

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA

REPUBLICA DEL PERU



1987

C U R S O

HIDROLOGIA GENERAL

Y

APLICADA

PROYECTO PER 81 / 007

"HIDROLOGIA, CLIMATOLOGIA Y AGROMETEOROLOGIA"

PNUD / OMM

SENAMHI/CORDELOR

- 1983 -

C O N T E N I D O		Pág.
I	PRESENTACION	- ii -
II	TEMA : PRINCIPIOS BASICOS Ing. Nicolás Echeverría M.	1
III	TEMA : LA CUENCA HIDROGRAFICA Ing. Luis Vega C.	23
IV	TEMA : PRECIPITACION Y CAUDALES EVAPORACION Ing. Walter Gómez L.	52
V	TEMA : ESTADISTICA EN HIDROLOGIA Ing. Nicolás Echeverría M.	109
VI	TEMA : CALIDAD DE LAS AGUAS NATURALES Ing. Orlandino Arteaga T.	137
VII	TEMA : TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Ing. Orlandino Arteaga T.	158
VIII	TEMA : USO DE COMPUTADORAS EN HIDROLOGIA Ing. Orlandino Arteaga T.	211

I PRESENTACION

A través del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD- y con la Asesoría Técnica de la Organización Meteorológica Mundial -OMM-, el Gobierno de la República del Perú lleva a cabo el Proyecto PER 81/007 "Hidrología, Climatología y Agrometeorología".

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología -SENAMHI- ha sido designado ejecutor del Proyecto, en coordinación con varias instituciones del Gobierno y el apoyo financiero de la Corporación de Desarrollo del Departamento de Loreto -CORDELOR-

El proyecto pretende establecer un mecanismo operacional para la coordinación de las actividades meteorológicas e hidrológicas en el país, con énfasis en la cuenca del río Amazonas. Así mismo, establecer una base de datos confiable y apropiada para los estudios de desarrollo y conservación de los recursos naturales de la región.

A través del Proyecto se propiciará la coordinación de los estudios hidrológicos y climatológicos encaminados a la planificación y fomento del desarrollo de la cuenca amazónica a nivel nacional e internacional.

Parte de sus actividades lo conforma el adiestramiento de personal nacional a todos los niveles, pues se tiene conciencia que solo contando con recursos humanos capacitados, pueden continuar y man

tenerse las funciones de estudio e investigación orientados hacia el conocimiento de los recursos hídricos de que dispone el país.

Con tal objetivo en mente, el Proyecto organiza y lleva a cabo cursos de capacitación en los campos de Meteorología, Agro-Climatología, Hidrología y ciencias afines.

Bajo este marco, se organizaron los primeros cursos cortos sobre "Hidrología General y Aplicada" y "La Meteorología y sus aplicaciones", los cuales se llevaron a cabo en la ciudad de Iquitos, capital del Departamento de Loreto.

A los mismos asistieron 90 profesionales de diversas ramas de ingeniería laborantes en varias instituciones públicas y privadas de la región amazónica. Los eventos constituyeron todo un éxito, habiéndose logrado despertar las inquietudes de los participantes en los campos de Hidrología y Meteorología. A través del curso se dieron los enfoques teóricos y prácticos sobre el importante papel que desempeñan dichas disciplinas en la ejecución de cualquier proyecto de aprovechamiento de los recursos naturales.

Como complemento obligado de los cursos y para una mayor efectividad, se recopilaron las conferencias de los profesores visitantes, las cuales se han plasmado en dos volúmenes, correspondiendo éste al curso de Hidrología General y Aplicada, cuyo personal docente estuvo constituido de la siguiente

./.

manera :

- Ing. Nicolás Echeverría Morales.
Profesor Asociado de Hidrología, Aguas Subte
rráneas e Irrigación.
Universidad Nacional Agraria La Molina

- Ing. Luis Vega Cedano.
Director General del SENAMHI
Profesor de Hidrología
Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

- Ing. Walter Gómez Lora.
Hidrólogo del SENAMHI
Profesor de Hidrología
Universidad Nacional Federico Villarreal.

- Ing. Orlandino Arteaga Toledo.
Experto Hidrólogo OMM, Proyecto PER 81/007
Ex-profesor de Hidrología y Potamología
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
Universidad de San Carlos. Guatemala

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidro
logía -SENAMHI-, se complace en presentar el primer
volumen que recopila la materia impartida en el
curso de Hidrología General y Aplicada, deseando -
con ello contribuir al desarrollo de las activida -
des hidrológicas en el país.

Iquitos, Noviembre 1983

TEMA : PRINCIPIOS BASICOS

Ing. Nicolás Echeverría M.

	I n d i c e	Pág.
2.1	LA HIDROLOGIA Y SU DESARROLLO	3
	2.1.1 Antecedentes históricos	3
	2.1.2 Definición	7
2.2	EL CICLO HIDROLOGICO	10
2.3	SISTEMA HIDROLOGICO REGIONAL	14
	2.3.1 Balance Hidrológico	14

Figuras

2.1	Representación esquemática del Ciclo Hidrológico	11
2.2	Representación esquemática del sistema hidrológico general	13
2.3	Representación esquemática del sistema hidrológico regional	15

2.1 LA HIDROLOGIA Y SU DESARROLLO

2.1.1 Antecedentes históricos

Desde tiempos remotos se han estudiado las propiedades físicas y químicas del agua así como su comportamiento, tanto en la atmósfera, como sobre y debajo de la tierra.

Los griegos (1400 A.C.) iniciaron el estudio de los escurrimientos superficiales, tratando de conocer el origen de los ríos. Llegaron casi en forma exacta a definir el ciclo hidrológico. Los Romanos (15 A.C.) en la persona de Marco Vitruvius dieron también una versión del ciclo hidrológico incluyendo la infiltración del agua hacia el subsuelo.

Durante el Renacimiento, los conceptos puramente filosóficos de la hidrología experimentaron un cambio gradual hacia las observaciones científicas. Como ejemplo podemos mencionar a Bernardo Palissy filósofo francés (1509-1589) y a Leonardo da Vinci (1452 - 1519), quienes perfeccionaron el conocimiento del ciclo hidrológico, especialmente sobre la lluvia, la infiltración del agua en el subsuelo y su retorno a la superficie a través de manantiales.

Sin embargo, su comprensión sobre la circulación del agua desde el mar hacia la atmósfera; de ésta hacia la tierra y su regreso al mar, parece ser más bien una manifestación del genio y no el producto del análisis sobre bases cuantitativas.

Se puede considerar que la hidrología nació en el siglo XVII, cuando dos científicos franceses : Pierre Perrault (1608-1680) y Admé Mariotte (1620-1682), determinaron la fuente de abastecimiento de los ríos. Perrault midió la precipitación en un punto arriba de Borgoña y estimó el escurrimiento del río Sena en los años - 1668 al 1670. Encontró que el promedio anual - era de 520 mm. Posteriormente determinó el escurrimiento de la cuenca y concluyó que el escurrimiento ascendía a una sexta parte del agua - llovida, deduciendo que "la lluvia era la fuente de abastecimiento de las corrientes superficiales". También estudió la evaporación y el ascenso capilar, determinando que éste no formaba un cuerpo independiente con respecto a la napa freática. Asimismo, afirmó que el ascenso capilar en arenas era menor de un metro, estableciendo los límites aproximados a la capilaridad en las arenas. Mariotte midió la cantidad de agua de lluvia que se infiltra, concluyendo que la misma abastecía a los manantiales. Usando flotadores estimó el gasto del río Sena en - París en 200,000 piés cúbicos por minuto ó sea 1.05×10^{11} piés cúbicos por año, cantidad que era menor que la sexta parte de la precipitación promedio anual de la cuenca. Comprobó así las conclusiones de Perrault.

Varios años después Edmund Halley (1656-1742) - famoso astrónomo británico, miembro de la Real Sociedad de Londres, publicó estudios de evaporación del mar mediterráneo.

./.

Afirmó que la evaporación estaba en función de los volúmenes que llegaban al mar por las diferentes corrientes.

Durante el siglo XVIII florecieron los estudios experimentales en hidráulica. Entre los más notorios se destacan : el uso del piezómetro de Bernoulli, el tubo de Pitot, el medidor de corriente de Wolfman. Se derivan el teorema de Bernoulli y la fórmula de Chezy. Todos estos adelantos contribuyen al desarrollo de los estudios hidrológicos sobre bases cuantitativas. En este período hubo contribuciones como la teoría del sifón por J.T. Desaguliers; la publicación de un libro sobre ríos y corrientes por Paul Frisi, quien ya aporta datos cuantitativos sobre el escurrimiento pluvial, corrige algunos conceptos hidrológicos y aporta a su vez algunos conceptos erróneos y una ampliación al trabajo de Mariotte sobre la infiltración por la Mehtrie.

El siglo XIX fue la época grande de la hidrología experimental. En él se presentan muchas contribuciones significativas a la hidrología de las aguas del subuelo. Por primera vez los conocimientos geológicos fueron aplicados a los problemas hidrológicos por William Surith ; en el campo de las aguas superficiales la hidrografía experimentó grandes avances, incluyendo el desarrollo de muchas fórmulas e instrumentos de uso actual.

La hidrología como ciencia fue grandemente empírica, ya que las bases físicas para las de terminaciones cuantitativas no eran bien conocidas.

Durante la última parte del siglo XIX, y los siguientes 30 años ó más, el empirismo se hizo más evidente. Cientos de fórmulas fueron propuestas y la selección de sus coeficientes y parámetros se basó principalmente sobre conceptos y experiencias poco satisfactorias. Esto motivó el incremento en la investigación hi drológica, para la cual se crearon numerosas sociedades.

De 1930 a 1950 se aplicaron análisis racionales a las bases empíricas para resolver problemas hidrológicos. En este período se incrementó notablemente el establecimiento de numerosos laboratorios de hidráulica e hidrología en todo el mundo.

Después del año 1950 los adelantos técnicos se han usado extensamente en problemas de hidrología; muchos principios hidrológicos racionales han sido propuestos, pudiéndose someter a análisis matemáticos

En los últimos 20 años, las teorías de la estadística, probabilidades y procesos estocásticos se han utilizado con el objeto de tener una representación más adecuada de la variabilidad de los datos hidrológicos.

Instrumentos sofisticados y computadoras de alta velocidad se han desarrollado para medir - entre otros, los delicados fenómenos de la hidrología y para resolver complicadas ecuaciones matemáticas de la teoría hidrológica.

2.1.2

Definición

Desde el punto de vista etimológico, hidrología significa el estudio del agua. Abarca por lo tanto un amplio panorama.

De acuerdo a las características con que interviene el agua, es necesario hacer su estudio - por separado.

Así se tiene como ejemplo la Hidráulica, la Hidrometría y la Hidrología propiamente dicha.

Para definir la hidrología se han propuesto numerosos enunciados de los cuales, se detallan - algunos a continuación :

En 1961 Merrian and Webster's describen la Hidrología como: "La ciencia que estudia las propiedades, distribución y circulación del agua , sobre la superficie de la tierra, en el suelo , debajo las rocas y en la atmósfera, en lo que se refiere a la evaporación y precipitación.

En 1959 El Federal Council for Science and Technology for Scientific Hydrology, recomendó la siguiente definición: "Hidrología es la ciencia que trata del agua en la tierra, su ocurrencia, su circulación y distribución, sus propie-

dades físicas y químicas y su relación con el medio ambiente incluyendo los seres vivientes". Entre las definiciones que destacan su importancia práctica está la de Wisler y Brater que dice: "Hidrología es la ciencia que trata con los procesos que gobiernan el vaciado y aprovisionamiento de los depósitos de agua en áreas sobre la tierra". En esta última definición se incluye el transporte del agua a través del aire, sobre la superficie de la tierra y a través de los estratos terrestres, o sea; es la ciencia que estudia las "diferentes fases del ciclo hidrológico".

Todavía se puede dar una última definición, describiéndola como: "La ciencia que estudia las aguas que pueden ser aprovechables en forma superficial, así como en forma subterránea, siempre que sea a profundidad económicamente utilizable".

Se considera como ciencia pura aquella que determina relación entre causa y efecto de un fenómeno determinado. Conociendo este último (precipitación, evaporación, escurrimiento, etc) la hidrología trata de definir sus orígenes, con la finalidad de determinar las medidas necesarias para su control. Además, procura establecer leyes entre causa y efecto, lo que es sumamente difícil, ya que un fenómeno meteorológico para presentarse necesita de la ocurrencia de varias causas. Por ejemplo, se pueden estimar escurrimientos de lluvias futuras, pero no se puede predecir cuando ocurrirán esos fenómenos, si acaso sólo se pueden dar ciertas probabilidades estadísticas de frecuencia.

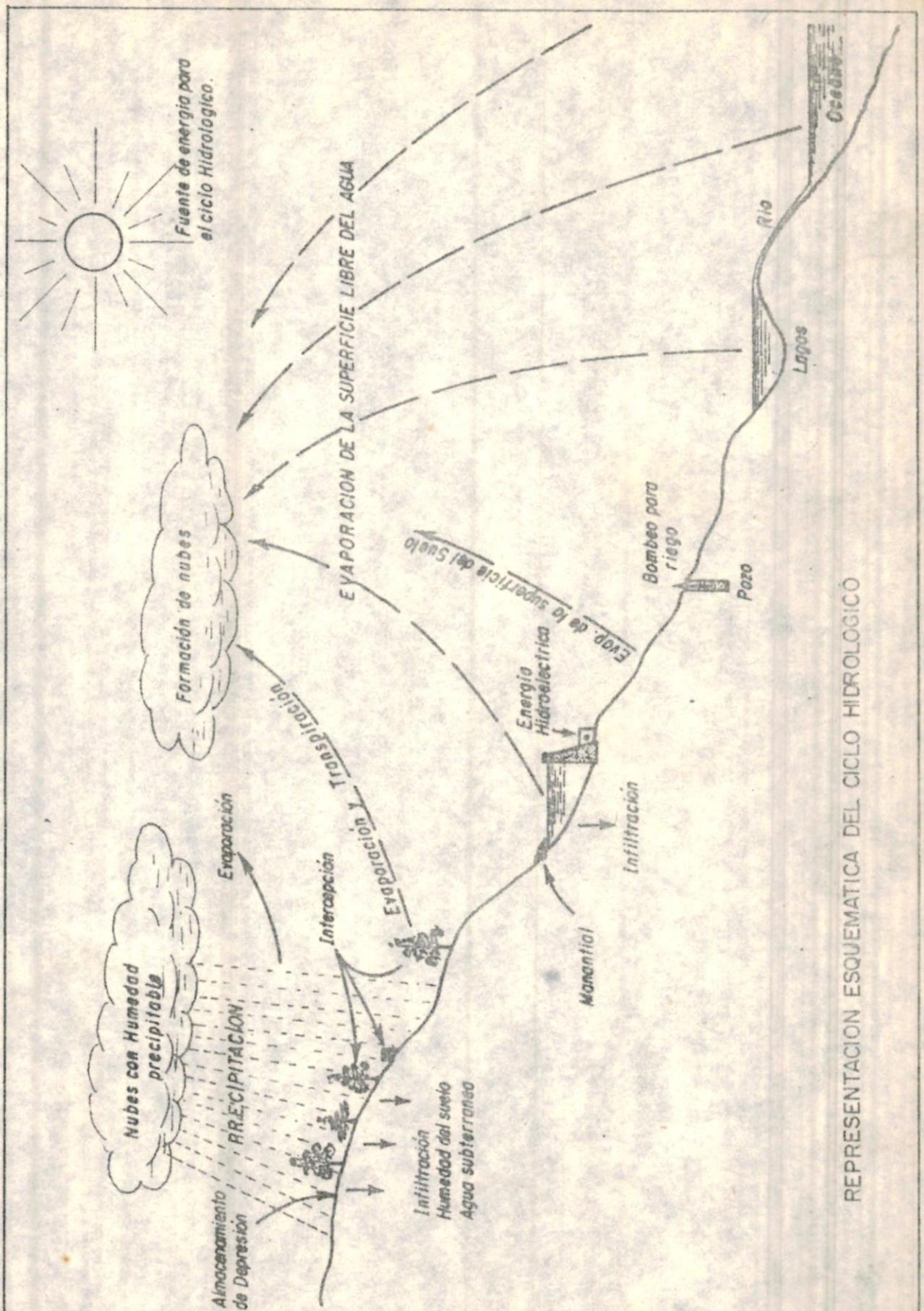
Por lo anteriormente mencionado, se infiere que la Hidrología no es una ciencia completamente pura, que tiene una relación muy estrecha -- con otras ciencias; que sus aplicaciones son numerosas y para enfatizar la importancia que tienen este aspecto, se usa el término "Hidrología aplicada".

Habiendo descrito a grandes rasgos el desarrollo de la hidrología, se observa que la fingitud de la misma, es poder contar con los da--tos necesarios para la construcción de obras hidráulicas en garantía del mejor aprovechamiento de las aguas.

2.2 EL CICLO HIDROLOGICO

La figura 2.1, muestra una representación esquemática de los procesos del sistema hidrológico general. Se puede suponer que el ciclo hidrológico empieza con la evaporación del agua de los océanos. El vapor del agua es -- trasladado por las masas de aire en movimiento y puede -- enfriarse, condensarse y formar nubes. Si las condiciones son favorables, el proceso de condensación continúa y los núcleos aumentan hasta que alcanzan una dimensión suficiente para precipitarse. Parte de esta precipitación puede evaporarse en la atmósfera antes de llegar a la superficie de la tierra; gran parte cae directamente sobre los océanos y otra cae sobre la tierra.

La precipitación que cae sobre la tierra, se distribuye en varias formas. Parte es interceptada por la vegetación, los edificios y otros objetos, pudiendo evaporarse de nuevo hacia la atmósfera o deslizarse por los mismos objetos, hasta llegar a la tierra. Parte corre sobre la superficie del suelo hacia los ríos y lagos; mientras que otra es retenida por las depresiones en la superficie del suelo. Parte del agua caída sobre la superficie se infiltra y se distribuye de la siguiente manera: una porción se queda en el suelo, constituyendo la humedad del suelo; ésta puede percolar hacia los depósitos subterráneos o volver a aparecer en la superficie, regresar a la atmósfera mediante los procesos de evaporación y de transpiración por las plantas. Una porción de las aguas infiltradas se mueve a través de las capas superiores para luego reaparecer en la superficie del suelo o en el lecho del río en forma de escorrentía subsuperficial. Otra porción alcanza el almacenamiento más o menos



REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL CICLO HIDROLOGICO

Figura 2.1

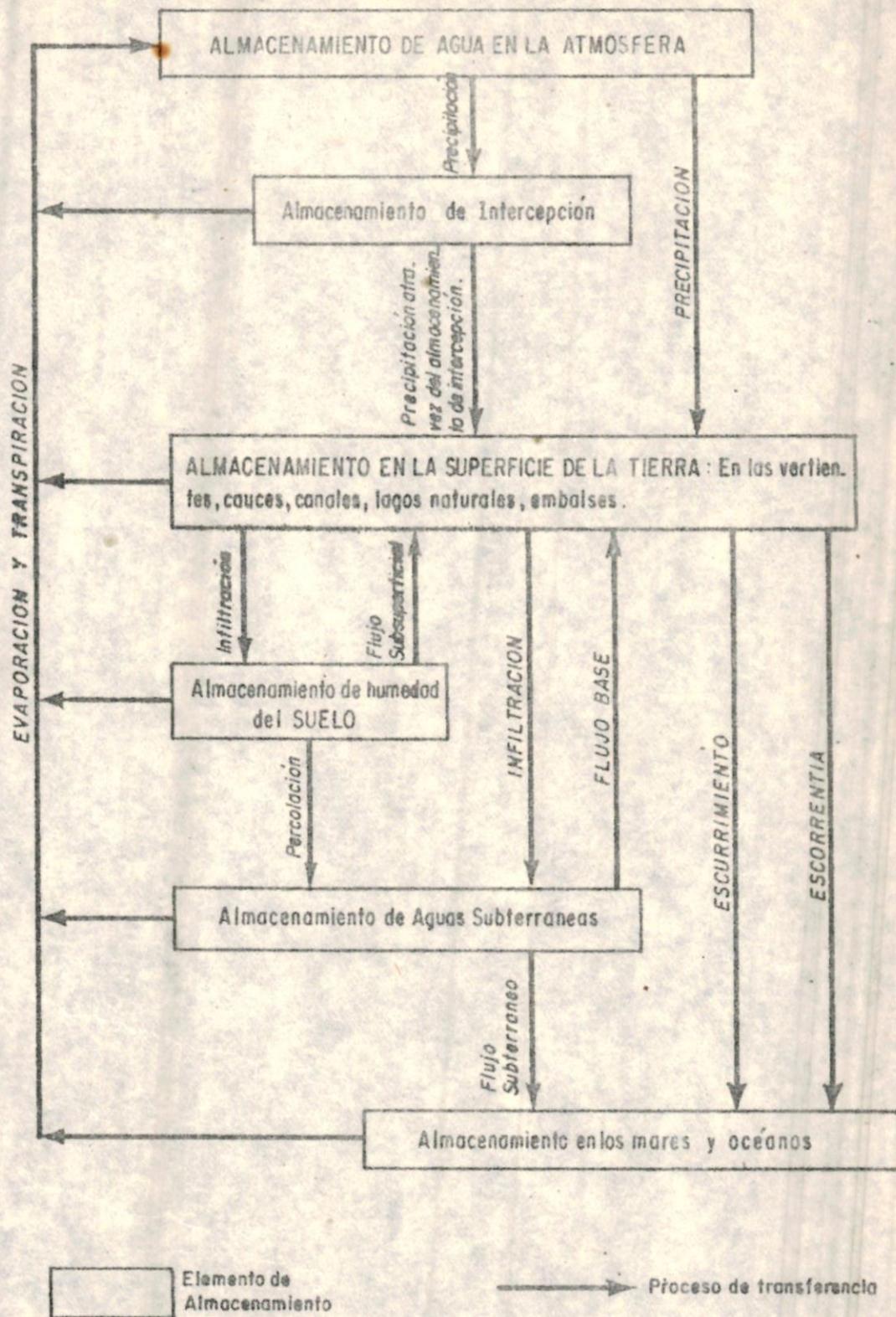
permanente de agua subterránea profunda y reaparecerá, después de largos intervalos de tiempo (a menudo en puntos muy distantes) en la forma de un surtidor, emergiendo de un pozo artesiano o de un manantial.

Parte de la escorrentía de los ríos se puede desviar mediante obras de derivación, para ser utilizada de inmediato con fines de abastecimiento de agua a las poblaciones, a las industrias, a la agricultura, a la producción de energía eléctrica, etc. Otra parte puede almacenarse temporalmente en embalses para regulación de los caudales con el fin de evitar excesos y satisfacer la demanda.

El agua almacenada en los depósitos subterráneos puede extraerse mediante bombeo o por simple gravedad. Parte del agua se evapora desde las superficies del suelo, de los lagos, de los ríos y de los pantanos.

Parte de las aguas de los ríos, lagos y depósitos subterráneos fluyen a los mares y océanos, reiniciando así todo el proceso.

La figura 2.2 muestra un flujograma del sistema hidrológico general. Los procesos del sistema son representados por flechas, y los almacenamientos por cuadros. Al considerar solamente una parte de este sistema general, se debe cortar una de las flechas y aislar unos almacenamientos. Las flechas cortadas que corresponden a procesos determinados, constituyen las entradas y salidas al sistema, mientras que los almacenamientos aislados son los que se deben considerar en el establecimiento de la ecuación general de la hidrología.



REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL SISTEMA HIDROLOGICO GENERAL

Figura 2.2

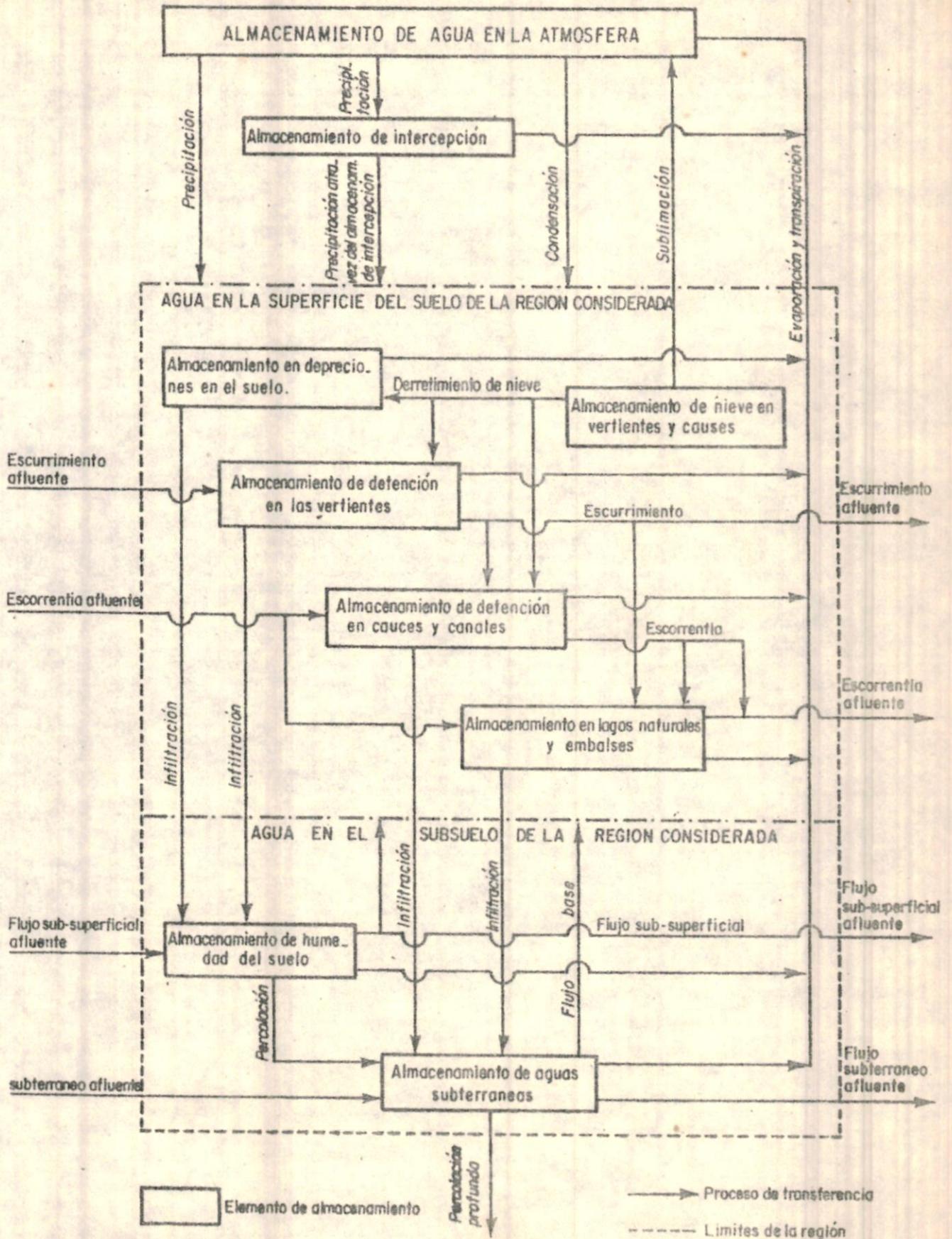
2.3 SISTEMA HIDROLOGICO REGIONAL

El sistema hidrológico general o ciclo hidrológico se aplica a toda la tierra. En la mayoría de los casos, el analista está interesado en una región menos extensa y con límites bien definidos. Los límites pueden ser fisiográficos, siguiendo las líneas de división de una cuenca hidrográfica; pueden ser políticos, o pueden coincidir con los límites de una área cultivada. El sistema hidrológico de tales regiones se presenta en la figura 2.3, con sus posibles entradas y salidas y los procesos internos que lo integran. Se observa que el sistema hidrológico es continuo, o sea, regido por el principio de la conservación de la masa. En otros términos, el sistema y sus salidas dan cuenta de todas las cantidades de agua que constituyen sus entradas.

Es obvio que el sistema hidrológico regional es un subsistema del sistema hidrológico general. También es posible que el analista considere el sistema hidrológico regional con otras salidas y entradas; o solamente considere un subsistema, o sea una parte del mismo, según sea su objetivo, conocimiento de los procesos o los datos de que disponga.

2.3.1 Balance Hidrológico

La ecuación general del balance puede aplicarse al establecimiento del balance hidrológico de una región. Esta aplicación requiere la selección de un período de tiempo bien definido.



REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN SISTEMA HIDROLOGICO REGIONAL

Figura 2.3

De acuerdo al sistema hidrológico regional descrito anteriormente y al uso que se hace del agua en una región desarrollada, la ecuación toma la forma siguiente :

$$P + Q_a + Q_r - E - Q_e - D = \pm A \dots\dots\dots(3.1)$$

Donde :

A. ENTRADAS (mm)

Alimentación directa :

P = Precipitación

Q_a = Aportes en otras regiones, que pueden integrarse con

Q_{ba} - Flujo subsuperficial afluente

Q_{wa} - Flujo subterránea afluente

Q_{sa} - Flujo superficial afluente

q_a - Escurrimiento sobre el terreno

Q_{ra} - Escorrentía en los ríos

Q_i - Agua de importación

Q_r = Aguas de retorno desde, compuestas por

Q_{pr} - Agua potable

Q_{ir} - Agua industrial

Q_{rr} - Agua agrícola riego ./.

B. SALIDAS (mm)

E = Evapotranspiración real

Q_e = Salidas hacia otras cuencas, que pueden ser :

Q_{be} - Flujo subsuperficial efluente

Q_{we} - Flujo subterráneo efluente

Q_{se} - Flujo superficial efluente

q_e - Escurrimiento sobre el terreno

Q_{re} - Escorrentía en los ríos

Q_{ex} - Agua de exportación

D = Derivación de agua para :

D_p - Agua potable

D_i - Agua industrial

D_r - Agua agrícola, riego

C. CAMBIO EN LOS ALMACENAMIENTOS (mm): A

Almacenamiento al principio del período o portes del período anterior.

Almacenamiento al fin del período o aportes al período siguiente.

Los tipos de almacenamiento pueden ser :

Almacenamiento de retención

- intercepción
- depresiones

Almacenamiento de detención

- lámina sobre el terreno
- aguas en ríos, canales, lagos y embalses.
- almacenamiento de humedad del suelo

Almacenamiento subterráneo

En general los balances hidrológicos permiten calcular por diferencia uno de sus elementos, siendo los demás conocidos. - Por eso es de interés analizar los elementos para determinar como se calculan o se pueden estimar en caso de que no se presten fácilmente a la medición.

Los componentes del balance pueden detallarse así :

ENTRADAS

Precipitación p

La precipitación que figura en la ecuación - (3.1) incluye sólo la lámina caída en la región bajo consideración. En general, es conocida y se mide fácilmente con pluviómetros y pluviógrafos. La lámina de precipitación puede ser calculada por el método de las curvas isoyetas o el de los polígonos de Thiessen.

./.

Aportes de Otras Regiones Q_a

Estos aportes incluyen el flujo superficial afluente Q_{sa} , el flujo subsuperficial afluyente Q_{ba} y el flujo subterráneo afluyente Q_{wa} . En términos matemáticos :

$$Q_a = Q_{sa} + Q_{ba} + Q_{wa}$$

- Flujo Superficial Q_{sa}

El flujo superficial a su vez abarca el escurrimiento sobre el terreno q_a , la escorrentía en los ríos Q_{ra} y las aguas de importación desde otra región Q_i . En otros términos :

$$Q_{sa} = q_a + Q_{ra} + Q_i$$

Escurrimiento q_a

El escurrimiento está constituido por una lámina tenue de agua que fluye hacia la red de drenaje de la región. Esta lámina está presente solamente durante y unos momentos después de una tormenta, una aplicación de riego o una inundación

Escorrentía en los Ríos Q_{ra}

Generalmente se dispone de registros de escorrentía superficial en unos puntos de una región. En puntos donde no hay una estación hidrométrica se puede hacer una estimación de la escorrentía por

correlación con parámetros tales como la escorrentía en otros puntos de la región, la precipitación, etc.

Aguas de Importación Q_i

Se puede fácilmente medir el agua importada desde otra región, pues los conductos en que fluye esta agua tienen, en la mayoría de los casos, una forma geométrica bien definida.

- Flujo Subsuperficial Q_{ba}

No existe ningún método satisfactorio para la medición del flujo subsuperficial. Sólo en los balances hidrológicos para tiempo muy corto se considera el flujo subsuperficial. A menudo se considera este flujo como parte del agua subterránea o parte del agua superficial y se hace su estimación como tal.

- Flujo Subterráneo Q_{wa}

No se puede medir directamente el flujo subterráneo. Sin embargo, si se dispone de registros de piezómetros en la región y de datos acerca de acuíferos tales como profundidad, extensión, permeabilidad; se puede estimar el flujo subterráneo mediante la aplicación de la fórmula de Darcy.

Aguas de Retorno Q_r

A menudo las aguas de retorno son excluidas del balance hidrológico debido al hecho de que son difí-

ciles de medir o de estimar. Cuando no se dispone de datos sobre las aguas de restitución, se supone que un tercio de las aguas potables y la mitad de las aguas industriales usadas en la región, regresen a los ríos, dentro de los límites de la región. Las aguas agrícolas de restitución con calculadas en base a la eficiencia de riego, puesto que el porcentaje del agua de riego que sirve para remediar el déficit de la humedad del suelo, puede definirse como la eficiencia de riego.

SALIDAS

Evapotranspiración Real E

No es común encontrar registros de medición directa de la evapotranspiración real medida con lisímetros o evapotranspirómetros.

Salidas Hacia Otras Regiones Q_e

Las consideraciones que se hicieron para los aportes de otras regiones se aplican también a las salidas, Q_e .

Derivación de Agua D

La derivación de agua de los ríos, embalses, lagos y acuíferos se hace para el consumo doméstico, industrial o agrícola. Los requerimientos de agua potable son función del nivel de vida y el número de habitantes. Se calculan multiplicando el consumo unitario total por el número de habitantes. El con

sumo industrial depende del tipo de industria y crece con un aumento en el nivel de desarrollo de la región. Es difícil hacer una estimación de las aguas industriales si no se sabe los tipos de industria de que se trata.

CAMBIO DE ALMACENAMIENTO : ± A

El cambio de los almacenamientos, ocurrido entre el fin y el principio del período considerado, -- puede estimarse por la medición de los niveles de agua superficial y de las fluctuaciones de la napa freática. Esta determinación, que supone el -- almacenamiento de humedad de suelo y de retención insignificante o invariable, conviene particularmente cuando se trata de períodos anuales o mayores. El almacenamiento de retención que incluye -- el agua interceptada por la vegetación y otros -- obstáculos y la que queda en depresiones de la -- superficie del suelo, se toma en cuenta sólo cuando los períodos de tiempo son muy reducidos.

A menudo el almacenamiento de humedad del suelo -- se obtiene por diferencia, estableciendo el balance hídrico del suelo.

TEMA : LA CUENCA HIDROGRAFICA

Ing. Luis Vega C.

I n d i c e		Pág.
3.1	LA CUENCA HIDROGRAFICA	26
3.1.1	Definición	26
3.1.2	Delimitación y área	29
3.1.3	Factores topográficos y Climatológicos	30
3.2	MAGNITUDES FISIOGRAFICAS E INDICES MORFOMETRICOS	31
3.2.1	Consideraciones generales	31
3.2.2	Parámetros fisiográficos	33
3.3	OTROS FACTORES	51
3.3.1	La geología y los suelos	51
3.3.2	La glaciología	51
3.3.3	Características climatológicas	51

	Indice de Figuras	Pág.
3.1	La cuenca hidrográfica	27
3.2	Perfil longitudinal de un río	36
3.3	Rectángulo equivalente	41
3.4	Pendiente media del río	46
3.5	Pendiente 20% - 80%	46
3.6	Curva hipsométrica	47
3.7	Altura media y Altura 50%	48

C u a d r o s

3.1	Cálculo de curva hipsométrica	50
-----	-------------------------------	----

3.1 LA CUENCA HIDROGRAFICA

3.1.1 Definición

Se define como el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se concentran para formar un solo cauce principal.

En otras palabras, todo curso de agua tiene una cuenca tributaria bien definida y única en cualquier punto de su recorrido.

Cuenca hidrográfica se puede definir también, como un territorio o parte de la superficie terrestre ocupada por un sistema de drenaje desde el cual las aguas escurren, real o potencialmente, hacia un colector común, que puede ser un río, el mar o un lago. En igual forma se habla de cuenca tributaria, área tributaria, región tributaria, hoya hidrográfica y hoya tributaria. En un sentido más restringido, cuenca u hoya es el territorio del cual provienen o pueden provenir las aguas que escurren por una determinada sección de un río respecto a la cual se define la cuenca (punto de concentración). Fig. 3.1

Una cuenca se separa de otras por medio de una línea imaginaria llamada divisoria de aguas, separatriz de aguas o divorcio de las aguas. Desde la línea divisoria las aguas escurren en sentidos opuestos hacia distintas cuencas.

Se debe distinguir entre la divisoria superficial de aguas y la divisoria de aguas subterráneas; líneas imaginarias que no necesariamente coinciden.

La divisoria superficial sigue la línea de mayor elevación entre dos cuencas y se puede trazar fácilmente sobre un mapa con curvas de nivel, determinando así la cuenca de precipitaciones; en cambio, para determinar la divisoria de aguas subterráneas es necesario un reconocimiento hidrogeológico.

El área de la cuenca es la principal magnitud de referencia en hidrología. Dividiendo los caudales medidos en una sección determinada por la correspondiente cuenca, se obtienen los caudales específicos o rendimientos expresados generalmente en litros por segundo y por kilómetro cuadrado. Los rendimientos máximos, mínimos y medios son magnitudes comparables y susceptibles de interpretación hidrológica con fines de generalización. Se encuentra, no obstante, que el rendimiento no es independiente del tamaño de la cuenca, de manera que los valores encontrados no se pueden extender a cuencas muy disímiles en magnitud, aún en igualdad de otras condiciones. Si en vez de referir los caudales se refieren los volúmenes escurridos por una sección, al tamaño de la cuenca, se obtiene una magnitud lineal que expresa la altura de la capa imaginaria de agua que el volumen señalado representaría, supuesta su distribución uniforme sobre toda la cuenca. En una región determinada casi todas las características morfométricas se pueden correlacionar con el tamaño de la cuenca.

Las cuencas hidrográficas se pueden componer por suma en unidades territoriales más grandes, que

también cumplen la definición de cuenca. En general, la suma de cuencas solo tiene sentido si se trata de áreas colindantes y existe un punto de concentración por el que pasa todo el caudal generado en la cuenca. También se designa propiamente como cuenca el área definida por la divisoria de aguas entre dos puntos de concentración sucesivos sobre un mismo río.

La forma de la cuenca incide sobre el régimen hidrológico: el hidrograma resultante de una lluvia, es distinto en una cuenca larga y estrecha que en una cuenca amplia y bien ramificada.

3.1.2 Delimitación y Area

La delimitación de una cuenca se hace siguiendo las líneas divisorias de las aguas y teniendo en cuenta que las líneas de flujo son perpendiculares a las curvas de nivel del terreno y hasta un punto del curso del río que sirve como emisor de las aguas que caen en esta cuenca.

Trazada la divisoria de aguas sobre un plano de la región, la superficie de la cuenca se mide con planímetro, contando recuadros u otro recurso semejante. Conforme al procedimiento indicado, la magnitud de una cuenca se expresa como la proyección sobre un plano horizontal a nivel del mar.

El área de recepción de una cuenca se expresa ya sea en hectáreas si la cuenca es pequeña o en Km², cuando ésta es mayor.

3.1.3 Factores topográficos y climatológicos

En una cuenca también interesan fundamentalmente, la topografía y la climatología, porque estos dos factores, determinan en gran medida las condiciones de recepción y escurrimiento de las aguas que caen por precipitación y que forman los cursos de agua, los manantiales, los nevados, etc. Aquí se tratará sólo de las características topográficas en una cuenca puesto que la climatología es materia de un tema aparte.

3.2 MAGNITUDES FISIOGRAFICAS E INDICES MORFOMETRICOS

3.2.1 Consideraciones generales

Se llama morfología al estudio de las formas - superficiales; en este sentido, geomorfología es el estudio de las formas de la superficie terrestre - en cuanto ésta no conforma un esferoide perfecto. La caracterización cuantitativa de determinados rasgos propios de la superficie terrestre se llama geomorfometría o simplemente morfometría. La morfometría aplicada a la geomorfología, entrega pues, valores numéricos objetivos que permiten comparar o correlacionar una parte de la superficie terrestre con otra.

El régimen hidrológico es una función compleja de numerosos factores, entre los que predominan el clima y la configuración del territorio en el cual se desarrolla el fenómeno.

Las formas de la superficie terrestre y en particular su altitud, tienen influencia decisiva sobre los más importantes factores condicionantes del régimen hidrológico como precipitación, escorrentía, infiltración y formación de aluviones y sedimentos. Los índices morfométricos son fundamentales para documentar la analogía territorial y establecer relaciones hidrológicas de generalización territorial.

Como las formas de la superficie terrestre se alteran sólo en el curso de lapsos geológicos, se puede considerar en la práctica y con sólo algunas reservas que las magnitudes morfométricas son valores fijos y permanentes.

Resumiendo :

- a. La configuración del terreno y el clima son factores condicionantes en el comportamiento hidrológico.
- b. Las formas de la superficie terrestre se pueden expresar mediante números e índices de modo que posibilitan la comparación de una cuenca con otra.
- c. En países con poca densidad de estaciones hidrometeorológicas, el establecimiento de relaciones de similitud entre cuencas es de suma importancia ya que hace posible el análisis regional y la determinación indirecta de valores hidrológicos.
- d. Las características hidrológicas y fisiográficas expresadas mediante dígitos, hacen posible su manipulación matemática. Así, la complejidad de los modelos y/o la cantidad de operaciones a realizar se resuelven adecuadamente haciendo uso de calculadoras electrónicas.
- e. Los parámetros fisiográficos e hidrológicos proporcionan información básica e imprescindible para cualquier estudio de pre-factibilidad, especialmente los referidos a recursos hídricos.

Los índices morfométricos expresan en términos de simples valores medios, las características de paisajes complejos. Por esta razón, se recomienda mucha cautela al incluir en un mismo índice paisajes de naturaleza diferente, como montañas y llanuras, porque el valor resultante podría tener poco sentido.

Se han concebido muchos parámetros fisiográficos e índices morfométricos, algunos de ellos de interpretación similar. En la presente exposición se desarrollan los conceptos pertinentes a algunos índices morfométricos cuya aplicación a la hidrología es más frecuente. Para estos fines, generalmente la unidad de referencia, para determinar los índices, es la cuenca hidrográfica.

3.2.2 Parámetros fisiográficos

A. Orden de las corrientes

Permiten inventariar los ríos según su importancia.

Siguiendo la clasificación de Horton, el orden del cauce principal de un río se integra de la siguiente manera :

- a. Cauces de orden 1 son aquellos que no tienen tributarios sino son ellos el origen del sistema de drenaje.
- b. Cauces de orden superior a 1 se integran por unión de dos cauces del mismo orden, así :

$$1 + 1 = 2, \quad 2 + 2 = 3, \quad 3 + 3 = 4, \text{ etc.}$$

- c. De dos cauces con diferente orden, continúa prevaleciendo el de orden superior, así :

./.

$$1 + 2 = 2, \quad 2 + 4 = 4,$$

$$2 + 3 = 3, \quad 4 + 6 = 6, \text{ etc.}$$

Mientras más alto es el orden de drenaje del cauce principal de una cuenca, - más desarrollados es su sistema de drenaje; tiene más condiciones favorables a la infiltración y consecuentemente más capacidad de retención, mayor caudal base y crecidas más acampanadas en su forma, es decir con mayor tiempo de base.

B. Area de la cuenca

Su magnitud influye sobre las características de los escurrimientos fluviales. Se refiere al área de la proyección horizontal de la cuenca.

Es el parámetro directamente relacionado con la superficie de captación de la lluvia. A mayor área mayor precipitación que se transforma en escorrentía hacia el cauce principal.

C. Perímetro

Es característico para cada cuenca, pues su magnitud será diferente aún cuando su área sea igual a otra. Tiene influencia en el tiempo de concentración.

El perímetro o longitud de la divisoria de una cuenca está estrechamente relacionado con su tamaño en superficie y con los diferentes parámetros de comparación definidos como coeficientes de forma.

D. Perfil longitudinal del curso de agua

Es el corte vertical del curso de agua siguiendo la línea de máximas velocidades. Fig. 3.2 Influye en el tiempo de traslado del agua a lo largo del cauce.

Permite identificar los tramos de mayor pendiente con posibilidades de aprovechamiento energético.

Da la configuración del cauce desde sus inicios hasta el punto de su confluencia con otro río o su desembocadura al mar. Es un índice de la rapidez con que el flujo escurre a lo largo del cauce, es decir el tiempo que tarda en desplazarse el agua, lo cual es un indicativo del tipo de crecidas que pueden esperarse. Fuertes pendientes dan crecidas súbitas muy cortas de tiempo base y agudas en su hidrograma. Pendientes más suaves dan crecidas más acampanadas, de mayor tiempo de base y consecuentemente de menores valores de pico. Sirve también para definir tramos con potencial hidroeléctrico.

Es importante conocer el perfil longitudinal del curso principal de la cuenca, so

PERFIL LONGITUDINAL DEL RIO LLANGANUCO

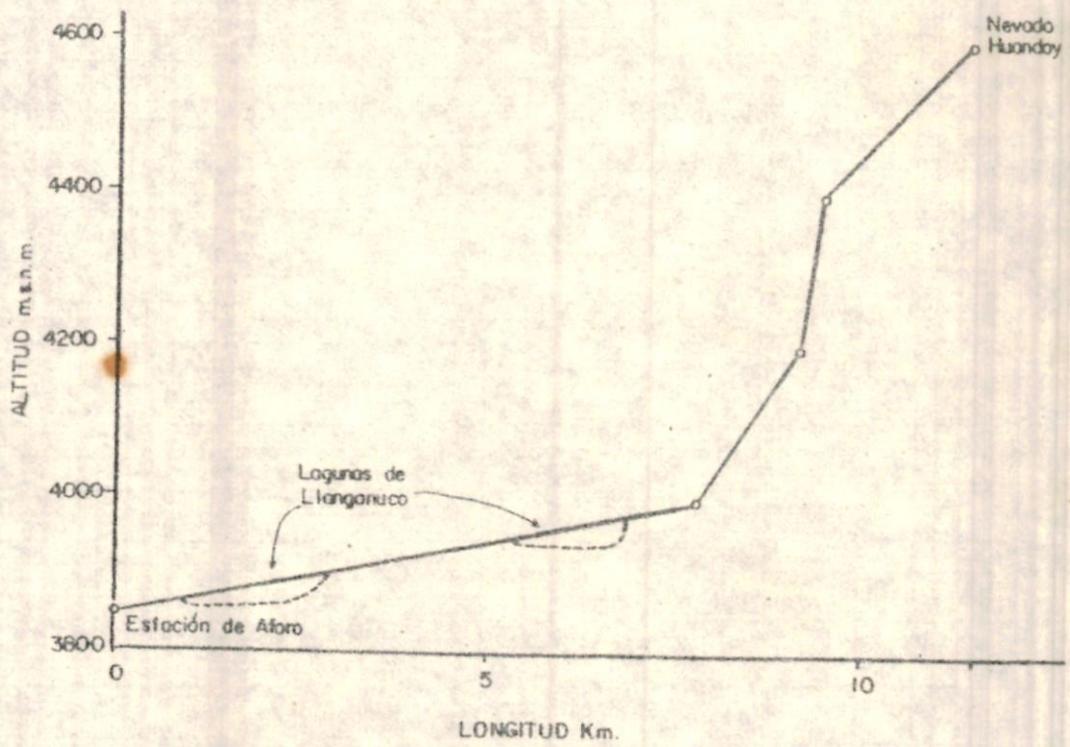


Figura 3.2

bre todo para tener una idea de las pendientes que tiene éste en diferentes tramos de su recorrido y que puede ser factor de importancia para ciertos trabajos, como captación de las aguas, ubicación de posibles -- centrales hidroeléctricas, etc.

E. Densidad de drenaje

Representa la longitud media de la red hidrográfica por Km².

Está determinado por :

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Donde :

L = Longitud total de los cursos de agua.

A = Area de la cuenca

Representa la mayor o menor concentración del escurrimiento respecto al cauce principal. Influye en los tiempos de concentración y en las crecidas.

Mientras más alta es la densidad de drenaje de una cuenca, sus crecidas son más - amortiguadas y se favorece la infiltración y recarga de acuíferos.

F. Indice de compacidad o de gravelious

Es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo cuya área sea igual al de la cuenca en estudio. Indica la regularidad de la forma de la cuenca y su influencia en las máximas crecidas.

Su valor está dado por :

$$K_c = \frac{P}{2 \sqrt{\pi} \sqrt{A}} \quad \text{ó}$$

$$K_c = \frac{0.28 P}{\sqrt{A}}$$

Donde :

P = Perímetro de la cuenca

A = Area de la cuenca

Dedución :

$$A = \pi r^2 \quad (1)$$

$$P_o = 2 \pi r \quad (2)$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

$$P_0 = 2 \pi \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

$$K_c = \frac{P}{2 \pi \sqrt{\frac{A}{\pi}}}$$

$$K_c = \frac{1}{2 \sqrt{\pi}} \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Finalmente :

$$K = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Tiene relación con la forma de concentración del escurrimiento como origen de las crecidas. Igualmente en la forma del hidrograma y su respectivo tiempo de base. Se utiliza para hacer extrapolaciones de parámetros de una cuenca a otra en función de su semejanza de índices.

6. Factor de forma

Expresa la forma y la mayor o menor tendencia a crecientes de una cuenca. Igual como el anterior, influye en las características de similitud entre cuencas, para análisis regional o comparación de patrones de escorrentía.

./.

Esta representado por :

$$F_f = \frac{A}{L^2}$$

Donde :

A = Area total

L = Longitud del curso de agua
más larga.

H. Rectángulo equivalente de roche

Es una expresión que relaciona el perímetro y el área de una cuenca tratando de reducirlo a las dimensiones de un rectángulo. Fig. 3.3 Para conseguirlo se emplean las siguientes relaciones :

$$P = 2(L + 1) = 2 K_c \sqrt{\frac{A}{1.12}}$$

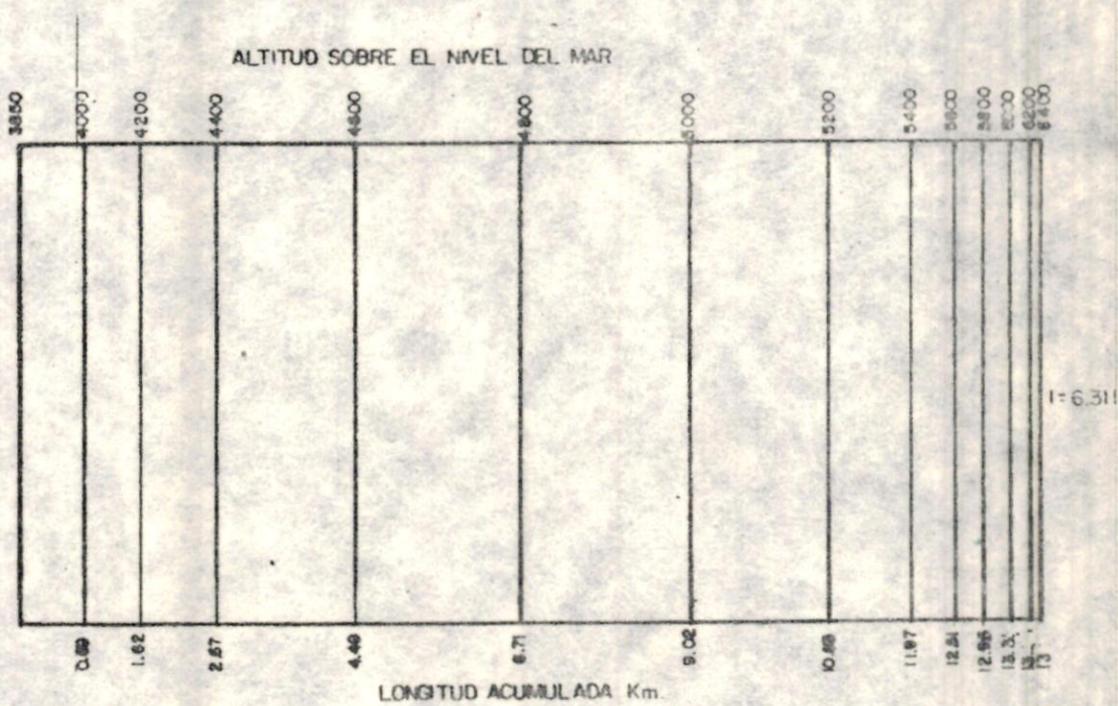
$$A = L + 1$$

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c}\right)^2} \right]$$

$$1 = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c}\right)^2} \right]$$

./.

RECTANGULO EQUIVALENTE CUENCA DEL RIO LLANGANUCO



$L = 13.69$ Km

Figura 3.3

Donde :

L = Lado mayor del rectángulo

l = Lado menor del rectángulo

K_C = Coeficiente de Gravelious

$$= \text{perímetro} / 2 \sqrt{\pi A}$$

A = Area de la cuenca

Con el rectángulo equivalente se trata de expresar el comportamiento hidrológico de una cuenca de un modo análogo a un rectángulo que tuviera la misma área y perímetro (y por lo tanto el mismo coeficiente de Gravelious), igual distribución de alturas (igual curva hipsométrica) e igual distribución de terreno en cuanto a sus condiciones de cobertura.

I. Indice de pendiente de la cuenca

Es la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a áreas elementales.

Influye en el tiempo de concentración

Su valor está dado por I_p, que es tomado directamente del mapa de la cuenca :

$$I_p = \frac{L_c \cdot \Delta h}{A}$$

./.

Donde :

A = Area de la cuenca

Δh = Diferencia de cotas entre curvas de nivel.

L_c = Longitud total de las curvas de nivel de la cuenca.

También conocida como pendiente promedio de la cuenca. Tiene aplicación en estudios agrícolas y de suelos, manejo de la cuenca, etc. Hidrológicamente es un factor que puede indicarnos la mayor o menor facilidad de infiltración y recarga de acuíferos

El índice de pendiente también se puede calcular teniendo en cuenta el rectángulo equivalente y da un valor medio de las pendientes y se calcula mediante la expresión:

$$I_p = \frac{\sum_{n=2}^n}{n} \sqrt{b_i (a_n - a_{n-1})} \frac{1}{\sqrt{L}}$$

Donde :

I_p = Índice de pendiente

n = Número de curvas de nivel existentes en el rectángulo, incluidos los extremos.

$a_1, a_2 \dots a_n$ = Cotas de las curvas consideradas.

b_i = Fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas a_n y a_{n-1} .

L = Longitud del lado mayor del rectángulo.

3. Pendiente media del río principal

Influye en la velocidad de desplazamiento de las aguas encausadas. Fig. 3.4

Su valor está dado por :

$$I = \frac{H'_M - H_m}{1,000 L}$$

Donde :

H'_M y H_m = Altitudes máximas y mínimas de la recta equivalente.

L = Longitud del río en Km.

Representa aquella pendiente equivalente, que en la gráfica del perfil longitudinal corresponde a la misma área entre la curva y ejes coordenados.



K. Pendiente 20 - 80%

Representa una pendiente ponderada más real y aplicable a la mayor parte del cauce en su tramo central. Es la que resulta de unir los niveles de los puntos 20% y 80% del perfil de la longitud total. Fig. 3.5

L. Curva Hipsométrica

Tiene como ejes a las altitudes y en el otro eje el porcentaje de superficie de la cuenca situada por encima de esas altitudes. Fig. - 3.6

Da referencia del relieve de la cuenca y su madurez, así como la distribución de áreas acumuladas por encima de la elevación a una cota dada. De ella pueden derivarse los parámetros de H promedio y $H_{50\%}$. Define concentración de alturas y superficie. De utilidad en muchos estudios hidrológicos, principalmente en el diseño de redes hidrometeorológicas. Fig. 3.7

Es la curva que puesta en coordenadas representa la relación entre la altura y la superficie que queda sobre diferentes alturas de la cuenca; una especie de perfil longitudinal promedio de la cuenca. Cuadro No. 3.1. Es muy importante su determinación porque como se ha visto en párrafos anteriores, la altitud de una cuenca es un factor muy importante en la hidrología de una región.

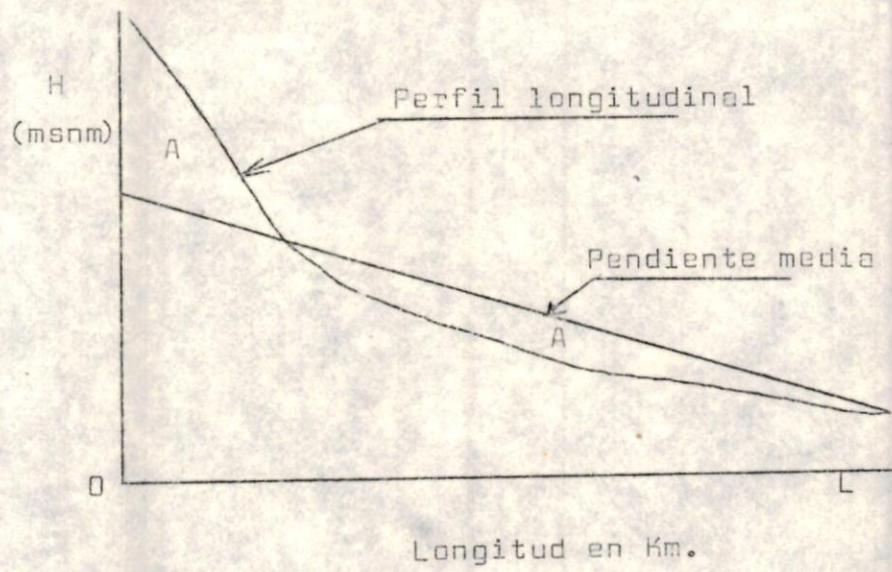


Fig. 3.4

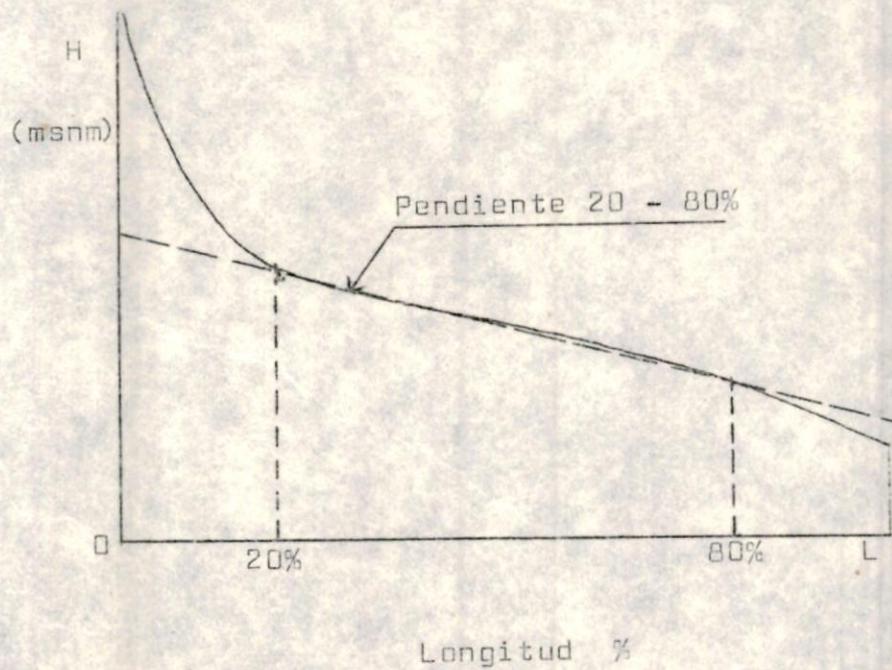


Fig. 3.5

CURVA HIPSONOMETRICA Y POLIGONO DE FRECUENCIAS DE LAS

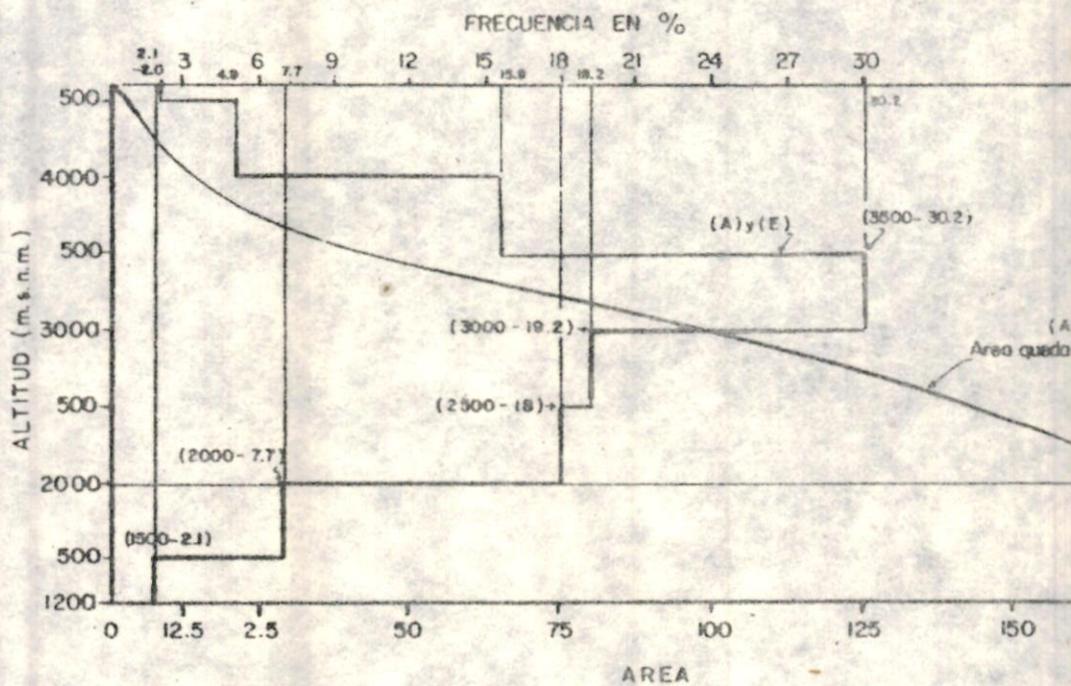


Figura 3.6

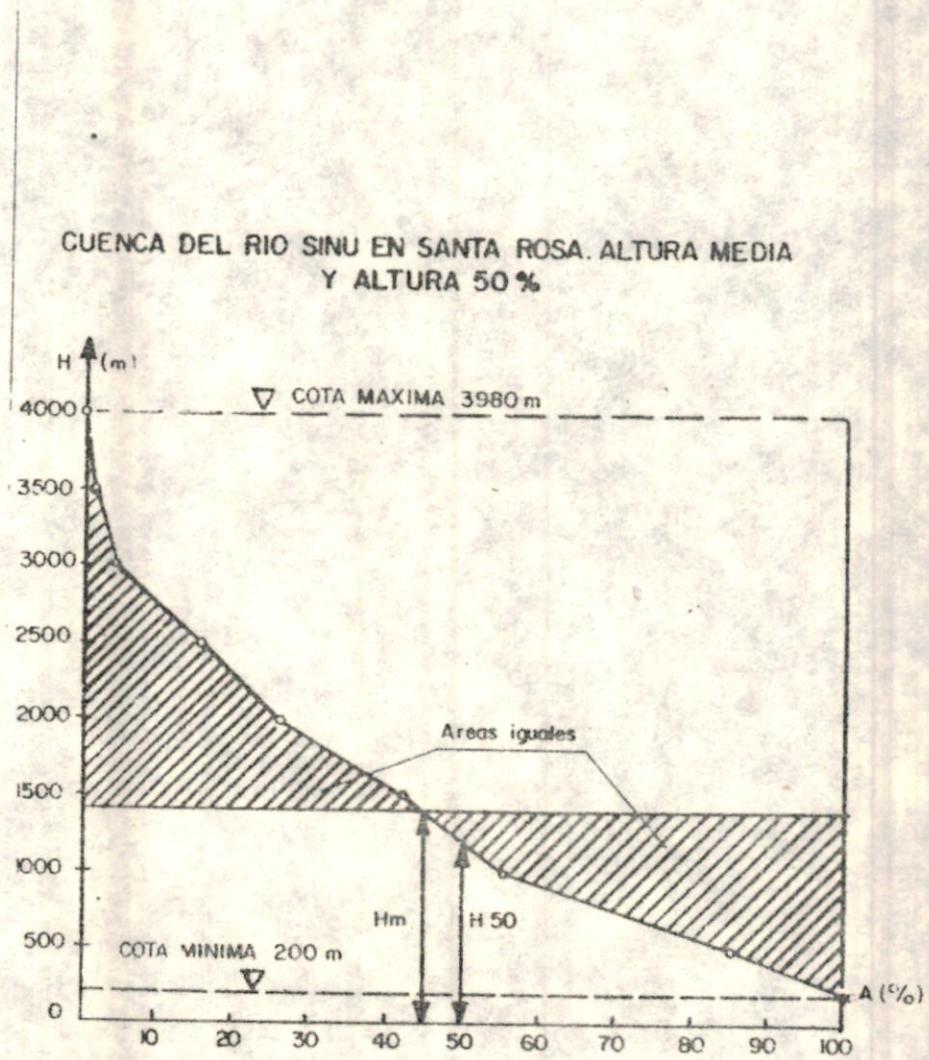


Figura 3.7

M. Polígono de frecuencia de altitudes

Muestra las altitudes más frecuentes y de frecuencia media.

Con un diagrama de escalones, dá las superficies en Kms. o en porcentajes de los elementos de la cuenca comprendida entre alturas escalonadas. Fig. 3.6

Indicador de la forma de distribución de la superficie de la cuenca respecto a su altura media. Tiene aplicaciones en estudios agrícolas y forestales.

N. La cobertura vegetal

Es un factor muy importante porque determina principalmente la mayor o menor erosionabilidad de los suelos, así como la formación de torrentes. Es también factor decisivo del coeficiente de escorrentía de una cuenca.

REPARTICION DEL AREA DE LA CUENCA DEL RIO AUCARA
DE ACUERDO A LA ALTITUD EN Km²

ALTITUD m.s.n.m.	AREAS PARCIALES	AREAS ACUMULADOS	AREA QUE QUEDA SOBRE la ALTITUD	% DEL TOTAL
Punto mas bajo				
1,200	0	0	193.6	—
1,500	40	4.0	189.6	2.1
2,000	5.0	19.0	174.6	7.7
2,500	34.8	53.8	139.8	18.0
3,000	37.2	91.0	102.6	19.2
3,500	58.5	149.5	44.1	30.2
4,000	30.9	180.4	13.2	15.9
4,500	9.4	189.8	3.8	4.9
Pto. mas alto 4,600	3.8	193.6	0	2.0
TOTAL	193.6	—	—	100.0
A	B	C	D	E

Cuadro N° 3.1

3.3 OTROS FACTORES

Además de las características que acabamos de enumerar, hay que tener en consideración otras igualmente importantes y que por su amplitud no pueden ser tratados en el presente curso. Sin embargo se hará una breve síntesis de los mismos.

3.3.1 La Geología y los suelos

Son muy importantes, sobre todo para el estudio de aguas subterráneas y para la determinación empírica de la escurrentía, ya que la geología y el tipo de suelo son factores importantes de la infiltración.

3.3.2 La Glaciología

En lo posible, hay que ubicar y determinar la magnitud de los nevados que puedan encontrarse en la cuenca porque ellos pueden ser factores muy importantes en el régimen de los ríos, como en efecto lo son en la Costa Peruana donde aseguran un cierto caudal en las épocas de sequía, o de ausencia de lluvias.

Son verdaderos reservorios de agua. En el país su estudio aún no ha sido emprendido en escala considerable.

3.3.3 Características Climatológicas.

Esto corresponde a la temperatura, humedad relativa, horas de sol, etc. que son importantes en el comportamiento de la cuenca.

T E M A : PRECIPITACION Y CAUDALES.
EVAPORACION

Ing. Walter Gómez L.

I N D I C E		Pág.
4.1	PRECIPITACION	55
4.1.1	Definición	55
4.1.2	Instrumentos de observación	55
4.1.3	Pluviómetros normalizados	57
4.1.4	Tipos de pluviómetros	59
4.1.5	Pluviómetros totalizadores	60
4.1.6	Pluviógrafos	60
4.2	MEDIDA DE CAUDALES	65
4.2.1	Definición	65
4.2.2	Aforo con molinetes	65
4.2.3	Cálculo del caudal	78
4.2.4	Aforo con flotadores	87
4.2.5	Aforo químico	88
4.3	CURVAS NIVEL CAUDAL	95
4.3.1	Cálculo de la curva de descarga	95
4.3.2	Extrapolación de la curva de <u>des</u> carga	96
4.4	EVAPORACION Y EVAPOTRANSPIRACION	102
4.4.1	Instrumentos de medida	102
4.4.2	Métodos indirectos para estimar evaporación	107

	Indice de Figuras	Pág.
4.1	Tipos de Pluviómetros	61
4.2	Pluviómetros totalizadores	62
4.3	Tipos de molinetes	66
4.4	Tipos de molinetes	67
4.5	Tipos de molinetes	69
4.6	Medición de la Sección Transversal	72
4.7	Registro para cálculo de aforos	80-81
4.8	Cálculo del aforo	83
4.9	Cálculo del aforo por método gráfico	85-86
4.10	Aforo químico	93-94
4.11	Variaciones de la curva de descarga	97
4.12	Indicaciones y descripción	103

4.1 PRECIPITACION

4.1.1 Definición

En términos generales, precipitación es toda forma de humedad que emana de las nubes y que cae sobre la tierra durante un período determinado. Se le expresa en función del nivel que alcanzaría sobre una proyección horizontal, siendo objetivo principal el que su medición sea verdaderamente representativa de la zona en que se registra

4.1.2 Instrumentos de Observación

Cualquier depósito elegido para medir la precipitación, independientemente del diámetro, que cumpla con las condiciones de emplazamiento y que permita reducir los efectos del viento, puede servir como pluviómetro:

- Para medir cantidades de precipitación (pluviómetros, nivómetros, totalizadores)
- Registradores de lluvia (pluviógrafos)
- Registradores de intensidad

Su emplazamiento ideal será aquel que permita registrar la precipitación real producida en la zona circundante.

En la práctica, esto es muy difícil de lograr, - debido a una serie de factores perturbantes como son :

- a. Efectos sobre el propio instrumento, que tiende a reducir la cantidad de agua recogida.
- b. Efecto del emplazamiento sobre la trayectoria del viento. Es el más importante - porque puede dar lugar a excesos y defectos en su medición.

Estos efectos se pueden reducir en gran parte :

- Eligiendo un emplazamiento de modo que la velocidad del viento a nivel de la boca - del pluviómetro sea lo menor posible, pero sin que al mismo tiempo, la lluvia sea reducida por objetos circundantes.
- Modificando los alrededores del pluviómetro, a fin de que el aire fluya casi horizontalmente sobre la boca.

A Consideraciones de instalación

Los pluviómetros de una región o país, deben ser instalados bajo los mismos criterios como son :

- Altura del pluviómetro
- Igual diámetro en la boca del pluviómetro.

./.

- Evitar pendientes fuertes del terreno.
- El terreno circundante debe estar cubierto de césped o grava para evitar las salpicaduras con dirección a la boca del pluviómetro.

4.1.3 Pluviómetros Normalizados

A Partes de un pluviómetro

- Boca: que tiene superficies variables de 100, 200, 500 a 1000 cm².
Hecho de material resistente, bicelado y cortante y la precisión en su construcción en cuanto a su diámetro debe ser 0.5 %
- Colector: lleva una cámara de aire alrededor para evitar que se caliente el agua recogida y disminuir la evaporación.
- Embudo: sirve para canalizar el agua hacia el colector y simultáneamente de tapadera de éste.

B Dispositivos de Medida

- Varillas medidoras de nivel, pueden ser de cedro o de metal, pero siempre deben

estar provistas de un pie de metal y estar graduadas por los menos cada - 10 mm. Su error máximo no debe pasar de (+) (-) 0.5 mm.

Este tipo de varilla sirve para medir directamente la precipitación en el colector.

- Probeta.

Generalmente es de vidrio transparente y siempre lleva las dimensiones -- del pluviómetro a emplearse.

C Errores de medición

Los errores en la medición de líquidos recogidos en el pluviómetro son pequeños comparados con los errores debidos a los efectos de la instalación del instrumento. Los errores producidos se deben al empleo de probetas o varillas carentes de precisión, al derrame de parte del líquido al transferirlo a la probeta, al humedecimiento del colector, embudo, etc. A pérdidas por evaporación, sobre todo aquellos pluviómetros que se observen a intervalos poco frecuentes. Generalmente los errores en porcentajes son siempre ligeramente por defecto.

4.1.4 Tipos de Pluviómetros

En el mercado nacional, pueden construirse los -- pluviómetros cuando se les dan las condiciones de diseño y debe recomendarse siempre que la boca - sea de un anillo de bronce biselado.

En el mercado internacional, existen diferentes - tipos de pluviómetros, siendo los más usados en - Perú los tipos español y el alemán modelo HELLMANN. Fig. 4.1

Otros tipos

Tipo Francés: (diámetro de la boca 226 mm), pare-- des verticales de embudo muy cortas y colocado a 1.50 m. de altura del suelo a la boca de captación.

Tipo Inglés: Tiene una boca de diámetro de 127 mm o 5 pulgadas y a una altura del suelo de 12 pulg^a das o 304.8 mm. Posee un colector que es una bote^l llo de cristal y una probeta para medir hasta 127 milímetros. Está diseñado con un material de co- bre en su conjunto y el colector está bajo tierra.

Tipo Canadiense: El material usado es de cobre y bronce, y el diámetro de la boca es de 90.78 mm. y a una altura de la boca sobre el suelo, de -- 304.8 mm. El colector está sobre un pie de obra - sobre 2 pulgadas y la probeta medidora sirve ade- más de colector.

Tipo Norteamericano : Tiene una boca de diámetro de 203.2 mm y a una altura del suelo de 762 mm. Su medición se hace con una reglilla graduada directamente en el colector. Fig. 4.1

Tipo Español y Alemán - Modelo HELLMANN : Diámetro de la boca es de 159.6 mm. dando una superficie receptora de 200 cm² y a una altura de 1.50 m. de la boca al suelo, sujeto a un poste de madera biselado en su extremo superior. Fig. 4.1

4.1.5 Pluviómetros Totalizadores

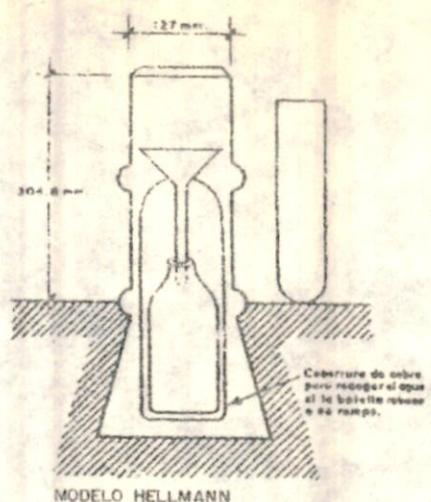
Diseñado con el objeto de realizar una sola medida durante un largo período (después de 3 meses - de lluvia). Se instalan en zonas de difícil acceso o donde no hay lector y el diseño del colector está en función a la lluvia máxima que se estima que puede caer en dicho lugar. Fig. 4.2

En el interior del colector se deben colocar 2 litros de aceite líquido de vaselina o parafina para evitar la evaporación y 2 a 4 kg. de Cl Ca -- anhídrico, para evitar el congelamiento. El volumen de la solución vertida no debe exceder de un tercio de la capacidad total del colector.

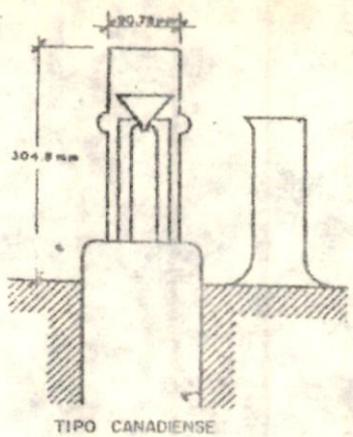
4.1.6 Pluviógrafos

A Pluviógrafo de flotador

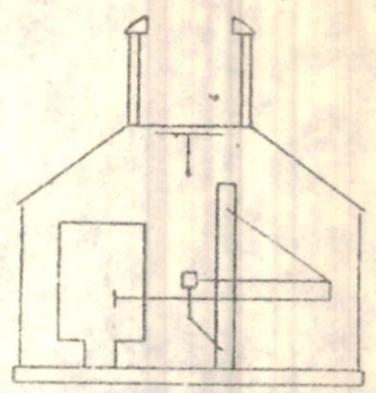
La lluvia recogida pasa a un recipiente - que contiene un flotador liviano, en el



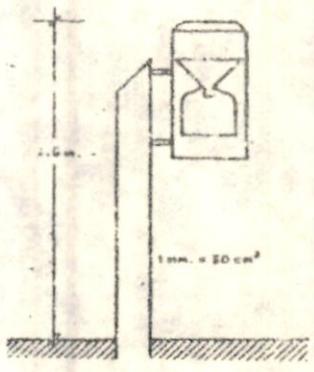
MODELO HELLMANN



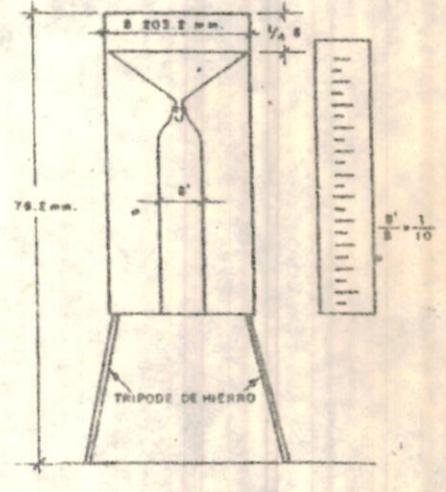
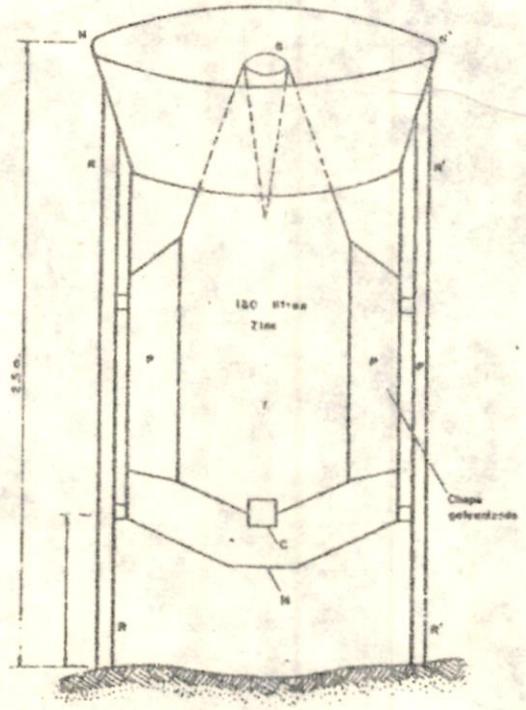
TIPO CANADIENSE



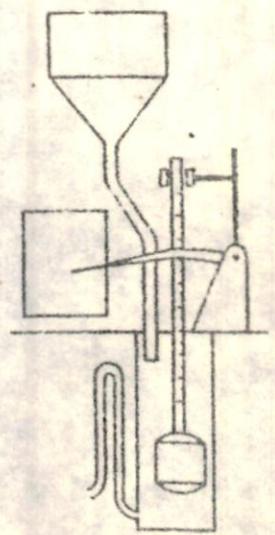
PLUVIOGRAFOS DE BALANZA



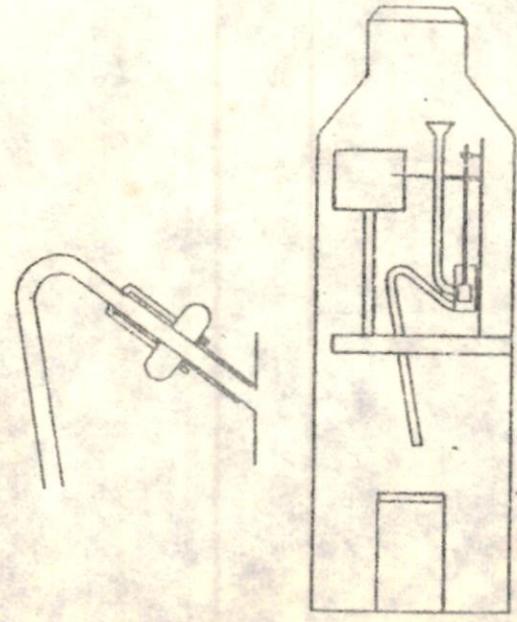
TIPO ESPAÑOL Y ALEMAN



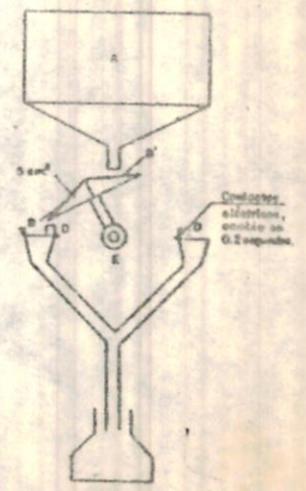
TIPO NORTEAMERICANO



FLOTADOR C/S SIFON AUTOMATICO



HELLMANN - FUESS



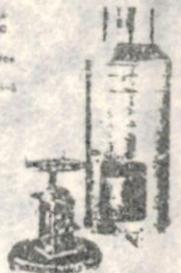
DE OSCILACION

Figura 4.1

Instrumentos pluviométricos

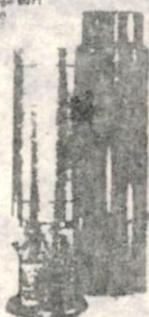
INSTRUMENTOS PARA LA MEDIDA DE LA PRECIPITACION

Nº de catálogo 5-780
Serie de pluviómetros universales
Botón 1-43



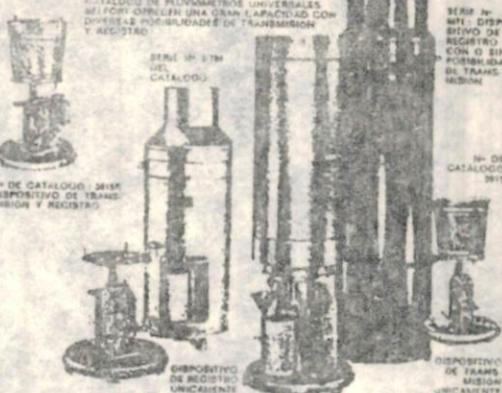
Precisión 0.5% de toda la escala a la subida y a la bajada entre -40°C y +52°C
Amplitud de medida: 8 pulgadas, registro unidireccional: 4.8 pulgadas, 20 pulgadas y 500 mm, registro bidireccional.
Todos los modelos excepto el 5-780-20... 395.00 dólares EE.UU.
Modelo 5-780-20 con dispositivo de desbordamiento... 458.00 dólares EE.UU.
FOB Baltimore, Maryland

Pluviómetro de gran capacidad
Nº de catálogo 6071
Botón 75-60



Colector de 270 mm de diámetro recubierto de latón, mecanismo de pesada robusto, capacidad de 30 pulgadas y 750 mm con registro de la subida y bajada, precisión 0.5% de la escala total a la subida y a la bajada, entre -40°C y +52°C
825.00 dólares EE.UU.
FOB Baltimore, Maryland

TRES VARIANTES DEL MODELO Nº 5-90 DEL CATALOGO DE PLUVIOMETROS UNIVERSALES. SE PUEDE OBTENER UNA GRAN VARIACION DE DIVERSAS POSIBILIDADES DE TRANSMISION Y REGISTRO.



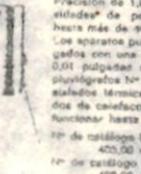
SE PUEDE OBTENER UN DISPOSITIVO DE SEGURIDAD CON O SIN POSIBILIDAD DE TRANS-MISION.
Nº DE CATALOGO 5911
DISPOSITIVO DE TRAMSES UNICAMENTE
DISPOSITIVO DE TRAMSES UNICAMENTE

Pluviómetros de cubeta basculante
Nº de catálogo 5-405, 5-405A, 5-405HA, 5-405HAH, 5-405HAH2



Precisión de 1.0% para intensidades de precipitación de hasta más de 90 mm por hora. Los aparatos pueden ser armados con una sensibilidad de 0.01 pulgadas o 0.2 mm. Los pluviómetros Nº 5-405HA están sellados herméticamente y dotados de calefacción para poder funcionar hasta -25°C.
Nº de catálogo 5-405: 405.00 dólares EE.UU.
Nº de catálogo 5-405HA: 495.00 dólares EE.UU.
FOB Baltimore, Maryland

Pluviómetros de cubeta basculante
Nº de catálogo 5-405, 5-405A, 5-405HA, 5-405HAH, 5-405HAH2



Precisión de 1.0% para intensidades de precipitación de hasta más de 90 mm por hora. Los aparatos pueden ser armados con una sensibilidad de 0.01 pulgadas o 0.2 mm. Los pluviómetros Nº 5-405HA están sellados herméticamente y dotados de calefacción para poder funcionar hasta -25°C.
Nº de catálogo 5-405: 405.00 dólares EE.UU.
Nº de catálogo 5-405HA: 495.00 dólares EE.UU.
FOB Baltimore, Maryland

LIMNIGRAFOS (para medir el nivel de los líquidos)

TRES VARIANTES DEL MODELO Nº 5-9W DEL CATALOGO BELFORT CON DISPOSITIVO DE REGISTRO LIMNIGRAFICO DE LARGA DURACION Y SALIDAS POTENCIOMETRICAS.



MAQUINA POTENCIOMETRICA
DISPOSITIVO DE REGISTRO CIRCULAR PARA EL TRAZADO DE DIAGRAMAS SOBRE BANCA DE PAPEL
Nº DE CATALOGO 5-9W CON O SIN SALIDA POTENCIOMETRICA
REGISTROS DUPLICADOS O REMANENTADOS
BELFORT INSTRUMENT COMPANY
CATALOGO COMPLETO DE INSTRUMENTOS

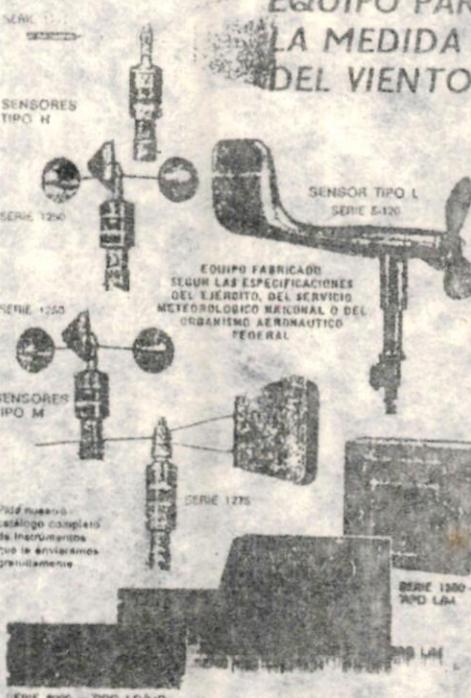
Escribanos para obtener gratuitamente nuestro catálogo completo de instrumentos.

BELFORT INSTRUMENT COMPANY
1400 S. CLINTON STREET
BALTIMORE, MARYLAND 21224
Estados Unidos de América
Tel. (410) 742-2626

BELFORT INSTRUMENT COMPANY, 1400 S. Clinton Street, Baltimore, Md. 21224 U.S.A. Tel. (410) 742-2626

EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA ALTURA DEL VIENTO

SEAL
SENSORES TIPO H
SERIE 1250
SERIE 1255
SENSORES TIPO M
SERIE 1275
SENSOR TIPO L SERIE 5-120
EQUIPO FABRICADO SEGUN LAS ESPECIFICACIONES DEL EJERCITO, DEL SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL O DEL ORGANISMO AERONAUTICO FEDERAL
SERIE 1300 740 LHA
SERIE 8000 - TIPO LDMO
INDICADOR/REGISTRADOR



Registro preciso de la altura de las precipitaciones, cualquiera que sea el clima

Para el registro continuo de las precipitaciones, el método del alfiler basculante es probablemente el más eficaz y el preferido del Servicio Meteorológico Británico. El agua de la lluvia se dirige a una cámara que contiene un flotador. Cuando esa cámara está llena, se libera un flotador y la cámara bascula sobre una cuchilla lo que provoca el vaciado del agua. La cámara vuelve a su posición inicial mediante la acción de un contrapeso, y la operación de relleno vuelve a repetirse. El vaciado se efectúa de manera positiva, rápida y sin pérdidas de líquido.

Este dispositivo puede ser utilizado para su instalación en zonas húmedas y en zonas templadas. La velocidad de la lluvia puede ser medida en unidades de centímetros reduciendo el flujo de agua de una cámara. Se puede utilizar para registrar la precipitación en las montañas de alta altitud y en las zonas de alta montaña. Los dos sensores de precipitación de la serie 1250 y 1255 pueden ser utilizados para registrar la precipitación en las zonas de alta montaña.

La gama de instrumentos Casella para la medición de la humedad, de la temperatura, de la presión, de la altura de las precipitaciones, del viento de la evaporación y de la radiación, Casella es una gran variedad de los instrumentos Casella y muchos de ellos utilizan los instrumentos Casella como instrumentos tipo para el establecimiento de sus registros meteorológicos.

Escriba a la Caja Postal ASG para obtener los Catálogos 931 a 935

CASELLA LONDON
C. F. CASELLA & CO LIMITED
Box ASG, Regent House, Britannia Walk, London N1 7JH
Telephone: 01-253 8591 Telex: 261641

Escribanos para obtener gratuitamente nuestro catálogo completo de instrumentos.

BELFORT INSTRUMENT COMPANY
1400 S. CLINTON STREET
BALTIMORE, MARYLAND 21224 U.S.A.
Tel. (410) 742-2626

Figura 4.2

que se apoya un brazo acodado que sujeta la plumilla, unido a un eje horizontal por el otro extremo. Este brazo lleva un dispositivo tal, que cuando la plumilla llega a la parte superior de la banda, cae verticalmente hacia abajo, quedando de esta forma registradas las alturas de agua en la banda. Fig. 4.1

Existen pluviógrafos con flotadores sin sifón automático y con sifón automático. En el primer caso es necesario cebar un sifón para vaciar el depósito y en el segundo, éste se ceba por sí mismo cuando la plumilla ha alcanzado su máxima altura y al mismo tiempo vuelve al cero. En este tipo de flotadores existe el problema del congelamiento, ocasionando daños al flotador y a la cámara. En épocas de invierno, deberá instalarse algún dispositivo de calefacción dentro del pluviógrafo, tales como un hilo de electricidad o una lámpara infrarroja.

Entre este tipo de pluviógrafos se identifican el LAMBRECH y el HELLMANN- FUESS, que es el más usado en el Perú.

B Pluviógrafo de Pesada o gravedad

Este tipo de instrumento es útil para registrar las precipitaciones en sus diferentes formas. Sus registros son continuos.

Por medio de un mecanismo de resortes el peso es transmitido a través del colector, que va colocado sobre el platillo. Tiene el inconveniente de la evaporación, por lo que debe incluirse aceite. Las oscilaciones del viento originan oscilaciones en la balanza que influyen en el registro y se evitan con amortiguadores de aceite. Fig.

C Pluviógrafo vasculante

El principio de este tipo de pluviógrafo es sencillo. Un recipiente de metal liviano dividido en dos compartimientos, se coloca en equilibrio inestable sobre un eje horizontal: En su posición normal, reposa sobre uno de dos topes, lo que impide que se vuelque completamente. El agua de lluvia pasa desde un embudo colector ordinario al compartimiento superior, una vez recogido un determinado volumen de líquido, la cubeta pierde estabilidad y se inclina hacia su segunda posición de reposo, realizando en cada movimiento un contacto eléctrico que es transmitido a un teleregistro situado en la oficina. Fig. 4.1

4.2 MEDIDA DE CAUDALES

4.2.1 Definición

Es la medida del volumen de agua que pasa por una sección transversal de un río en la unidad de -- tiempo. Su objetivo es correlacionar el nivel de agua con el caudal o gasto para obtener la curva de descarga o calibración.

El aforo debe realizarse en detalle para que -- permita determinar las alteraciones de las condiciones de escurrimiento (sección transversal, pen-- diente del eje hidráulico rugosidad). Los aforos deben repetirse uniformemente a lo largo del in-- tervalo comprendido entre el gasto mínimo y máxi-- mo.

4.2.2 Aforo con molinetes

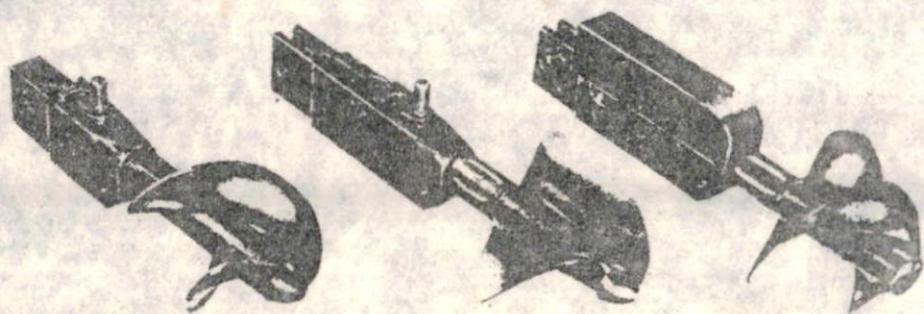
Este método se basa en medir la velocidad de la -- corriente en diferentes puntos de una sección -- transversal, definida por distancias horizontales y un origen fijado en una de las márgenes. Los mo-- linetes de uso general, son de dos tipos a saber:

El molinete de Casoletas, con eje vertical y el de Hélice con eje horizontal. Fig. 4.3/ 4.4 . Ambos tipos están provistos de un dispositivo que genera un impulso eléctrico para indicar las revoluciones



CURRENT METERS

CURRENT METERS AND ACCESSORIES

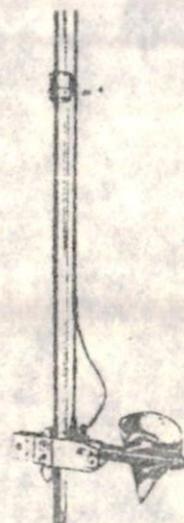


Meter V Arkansas, short

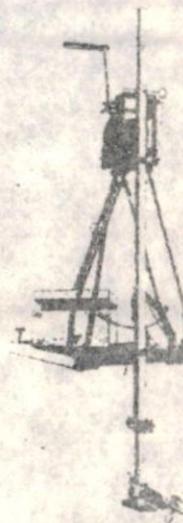
Propellers of various pitches and diameters

Meter V Arkansas

Meter V Texas

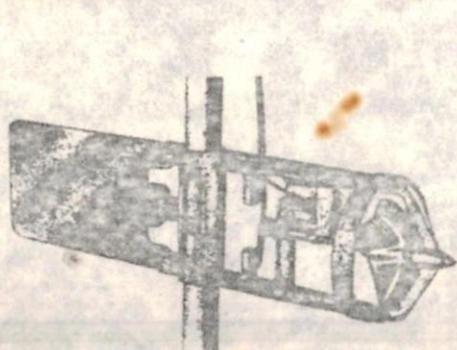


Rod-mounted Current Meter with height-adjusting gear

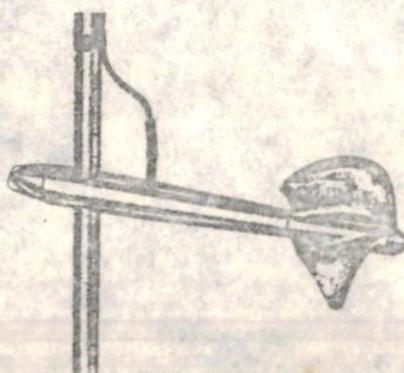


Current Meter on Suspended Rod

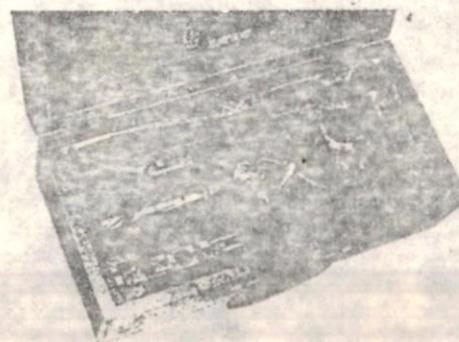
Figure 4.3



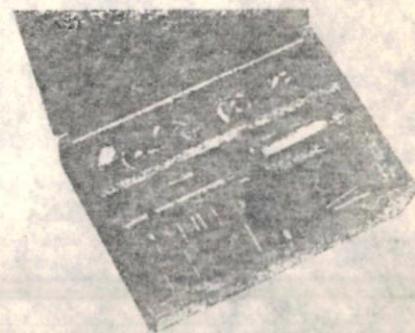
Current Meter X



Small Current Meter



Current Meter V with Accessories



Small Current Meter with Accessories

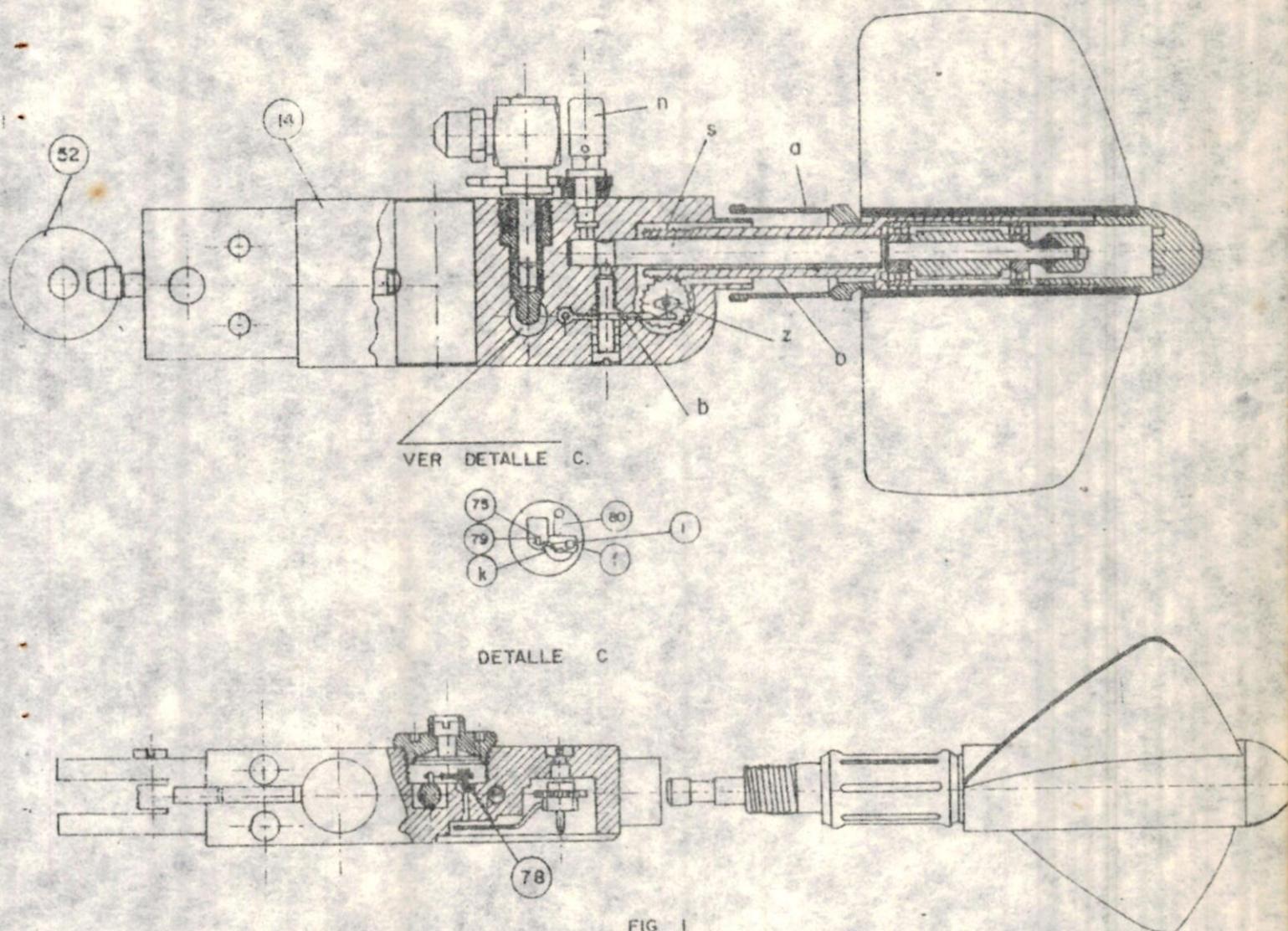


FIG 1
CORTES VARIOS DE UN MOLINETE V-ARKANSAS
A UNA ESCALA DE 0.6
TAMAÑO NATURAL

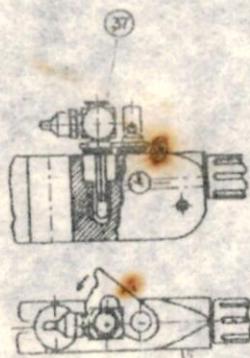


FIG 2
FIJACION DEL ENCHUFE ANGULAR

Estas últimas son registradas en un contador digital y corresponden a las revoluciones de la hélice sumergida en el fluido en movimiento. Fig. 4.5 De esta forma se conocen el número de revoluciones por segundo "n" de la hélice y por la fórmula $V = an+b$, se halla la velocidad de la corriente en el punto elegido. Así sucesivamente, se pueden tomar las velocidades en diferentes puntos de una vertical, a distancias prefijada para posteriormente obtener los caudales por métodos geométricos o gráficos.

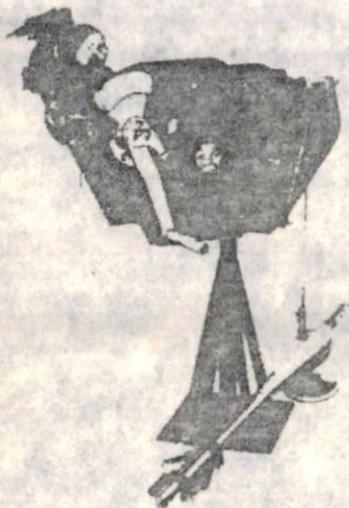
Debe procurarse que el calibrado del molinete o correntómetro cubra la gama de velocidades de la corriente a medir, y que la medición se haga por lo menos una vez al mes.

A Medición de la sección transversal

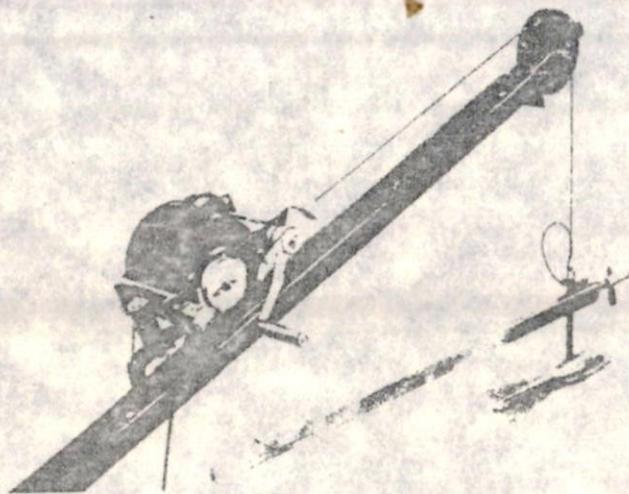
Los aforos pueden realizarse por vadeo o por suspensión desde cable-canastilla. En el segundo caso también puede ser por intermedio de una pasarela, puente o bote.

- Distancia entre verticales de sondeo

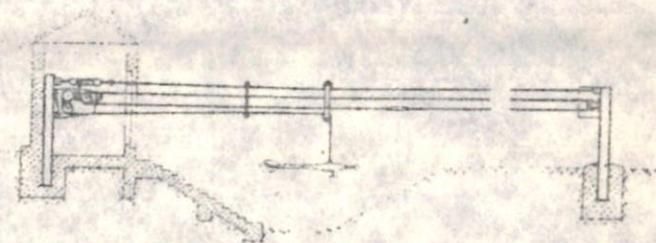
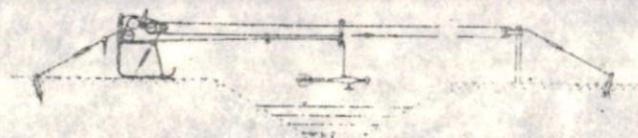
Puede medirse utilizando una cinta graduada de acero, o una cadenilla graduada, wincha metálica, graduaciones fijados en un puente por los costados de aguas arriba, o en un cable teleférico.



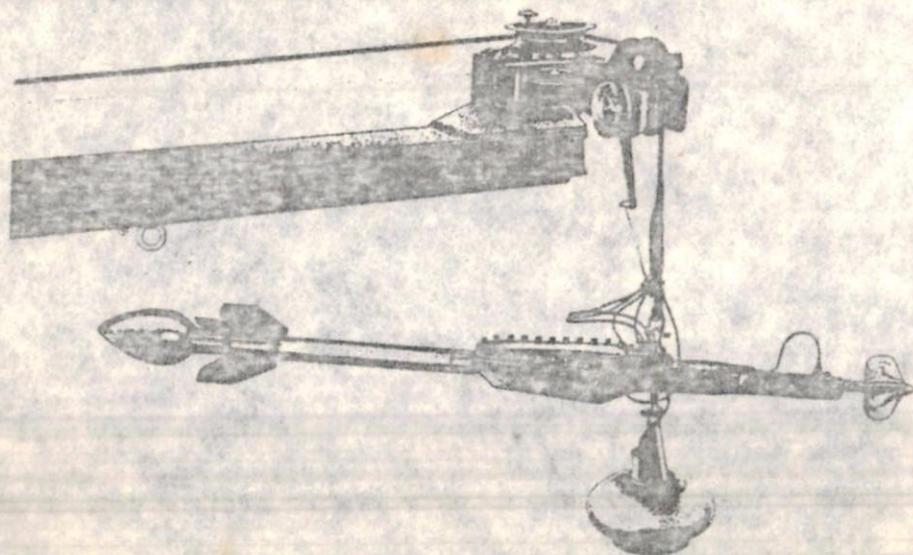
Heavy Cable Suspended Current Meter on Winch



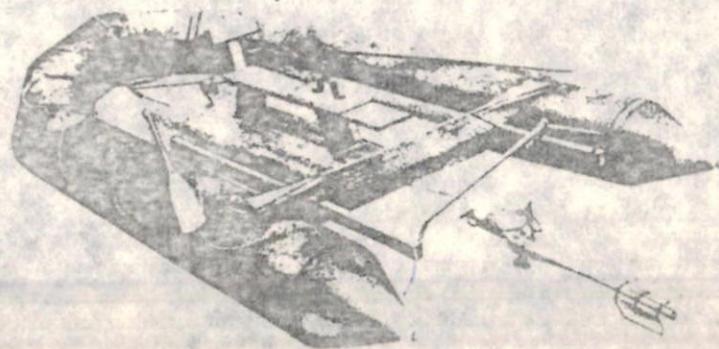
Light Cable Suspended Current Meter on Winch



Cable Way Installations



Current Meter with Flow Direction Indicator



Collapsible Gauge Raft for River Gauging

Para medición de distancias en grandes ríos se utiliza generalmente una embarcación equipada con equipos topográficos (banderolas, radio, etc.) existiendo diferentes métodos para medir la distancia vertical.

- Medición con estadía

Se sitúa un teodolito en un extremo de la sección visualizada a través de jalones y se mide ópticamente, la distancia sobre una mira en la embarcación. Este método es práctico y simple, siempre que la embarcación no se mueva mucho. Está limitado por el poder óptico del teodolito, que generalmente no alcanza más allá de 200 metros. Fig. 4.6.a

- Método angular

Se sitúa al teodolito a una distancia conocida de la sección y se mide el ángulo alfa formado por la visual de la embarcación y la normal al punto de observación a la vertical. Para calcular la distancia se necesita una tabla de tangentes (regla de cálculo). Este método es practicable aún con grandes distancias.

En una variante de este método, se mide el ángulo por medio de un sextante desde la embarcación, en cuyo caso en el sitio

del teodolito se coloca un jalón. Resulta ventajoso cuando la posición del bote se debe mantener con el motor sin que se pueda anclar. Para lo cual se instruya fácilmente al motorista. Fig. 4.6.5. y 4.6.6

-- Método de proyección

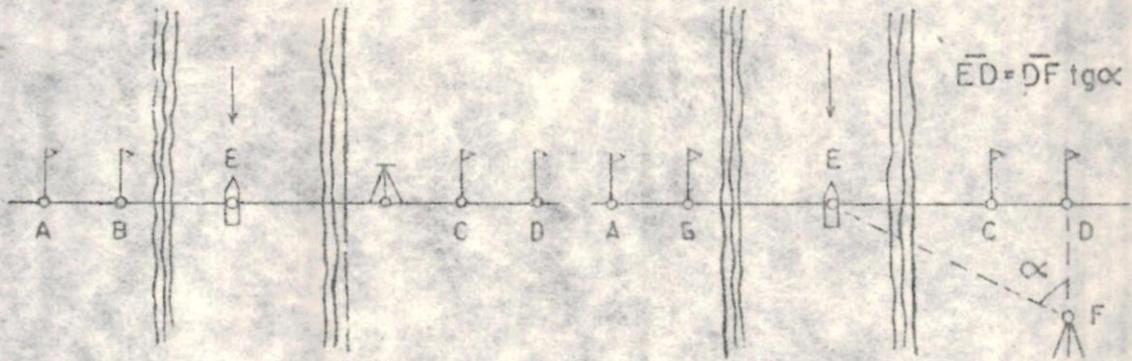
Sobre cada orilla se establezca una normal a la sección. En una de ellas, a una distancia conocida, se coloca un jalón fijo. Sobre la normal de la otra orilla se coloca un observador que busque alinear la embarcación con el jalón fijo de la orilla opuesta, hecho lo cual mide su alejamiento de la sección. La distancia se calcula por proporciones. Este método tiene la ventaja de que se puede desarrollar aún sin teodolito ni sextante. El operador de la embarcación no puede corregir su posición sino obedeciendo señales desde la orilla o radio. Fig. 4.6.d/ 4.6.e

8 Determinación de la profundidad

En el caso de profundidades pequeñas se utiliza una barra graduada.

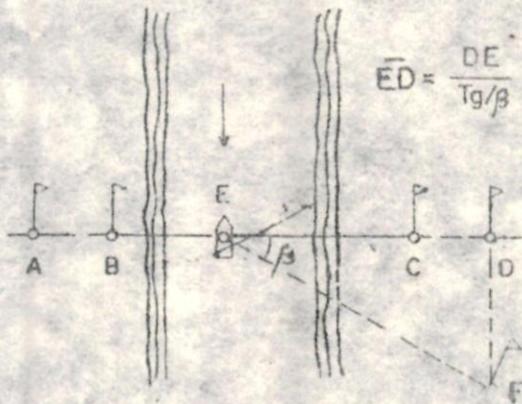
En los lechos de poca profundidad y mucha velocidad debe usarse preferentemente el escandalle coaxial, el que lleva unido un

MEDICION DE DISTANCIAS SOBRE GRANDES RIOS
DONDE NO SE PUEDE TENER CABLE

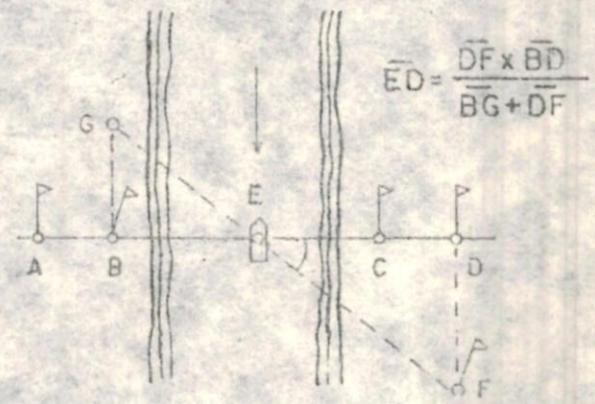


a) METODO DE LA ESTADIA

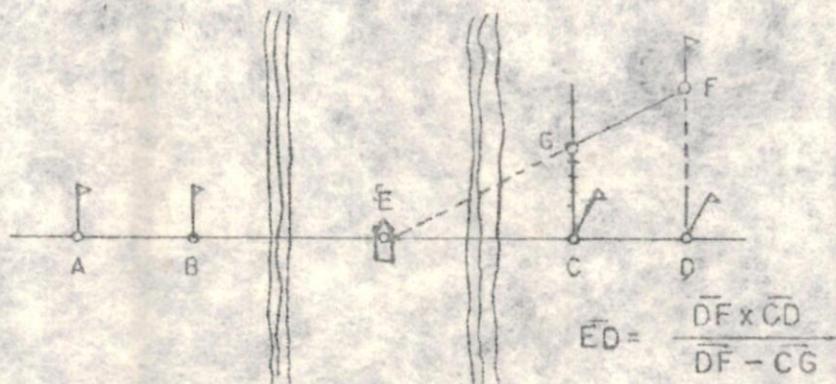
b) METODO ANGULAR - TEODOLITO



c) METODO ANGULAR - SEXTANTE



d) METODO DE PROYECCION - AMBAS ORILLA



d) METODO DE PROYECCION EN UNA SOLA ORILLA

Figura 4.6

cable enrollado en un tambor o wincha, cuya verticalidad con respecto a la superficie y el fondo debe mantenerse durante el oforo. Si el ángulo entre el cable y la vertical es grande será necesaria la corrrección de la profundidad medida. El peso del escandallo, pescado o lastre está en función a la velocidad, es decir a medida que la velocidad aumente el lastre - debe ser de mayor peso para reducir el - error de medición por la inclinación del cable.

En los ríos anchos y de gran profundidad, pueden medirse también con ecosonda, donde el amplificador magnético suele montarse en la propia sonda y la profundidad se registra en una banda continua. Es preciso calibrar periódicamente el ecosonda en las mismas condiciones de salinidad y temperatura del agua que se dan en la práctica cuando se efectúan las mediciones.

C Medición de la velocidad

La distribución de velocidades en una vertical, ha planteado discusiones teóricas, habiéndose propuesto como patrón el arco de parábola, el cuarto de elipse y figuras compuestas de arco, de círculo y rectas. En los cauces naturales estas distribuciones de velocidad son muy diversas debido a las condiciones del lecho, gravas,

cantos rodados, influencia de roce lateral y de fondo, etc. pero en general el valor máximo está próximo a la superficie, el mínimo en el fondo y en las orillas sus velocidades presentan valores menores.

La velocidad debe tomarse en uno o más puntos en cada vertical a través de la sección, con tiempos no inferiores a 60 seg, y con el molinete orientado perpendicularmente a la dirección del flujo.

En caso que no fuera posible, deberá medirse el ángulo que forma la velocidad de la co-rriente y el plano de la sección de medida.

Luego determinar la componente normal de la velocidad, multiplicando la velocidad medida con el molinete en posición libre, por - el seno del ángulo que forman el plano de la sección de medida y la dirección de la co-rriente.

a Medición en varios puntos

Este tipo de medición origina el llama- do aforo completo por puntos, y mide - las velocidades en 3 o más puntos. Per- mite dibujar sobre la sección transver- sal, las líneas isótocas o curvas de - igual velocidad, visualizándose la distribución de velocidades sobre toda la sección y además permite obtener la dis

tribución de velocidades en cada vertical.

Como regla general en este procedimiento se mide la profundidad del fondo y en varios puntos intermedios.

El cálculo matemático de esta velocidad en cada vertical se determina de la siguiente manera :

$$v_m = \frac{A}{h} = \int_0^h \frac{v \, d \, y}{h}$$

o también :

$$V_m = \frac{V_s + 3V_{0.2} + 2V_{0.6} + 3V_{0.8} + V_1}{10}$$

V_s = velocidad justamente por debajo de la superficie.

V_1 = velocidad ligeramente por encima del fondo.

b . Medición del 0.2 y 0.8

Este procedimiento consiste en hacer observaciones de velocidad en cada vertical a 0.2 y 0.8 de la profundidad, par

./.

tiendo desde el fondo hacia arriba o de la superficie hacia abajo. Este método debe usarse cuando en la sección se ha hecho un número suficiente de aforos completos por puntos, de tal manera de poder determinar el porcentaje de error. Así por ejemplo, en 70 aforos realizados en Chile, el error cometido fue del 1.6%, en 17 aforos realizados en San Salvador el error fue de 1.6%, en norteamérica, para ríos tranquilos 4.6 % de error.

En ríos de fuerte pendiente los errores aceptables son del 5 %.

Este método se basa en el concepto de reemplazar la superficie de velocidad por un trapecio de área equivalente. La velocidad media de una vertical se obtiene como promedio aritmético de ambas velocidades medidas.

c. Medición del 0.6 o un solo punto

La observación de velocidad se hace a una profundidad de 6 décimos desde la superficie y cuando se mide del fondo a la superficie es de 4 décimos. Este método debe ser aplicado sólo cuando se tiene un ajuste por la rela

ción entre un aforo a 0.6 con aforo - de 0.2 - 0.8 o mayor cantidad de puntos; por factor tiempo o cuando se re quiere chequear un aforo en forma rápida o en el caso de crecidas, siempre y cuando se pueda introducir el molinete.

El error porcentual en este tipo de aforo es mayor del 5% en promedio.

d. Medición por integración

En este método el molinete o correntómetro es sumergido hasta el fondo del río y luego es subido a una velocidad constante. Esto se efectúa para cada vertical.

Las revoluciones son contadas, así como el tiempo para cada observación.

Este método no es muy usado ni se reco mienda, ya que además de ser muy laborioso se requiere de personal altamente capacitado. La experiencia demuestra que sólo debe hacerse como una medida de investigación para compararlo con otros métodos.

e. Medición Superficial

La velocidad superficial se emplea en los casos en que los aforos son imposi

bles de realizar por los métodos ante riores, debido a que no se cuenta con el instrumental (correntómetro) o que éste no puede introducirse debido a - que la velocidad del río no lo permite. También para encontrar la relación que existe entre la velocidad su perficial y la velocidad media. Este cálculo se puede hacer de la siguiente manera :

Midiendo la velocidad a la altura del pelo de agua para encontrar una relación de $\frac{V_s}{V_m}$ para cada vertical.

Gráficamente se puede determinar la - velocidad siempre y cuando se tengan más de tres mediciones.

4.2.3 Cálculo del Caudal

El caudal se calculará aritméticamente (métodos de la sección media y de la semi-sección) o gráficamente (métodos de la integración de la curva de - profundidad velocidad y del trazado de la curva - de velocidad)

La elección de cualquiera de estos métodos, depen de de la precisión requerida, de la naturaleza de la corriente y de las condiciones de trabajo y - formación del hidrólogo.

Los métodos aritméticos son mucho más rápidos y son especialmente útiles para las evaluaciones he

chas sobre el terreno.

Los métodos gráficos son más laboriosos pero, aumentan en ocasiones la precisión del cálculo y presentan un cuadro más completo de las condiciones de la corriente.

A Métodos aritméticos

La fig.4.7 muestra un modelo de hoja de registro de las observaciones hechas sobre el terreno y del cálculo del gasto.

a. Método de la sección media

Se considera que la sección transversal (Fig. 4.8) está compuesta por cierto número de franjas, limitada cada una de ellas por dos verticales adyacentes. Sea V_1 la velocidad media en la primera vertical y V_2 la velocidad media en la vertical adyacente; d_1 y d_2 las profundidades totales medidas en las verticales 1 y 2 respectivamente y b , la distancia horizontal entre las verticales. El gasto de una franja será :

$$q = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \frac{(d_1 + d_2)}{2} b$$

Esta operación se repite para cada franja y el gasto total se obtiene sumando el resultado obtenido para cada una de ellas.

./.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
 DIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA
 CONTROL DE DESCARGAS

ESTACION 4651		HORA INICIAL 11:55		LECTURA DE ESCALA		CORRENTOMETRO No. 2-11 HELICE No. 1			
RÍO 4666		HORA FINAL 12:55		INICIAL 1.55		LASTRE 1.55			
CUBIENCA 4666		FECHA 17-11-9		FINAL 1.7		REVOLUCIONES POR SERIAL			
CENTRO REGIONAL 1014		PROFUNDIDAD		PROFUNDIDAD		AFORADOR W. GILES P. G. C. S.			
TRABAJO DE CAMPO				TRABAJO DE GABINETE					
SONDEOS		CORRENTOMETRO		VELOCIDAD		SECCION		DESCARGAS	OBSERVACIONES
ENTRADA DEL PUNTO	PROFUNDIDAD	TIEMPO	VELOCIDAD	TIEMPO	VELOCIDAD	ANCHO	ALTO		
1	1.00	0.20	0.2	0.04	0	50	0.01		
			0.4	0.08	7		0.05		
			0.6	0.12	18		0.10	0.06	
			0.8	0.16	18		0.07	0.16	
2	2.00	0.30	0.2	0.06	80		0.27	0.36	0.35
			0.4	0.12	79		0.22		0.25
			0.6	0.18	109		0.27		0.20
			0.8	0.24	110		0.28		0.20
3	3.00	0.35	0.2	0.07	58		0.21	0.42	0.32
			0.4	0.14	76		0.40		0.22
			0.6	0.21	87		0.46		0.20
			0.8	0.28	114		0.44		0.20
4	4.00	0.49	0.2	0.10	135		0.20	0.63	0.42
			0.4	0.20	156		0.21		0.25
			0.6	0.30	185		0.26		0.25
			0.8	0.39	185		0.26		0.25
5	5.00	0.57	0.2	0.11	110		0.28	0.81	0.53
			0.4	0.23	97		0.51		0.20
			0.6	0.34	183		0.25		0.20
			0.8	0.46	188		0.28		0.20
6	6.00	0.48	0.2	0.10	240		1.38	1.10	0.52
			0.4	0.19	278		1.40		0.20
			0.6	0.29	387		1.49		0.20
			0.8	0.38	399		1.60		0.20
7	7.00	0.52	0.2	0.12	231	50	1.20	1.05	0.55
			0.4	0.25	265		1.09		0.20
			0.6	0.37	380		1.96		0.20
			0.8	0.50	417		2.06		0.20
8	8.00	0.46	0.2	0.09	174		0.90	1.76	0.54
			0.4	0.18	267		1.05		0.20
			0.6	0.28	407		2.07		0.20
			0.8	0.37	402		2.08		0.20
9	9.00	0.88	0.2	0.16	227		1.09	1.72	0.67
			0.4	0.32	325		1.72		0.20
			0.6	0.48	381		1.92		0.20
			0.8	0.64	482		2.08		0.20
10	10.00	0.74	0.2	0.15	156		0.91	1.70	0.81
			0.4	0.30	202		1.26		0.20
			0.6	0.44	299		1.75		0.20
			0.8	0.59	409		2.12		0.20
11	11.00	0.82	0.2	0.16	180		0.94	1.67	0.78
			0.4	0.32	323		1.70		0.20
			0.6	0.48	412		2.13		0.20
			0.8	0.64	454		2.36		0.20
12	12.00	0.85	0.2	0.15	246		1.28	1.82	0.78
			0.4	0.30	359		1.86		0.20
			0.6	0.45	432		2.03		0.20
			0.8	0.60	488		2.26		0.20
13	13.00	0.90	0.2	0.18	273	50	1.22	1.84	0.82
			0.4	0.36	385		1.92		0.20
			0.6	0.54	419		2.06		0.20
			0.8	0.72	527		2.25		0.20
14	14.00	0.70	0.2	0.14	36		0.20	1.16	0.80
			0.4	0.28	69		0.36		0.20
			0.6	0.42	130		0.62		0.20
			0.8	0.56	157		0.82		0.20
15	15.00	0.63	0.2	0.13	220		1.19	1.00	0.66
			0.4	0.25	389		1.92		0.20
			0.6	0.38	526		2.44		0.20
			0.8	0.52	560		2.85		0.20
16	16.00	0.55	0.2	0.12	379		1.40	1.69	0.64
			0.4	0.24	567		1.90		0.20
			0.6	0.36	788		2.41		0.20
			0.8	0.48	938		2.92		0.20
17	17.00	0.57	0.2	0.11	102		0.57	1.42	0.61
			0.4	0.22	186		0.97		0.20
			0.6	0.34	252		1.37		0.20
			0.8	0.46	348		1.89		0.20
18	18.00	0.50	0.2	0.10	63		0.33	0.86	0.54
			0.4	0.20	126		0.66		0.20
			0.6	0.30	167		0.85		0.20
			0.8	0.40	178		0.93		0.20
19	19.00	0.54	0.2	0.11	29	50	0.46	0.86	0.52
			0.4	0.22	57		0.30		0.20
			0.6	0.32	87		0.43		0.20
			0.8	0.42	98		0.51		0.20
20	20.00	0.20	0.2	0	0		0.01	0.21	0.37
			0.4	0.02	15		0.09		0.20
			0.6	0.04	14		0.08		0.20
			0.8	0.06	17		0.10		0.20

11.214 74.337 → 74.421 10.00
 (16.5%) 16.701

 W. GILES P. G. C. S.

Figura 4.7

EXPLICACION DEL CALCULO DE UN AFO
RO POR EL METODO DE SECCION MEDIA

<u>Columna</u>	<u>D e s c r i p c i ó n</u>
1)	Número del punto de medición
2)	Distancia del punto de medición al origen ubicada en una de las orillas
3)	Profundidad del punto de medición o distancia en m. del fondo a la superficie del agua
4)	Porcentaje de profundidad con respecto al fondo o a la superficie del agua (usando también método 0.2 y 0.8)
5)	Equivalentes en metros de los porcentajes de <u>profundidad</u>
6)	Número de revoluciones de la hélice del correntómetro por cada porcentaje de profundidad
7)	Intervalo de tiempo en que se contabilizó el número determinado de revoluciones por cada <u>porcentaje</u> de profundidad
8)	Velocidad por cada porcentaje de profundidad, - tiempo y revoluciones, hallado por la ecuación - del correntómetro $V = aN + b$
9)	Valor promedio de la velocidad en la vertical, <u>hallado</u> promediando los 4 valores de velocidad - por altura porcentual
10)	Valor promedio entre dos puntos de medición consecutivos
11)	Valor promedio de las profundidades dadas entre los dos puntos de medición
12)	Distancia entre los puntos de medición <u>consecutivos</u> .

- 13) Area del trapecio formado por las profundidades de los dos puntos y su distancia
- 14) Caudal del tramo en m^3/s obtenido multiplicando el área de la sección por la velocidad media del tramo
- 15) Sumatoria de los caudales parciales para hallar la descarga total en la sección.

b. Método de Semisección

Para calcular el gasto de cada franja, se multiplicará V_d por la anchura correspondiente medida a lo largo de la línea de superficie. Esta anchura representará la suma de la mitad de la distancia entre verticales adyacentes. Puede evaluarse el valor de V_d en las dos medias anchuras próximas a las márgenes.

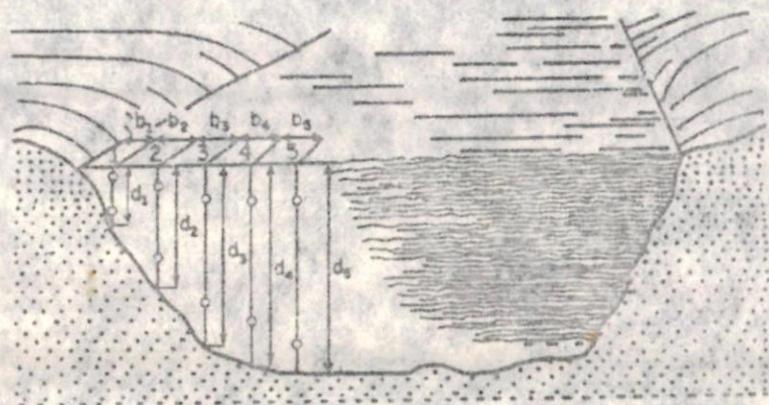
Con referencia a la Fig. 4.8 el gasto total se calculará de la siguiente manera :

$$Q = V_1 d_1 \frac{(b_1+b_2)}{2} + V_2 d_2 \frac{(b_2+b_3)}{2} + \dots$$

B Métodos gráficos

a. Integración de la curva profundidad-velocidad

La primera operación consiste en trazar para cada vertical, la curva profundidad-velocidad, cuya área representa el producto de la velocidad media por la profundidad total en m^2/seg . El valor de este producto en cada vertical, se referirá a la línea de superficie, trazándose una curva con los puntos así obtenidos. El área comprendida entre esta



Sección de un río con el emplazamiento de los puntos de medición

CALCULO DEL AFORO

a) Método de la sección media :

$$q = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \cdot \frac{(d_1 + d_2)}{2} \cdot b_1$$

$$Q = \sum q \quad [m^3/seg.]$$

b) Método de la Semisección :

$$q = v_1 \cdot d_1 \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2} \right)$$

$$Q = \sum q \quad [m^3/seg.]$$

NOTA: EN CASO DE NO SER POSIBLE MEDIR LA VELOCIDAD EN LAS MARGENES, HAY QUE ESTIMARLO EN CAMPO EN RELACION AL PUNTO MAS CERCAÑO MEDIBLE.

Figura 4.8

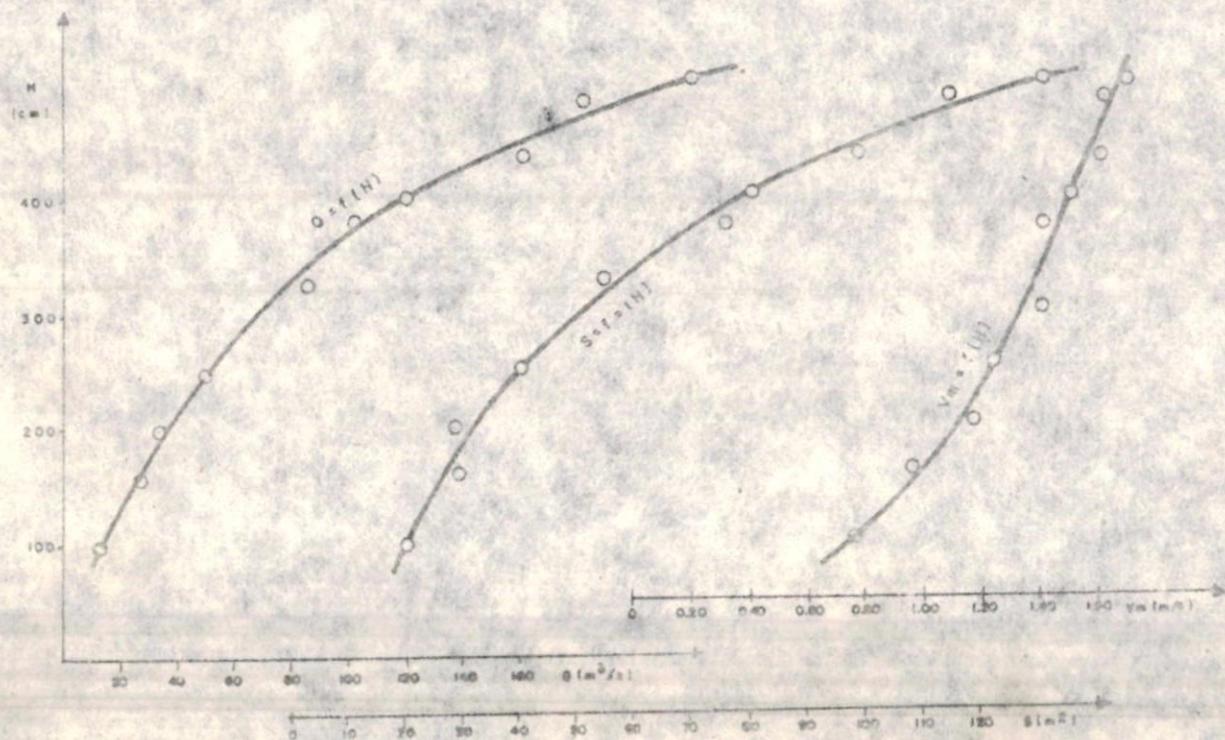


FIGURA 4

ASPECTO GRAFICO NORMAL DE LAS CURVAS DE GASTOS Y SUS CORRESPONDIENTES AREAS

curva y la línea representativa de la superficie del agua será el gasto de la sección transversal. En este método debe determinarse gráficamente la velocidad superficial V_s y compararla con la velocidad media V_m donde -

$$K = \frac{V_m}{V_s} \quad \text{Fig. 4.9}$$

b. Trazado de la curva de velocidad

Con las isótacas dibujadas en la sección, se planimetrán las curvas de igual velocidad y se dibujan en un papel aritmético, en la abcisa, el área planimetrada y en la ordenada, la velocidad. El área correspondiente a esta figura representa el caudal de dicha sección transversal.

c. Precisión de las mediciones

La precisión de estas mediciones depende de la exactitud del instrumento de medida, de las condiciones del río, del número de observaciones de velocidad y profundidad, de la experiencia habilidad y capacitación del aforador, del método de cálculo, etc.

H U A U R A

ESTACION: ALCO

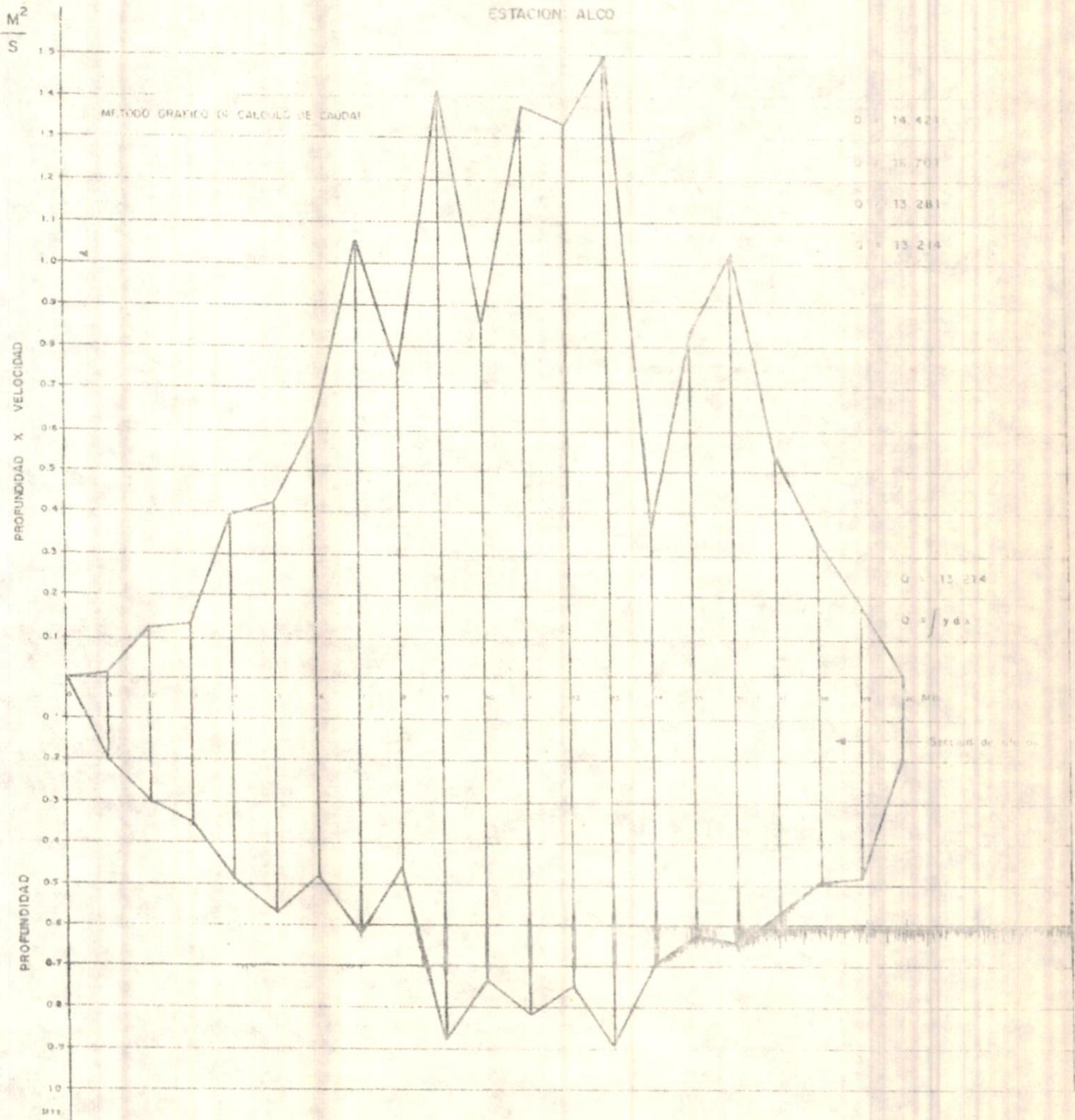


Figura 4.9

EXPLICACION DEL CALCULO DE
DE UN AFORO POR EL METO
DO GRAFICO

- 1) Se grafica la distribución de las velocidades perpen-
diculares a la línea de profundidad de cada punto de
medición. Es decir altura porcentual de profundidad
en m. versus velocidad perpendicular correspondien-
te.
- 2) La distribución de las velocidades halladas, se ajus-
ta a un perfil de distribución de velocidades versus
profundidad para cada punto de medición.
- 3) Se halla el área de dichos perfiles de distribución
comprendidos del fondo hasta la superficie y expresa-
dos en M^2/S .
- 4) Teniendo para cada punto de medición, su correspon-
diente área del perfil de velocidades en su línea de
profundidad, se confecciona un gráfico donde las or-
denadas representan las áreas en M^2/S y las abscisas
las distancias al origen de cada punto de medición -
de la sección.
- 5) Se halla el área bajo la curva Area de perfil versus
distancia obteniéndose el caudal de la sección ya
que $M^2/S \times M = M^3/S$
- 6) Se grafica la sección, presentándose junto al gráfi-
co Areas de perfil de velocidades versus distancia.

EJEMPLO :

El tramo 6 - 7 corresponde a los puntos de medición 6 y 7
./.

con una separación de 1 m.

El punto 6 (a 6 mts. del origen), tiene una profundidad de : 0.48 y el área de su perfil de velocidades es -- 0.624 M²/S

El punto 7 (a 7 mts. del origen), tiene una profundidad de : 0.62 mts. y el área de su perfil de velocidades es 1.052 m²/s

En el tramo el área en m³/S o control del tramo será :

$$\frac{(0.624 + 1.052)}{2} \text{m}^2 \cdot 1 \text{ m.} = 0.838 \text{ m}^3/\text{S}$$

Es decir el área del trapecio, cuya base menor y mayor son las áreas de los perfiles de velocidades en M²/S y 0.624 y 1.052 y la altura es la distancia entre los -- dos puntos igual a 1 m.

El error aceptable dentro de este tipo de mediciones efectuada en condiciones normales se sitúa entre el 2% al 5% aproximadamente y en condiciones extraordinarias (una crecida) del 10 %.

4.2.4 Aforo con flotadores

Este es el método más práctico para medir la velocidad superficial, cuando resulta imposible aforar con molinete. (debido al material en arrastre o velocidad del río).

En este método, previamente deben trazarse a escala las secciones de aguas arriba y aguas abajo, divididas en un mismo número a una distancia razonable de 50 a 300 m, según el tamaño y la velocidad de la corriente. Los flotadores se sueltan de manera que cuando pasen por la primera sección ya estén en régimen.

El recorrido de cada flotador se determina a través del ángulo que forma con una referencia fija al pasar por la sección de aguas arriba y la sección de aguas abajo respectivamente.

A mitad de camino entre ambas secciones, se traza una línea paralela a ellas y donde los flotadores la corten se trazan a escala las velocidades correspondientes afectadas de su coeficiente de reducción a la vertical, obteniéndose así una curva de distribución de velocidades. De esta curva se sacan los valores que multiplicados por el promedio de las -- áreas correspondientes proporcionarán los gastos parciales que sumados nos darán el gasto total. Es decir, la medida de la velocidad superficial es una -

manera indirecta de determinar la velocidad media, siempre y cuando anteriormente se hayan realizado algunas mediciones que determinen dichas relaciones.

Los flotadores a utilizar son : los de superficie y los sumergidos, no pudiendo emplearse el primero cuando es afectado por los vientos. Otro tipo de flotador es el de varilla, que tiene una inmersión superior a la cuarta parte de la profundidad del río. En condiciones difíciles se pueden emplear como flotadores naturales: árboles, palizadas, etc.

4.2.5 Aforo Químico

Este aforo consiste en verter una solución conocida y ver la variación que experimenta una vez mezclada de manera homogénea en la masa de agua circulante. Este método se recomienda únicamente en los lugares que no puedan emplearse los métodos convencionales. Son condiciones comunes a este tipo de aforos: poca profundidad de la corriente, excesiva velocidad o la magnitud de la turbulencia.

A Condiciones generales

- La solución inyectada debe diluirse completamente en toda la sección transversal del río antes de llegar a la sección de muestreo.

- Los materiales, sedimentos, plantas u organismos, depositados en el lecho del río no absorvan la sustancia trazadora.

B Trazadores

Puede utilizarse como trazador cualquier sustancia a condición de que :

- Se disuelva rápidamente en el río a una temperatura normal.
- No se encuentre normalmente en el agua del río o esté presente sólo en cantidades ínfimas.
- No se descomponga en el agua del río, ni sea retenida o absorbida por sedimentos, plantas u organismos.
- Su concentración pueda ser detectada por métodos sencillos.
- Sea inofensiva para el hombre y para los animales en el grado de concentración que alcance en la corriente.
- Sea barata.

Los trazadores que se utilizan más comúnmente son: cloruro de sodio, dicromato de sodio, elementos radiactivos tales como: el oro de 198 y el sodio 24.

C Método de Integración

El objetivo es determinar el caudal vertiendo un volumen V de solución concentrada N_1 , en gramos por litro en una manera instantánea en un punto S_1 del río. Posteriormente en un intervalo de tiempo se toman muestras de la solución mezclada en el agua en diferentes intervalos de tiempo en un punto del río S_2 . Estas muestras son luego analizadas en un laboratorio, dibujándose un gráfico de concentraciones vs. tiempo. Fig. 4.10

El área de la curva puede calcularse por la expresión :

$$VN_1 = Q \int_{T_1}^{T_2} N_i dt$$

La integral es el área de la campana representada en la curva, y puede ponerse en forma de incrementos finitos como sigue :

$$\int_{T_1}^{T_2} N_i dt = \Delta T \sum_{i=1}^n N_i$$

donde :

ΔT = es el intervalo de tiempo de extracción de muestras y "n" el número de muestras extraídas, debiendo ser "0" la concentración de la primera y última. Se tiene con esto el caudal buscado:

./.

$$Q = \frac{V N_1}{\Delta T \sum_{i=1}^n N_i}$$

V = volumen vertido en S₁ en litros, se mi
de in situ con una probeta.

N₁ = concentración en gramos por litro; se
toma una muestra para medir en el labo
ratorio con el fotocolorímetro.

ΔT = intervalo en segundos de las tomas de
muestras; como mínimo T = 10 seg., -
para que dé tiempo a efectuar la opera
ción de extracción.

N_i = concentración en gramos por litro, a -
medir en laboratorio de las muestras -
extraídas.

También se pueden tomar muestras de manera contí
nua con una bomba a caudal constante, vertiéndoo
las en un frasco que dará la muestra de valor me
dio N₂ de manera que el caudal será :

$$Q = \frac{VN_1}{TN_2} \quad \text{ya que}$$

./.

$$TN_2 = A T \sum_{i=1}^n N_i$$

D Método de inyección continua o clásico

Este método se basa en efectuar una inyección -- continua de solución a caudal constante, de q litros/segundo, en una sección S_1 del río. Aguas -- abajo, en otra sección S_2 se habrá alcanzado la mezcla y al cabo de un tiempo " t_1 " se llega a formar una meseta en la curva de concentraciones.

Fig. 4.10

$$Q = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]$$

donde :

N_1 = concentración de la solución vertida, medida en laboratorio con fotocalorímetro. Sección S_1 .

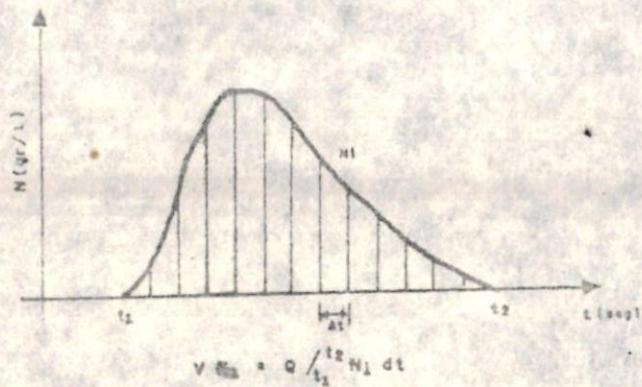
Q = el caudal circulante por el río, que se trata de calcular, en 1/s.

= caudal constante de inyección de la solución.

N_2 = concentración de la solución en la -- sección S_2 .

./.

METODO DE INTEGRACION



METODO DE INYECCION CONTINUA

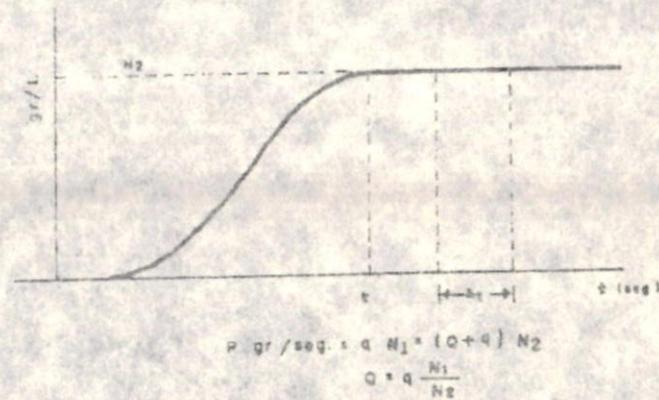
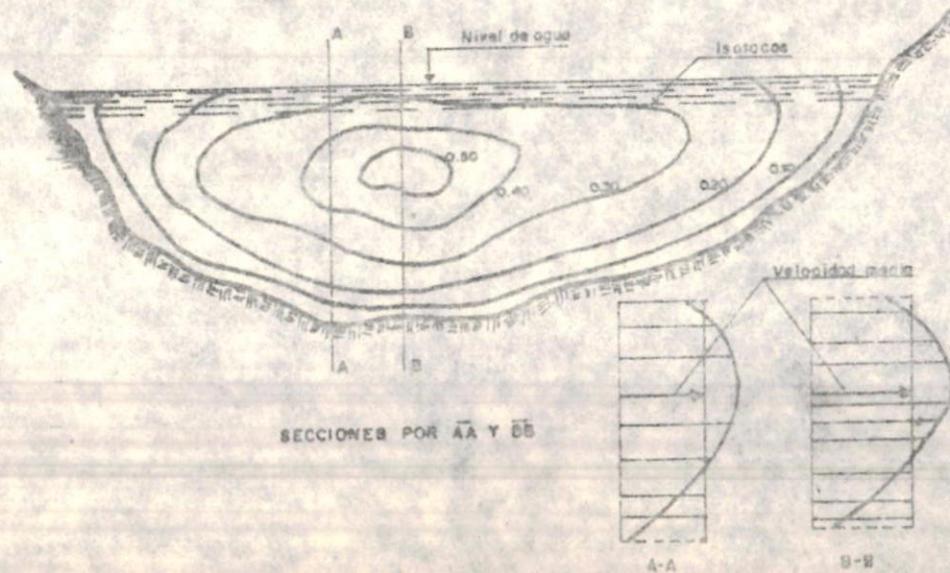


Figura 4.10



AFORO QUIMICO

(Determinaciones de Laboratorio)

MUESTRAS DE AGUA

(Disolución madre)

Número	Concentración
C - 1	28.410 mg/l Cr ⁶⁺
M - I - 2	99.810 mg/l Cr ⁶⁺

METODO DE INTEGRACION

(Campana)

Muestra Número	Concentración
27	0
28	0,02 mg/l Cr ⁶⁺
29	0,03 " "
30	0,26 " "
31	1,10 " "
32	2,60 " "
33	2,70 " "
34	2,25 " "
35	1,70 " "
36	1,25 " "
37	1,05 " "
38	0,95 " "
39	0,74 " "
40	0,45 " "
41	0,41 " "
42	0,38 " "

Datos campo - V = 6 litros t = 20 seg.

METODO DE INTEGRACION

(Bomba)

Muestra Número	Concentración
50	1,08 mg/l Cr ⁶⁺

Datos campo T = 300 seg.

METODO CLASICO

46	1,85 mg/l Cr ⁶⁺
47	1,84 " "
48	1,84 " "
49	1,68 " "

Datos campo - q = 0,10 l/seg.

AFORO QUIMICO (CALCULO)

INTEGRACION

12) Campana

$$I_{N1} = 15,87 \text{ mgr/l}$$

$$I_{N1} = 0,30 + 0,20 + 0,15 + 0,10 + 0,08 + 0,05 + 0,02$$

$$I_{N1} = 0,90$$

$$E_{N1} + E_{N1} = 0,90 + 15,87 = 16,77$$

$$Q = \frac{VN1}{\Delta t \times 16,77} = \frac{6 \times 99,81}{20 \times 16,77} = 1,79 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

24) Bomba

$$Q = \frac{V - N1}{T \times 1,08} = \frac{6 \times 99,81}{300 \times 1,08} = 1,84 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

CLASICO

$$Q = q \times \frac{28,41}{1,84} = 0,10 \times \frac{28,41}{1,84} = 1,60$$

$$Q = 0,10 \times \frac{28,41}{1,88} = 1,79$$

4.3 CURVAS NIVEL CAUDAL

La relación nivel-caudal se determina representando en la abscisa el caudal medido y en la ordenada el nivel correspondiente, dando origen a una curva que es función esencialmente de la forma geométrica de la sección y de la pendiente del eje hidráulico del agua. Estas curvas obtenidas pueden ser simples o compuestas. Y se les conoce comúnmente como curvas de descarga.

Es conveniente tener en un solo gráfico toda la familia de curvas de descarga trazadas a la misma escala, correspondientes a la misma sección, con la finalidad de definir la curva que ha permanecido por más tiempo válida y en torno a la cual oscilan las otras curvas. Esta curva definida es la llamada curva de descarga fundamental.

En los casos de que el lecho del río sea estable, los distintos gastos que pasen siempre se ajustarán a una misma curva fundamental. En el caso de lechos inestables las curvas de descarga variarán alrededor de la ya definida curva fundamental. Fig. 4.11

4.3.1 Cálculo de curva de descarga

Se requiere experiencia y capacitación de las personas encargadas a esta labor, debido a que es frecuente encontrar errores de concepto al catalogar la bondad del aforo y revisión de los que le merecen duda.

Deben comprobarse; perfiles, profundidad, ancho - cálculo de operaciones, lecturas de mira, calibración del molinete, escalas del dibujo, planimetrado, etc.

Debe analizarse si los cambios de la curva son debidos a la variaciones del lecho del cauce, presencia de vegetación, o controles artificiales del agua, aguas arriba de la estación. Fig. 4.11

Tener cuidado del agua proveniente de afluentes, o bien de almacenamientos sobre las riberas, así como: aceleraciones debido a variaciones rápidas del caudal, dando origen a una curva de la forma de un lazo o histéresis.

Debido a las razones expuestas debe exigirse al aforador que en la planilla ponga todas las observaciones necesarias que sirvan para interpretar la curva altura gasto.

El número de aforos debe considerar una gama de los diferentes niveles limnimétricos.

4.3.2 Extrapolación de la Curva de descarga

A Extrapolación visual

Debe usarse sólo como una primera aproximación del dato y necesariamente debe confirmarse esta curva por otros métodos

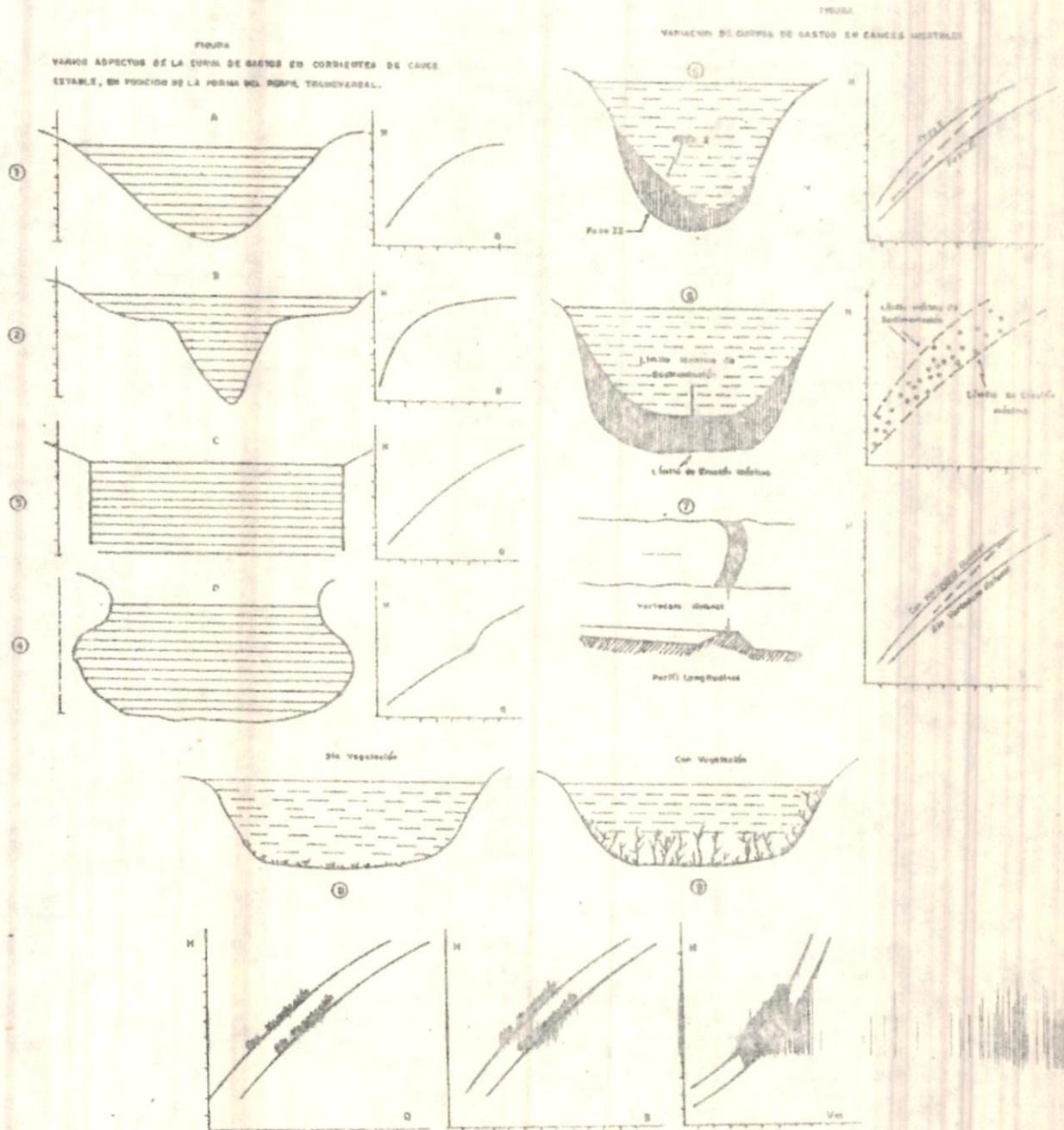


Figura 4.11

B Area-velocidad media

Conociéndose la velocidad media (V_m) y el Area (A) que corresponde a una sección, para una lectura de mira se grafica para un conjunto de aforos realizados, la relación nivel vs. área y vs. velocidad y en función a este gráfico se determina el caudal. Fig. 4.8

$$H = f(V, A)$$

$$Q = A \times V$$

C Método de Stevens

Es una modificación de la fórmula de CHEZY - aplicado a ríos relativamente anchos y poco profundos.

$$Q = A C \sqrt{SR} = C \sqrt{S} \times A \sqrt{\bar{H}}$$

donde :

A = Area

S = Pendiente del eje hidráulico

R = Radio hidráulico = \bar{H} = Tirante medio

C = Constante.

./.

Los valores C, S son casi constantes para niveles altos, posteriormente se grafica el valor del nivel de la mira vs $A \sqrt{H}$

D Fórmula de Manning

Esta fórmula deducida para canales puede aplicarse con mayor seguridad para la determinación de caudales que están a dos veces o más del caudal medio (niveles altos)

$$Q = AR^{2/3} \left[\frac{\sqrt{S}}{n} \right]$$

A = sección

R = radio hidráulico = $\frac{A}{P}$

P = perímetro mojado

S = pendiente eje hidráulico

n = constante que varía según la rugosidad del lecho.

El término $AR^{2/3}$, es el llamado factor geométrico y se plotea en las abcisas con los niveles en la ordenada y con el término $\frac{\sqrt{S}}{n}$ se produce de igual manera.

./.

Luego conociendo la lectura del nivel se entra al gráfico y se obtiene los dos elementos de la ecuación de Maning, el geométrico y el hidráulico.

E Método Analítico

Existe una serie de procedimientos analíticos o matemáticos para determinar la curva-nivel caudal, pero siempre debe apoyarse este resultado con la interpretación física e hidráulica de las variables analizadas. Pueden darse los siguientes casos :

- Un ajuste estadístico por parábola de segundo grado.

$$Q = ah^2 + bh + c$$

donde :

h : es la lectura de escala

a,b,c, : parámetros de la curva

- Ajuste de una ecuación exponencial

$$h = h_0 \cdot Q$$

aplicando logaritmos

$$\log h = Q \log + \log h_0$$

ó

./.

$$X = Q Y + B$$

$$X = A Y + B$$

Ecuación de una recta en ejes logarítmicos que se presenta en un papel logarítmico -- donde A y B son parámetros de la curva y X el logaritmo de la lectura de mira.

- Ajuste Potencial

$$Q = C (h-h_0)^n$$

Q = caudal en m³/s

h = nivel del agua leído en la escala.

C, n = constantes a determinar en la ecuación.

h₀ = es la altura para el cual el caudal es nulo, pudiendo ser positivo según corresponda a una erosión o una colmatación del tramo de la sección.

De esto se deduce que para distintos valores de h₀, le corresponden diferentes curvas, debiendo elegirse la más centrada, mediante tanteos o análisis matemáticos.

Además de estos métodos anunciados existen otros como los de Luna y Maddock, Leach, - Runnin Johnson.

4.4 EVAPORACION Y EVAPOTRANSPIRACION

La evaporación es el paso del agua del estado líquido a vapor y esto sucede cuando las molécula de agua adquiere la suficiente energía cinética para salir por sí sola a la superficie del agua venciendo las fuerzas de tensión superficial. En este proceso existe consumo de energía o calor, con la consiguiente disminución de temperatura.

Los elementos meteorológicos condicionantes más importantes son :

- Velocidad media del viento
- Temperatura del aire
- Temperatura de la superficie del agua.
- Humedad del aire
- Presión atmosférica
- Precipitación
- Calidad del agua
- Naturaleza y forma de la superficie

4.4.1 Instrumentos de Medida

La evaporación puede medirse en forma directa o indirecta por medio de medidores de evaporación relativa, evaporímetros registradores y medidores de evaporación absoluta. Fig. 4.12

Evaporímetros registradores

Evaporímetros de papel

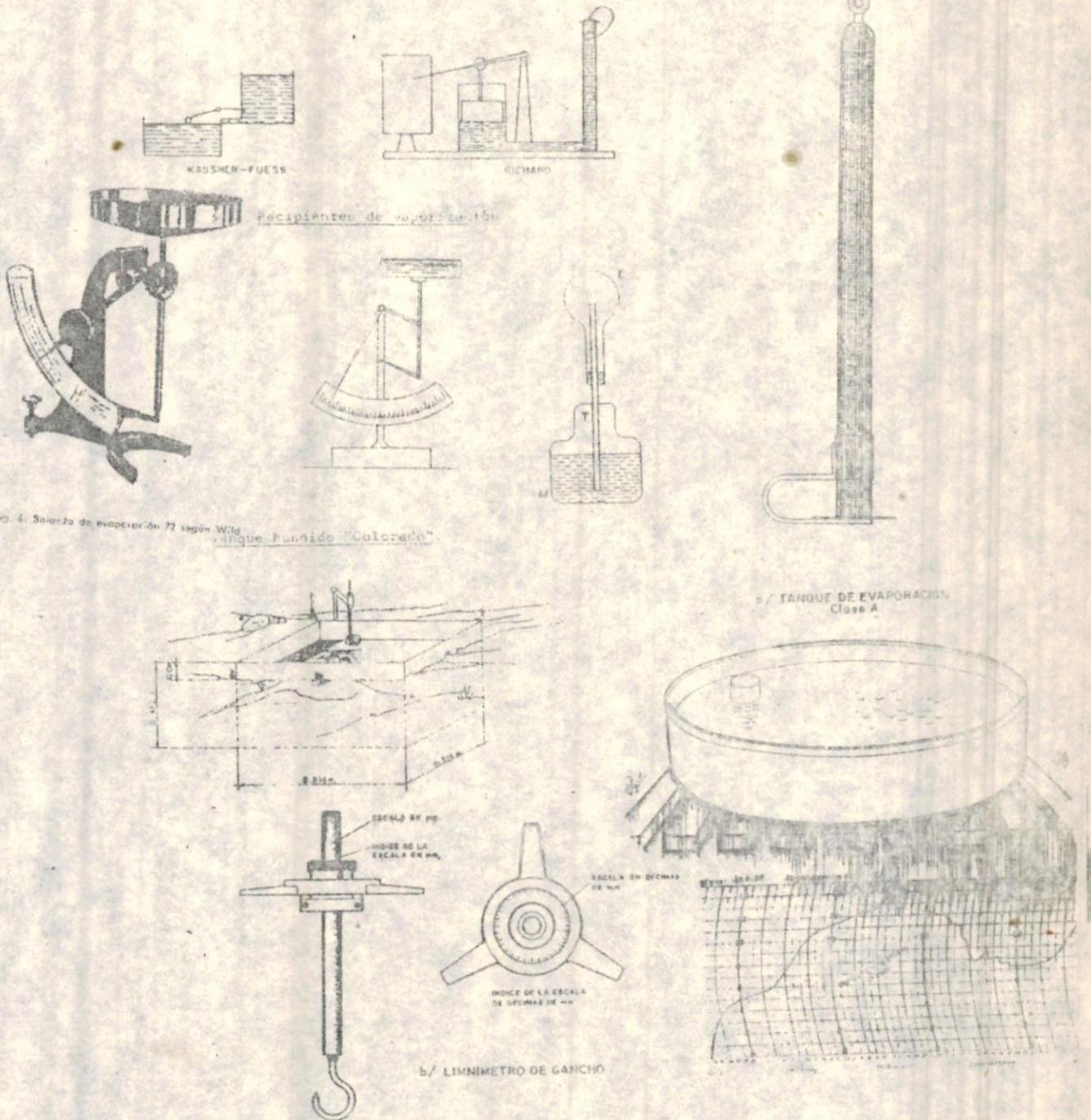


Figura 4. 12

A Tanques de evaporación

Estos tienen un almacenamiento de energía - calorífica muy inferior al de los lagos y lagunas. Tienden a experimentar un ciclo de - evaporación anual muy diferente, presentándose los valores extremos para el tanque al comienzo de la estación.

En cambio en el lago o laguna, el calor acumulado en la época de primavera o verano, lo utiliza como una energía adicional para los meses de otoño a invierno.

Debido a estas razones, a la evaporación - calculada por tanque se le debe afectar por un coeficiente de lago-tanque, que permita estimaciones más fidedignas de la evaporación anual del lago.

Los tanques exteriores tienen la ventaja de ser una instalación muy sencilla y sus resultados no corren el riesgo de ser falseados - por los rebotes de las gotas de lluvia del área circundante. En cambio están sometidos a intercambios caloríficos a través de sus - paredes.

a. Tanques de evaporación Clase A.

Modelo americano de hierro galvanizado - sin pintar; de cuatro pies de diámetro - por 10 pulgadas de altura, expuesto sobre un marco de madera para que el aire pueda circular.

Trabaja llenado de agua hasta la altura de 8 pulgadas que en ningún caso debe bajar a 7 pulgadas. Su medida de evaporación se hace con el limnómetro de gancho ajustado por cualquier precipitación sucedida en el día, a través de un pluviómetro reglamentario.

b. Tanques enterrados

Son menos sensibles a la influencias de los cambios caloríficos en las paredes, pero están expuestos al rebote de las gotas de lluvia y a la acumulación de detritos sobre la superficie del agua y sus condiciones de contorno en el suelo son distintas a las de un gran Lago.

c. Tanque hundido de colorado.

Tiene 3 pies cuadrados y 18 pulgadas de profundidad, es de fierro galvanizado sin pintar y queda hundido en tierra hasta 4 pulgadas de sus bordes y su medición se hace con un tornillo de gancho.

d. Tanques flotantes.

Tienen la ventaja de que sus condiciones se asemejan mejor a las condiciones del lago o laguna, sus instalaciones resultan difíciles por sus sistema de amarres y estabilidad, pero sus mediciones pueden

ser falseadas por el oleaje del agua y por la acción del viento.

Este tanque tiene 3 pies cuadrados de área y 15 pulgadas de profundidad y está soportado por rodillos flotantes en el centro de una balsa de 14 x 16 pies.

B Evaporímetros

a. Evaporímetro de balanza

Su funcionamiento es igual al de una balanza cuyas vasijas cilíndricas son de 200 cm².

Se llena hasta que marque 0 y después de 24 horas la evaporación del agua hace subir el platillo, leyéndose la escala graduada de milímetros.

b. Evaporímetro de papel

El más conocido es el evaporímetro de Piché de un centímetro de diámetro y de 18 cm. de longitud. Funciona llenado de agua destilada o lluvia y luego se cubre su extremo abierto con un disco de papel fil-
tro. Posteriormente se invierte con cuida-
do y se cuelga con un gancho en el techo de la garita.

c. Evaporímetros Registradores

Existen varios modelos para medir la evaporación, registrándola en una banda gra-
duada. Todos ellos constan básicamente de

un sistema de relojería para hacer girar la banda en función del tiempo y una plañilla registradora accionada por un flotador, terminando en una varilla que está en función de la oscilación de la evaporación. Entre otros tenemos el evaporímetro de "Kassner" - "Fuess, "Richard, - etc.

4.4.2

Métodos indirectos para estimar la evaporación.

La exactitud en la estimación, depende de la precisión inherente al equipo de medida y de lo completo que sea el registro. Entre otros existen los métodos de balance Energético, de Transferencia de masa, de balance Hídrico, fórmulas empíricas.

A Balance Energético

Este método se basa en el balance de energía y su complicación nace en las dificultades de evaluación de los términos buscados para la solución de la ecuación.

Se le usa básicamente en trabajos de investigación pura, su ecuación es la siguiente :

$$E = \frac{Q_s - Q_r - Q_b + Q_v - Q_o}{SL (1 + R)}$$

./.

Donde :

E = Evaporación en cm.

S = Densidad del agua

L = Calor latente de evaporación

R = "Relación de Bowen" que se expresa:

$$R = \frac{0,61P}{1,000} \left[\frac{T_w - T_a}{e_w - e_a} \right]$$

Siendo :

P = Presión atmosférica en milibares

T_w = Temperatura del agua, en °C.

T_a = Temperatura del aire, en °C.

e_w = Presión de vapor saturado, en milibares.

e_a = Presión de vapor del aire, en milibares.

Q_s = Radiación solar que llega al agua

Q_r = Radiación solar reflejada

Q_b = Pérdida de energía neta dentro del agua, debido al intercambio de radiación de onda larga entre la atmósfera y el agua.

Q_v = Energía neta, por advección, en el interior del volumen de agua.

Q_o = Incremento de energía almacenada - en el volumen de agua.

TEMA : ESTADISTICA EN HIDROLOGIA

Ing. Nicolás Echeverría M.

I N D I C E		Pág.
5.1	ESTUDIO DE FRECUENCIAS	111
5.2	CORRELACION	118
5.2.1	Generalidades	118
5.2.2	Correlación	118
5.2.3	Correlación lineal simple	119
5.3	REGRESION	126
5.3.1	Análisis de Regresión	126
5.3.2	Pasos en el análisis de regresión	126
5.3.3	Regresión lineal	127
5.3.4	Modelo lineal 1	128
5.3.5	Modelo lineal 2	129
5.3.6	Límites de confianza sobre la reg ta de regresión	134
5.4	TIPOS DE ASOCIACION CORRELATIVA	136
5.4.1	Relaciones causa-efecto	136
5.4.2	Relaciones de causa común	136

5.1 ESTUDIO DE FRECUENCIAS

Diversos problemas en hidrología requieren del uso de distribuciones empíricas univariadas de datos no agrupados. En el caso de muestras pequeñas, no es conveniente agrupar los datos en intervalos de clase porque pueden presentarse intervalos de clase con frecuencia absoluta nula.

Para el análisis de frecuencia de datos no agrupados, éstos se arreglan en orden de magnitud, sea creciente o decreciente.

Para poder comparar la distribución empírica con una función de distribución probabilística teórica cuya expresión algebraica se conoce, es necesario decidir donde graficar las observaciones simples que denominaremos x_m ($m = 1, 2, \dots, N$), de los eventos, no agrupados, pero sí ordenados en forma de magnitud creciente o decreciente.

Para tener el gráfico de la distribución empírica y poder deducir de su tendencia si el comportamiento de los datos pueden generalizarse mediante una función de probabilidad (la cual posee parámetros determinados que facilitan la extrapolación de los resultados y ayudan a predecir los eventos característicos), se requiere hallar las coordenadas x_m y $F(x_m)$, para todos los valores de x_m , donde $F(x_m)$ es la frecuencia acumulada del evento x_m .

La posición de $F(x_m)$, del m -ésimo valor ordenado de x perteneciente a la muestra de tamaño N y de la función de distribución $P(x)$ es función de m , N y $P(x)$. El m -ésimo valor tiene una distribución en la que se puede conocer la mediana, la moda y el valor esperado.

Teóricamente, la probabilidad del valor esperado $P(E(x_m))$ del valor m -ésimo se supone como su coordenada de representación. Si $P(x)$ se puede describir por los parámetros a, b, c, \dots etc., $P(x_m) = f(m, N; a, b, c, \dots)$. Para cada función específica ($P(x)$) con sus parámetros a, b, c , puede asignarse una expresión particular para graficar la coordenada $F(x_m)$.

Esto quiere decir que podemos suponer una función de probabilidad $P(x)$, calcular $F(x_m)$ y graficar el punto x_m y $F(x_m)$ en el sistema de coordenadas adoptado. Luego determinamos los parámetros a, b, c, \dots etc. y mediante la aplicación de una prueba verificamos el ajuste del gráfico resultante a la función $P(x)$. Si la prueba no satisface, se emplea otra función $P'(x)$, se repite el cálculo de $F(x_m)$ y nuevamente se grafican los puntos.

Debido a que $F(x_m)$ depende de $P(x)$ los puntos graficados $F(x_m)$ son funciones de $P(x)$.

Habiendo escogido una fórmula para el cálculo de la frecuencia, conociendo la función a la que deseamos ajustar los datos, puede emplearse el procedimiento de $F(x_m)$ dependiente de $P(x)$.

Las condiciones que deben satisfacer las coordenadas $F(x_m)$ del enésimo valor ordenado, según Gumbel son :

- a) Todas las observaciones pueden graficarse en un papel de probabilidades cuyo intervalo

$$P(x) = 0 \text{ y } P(x) = 1$$

Es decir no debe considerarse el evento de probabilidad 0 que es imposible y el evento indudable de probabilidad 1.

- b) Si se satisface la condición (a) que $F(x_m)$ no tome los valores de cero ni de uno. Las coordenadas del enésimo valor se distribuyen al azar y pueden ser independientes de la función de distribución fundamental $P(x)$ encontrándose entre las frecuencias observadas m/N y $(m-1)/N$.

- c) Las probabilidades de excedencia del valor máximo observado o de no excedencia del valor mínimo observado, se aproximan a las frecuencias relativas $1/N$, es decir a la inversa del tamaño de la muestra.

- d) Las observaciones graficadas en la escala de frecuencias pueden ser igualmente espaciadas donde la diferencia entre dos puntos consecutivos de orden $(m+1)$ y m es función de N únicamente y no de m .

- e) La coordenada debe ser analíticamente simple.

La expresión que permite calcular las coordenadas satisfaciendo las exigencias de Gumbel es conocida como fórmula de Weibull y que se presenta

$$F(x) = \frac{m}{N + 1} \quad (1)$$

Donde m es el orden que ocupa el valor x ; $m=1, 2, \dots, N$. Es decir que el evento de mayor magnitud le corresponde $m = 1$ y al último le corresponderá $m = N$.

N es el tamaño de la muestra

La expresión (1) indica que para $m = 1$; $P(x_1) = \frac{1}{N + 1}$ y para $m = N$; $P(x_N) = \frac{N}{N + 1}$; $P(x_1)$ es mayor que cero y $P(x_N)$ menor que la unidad; con lo cual se satisface el requerimiento (a) de Gumbel.

La inversa de $P(x)$ se conoce con el nombre de período de retorno o de intervalo de recurrencia que se expresa por

$$T(x) = \frac{1}{P(x)} \quad (2)$$

El período de retorno se expresa en las mismas unidades temporales a que corresponden los eventos, así por ejemplo, en el caso de avenidas o sequías son : eventos anuales.

Para el caso de la fórmula Weibull el período de retorno se expresará por :

$$R(x) = \frac{N + 1}{m} \quad (3)$$

Los períodos de retorno para los eventos de orden $m = 1$ y $m = N$ son

$$R(x_1) = N + 1 \quad \text{y} \quad R(x_N) = \frac{N + 1}{N}$$

Si $N = 100$

$$R(x_1) = 101 \quad \text{y} \quad R(x_N) = 1.01$$

El valor $R(x_1) = 101$, nos indica que para un período de observaciones de 100 años, el período de retorno es siempre 1 año más que el período de observaciones, eso quiere significar, que el evento de mayor magnitud registrado posee la probabilidad de repetirse dentro del período $N + 1$ años.

Por otro lado, el evento de orden $m = N$, es decir, el que con mayor frecuencia se presenta a tal punto que durante el período de registro su magnitud ha sido o igualada o superada, tiene un período de retorno 1.01, es decir ligeramente mayor que 1, lo cual es físicamente aceptable, dando cabida a la presencia de un evento de magnitud menor.

Otras fórmulas que se usan para estos cálculos son :

./.

Cuando la curva total de distribución de frecuencia es de interés práctico, se recomienda el uso de la ecuación (1) para la graficación de las distribuciones hidrológicas de puntos no afectados por el tamaño de la muestra. Si nos interesamos en los valores máximos únicamente, y los datos son ordenados en magnitud decreciente la ecuación (5) es la más apropiada. Para el mismo ordenamiento de la serie y cuando únicamente los valores mínimos son de interés, la ecuación (6) da buenos resultados.

5.2 CORRELACION

5.2.1 Generalidades

El análisis de regresión y correlación es una antigua herramienta usada en hidrología. Al inicio fue usada para completar datos y extender registros de corta duración por relación con otras estaciones con mayor extensión. Actualmente su aplicación se ha extendido para cubrir el estudio de las relaciones entre una a más variables hidrológicas y también en la investigación de la dependencia entre valores sucesivos de una serie de datos hidrológicos.

5.2.2 Correlación

A Definición

Se define como la asociación entre dos o más variables aleatorias. Explica sólo parcialmente la variación total de una variable, -- por la variación de otras variables aleatorias involucradas en la ecuación de asociación.

La parte de la variación total que queda sin explicar o sea, la variación no explicada, -- se debe a errores o a otras variables aleatorias que no han sido tomadas en cuenta en la correlación.

B Medidas de Correlación

Se necesita un parámetro estadístico para medir el grado de asociación correlativa entre las variables bajo consideración. Los parámetros estadísticos más utilizados son los coeficientes de correlación y de determinación y la desviación típica de los residuos.

C Análisis de Correlación

El análisis de correlación consiste en :

- a) El cálculo de una medida del grado de correlación.
- b) La realización de pruebas para determinar si es aceptable el grado de asociación correlativa.

El análisis de correlación está estrechamente relacionado con el análisis de regresión, puesto que la fórmula utilizada en el cálculo de la medida de correlación depende del modelo de regresión adoptado. Cuando se selecciona un modelo lineal simple, se habla de correlación lineal simple.

5.2.3 Correlación Lineal Simple

En lo que sigue se presentan los parámetros estadísticos más utilizados como medida de asociación correlativa.

./.

A Coefficiente de Correlación

El coeficiente de correlación es el parámetro estadístico más comúnmente utilizado para medir el grado de asociación entre dos variables linealmente relacionadas.

Está dado por la expresión :

$$\begin{aligned} \rho(x,y) &= \frac{\text{cov}(x,y)}{(\text{var } x \text{ var } y)^{1/2}} \\ &= \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \\ &= \frac{E[(x-\mu_x)(y-\mu_y)]}{[E(x-\mu_x)^2 E(y-\mu_y)^2]^{1/2}} \end{aligned}$$

Siendo ρ el coeficiente de correlación poblacional de las variables x e y . En base a muestras de tamaño n sacadas de las poblaciones de las variables se puede calcular r , que es una estimación de $\rho(x,y)$, mediante la fórmula :

$$\begin{aligned} r &= \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n s_x s_y} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y}}{n s_x s_y} \quad \therefore \end{aligned}$$

Para valores pequeños de n se suele utilizar la estimación insesgada.

B Valores y Variación de r

Cuando x e y son independientes $r=0$, puesto que en este caso $\text{cov}(x,y) = 0$

Si $r=0$, x e y no son correlacionadas linealmente, aunque pueden ser independientes.

Si $r=1$ ó $r=-1$ hay dependencia lineal funcional entre las dos variables, o sea las series x_i e y_i son idénticas o difieren por un factor constante.

Valores de r entre -1 y 1 describen los varios grados de asociación.

C Estimación de Parámetros del Modelo Lineal

Para la determinación de los parámetros obtenemos una muestra (x_i, y_i) de tamaño n y suponemos que la regresión poblacional

$$Y = \alpha + \beta X$$

puede ser estimada por la regresión muestral

$$Y = a + bx$$

./.

Para $x = x_i$ podemos calcular el valor correspondiente de y que llamaremos el valor estimado o calculado de y . Denotaremos este valor estimado por \hat{y}_i para diferenciarlo del valor observado y_i . Entonces el valor del cuadrado de las desviaciones de los valores estimados y observados es

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Donde :

$$\hat{y}_i = a + bx_i$$

Al combinar estas últimas dos ecuaciones se obtiene

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2$$

D Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación, D , se define como el cuadrado del coeficiente de correlación, o sea

$$D = r^2$$

./.

D es una medida del grado en que la varianza es explicada o tomada en cuenta por la regresión lineal. En otros términos una medida de la diferencia entre la varianza de los valores observados y la varianza de los valores calculados mediante la ecuación de regresión. Cuanto mayor es D, menor es la diferencia.

E Desviación típica de residuos

Los residuos de la regresión lineal de y - versus x con $\Delta y_i = y_i - y$, donde y_i son los valores observados mientras que y es el valor calculado mediante la ecuación de regresión para un valor dado $x = x_i$.

La desviación típica de los residuos es - idéntica a la desviación típica condicional de y dado x. Se calcula mediante

$$s_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y)^2}{n}}$$
$$= \sqrt{\frac{\sum |y_i - (a + bx_i)|^2}{n}}$$

También

$$s_{y/x} = s_y (1 - r^2)$$

./.

Una estimación insesgada de la desviación típica de los residuos es

$$s_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - (a + bx_i))^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{n - 1}{n - 2}} s_y \sqrt{1 - r^2}$$

Cuanto mayor es el valor de $s_{y/x}$, mayor es la dispersión de los puntos alrededor de la línea de regresión.

F Prueba de Significación del Coeficiente de Correlación Lineal.

Aún cuando el coeficiente de correlación li neal difiere de cero puede ocurrir que las dos variables Y y X no sean correlacionadas linealmente. El valor de r diferente de cero puede ser debido a errores de muestreo, aunque en la realidad $\rho = 0$

Por consiguiente, conviene probar la hipótesis H_0 de que r no sea diferente de cero de manera significativa. Para tal prueba se puede utilizar el estadístico.

$$t = \frac{r \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}}$$

donde r es el coeficiente de correlación lineal calculado en base a n pares de valores de X e Y.

El estadístico t sigue la distribución t de Student con $(n-2)$ grados de libertad.

Se escogerá a priori un nivel de significancia α para la prueba y se obtendrá los valores

$$\frac{t_{\alpha}}{2}, n-2 \text{ y } t_1 - \frac{\alpha}{2}, n-2. \text{ Se aplicará el criterio siguiente :}$$

cará el criterio siguiente :

Si $\frac{t_{\alpha}}{2}, n-2 \leq t \leq t_1 - \frac{\alpha}{2}, n-2$ se aceptará la hipótesis H_0 de que r no es \neq de cero.

Si $t < \frac{\alpha}{2}, n-2$ ó $t \geq t_1 - \frac{\alpha}{2}, n-2$ Se rechazará la hipótesis H_0 .

Esta prueba se aplica sólo si se puede suponer que la distribución probabilística bivariada de las variables Y y X es normal. Se sabe que la mayoría de las variables hidrológicas no son distribuidas normalmente y siguen una distribución sesgada. Por eso que en hidrología es muy común transformar la variable para normalizarla, y poder así utilizar técnicas requiriendo una distribución normal. Las transformaciones más comúnmente empleadas son la logarítmica, la raíz cuadrada o cúbica.

5.3 REGRESION

5.3.1 Análisis de regresión

Por regresión se entiende la representación gráfica y determinación de una ecuación matemática que expresa una variable aleatoria que en función de otra o varias variables relacionadas. No todas las variables necesitan ser aleatorias.

Por análisis de regresión se entiende la determinación de modelos de asociación correlativa de 2 o más variables, de tal manera que la mejor predicción de una variable puede ser obtenida a partir de la o de las otras variables. Los modelos así desarrollados se llaman funciones de regresión, curvas de regresión o regresiones.

El grado de asociación correlativa depende de la función de regresión seleccionada.

5.3.2 Pasos en el Análisis de Regresión

- a) Selección de una función de relación correlativa, simple o múltiple, lineal o no-lineal.
- b) Estimación de parámetros que miden el grado de asociación correlativa.

- c) Prueba de la significación de los parámetros estadísticos que miden la asociación correlativa.
- d) Estimación de los parámetros de la ecuación o función de regresión.
- e) Prueba de la significación de los parámetros de regresión, o determinar o dibujar los límites de confianza alrededor de las funciones de regresión ajustadas.

Determinación de Parámetros

El método más comúnmente utilizado en la determinación de los parámetros de regresión es el de mínimos cuadrados. El principio del método consiste en determinar los parámetros desconocidos con el criterio de que sea mínimo el valor medio del cuadrado de ciertas desviaciones. En el caso de la regresión, las desviaciones cuyos cuadrados deben ser minimizados son las diferencias entre los valores observados de la muestra y los valores calculados a partir de la ecuación de regresión.

5.3.3 Regresión Lineal

Si la función de relación correlativa o ecuación de regresión seleccionada es lineal, entonces hablamos de un análisis de regresión lineal. Según si la va-

riable independiente es una variable no aleatoria o aleatoria se distingue el modelo lineal 1 y el modelo lineal 2.

5.3.4

Modelo Lineal 1

En este caso la variable aleatoria Y es funcionalmente dependiente de una variable no aleatoria x cuyo valor puede cambiar de un ensayo al otro. El modelo 1 tiene la forma :

$$E(Y)_x = \alpha + \beta x$$

En cada ensayo x tendrá algún valor x_i y el valor esperado de y_i será $\alpha + \beta x_i$, de modo que

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \epsilon_i$$

Donde ϵ_i es una variable aleatoria como media cero llamada el término del error.

ϵ_i tiene la misma distribución que Y_i con la diferencia de que su media es cero.

A continuación se presentarán ejemplos de variables que se ajustan al modelo lineal 1. La precipitación es una variable aleatoria que en zonas montañosas puede depender funcionalmente de la altitud del punto conside

rado. La escorrentía o caudal en una sección de un río es una variable aleatoria que depende del área de la cuenca que drena hasta la sección considerada. La resistencia del suelo también es una variable aleatoria que es una función de la profundidad a que se toma la muestra. En estos ejemplos la altitud, el área de la cuenca y la profundidad son variables no aleatorias.

5.3.5

Modelo Lineal 2

En esta clase de modelos tanto la variable dependiente como la independiente son variables aleatorias. El modelo 2 especifica que el valor esperado condicional de Y dado que $X=x$ es una función lineal de x , o sea :

$$E(Y/X=x) = \alpha + \beta x$$

Para $X = x_i$ el valor esperado Y_i de Y es

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \epsilon_i$$

Para que D sea un mínimo se debe tener:

$$\frac{\partial D}{\partial \alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n -2 (y_i - \alpha - \beta x_i) = 0$$

$$\frac{\partial D}{\partial \beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n -2 x_i (y_i - \alpha - \beta x_i) = 0$$

./.

o sea

$$\sum y_i - na - b \sum x_i = 0$$

$$\sum x_i y_i - a \sum x_i - b \sum x_i^2 = 0$$

Estas expresiones se llaman ecuaciones normales y se pueden resolver para a y b , obteniendo :

$$a = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{n \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

Manipulando estas expresiones se puede demostrar que

$$b = r \frac{s_y}{s_x} = \frac{s_{x,y}}{s_x^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

./.

Ejemplo

Las precipitaciones (mm) del mes de enero para dos estaciones X e Y se presentan en la siguiente tabla para siete años

x_i	12	18	24	30	36	42	48
y_i	5.27	5.68	6.25	7.21	8.02	8.71	8.42

- 1) Calcular los parámetros de regresión lineal entre X e Y.
- 2) Hacer una prueba de significación de r utilizando el estadístico.

$$t = \frac{r \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}}$$

- 3) Para un nivel de significación del 5% de terminar los límites de confianza de Y - dado que X = 36

SOLUCION

1)

x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	y_i^2
12.00	5.27	144.00	63.24	27.77
18.00	5.68	324.00	102.24	32.26
24.00	6.25	576.00	150.00	39.06
30.00	7.21	900.00	261.30	51.98
36.00	8.02	1296.00	288.72	64.32
42.00	8.71	1764.00	365.82	75.86
48.00	8.42	2304.00	404.16	70.90

./.

$$\begin{aligned} \sum x_i &= 210 & \sum x_i^2 &= 7308 & \sum y_i &= 361.15 \\ \sum y_i &= 49.56 & \sum x_i y_i &= 1590.48 & & \end{aligned}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i = \frac{210}{7} = 30$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i = \frac{49.56}{7} = 7.09$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n} - \left(\frac{\sum x_i}{n}\right)^2} = \sqrt{\frac{7308}{7} - \left(\frac{210}{7}\right)^2} = \sqrt{144} = 12$$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n} - \left(\frac{\sum y_i}{n}\right)^2} = \sqrt{\frac{361.15}{7} - \left(\frac{49.56}{7}\right)^2} = \sqrt{1.47} = 1.21$$

$$s_{x,y} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \bar{x} \bar{y}$$

$$s_{x,y} = \frac{1}{n} (1,590.48) - (30)(7.09) = 14.51$$

$$a = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{(49.56)(7308) - (210)(1590.48)}{7(7308) - (210)^2}$$

$$a = 4.0$$

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{7(1590.48) - (210)(49.56)}{7(7308) - (210)^2}$$

$$b = 0.10$$

La ecuación de regresión es

$$y = 4 + 0.10x$$

Hubiéramos obtenido los mismos resultados utilizando las fórmulas

$$b = \frac{s_{x,y}}{s_x^2} = \frac{14.51}{(12)^2} = 0.10$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = 7.09 - 0.10(30) = 4.07$$

2)

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{14.51}{(12)(1.21)} = 0.9985$$

H_0 : r no es diferente de cero

$$t = \frac{0.9985 \sqrt{7 - 2}}{\sqrt{1 - (0.9985)^2}} = 40.78$$

$$v = n - 2 = 5$$

$$\frac{t_\alpha}{2}, n-2 = t_{0.025,5} = 2.57$$

Si t está comprendida entre $-t_{0.025,5}$ y $t_{0.025,5}$ se acepta H_0 . De lo contrario se rechaza H_0 .
./.

Puesto que $t = 40.78$ no está comprendida entre -2.57 y 2.57 rechazamos la hipótesis nula de que r no es diferente de cero

$$3) s_{y/x} = s_y \sqrt{1 - r^2} = 1.21 \sqrt{1 - (0.9985)^2}$$

$$= 0.066 \bar{y} + b (x_i - \bar{x}) - t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \frac{s_{y/x}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{s_x^2}}$$

$$= 7.09 + 0.10(36 - 30) - 2.57 \times \frac{0.066}{\sqrt{7}} \sqrt{1 + \frac{(36-30)^2}{(12)^2}}$$

$$7.69 - 0.0717 = 7.62$$

El otro límite es

$$7.69 + 0.0717 = 7.76$$

5.3.6 Límites de Confianza sobre la Recta de Regresión

Sea la regresión lineal muestral y_x vs x_i definida por :

$$Y = a + bX$$

La regresión de las poblaciones es

$$\eta = \alpha + \beta \xi$$

Y es la estima de η para $\tilde{X} = X$

./.

El valor Y es distribuido normalmente alrededor de η con varianza.

$$\hat{s}(Y) = \frac{\hat{s}_{Y \cdot X}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{(X - \bar{X})^2}{\hat{s}_x^2}}$$

\hat{s}_Y es el error típico de una estima Y .

$$t = \frac{(Y - \eta)}{\hat{s}(Y)} * \quad (\text{con } (n-2) \text{ grados de libertad } Y)$$

se distribuye según la distribución t de Student para n pequeño * .

Los límites de confianza para un nivel de significancia α son :

$$\bar{Y} + b(X_i - \bar{X}) - t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \frac{\hat{s}_{Y \cdot X}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\hat{s}_x^2}} \leq \eta \leq$$

$$\bar{Y} + b(X_i - \bar{X}) + t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \frac{\hat{s}_{Y \cdot X}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\hat{s}_x^2}}$$

Para cada valor X_i de X calculamos los límites de confianza para un nivel α .

Ploteamos estos dos puntos. Luego juntamos los puntos del límite inferior también los del límite superior para determinar los límites.

./.

5.4 TIPOS DE ASOCIACION CORRELATIVA EN HIDROLOGIA

5.4.1 Relaciones Causa Efecto

- a. Donde la variable aleatoria, Y , está relacionada correlativamente a factores causativos, x_i , que producen o afectan el valor de y .
- b. Ejemplo: Relación precipitación-esco--rrentía porque la precipitación es el factor causativo básico de la esco--rrentía, con las características geométricas de la cuenca, el suelo, la humedad y factores climáticos afectando la relación básica causa efecto.

5.4.2 Relaciones de Causa Común

- a. Relaciones de variables aleatorias que tienen los mismos factores causativos -- tal como
 - La asociación correlativa del caudal de un río al caudal de un río adyacen--te.
 - La relación entre las variables de pre--cipitación de estaciones pluviométric--as adyacentes.

T E M A : CALIDAD DE LAS AGUAS NATURALES

Ing. Orlandino Arteaga T.

I N D I C E		Pág.
6.1	Concepto de calidad	139
6.2	El agua en la naturaleza	140
6.3	Usos agrícolas del agua	142
6.4	Usos industriales	144
6.5	Usos domésticos	146
6.6	Fuentes del agua en el ciclo hidrológico	148
6.6.1	Aguas meteóricas	148
6.6.2	Aguas superficiales	149
6.6.3	Aguas subterráneas	151
6.7	Registros periódicos de calidad	153

F i g u r a s

6.1	Clasificación de aguas para riego	145
-----	-----------------------------------	-----

CALIDAD DE LAS AGUAS NATURALES

6.1 Concepto de calidad

Defínese la calidad del agua en la naturaleza como un estado con relación a sus propiedades y características físicas, químicas y bacteriológicas. Hablar de calidad del agua, es pues, referirse a las condiciones presentes en el agua con relación a las características mencionadas, en su estado natural.

La calidad del agua depende de muchos y múltiples factores tanto naturales como ocasionados por el hombre. Estos factores a su vez varían en el espacio y en el tiempo para una misma fuente y son función directa de las propiedades como solvente conocidas en el agua y su facilidad para transportar sustancias en suspensión o por arrastre.

La calidad natural cambia de un lugar a otro en una misma fuente; es función del clima y la estación del año, así como de las condiciones o características geológicas de la cuenca. Influyen la temperatura del agua, la evaporación y el contenido de poluentes o contaminantes presentes en el suelo.

La calidad del agua y por ende las normas aplicables, dependen fundamentalmente del uso a que se le destine y del origen de la fuente. Los usos a su vez son causa de alteraciones o cambios en la calidad de los efluentes y por consecuencia del cuerpo de agua receptor de estos efluentes.

Debe entenderse en relación con la calidad de agua el uso de los términos "Polución y Contaminación". Por Polución se entiende la alteración de las propiedades físicas y químicas del agua, que la hacen inadecuada para un fin específico. Contaminación abarca la participación de materia orgánica en descomposición o presencia de bacterias nocivas que hacen inapropiada el agua para consumo humano.

Las aguas naturales continuamente experimentan un proceso de polución o contaminación y a la vez de autopurificación por transformación o mineralización de los desechos orgánicos y bacterias, con consumo de oxígeno libre disponible en el agua.

Por lo tanto, previo a cualquier uso aceptado del agua, ésta debe ser sometida a una serie de análisis de campo y laboratorio para determinar su calidad. Estos análisis requieren de un muestreo sistemático con determinada frecuencia de toma y la determinación de parámetros y concentración de elementos indeseables.

6.2 El agua en la naturaleza

Puede decirse que el agua químicamente pura es solo obtenible en el laboratorio. En la naturaleza, dado el hecho de ser el agua el disolvente natural de más amplio campo de acción, actúa sobre la totalidad de materia en contacto con ella. Esta situación hace imposible la existencia en estado natural de una agua químicamente pura según su concepto y normas establecidas para el uso y consumo humano. Aún el agua de lluvia -

contiene polvos e impurezas arrastradas en su descenso hacia la tierra.

Ya en contacto con la superficie terrestre, los materiales poluentes y contaminantes se multiplican, -- siendo disueltos o arrastrados por el agua de escorrentía que los incorpora como parte de su composición química o bien los transporta como material en suspensión.

La mayor o menor situación contaminante del agua, está en función del tiempo de contacto y abundancia de materiales contaminantes. Dícese entonces de las aguas naturales, que las mismas se encuentran siempre con un cierto grado de alteración de sus propiedades físicas, químicas (polución), o bacteriológicas (contaminación).

Múltiples y variados son los usos del agua por el hombre. Los hay considerados como usos benéficos (agua potable, energía, navegación, recreación, piscicultura, etc.) y también usos degradantes y algunas veces altamente contaminantes (descarga de aguas negras, basuras, etc.). De ahí el concepto de que si bien el volumen de agua existente en la naturaleza es el mismo desde la creación del universo, su disponibilidad para uso humano va siendo cada vez menor.

Cada día son más altas las inversiones que se requieren para hacer de una agua un uso benéfico. Algunas veces el estado de contaminación es tal, que económicamente es imposible recuperar el vital líquido para un nuevo uso, pues los costos de dicha operación lo hacen prohibitivo. Si a ello se agrega el continuo crecimiento demográfico que cada día exige una mayor dotación per cápita y los avances del progreso, que cada -

vez requieren de más altos volúmenes de agua, se ve palpablemente la reducción acelerada de la disponibilidad del vital líquido.

Esta reducción en cantidad utilizable se ve afectada en alto grado por las descargas de origen urbano de las grandes urbes, que son tanto de tipo social (aguas negras) como de tipo industrial y comercial (aguas servidas). Consecuentemente, es una necesidad la conservación del recurso agua y por lo tanto el control en sus características físicas, químicas y bacteriológicas.

Puede verse entonces, la importancia de mantener un estricto control de calidad de las aguas naturales como fuentes de suministro de agua para usos múltiples.

Para un mejor entendimiento se hará una síntesis de los requerimientos de agua para determinados usos.

6.3 Usos agrícolas del agua

El principal uso agrícola del agua lo constituye el riego. Con tal propósito, el agua debe poseer determinada calidad principalmente en lo relativo a su contenido de sales que pueden en un momento dado, no sólo ser dañinas al crecimiento vegetativo de las plantas, sinó también en relación con la deposición de dichas sales sobre los suelos agrícolas. Muchos tipos diferentes de sales con arrastrados por el agua, dependiendo su contenido de las formaciones geológicas de la cuenca de captación a través de la cual fluye el agua.

Para que una zona de riego pueda mantener su condición óptima respecto al contenido de sales solubles, - se requiere que el flujo de estas sales que entre a la zona de riego sea igual al que sale por medio de las aguas residuales drenadas. De otra suerte, se retardará el crecimiento de la planta o se afectará su rendimiento. En el peor de los casos, la acumulación de sales en el suelo destruirá el potencial agrícola del mismo.

La acumulación de sales en el suelo está en relación directa con los siguientes factores :

- a. Composición y concentración de sales
- b. Volumen de agua aplicado al riego
- c. Características del suelo, permeabilidad, capacidad de campo, etc.
- d. Drenabilidad y profundidad de la napa freática
- e. Manejo de los suelos
- f. Método de riego aplicado
- g. Condiciones climáticas
- h. Régimen de precipitación

Aunque no es muy común también se presentan problemas por sustancias venenosas en determinadas concentraciones. Algunas aguas pueden contener boro, arsénico, selenio y otros minerales nocivos o indeseables. Es por lo tanto importante el efectuar análisis químicos de la fuente que habrá de utilizarse en un Sistema de riego. El caso más común sin embargo lo constituye el contenido de sales minerales (alcalis).

El análisis de agua para riego requiere la determinación de la conductividad eléctrica, el contenido de sales en ppm., presencia de cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio, y de aniones carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, etc. En la figura 6.1 se muestra el diagrama que permite la clasificación de las aguas para riego.

6.4 Usos industriales

Las principales características del agua en relación a usos industriales se centralizan sobre sus propiedades corrosivas, dureza total, alcalinidad y en determinado grado sobre su turbidez, color, temperatura y contenido de materia orgánica.

De ellas, la dureza producida por calcio y magnesio representa la mayor fuente de problemas en la industria. Toda agua con un valor de dureza indeseable o superior a las normas mínimas aceptadas debe ser sometida a un proceso de ablandamiento o suavización. Según sea el tipo de dureza así será su tratamiento y consecuentemente la inversión requerida.

Las propiedades corrosivas en el agua pueden ser originadas por varias causas, siendo una de ellas su contenido de dióxido de carbono libre. En algunos casos, apreciable cantidad de ácidos o sales, tales como el cloruro de magnesio causan condiciones corrosivas al agua. El tratamiento aplicable dependerá del origen y grado de polución existente en la fuente.

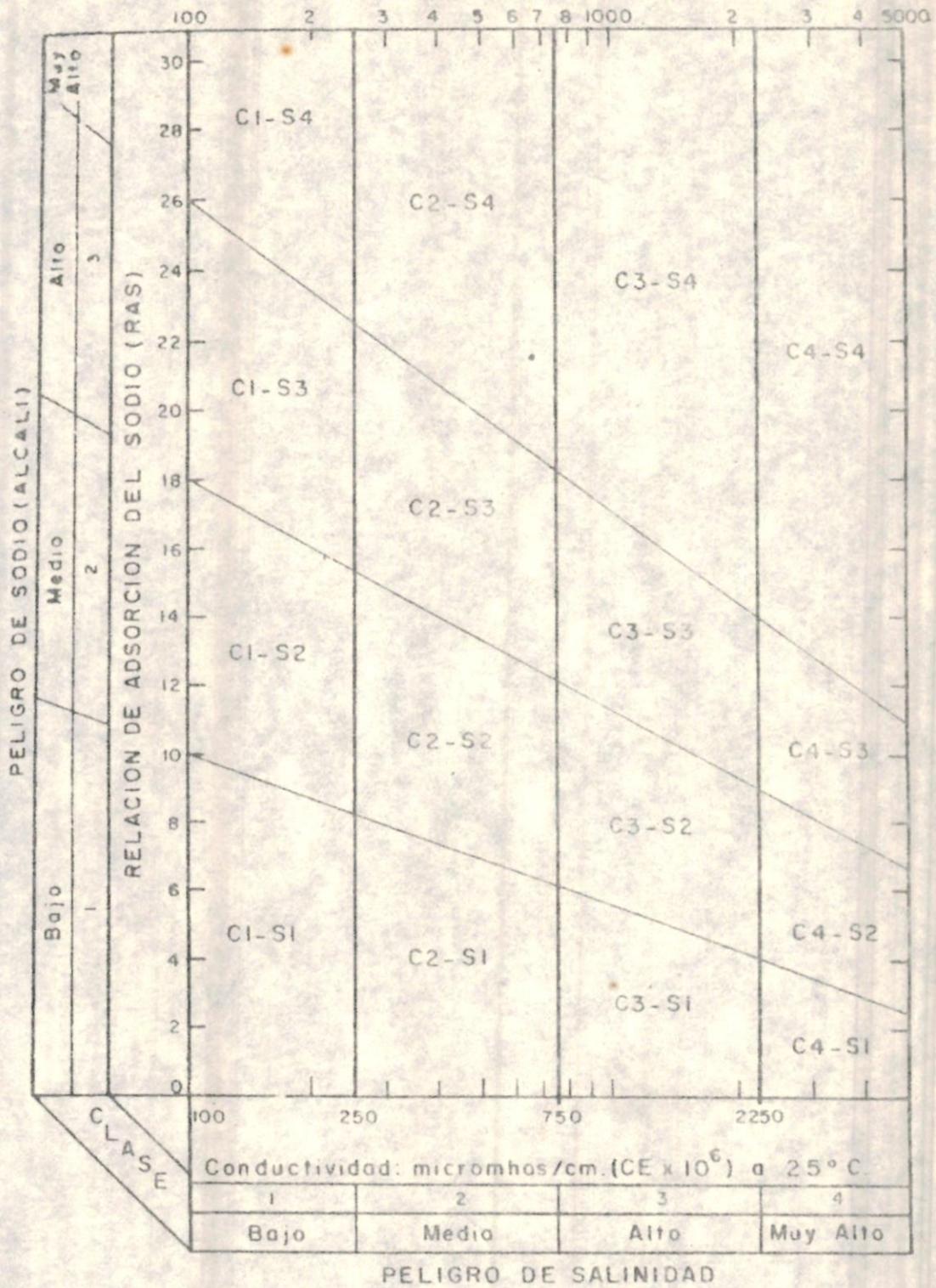


DIAGRAMA PARA LA CLASIFICACION DE LAS AGUAS PARA RIEGO.

Figura 6.1

Colgado del manual de Agricultura N° 60
del Departamento de los Estados Unidos de América



Según sea el tipo de industria o el uso que se dará al agua, así serán sus normas y niveles de calidad y el tratamiento correspondiente. Por ejemplo, aguas destinadas a la producción de bebidas deben estar exentas de color y turbidez, libres de hierro y otros minerales que pueden afectar el sabor de las bebidas carbonatadas. Aguas para la producción de textiles deben ser aguas claras, suaves y de buena calidad, exentas de -- hierro, magnesio y cualquier otro mineral que pueda dar lugar a coloraciones o manchas. No se podrían utilizar aguas turbias o duras en la fabricación de hielo, ni mucho menos que tengan color.

6.5 Usos domésticos

El agua para consumo humano debe ser de condiciones químicas apropiadas, no debe contener sustancias tóxicas, venenosas ni minerales en concentraciones indeseables. Por igual su calidad física debe estar exenta de color, olor, turbidez y sabor. En relación a su pureza biológica no debe contener ningún tipo de bacterias ni residuos de materia orgánica. Por lo tanto para que un agua destinada a uso humano pueda ser considerada buena, debe cumplir con las más estrictas normas de potabilidad establecidas internacionalmente. Estas normas se clasifican en calidad física, calidad química y en calidad bacteriológica.

Fundamentalmente las normas de calidad física se refieren a las concentraciones máximas aceptables en cuanto a color, olor, turbidez y sabor. Las normas de calidad química abarcan una amplia gama de compuestos químicos y minerales que influyen sobre la potabilidad (Ejem:

Sólidos totales, Hierro, Magnesio, Calcio, Sulfatos, Cloruros, pH, etc). Igualmente sobre sustancias peligrosas para la salud (nitratos, Fluoruros , etc), - sustancias tóxicas (compuestos fenólicos, arsénico , bario, cadmio, cianuros, plomo, etc). Finalmente la calidad bacteriológica se mide en unidades relativas de concentración de bacterias coliformes.

Existen también indicadores químicos de contaminación, entre los que pueden mencionarse la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Contenido de Amoníaco, extracto de carbón con cloroformo, etc.

Las normas están tabuladas en valores máximos de concentración y son de aplicación internacionalmente reconocida.

En relación al uso doméstico, se considera que toda agua de origen superficial está contaminada y necesita tratamiento. No puede consecuentemente tener un consumo directo. La norma más elemental para ello es el proceso de hacer hervir el agua hasta su punto de ebullición, con lo cual se elimina cualquier peligro de origen bacteriológico.

Las aguas subterráneas profundas y manantiales de origen profundo, pueden considerarse excentos de contaminación bacteriológica y muchas veces son de uso directo sin mayor tratamiento. Sin embargo su grado de pureza química es probable que no sea satisfactorio, -- siendo siempre conveniente hacer análisis químicos previo a su utilización como fuente de bebida.

6.6 Fuentes de agua en el Ciclo Hidrológico

Las fuentes de agua accesibles para uso del hombre pueden identificarse en el ciclo hidrológico como: - Aguas Meteóricas, Aguas Superficiales y Aguas Subterráneas. Cada una de ellas tiene sus propias peculiaridades relacionadas con su régimen natural de comportamiento y sus condiciones de calidad.

6.6.1 Aguas Meteóricas

Representadas fundamentalmente por la lluvia y precipitación en forma de nieve o granizo. En su punto de formación pueden considerarse como químicamente puras; - sin embargo, en su trayecto hacia la tierra arrastran impurezas, polvo, humo, esporas de pequeñas plantas, - etc., a la vez que son capaces de absorber oxígeno, anhidrido carbónico y otros gases presentes en la atmósfera.

El contenido de impurezas en el agua de lluvia depende de la formación de la atmósfera que atraviesa. - En otras palabras, el agua precipitada en una área industrial o urbana, no tendrá la misma composición ni pureza que una que se precipita en campo abierto. En el primer caso contendrá mayor cantidad de impurezas y poluentes que en el segundo. Prácticamente las impurezas son de poca repercusión sanitaria y las aguas de lluvia bien captadas pueden ser de consumo directo.

Por su contenido de dióxido de carbono pueden resultar agresivas o con cierto grado de sabor desagradable. En relación a su contaminación bacteriana, pueden considerarse exentas y aptas para su consumo.

6.6.2 Aguas Superficiales

Integradas por las fuentes en contacto con el suelo, pueden dividirse en Ríos, Lagos y Lagunas y también incluir depósitos artificiales como son los embalses.

Su calidad difiere de las anteriores y depende de muchos factores entre los que se tienen: la geología y topografía de la cuenca, su extensión y cobertura, el uso y manejo de los suelos, las prácticas agrícolas y de fumigación, la concentración y tamaño de los centros urbanos dentro de la cuenca y así mismo el uso indiscriminado de las fuentes por los mismos centros urbanos.

La calidad de las aguas superficiales es la menos satisfactoria. Entre éstas, las de los ríos generalmente son más variables que la de los depósitos naturales o artificiales como lagos y embalses.

El régimen natural del recurso hídrico tanto como la geología o composición litológica superficial, son determinantes. Así por ejemplo, aguas que han circulado por regiones calizas contienen un grado mayor de dureza y son más limpias y cristalinas. Poseen un grado de agresividad mayor que aguas de otras fuentes.

En época lluviosa el agua de los ríos se vuelve turbia y altamente cargada de sedimentos. Al inicio de las aguas altas pueden contener mayor cantidad de bacterias. En crecidas existe mayor dilución y menor contenido de contaminación bacteriana. En épocas de sequía cambian tanto las propiedades físicas y presenta-

ción del agua como su contenido relativo de poluentes y contaminantes. Si existen descargas de aguas negras en época seca, con pequeños caudales receptores, el grado de contaminación se eleva considerablemente. Por lo tanto, entre las épocas de aguas altas y aguas bajas, es decir a lo largo del año, las características de calidad varían en función del tiempo.

Las condiciones de cobertura de la cuenca receptora, el tipo de suelos y su uso agrícola en combinación con el clima, definirán el régimen de erosión de los suelos y como consecuencia tendrán influencia directa en el arrastre de sedimentos. De éstos, los sedimentos en suspensión son los que ocasionan turbidez y problemas de azolvamiento en las obras de captación y aprovechamiento.

Sin embargo, la naturaleza también se encarga de mantener su equilibrio. Así, al disminuir la velocidad a lo largo del cauce o en depósitos naturales o artificiales, se produce la sedimentación o deposición de los materiales en suspensión. La oxidación de la materia orgánica la estabiliza y modifica la flora bacteriana constitutiva. La luz solar también tiene su efecto sobre la coloración de ciertas aguas, haciéndolas más claras. El grado de autopurificación es función de muchos factores, principalmente la disponibilidad de oxígeno, del clima y época del año, la temperatura del agua, el tipo de polución o contaminación, etc. La temperatura es un parámetro presente en todos los procesos de autopurificación. Su variación está en relación con el tamaño del cuerpo de agua. Ríos grandes tienen menos fluctuación de temperatura que ríos

pequeños. La profundidad también afecta, pues ríos de poca profundidad son más rápidamente autopurificables y aereables que ríos grandes y profundos, donde depósitos de materia orgánica afectan el color, sabor, etc.

La calidad del agua de los depósitos naturales o artificiales tiende a ser similar a la de sus ríos tributarios. La forma y profundidad de los lagos, lagunas y embalses determinan las corrientes de flujo. El oleaje tiende a producir mayor turbidez en los orillas. En lagos pequeños la autopurificación es menos completa que en los de mayor tamaño.

El aquietamiento relativo del flujo y el intercambio de corrientes limnológicas, hace que las aguas de lagos y lagunas sean de mejor calidad que la de los ríos de cuencas vecinas. En el caso de los embalses, la operación del vaso también ejerce sus efectos sobre la calidad del agua. Debe eliminarse la vegetación que quedará cubierta con el llenado del embalse, a fin de evitar la formación de gases y procesos de descomposición de la materia orgánica. Las partes profundas de los ríos son de temperatura más fría que el resto y generalmente, la mejor calidad del agua se encuentra a media profundidad. Al fondo pueden existir concentraciones mayores de dióxido de carbono, hierro, manganeso y otros compuestos.

6.6.3 Agüas Subterráneas

Al producirse la infiltración y posterior percolación de las aguas superficiales hacia los estratos subterráneos, el agua se pone en contacto directo con las capas de suelo y roca, que también poseen sustancias or

gánicas e inorgánicas, muchas de ellas solubles en el agua. Esto causa alteraciones de calidad, la cual depende del tipo de estratos atravesados. El dióxido de carbono absorbido en combinación con el oxígeno liberado por la descomposición de la materia orgánica disuelve hierro y manganeso del suelo.

En relación al contenido de bacterias, las aguas van siendo liberadas de dicha contaminación en la medida que las capas atravesadas le sirven de filtro bacterial, siendo desde este punto de vista buenas para su consumo.

Generalmente las aguas subterráneas son más frescas, incoloras y de temperatura más uniforme que las aguas superficiales que les dieron origen. Entre 10 y 15 m. de profundidad, la temperatura del agua es casi igual a la temperatura ambiente del lugar. El agua de los pozos poco profundos, por lo tanto, es similar en temperatura que la temperatura del lugar. Está más expuesta a sufrir contaminaciones de origen superficial y subsuperficial, como sería el caso de contaminaciones producidas por la existencia de letrinas en las vecindades, máxime si éstas se encuentran en sitios aguas arriba del flujo hacia el pozo.

En el caso de los pozos profundos el problema se cambia por mayor polución química y de compuestos minerales. El agua en su recorrido ha estado en más contacto con el suelo y subsuelo así como con las rocas y minerales que los forman. Las aguas profundas generalmente son claras y cristalinas, pero comúnmente contiene hierro y manganeso; al ser aireadas com-

bien su color por oxidación de los minerales. Algunas veces contienen altas concentraciones de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y sales minerales como cloruros, sulfatos y carbonatos que dificultan su tratamiento o potabilización.

6.7 Registros Periódicos de calidad

Ha sido señalado que la calidad de las aguas naturales varía en función del tiempo y de lugar a lugar. Esta situación obliga a un muestreo sistemático que permita conocer las condiciones promedias de calidad según la época del año. Generalmente se toman muestras solamente del punto o lugar de captación y en la fecha de los estudios. Este muestreo es sólo válido para el momento o fecha de la muestra y en manera alguna representativo como un promedio de la fuente.

El muestreo debe ser sistemático y referenciado a puntos definidos que generalmente pueden ser los sitios de estaciones hidrométricas de la red o los lugares potenciales de captación. Dependiendo el uso a que se destine el agua así será el conocimiento específico de determinados parámetros de su calidad.

Las entidades que más comúnmente efectúan muestreo sistemático son las encargadas de los sistemas de riego y agua potable, así como los servicios nacionales de hidrología y meteorología.

La frecuencia del muestreo estará en relación directa con la variabilidad en la calidad del agua de la fuente. A mayor variabilidad, más frecuente la toma de

las muestras. En este sentido también influyen las facilidades de laboratorio y equipo portátil de que se disponga, así como el presupuesto asignado para ello. La distancia de los lugares de muestreo y su accesibilidad son también factores a considerar. En ciertos casos puede ser suficiente un muestreo y análisis de campo. En otros será necesario mandar las muestras al laboratorio más cercano para su completo análisis.

Se estima conveniente seleccionar dentro de la red hidrométrica los lugares para efectuar muestreo sistemático, pues no en todas las estaciones debe hacerse tal operación. Debe diseñarse un plan operativo de toma de muestras que cubra todo el período anual, es decir todas las etapas de cambios posibles de calidad. La frecuencia puede ser de un muestreo mensual como mínimo por un período inicial de uno o dos años hidrológicos. En una segunda etapa puede cambiarse la frecuencia la frecuencia en relación con la variabilidad detectada en esta primera fase.

En el caso de aguas superficiales, la mayor importancia relativa la tienen aquellas estaciones hidrométricas o fuentes localizadas en zonas potencialmente irrigables y aquellas de posible uso para abastecimiento a zonas urbanas.

No teniéndose un objetivo específico para la realización del tipo de análisis, se deberán establecer análisis estandarizados para estos casos, cuyos resultados puedan ser de uso general. Estos análisis como queda dicho serán efectuados in situ por medio de equipo

portátil de laboratorio y otros en el laboratorio de la oficina encargada.

No puede darse una recomendación general, pero - para muestreos de calidad se harán los análisis físicos y químicos con prioridad, quedando el bacteriológico destinado a aquellas fuentes de uso potencial - en agua potable.

Los análisis recomendables a realizar in situ con laboratorio portátil pueden ser :

- Alcalinidad
- Dureza total
- Cloruros
- Fluoruros
- Fosfatos totales
- Hierro y Manganeso
- Nitritos y Nitratos
- Oxígeno disuelto
- pH
- Sílice
- Sulfatos
- Conductividad

Para los análisis a efectuarse en laboratorio central :

- Cloruros
- Fluoruros

- Hierro y Manganeseo
- pH
- Sólidos totales
- Sólidos disueltos

Para el caso de análisis bacteriológico :

- Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO
- Índice Coli (NMP)
- Recuento Bacterial a 20^oC
- Recuento Bacterial a 37^oC

Los resultados obtenidos de los análisis deben ser corectamente archivados y referenciados. Deben ser accesibles a los usuarios a quienes se hará llegar comunicación de su existencia, ya sea en forma de aviso periódico o en publicación de la información.

BIBLIOGRAFIA

1. Sergio Antonio Vargas R. PARAMETROS DE CALIDAD DE LAS AGUAS NATURALES DE LA REPUBLICA DE GUATEMALA.
Tesis profesional. Facultad de Ingeniería, Julio 1969.
2. H. Grover-N. Clifford. STREAMFLOW, measurements, records and their uses.
Ed. Dover Publications Inc. N.Y. 1966.
3. Ing. E. Basso. Publicación No. 14 "TECNICAS DE LABORATORIO EN HIDROLOGIA" Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano. San José, Costa Rica 1967.
4. SIMPOSIO SOBRE CONTAMINACION DE CORRIENTES
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria. Facultad de Ingeniería, Guatemala 1967.

atsh.

T E M A : T R A N S P O R T E D E S E D I M E N T O S

Ing. Orlandino Arteaga T.

I N D I C E		Pág.
7.1	INTRODUCCION	161
7.2	EFFECTOS DE LA SEDIMENTACION	163
7.2.1	Origen de los sedimentos	163
7.2.2	Proceso de erosión	165
7.2.3	Características de la cuenca	168
7.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	171
7.3.1	Tipos de Sedimentos	171
7.3.2	Concentración de sedimentos	173
7.3.3	Distribución vertical y trans <u>versal</u>	175
7.4	MEDICION DE SEDIMENTOS EN SUSPENSION	181
7.4.1	Consideraciones generales	181
7.4.2	Características del muestreo de sedimentos en suspensión	182
7.4.3	Cálculo de sedimentos en sus <u>pensión</u>	194
7.4.4	Extensión del registro de gas <u>to sólido</u> en suspensión	200
7.4.5	Sedimento de arrastre por el fondo	201
7.4.6	Resumen de términos utilizados	207
	Bibliografía	

	F i g u r a s	Pág.
7.1	Curvas de concentración	176
7.2	Curvas teóricas de Sedimento en Suspensión	177 - A
7.3	Distribución de velocidades y concentraciones de sedimento en suspensión	180
7.4	Curvas de calibración para boqui- llas del muestreador de Sedimen- to en Suspensión USD.49	188
7.5	Muestreadores puntuales de Sedi- mento en Suspensión USP-61, USP-63	193
7.6	Muestreadores de tipo integrador. Sedimento en Suspensión. USDH=48/59	195
7.7	Muestreadores de tipo integrador Sedimento en Suspensión. USD= 49	196
7.8	Canasta para muestreo de sedimento de fondo	204
7.9	Muestreador de Sedimento de Fondo	205

7.1 INTRODUCCION

Hoy en día son cada vez más numerosas las obras hidráulicas que se construyen como parte del desarrollo económico de los países. El progreso de una nación requiere que la explotación de sus recursos se haga en forma racional y optimizada, es decir, económicamente. Entre éstos, los recursos hídricos y fluviales son de capital importancia, pues tienen relación directa con la generación de energía y el transporte o circulación de productos y personas.

El azolve, sedimento o acarreo de sólidos por parte de las corrientes superficiales es un fenómeno natural, que se sucede continuamente y no puede evitarse. Como tal, afecta grandemente la vida útil de las obras hidráulicas y encarece su operación y mantenimiento. En algunos casos puede ser determinante en la factibilidad física de un proyecto. Ejemplos hay de grandes embalses que han visto reducida su capacidad en menor tiempo del previsto inicialmente, con la consecuente pérdida de su vida económica. En otros casos las obras han sido diseñadas y construídas con muy poco conocimiento sobre sedimentos, habiéndose llegado a fracasar económicamente en gran escala.

El conocimiento del régimen hidrológico no es ya solamente circunscrito al aspecto del flujo o escurrimiento del agua, sino requiere también del conocimiento del flujo mixto agua-sólidos. De tal suerte, las estadísticas hidrométricas deben abarcar también la fase de sedimentología o sea el estudio y determinación del transporte de sedimentos. Este conocimiento resulta ser básico y fundamental en cualquier planificación de uso de recursos hidráulicos, razón por la cual se

ha establecido toda una ciencia al respecto, cuyo campo de investigación está aún en desarrollo.

Mucho ha aportado la investigación científica en este aspecto, pero aún no se ha llegado a soluciones valederas y satisfactorias, teniéndose que conformar con aproximaciones mas o menos aceptables sobre el fenómeno de la erosión y las leyes que gobiernan el transporte de sedimentos.

En los capítulos que siguen se hará una síntesis de algunos temas de interés que deben ser conocidos cuando se habla del transporte de sedimentos y su determinación.

El enfoque dado está orientado más hacia la práctica diaria de una recopilación de estadísticas sedimentométricas que a la teoría pura del arrastre de sedimentos, cuyo tema es mucho más complejo y propio de un investigador de laboratorio.

7.2 EFECTOS DE LA SEDIMENTACION

7.2.1 Origen de los sedimentos.

Los fenómenos naturales que gobiernan el medio ambiente en una región cualquiera y el uso de las tierras agrícolas laborables por el hombre y los animales, determinan cambios continuos que inciden sobre la pérdida permanente de suelo.

Entre los fenómenos más importantes relacionados con la pérdida de suelo están : la precipitación y el viento. Igualmente los elementos climáticos y dentro de éstos la temperatura y evaporación también contribuyen a la denudación y subsecuente pérdida de suelo, generando fuentes de producción de sedimentos.

La intensidad con que cae la lluvia determina la energía de impacto, que es amortiguada y absorbida por el suelo; así mismo, la distribución espacial de la lluvia y la razón de evaporación, acompañado a las condiciones antecedentes de humedad de los suelos y la capacidad de retención del escurrimiento superficial, valga decir, la cobertura vegetal y topografía, definen la cantidad de sedimento producido en una región dada.

El origen y transporte de sedimentos puede ser eólico o hídrico, según sea el agente que lo produce y a su vez traslada de un lugar a otro. En hidrología el de mayor interés es el hídrico.

Debe darse al clima un lugar preponderante como partícipe de la producción de sedimentos.

La humedad relativa ambiente, la aridez o semiaridez del lugar determinan en combinación con los suelos, el tipo de cobertura vegetal, su condición de crecimiento anual y la cantidad anual de sedimentos.

Como puede verse, muchos son los factores que inciden en la producción continua de sedimentos en la naturaleza, pero a ellos se agregan, no menos importantes, las actividades del hombre sobre el paisaje. Estas pueden derivarse del manejo que se haga de la cuenca, es decir, las prácticas agrícolas y explotación forestal, pastoreo de animales domésticos, construcción de carreteras, minería, urbanización y actividades recreativas, etc..

Es obvio que la mayoría de las acciones que el hombre lleva a cabo causan alteraciones en el paisaje, que luego se transforman en fuentes de origen de sedimentos cuando no se toman las medidas del caso o cuando se hace abuso de la naturaleza. Por ejemplo, las prácticas agrícolas en terrenos con fuerte pendiente remueven la cobertura de protección natural, alteran los factores de drenaje y cuando son cultivos limpios o sea aquellos que después de la cosecha dejan el suelo expuesto y flojo, propician o favorecen grandemente el arrastre de partículas con las primeras formaciones del escurrimiento.

Algunas veces se abusa de sobrepastoreo de tierras, sea por animales domésticos o salvajes, esto desviste los suelos y los expone fácilmente a la acción de los agentes climáticos, éoli-

./.

cos e hídricos con la consecuente generación de sedimentos. Lo propio ocurre también con cualquier explotación forestal incontrolada y con los cortes y rellenos de tierras en la construcción de carreteras.

Minas a cielo abierto o desperdicios mineros van a parar o son arrastrados por la escorrentía hasta los cursos fluviales, aumentando el volumen natural de sedimentos transportados.

En resumen, larga sería la lista de factores que dan origen a los sedimentos; aquí solo se han destacado los elementos más importantes del proceso.

7.2.2. Proceso de erosión.

Simmons (6)* define el proceso erosivo y sus efectos como una combinación de eventos matemáticamente no lineal y de características netamente probabilísticas, cuyos orígenes ambientales pueden ser de tipo :

- Hidrológico-Hidráulicos
- Atmosférico-Meteorológicos
- Geológico-Geomórfico
- Biológico
- De influencia humana

Estos factores determinan el medio ambiente físico y el comportamiento del sistema hidrológico o fluvial que dan marco al proceso de erosión.

La erosión puede ser natural o causada por el hombre. Esta última es más acelerada y destructiva que la primera. También pueden mencio-

* Referencia Bibliográfica.

narse los desastres naturales, terremotos, incendios, etc., como generadores ocasionales de erosión y sedimentos.

Se reconocen tres tipos de erosión :

- a. Laminar
- b. De barranco
- c. Avalancha

La erosión laminar es la primera que se reconoce. Se produce siempre al inicio de la escorrentía superficial, es decir, cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de filtración del agua hacia el subsuelo. Las partículas sueltas por el impacto de la lluvia o por condiciones antecedentes son barridas de su lugar en pequeñas capas.

En la medida que la distancia recorrida se incrementa, la erosión laminar disminuye por concentración volumétrica de la escorrentía, transformándose en erosión de surco o zanja que más tarde degenera en formación de barrancos. Los barrancos a su vez se aceleran en formación dependiendo de la pendiente del terreno, del tipo de suelo y de la concentración volumétrica de la escorrentía. En los barrancos se produce tanto erosión progresiva de fondo y márgenes, como regresiva, es decir, hacia aguas arriba.

La erosión laminar es característica de las cabeceras de cuenca y de las áreas agrícolas al inicio de las lluvias, la de barranco es más propia de las partes media y baja de la cuenca.

El tipo de erosión por avalancha es aquél originado por el deslizamiento de taludes o enormes masas de suelo que pierden su ángulo de reposo y se precipitan hacia la base del talud.

Estos deslizamientos cuando se presentan a las orillas de los ríos, pueden temporalmente ser enormes fuentes de sedimentos que luego son arrastrados por las corrientes.

La erosión ~~no~~ es propia solamente de las partes altas o medias de la cuenca, sino que está presente en toda ella, incluyendo el propio lecho de las corrientes, lo que se conoce también como erosión del cauce.

La erosión de cauce es característica de las partes bajas de la cuenca. Generalmente se presenta en el fondo y márgenes de la corriente y su mayor o menor efecto se relaciona estrechamente con la composición geológica del cauce, el tipo de rocas que lo forman y así mismo, el régimen de flujo de la corriente.

Este tipo de erosión va acompañado del fenómeno de sedimentación o deposición, según sea la pendiente longitudinal y la velocidad del flujo de la corriente. El juego continuo de erosión y sedimentación propicia los cambios de cauce y formación de meandros en los ríos, propios de las partes bajas de la cuenca donde la pendiente se hace casi nula y el caudal es máximo.

En los grandes ríos es característica la inestabilidad de las márgenes, las cuales son erosio-

nadas por el constante oleaje de orilla y por cambios de saturación del suelo al variar el nivel de la corriente. El material fácilmente pierde su cohesión y las fuerzas de subpresión y gravedad (por el peso mismo de la masa) hacen que las orillas se colapsen.

Este proceso se hace más grave cuando existe vegetación de orilla, pues la capa radicular afloja el suelo y cuando los árboles caen al agua como parte del deslizamiento producido, forman represamientos que alteran las líneas de flujo creando corrientes de ataque por remolino. Estas corrientes socaban el pié de la orilla y son un motivo adicional para la caída de los taludes de orilla.

En las cuencas de los grandes ríos, la erosión de cauce resulta ser la más importante por cuanto los otros tipos de sedimentos, como lo son la laminar y barranquera, no son comunes en las áreas planas donde se desarrollan los cauces principales o bien su contribución en materia de sedimentos es despreciable.

7.2.3 Características de la cuenca.

La producción de sedimentos hacia los cauces fluviales está estrechamente ligada a la morfometría de la cuenca, valga decir, a su configuración geométrica y orográfica.

Fuertes pendientes desprovistas de vegetación son fácilmente erosionables, refiriéndose dichas pendientes tanto a la superficie de la cuenca como a los cauces en sí. La mayor o menor configuración accidentada o el desarrollo del sistema de

drenaje, permiten una mayor retención superficial y filtración, lo cual indirectamente regula el escurrimiento superficial reduciendo su potencial erosivo.

La velocidad de movimiento del escurrimiento y su régimen de flujo conforman un desagüe rápido o lento según el caso, con los consiguientes aspectos erosivos. En otras palabras, la resistencia que recibe el flujo de corrientes reducirá la erosión superficial. Esta resistencia está representada tanto por las irregularidades del terreno que dan lugar a la detención y retención superficial, como por el tipo de su cobertura vegetal.

No debe olvidarse la geología y litología de la cuenca, lo que se conoce como su geomorfología o sea, el origen mismo de la cuenca; determinante por cuanto representa la base de circulación del agua. Según sea el origen geomorfológico así será la integración del régimen hidrológico y fluvial de la cuenca, o sea, su sistema de drenaje.

La litología a su vez es la que en tiempos preterritos dió formación a los suelos de la cuenca, lo que se conoce como origen parental de los suelos.

En resumen, tanto en la formación de los suelos como en su razón de pérdida para formar sedimentos, los factores determinantes son por un lado el clima y sus parámetros, precipitación, temperatura y evaporación, por otro la escorrentía en combinación con la geomorfología y cobertura

vegetal de la cuenca. De su control adecuado dependerá la estabilización, reducción o incremento del aporte sólido a los recursos de agua.

scfb.

7.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

7.3.1 Tipos de sedimentos.

Los tipos reconocidos de sedimentos están estrechamente relacionados con la forma de movimiento que presentan al ser arrastrados o transportados por la corriente. El modo de arrastre o transporte es función del tamaño y forma de las partículas, de la velocidad del flujo, de la temperatura y viscosidad del agua y del peso específico o densidad del material.

Se reconocen así los tipos siguientes :

- a. Sedimento de lavado (wash load). Partículas de material muy fino, no fácilmente sedimentables y siempre transportados por la corriente a su misma velocidad y régimen. Esta definición es más académica que práctica al igual que el reconocimiento de este tipo de sedimento, que por sus características teóricas no es medible, siendo incluido como parte del sedimento en suspensión.
- b. Sedimento en suspensión. Aquellas partículas finamente divididas, mantenidas en suspensión por las componentes verticales de la velocidad en flujo turbulento y transportadas finalmente por los componentes horizontales del flujo.
- c. Sedimento de salto. Material de tamaño tal que algunas veces es empujado o deslizado por el fondo, pero que a momentos por choque con otras partículas o desbalance de fuerzas componentes del flujo y su propio peso, "salta" y temporalmente es transportado en suspensión

./.

para nuevamente caer al fondo.

- d. Sedimento de fondo. Partículas de tamaño mayor al sedimento suspendido que siempre son arrastradas, deslizadas o hechas rodar por el fondo, estando siempre en contacto con el lecho del cauce.
- e. Piedras de fondo. Material de tamaño tal que solo muy ocasionalmente son movidas por la corriente en tramos muy cortos, permaneciendo tiempo indefinido en quietud hasta nuevamente verse movidas por la corriente.

De los tipos de sedimentos, en la práctica se reconocen solamente dos grupos por ser los que pueden muestrearse y estimarse cuantitativamente en función del tiempo. Estos son : sedimento en suspensión y sedimento de fondo.

Se considera que el sedimento de lavado se incluye como sedimento en suspensión y que el sedimento de salto puede estar considerado indistintamente como parte del muestreo en suspensión o del muestreo de fondo según el caso. Las piedras de fondo no tienen mayor interés en transporte de sedimentos.

Los tipos señalados se presentan simultáneamente en la naturaleza, por lo que la clasificación dada obedece más a su forma de muestreo y cuantificación que a su condición. De ahí una última definición que engloba todos los tipos y es lo que se denomina sedimento total, compuesto por la suma del sedimento en suspensión y el de arrastre por el fondo.

7.3.2 Concentración de sedimentos.

El propósito fundamental del muestreo de sedimentos es el determinar la concentración de los mismos respecto al volumen de la mezcla agua-sedimento de la corriente. Obtenida la concentración en una sección transversal dada puede, en combinación con el volumen líquido que pasa en un instante dado, calcularse el arrastre total de sedimentos.

La concentración tiene varias acepciones cuando se trata de medición de sedimentos en una sección transversal de un río, pero en términos generales se dará su definición clásica.

Se entiende por "concentración", la relación que existe entre el peso seco del contenido de material sólido de la muestra y el volumen total de la mezcla líquido-sedimento. Su valor viene dado en peso seco por unidad de volumen.

También puede definirse la concentración, como la relación del peso seco del sedimento al peso total de la muestra líquido-sedimento. La forma más comunmente empleada es la primera o sea la relación peso seco a volumen unitario de la mezcla.

La concentración puede ser puntual o sea aquella relativa al punto de toma de la muestra y puede ser espacial sobre un vertical de sondeo, cuando corresponde a una muestra integrada captada uniformemente a lo largo de la vertical. Esta última se considera válida en una distribución uniforme sobre una columna o segmento de área, equivalente a la mitad de la distancia entre sondeos

a ambos lados de la vertical considerada, desde la superficie al fondo del cauce.

Si se conoce la concentración puntual en varios puntos a lo largo de la vertical; un promedio ponderado de estos valores dará la concentración media sobre la vertical. En igual forma, un promedio ponderado de concentraciones sobre las verticales de una sección transversal del río, dará el valor de la concentración espacial media a lo largo de la sección completa.

Cuando las concentraciones definidas anteriormente se relacionan con el volumen de líquido que pasa por unidad de tiempo en dicha sección, entonces se tienen los valores medios de concentración del gasto líquido que pasa en la sección transversal.

La concentración media ponderada del caudal líquido multiplicada por el valor de dicho caudal dará el gasto sólido. Expresado en forma de ecuación :

$$g_i = c_i q_i$$

donde :

g_i = gasto sólido en una fracción de sección transversal en gr/s.

c_i = concentración media del gasto líquido en dicha fracción i en gr/l.

q_i = caudal líquido parcial en la sección i en l/s.

./.

integrando :

$$G = \sum_1^i Q_i$$

$$G = \sum_1^i c_i Q_i$$

$$G = \bar{c}Q \text{ (gr/s)}$$

$$G = 0.0864 \bar{c}Q \text{ (Tn/día)}$$

donde :

\bar{c} = concentración media del caudal líquido en gr/m³

Q = caudal líquido en m³/s

0.0864 = factor de reducción

La forma más común de representar la concentración del caudal medio está dada también en porcentaje, siendo equivalente cada unidad de porcentaje a 10,000 partes por millón (ppm).

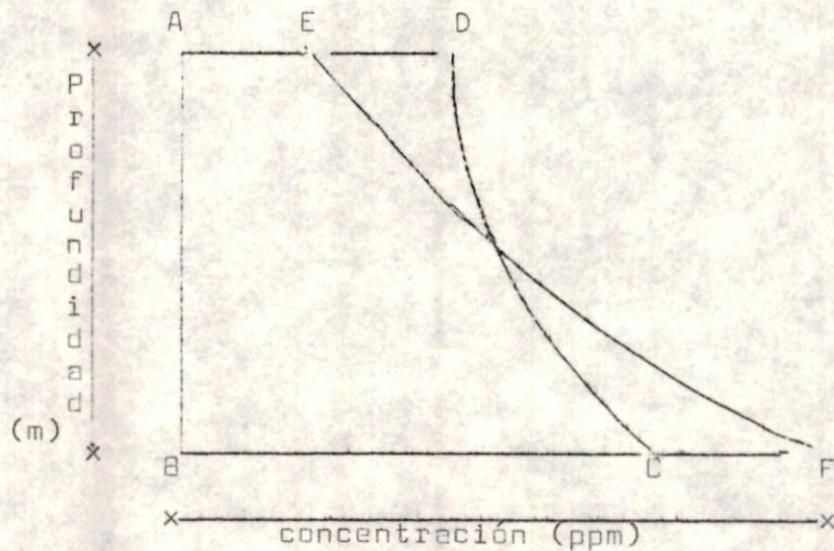
7.3.3 Distribución vertical y transversal.

El transporte de materiales en suspensión está en relación directa con la turbulencia del flujo de corriente. La distribución de la concentración del sedimento en suspensión, varía tanto vertical como transversalmente, debido a cambios de velocidad, componentes del flujo, formación de remolinos, cambios direccionales de velocidad hacia arriba y hacia abajo, etc.

En una vertical, la concentración aumenta desde la superficie hacia el fondo, como resultado - ./.

de la acción de las fuerzas que tienden a sedimentar la partícula y las corrientes direccionales dadas por el grado de turbulencia del flujo.

Generalmente la distribución tiene la forma de una curva de decaimiento con su máximo hacia el fondo. Partículas más finas varían relativamente menos en su concentración con la profundidad que partículas de arena más gruesas, como se muestra en la gráfica de la figura 7.1



Curva EF arenas más gruesas
Curva DC arenas más finas

Fig. 7.1

Para limos y arcillas la concentración a lo largo de la vertical varía muy poco.

Matemáticamente la relación de concentración del sedimento en suspensión respecto a la profundidad puede expresarse por :

./.

$$C = \left[\frac{d - y}{y} \right]^Z$$

o bien, si se considera la zona de sedimento no -
medido (por razones prácticas de construcción de
los muestreadores, no puede medir sino hasta una
distancia dada "a" del fondo).

$$\frac{C_y}{C_a} = \left[\frac{d - y}{y} \cdot \frac{a}{d - a} \right]^Z$$

La expresión anterior puede utilizarse cuando
 C_y es la concentración de un tamaño especificado
de sedimento a una distancia cualquiera "y" sobre
el fondo del cauce.

C_a es la concentración del mismo tamaño de par-
tícula que corresponde a una distancia "a" del fon-
do; d, es la profundidad y Z el exponente teórico
que describe la curva de distribución del sedimen-
to en suspensión.

El valor de Z puede asimilarse al de la pen -
diente de la recta formada en un gráfico doble lo-
garítmico al plotear $(d-y)/y$ contra la concentra-
ción medida a varias profundidades. En la fig.
7.2 se muestra la variación teórica del material
en suspensión en función de Z.

Cabe señalar, que en la mayoría de los casos
la concentración a media profundidad y al fondo,-
siempre es mayor que la concentración en la super-
ficie, en más de un 10 a 20% .

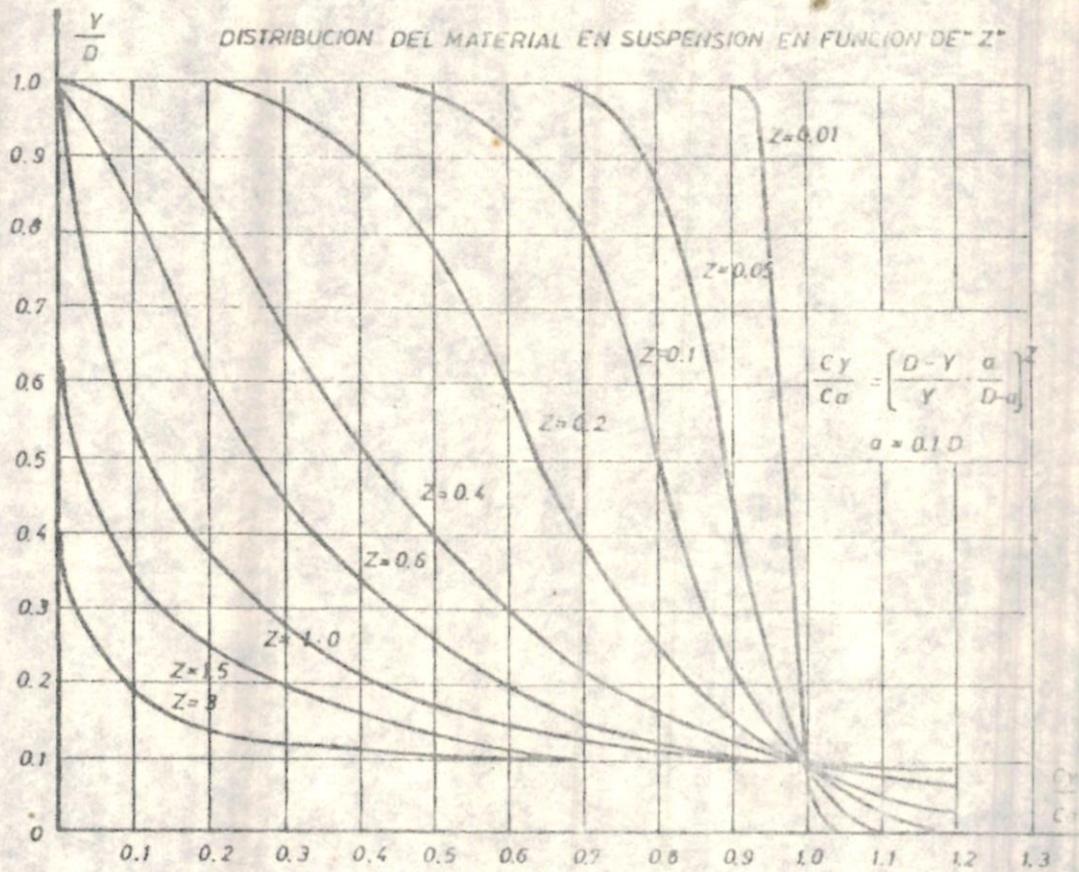


Figura 7.2

La distribución espacial del sedimento en suspensión a través de la sección transversal varía en menor proporción que sobre una vertical. Esta distribución está en relación con la forma y regularidad de la sección geométrica, y a excepción de áreas irregulares la concentración es muy similar a lo largo de la sección transversal. Sin embargo, en los casos de tramos aguas abajo de la unión de un tributario mayor, cuya concentración difiere de la del cauce principal, la concentración variará en sentido transversal y longitudinal del cauce. El punto hasta donde se presente un homogenización transversal puede estar a considerable distancia del punto de unión, siendo función de la magnitud de ambos ríos (caudales) y de su régimen individual y conjunto de flujo.

Estas consideraciones permiten asumir una variación lineal de la concentración entre verticales de sondeo, a fin de calcular la descarga del gasto sólido en suspensión. Así mismo, en secciones transversales bastante uniformes en configuración geométrica, de tramos rectos y flujo similar, las verticales de muestreo pueden espaciarse a mayor distancia o muestrearse sedimentos alternadamente en las verticales donde se ha medido velocidad durante un aforo. Esto hace una operación sistemática de muestreo más económica, sin disminuir en mayor grado la precisión de las mediciones.

La fig. 7.3 muestra esquemáticamente la distribución del flujo líquido (velocidades) a lo largo de una sección transversal, la distribución

./.

espacial de las concentraciones del sedimento en suspensión y su integración en sedimento + líquido o sea, el gasto sólido en suspensión.(1)

scfb.

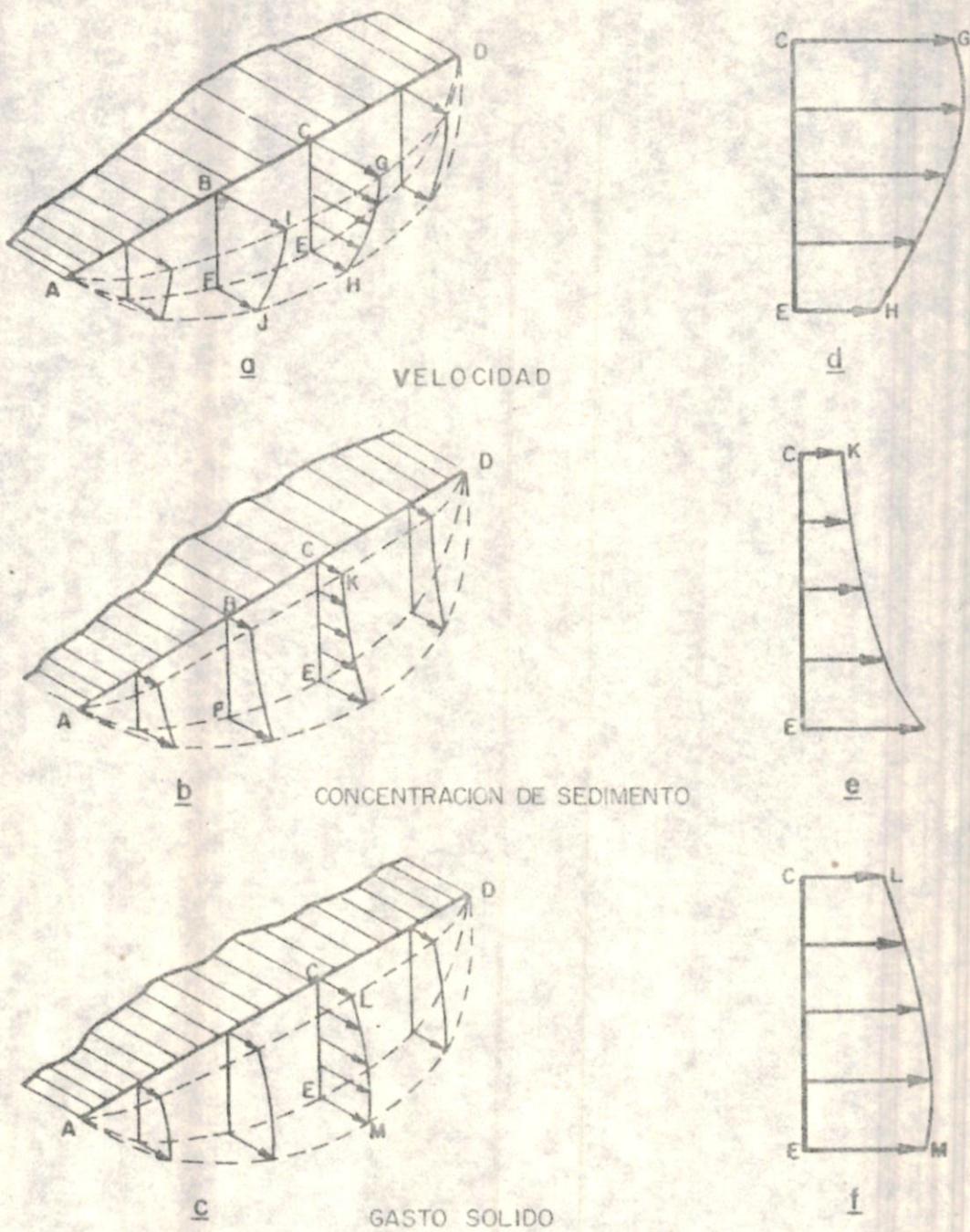


Figura 7.3

7.4 MEDICION DE SEDIMENTOS EN SUSPENSION

7.4.1 Consideraciones generales.

La medición de sedimentos en suspensión es una actividad que forma parte de un servicio de hidrología y que se debe efectuar sistemáticamente en forma simultánea con los aforos de caudal líquido.

No en todas las estaciones de la red debe muestrearse, sino en un número seleccionado de ellas. La red de estaciones para medición de sedimentos debe guardar estrecha relación con la forma o producción del sedimento y estar estratégicamente localizadas en aquellos puntos críticos de zonas erosionables o en las estaciones hidrométricas que miden caudales para un propósito de aprovechamiento específico, principalmente captaciones con embalses.

La operación de una red sedimentométrica requiere inversión adicional a la de la red hidrométrica que pertenece, por cuanto debe contarse con equipo o instrumental de muestreo en el campo y con un laboratorio en la oficina encargada. Sin embargo, los datos aportados son fundamentales y determinantes en el diseño de proyectos de embalse. En ciertos casos, la factibilidad de un proyecto puede verse amenazada si la vida útil de las obras hidráulicas es, por sedimentación o azolvamiento, más corta que la económicamente rentable. De ahí la importancia de la operación de una red sedimentométrica.

Los sedimentos son causa de múltiples problemas en la operación y vida útil de las obras hidráulicas. En embalses reducen gradualmente la capacidad de almacenamiento y consecuentemente la disponibilidad para generación hidroeléctrica, causan reducción del área regable, disminución de la regulación de avenidas, etc.

Dependiendo del tipo de sedimento, el mantenimiento de la maquinaria hidráulica puede encarecer enormemente la operación de las obras. En síntesis, el transporte de sedimentos tiene grandes repercusiones en la planificación, ejecución y operación de obras hidráulicas. De ahí la necesidad y utilidad de su determinación a base de medición sistemática en las estaciones de la red hidrosedimentométrica.

7.4.2 Características del muestreo de sedimentos en suspensión.

El objetivo principal de la medición o toma de muestras es el determinar la concentración del sedimento en suspensión y con dicho valor, calcular el gasto sólido que pasa por una sección transversal de un río en un momento dado. Es necesario e indispensable que cada vez que se haga la toma de muestras, previamente o en forma simultánea, se mida el caudal líquido y se refiera a la altura de mira del momento, tomándose también la temperatura del agua.

Para la estimación del sedimento en suspensión pueden emplearse varios métodos :

- a. Métodos colorimétricos
- b. Uso de muestreadores

- c. Cubicación de depósitos o embalses
- d. Empleo de fórmulas.

Los métodos colorimétricos son más utilizados en las actividades de agua potable, con los cuales se mide la turbidez del líquido utilizando turbidímetros. Su precisión es poco favorable cuando se trata de cuantificar el gasto sólido, por lo que en la práctica hidrométrica no se utiliza.

El método más preciso de cuantificar sedimentos es la cubicación periódicamente de vasos de almacenamiento, cuando se cuenta con uno o más embalses en la cuenca.

El empleo de fórmulas está circunscrito en aquellos casos donde el muestreo es muy reducido o no se cuenta con estadísticas. Su precisión es siempre dudosa, por cuanto las fórmulas casi siempre han sido deducidas para condiciones ideales de laboratorio, que en sustancia, difieren de las existentes en la naturaleza.

El uso de muestreadores resulta ser la técnica más recomendable para trabajo continuo y sistemático. En este caso, pueden emplearse muestreadores de tipo puntual, integradores o muestreadores continuos. La selección y uso de cada uno depende de la preferencia de la oficina encargada y del personal capacitado con que se cuente. En cualquier caso y dentro de un mismo tipo de muestreadores existe variedad instrumental, elegible según el tamaño y profundidad de la corriente y su volumen de arrastre.

./.

El desarrollo del instrumental para el muestreo de sedimentos ha tenido su auge en Estados Unidos y en Europa. En el medio latinoamericano, los equipos en mayor preferencia y uso son los norteamericanos.

Las técnicas de muestreo tratan de obtener valores representativos del fenómeno, y como tal, tomando en consideración lo dicho sobre la variación vertical y transversal de la concentración, los puntos a considerar son :

- a. Número de verticales de muestreo
- b. Número de puntos o forma de muestreo en una vertical
- c. Frecuencia de los muestreos.

La solución a los interrogantes que se plantean dependerá del grado de precisión deseado, de la distribución y volumen del sedimento transportado por la corriente, y del equipo de que se disponga. En cualquier caso, deberá tratar de muestrearse en todo el rango de variación de niveles del río.

Número de verticales de muestreo

Teóricamente debería muestrearse en cada vertical de sondeo del aforo. Esto es recomendable en aquellos casos que requieran de mucha exactitud.

Como ha sido descrito, tomando en cuenta la variación lineal asumida para la concentración, las verticales de muestreo pueden reducirse o espaciarse con relación a las del aforo.

Así puede muestrearse la sección dividiéndola en partes iguales (cuatro o más verticales igualmente espaciadas), una vertical en el centro de gravedad de los tercios de sección, o un número seleccionado de verticales (generalmente no superior a 10) a lo largo de la sección. En el caso más simple, una sola vertical en el punto de mayor profundidad o concentración del flujo, o al centro de la sección.

En general, la mejor elección será aquella que divida el volumen líquido en partes proporcionales del caudal total y que éstas sean representativas económicamente del sedimento transportado.

Muestreo en una vertical de sondeo

Existen dos modalidades de muestreo por vertical así :

- Muestreo por puntos
- Muestreo por integración

El primero es aquél que en semejanza a la medición de velocidades en una vertical, la toma de muestras se realiza en puntos definidos previamente seleccionados en la vertical.

Los puntos elegibles pueden ser :

- a. Un solo punto superficial
- b. Un solo punto a 0.6 de la profundidad a partir de la superficie.
- c. Una muestra superficial y otra de fondo.
- d. Muestras a 0.2 y 0.8 de la profundidad
- e. Idem anterior agregando a 0.6 de la profundidad.

./.

- f. Muestras en varios puntos igualmente espaciados.

La toma de muestras puede tener dos objetivos, uno el determinar la concentración y el otro la granulometría del sedimento. Las muestras puntuales no son convenientes ni representativas para la granulometría.

La selección de uno o más puntos depende de la exactitud deseada. Las muestras con un solo punto son poco precisas y recomendables únicamente en ríos pequeños y de sección uniforme.

Es preferible el procedimiento de tres puntos (caso e) o el de dos (caso d) por la congruencia con la medición de velocidades. En estos casos la concentración media en la vertical puede calcularse así :

- 0.2 y 0.8 de la profundidad

$$C_m = \frac{3}{8} C_{0.8d} + \frac{5}{8} C_{0.2d}$$

- 0.2, 0.6, 0.8 de la profundidad

$$C_m = \frac{1}{4} \left[C_{0.8d} + 2C_{0.6d} + C_{0.2d} \right]$$

Estos procedimientos están más acordes con la metodología de aforos y con la sistematización del muestreo, y son por otro lado fáciles de captar por el personal de campo.

Si se desea determinar la granulometría con un integrador puntual, puede hacerse una muestra

./.

conjunta por combinación de las muestras puntuales en tres puntos, tomando doble muestra en el punto medio.

La exactitud del muestreo puntual es función del número de puntos considerados y varía inversamente con el tamaño o grosor del sedimento. El porcentaje de error aumenta al disminuir la velocidad y turbulencia de la corriente y al aumentar el tamaño de las partículas.

La otra modalidad de muestreo es llamada por integración, y consiste en captar la muestra haciendo recorrer el muestreador a lo largo de toda la vertical en viajes de ida y vuelta (superficie-fondo-superficie) a velocidad constante.

La velocidad de tránsito del instrumento está en función del tamaño del sedimento (así será el diámetro de la boquilla) y la velocidad del flujo. Los fabricantes han calibrado previamente el tiempo de tránsito para cada boquilla del instrumento en razón directa de la velocidad del agua. Una muestra de estas curvas se da en la figura 7.4

Este procedimiento es el más exacto, pues bien captada la muestra, representa el valor medio (integrado) de la concentración en dicha vertical. La muestra puede utilizarse por la misma razón en determinar la granulometría del sedimento.

El método utiliza doble carrera (ida y vuelta) en profundidades no mayores de 5 m. Para casos por encima de este valor, el tiempo dado por la

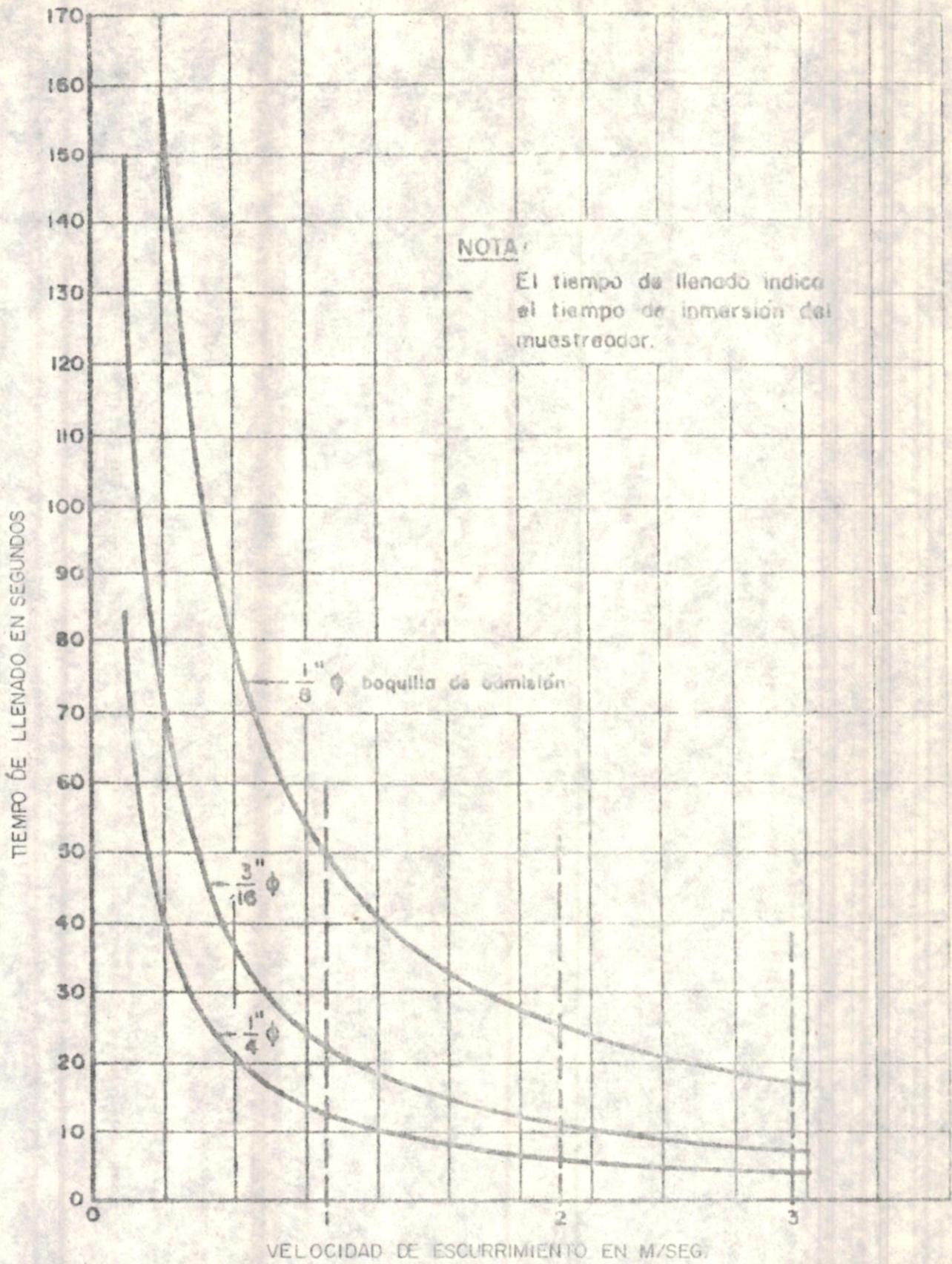


Figura 7.4.- TIEMPO DE LLENADO PARA BOTELLA DE 395 cm³

curva debe emplearse sólo en una dirección (ida). El problema se complica en la operatoria cuando se tienen ríos muy profundos, donde es preferible utilizar muestreadores puntuales y captar muestras en varios puntos de la vertical.

Una desventaja tiene el método por integración, y es la imposibilidad de medir en la zona cercana o en contacto con el fondo, donde por causa de la turbidez se presenta el mayor valor de la concentración. El arrastre de la zona no medible debe ser estimado en forma indirecta por fórmulas.

Frecuencia del muestreo

En la operatoria sistemática común existen dos tipos de muestreos: el que se verifica conjuntamente con el aforo, al que se denomina completo por ser hecho a todo lo ancho de la sección y el de orilla o centro, tomado diariamente por el Observador.

Durante el muestreo completo también se toma una muestra de orilla o centro, en igual forma a la verificada por el observador. Esto último, lleva como propósito definir cualquier correlación posible entre el muestreo parcial y el completo, a fin de extrapolar hacia los muestreos diarios dicha correlación.

La frecuencia del muestreo completo queda asimilada a la frecuencia con que se efectúan los aforos en la estación hidrométrica. En rigor, todo muestreo de sedimentos debe estar ligado a una medida de caudal y consecuentemente a una lectura

de mira (caso de las muestras parciales). Los muestreos sin ésta condición no son de mayor utilidad, pues el objetivo es extrapolar valores para obtener una estadística completa de gastos sólidos medios diarios, mensuales y anuales.

La frecuencia de muestreo al igual que de aforo debe ser mayor en época de crecidas. En la práctica se ha determinado que son las crecidas las que transportan la mayor cantidad de sedimento. Sin embargo, la concentración máxima no coincide con el pico de la crecida, como sería de esperarse, sino que se presenta antes de éste.

Por otro lado las curvas de gasto sólido deben extrapolarse hacia valores altos de nivel y caudal, lo cual sugiere la conveniencia de efectuar mediciones en épocas de aguas máximas con la mayor frecuencia posible.

Durante el estiaje, cuando los niveles son más constantes y las aguas más claras, el muestreo puede espaciarse al igual que los aforos. En general puede decirse, que una investigación retrospectiva, después de uno o varios años de registros, puede ser la única forma de definir si es conveniente o de utilidad real el muestreo diario (caso de que se defina buena correlación con el muestreo completo) y por igual la frecuencia más representativa de aforos y muestreos completos.

No debe olvidarse que el gran número de análisis de laboratorio que deben efectuarse, encarece grandemente la operación de una red. Por lo tanto.
./.

to, una investigación retrospectiva rinde sus frutos en la economía de las observaciones y reducción del presupuesto anual o ampliación del número de estaciones sedimentométricas de la red.

Equipo de medición puntual

Se hará una breve descripción del equipo comúnmente en uso y de fabricación norteamericana.

Los muestreadores de sedimentos en suspensión tanto puntuales como integradores tienen forma hidrodinámica direccional y son de peso apropiado a su propósito. La forma generalmente es de pescador o zepelín, y a su interior llevan el depósito captador (una botella lechera de 1/4 de litro). La entrada de la muestra se verifica a través de una boquilla cuyo diseño y diámetro son tales que no perturban la muestra (velocidad y presión de entrada igual a la del flujo de corriente).

Los muestreadores puntuales tienen controlada la entrada del líquido por medio de una válvula gobernada por el operador desde el exterior. Una vez bajado el instrumento hasta la posición del punto a medir, se abre la válvula para captar la muestra y luego se cierra previamente a extraer el instrumento del agua.

Los muestreadores usuales se identifican por su peso y modelo. Los de tipo puntual son:

- USP-61 de 28" largo y 100 lbs peso
Uso hasta profundidades de 50 m.
- USP-63 de 34" largo y 200 lbs peso
Para profundidades hasta 60 m.

- USP-50 de 44" largo y 300 lbs peso
Para grandes profundidades hasta 75 m.

El diseño es semejante en los tres casos por lo que en la fig. 7.5 solamente se muestra el USP-61 y USP-63, tomados de la referencia (2).

Equipo de medición por integración.

El instrumental de muestreo por integración es similar al anterior cuando se trata de mediciones desde cable. Sin embargo, para este caso también existen los modelos de manejo manual para pequeñas corrientes donde la operatoria puede hacerse por vadeo.

En los modelos integradores no se utilizan válvulas de control, y la muestra empieza a captarse tan pronto el instrumento se introduce al agua, y termina al extraerlo. Tanto en el modelo de vadeo como en el de profundidad, el tiempo de inmersión debe ser igual al de extracción, procurando que la velocidad sea uniforme en todo el recorrido. La botella lechera no debe salir totalmente llena, sino con líquido hasta las 3/4 partes de su contenido.

Tanto en los casos de poco contenido como en el de botella llena, la operación debe repetirse ante la incertidumbre de su representatividad, pues en el primer caso el contenido es insuficiente, como en el segundo; no se sabe el punto dónde terminó el llenado. Lo que se quiere es captar una muestra integrada a todo lo largo de la vertical. En profundidades mayores de 5 m. será solo

./.

de ida, tomando igual tiempo que en doble viaje. Por su diseño, los integradores están limitados en su aplicación cuando la profundidad supera los 10 m.

Los equipos son calibrados para 3 diámetros de boquilla, 1/8", 3/16" y 1/4", quedando la selección en función de la cantidad de sedimento arrastrado y de la velocidad del flujo.

Existen varios modelos en uso generalizado, pero los más comunes son :

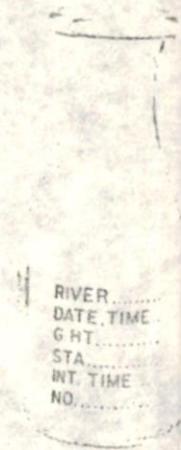
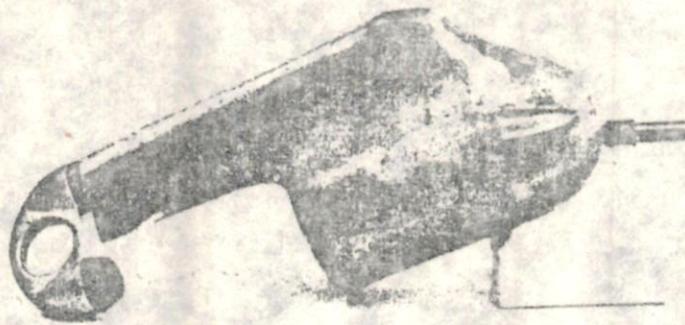
- USDH-48 de 13" largo y 4 1/2 lb. peso uso de vadeo.
- USDH-59 de 15" largo y 24 lb. peso
- USD-49 de 24" largo y 62 lb. peso

En las fig.7.6 y 7.7 se muestran objetivamente (tomando de la referencia (2)).

Existen equipos más sofisticados de medición, como lo son los muestreadores continuos de extracción automática de muestras por medio de bombeo. No se describirán aquí por no ser el caso de uso sistemático en redes sedimentométricas. Mayor información puede tenerse de las referencias (1) y (2).

7.4.3 Cálculo de sedimentos en Suspensión.

El objetivo del muestreo sistemático es el obtener información básica que sirva para extrapolar hacia resultados referidos al tiempo. Los muestreos, sean puntuales o integrados, se hacen representativos del caudal líquido que pasa por la sección en ese momento y el cual ha sido pre-
./.

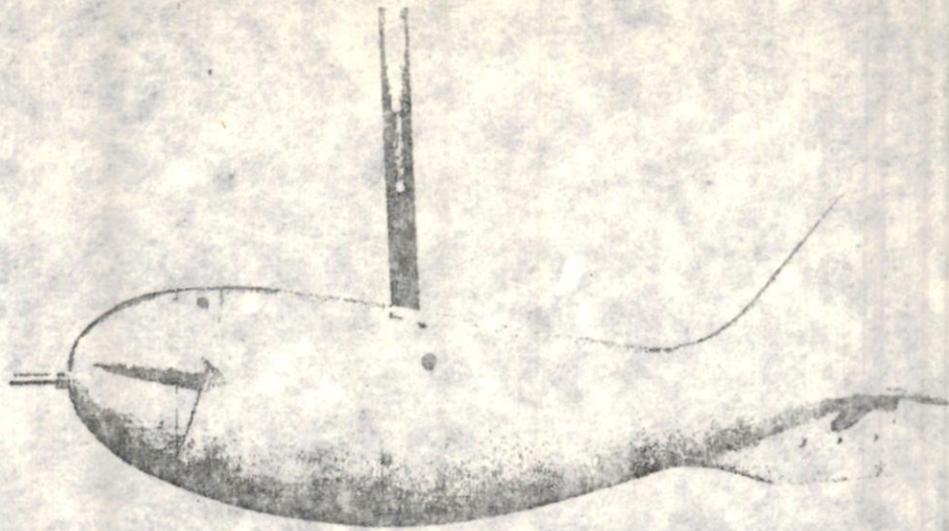


US DH-48 MUESTREADOR INTEGRADOR MANUAL

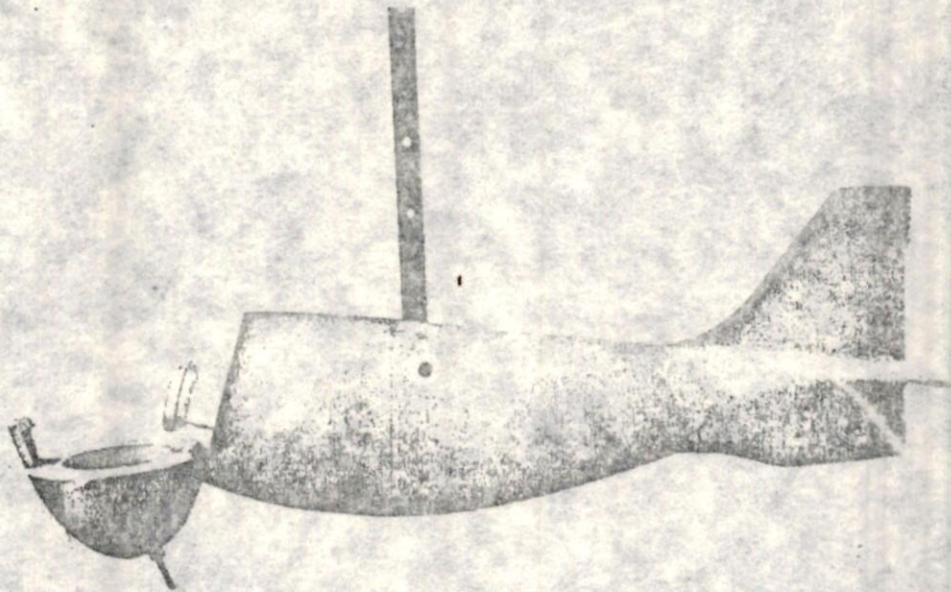


US DH-59 MUESTREADOR INTEGRADOR MANUAL

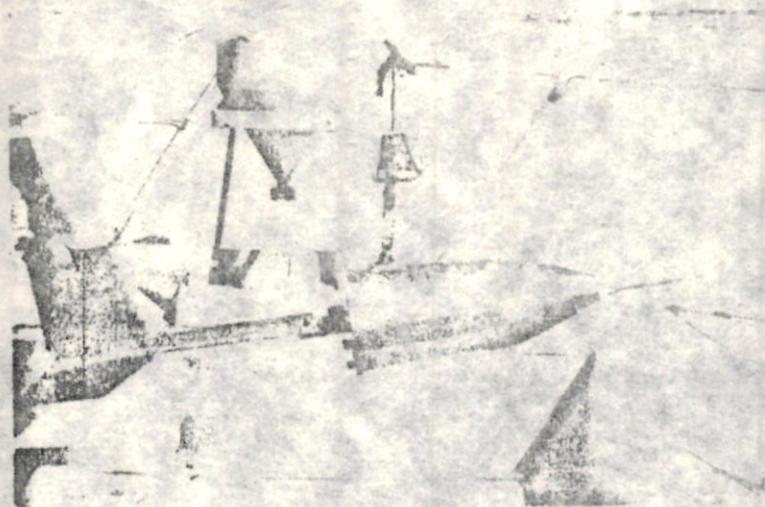
Figura 7.6



US D-49 MUESTREADOR INTEGRADOR A CABLE (CERRADO)



US D-49 MUESTREADOR INTEGRADOR A CABLE (ABIERTO)



MUESTREADOR BOTELLA DE DELFT (SUSPENSIÓN)

viamente aforado.

El interés real del planificador o investigador, es conocer el volumen total de sedimentos que pasan a través de dicha sección en un tiempo dado (días, semanas, meses o años). Es éste el valor de utilidad y hacia el que se pretende llegar con el cálculo de la estadística de sedimentos. Por lo tanto se requiere de una metodología que pueda aportar dicho conocimiento.

Curva de gasto sólido en suspensión.

Tanto el fenómeno de la erosión como el de transporte de sedimentos, están sujetos a la combinación y conjunción de un número múltiple de factores. Esto hace del fenómeno un evento sumamente complejo y sujeto en su formación a las reglas del azar, valga decir a las leyes de probabilidad. Hasta hoy día, no se ha llegado a determinar una metodología netamente satisfactoria y representativa, siendo motivo de investigación la solución de este problema.

Como una técnica usual, se tiene la denominada Curva de calibración del gasto sólido en suspensión, la cual pretende determinar una relación directa entre el gasto líquido medido y la concentración o gasto sólido equivalente, planteados en papel doble logarítmico en ambos casos.

Realmente no existe una relación unívoca entre el gasto líquido y el gasto sólido correspondiente a la concentración del sedimento y eso es fácilmente explicable al razonar sobre la complejidad de origen en la formación del sedimento, y

la infinidad de orígenes que llevan a la formación y concentración del caudal líquido que lo transporta.

Grande es en la mayoría de los casos la dispersión de los puntos sobre la gráfica y ésta se hace más acentuada cuando se amplía el período entre las fechas de toma. En otras palabras, curvas de corto período de validez (semanas o meses) son menos dispersas que de más largo tiempo (años).

Sin embargo, se acepta como válido un valor promedio representado por la curva más lógica que ajuste lo mejor posible en razón de dicha dispersión.

Matemáticamente se ha querido representar la forma de la curva por medio de una ecuación de tipo parabólico así :

$$G = K Q^n$$

donde :

G = gasto líquido en Ton/día

Q = gasto líquido en m³/s

K, n = constantes

Igual razonamiento puede darse al tratar con las concentraciones y sus caudales.

$$C = K Q^n$$

Obtenida la función más representativa y aplicada a la estadística de caudales del mismo período de registro, se obtiene la estadística correspondiente al gasto sólido en suspensión. De dicha estadística los valores más utilizados son

./.

los del volumen equivalente de gasto sólido mensual y anual, produciendo en la cuenca considerada.

Una forma práctica de referir el transporte de sedimentos a la pérdida de Suelo en la cuenca, es el de dividir el peso total (o volumen equivalente) producido por año en un punto dado, entre el área de la cuenca. Esta relación dá lo que se conoce como "Rendimiento" de la cuenca y está dado en Ton/Km², Este valor es de utilidad para extrapolarlo a cuencas similares donde no se cuenta con información, y a la vez es un índice del estado o gravedad en la producción de sedimentos en la cuenca bajo estudio y al grado de erosión.

Registros de sedimentos en suspensión.

Queda establecido que toda operación de muestreo de sedimentos debe asociarse a un aforo del caudal líquido y consecuentemente, ambos efectuados en una estación hidrométrica que en este caso pasa a formar parte de la red sedimentométrica.

La sistemática de un buen muestreo es aquella que logra obtener muestras en caudales representativos entre el 20 y 80% del tiempo anual de variación del gasto líquido. En otras palabras, una curva de frecuencia o duración de caudales debe tener muestreos de suficiente número de caudales comprendidos entre los rangos de frecuencia de 20 y 80% cuando menos.

Por lo tanto, correctamente llevada una estadística anual de sedimentos en suspensión, es aquella que trata de obtener las curvas de gasto -

sólido para períodos representativos y los aplica directamente a los caudales de las mismas fechas.

Algunas veces puede asumirse un comportamiento semejante en la cuenca con relación a su manejo - en la producción de sedimentos. En tales casos, las correlaciones halladas pueden aplicarse o extrapolarse a las mediciones anteriores de caudal y en tal forma, obtener un estimado de más largo período de registro.

Estos razonamientos deberán ser acompañados - siempre de una investigación sobre la veracidad - de la suposición hecha de un manejo similar en los períodos de tiempo de la extrapolación.

7.4.4

Extensión de registros de gasto sólido en suspensión.

En los estudios de planeación o diseño de obras hidráulicas se requiere saber el probable aporte o acumulación anual de sedimentos en las presas de almacenamiento o captación.

Esto requiere la extensión de los registros de gasto sólido para períodos de largo registro. Cuando se cuenta con registros de caudal en combinación con registros de gasto sólido en suspensión, puede extenderse la correlación dada para el registro simultáneo de ambos caudales. Esta correlación puede mejorarse investigando mejores ajustes entre curvas de gasto sólido referidas a valores de velocidad, o lecturas de nivel en complementación de los valores de caudal líquido.

Si se cuenta con un largo registro de caudales, pero no de sedimentos, puede calcularse la curva promedio de duración de caudales líquidos y convertirla a curva de duración de gasto sólido, usando las funciones de correlación halladas para un año hidrológico. La integración del área de la curva así definida dará el transporte medio anual esperado de sedimentos en suspensión.

Los sedimentos en suspensión forman, en la generalidad de los casos, un 50 a 90% del arrastre total de sedimentos. Cuando se desea el volumen total arrastrado por el río, podrá entonces incrementarse el volumen hallado para el sedimento en suspensión en un porcentaje entre el 20 y 40% para estimar el volumen total.

Cuando se cuenta con datos aportados por cubi- cación de embalses en la cuenca dada o en sus ve- cindades, éste será un dato más confiable para e- valuar el rendimiento del transporte de sedimen- tos.

7.4.5 Sedimentos de arrastre por el fondo.

Si bien el sedimento en suspensión integra la mayor parte del total transportado por el río, una parte importante también lo es el sedimento arras- trado por el fondo. Este último tiene interés - cuando se trata de conocer sobre el comportamien- to del cauce del río, dragado de cursos fluviales, socavación o azolvamiento, mantenimiento de maqui- naria hidráulica, etc.

Ahora bien, en relación al muestreo y cuanti- ficación del arrastre por el fondo, no sucede lo ./.

mismo que con el sedimento en suspensión que puede determinarse con relativa mayor precisión e igualmente muestrearse con más representatividad. El sedimento de fondo resulta hasta hoy día un problema casi imposible de solucionar en lo que respecta a los procedimientos de muestreo y su cuantificación sistemática. Todos los métodos conocidos tienen su alto grado de incertidumbre por lo que la técnica está en continua investigación.

Los procedimientos empleados son a base de muestreo y por fórmulas empíricas deducidas en el laboratorio. El método más recomendable no existe, sino mas bien debe hacerse una evaluación haciendo mano a los diferentes procedimientos disponibles. Sin embargo debe quedar claro, que aún hoy día, éste es un problema sin solución satisfactoria.

Entre los muchos motivos de incertidumbre pueden señalarse, que todavía no se ha diseñado el muestreador ideal, es decir, aquél que pueda captar la muestra representativa sin disturbar. No puede identificarse un comportamiento regular en el arrastre, tanto en lo referente a su desplazamiento espacial como en función del tiempo, existiendo una gama infinita de situaciones cambiantes, carentes de todo patrón de movimiento. De ahí que muestras simultáneas pero tomadas en diferente posición sobre la transversal pueden diferir radicalmente.

El arrastre de fondo puede estimarse de varias formas así :

- a. Utilizando trampas de atrape colocadas ./.
..

en el lecho del cauce. La cantidad atrapable en función del tiempo dará el caudal sólido de arrastre de fondo.

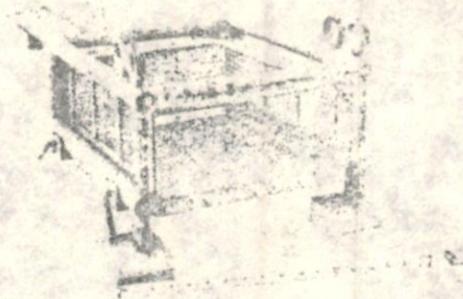
- b. Utilizando muestreadores para atrapar el sedimento de fondo. Los hay de diferentes tipos y modelos.
- c. Por medio de fórmulas empíricas
- d. Por diferencia entre el sedimento total y el sedimento en suspensión.

Muestreo de arrastre por el fondo.

Existe una gran variedad de instrumentos orientados a este fin, siendo el más simple la trampa transversal que puede ser fija (trinchera) o móvil (canasta). En ambos casos el objetivo es capturar sedimentos en un tiempo dado a lo largo de la sección, ubicando posteriormente. A pesar de su aparente representatividad son, en la práctica, procedimientos difíciles de implementar y muy costosos. Fig. 7.8

Entre los instrumentos muestreadores más aceptados está el desarrollado en Holanda denominado "trampa de ratón de ARNHEM" fig. 7.9 . Consiste de una entrada rectangular rígida, conectado a un depósito de hule que luego se extiende en una pirámide triangular sellada con malla metálica de 0.2 a 0.3 mm de paso. Esta malla deja escapar el agua capturando el sedimento sólido.

Entre los muestreadores en boga es quizás el de mejor diseño, pero aún no puede considerársele como el instrumento ideal.



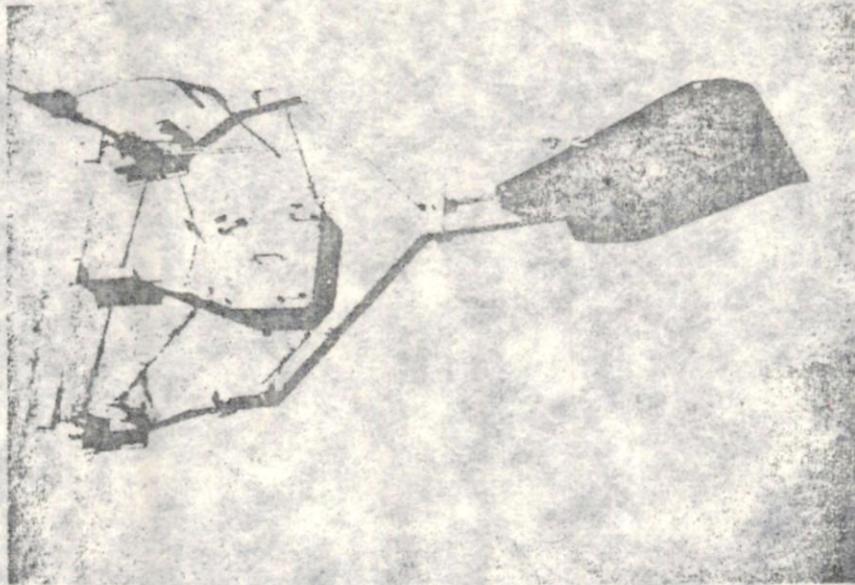
CANASTA DE MUESTREO ACARREO DE FONDO



F CANADA

CANASTA EN OPERACION

Figura 7.8



MUESTRADOR SPHINX - ACARREO DE FONDO



MUESTRADOR ARNHEM - ACARREO DE FONDO

Un instrumento semejante al anterior es el Sphins Sampler desarrollado en Delft Holanda y que puede montarse sobre la misma estructura utilizada por el de ARNHEM. Su eficiencia hidráulica es buena y puede capturar partículas hasta de 0.4 mm. Fig. 7.9. Sin embargo aún no se ha demostrado en este último caso su grado de efectividad. En cualquier caso, los muestreadores deben calibrarse previamente, puesto que su eficiencia puede variar considerablemente en función del tamaño del sedimento, caudal, etc.

Cálculo indirecto del transporte de fondo.

Debido al éxito obtenido con los ensayos de laboratorio, a diferencia del sedimento en suspensión (medible), el de fondo corrientemente es calculado en forma analítica utilizando fórmulas. Esto se vé cada vez más favorecido, dado lo difícil y costoso de los métodos de muestreo y aún más de su poca confiabilidad.

Algunos métodos calculan solamente el sedimento de fondo, mientras que otros se ocupan del sedimento total.

Entre las varias fórmulas aplicables se tienen :

- Kalinske (1947). Sedimento de fondo. Dá buenos resultados.
- Meller-Peter-Müller (1948) Sedimento de fondo. Dá buenos resultados.
- Einstein-Colbi (1955) Sedimento total. Dá buenos resultados.

Todos estos métodos requieren el conocimiento de parámetros hidráulicos y físicos del sedimento (radio hidráulico, pendiente hidráulica, coeficiente de rugosidad, peso específico del agua, peso específico del sedimento, diámetro de las partículas, etc.)

Cuando se cuenta con tales datos pueden utilizarse estos métodos con buenos resultados. Lo más recomendable es aplicar todas las fórmulas y luego seleccionar el valor final más aceptable.

Todas las fórmulas dan el caudal sólido que corresponde a un caudal líquido dado. Calculando para varios caudales puede derivarse una curva de calibración de arrastre de fondo, la cual en combinación con la curva de duración de caudales, puede servir para calcular el caudal anual arrastrado por el fondo.

7.4.6 Resumen de términos.

Sedimento : Todo aquél material fragmentado transportado en suspensión, arrastrado por el fondo o depositado por una corriente de agua superficial.

Lecho del cauce : Fondo de los cauces por donde circula la corriente.

Sedimento en suspensión : Material finamente dividido, que es transportado por la corriente en estado coloidal (sedimento de lavado o "wash load") o en suspensión por las corrientes de turbulencia del flujo.

Muestra de sedimento en suspensión : Cantidad captada de la mezcla agua-sedimento y que representa la concentración puntual o integral promedio de distribución del sedimento en suspensión.

Muestra puntual : Muestra captada en un punto fijo de la vertical especificada, tomada en un tiempo relativamente corto.

Muestra integral : Muestra captada en un tiempo promedio sobre una vertical dada, moviendo verticalmente el instrumento a velocidad constante, desde la superficie hasta el lecho del cauce y vuelta a la superficie.

Concentración del sedimento en suspensión : Es la relación del peso de la parte del material seco extraído de la muestra, en relación al volumen de la mezcla agua-sedimento. Se mide en gramos por litro (gr/l), miligramos por litro (mgr/l), o en partes por millón (p.p.m.)

Gasto sólido en suspensión : Cantidad de sedimento o material sólido transportado en suspensión por el agua, que pasa a través de la sección transversal del río en la unidad de tiempo. Se mide en Ton/día equivalentes.

Arrastre de fondo : Material sólido que se desliza o rueda en contacto con el fondo, movido por las fuerzas resultantes de la corriente.

Material de fondo : Material sedimentado que integra la composición del cauce o lecho del río.

Descarga de fondo : Es el peso del material de fondo que pasa a través de una sección transversal en la unidad de tiempo.

Gasto sólido total : Suma del gasto sólido en suspensión con la descarga de fondo.

Sedimento de salto : Material temporalmente en suspensión y temporalmente en movimiento por el fondo.

Rendimiento : Volumen total de sedimento en suspensión y de fondo, aportado por la cuenca o área de drenaje hasta un punto de referencia dado, en un determinado lapso de tiempo que generalmente es un año.

scfb.

B I B L I O G R A F I A

1. Cooperating Agencies. Determination of fluvial sediment discharge. Report No. 14. St. Anthony. Falls Hydraulic Laboratory. Minneapolis, Minnesota. 1963
2. W. Stichling. Instrumentation and Technics in Sediment surveying. Reprint Series No. 22. Department of energy, mines and resources Canada.
3. Juergen Delsner. Normas para el muestreo y cálculo del sedimento en suspensión. SNMH. Quito. Ecuador. 1965
4. E. Basso. Notas sobre transporte de sedimentos. Publicación No. 125. PHCA. Guatemala 1976
5. Ven Te Chow. Handbook of Applied Hydrology. McGraw Hill book Co. N.Y. 1964
6. Hsich Wen Shen. Modeling of rivers. Colorado State University. John Wiley & Sons. N.Y. 1979

T E M A : U S D D E C O M P U T A D O R A S E N
 H I D R O L O G I A

Ing. Orlandino Arteaga T.

I N D I C E		Pág.
8.1	INTRODUCCION	213
8.2	CONCEPTOS Y DEFINICIONES	214
8.2.1	Descripción general de las compu tadoras	214
8.2.2	Integración de una computadora	220
8.2.3	Operación de una computadora	223
8.2.4	Sistemas de computación	226
8.3	ELEMENTOS DE PROGRAMACION	229
8.3.1	Enfoque y solución de problemas	229
8.3.2	Secuencia y lógica de un proceso	229
8.3.3	Lenguajes de programación	233
8.4	APLICACION DE LAS TECNICAS DE COMPUTA - CION	235
8.4.1	Procesamiento de datos	235
8.4.2	Aplicaciones en Hidrología	236
8.4.3	Bancos de datos	238
8.4.4	Aplicaciones en estudios de apro vechamiento de recursos hídricos	239
BIBLIOGRAFIA		

8.1 INTRODUCCION

La presente exposición lleva como propósito dar una ilustración general y elemental sobre lo que son las computadoras y su utilización en la solución de los problemas comunes en Hidrología. Está dedicada a personas sin ningún conocimiento previo sobre el tema y su objetivo es complementar el material teórico-práctico del curso corto sobre Hidrología.

El tema de computación y uso de computadoras en la solución de problemas es de suyo sumamente amplio y extenso, como los avances de la tecnología moderna y la ciencia de la electrónica. Como tal, es muy difícil tratar de resumir en pocas líneas lo relativo al campo de acción de la moderna computación. Por lo tanto, se hará una breve descripción sobre lo que son las computadoras, cómo están integradas, cómo trabajan y cuáles son los campos de acción más comunes en relación con la Hidrología.

8.2 CONCEPTOS Y DEFINICIONES

8.2.1 Descripción general de las computadoras

La evolución y desarrollo de la electrónica y dentro de ésta, el inmenso campo de las computadoras electrónicas, ha experimentado en los últimos años un crecimiento exponencial. Resulta sumamente difícil y complejo pretender dar una clasificación o enmarcar dentro de determinado patrón a los diferentes tipos, clases y tamaños de computadoras existentes en el mercado. Las hay desde computadoras sumamente complejas y de gran capacidad y versatilidad, hasta la micro computadora de escritorio y aún más, las calculadoras programables de bolsillo.

Bajo el punto de vista de su funcionamiento pueden identificarse dos grupos diferentes de computadoras; las llamadas digitales y las analógicas.

Por computadoras digitales se entiende aquellas dentro de las cuales la información y proceso se efectúa por medio de una sucesión finita de caracteres, igual que en las calculadoras de bolsillo, es decir a base de representación en forma de dígitos.

En las computadoras analógicas los números y procesos se representan a base de cantidades físicas de variación continua, o en otras palabras, haciendo uso de la similitud de comportamiento entre el proceso que se analiza y el de los circuitos o flujo eléctrico. La computadora analógica obedece pues, a las leyes físicas de los circuitos eléctricos.

Todas las operaciones internas en ambos tipos de

./.

computadoras se efectúan a base de circuitos eléctricos y a la velocidad de movimiento de la electricidad. De ahí el calificativo de computadoras electrónicas. Aquí, se hará referencia en exclusiva a las computadoras digitales, que por lo demás, son las más comunes y usadas en el campo de la investigación científica. Las computadoras analógicas son de uso más específico en la simulación de procesos.

Existen diversos tamaños y tipos de computadoras digitales, tendiéndose cada vez más con base en los adelantos tecnológicos a construir los elementos físicos que las componen (identificados por la palabra Hardware) de pequeño tamaño. Su principal característica está definida por lo que se conoce como su CAPACIDAD de almacenamiento o MEMORIA y su versatilidad de proceso de información, medido en términos de "palabras".

Una palabra puede representar una instrucción cualquiera, un número o determinado grupo de caracteres del lenguaje escrito. El tamaño de la memoria de la computadora se mide en términos de palabras o miles de palabras, o sea en múltiplos de 2 elevado a la décima potencia o sea 1024 palabras, lo que se conoce como un K de capacidad.

Comunmente las computadoras utilizan el sistema binario para la representación de números o caracteres es decir utilizan el 0 y el 1 como dígitos binarios. De ahí la expresión clásica de unidad b i t (binary digit).

El tamaño o longitud de palabra se mide en bits. Según sea la marca del computador así será la longitud de palabra utilizada. Hay tamaños estandares de palabra.
./.

bra, pudiendo ser de 16 o 32 bits según el caso. En síntesis, la palabra puede ser un número, una instrucción o un conjunto de dígitos que ocupan una posición de memoria y son considerados como una unidad, incluyendo el signo correspondiente.

Existe una unidad múltiplo de bits denominada "bytes" equivalente a 8 bits. Así, una palabra puede ser de 2 o 4 bytes. La representación interna de los diferentes tipos de números o caracteres se especifica entonces en bytes.

Una instrucción en la computadora está expresada por dígitos teniendo cada uno de ellos una función específica. Cada instrucción puede tener el tamaño de una palabra o varias instrucciones estar contenidas dentro de una palabra. Los dígitos utilizados representarán, unos el tipo de operación que debe ejecutarse y otros la posición de la memoria donde se localizan los datos.

El uso del sistema binario de representación y la forma como las instrucciones son dadas internamente en la computadora, constituye lo que se conoce como "lenguaje de máquina". Es decir, la forma intrínseca con que la máquina maneja las instrucciones dadas y las operaciones matemáticas que debe ejecutar.

Toda computadora es capaz entonces de ejecutar tres funciones principales :

- a. Capacidad de Almacenamiento de instrucciones e información numérica.
- b. Capacidad de Decisión por comparación de valores o simplemente por afirmación o negación del postulado de prueba; decisión lógica.

./.

c. Capacidad de Ejecución de operaciones aritméticas.

En el primer caso, un conjunto de instrucciones prefijadas por el usuario y los datos o información a ser utilizada, son almacenados en la memoria, en su propio lenguaje de máquina (único que entiende la computadora). En la jerga de computación esto se conoce como condición de "programa almacenado".

Como se verá más adelante, el programa tiene que ser un conjunto de instrucciones secuenciales que la computadora debe ejecutar en el orden estricto en el cual le fueron introducidas por el usuario.

Entiéndese por usuario, la persona que a través de un programa escrito en un lenguaje de programación, introduce datos y hace trabajar la máquina con el propósito de obtener una solución a un problema dado. El usuario no necesariamente tiene que ser programador o saber de lenguajes de programación. Puede ser cualquier persona que manipula datos masivos o desea procesar información o efectuar operaciones repetitivas de un determinado problema. Es pues, cualquier persona que desea obtener una respuesta a un problema dado.

En este sentido puede hacerse obvio el papel de una computadora, como aquella máquina que opera a velocidades grandísimas datos masivos y proporciona respuestas inmediatas a problemas que de otra suerte, requerirían el consumo de muchas horas/hombre. Por otro lado, su construcción interna las hace infalibles en la realización de operaciones matemáticas. En otras palabras, si la computadora ha sido convenientemente programada, los resultados obtenidos sobre cualquier pro-
./.

ceso matemático, por complejo que sea, son exactos. Este hecho la hace fundamental en la toma de decisiones al eliminar las posibilidades de error, comunes en los procesos manuales.

En relación con su segunda función o sea su capacidad para ejecutar decisiones, la computadora puede realizar cualquier tipo de decisiones lógicas y automáticamente cambiar el sentido secuencial de ejecución de las instrucciones programadas. Esta peculiaridad - las diferencia de una simple condición de máquina calculadora, puesto que al poder efectuar comparaciones matemáticas o lógicas de "si" o "no", su versatilidad se magnifica, dándoles "razonamiento" de alterar un proceso o ejecución numérica si no se cumple con los postulados previamente definidos. Dicha característica las hace capaces de discernir (aunque rígidamente) entre varias posibilidades factibles, otorgándoles aparentemente poder de decisión o "inteligencia".

Su tercera función está representada por el hecho de poder realizar operaciones matemáticas numéricas y alfanuméricas (manejo de números y caracteres alfabéticos) a grandes velocidades solo limitadas por las dificultades de movimiento del fluido eléctrico. Así, puede ejecutar sumas, restas, multiplicaciones, divisiones, elevación a potencias o extracción de raíces o cualquier operación matemática compleja a velocidades de milésimas y millonésimas de segundo. Las operaciones complejas tales como diferenciación, integración, funciones trigonométricas, logaritmos, etc., las ejecuta por análisis numérico de suficiente aproximación que prácticamente no hace diferencia alguna con los valores obtenidos manualmente o por tablas. Así, la integración la ejecuta por suma continuada, la dife

./.

renciación por diferencias finitas, las raíces por procesos iterativos y las funciones trigonométricas por desarrollos en serie.

En síntesis, una computadora es hoy en día una herramienta básica para la toma de decisiones, cuyo campo de acción es cada vez más amplio y multifacético. Debidamente programadas, con ellas puede ejecutarse u obtenerse la solución a un infinito número y tipos de problemas.

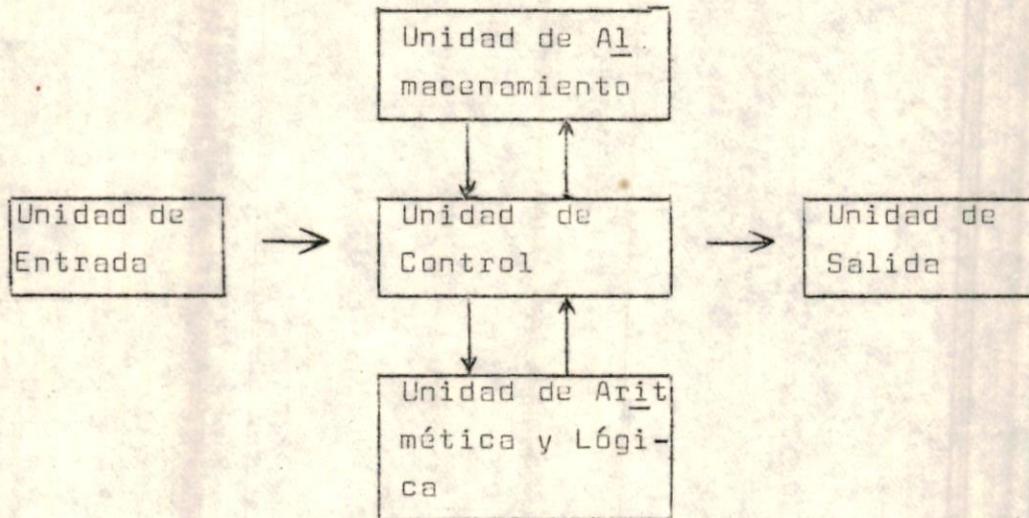
Todas las operaciones indicadas son ejecutadas sin la participación del usuario o el operador de la máquina, es decir son llevadas a cabo automáticamente. Por lo tanto, para que el éxito en el uso de las computadoras pueda ser realidad y los resultados obtenidos valederos, la máquina debe "ser programada eficientmente".

Como una cosa inanimada, la máquina "no piensa" ni "soluciona problemas" por si misma, sino solamente ejecuta ciegamente las instrucciones que le son dadas. De ahí el mote con que se les ha bautizado de "rápida pero estúpida".

En otras palabras, la computadora ejecutará cualquier operación que se le indique por ilógica, razonable o irrazonable que sea. Igualmente dará resultados ilógicos y sin sentido, si así recibe las instrucciones pre-programadas. Hay un dicho muy conocido en el ambiente de las computadoras: "Basura entra, basura sale", queriendo con esto expresar que si las instrucciones o programación no son apropiadamente establecidas, los resultados consecuentemente serán ilógicos, falsos y sin ningún valor.

8.2.2 Integración de una computadora

Independientemente de su tamaño, marca o clasificación, todas las computadoras están integradas de fases o grupos de componentes con funciones bien definidas, tal como se muestra en el esquema de la figura



- a. Dispositivos de entrada. A través de esta unidad, el usuario puede introducir toda aquella información que requiera en la solución de su problema. Es también el medio de comunicación entre el hombre y la máquina, y la forma de introducir números, letras o caracteres para su uso en el proceso a realizar. El medio y forma más común de introducir información a la computadora es a través de : tarjetas perforadas (lectora de tarjetas), cinta de papel (lectora de cinta de papel), cinta magnética (Unidad de cinta) o en forma directa utilizando el teclado de letras, números y caracteres que se manejan a través de la pantalla de rayos catódicos (terminales CRT).

En un sistema de computación, un cerebro central - puede estar conectado a varios dispositivos o unidades de entrada a la vez, siendo por lo común las terminales de pantalla las más numerosas. Mientras mayor es la capacidad de una máquina, más posibilidad de conexión de varios dispositivos simultáneos puede existir.

- b. Unidad de salida. Esta unidad es aquella a través - de la cual se obtienen los resultados deseados. Puede ser a través de la misma unidad de cinta magnética (grabación), por intermedio de perforador de tarjetas o cintas de papel (caso inverso de la unidad de entrada), en forma directa a través de la - pantalla terminal o por medio de un ploteador de gráficos y el impresor de línea o máquina de escribir. En una u otra forma se obtendrá una réplica - escrita, vista o grabada de los resultados.

- c. Unidad de Almacenamiento. Llamada también Memoria, está compuesta de discos magnéticos individuales, - tambores de discos o cilindros y cintas magnéticas. Su función es la conservación inalterada de las instrucciones del programa almacenado y la información pertinente. Generalmente estos dispositivos funcionan a base de núcleos magnéticos o dispositivos electromagnéticos.

La memoria puede ser interna y externa o virtual. La primera es dependiente del tipo o modelo de la máquina y la segunda es independiente y expansible.

Según sea la forma de su constitución así se rá la versatilidad de acceso que posea, el cual puede ./. .

de ser secuencial o al azar en cualquier posición (at Random). Generalmente las unidades de disco o cilindros son de acceso al azar en cualquier posición (mayor velocidad), mientras que las unidades de cinta son de acceso secuencial (más lentas).

Todo archivo o instrucción tiene una posición o "dirección" dada, identificada unívocamente y la cual puede ser localizada de inmediato por el indicador o "pointer" interno de la máquina.

La velocidad de almacenamiento se mide en términos de tiempo de acceso a una dirección o archivo dado. El acceso puede ser ya sea para "leer" o para "escribir" información sobre el archivo almacenado.

No toda la capacidad nominal de una computadora está disponible para el usuario. Parte de esa misma se consume en el manejo de los lenguajes de programación, lenguajes de la máquina misma (Software del sistema) y el resto queda disponible como área de trabajo. Como se mencionó anteriormente, la capacidad se mide en palabras o miles de palabras, es decir K palabras.

- d. Unidad de aritmética y lógica. También llamada de procesamiento, es aquella parte de la máquina donde se llevan a cabo las operaciones aritméticas y las decisiones lógicas por comparación de valores positivos, negativos o cero. Luego de efectuadas las operaciones o decisiones, son transmitidas a otras unidades de la máquina. Posee un "acumulador" que le permite almacenar la información temporalmente y realizar las operaciones algebraicas y las de deci-
./.

sión.

- e. Unidad de control. Esta unidad es la rectora o directora de las operaciones, manteniendo la secuencia de ejecución de las mismas. Interpreta las instrucciones codificadas e inicia la realización de las operaciones manteniendo el control operativo de todas las unidades de la máquina. Mantiene un registro de instrucciones de los diferentes programas en proceso y los ejecuta por turnos a velocidades tales, que el usuario siempre tiene la sensación de ser el único en contacto con la máquina.

El conjunto de dispositivos físicos que dan cuerpo a las diferentes unidades descritas, forma lo que se conoce como el Sistema de Computación. Cada componente y la combinación de ellos para integrar un sistema dado se denominan con la palabra inglesa de "Hardware". En otras palabras el Hardware o composición del sistema es un patrón de comparación entre las diferentes marcas y fabricantes y en cierto modo da una indicación de la versatilidad de proceso del sistema.

8.2.3 Operación de una computadora

Conviene señalar algunos aspectos relativos a la operación misma de una computadora, es decir, a la forma cómo ella trabaja y establece el canal de comunicación con los usuarios.

En este sentido la computadora puede definirse como una máquina de multiprogramación, de tiempo compartido y funcionamiento en modo de lote (Batch). A las operaciones ya descritas puede agregarse la de te-

./.

leproceso, o capacidad de uso de una computadora cuyo cuerpo principal se encuentra distante del usuario (algunas veces a cientos o miles de kilómetros).

La forma de operación de una máquina está en función con su tamaño y versatilidad. En las épocas actuales, por pequeña, mini o micro que sea una computadora, siempre existe la posibilidad de trabajo de varios usuarios a la vez.

Se dice que un proceso de computación se efectúa a modo de lote, cuando las tareas se ejecutan secuencialmente o sea por control de fila de espera dentro de la computadora misma. En este estilo, el operador no participa de la selección o forma de ejecución, pues la transferencia de una a otra tarea es automática. Es decir, varios programas pueden estar en línea de espera para su ejecución. La máquina continúa con el siguiente en línea al finalizar el turno correspondiente del anterior.

No todas las unidades tienen la misma velocidad de respuesta o tiempo de operación. Así la unidad central de procesamiento CPU o cerebro de la máquina, donde se ejecutan las operaciones matemáticas y se mantiene control del sistema, es muy rápido para realizar una tarea. Luego de ello queda a espera de la próxima, perdiendo tiempo que puede utilizarse en otro proceso.

Tal condición permite operar en lo que se denomina "multiprogramación", es decir el hecho de poder realizar varias tareas "simultáneamente" para diferentes usuarios, lo cual aumenta la eficiencia de la computadora.

La unidad de control, mantiene la secuencia de órdenes para la operación de los diversos elementos o terminales de la máquina, los cuales son de hecho más lentos en su respuesta. Ello hace que el usuario tenga la sensación de trabajo exclusivo, pero en realidad, todo es cuestión de velocidades de proceso entre el CPU y las unidades de la máquina. Esta forma de operar es lo que aumenta la eficiencia y versatilidad de una computadora.

El sistema de multiprogramación permite la conexión de varias terminales a la vez (inclusive remotas) y sus correspondientes usuarios. Lo que da lugar a que cada uno de ellos comparta el tiempo de trabajo del CPU. Esto es lo que se llama sistemas de tiempo compartido, y lo cual hace sumamente útiles y multifacéticas a estas máquinas que dan servicio "simultáneo" a todos los usuarios.

Las terminales de rayos catódicos y teclado (CRT) permiten un canal directo de comunicación entre el usuario y la máquina. Así se establece el sistema "conversacional" pues casi a cada operación del usuario existe una respuesta inmediata de la computadora, que puede visualizarse por la pantalla o hacerse escribir en el impresor de línea o máquina de escribir.

Tal situación permite llegar al máximo de versatilidad, pues a través de este procedimiento, el usuario puede introducir y hacer correcciones a sus programas, los puede compilar o hacerlos operativos y a su vez puede tener acceso a cualquier archivo o unidad de la computadora. Puede ordenar que sus programas se ejecuten y que los resultados a su vez pasen a integrar nuevos archivos, a ampliar otros ya existentes.
./.

tes o bien a sustituirlos parcial o totalmente.

Conviene aquí señalar la existencia de lo que se conoce como terminales inteligentes. Son aquellas que tienen cierta capacidad de memoria que les permite trabajar fuera de línea o aisladamente. Algunas tienen además lenguajes incorporados, pasando a ser pequeñas computadoras dentro del mismo sistema de computación. Son muy útiles para introducir datos fuera de línea y en su momento apropiado conectarse con el CPU para realizar las operaciones formales de un programa dado. De esta manera ejecutan una operación auxiliar sin hacer uso de memoria del cerebro principal o sea, sin restar la capacidad.

8.2.4 Sistemas de computación

Entiéndese como tal la configuración del conjunto de elementos principales y periféricos que integran una computadora. Según sea su tamaño así será la configuración del sistema y según su capacidad disponible, el número y variedad de periféricos que pueden conectarse a la unidad central de procesamiento CPU.

Al conjunto de equipos se le denomina Hardware y a su configuración o forma de interconexión, Sistema.

Los componentes de un sistema pueden ser entre otros :

- a. Cerebro principal CPU de capacidad definida en K palabras.
- b. Periféricos de entrada
 - lectora de tarjetas
 - lectora de cinta de papel
 - lectora de cinta magnética

./.

- terminales de pantalla CRT.
- c. Periféricos de salida
 - máquina de escribir
 - perforadora de tarjetas
 - perforadora de cinta de papel
 - unidad de cinta magnética
 - impresor de línea de alta velocidad.
- d. Periféricos de memoria auxiliar
 - discos magnéticos
 - discos flexibles o diskettes
 - cilindros de discos
 - unidades de cinta
 - unidades de cassette
- e. Periféricos especiales
 - graficador o ploteador de gráficas
 - Integradores gráficos
 - otros.

La capacidad de una computadora se mide en palabras, miles de palabras o K palabras y la capacidad de las unidades de almacenamiento en bytes o megabytes - (10^6 bytes).

Todo sistema posee capacidad operativa de dos tipos de lenguajes, los que sirven de comunicación entre el usuario y la máquina (lenguajes de programación) y los que el fabricante ha preparado especialmente para el manejo del sistema. Con estos últimos la máquina recibe su potencialidad de operación y la versatilidad de operación o amplitud multifacética de su aplicación.

Al conjunto de lenguajes y programas específicos propios de la máquina se les denomina "Software", siendo de hecho uno de los patrones que permite conocer -

qué tan eficiente o versátil puede ser un sistema dado. Cada fabricante ofrece su producto con su propio software. Es decir, el software de un sistema difiere de otro de marca diferente y es la peculiaridad que le permite competir, ofreciendo una máquina de mejores características y potencialidad.

A diferencia del software que es particular de cada fabricante de computadoras, los lenguajes de programación con que el usuario se comunica con la máquina, tienen entre sí una base común que los hace adaptables a cualquier sistema, independientemente de la marca o modelo de computadora.

Aquí sin embargo, también los fabricantes introducen avances o mejoras propias de su sistema, para aumentar su potencialidad operativa de los lenguajes de programación. Estas innovaciones no son lógicamente aceptadas por otra computadora de marca diferente. El objetivo de ellas es ampliar el campo de acción y facilitar el lenguaje o reducirle tiempo de corrida a los programas. Es decir, un programa que utilice subrutinas del sistema solo puede correrse con éxito en la máquina para la cual fue escrito.

8.3 ELEMENTOS DE PROGRAMACION

8.3.1 Enfoque y solución de problemas

Debe quedar claro, que las ventajas de las computadoras estriban en su velocidad de trabajo y capacidad para manejar grandes volúmenes de información, efectuando operaciones repetitivas en tiempos medibles en milésimas de segundo.

Por lo tanto, las computadoras son de utilidad como herramientas para realizar "producción", en el proceso de información, efectuando a la vez operaciones matemáticas complejas con toda la gama de alternativas posibles.

Las computadoras, son entonces, el medio para realizar trabajos que eficientemente se obtienen en corto plazo y los cuales, de hacerse en forma manual, consumirían muchas horas o meses/hombre.

Cualquier persona involucrada con el manejo de información o toma de decisiones puede hacer uso de una computadora, siendo solamente necesario que se auxilie de un buen programador y un operador del sistema.

En resumen, la solución continuada de un problema utilizando computadoras presenta dos facetas: a) fase de programación o preparación de las instrucciones que habrá de cumplir ciegamente la computadora, b) fase de producción, por medio de la cual se obtienen los resultados finales de un proceso matemático.

8.3.2 Secuencia lógica de un proceso

La solución de un problema para ser efectiva de-
./.

be seguir una secuencia definida y orientada de ejecución, pasando obligadamente por varios pasos. La clave del éxito estriba en el correcto cumplimiento de los mismos.

Los pasos a seguir pueden resumirse así :

a. Conocimiento y planteamiento del problema

Para poder resolver un problema debe previamente conocerse, estar conciente de todas las alternativas posibles y de las complejidades que pueden presentarse. Es decir, deben como primer paso, establecerse los postulados que definan claramente el problema.

Ello abarcará la preparación de esquemas, dibujos, diagramas, etc. y la información básica requerida, así como un bosquejo de la forma de presentación deseada para los resultados.

Por igual, el rango de precisión aceptable y las especificaciones o restricciones que deben cumplirse.

b. Análisis de la solución matemática

Debe hacerse el análisis matemático completo, la formulación de las ecuaciones y su forma de solución por medio de la computadora.

Debe quedar definida toda la lógica matemática que se necesita en el proceso y sus posibles puntos de control.

c. Planificación y programación del proceso

Se planificará toda la lógica por medio de esquemas o diagramas de flujo del proceso a realizar, incluyendo la introducción del análisis matemático

co adoptado. Se identificarán los datos de entrada y la forma de salida, la creación de archivos o ampliación de archivos existentes, etc.

d. Codificación en lenguaje de programación

Según sea el tipo de problema y el lenguaje utilizado, así será la codificación o escritura en lenguaje comprensible para el usuario, de las instrucciones que la máquina deberá ejecutar. A esta etapa se le llama algunas veces y equivocadamente, programación, siendo de hecho una escritura del código o lenguaje adoptado.

e. Compilación del programa

Los lenguajes de programación son instrucciones pre-establecidas y que deben cumplir con normas fijas. Son por lo tanto, la mayor fuente de error humano en la etapa de preparación. Luego de finalizadas deben ser introducidas a la máquina y aceptadas por ésta; a este paso se le llama compilación.

Todas las computadoras están provistas de un programa "Ensamblador", el cual traduce el lenguaje simbólico del usuario a lenguaje de máquina comprensible por la computadora. Igualmente existe un programa "compilador" que examina y hace compatibles las instrucciones correctas a la máquina para la solución del problema. En esta fase, el programa no es aceptado por la máquina, ni se hace operativo, hasta tanto no cumpla completamente con las normas y reglas del lenguaje. Cada lenguaje tiene su propio programa compilador. Cabe indicar aquí, que la compilación únicamente corrige sintaxis y errores de codificación, pu -
./.

diendo aceptar y poner operativo un programa con errores de lógica y consecuentemente no correcto para su aplicación. Los errores de lógica son sólo detectables y corregibles por el programador o usuario.

f. Documentación del programa

No siempre el autor es el único usuario de un programa; mas bien, un buen programa debe ser de utilidad a cualquier usuario que desee o necesite resolver el mismo problema con diferentes datos. Por lo tanto, luego de finalizada la compilación y prueba del programa (conviene siempre hacer una prueba manual de comparación de resultados, para garantizar la operatividad del programa), el programador debe escribir dos tipos de manuales que identifiquen y expliquen el programa :

- Manual de usuario; en el cual se dan todas las reglas de uso del programa, sus limitaciones, los métodos y soluciones aplicadas, las suposiciones e hipótesis adoptadas, etc. Así mismo, la forma de introducción de los datos y una réplica de los datos de salida. Se acostumbra complementarlo con los diagramas de flujo e identificación de las variables utilizadas.
- Manual del programador; contiene además de lo anterior las especificaciones sobre los puntos claves que pueden ser modificables, la lista de variables completa y la explicación sobre la configuración del programa.

Ambos manuales deben formar parte de la biblioteca de programas de un centro de cómputo.

./.

9. Producción

Es ésta la última etapa y puede decirse la fase de aplicación en la solución del problema. Es también una fase que puede servir de retroalimentación para mejorar el programa y hacerlo más amplio en su campo de acción.

8.3.3 Lenguajes de Programación

Hoy en día son múltiples y desde sencillos hasta complejos los lenguajes de programación inventados para el manejo de computadoras. Los orientados con propósitos científicos son el BASIC (Beginners All Purpose Symbolic Code), el FORTRAN (Fórmula Translation) y el ALGOL (Algorithmic language).

Todos ellos han ido sufriendo mejoras y avances conforme su aplicación y de ahí surgen el BASIC I, II, o FORTRAN II, IV, V, etc. Siendo estos últimos, versiones semejantes en su estructura pero diferentes por las nuevas modalidades de codificación introducidas.

Denomínase "Programa Fuente" al programa original escrito en lenguaje de usuario e intellegible fácilmente. A su vez se llama "Programa Objeto" al mismo programa ya compilado y traducido a lenguaje de máquina, listo para su aplicación.

También existen programas de uso comercial como el COBOL (Common Business Oriented Language), el RPG y otros de avanzada más específica en el campo científico como el PLI, II y el PASCAL, etc. Sin embargo para el científico y en este caso el hidrólogo, dos son los lenguajes aplicables a su campo y más utilizables, el BASIC y el FORTRAN, quedando su uso a elección de

la persona según su formación y preferencia. El Fortran es más complejo que el Basic, pero de más campo y velocidad de aplicación. Esta afirmación no es ya del todo estricta, pues las últimas versiones en ambos lenguajes son tan complejas y aplicables indistintamente, que solo queda su elección según la máquina de que se disponga.

8.4 APLICACION DE LAS TECNICAS DE COMPUTACION

8.4.1 Procesamiento de datos

La Hidrología, Meteorología, Estadística, Demografía, Econometría, etc., son ciencias que se caracterizan por la gran cantidad de datos que manejan. Estos datos son inicialmente recopilados en el campo o fuente de origen y posteriormente sujetos a un proceso de selección, ordenamiento, análisis, depuración, cuantificación almacenamiento, etc., previamente a ser puestos a disposición de los usuarios.

Antiguamente las operaciones que en su conjunto se denominan procesamiento de datos, se efectuaban manualmente con utilización de calculadoras de escritorio. El manejo de datos masivos requería técnicas simplificadas y su cálculo era de por sí tedioso y consumía mucho tiempo y mano de obra. Después de la segunda guerra mundial se tiene el advenimiento de las computadoras, cuyo crecimiento y avance han sido tales que ya actualmente puede decirse que el hombre se encuentra a las puertas de su futura automatización. Este hecho trajo como consecuencia un avance acelerado en la investigación científica y tecnológica, pues las computadoras permitieron una sofisticación y complejidad de cálculo en menos tiempo y con mayor precisión. Hoy en día no se concibe el tratamiento de información o procesamiento de datos sin el uso de computadoras, pues a la par de aumentar velocidad y precisión de cálculos, dan lugar al almacenamiento de grandes volúmenes de datos en espacios tan reducidos como un disco o cinta magnéticos. En igual forma permiten el acceso casi instantáneo a cualquier información básica contenida en ellas, lo que las hace ser imprescindibles en

cualquier oficina encargada del manejo de información.

A las primeras etapas de transformación de un dato crudo a forma utilizable por el usuario, se denomina "procesamiento primario". El procesamiento primario es entonces, aquél que dá lugar a la presentación de la información básica en forma fácilmente comprensible, simple, clara y accesible al usuario para su utilización en estudios posteriores.

Algunas veces el procesamiento se hace tan específico y especializado, como en el caso de datos meteorológicos e hidrológicos, que existen computadoras de diseño especial destinadas en exclusiva a esta clase de operaciones.

8.4.2 Aplicaciones en Hidrología

Prácticamente son múltiples y variados los usos que se hacen de las técnicas de computación en el campo de la Hidrología. La solución a los problemas tiene un doble aspecto :

- a) Cuáles son las técnicas más utilizables, y
- b) Qué tipo y tamaño de computador se adapta mejor a la solución de problemas.

No existen reglas de aplicación general, pero puede decirse que la mejor solución, es aquella que permite contar económicamente con un computador inicialmente de suficiente capacidad para el presente uso y de características expandibles, adaptables a los adelantos tecnológicos y al incremento de las necesidades del procesamiento.

Una de las aplicaciones más comunes de la computación es el procesamiento primario de información, descrito en párrafos anteriores.

Estando la información disponible en forma de datos básicos, puede utilizarse por cualquier persona en la realización de estudios de cualquier índole, llamándose entonces procesamiento secundario o dato elaborado.

Tanto en el procesamiento primario como en el secundario existen tecnologías de aplicación general representadas por una cantidad enorme de programas y modelos de computación.

En cada tópico específico se han elaborado paquetes de programas o software, algunos de los cuales se proporcionan a los gobiernos libres de cargo. La Organización Meteorológica Mundial O.M.M., viene patrocinando el subprograma de Hidrología Operativa para fines múltiples, más comunmente conocido por las siglas H.O.M.S., uno de cuyos propósitos es difundir y poner en servicio de los gobiernos, las tecnologías de computación de los países más adelantados en los diversos campos de aplicación en Hidrología. Estos campos abarcan toda la gama de estudios tales como planificación y organización, diseño de redes, procesamiento primario y secundario de datos, modelos hidrológicos de simulación y predicción hidrológica, cálculos matemáticos y estadísticos, etc.

Como puede verse, la aplicación de las técnicas de computación están presentes en todas las fases de estudio y planificación de la Hidrología. De ahí su importancia y recomendación para aquellos Servicios Nacionales que no disponen de estas facilidades, para incorporarse en el menor tiempo posible a estas técnicas o ac-
./.

tividades de computación aplicables en Hidrología .

8.4.3 Bancos de Datos

El uso de las técnicas de computación vino a revolucionar el manejo de información. Antiguamente toda la información procesada era archivada manualmente y algunas veces publicada para servicio de los usuarios. A pesar de ello, el acceso libre a los datos siempre - presenta dificultades, máxime cuando se desea obtener el dato original. Las más de las veces la información se almacena en forma de datos de cálculo e interpretación de gráficas o bandas de aparatos registradores, - tarjetas perforadas o en el mejor de los casos en cintas magnéticas si es que se han utilizado computadoras. En todos los casos no existe una organización mas que de archivo de información.

Cuando se dispone de un computador, el procesamiento y manejo de información puede llevarse en forma organizada, eficiente y con el mínimo de espacio requerido, puesto que se utilizan los soportes magnéticos del sistema para almacenar la información.

La condición señalada permite la formulación de lo que se conoce como Banco de Datos, es decir una información organizada en forma homogénea, interrelacionable, estandarizada y que sigue patrones definidos de configuración.

El Banco de Datos debe ser la meta a seguir en cualquier oficina de servicio público. A su vez debe ser congruente con bancos de datos de tipo similar establecidos en otras organizaciones afines o en otros países.

Un banco de datos bien organizado y operado facilita el libre acceso a la información en forma rápida y efectiva. Esta información por su parte debe estar bien analizada, procesada y depurada, a fin de que el dato proporcionado sea confiable, realístico y actualizado a la última fecha posible.

La tecnología de Bancos de Datos es por demás de reciente creación y aún en proceso de formación. Por lo tanto, no pueden darse normas sobre cuál debe ser el tipo de organización adecuado a cada caso. Sin embargo, para que un banco de datos funcione como tal, debe ser actualizado, eficiente, rápidamente accesible y completo, es decir tener dentro de su configuración todas las áreas que se relacionan con el campo representado en dicho banco.

8.4.4 Aplicación de computadoras en estudios de aprovechamiento de recursos hídricos

La computadora es una herramienta poderosa en manos de un planificador, investigador o responsable del estudio de un aprovechamiento hídrico.

La ingeniería moderna la utiliza en todos sus campos, especialmente en el de recursos hidráulicos, para efectuar estudios alternativos, buscar soluciones más realistas, efectuar diseños más ajustados y efectivos, en el seguimiento de obras, en la producción, etc.

En ingeniería de recursos hidráulicos se utiliza en la simulación de sistemas hidráulicos, en cálculos complejos y sofisticados de hidráulica, en análisis del paso de crecidas a través de embalses, en la regulación y operación de embalses, en hidráulica fluvial y

en general en todas las etapas de planificación, diseño, construcción y operación de obras hidráulicas.

Gracias a las modernas computadoras pueden hacerse simulaciones y modelamiento matemático de los más variados y complejos sistemas hidráulicos. Así por ejemplo, puede hacerse el análisis o simulación de la forma más optimizada de aprovechar los recursos de una cuenca hidrográfica, considerando el sistema hidrográfico como un todo, en el cual, los aprovechamientos son influenciados entre sí. Pueden darse restricciones o condiciones, normas de operación de embalses, generación hidroeléctrica, control de avenidas, etc,etc.

En el diseño de embalses, pueden efectuarse simulaciones de comportamiento bajo las condiciones más críticas y desfavorables que pueden presentarse en el futuro, con base en la información histórica disponible.

En fin, pueden llevarse a cabo operaciones que requieren un alto grado de sofisticación, imposible de poderse obtener o realizar manualmente.

scfb.