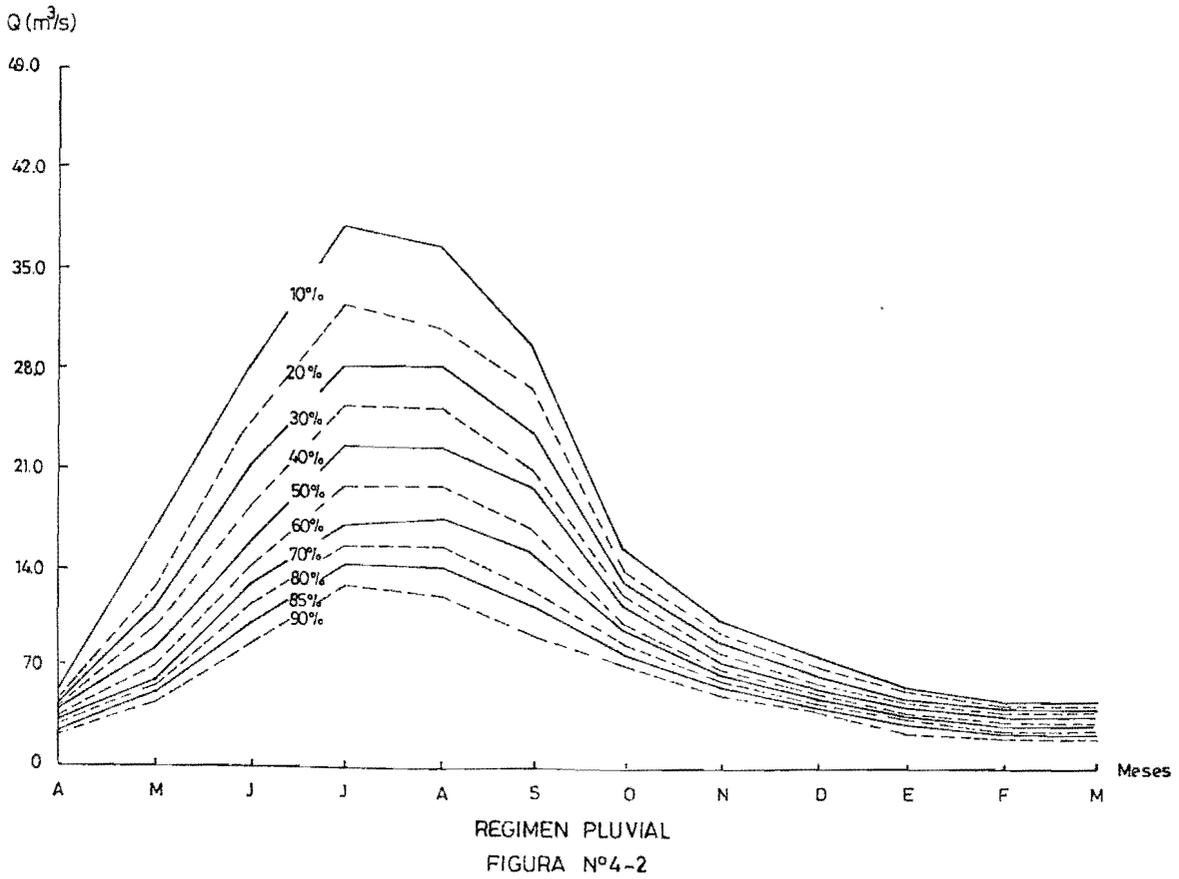
Q_{ci} , Q_{co} = Caudal superficial entrante y saliente a la cuenca por el río
 Q_{go} = aporte subterráneo al río
 Q_{so} = Caudal superficial de retorno desde la zona regada al río
 Q_r = Caudal bombeado desde la napa subterránea
 ΔS_s , ΔS_g = Almacenamiento de agua en el suelo y en la napa subterránea para el período



CURVAS DE VARIACION ESTACIONAL
 NUBLE EN SAN FABIAN



CURVAS DE VARIACION ESTACIONAL
 PUREN EN TRANAMAN



CURVAS DE VARIACION ESTACIONAL

TOLTEN EN VILLARRICA

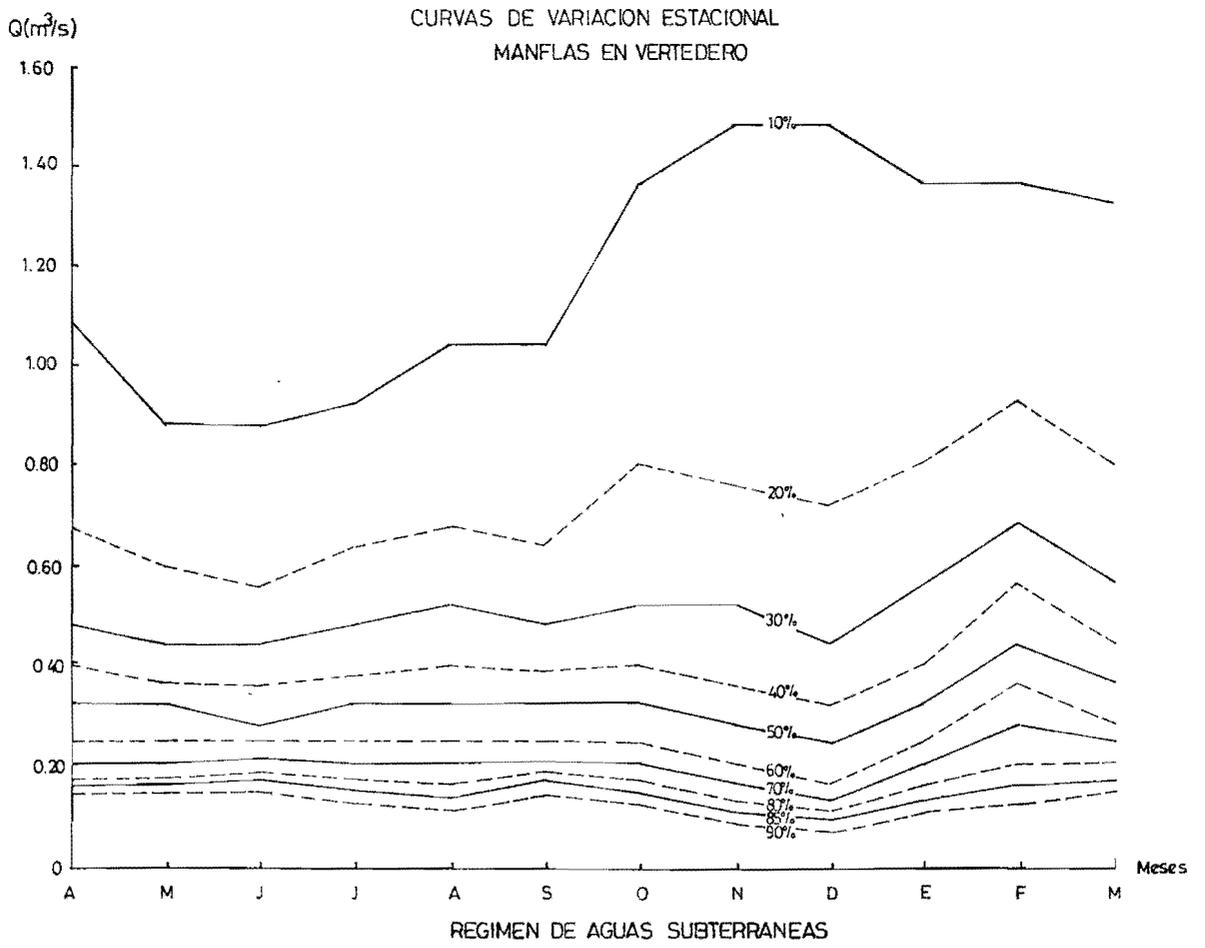
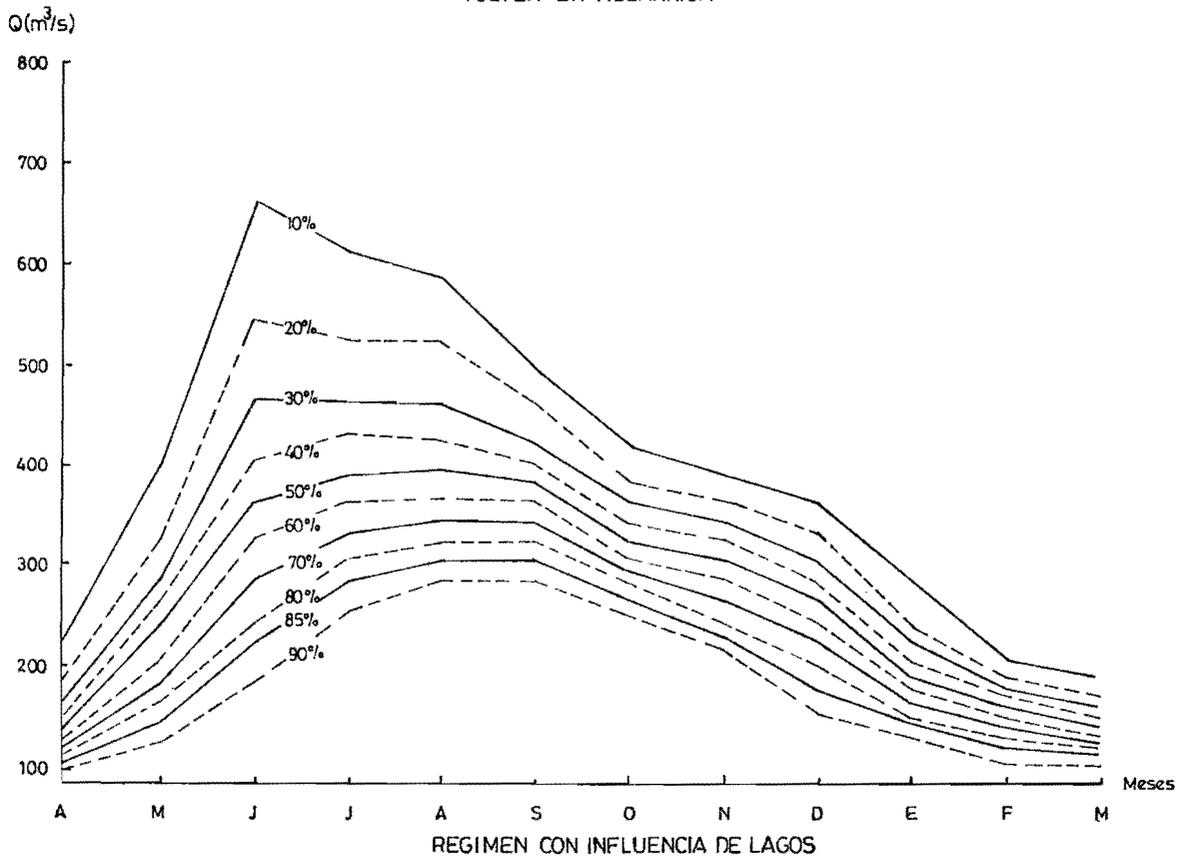
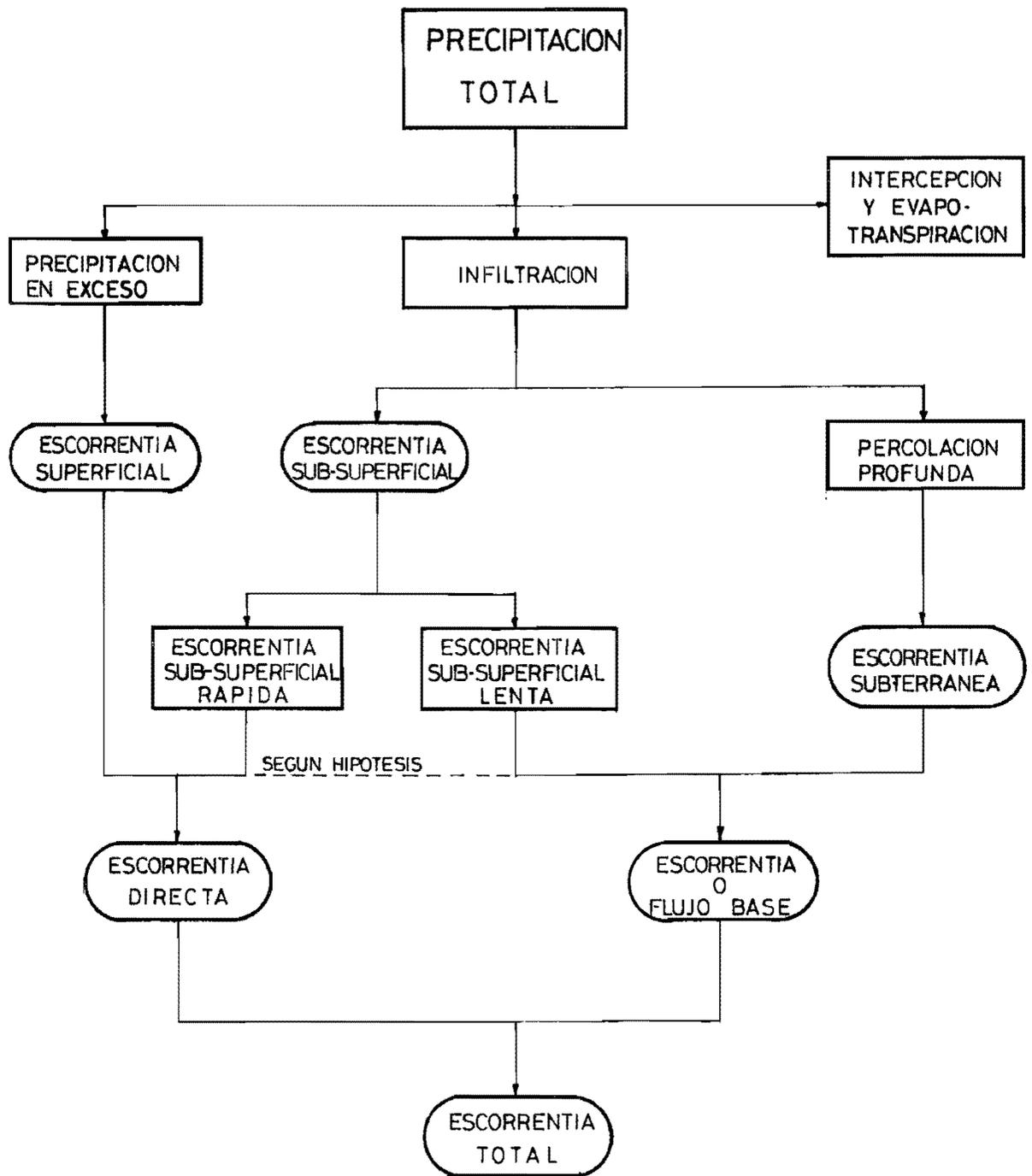


FIGURA Nº 4-3

- 2.4 El hidrograma da información acerca de la escorrentía de una cuenca. La escorrentía es aquella parte de la precipitación que se manifiesta más tarde como corriente de superficie en un río permanente o intermitente.
- 2.5 En forma idealizada se puede distinguir entre 4 tipos de escorrentía, según sea el origen de las aguas: precipitación directa sobre los cauces, superficial, sub-superficial y subterránea.
- 2.6 La escorrentía sub-superficial es aquella parte de la precipitación que se infiltra y escurre lateralmente a través de los primeros horizontes del suelo.
- 2.7 La escorrentía subterránea se origina en la percolación profunda hacia los acuíferos.
- 2.8 Se llama precipitación en exceso a aquella que contribuye directamente a la escorrentía superficial.
- 2.9 En la práctica, en los hidrogramas se distingue solamente entre escorrentía directa y flujo base.
- 2.10 La escorrentía directa es aquella que se incorpora rápidamente a una corriente de superficie. El flujo base lo hace en forma lenta.
- 2.11 En el diagrama de la figura N° 5 se puede apreciar la formación de la escorrentía total, a partir de sus diversas componentes.
- 2.12 En la figura N° 6 se analiza la forma de un hidrograma de crecida pluvial de acuerdo a los conceptos anteriores; y además se muestran algunos hidrogramas de deshielo característicos.

3. USO DE LA INFORMACION FLUVIOMETRICA

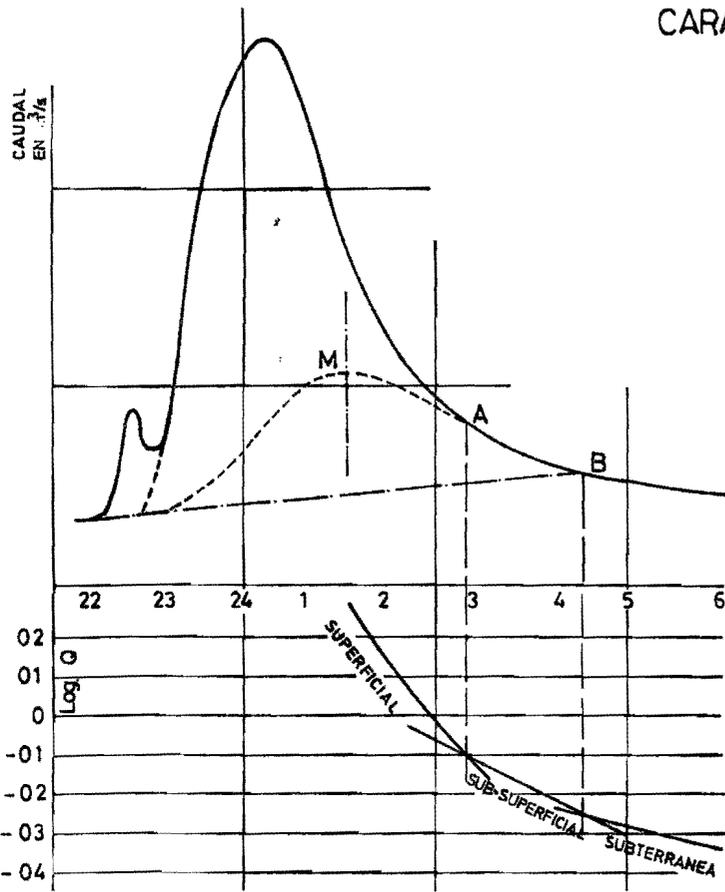
- 3.1 En general para ser utilizada la información fluviométrica en un estudio hidrológico, además de ser confiable, debe disponer de un registro en régimen natural, consistente, completo y para un período de tiempo representativo. Si no se cumplen estos requisitos no es posible comparar los datos de distintas estaciones de medición.
- 3.2 Se llama régimen natural de una corriente de agua al que tendría sin las modificaciones que introduce el hombre (regulación del caudal en embalses, extracciones de agua, etc.). Esta condición es importante en las estaciones de cabecera de los ríos.
- 3.3 Un registro es consistente si los cambios de tendencia que pudieran presentarse en los caudales se deben exclusivamente a causas hidrometeorológicas, y no a problemas de medición o a alteraciones introducidas en la cuenca por el hombre.



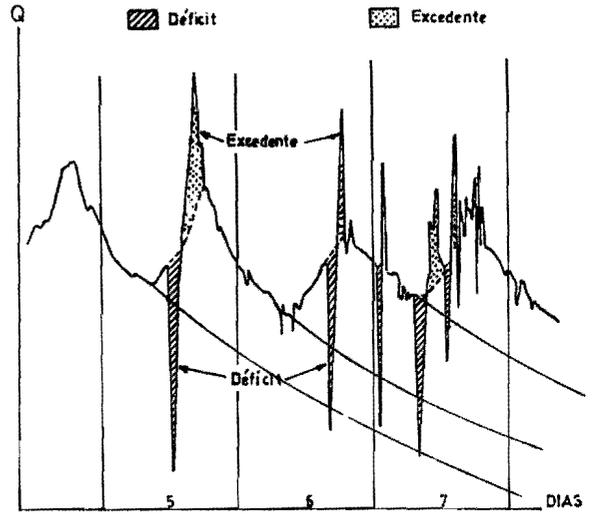
FORMACION DE ESCORRENTIA TOTAL

FIGURA Nº 5

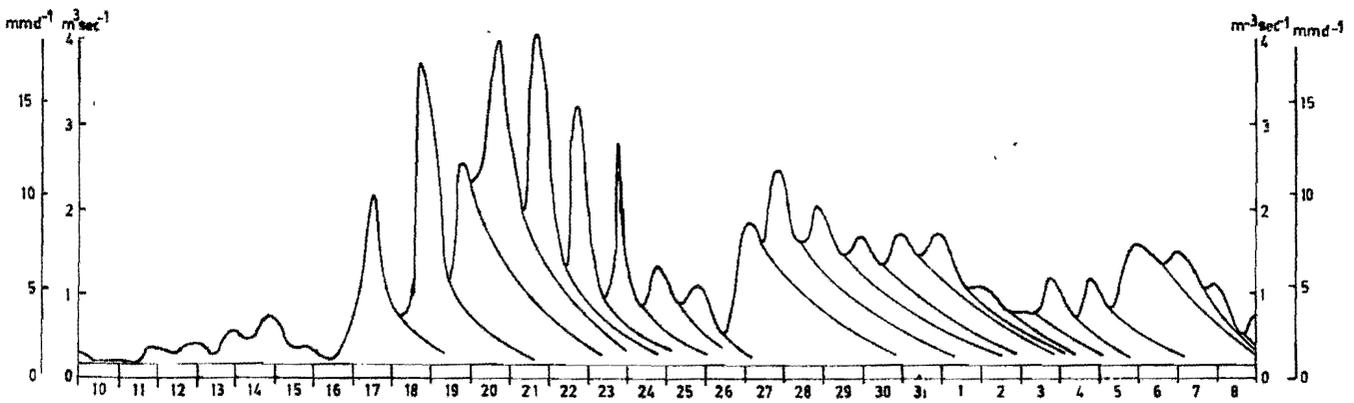
ANALISIS DE HIDROGRAMAS CARACTERISTICOS



A) CRECIDA PLUVIAL



B) DETALLE DE HIDROGRAMA
DE FUSION GLACIAL



C) HIDROGRAMA DE CRECIDA NIVAL

- 3.4 Cuando no se dispone de registros completos, el hidrólogo usualmente rellena la información aplicando diversas técnicas. El relleno de valores de crecidas es especialmente difícil, en cambio el relleno de períodos breves con solamente flujo base no presenta grandes dificultades.
- 3.5 Usualmente se acepta que un período del orden de los 30 años de estadística es representativo de las condiciones medias del escurrimiento. Sin embargo, en estudio de crecidas es deseable disponer de registros de la mayor duración posible.
- 3.6 En general existen 2 grandes problemas que debe resolver la ingeniería hidrológica. Ellos son, la evaluación de los recursos de agua disponibles y la determinación de los caudales máximos que escurren por un cauce.
- 3.7 Ambos problemas son de naturaleza esencialmente estadística. Para su solución los valores más importantes de la serie de datos, son los valores extremos (años muy secos, años muy húmedos, grandes crecidas, etc.), y en consecuencia su registro debe ser especialmente cuidadoso.
- 3.8 En la evaluación de los recursos de agua disponibles se presentan 2 casos, según se considere o no la regulación de los caudales. En el caso sin regulación interesa fundamentalmente la distribución estadística de los caudales, en cambio en el caso con regulación es importante la secuencia de los valores.
- 3.9 Se hacen estudios de caudales máximos con 2 objetivos: i) para el diseño de obras hidráulicas y ii) para la operación de estructuras hidráulicas de seguridad, mediante el pronóstico de crecidas a corto plazo.
- 3.10 Junto a un adecuado registro del hidrograma de crecida y del caudal peak, el análisis de una crecida requiere de la determinación de la hoya tributaria (línea de nieve), de información hidrometeorológica y del conocimiento de las alteraciones significativas que pudieran haberse producido durante la crecida al régimen natural (operación de compuertas, vertederos, etc.)
- 3.11 Es importante destacar que una estadística fluviométrica que no tiene un buen registro de esos acontecimientos extremos (crecidas, sequías, etc.) puede ser inservible para muchos propósitos, aún cuando haya sido controlada por un largo período. Lo mismo se puede señalar si ella no representa un régimen natural o si no es consistente, y no se han tomado las medidas para corregir los registros en forma oportuna.

4. LA RED HIDROMETRICA NACIONAL

- 4.1 El Departamento de Hidrología ha iniciado un programa de revisión crítica de la Red Hidrométrica Nacional. A continuación se entrega un resumen con sus objetivos, fundamentos y alcances.

4.2 El estado actual de desarrollo de la Red Hidrométrica Nacional hace necesario una revisión crítica de los controles fluviométricos que se efectúan y la definición de la red de medición futura. Dicha red de mediciones que se ha llamado Red Hidrométrica Nacional Optima (RHNO), deberá presentar las siguientes características:

- i) Deberá estar diseñada sobre bases similares en todo el territorio nacional.
- ii) Deberá constituir la referencia oficial y definitiva para las mediciones que se desarrollen en el futuro.
- iii) Deberá establecer prioridades entre las distintas estaciones de control, de modo de que sirva de base para la toma de decisiones en aspectos relativos a la operación de la red.
- iv) Deberá proporcionar una información hidrométrica suficiente para fines generales y a un mínimo costo.

4.3 Definición de Red Hidrométrica Nacional Optima (RHNO)

Es aquella capaz de proporcionar a un mínimo costo las características de los caudales, a lo menos con la aproximación correspondiente a un estudio de factibilidad, en cualquier cauce importante del país, mediante la extensión de valores obtenidos en las distintas estaciones que la conforman. Se entiende por características de los caudales, todos los datos cuantitativos promedios y extremos que definen la distribución estadística del caudal estudiado. Se supone la existencia de una adecuada red meteorológica.

4.4 JERARQUIZACION

La RHNO deberá establecer una diferenciación jerárquica entre las diversas estaciones que la conforman, de acuerdo a la importancia de cada una de ellas para el cumplimiento de sus fines. Con ese objetivo se distinguirá entre estaciones primarias y estaciones secundarias.

a) Estaciones Primarias

Son estaciones permanentes y básicas para los estudios de recursos hídricos de la zona.

Ellas deben ser operadas continuamente e indefinidamente de tal modo que proporcionen el fundamento de cualquier estudio de recursos de agua.

Sus registros no pueden ser obtenidos (con una aproximación aceptable) de los antecedentes proporcionados por otra estación primaria.

b) Estaciones Secundarias

Son estaciones que deben ser observadas solamente el tiempo suficiente para establecer una buena correlación entre ellas y las estaciones primarias. En consecuencia, después de un período de mediciones suficientemente largo su control debiera suspenderse.

Estaciones para fines especiales

Las estaciones para fines especiales (investigaciones, proyectos, manejo de recursos etc.) no se consideran parte integrante de la RHNO, y deben mantenerse hasta que cumplan sus fines propios.

4.5 CRITERIOS DE DISEÑO DE LA RHNO

El diseño de la red deberá considerar los siguientes aspectos fundamentales:

i) Aspectos Hidrológicos

Como se ha señalado, la red deberá entregar información acerca de las características de los caudales en cualquier cauce, por extensión de los datos obtenidos en las estaciones hidrométricas que la conforman. Para ello será necesario obtener información de los diversos regímenes hidrológicos que se puedan presentar y disponer de una densidad de estaciones de control de acuerdo a las características climáticas, fisiográficas y de desarrollo económico de la zona. Las estaciones deberán estar ubicadas en cuencas representativas de dichas características.

ii) Aspectos relativos a la evaluación y a la planificación de los recursos hídricos.

La red deberá permitir la evaluación y planificación de los recursos hídricos a nivel de cuencas (o sub-cuencas principales). Por lo tanto, junto con la información de los recursos hídricos existentes deberá proporcionar información general referente a los caudales que son consumidos y al balance hidrológico de la zona. Las alteraciones importantes introducidas por las obras de aprovechamiento al régimen natural, también deberán ser consideradas.

iii) Aspectos económicos

La red propuesta deberá tener costos de instalación y operación mínimos compatibles con los objetivos planteados. Para ello tendrán que aprovecharse al máximo las instalaciones existentes y además será necesario evaluar la información que entrega cada una de ellas, suprimiendo aquellas cuya información pueda ser obtenida de otras con una buena aproximación.

iv) Factibilidad técnica

La red propuesta deberá estar formada por estaciones emplazadas en lugares accesibles y donde la construcción y mantención de las obras sea técnicamente factible.

II. HIDRAULICA

1. Clasificación de los Escurrimientos

Según como varíen, en la corriente, las condiciones de velocidad, presión, etc., en cada punto del espacio se podrá saber si la corriente es "permanente" o "impermanente".

Corrientes permanentes son aquellas en que el movimiento no varía en el tiempo.

Ejemplo: Canal rectangular con escurrimiento permanente.

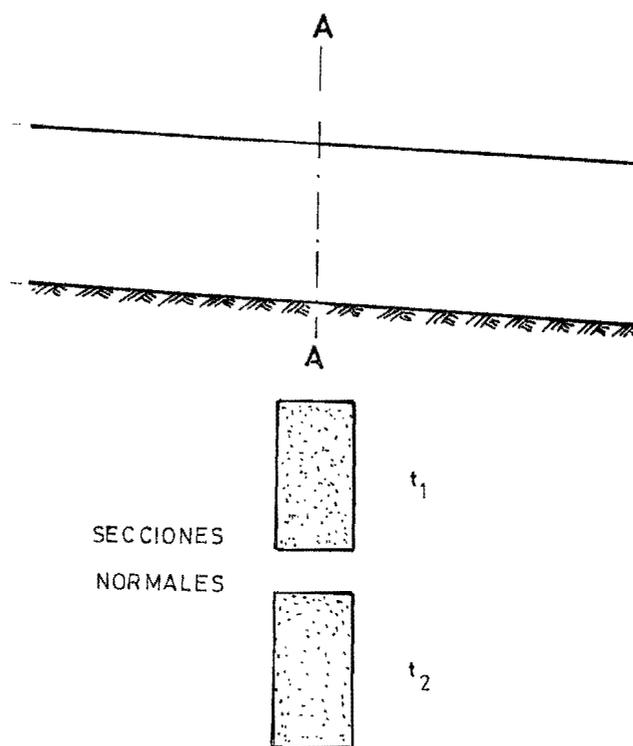


FIG 1

A su vez serán corrientes impermanentes, aquellas en que la sección normal es variable en el tiempo.

Ejemplo: Movimiento de las olas

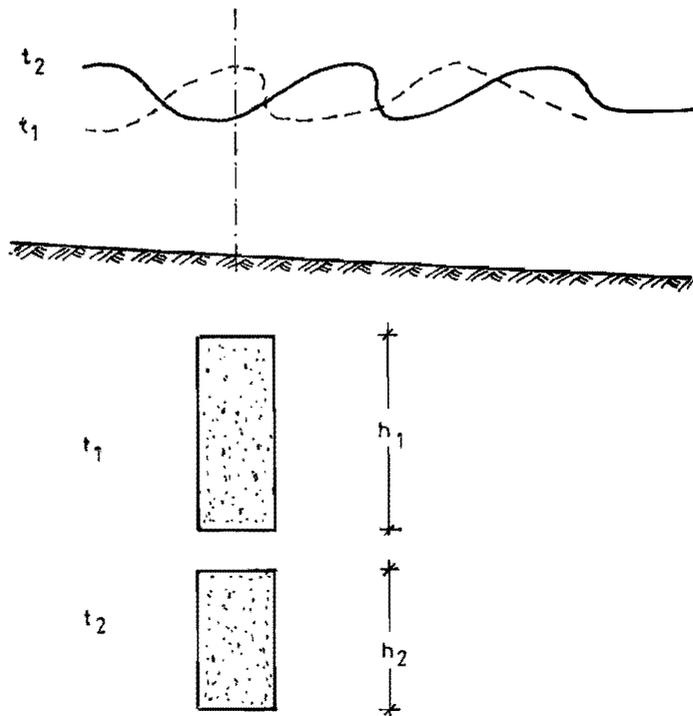


FIG. 2

Si en un escurrimiento, además de ser invariable la sección en el tiempo, las secciones sucesivas son iguales a ella a lo largo del camino, se dice que el movimiento o corriente es "uniforme".

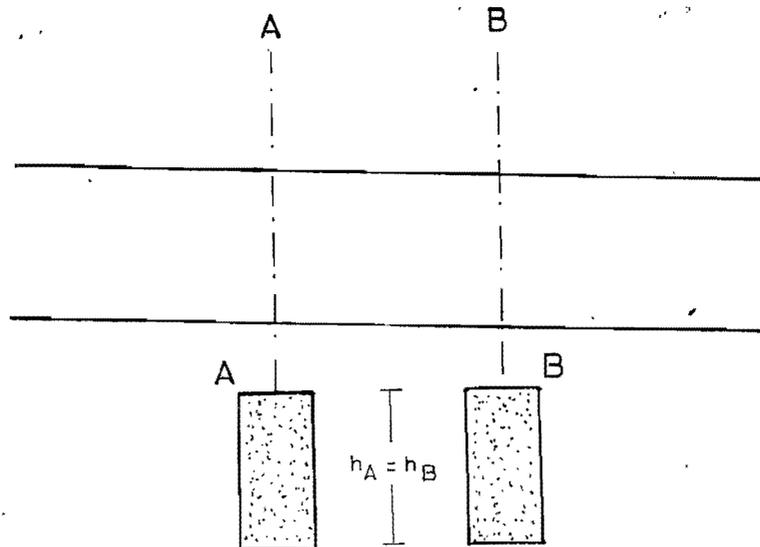


FIG. 3

Por otra parte, si a la invariabilidad de cada sección corresponde una lenta convergencia o divergencia de la corriente, es decir las secciones sucesivas disminuyen o aumentan, se hablará de corrientes "gradualmente variadas".

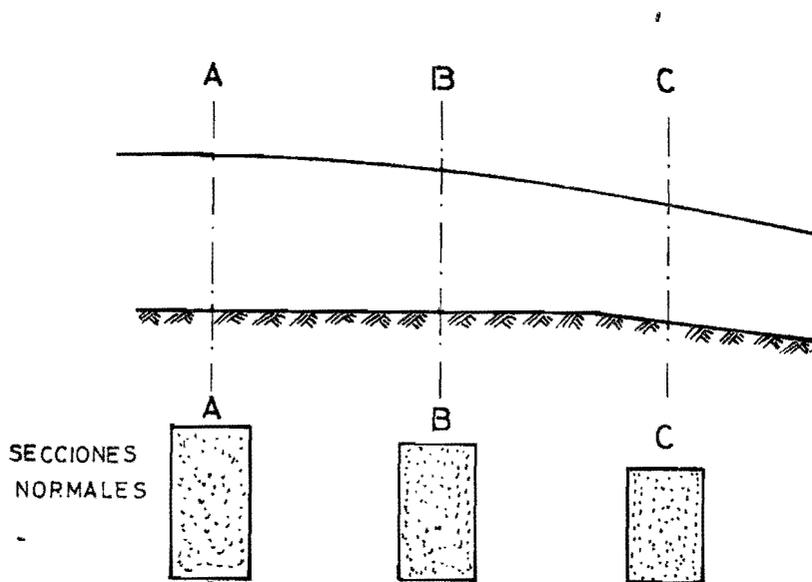


FIG. 4

Teóricamente, el movimiento permanente uniforme es el más sencillo que se puede concebir.

En corrientes cerradas (tuberías) es fácil que se reúnan las circunstancias externas que este movimiento supone:

- invariabilidad de la sección
- eje recto
- pendiente y naturaleza de paredes, constantes pero en corrientes abiertas, especialmente en lechos naturales en los cuales se producen embancamientos, existencia de vegetación, etc. es imposible la reunión de condiciones para producirlo, pero sí llegar a una aproximación de éste.

Además, el escurrimiento por filetes paralelos, se da en la práctica en corrientes de poca velocidad, si ésta es alta el escurrimiento es desordenado, las trayectorias dejan de ser rectas y en la superficie libre se puede distinguir las ondulaciones provocadas.

2. Campo de Velocidades

Definición de líneas de corrientes

Si pudiéramos ir marcando la trayectoria que sigue cada partícula de la masa líquida, se definiría una línea denominada "línea de corriente". Esta trayectoria quedará determinada por las velocidades que se producen en el fluido.

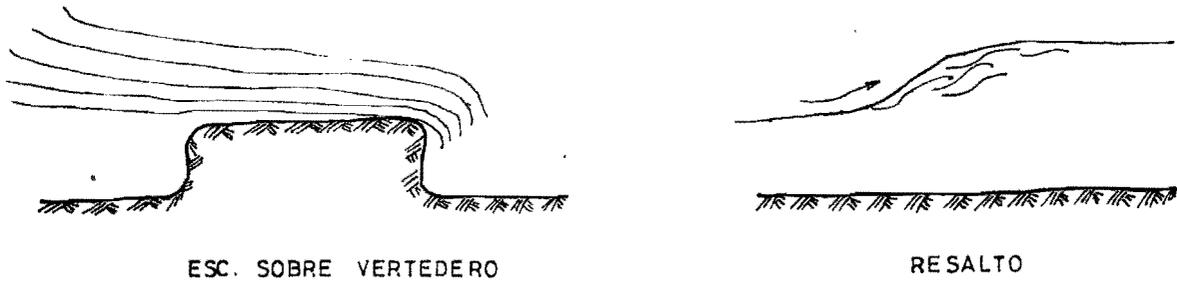


FIG. 5

En la naturaleza las distribuciones de velocidades que se presentan en la vertical son variadas, e incluso pueden producirse velocidades en distintos sentidos.

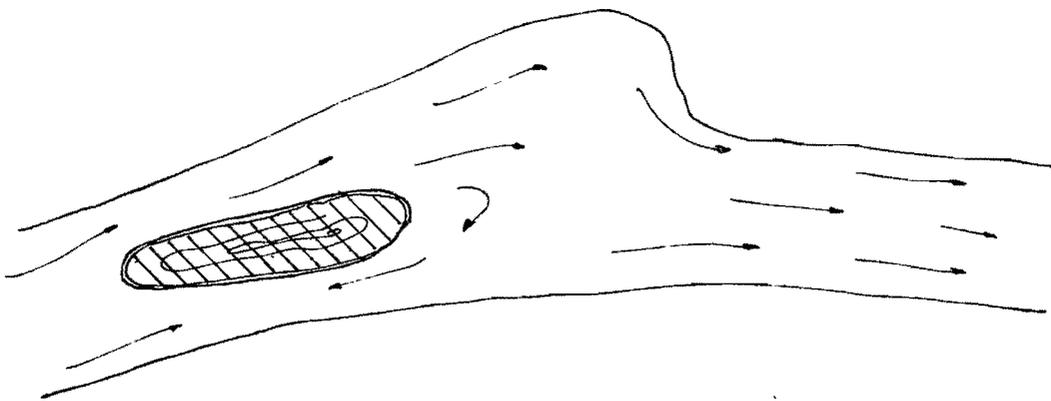
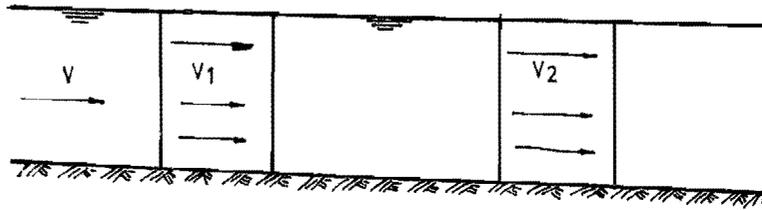


FIG. 6

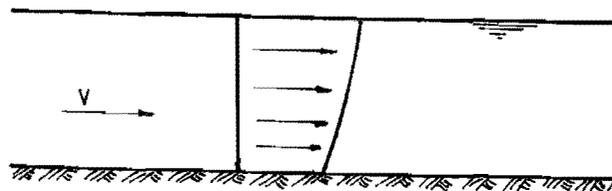
En un movimiento uniforme, la repartición de velocidades a lo largo de una vertical, si no existieran frotamientos, sería constante como lo son todas las demás circunstancias del escurrimiento.



ESCURRIMIENTO UNIFORME (SIN FROTAMIENTOS)

FIG. 7

La existencia de una fuerza de resistencia en el contacto entre el líquido y el lecho, deforma la distribución anterior y genera un campo de velocidades del siguiente tipo:



ESCURRIMIENTO UNIFORME (CON FROTAMIENTOS)

FIG. 8

Las investigaciones han dado origen a múltiples interpretaciones de la curva de repartición de velocidades, siempre sobre la base que ha de ser parabólica cuyo máximo corresponde a la superficie libre y la velocidad de fondo tiene un valor finito.

En los lechos naturales esta situación es más compleja. En la Fig.(9) se muestra distintas formas que pueden formar la "parábola" de velocidades de acuerdo a distintas condiciones del lecho.

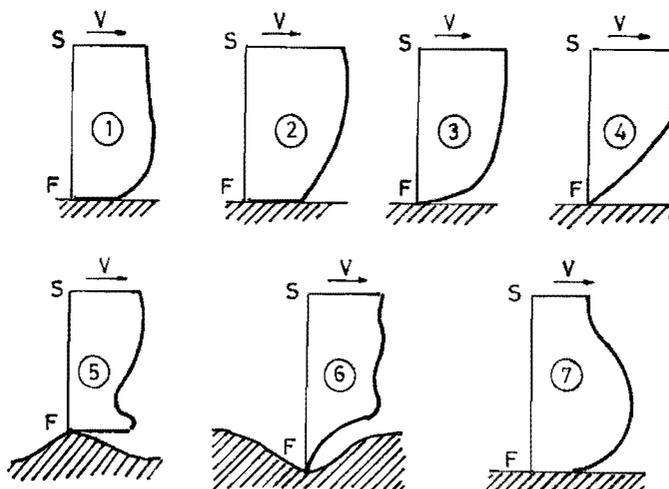


FIG. 9

1. Esgurrimiento muy turbulento, velocidades grandes.
2. Fondo liso, velocidades pequeñas
3. Fondo rugoso, rocas
4. Fondo muy rugoso, vegetación acuática importante
5. Curva de velocidades sobre un montículo, una roca importante, etc.
6. Curva de velocidades sobre una depresión, antes de una roca, etc.
7. Frenado de superficie (ramas sumergidas, etc.)

Como puede apreciarse, es muy raro que la velocidad en la superficie sea la misma que la del fondo o de profundidades intermedias; ésto se debe a que existen los frotamientos y perturban el movimiento.

En la práctica se miden las velocidades en pocos puntos de la vertical y en base a ellos se deduce el valor de la velocidad media.

Es de interés relacionar la velocidad superficial con la velocidad media de la vertical, que en corrientes muy anchas se puede extender a toda la anchura.

La razón entre la velocidad media y la superficial varía, en teoría, de acuerdo a las siguientes tablas:

1. Canales de gran anchura, en que se supone que la velocidad máxima se produce en la superficie (1) :

	h (mt)	=	0.10	0.25	0.50	0.75	1	2	3	5	
<u>U media</u>	}	Concreto	=	0.89	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92
<u>U máxima</u>		Tierra	=	-	-	0.78	0.81	0.82	0.85	0.87	0.88

2. Cauces Naturales

La U media puede tomar los siguientes valores (2):
U media superficial

Velocidades fuertes, profundidades sobre 4,0 mt.	1,00
Velocidades medias en riberas de montañas	1,05
Pendientes suave, riberas medias	0,85
Flujos grandes	0,95
Pendientes medias, riberas medias	0,90 a 0,95
Velocidades muy débiles	0,80

(1) Hidráulica. Fco. Javier Domínguez

(2) Hidrología de Surface. M. Roche

3. Ecuaciones Fundamentales

Para determinar las condiciones de escurrimiento de un líquido, existen ciertas relaciones mediante las cuales pueden calcularse las velocidades y las fuerzas que intervienen en el movimiento de éste.

Estas ecuaciones se determinan para líquidos perfectos, es decir se desprecia la influencia de los frotamientos, se los considera incompresibles, etc. en general situaciones ideales; pero estas relaciones son usadas en líquidos naturales agregando términos correctivos.

3.1 Teorema de Bernoulli

Este teorema es la expresión del principio de la "conservación de la energía", es decir si el escurrimiento o masa de agua lleva una cierta energía en una sección dada, en condiciones ideales, aguas abajo de ésta la energía se mantendría; pero en la realidad esto no sucede ya que a medida que la masa líquida va avanzando la energía hidráulica se va perdiendo.

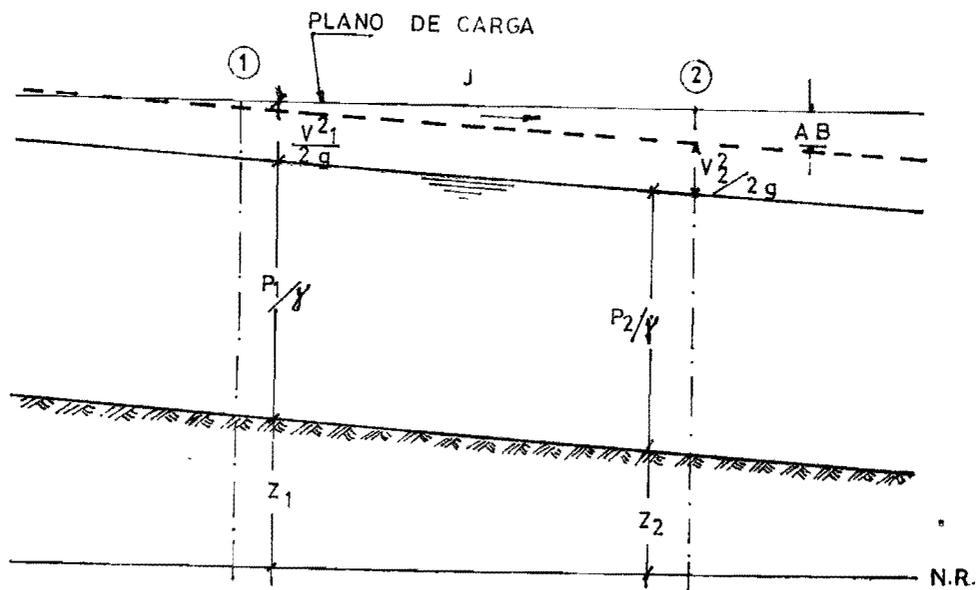


FIG. 10

La expresión matemática de este teorema es:

$$B = Z + p/\gamma + \frac{V^2}{2g}$$

Luego según $Z_1 + p_1/\gamma + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta B$
 FIG. (6)

En que:

- B : Bernoulli o energía total por unidad de masa
z : cota o altura geométrica con respecto a un nivel de referencia arbitrario
p : presión sobre el líquido
v : velocidad media
 ΔB : pérdidas de energía

El término $z + p/\gamma^l$ se lo denomina también cota piezométrica y nos da la idea de la energía potencial del fluido.

El término $\frac{v^2}{2g}$ se denomina altura de velocidad y representa la energía cinética.

En resumen, la masa líquida, al escurrir lleva cierta energía, en que una parte es cinética y la otra es potencial y a medida que avanza éstas pueden ir variando, aumentando una y disminuyendo la otra o viceversa; además de las pérdidas que se producen.

Pérdidas de carga

En todos los líquidos naturales se generan resistencias y frotamientos que provocan una transformación de energía, la cuál en hidráulica se llama pérdida de carga.

Por ejemplo, si pensamos en un río en nuestro país cuya cota piezométrica inicial sea de 3.000 m.s.n.m. y la final el mar (tomando como nivel de referencia el nivel del mar $z=0$), si suponemos nula la velocidad inicial se tiene:

$$B_0 = h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = 3000 + 0$$

$$B_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = 0 + \frac{v_1^2}{2g}$$

si no existieran las pérdidas : $B_0 = B_1$

$$3000 = \frac{v_1^2}{2g} \implies v_1 = 242 \text{ m/seg}$$

Esta velocidad es más de 100 veces superior a la efectiva.

Las pérdidas de carga pueden ser singulares y/o por frotamiento.

Las pérdidas singulares son locales y provocan disipaciones de energía que son fácilmente perceptibles y verificadas en cortas longitudes. Pueden ser provocadas por: ensanches bruscos, cambios de dirección de la corriente, caídas, etc.

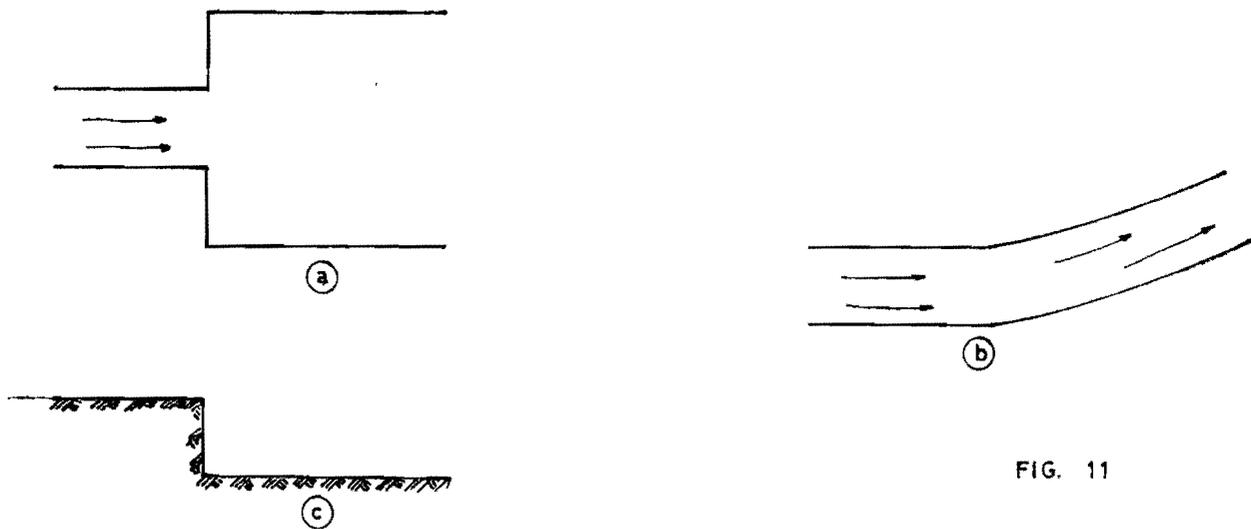


FIG. 11

Estas pérdidas se calculan fácilmente en función de la velocidad del escurrimiento y en base a ciertos coeficientes.

Por otra parte existen las pérdidas de carga por frotamientos, debido a la resistencia que se le presenta al líquido a lo largo de su trayectoria, ésta es una disipación continua de energía.

Ejemplo: Canal con un ensanche, en lecho rugoso.

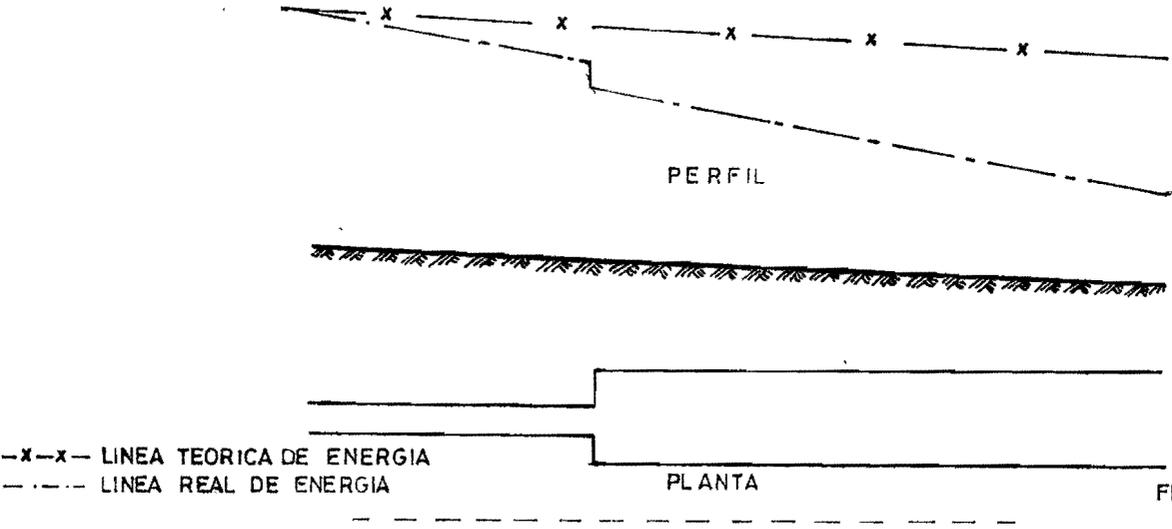


FIG. 12

3.2 Ecuación de continuidad

En las corrientes, la medida que tiene mayor importancia es el gasto o caudal, que es el volumen líquido que pasa por una sección en la unidad de tiempo.

En forma general podemos decir que el gasto total de una corriente de sección normal A y de velocidad media V es:

$$Q = A \cdot V$$

En que se llamará "velocidad media" al promedio aritmético de la velocidad de todos los filetes de corriente.

Luego, si se tiene el gasto de un aforo y el área mojada, se puede obtener la velocidad media total $v = Q/A$

En una corriente permanente, el gasto que pasa por cada sección es constante.

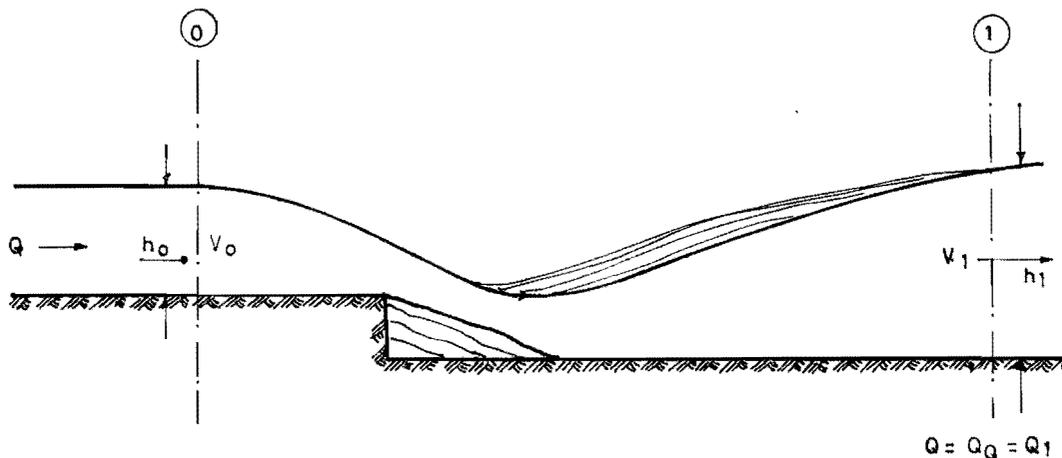


FIG. 13

$A_0 \cdot V_0 = A_1 \cdot V_1 = \text{cte.}$ Esta es la ecuación de continuidad en los fluidos ideales.

4. Escurremientos de Río y Torrente

Ya se habló anteriormente de cómo puede expresarse la energía que lleva una corriente, a través del Bernoulli y que en él quedan expresados la influencia de la energía cinética y de la energía potencial. Por lo tanto en una corriente puede producirse lo siguiente:

- i) que ésta sea de gran altura de agua y de poca velocidad (E_p es mayor que la E_c) y se le denomina régimen de "río"

o bien

- ii) que la corriente tenga poca altura pero escurra a una gran velocidad (E_c es mayor que la E_p) se le denomina régimen de "torrente"

Para una misma condición de energía total puede presentarse cualquiera de esas posibilidades y a su vez podemos imponer alguna de esas condiciones.

Si se graficara para cada valor de energía las dos alturas posibles en el escurrimiento, se tendría:

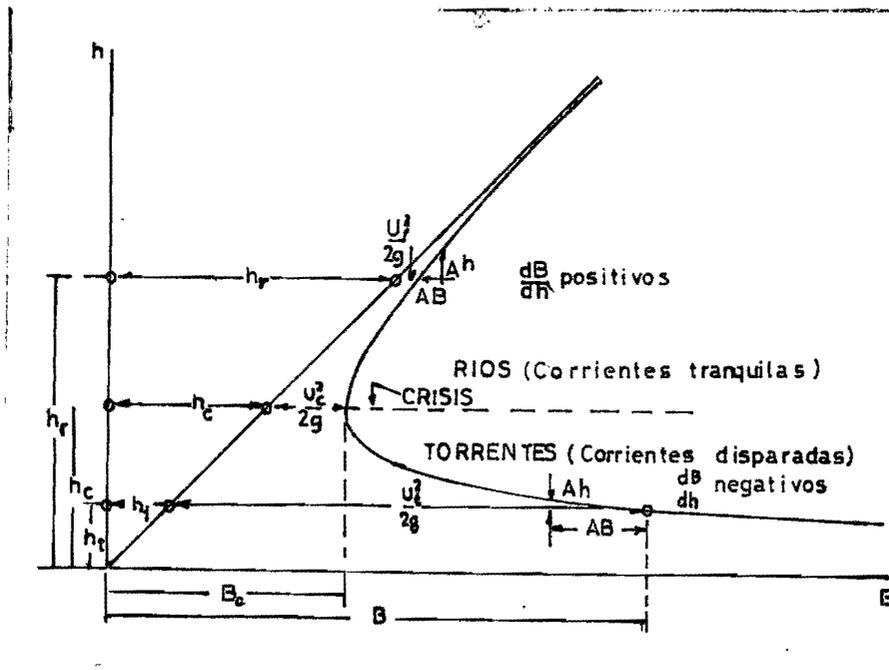


FIG. 14

El Bernoulli referido al fondo de la sección se expresa como

$$B = h + \frac{v^2}{2g}$$

De esta forma, en la Fig. (14) si partimos graficando las alturas para B_1 y disminuimos esta energía, llegará un momento en que habrá una variación rápida de alturas sin variación apreciable del Bernoulli hasta llegar a un valor único de energía, el mínimo que se producirá para una altura única llamada "altura crítica".

Luego, en un escurrimiento crítico, la profundidad de él como la velocidad son llamadas críticas y se denominan por h_c y V_c .

Existe otro hecho que caracteriza también al escurrimiento crítico: su velocidad es la misma con que avanza una onda de traslación.

La onda de traslación es una elevación o una depresión que se propaga conservando su forma geométrica. Se origina como elevación cuando se agrega bruscamente un volumen de agua, o cuando se introduce un cuerpo sólido y como depresión cuando se extrae repentinamente parte del agua. Ver figura (15)

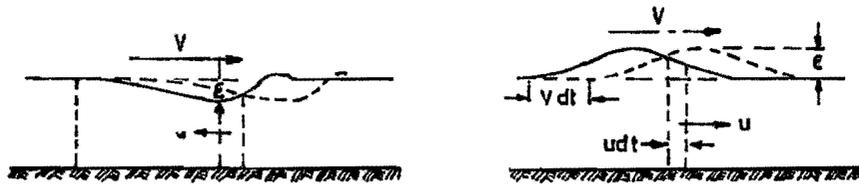


FIG 15

Las ondas se van trasladando y al mismo tiempo extinguiendo y su paso por una sección provoca un movimiento en el agua, en el mismo sentido de la traslación de la onda si se trata de elevación y en sentido inverso si es depresión.

Se dijo anteriormente que los ríos tienen velocidades inferiores a la crítica y los torrentes velocidades mayores. Si además consideramos que la velocidad de onda es igual a la velocidad crítica, se concluye que:

Los ríos están a merced de una variación que se propaga hacia aguas arriba; en cambio un torrente no puede ser influenciado por variaciones de aguas abajo lo que equivale a decir: "Los ríos dependen de aguas abajo, los torrentes sólo de aguas arriba".

Ejemplo:

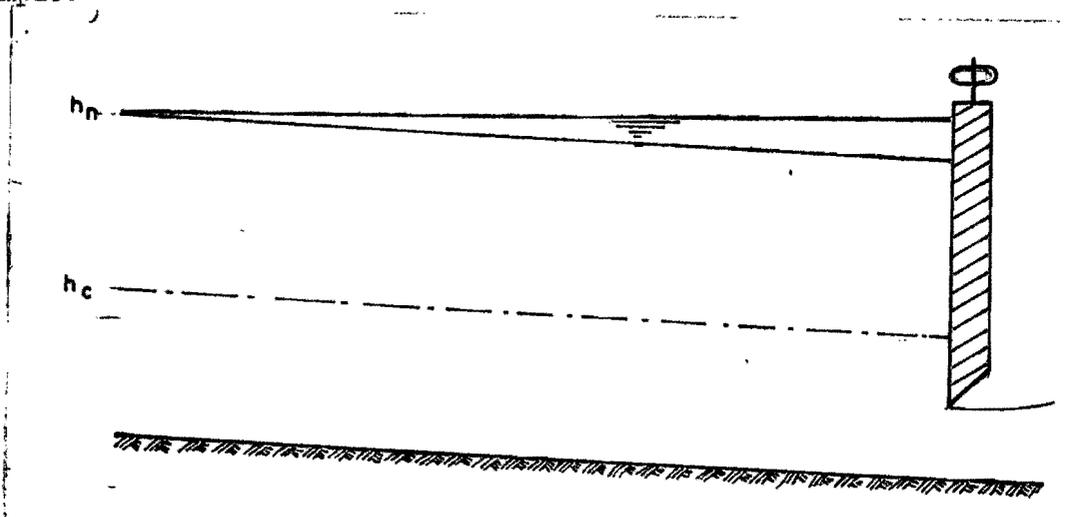


FIG. 16

En este caso, la compuerta ubicada aguas abajo del río provoca un peralte del agua, que se propaga hacia aguas arriba y la altura del escurrimiento tiende asintóticamente a la altura normal (h_n).

5. Eje Hidráulico

El Eje Hidráulico es la referencia más sencilla de la corriente. Es el lugar geométrico de los puntos medios de la superficie libre del agua, en varias secciones sucesivas.

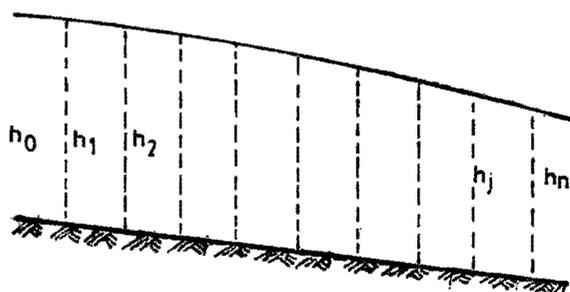


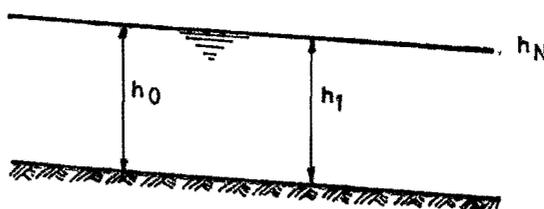
FIG. 17

En el caso de corrientes abiertas, el Eje Hidráulico corresponde a la cota piezométrica.

La profundidad que adquiere un fluido en movimiento uniforme, para un gasto dado y en un lecho dado, se llama altura normal y se denomina por h_n .

Por otra parte, de acuerdo al análisis hecho en el gráfico de la Fig. (14), serán profundidades de río (h_r) aquellas superiores a la altura crítica y profundidades de torrente (h_t) si son inferiores a ella.

En movimiento permanente uniforme, el eje hidráulico será paralelo al fondo, con altura normal.



$$h_0 = h_1 = h_N$$

FIG. 18

En el caso de movimiento gradualmente variado, la curva que define el eje hidráulico se puede presentar de las siguientes formas:

- i) Tener cierta inclinación con respecto a la paralela al fondo.

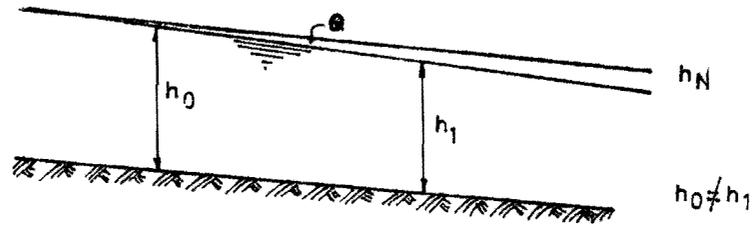


FIG. 19

- ii) Normal al fondo. Cuando el eje está próximo al escurrimiento crítico se inclina con respecto al fondo tendiendo a ponerse normal a él y alejándose de la crisis tiende asintóticamente a la altura normal.

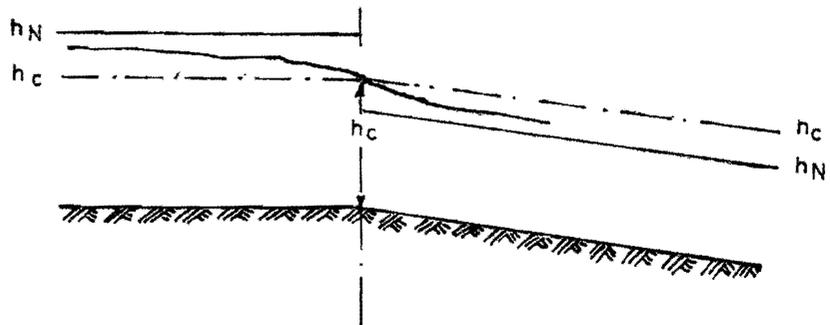


FIG. 20

Los cambios de pendiente, originan distintos tipos de escurrimiento.

CAMBIOS DE PENDIENTE

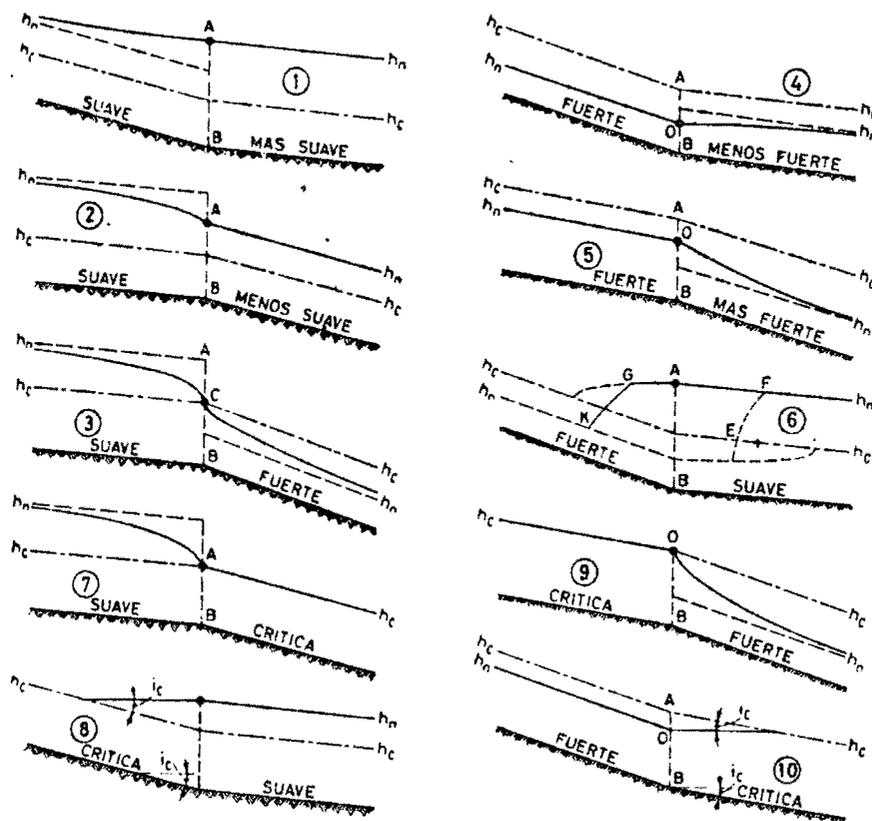


Fig. N° 21

El cálculo del eje hidráulico en un escurrimiento puede hacerse partiendo de una sección con valores conocidos de altura, sección de escurrimiento, velocidad, etc. En este caso, con la ayuda de la ecuación de Bernoulli generalizada, es decir considerando que entre una sección y otra hay pérdidas de energía, se calcula la distancia hacia aguas arriba (o abajo) a la cual se encuentra otra altura que nos damos.

Los puntos de partida en el cálculo son siempre fáciles de obtener, ya sea por una singularidad, algún punto de movimiento uniforme, cambio de pendiente, etc.

La producción del escurrimiento crítico en una sección, aísla el resto de la corriente de variaciones provenientes de aguas abajo. Es una desligazón del eje hidráulico y de saber que se produce en una sección es un buen punto de partida para el cálculo de éste.

Por otra parte, cuando existe un régimen torrencial dado por condiciones de aguas arriba (compuerta, pendiente fuerte, etc.) y por condiciones de aguas abajo existe un río; si no existe singularidad en el lecho, la única forma de pasar de torrente a río es por medio de un ensanche de la corriente lo cual se traduce en un torbellino de agua denominado resalto.

Se transforma la energía cinética en energía potencial y se pasa de una altura de torrente a altura de río, transformación que también presenta una pérdida de carga.

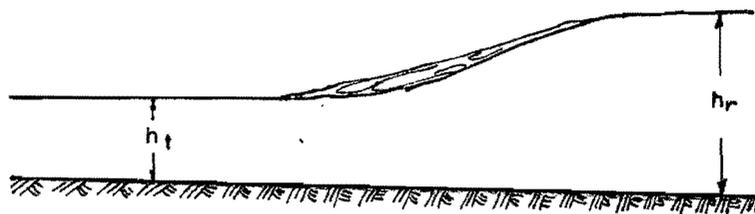


FIG. 22

Hasta aquí se ha analizado la determinación del eje hidráulico, conocido el gasto que pasa por una sección y las características de ésta. Sin embargo, es posible invertir el problema, vale decir conociendo el eje hidráulico y las características de la sección se determina el gasto mediante métodos llamados indirectos, de los cuales citaremos algunos:

1) Método Area Pendiente

Este método se basa fundamentalmente en la utilización de las ecuaciones de canales en movimiento uniforme (Manning), perfiles de la superficie del agua (eje hidráulico), secciones transversales y coeficientes de rugosidad en el tramo en estudio.

Es muy útil para determinar el gasto en caso de crecidas que han dejado las trazas marcadas en ambas riberas del tramo del cauce que se pretende analizar.

Para la aplicación del método se requiere:

- Perfiles transversales, en un tramo cuya longitud debe ser igual o mayor a 75 veces la profundidad media del cauce. Se recomienda tomar un mínimo de tres secciones en el tramo, para poder aplicar el método.
- Perfil longitudinal de las trazas de la crecida en la orilla izquierda y orilla derecha del tramo considerado.
- Definición del tipo de lecho para estimar el coeficiente de rugosidad.
- Dibujo en planta del cauce para determinar pérdidas por estrechamientos y/o ensanches.

2) Angostamientos

Este método puede ser usado cuando hay algún estrechamiento en el cauce. Utiliza las marcas dejadas por las crecidas en el angostamiento (eje hidráulico)

y la geometría de éste; y con la ayuda de las ecuaciones de energía (Bernoulli inicial, final y pérdidas de carga) y de continuidad, puede obtenerse el gasto.

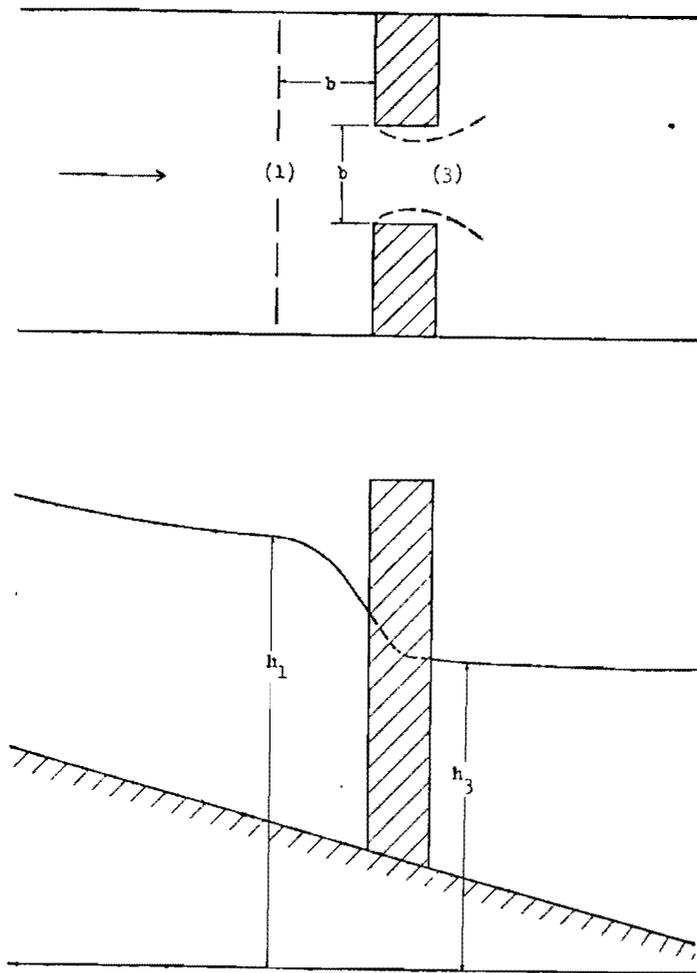


FIG. 23

6. Cálculo de la altura normal

Se habla en hidráulica que los canales poseen un movimiento uniforme aproximado, cuando la diferencia entre las magnitudes reales y las ideales, no superan la exactitud práctica requerida.

Fórmula de Manning

$$Q \frac{n}{\sqrt{I}} = \Omega R^{2/3} \quad \text{o bien} \quad Q = \frac{\sqrt{I}}{n} \Omega R^{2/3}$$

Q = gasto

n : coeficiente de rugosidad de Manning y se determina por simple inspección del tipo de paredes del cauce.

i : pendiente del eje hidráulico, que en movimiento uniforme es igual a la pendiente del lecho.

Ω : sección transversal

R : radio hidráulico $R = \frac{\Omega}{X}$

En esta ecuación que está deducida para condiciones de flujo uniforme en canales, se ven representadas las condiciones que influyen en el gasto que acepta una sección determinada. Estas condicionantes son: la sección (Ω), la resistencia que presenta la rugosidad del lecho (n); la longitud que realmente está en contacto con el lecho (R), y las disipaciones continuas de energía (i) provocadas por los frotamientos.

En caso de crecidas, o sea una lámina gruesa de agua, la pendiente del eje hidráulico toma un valor promedio pasando por alto las pequeñas variaciones de pendientes del lecho: de tal forma que pueden aplicarse con mayor seguridad la fórmula de Manning y determinar la profundidad normal del escurrimiento, o el gasto.

A continuación se presentan algunos valores de rugosidad (n) para usarlo en la fórmula de Manning.

Descripción del Canal	Valor de n
Canales de Tierra	0.020 - 0.025
Canales con lecho de piedra, con vegetación en los bordes	0.030
Corrientes naturales con vueltas y curvas; limpias, pero con ensanches	0.035
Ríos en secciones irregulares en estiaje	0.040 - 0,100
Inundaciones en Planices	0.100 - 0.175

7.- Teoría de la Curva de Descarga

Se denomina curva de descarga de una sección a la relación que se obtiene entre el gasto y el nivel superficial del escurrimiento $Q = f(h)$.

Generalmente se admite que la relación $Q = f(h)$ es unívoca, pero existen ciertas circunstancias que lo impiden y, a una misma cota en las escalas pueden corresponder caudales muy diferentes.

Teniendo presente las definiciones hechas anteriormente en cuanto a flujos permanentes, uniformes, escurrimientos de río y torrente, altura y velocidad crítica, eje hidráulico, etc.; se definirá: Control.

Control: es toda particularidad del canal o río (fuerte aumento de pendiente, estrechamiento importante, umbral de vertedero, etc.) que provoque un aumento suficiente de la velocidad del agua para hacer pasar la corriente de régimen de río a torrente. Existe pues, en el lugar de control una velocidad media igual a la velocidad crítica.

Los controles pueden ser naturales o creados por la mano del hombre. Un umbral rocoso, un banco de arena o una línea de bloques gruesos, más o menos aumentado por un relleno de materiales finos, pueden crear una ruptura de pendiente o aún un verdadero vertedero que impone en la sección donde se encuentra, una relación casi estable entre el caudal y la cota de la superficie del agua.

El control es llamado "permanente" si mantiene invariables en el tiempo sus características geométricas y su acción hidráulica para todos los niveles del agua.

7.1 Estaciones en que la relación $Q = f(h)$ es unívoca.

Solamente en los casos siguientes, existirá relación unívoca entre el caudal Q y la altura h leída en la escala limnimétrica.

- 1.- Corriente o flujo uniforme
- 2.- Corriente permanente con control invariable en el tiempo

1.- Corriente Uniforme

En el caso de una corriente uniforme, es fácil visualizar la relación $Q = f(h)$ y para ello se tienen varias ecuaciones que han sido ampliamente verificadas por la experiencia. Como ya se ha visto la ecuación de Manning, por ejemplo, involucra las condiciones geométricas y de rugosidad del lecho. Y, en caso de variar alguna de ellas, se modificará el escurrimiento.

2.- Corriente con "control"

Basándonos en la ecuación de la energía, se deduce que para un lecho de topografía dada, se pueden calcular paso a paso, la altura de todos los puntos de la rasante superficial del agua para cualquier caudal Q , a condición de conocer la cota "ho" del agua para ese mismo caudal en una sección cualquiera; en la práctica

esta última será una "sección de control". En consecuencia habrá una relación unívoca entre un h cualquiera y el caudal.

Si el régimen es de río en el perfil transversal considerado, esta sección de control se encuentra aguas abajo, mientras que si el régimen es torrencial, la misma se halla aguas arriba. Ver fig. (24)

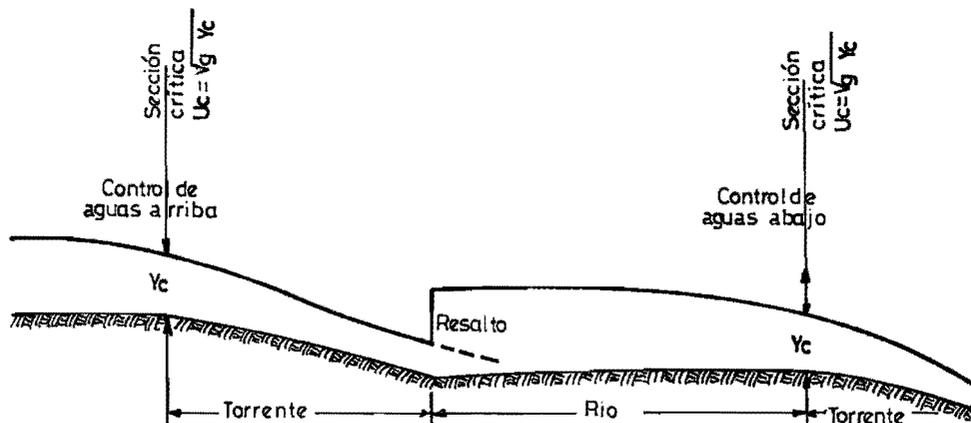


FIG. 24

Para que el eje hidráulico no cambie para un caudal dado, se requiere lo siguiente:

a) La Ley $h_o = f(Q)$ impuesta al nivel superficial del agua correspondiente a la sección de control sea invariable en el tiempo.

Esta ley corre el riesgo de ser alterada, por una modificación geométrica del control (erosión, maniobras de las compuertas de una presa móvil, etc.) sea por un cambio de sus condiciones de funcionamiento hidráulico (ejemplo: Supresión en un tramo en régimen torrencial a consecuencia de la elevación del nivel del agua, aguas abajo de este último).

b) La topografía y rugosidad del lecho no se modifiquen con el tiempo entre la sección de control y aquella en que se encuentra la escala limnimétrica.

c) No se produzca un cambio de régimen en la sección de medición. Esto puede ser si cambian las condiciones de aguas arriba, como la geometría o la rugosidad a tal punto que varíen el escurrimiento.

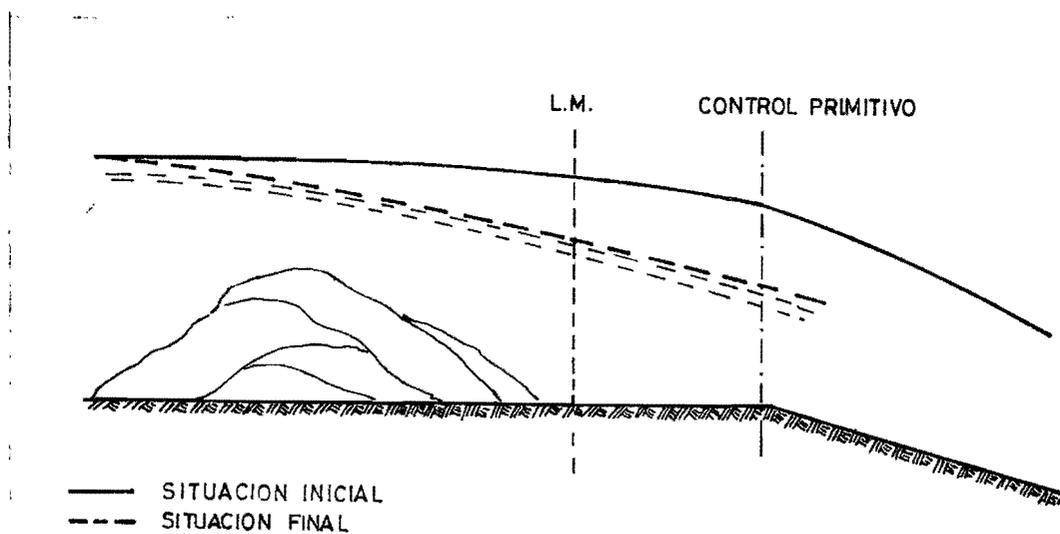


FIG. 25

Por otra parte, puede suceder que, un control que es válido para determinados caudales, deje de serlo para caudales mayores y pase a ser importante el control que se encuentra aguas abajo, con lo cual la curva de descarga se modificará.

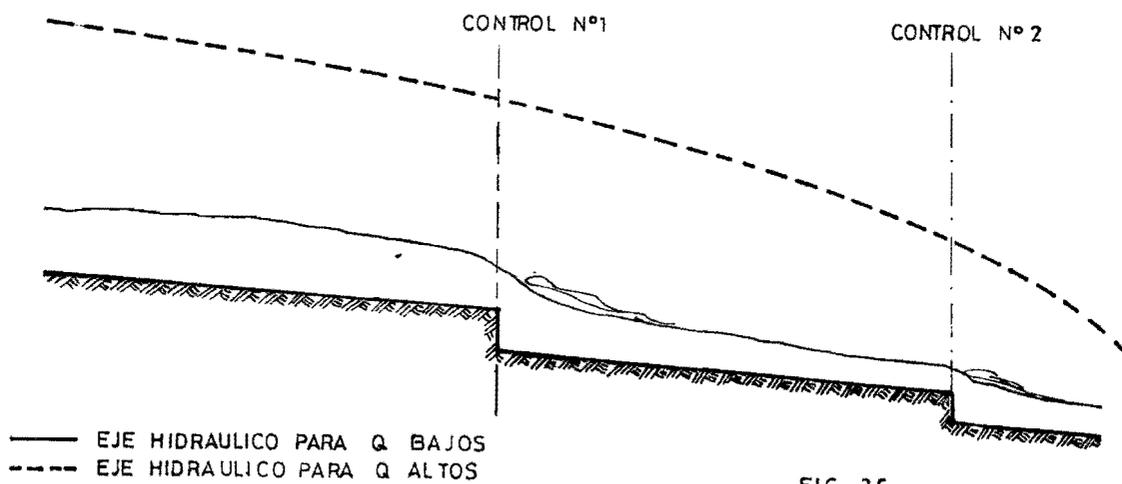


FIG. 26

Las condiciones principales para la instalación de una estación de escalas limnimétricas son:

- 1.- El control - único si es posible, cualquiera que sea el caudal - debe ser estable y permanente.
- 2.- Debe ser también poco influenciado por controles eventuales situados más abajo, de los cuales es, en general difícil eliminar la acción en aguas altas.
- 3.- La escala debe ser instalada en la proximidad del control y, con preferencia, en el tramo de canal de aguas bajas situado inmediatamente aguas arriba. La curva de gasto es así determinada, sobre todo, por las características del control, y será poco alterada por modificaciones eventuales del lecho entre aquél y la escala.
- 4.- Los aportes de los afluentes entre la sección de control y la escala deben ser insignificantes, de manera de no correr el riesgo de introducir "condiciones a los límites variables" principalmente en período de crecida de dichos afluentes y que las mismas no se produzcan al mismo tiempo que las del río principal.

Las consideraciones anteriores muestran toda la importancia del estudio sobre los lugares de los controles para obtener una estación cuya curva de gasto sea estable y regular.

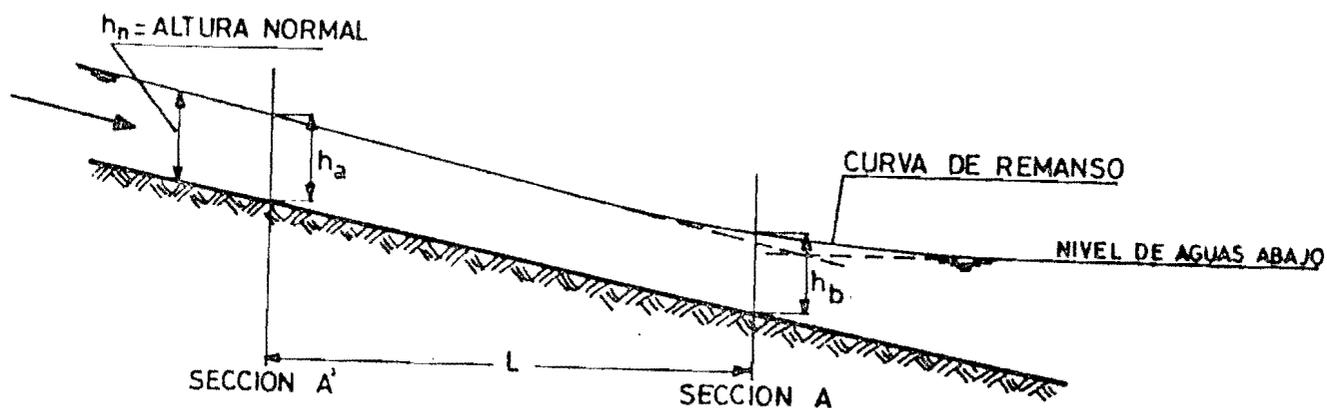
7.2 Estaciones en las cuales la relación no es unívoca (estaciones afectadas por remanso).

En la práctica existen ciertos casos en que no es posible que la relación $Q = f(h)$ sea unívoca. Si eso ocurre, a una misma cota de la escala limnimétrica pueden corresponder gastos muy diferentes.

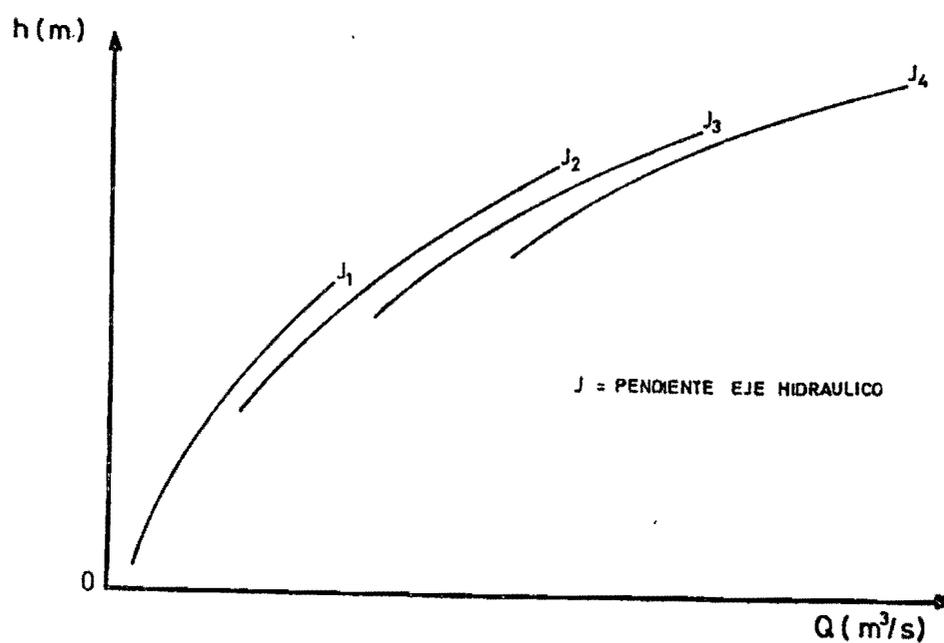
Estos casos se presentan usualmente cuando una estación queda influenciada por las mareas, o cuando el río se está controlando cerca de su desembocadura en otro mayor.

Estas circunstancias implican un trabajo bastante mayor para establecer la relación de caudales.

Se puede obtener buenas medidas instalando estaciones que tengan dos escalas limnimétricas, situadas a una distancia L entre sí. El caudal será función de la altura limnimétrica y de la pendiente del eje hidráulico. Por lo tanto, se construyen curvas de descarga utilizando la pendiente del eje hidráulico como parámetro. Ver Fig. (27) y Fig. (28)



CURVAS DE REMANSO EN UN RIO
FIGURA N° 27



ABACO DE CURVAS DE DESCARGA DE UNA SECCION AFECTADA POR REMANSO

FIGURA N° 28

Se pueden presentar dos casos:

- La estación base (aguas abajo) no siempre está afectada por el remanso.
- La estación base está siempre afectada por el remanso.

Para obtener mayores detalles sobre la metodología usada en estos casos, remi-
tirse a las Normas Hidrométricas, Tomo II, (paq. 6-47).

CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS HIDRICOS



3 5617 00001 3813