

RO-465
(6838)

II CURSO LATINOAMERICANO DE DISEÑO DE
PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS - PCH



MANUAL DE DISEÑO DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS

VOLUMEN II EVALUACION DEL MEDIO FISICO

(VERSION PRELIMINAR)

Bucaramanga, Colombia
Octubre de 1985



BID



VOLUMEN II
EVALUACION DEL MEDIO FISICO

II

TEMAS	AUTOR
II-01. Evaluación del Medio Físico (Hidrología)	Ing. Juan Carcelén
II-02. Elementos de Geología, Geotécnia, Geomorfología y Ecología	Ing. Raúl Maruri
II-03. Aplicaciones de Cartografía y Topografía	Ing. Teodoro López
II-04. Recursos Hidráulicos	Ing. Lucien Monition

0.1. EVALUACION DEL MEDIO FISICO
(ELEMENTOS DE HIDROLOGIA)

JUAN CARCELEN

INDICE

1. ELEMENTOS DE HIDROLOGIA	
1.- Consideraciones Generales	
1.1. Introducción	
1.2. Concepto básico y terminología	
1.3. La Hidrología y los proyectos Hidroeléctricos	
1.4. La Hidrología aplicada al diseño de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas	
2. Procedimiento de análisis Hidrológico	
2.1. Generalidades	
2.2. Metodología de estudio	
2.2.1. Existencia de registros de caudales:	
Caso 1 — Existencia de registros de caudales en una región inmediata cercana al proyecto	
Caso 2 — Existencia de registros de caudales en una estación ubicada dentro de la misma cuenca de drenaje	
Caso 3 — Existencia de registros de caudales en una estación ubicada en una cuenca vecina a la estudiada	
2.2.2. Ausencia de registros de caudales en la región	
Caso 4 — Existencia de registros meteorológicos	
Caso 5 — Ausencia de registros meteorológicos	
2.3. Algunos aspectos sobre el problema de sedimentación	
2.4. Conclusiones y recomendaciones	
3.- Consideraciones Adicionales	
4.- Anexos	
Bibliografía	

EVALUACION DEL MEDIO FISICO

I. ELEMENTOS DE HIDROLOGIA

1. Consideraciones Generales

1.1. Introducción

El agua es uno de los elementos más importantes de la naturaleza no sólo por su aspecto cuantitativo (cerca de un millón y medio de kilómetros cúbicos) sino también por sus características cualitativas ya que interviene directamente en todos los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en nuestro planeta.

El agua se presenta en forma más o menos periódica dentro de los tres estados: Líquido, sólido y gaseoso. Este hecho significa quizás la cualidad más importante de este elemento, pues da lugar al proceso llamado ciclo hidrológico.

Se conoce como ciclo hidrológico al proceso de intercambio de los estados del agua en la naturaleza; y la ciencia que estudia las características de su formación, circulación y distribución en la superficie del globo terráqueo, es conocida como Hidrología.

Un alto porcentaje del agua que escurre hacia los océanos tiene su origen en la humedad acumulada en la atmósfera que se precipita a tierra en forma de lluvia o de nevadas. A su vez, gran parte de la humedad atmosférica, tiene su origen en la evaporación del agua de los océanos.

En el transcurso de un año, aproximadamente medio millón de kilómetros cúbicos de agua participa en este ciclo hidrológico.

Desde luego, no todo el volumen de agua evaporada que se encuentra en la atmósfera en forma de nubes, se precipita a la superficie del planeta que está ocupada por los continentes. Solamente un quinto de él, aproximadamente cien mil kilómetros cúbicos por año, caen a tierra firme en forma de lluvia o nieve. El resto se reincorpora directamente a los océanos.

En tierra firme, el agua producto de la precipitación atmosférica debe someterse también a los efectos de este ciclo y más del sesenta por ciento de su volumen es reincorporado a la atmósfera por evaporación, quedando menos de 40.000 kilómetros cúbicos de agua que fluye anualmente hacia los océanos por los ríos.

El proceso de escurrimiento está íntimamente ligado a las condiciones orográficas de tierra firme y tiene carácter de interdependencia ya que a su vez, estas condiciones se ven modificadas paulatinamente por efecto del escurrimiento.

Además, intervienen en este proceso factores colaterales como el clima, la latitud geográfica de la región, la cercanía al mar, la presencia de accidentes geográficos de importancia, tipos de vegetación predominantes, etc.

1.2. Conceptos básicos y terminología empleada

Para la explicación, análisis y utilización de la materia tratada en este tema, es necesario hacer un recuento de los principales conceptos inherentes a la Hidrología.

a. **Hidrología.**- El concepto más amplio de este término lo califica como la ciencia que estudia la formación, circulación y distribución del agua sobre la superficie terrestre, su interacción con el medio físico y con las diversas actividades humanas.

b. **Ciclo Hidrológico.**- El proceso periódico de cambios de estado por el que atraviesa el agua, desde la evaporación en el océano hasta su reincorporación a él por medio de los ríos.

c. **Cuenca Hidrológica.**- Formación orográfica determinada por un conjunto de pendientes convergentes en última instancia en un punto que generalmente es la desembocadura de un río en el mar.

d. **Red Hidrográfica.**- El conjunto de cauces convergentes dentro de una cuenca hidrográfica. El cauce principal es el centro de convergencia y termina usualmente en el punto de desembocadura en el océano.

e. **Area de Drenaje Superficial.**- Es la superficie de la cuenca hidrográfica. Si se refiere específicamente a un punto cualquiera dentro de la red hidrográfica, el área de drenaje significa la superficie máxima de aportación hídrica hasta ese punto. En otras palabras es la superficie que determina la máxima capacidad de escurrimiento superficial hacia un punto, de cualquier precipitación.

f. **Precipitación.**- El agua que cae de la atmósfera a la superficie de la tierra.

g. **Caudal.**- Volumen de agua que escurre por una sección hidráulica (cauce del río, canal, túnel, etc.) durante una unidad de tiempo.

h. **Período de retorno.**- Tiempo, en años, en el que se estima que un fenómeno hidrológico (precipitación, caudal, etc.) puede repetirse por lo menos en una determinada magnitud. Es igual a la inversa de la probabilidad de ocurrencia de ese fenómeno con esa magnitud.

i. **Aforo.**- Método puntual para cuantificar la magnitud del caudal en una sección de un cauce.

j. **Crecida.**- Caudales mayores extraordinarios que fluyen por una sección de un cauce.

1.3. La Hidrología y los Proyectos Hidroeléctricos

Un aprovechamiento hidroeléctrico menor, en general está conformado por obras de captación, conducción, generación y transmisión de energía.

El estudio de un proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico debe necesariamente abarcar tres aspectos principales:

- Ingeniería básica
- Evaluación económico-financiera
- Soluciones y diseño de obras

El primer punto significa el conocimiento detallado de los aspectos físicos que determinan la factibilidad técnica del aprovechamiento.

El segundo, tiene por objeto una evaluación del mercado eléctrico, los costos de producción y transmisión, el estudio de alternativas, las disponibilidades de financiamiento y la selección del esquema económicamente óptimo. En este análisis se deben tratar aspectos de orden social y ecológicos.

En el último punto es la aplicación de la técnica para la solución de los problemas encontrados, el diseño de las obras civiles y selección de los equipos de generación y transmisión necesarios para el proyecto a ejecutarse.

El tema global a desarrollarse en este curso, —Evaluación del medio físico, se refiere al conocimiento de las condiciones naturales del medio en el que se analizará un aprovechamiento hidroeléctrico. Esto es:

- Aspectos geológicos y geotécnicos, y
- Aspectos hidrológicos

Para complementar el marco de análisis de las condiciones físicas, faltaría el conocimiento de las características topográficas, aspecto que tiene naturaleza específica en cada proyecto y que es analizado en otro tema de este curso.

La factibilidad técnica de un proyecto hidroeléctrico fundamentalmente se basa en las disponibilidades hídricas del mismo.

Es por eso que la evaluación de los recursos hidrológicos debe estar revestida de la mayor importancia, independientemente de la magnitud del posible aprovechamiento.

La Hidrología es una ciencia que a diferencia de otras, necesita para su aplicación de una infraestructura compleja de información.

En los últimos años, las técnicas de procesamiento de datos se han perfeccionado y con la ayuda de los instrumentos electrónicos, los laboriosos cálculos estadísticos son posibles de ejecutarlos con un mínimo esfuerzo humano.

Lamentablemente, no siempre es posible hacer uso de todo el potencial técnico que en los actuales momentos se dispone pues, y sobre todo en muchos de nuestros países, la materia prima que consiste en la información estadística de los fenómenos hidrológicos adolece de deficiencias tanto cualitativas como cuantitativas.

La Hidrología aplicada a proyectos hidroeléctricos gira al rededor de un axioma: mientras más y mejores datos sean disponibles, mayor confiabilidad tendrán los resultados de su análisis.

1.4 La Hidrología aplicada al diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas

Al hablar de pequeñas centrales hidroeléctricas y bajo la clasificación adoptada por OLADE:

- microcentrales, hasta 50 Kw
- minicentrales, hasta 500 Kw
- pequeñas centrales, hasta 5.000 Kw,

debemos relacionar las cifras que determinan esta clasificación con el producto de dos factores básicos en el concepto de energía: la caída y el caudal, expresados en metros y en metros cúbicos por segundo respectivamente.

Los valores de este producto en cada caso no dependen exclusivamente del caudal de diseño, sino también de la caída bruta.

Ahora bien, cabe aquí la interrogante sobre los rangos de valores que puedan alcanzar cada uno de los componentes de este producto en cada caso.

En los últimos tiempos se ha desarrollado la técnica de la fabricación de microcentrales hidroeléctricas de mucha simplicidad, que, con relativa buena eficiencia, permiten el aprovechamiento hidroeléctrico de pequeñas caídas que van desde menos de 3 metros en adelante.

Sin embargo, parece razonable pensar que dentro del concepto de microcentrales, no son admisibles caídas superiores a los 50 metros.

De esta manera, en forma tentativa, para este grupo de hasta 50 Kw de potencia estaríamos tratando de caudales comprendidos entre 50 l/seg. hasta 3 m³/seg.

Para las minicentrales, considerando que las máquinas anteriormente mencionadas alcanzan potencias cercanas a los 1.000 Kw y que la utilización de caídas superiores a los 100 m son poco probables, el rango de caudales estaría entre 100 l/seg. hasta 30 y 40 m³/seg.

Siguiendo un razonamiento similar, para las pequeñas centrales (potencia hasta 5000 Kw.) el rango de valores de caudales de diseño estaría comprendido entre 0.5 m³/seg. y alrededor de 60 m³/seg.

Esta hipótesis permite demostrar el hecho de que el valor del caudal disponible no necesariamente determina el tipo de central hidroeléctrica según la clasificación adoptada.

Otro es el aspecto fundamental de la Hidrología y que a su vez es general para todo tipo de aprovechamiento hidroeléctrico. Se trata en definitiva de dar respuesta a dos interrogantes:

1. Cuál es el caudal garantizado que dispone para una aprovechamiento, y
2. Cuál es el valor del caudal máximo para el que se tiene que prever obras de defensa.

En más de un caso, y tratándose especialmente de mini y microcentrales hidroeléctricas, la primera pregunta puede tomar sentido inverso, o sea conocer la garantía que ofrece un caudal que de antemano significa el caudal de diseño con el que funcionará una determinada planta.

Esta situación se produce en el caso en que es necesario instalar una capacidad previamente definida, en función exclusiva de una baja demanda, generalmente en zonas rurales de difícil acceso que sin embargo ofrecen un potencial hidráulico superior al demandado, excluyendo de hecho la posibilidad de integrarlo a un sistema energético regional. Es este un caso de subutilización del potencial hidroeléctrico que tiene carácter temporal y por ende se manifiesta como situación excepcional.

Siendo cierto que se debe siempre propender a la máxima utilización del recurso hidráulico y retomando el sentido propio de la primera interrogante se debe seleccionar el valor de la garantía que debe tener el caudal de diseño.

Para la selección de la garantía entran en juego factores relacionados con la capacidad del aprovechamiento, el tipo de demanda energética que cubre, su interconexión o no a un sistema mayor, las posibilidades de regulación y las características propias de los elementos que conforman el proyecto.

Si es un proyecto aislado que cubre una demanda cualitativamente importante y que requiera de seguridad de funcionamiento, el valor de la garantía del caudal de diseño no debe ser menor que el 95 o/o.

Este valor puede disminuir considerablemente en los casos en que el aprovechamiento hidroeléctrico forma parte de un sistema energético interconectado que permita absorber la energía secundaria que puede generar en determinado momento, o cubrir su propia demanda con la energía de otras fuentes.

La determinación de la garantía del caudal de diseño, en todo caso merece de un análisis técnico-económico que considere por un lado el incremento del costo directo del proyecto (inversamente proporcional al valor de la garantía) y por otro, la incidencia económica en la cobertura de la demanda (costos de paralización de industrias, por ejemplo).

El segundo punto básico de un estudio hidrológico para proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas tienen relación directa con la seguridad de las obras.

En la determinación del caudal máximo para el que se deben diseñar las obras de protección, interviene el concepto de recurrencia o período de retorno de este fenómeno.

Aceptando la realidad de que la seguridad cuesta, la definición del valor de la crecida de diseño es un problema que se debería afrontar a través de un análisis técnico-económico.

En este análisis es posible relacionarlo a la clasificación adoptada en este curso en función de la capacidad de la central, pues como uno de los elementos evidentes está la necesidad de mayor seguridad a proyectos de mayor capacidad.

Sin embargo, este no es el único ni más importante elemento de juicio. Predominan muchas veces sobre la seguridad de las obras del proyecto, la protección de las infraestructuras y bienes aguas abajo de la obra protegida y la precautelación incluso de las vidas humanas que se encuentran supeditadas a la seguridad de las obras.

Por ejemplo, en el estudio de grandes presas, muchas veces se toma como caudal para diseño de las obras de evaluación y protección, el valor de la crecida que posee un período de retorno, en años, tendiente al infinito, o sea la máxima probable.

El análisis técnico-económico para la selección de la probabilidad o período de retorno del caudal de diseño de las obras de protección del proyecto hidroeléctrico, sin embargo no siempre es posible de realizarlo, por las consideraciones mencionadas que en ocasiones son incuantificables.

Por esta razón, usualmente se recomienda como caudal de diseño de las obras de protección y evacuación, el valor de la crecida que pueda ocurrir con los siguientes períodos de retorno según la capacidad de las centrales aquí estudiadas:

— microcentrales	20	—	50 años
— minicentrales	50	—	100 años
— pequeñas centrales	100	—	150 años

Esta recomendación debe asumírsela con carácter flexible, pues la decisión del valor del caudal de diseño para las obras mencionadas, está también relacionada a la selección del sitio de captación en el río y el tipo de obra de toma.

Otro aspecto hidrológico de importancia que tiene que ver con el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, es la determinación de la cantidad y tipos de sedimentos que acarrea el río aprovechando, con el fin de prever las obras de decantación, evacuación y protección.

2. PROCEDIMIENTOS DE ANALISIS HIDROLOGICO

2.1. Generalidades

¿Dónde es factible un aprovechamiento hidroeléctrico?

Las respuestas generales a esta interrogante son:

1. Donde existan recursos hídricos superficiales.
2. Donde existan condiciones físicas para su desarrollo y ejecución.
3. Donde se prevea la utilización de la energía que pueda generar.

De estos tres puntos se analizará, en el desarrollo de este tema, el relacionado con el recurso hídrico superficial.

La determinación de la cantidad de agua que dispone un río en un punto dado, está vinculado a las condiciones físicas de su cuenca de drenaje y a las condiciones meteorológicas imperantes en la región.

Cuando se dispone de una sección de control (Estación Hidrométrica), la información estadística que ésta proporciona, debe reflejar la conjugación de las condiciones señaladas, cuantificadas y registradas en los valores de caudales de agua que pasan por dicha sección.

En los casos en que se dispone exclusivamente de puntos de control de las condiciones meteorológicas (Estaciones Meteorológicas y/o Pluviométricas) dentro de la cuenca de drenaje y se conocen las características físicas de esta, es posible la evaluación de la cantidad de agua que puede pasar por una sección determinada de un río, interpretando la correlación de estas condiciones.

La mayor certeza en la cuantificación del recurso hídrico de una sección de un río, se presenta cuando se dispone tanto de secciones hidráulicas de control, como de puntos con registros meteorológicos y conocimiento de las características físicas de la cuenca de drenaje.

No siempre es posible disponer de esta información conjuntamente, y en muchos casos, es necesario evaluar el recurso hídrico en un punto de un río careciendo del conocimiento de una o todas estas condiciones.

La técnica de la Hidrología ha desarrollado métodos para la evaluación de los recursos hídricos bajo cualquiera de las situaciones planteadas.

Para el estudio de centrales hidroeléctricas, es necesario buscar la solución a dos aspectos básicos:

- El caudal de diseño para generación
- El caudal de diseño de las obras de protección y evacuación de crecidas.

Cualitativamente, estos dos aspectos tienen igual valor y deben ser afrontados con la misma profundidad, independientemente de la capacidad de la central a diseñarse.

La clasificación de las centrales hidroeléctricas adoptada en función de la potencia, sólo permitiría hacer una diferenciación aproximada de orden cuantitativo en relación a los estudios hidrológicos que ellas requieren.

En efecto, por lo general la capacidad instalable en una central es función directa del valor del caudal disponible en ese sitio, y a su vez, el caudal depende del tamaño de la cuenca de drenaje.

Los estudios hidrológicos deben analizar los fenómenos meteorológicos y las características físicas de toda la cuenca de drenaje y la magnitud de estos; obviamente es mayor mientras más grande sea dicha cuenca.

Para microcentrales, de capacidades hasta 50 Kw, usualmente se analizan caudales menores a 2 m³/seg. cuyas cuencas de drenaje no superan por lo general los 100 km².

En el caso de mini y pequeñas centrales, los caudales estudiados tienen mayores rangos y concomitantemente, el tamaño de las cuencas de aportación son superiores, debiendo su análisis comprender mayor magnitud.

Pero la menor o mayor complejidad que requiere un estudio hidrológico, no solamente depende del tamaño de la cuenca de drenaje, sino también de la cantidad y tipo de información hidrometeorológica con que ella cuenta.

Se presentan los siguientes casos respecto a la disponibilidad de información:

1. El proyecto cuenta con registros de caudales en una estación hidrométrica cercana a la zona de captación.
2. El proyecto no dispone de registros de caudales, pero en su cuenca de drenaje, están distribuidas estaciones pluviométricas.
3. El proyecto se encuentra en una zona que no dispone de ningún tipo de registros hidrometeorológicos.

A continuación se pretende dar una Metodología general de aplicación para cada caso.

2.2. Metodología de estudio

Cualquiera que sea el tipo y capacidad del aprovechamiento hidroeléctrico a estudiarse, el primer paso del análisis hidrológico del mismo significa la recopilación de toda la información disponible, que deberá consistir en lo siguiente:

1. Cartografía que abarque por lo menos la totalidad de la superficie de la cuenca de aportación, si es posible con la topografía dibujada en estos planos. Generalmente la escala utilizada de esta información está entre 1:25.000 a 1:1.100.000.
2. Fotografías aéreas de la región, que permitan una fotointerpretación de las condiciones físicas de la cuenca de drenaje.
3. Registros hidrometeorológicos de todas las estaciones en el interior y cercanas a la cuenca de drenaje. Comprende también la recopilación de aforos en las secciones de control.
4. Si existen obras hidráulicas dentro de la cuenca en que se ubica el aprovechamiento hidroeléctrico, será necesario contar con las referencias técnicas de las mismas. Para el caso de existencia de otro aprovechamiento hidroeléctrico, aguas arriba o aguas abajo del proyectado, es importante disponer del registro diario de generación para calcular los caudales utilizados. De igual manera, si dentro de la cuenca existe un embalse, el conocimiento de su funcionamiento hidráulico y sus registros es de fundamental importancia.

Cada estudio hidrológico que se realiza tiene sus propias características y limitaciones de la calidad y tipos de la información disponible.

2.2.1. CASO 1. Existencia de registros de caudales en una estación inmediatamente cercana al proyecto.

Este es el caso más ventajoso para un análisis hidrológico de un aprovechamiento hidroeléctrico. Sin embargo no siempre esto significa un sinónimo de sencillez de los estudios, a menos que los registros disponibles hayan sido revisados y comprobados anteriormente.

La verificación de la bondad de los datos fluviométricos es un proceso complejo en el que se necesita identificar las posibles deficiencias cualitativas de los registros.

Hay dos tipos de errores que usualmente se presentan en la información hidrometeorológica:

- errores sistemáticos
- errores accidentales

Los primeros son los que tienen mayor peso específico en los resultados que de ellos se puedan obtener en un estudio hidrológico, pues generalmente tienen que ver con deficiencias ya sea en la calidad de los aparatos o en el sistema de medición, lo cual ocasiona una distorsión sistemática de los registros.

Los errores accidentales son de tipo humano principalmente, y por su carácter eventual son de poca significación en el producto final del procesamiento de datos. Además, muchas veces son fácilmente detectables por su evidente distorsión en una serie.

Existe otro tipo de error, menos usual pero mucho más peligroso y difícil de detectar, que consiste en la irresponsabilidad y negligencia del personal encargado de realizar las mediciones. Por eso, las estaciones provistas de equipo automático de me-

dición (pluviógrafo, limnógrafo, etc) tienen por lo general un índice de confiabilidad superior a más de que proporcionan mayor cantidad de información y en forma continua.

Es de fundamental importancia en el análisis de caudales, la verificación de la ecuación de transformación de lecturas de niveles a caudales, mediante el estudio de la curva de descarga y sus aforos.

Las campañas de aforos para una estación hidrométrica deben abarcar las épocas características de un año hidrológico y tienen que efectuarse periódicamente con el fin de detectar las variaciones que la ecuación de descarga pueda sufrir por motivos de cambios en la forma de la sección transversal de control.

Estas verificaciones deberían efectuarse por lo menos después de cada crecida extraordinaria, pues el efecto de ésta muchas veces es la causa de modificación del régimen hidráulico de la sección de control (velocidad, área de flujo, rugosidad, pendiente longitudinal, etc.).

Existen varios métodos matemáticos para determinar una ecuación de descarga, o sea la relación que tienen las lecturas de niveles de agua y el caudal en una sección hidráulica determinada, que generalmente utilizan la optimización de parámetros estadísticos principales de las respectivas series (por ejemplo, el uso de los mínimos cuadrados).

Sin embargo del gran apoyo que prestan al ingeniero los programas computacionales para la determinación de la ecuación que optimiza la relación altura-caudal dada por la serie de aforos, es aconsejable comenzar por la elaboración de gráficos, que permitan en forma clara seleccionar los puntos confiables y deshechar los que demuestran una evidente distorsión que puede ocurrir por errores de carácter accidental.

Definida de esta manera la ecuación de descarga, se deberá proceder a la transformación de los valores de lecturas de niveles de agua registrados a sus respectivos valores de caudales.

Usualmente en las estaciones equipadas con limnómetro se registran tres lecturas diarias y sólo en épocas de crecidas, se recomienda la anotación de mayor número de lecturas que incluya la máxima alcanzada.

Para la elaboración de una serie de caudales medios diarios, es importante tener en cuenta que el valor del caudal debe ser calculado con el promedio aritmético de las lecturas de ese día.

Obtenidos los caudales diarios, se debe elaborar las series de caudales mensuales y anuales, con los que es posible calcular el caudal promedio multianual. Este valor es de gran importancia en el control de la bondad de la información procesada.

De igual manera, para estaciones con períodos de registros relativamente cortos (menos de 15 años), es conveniente graficar la serie de caudales mensuales con el objeto de identificar los períodos hidrológicos, sus fases y duración. Esto permite además controlar la información correlacionándola con otros factores.

En caso de que las elaboraciones efectuadas y la investigación sobre la historia de la estación evidencian congruencia en la información y permitan la aceptación y confianza de los datos proporcionados, es posible concretar el análisis hidrológico al problema clave de definir los parámetros hidrológicos de diseño del proyecto hidroeléctrico estudiado.

Este proceso final significa la elaboración de:

1. Curva duración de los caudales medios diarios.
2. Análisis probabilístico de las crecidas máximas anuales.

El primer punto consiste en la contabilización de la recurrencia de valores de caudales dentro de determinados rangos, con el fin de calcular las frecuencias relativas y absolutas de los mismos.

El producto de esta elaboración es la curva de duración de caudales diarios en la que constan los valores de estos con su correspondiente índice de garantía.

Así por ejemplo: Q90 significa el valor que, de la serie de caudales diarios registrada fue igual a o superior al resto de valores en el 90 o/o de las veces.

Este porcentaje es el valor de la garantía hidrológica, concepto anteriormente tratado y que en el caso de las pequeñas centrales hidroeléctricas, está íntimamente relacionado al caudal de diseño de las obras de toma, conducción y generación.

El segundo punto de importancia en el análisis hidrológico para un proyecto hidroeléctrico, es la determinación del caudal máximo esperado con un período de recurrencia adoptado previamente para el diseño de las obras de evacuación y protección, tanto en la captación como en el desfogue de la casa de máquinas.

Para el caso presente de disponibilidad de registros hidrométricos junto al sitio de interés, y una vez verificada la bondad de los mismos, se debe proceder al análisis probabilístico de los valores máximos instantáneos anualmente registrados en la estación estudiada.

El diseño de las obras de protección y evacuación de crecidas se efectúa para los proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas para períodos de retorno no mayores de 150 años.

Un período superior a 10 años de registros, permite con aceptable confiabilidad, el proceso probabilístico con el cual se determina el valor de las crecidas consideradas para el diseño, hasta tiempos de retorno de 100 a 200 años.

Existen muchos procedimientos matemáticos para el tratamiento probabilístico de las estadísticas registradas.

El más conocido y aplicado, probablemente es el método de Gumbel.

Sin embargo, la experiencia en muchos proyectos de pequeñas y medianas centrales permite la recomendación de los métodos de Pearson en sus varias modalidades (normal, log-normal y tripamétrica).

Todos los métodos utilizados basan su aplicación en el tratamiento de parámetros estadísticos entre los que se mencionarán los siguientes:

- valor medio aritmético
- coeficiente de variación

- desviación standard
- coeficiente de flexión (Skewness)

A más de los métodos matemáticos de determinación de la curva probabilística de caudales, se recomienda la graficación de los valores tratados en función de su probabilidad relativa que cada uno posee dentro de la serie de registros analizada. Para el efecto, existen escalas aproximadamente logarítmicas, (llamadas probabilísticas) en las que la localización de los puntos es fácil y permite intuir la tendencia de su distribución, que sirve además de control de los resultados obtenidos por métodos matemáticos.

Determinada la seguridad que debe presentar la obra construída, seleccionando el tiempo de retorno y en base al resultado del proceso probabilístico descrito, se obtiene el valor de la crecida que servirá para diseñar las obras de protección, evacuación correspondientes.

CASO 2. Existencia de registros de caudales en una estación ubicada dentro de la misma cuenca de drenaje.

Es una situación que se presenta más usualmente que la anterior.

El procedimiento para la verificación de los datos, detección y corrección de errores y elaboración de las respectivas series de valores diarios, mensuales, anuales y multi-anuales, se debe cumplir de igual forma que para el caso anterior. Asimismo, deberán ser definidas las curvas de duración de caudales diarios y las probabilísticas de caudales máximos.

La información así preparada servirá de base para el proceso de transposición de valores desde el sitio de registros (Estación hidrométrica) hasta el sitio previsto para la obra de toma.

La transposición de caudales consiste en determinar parámetros de correlación que permitan asumir valores en un punto diferente al de la fuente de registros, ubicado dentro de la misma cuenca de drenaje.

Para ello es necesario el análisis de las condiciones físicas y meteorológicas que presenta la cuenca de drenaje.

Se debe proceder al análisis de las condiciones meteorológicas de las respectivas cuencas, en caso de que se disponga de información al respecto.

En este caso se recomienda el trazado de isohietas medias anuales que cubran la cuenca estudiada, con el objeto de determinar en el sitio de la estación y en la bocanilla la precipitación media ponderada.

Este procedimiento permite obtener el coeficiente de transposición de caudales mediante la expresión:

$$CT = A1 * PMP1/A2 * PMP2$$

donde:

A1 — Area de drenaje en el sitio de toma

- A2 — Área de drenaje en el sitio de la estación.
- PMP1 — Precipitación media ponderada de la cuenca de drenaje en el sitio de toma.
- PMP2 — Precipitación media ponderada de la cuenca de drenaje en el sitio de la estación.

Cuando no se disponga de información meteorológica en la región y la distancia entre el sitio de toma y la estación que proporciona los registros no es considerable, se puede asumir un valor igual de precipitación media ponderada para las dos cuencas de drenaje, simplificándose de esta manera el valor del coeficiente de transposición a la relación entre sus áreas.

Este coeficiente, permite determinar los valores de caudales medios diarios, mensuales, anuales y de crecidas extraordinarias en el sitio de interés, transponiendo inclusive los resultados de los procesos estadísticos y probabilísticos que se realicen con ellos, de acuerdo a la metodología citada en el punto anterior.

CASO 3. Existencia de registros de caudales en una cuenca vecina a la estudiada.

Para este caso, el procedimiento de análisis de la información disponible debe ser igual que en el caso 1.

La situación es más compleja que en el caso anterior, puesto que se trata de cuencas diferentes.

Por lo tanto, se deben analizar con mayor profundidad las condiciones físicas de cada una que permita dictar un diagnóstico sobre las posibilidades de utilización de la información disponible en base a la comparación de sus respectivas características.

Los coeficientes de correlación tienen mayor índice de confiabilidad cuando las cuencas comparadas tienen mayor similitud en sus características físicas e hidrológicas.

Para poder de cierta forma, clasificar a una cuenca hidrográfica con el fin de compararla con otra, se hace uso de relaciones físicas características, como por ejemplo las siguientes:

1. Factor de forma.

Es la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud de su cauce principal:

$$Ff = A/L ** 2.$$

La forma de una cuenca, influye directamente en el modo de escurrimiento. Este factor de comparación es importante sobre todo en el análisis de crecidas.

2. Factor de Compacidad.

Es también un índice comparativo relacionado con la forma de la cuenca de drenaje; su valor se puede calcular a través del coeficiente de Gravelius que se expresa como:

$$Fc = 0.28 * P/SQRT (A)$$

donde:

P es el perímetro de la cuenca y A el área de la misma.

Mientras más cercano a la unidad sea este coeficiente, más próximo a la forma circular tiene la cuenca.

3. Extensión superficial de la cuenca.

Es el más importante índice de comparación entre cuencas. Es el área circunscrita por el divortium aquarum de la cuenca que influye directamente en los resultados de cualquier fenómeno hidrológico que ocurra dentro de ella.

Con fines de comparación, en ciertos casos se utiliza también el concepto de extensión superficial media, que es la relación entre el área total de la cuenca y la doble longitud del cauce mayor:

$$b = A/2 * L.$$

4. Elevación media de la cuenca.

Entre los factores que modifican las características hidrológicas de una región se encuentra la altura sobre el nivel del mar.

Por lo menos, es importante el conocimiento de los valores límites en cuanto a cotas de la cuenca de drenaje.

Cuando se dispone de información topográfica, es recomendable determinar el valor medio ponderado de la elevación de la cuenca, en base a las superficies relativas de igual nivel con relación a la superficie total.

5. Pendiente media de la cuenca.

Muy ligado a la elevación, por cuanto se refiere al aspecto cinético del escurrimiento, está el concepto de pendiente media de la cuenca.

Cuando no se dispone de información topográfica, se puede utilizar la siguiente expresión analítica para evaluar la pendiente media de una cuenca:

$$S (o/o) = (Hmax - Hmin) / SQRT (A)$$

donde:

Hmax y Hmin son las cotas máximas y mínimas de la cuenca y A su superficie.

Quando existe información topográfica, es recomendable elaborar la curva hipsométrica en base a las curvas de nivel y las superficies que ellas abarcan, para determinar la pendiente media ponderada de la cuenca.

Otra elaboración importante se refiere a la determinación de la pendiente media ponderada de los cursos principales de la cuenca, en función de un patrón de longitud fijo.

Los resultados de uno y otro método, ayudan a una interpretación más objetiva del modo de escurrimiento, sobre todo en el análisis de crecidas.

6. Densidad de la red hidrográfica

En este concepto interviene también la clasificación de los cauces que conforman la cuenca hidrográfica, determinados por su número de orden. Este es mayor mientras mayor sea el número de ramificaciones que lo conforman.

Por lo tanto, al hablar de densidad de la red hidrográfica, se debe mencionar el orden de la misma y consiste en la relación del número de cauces por unidad de superficie.

7. Cobertura vegetal y estructura geológica

La vegetación que cubre una cuenca, juega papel preponderante en el modo de escurrimiento y en las condiciones climatológicas que producen la precipitación.

El tipo de vegetación más influyente en este aspecto se refiere a bosques y si se dispone de la información suficiente, se recomienda determinar en cada caso el índice de su cobertura, mediante la relación de superficies cubiertas por este tipo de vegetación y la superficie total de la cuenca.

En cuanto a la estructura geológica, su conocimiento es importante porque está relacionado con la capacidad de retención e infiltración (pérdida) del escurrimiento en una cuenca.

Conocidos los índices físicos de las cuencas o subcuencas analizadas y determinados los parámetros para su comparación, es necesario analizar las condiciones meteorológicas que predominan en las áreas estudiadas, sobre todo en lo que tiene relación con la pluviosidad de las mismas.

Si existe información al respecto, lo suficientemente amplia que cubra la superficie de las cuencas en comparación, se recomienda que se procesen los datos pluviométricos de cada una de las estaciones bajo el siguiente modelo:

- Ubicación de estaciones en los mapas disponibles
- Selección de estaciones a utilizarse, tendiendo a la homogenización del período analizado.
- Relleno de datos faltantes mediante uno de los métodos estadísticos comúnmente utilizados.
- Obtención de series de lluvias mensuales y anuales y determinación del promedio multianual en cada una de las estaciones analizadas.

e. Tabulación de los registros anuales máximos de precipitación en 24 horas.

f. Análisis de los registros de tempestades.

Con esta información procesada, se debe elaborar un mapa de isohyetas que permita el cálculo de la precipitación multianual media ponderada en los puntos tanto de la estación hidrométrica proveedora de registros, así como del sitio de captación.

La expresión para el coeficiente de transposición de caudales de una estación a un punto ubicado en otra cuenca, en principio es la misma que la mencionada en el caso anterior, pero su utilización debe ser controlada y reajustada por factores resultantes de la comparación de las características físicas correspondientes.

En definitiva, las características físicas y las condiciones pluviológicas de una cuenca, se reflejan en el valor del coeficiente de escorrentía medio anual. Esto significa la relación entre la cantidad de agua que escurre en un año por un determinado punto y la cantidad de agua que se ha precipitado durante el mismo período de tiempo sobre la superficie de la cuenca de drenaje.

El valor del coeficiente de escorrentía depende entre otros factores, del tamaño de la cuenca, del tipo de vegetación, de la estructura geológica y de las pendientes de los cauces que forman la red hidrográfica.

Si en la cuenca de drenaje de la estación hidrométrica disponible se puede establecer un valor confiable del coeficiente de escorrentía, el análisis de las condiciones físicas de la cuenca de drenaje del sitio de interés permite asumir un coeficiente de escorrentía apropiado, el cual a su vez servirá de control y ajuste del coeficiente de transposición de caudales de una cuenca a la otra.

Este proceso de control, sirve también para la transposición de valores extraordinarios de crecidas anuales, con los que se podrá realizar su tratamiento probabilístico.

Sin embargo, es importante realizar una comparación de los resultados de crecidas, con los métodos que se describen en el siguiente caso.

2.2.2 Ausencia de registros de caudales en la región.

Esta situación es más común sobre todo en los estudios hidrológicos de pequeñas centrales hidroeléctricas, ya que generalmente, estos se encuentran en zonas apartadas donde no existe la infraestructura necesaria para el registro de valores hidrométricos.

Se presentan bajo esta modalidad, dos casos típicos que son analizados a continuación:

CASO 4. Existencia de registros meteorológicos.

En este caso, se deben cumplir con todos los procedimientos anteriormente previstos para el tratamiento de la información meteorológica y la información física de la cuenca.

En primer lugar, se deberán establecer todos los índices posibles, para un conocimiento cabal de las características de la cuenca de drenaje.

En segundo lugar, el análisis de la información meteorológica disponible requerirá de la mayor atención en el control de la bondad de la misma, en la selección de los métodos para relleno y extrapolación de datos, y en la interpretación y utilización de resultados.

Por último, deberá intervenir el criterio hidrológico experimentado en la ratificación de resultados bajo un estudio de analogía de cuencas.

Sin embargo, la deficiencia de registros hidrométricos, hará posible únicamente la obtención de una serie hasta de caudales medios mensuales, calculados con la serie de precipitaciones mensuales.

Existen varios métodos para la obtención de caudales en base de los datos pluviométricos.

El más común es el método polinomial en el que intervienen los registros de varios meses consecutivos de lluvias en la estimación del valor del caudal en un mes dado.

Siendo el objetivo del estudio hidrológico la determinación del caudal de diseño de las obras del proyecto de una central hidroeléctrica, el valor del caudal garantizado se puede alcanzar asumiendo una relación con el caudal medio anual. En la selección de este coeficiente, se debe analizar la serie de lluvias mensuales, su distribución y parámetros estadísticos y la recurrencia de los períodos secos y lluviosos.

Para condiciones de gran variación de los valores pluviométricos registrados en la serie, se pueden asumir coeficientes entre 0.15 y 0.25 para el cálculo del caudal garantizado el 90 - 95 o/o en función del caudal medio anual.

Para regiones con poca variación del factor pluviométrico, este valor puede asumirse hasta 0.40 y 0.50 del caudal medio.

La evaluación del caudal de crecida para diseño de las obras de protección y evacuación, si se dispone de registros anuales de precipitación máxima en 24 horas, se realiza mediante el análisis probabilístico de estos datos con cualquiera de los métodos que se disponen para el efecto.

Es aconsejable, si existe suficiente información elaborar un mapa de isohyetas con los valores obtenidos del análisis probabilístico de las precipitaciones máximas de 24 horas para un período de retorno de 100 años.

Hay que considerar que estos datos son puntuales, y que la distribución de una tempestad en función de la superficie, hace que disminuya este valor en el orden del 10 y hasta 20 o/o.

Si se dispone de registros de tempestades, se deberá realizar un análisis tendiente a determinar porcentualmente la distribución de la lluvia máxima en 24 horas, representativas de la zona.

Para cuencas pequeñas del orden de los 100 km², esta distribución alcanza su máximo valor en un tiempo inferior a las 24 horas.

En muchos casos es necesario un conocimiento adicional referente a la cantidad máxima de lluvia que pueda ocurrir en una hora. Si se dispone del análisis de registros de tempestades, es posible determinar este valor con mayor exactitud. En caso contra-

rio, se recomienda asumir entre el 40 y 60 o/o del valor de la precipitación máxima en 24 horas.

En los estudios hidrológicos para proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas, comúnmente se trata con cuencas cuyas áreas de drenaje no sobre-pasan los 200 km².

Este hecho, permite un uso mucho más generalizado del método llamado racional para la determinación de los caudales máximos de crecida en función de las precipitaciones.

En efecto, la aplicabilidad de este método está recomendada para cuencas de drenaje de hasta 200 km² en zonas montañosas, con coeficientes medios de escurrimiento superiores a 0.5.

Para cuencas ubicadas en valles o zonas del litoral, su aplicación es recomendada para áreas no mayores de 50 km².

El método racional consiste en determinar el caudal máximo que pueda ocurrir conociendo la intensidad de precipitación para un tiempo igual al de concentración de dicha cuenca.

El tiempo de concentración es el que tomaría en recorrer una partícula de agua desde el punto más lejano hasta el sitio analizado.

En su determinación intervienen los factores de pendientes del curso mayor, de estructura geológica y de cobertura vegetal de la cuenca de drenaje, en base a los que se establece una velocidad de flujo.

Esta velocidad asumida, es recomendable controlarla mediante cualquiera de los métodos hidráulicos, por comparación del coeficiente de rugosidad resultante.

Conociendo la longitud del cauce mayor y la velocidad aceptada, se establece el tiempo de concentración de la cuenca de drenaje en el punto de interés.

La intensidad de precipitación es la relación de este valor por unidad de tiempo. Generalmente está expresada en milímetros por hora.

Para el método racional, la intensidad que interesa es la correspondiente al tiempo de concentración de la cuenca. O sea, hay que determinar la cantidad de lluvia máxima, con un período de retorno previamente fijado, que cae en un tiempo igual al de concentración (que puede ser mayor o menor que una hora) y dividirla para ese mismo tiempo expresado en horas.

Otro factor que interviene en el cálculo de la crecida máxima por el método racional es el coeficiente de escurrimiento que dicha cuenca presenta durante la tempestad que ocasione la crecida.

Se ha mencionado anteriormente el método para determinar el coeficiente medio de escurrimiento de una cuenca. Sin embargo, este valor deberá ser mayorado entre el 25 y 50 o/o en relación inversa al tamaño de la cuenca, por cuanto la tempestad de diseño se producirá durante una época lluviosa extraordinaria, que habrá saturado de humedad al terreno disminuyendo su capacidad de retención y por lo tanto elevando el coeficiente de escurrimiento.

La fórmula del método racional es:

$$Q = C * I * A / 360 \text{ (m}^3\text{/seg)}$$

donde:

- C — Coeficiente de escorrentía (-)
- I — Intensidad de lluvia correspondiente al tiempo de concentración de la cuenca (mm/h)
- A — Area de la cuenca de drenaje (ha)
- Q — Caudal de crecida que ocurriría por efecto de una intensidad de precipitación con un período de retorno de n años (m³/seg).

Existen además otros métodos de evaluación de las crecidas de diseño en las que intervienen factores empíricos y estadísticos.

Es recomendable efectuar la selección del caudal de diseño para las obras de evacuación y protección, mediante el control y la comparación de resultados obtenidos por diferentes métodos, sean éstos empíricos o analíticos.

Muchas veces se detectan diferencias sustanciales en los resultados. Esto se debe principalmente a que los métodos empíricos son producto de experiencia en proyectos que pueden tener características físicas e hidrológicas no compatibles con las específicas del estudiado, por eso es aconsejable en la selección de métodos empíricos conocer la aplicabilidad que ellos han tenido y su origen.

CASO 5. Ausencia de Registros Meteorológicos.

Es el caso más crítico, pues no se dispone de ningún tipo de datos, ni los referentes a caudales ni sobre las condiciones meteorológicas.

Muchas veces inclusive no se dispone de cartografía adecuada ni de fotografías aéreas.

Ante esta situación, los resultados que puede ofrecer el estudio hidrológico para un proyecto de pequeña central hidroeléctrica, conllevan un alto porcentaje de incertidumbre. Por esta razón es recomendable que en la evaluación de los caudales de diseño intervenga un ingeniero con suficiente experiencia que le permita adoptar el método más indicado para el trabajo.

Por lo menos, es importante contar con el estimado de la superficie de la cuenca de drenaje, sus condiciones físicas más generales, el tipo y origen de las precipitaciones que en ella ocurren, y sus características acerca de la cobertura vegetal.

Si en general, para cualquiera de los casos de estudio aquí planteados, es necesario el reconocimiento de campo por parte de los especialistas encargados de la evaluación hidrológica, en el presente caso se acentúa con carácter de imprescindible este requerimiento.

La inspección de la zona del proyecto, deberá prever los siguientes aspectos:

1. Reconocimiento aéreo que pretenda cubrir la mayor superficie de la cuenca de drenaje, identificando el sitio de captación y las condiciones hidrográficas hacia aguas arriba.
2. Reconocimiento terrestre del proyecto, en el que se prestará la suficiente atención a las características físicas del lecho del río.
3. Estimación del caudal que presenta el río en la fecha de inspección.
4. Identificación de las huellas de máxima crecida, especialmente en aquellas secciones transversales que se consideran estables, como por ejemplo en sitios encañonados o bajo estructuras de puentes.
5. Indagación a los moradores de la región sobre el comportamiento del río, sus niveles máximos, mínimos y medios de los que se tenga referencia en secciones características.

La información de campo tomada durante el reconocimiento: fotografías, secciones transversales, etc., deberá servir para una primera evaluación de las condiciones hidrológicas del río, mediante el cálculo de los niveles de caudales característicos en las secciones analizadas.

Estos resultados, serán comparados y reajustados mediante el control de métodos empíricos o por analogía con estudios hidrológicos efectuados en otras cuencas.

Es importante buscar la posibilidad de instalar en el menor tiempo, una estación hidrométrica que proporcione valores de caudales medidos.

Cuando se trata de ríos pequeños, se puede recomendar tipos de estaciones de control y registro más simple que los normales, por ejemplo estaciones tipo vertedero o Parshall que no necesitan de la determinación de curvas de descarga.

Es de suponer que entre los primeros pasos en el estudio integral de un proyecto hidrológico, figure la evaluación hidráulica del mismo. Si se instala una estación hidrométrica durante la primera fase del estudio, los datos que ella proporcione será de gran importancia en el control de resultados que puedan obtenerse por métodos empíricos.

2.3. Algunos aspectos sobre el problema de los sedimentos.

En general son muy pocas las estaciones hidrométricas que disponen de aparatos para la medición del gasto sólido.

Más aún en el caso de pequeñas centrales hidroeléctricas, que aprovechan ríos secundarios donde a veces ni de la información sobre el gasto líquido se dispone, como se ha señalado en el punto anterior.

De allí el hecho de que el estudio de sedimentos, en la práctica no cuente con los elementos suficientes para su investigación y evaluación.

Para los proyectos de centrales hidroeléctricas, interesa del estudio de sedimentos, lo relacionado con el sedimento en suspensión y las medidas que hay que tomar para evitar que partículas abrasivas puedan llegar a las turbinas.

Sólo en casos muy excepcionales, se podría hablar de pequeñas centrales hidroeléctricas que prevean un embalse creado con la construcción de una presa, para cuyo caso, la evaluación de la cantidad de sedimento que transporta un río, adquiere carácter más crítico, pues está relacionado con la vida útil de ese embalse.

Por ser del caso general, la determinación del tipo de sedimento en suspensión para los proyectos aquí tratados, se citan a continuación algunos aspectos a él relacionados.

La cantidad de materia sólida en suspensión que se encuentra en el flujo de un río, es directamente proporcional a las condiciones cinéticas del flujo. En estado estático, esta materia se asienta por su propio peso, ya que los componentes no verticales se eliminan.

Si las partículas se asientan en el fondo, por su propio peso, este fenómeno está relacionado al tamaño de los mismos: en efecto, las de mayor tamaño y peso serán las primeras en asentarse. Las últimas serán las partículas más finas.

Si la velocidad de flujo disminuye, los componentes horizontales del estado cinético de las partículas son menores y se produce paulatinamente su descenso bajo una forma parabólica.

La retención de partículas consideradas peligrosas para las turbinas la cumple el desarenador, mediante el proceso de decantación del sedimento en suspensión hasta cierto diámetro.

Cuando se dispone de suficiente información estadística sobre las mediciones de sedimentos en suspensión, la determinación de las medidas de la cámara del desarenador, es posible realizar bajo un análisis técnico probabilístico en el que intervienen los registros de la composición y granulometría de dicha suspensión que está a su vez sujeta al efecto de pulsaciones bajo régimen turbulento en su proceso de decantación, acción que tiene carácter aleatorio al que se le puede aplicar la teoría de las probabilidades.

Teóricamente, la velocidad de paso de agua por la cámara de desarenador es nula cuando las dimensiones de ésta tienden al infinito. En esta situación todas las partículas de todo tamaño se asientan en el fondo.

Sin embargo éste no es el caso, pues se necesita detener las partículas superiores a un determinado diámetro (0.25 - 0.40 mm) consideradas peligrosas para las turbinas. Esta decantación por su carácter aleatorio, tiene su índice de garantía o probabilidad, de acuerdo al tamaño de la cámara.

Como se ha indicado, no siempre es posible disponer de la información suficiente que permita un análisis detallado y cálculo preciso de las dimensiones del desarenador.

El desarrollo de este tema no incluye aspectos específicos de diseño. Solamente se ha mencionado algunos puntos relacionados con el efecto de los sedimentos en un proyecto de pequeña central hidroeléctrica y la forma general de las medidas para su control.

2.4. Conclusiones y Recomendaciones.

El método más idóneo para la evaluación hidrológica de un proyecto consiste en el proceso de análisis de los registros disponibles tanto de estaciones fluviométricas como de meteorológicas, coadyuvando estos resultados con el estudio y conocimiento de las condiciones físicas de la región.

Si no se dispone de todos los registros hidrológicos básicos para el proyecto, es recomendable hacer uso de toda la información auxiliar, inclusive de proyectos análogos con características más o menos similares y que hayan sido debidamente estudiadas.

Los resultados del estudio hidrológico son fundamentales en el enfoque general de un proyecto hidroeléctrico y el grado de confiabilidad debe tratar de ser igual, independientemente de su magnitud.

En cuanto al nivel de estudio que se asigna a un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas, el aspecto hidrológico debe enmarcarse a las limitaciones generales de tiempo previsto para su ejecución.

A nivel de simple evaluación es necesario estimar de manera aproximada y rápida las posibilidades del recurso energético y la relación beneficio costo.

En este caso, puede ser suficiente la determinación del caudal medio anual de dicho proyecto, en base de registros ya sea en el interior de la cuenca de drenaje o en una vecina, correlacionándolo a su tamaño, adoptando como valor del caudal de diseño para generación un 30 o 50 o/o de aquel.

Cuando no se dispone de registros hidrométricos, para la fase de evaluación se debe determinar el área de drenaje y estimar el caudal medio asumiendo un coeficiente de escorrentía apropiado y un módulo de precipitación en base de la información disponible.

Para la determinación del caudal máximo de crecidas, en la fase de evaluación puede ser suficiente la aplicación de fórmulas empíricas, o asumiendo un coeficiente de seguridad, en base al mayor registro disponible.

Para niveles superiores de estudio, factibilidad y diseños definitivos, se recomienda que el análisis hidrológico tenga una profundidad suficiente que permita disponer de resultados definitivos sin necesidad de dividir su estudio en estas fases. Esta recomendación se sustenta en el hecho de que la fase de factibilidad tiene generalmente una duración prevista lo suficientemente amplia que permite desarrollar el estudio hidrológico con resultados de carácter definitivo, pues la mínima información adicional que se pudiera obtener en el transcurso entre una fase y otra, no incide en el análisis realizado.

En resumen, es conveniente disponer de resultados definitivos lo antes posible durante las fases generales de estudio que puede tener un proyecto de pequeña central hidroeléctrica.

Un informe hidrológico de carácter definitivo depende de las características específicas del proyecto, en cuanto a disponibilidad de información, complejidad y magnitud.

En términos generales, este informe debe incluir:

- Descripción general de la zona, aspectos climáticos, orográficos, geológicos, hidrográficos, de vegetación.
- Información disponible: cartografía, topografía, fotos aéreas, estaciones, ubicación, períodos de registros, tipos de obras hidráulicas.
- Determinación de parámetros físicos de la cuenca de drenaje.
- Descripción y evaluación técnica de las estaciones.
- Procesamiento de datos relativos al clima: Humedad, temperatura, vientos.
- Procesamiento de datos pluviométricos.
- Determinación y/o verificación de las ecuaciones de descarga.
- Procesamiento de datos fluviométricos.
- Análisis de control y reajuste de datos, mediante métodos de correlación, doble masa, balance.
- Evaluación hidroenergética.
- Resultados, conclusiones, y recomendaciones.

Además es importante anexar los cuadros, gráficos y mapas elaborados, que permitan una comprensión e interpretación de los resultados. Tentativamente se sugiere lo siguiente:

- Mapa general con la ubicación del Proyecto.
- Mapa de la cuenca de drenaje, la red hidrográfica, ubicación de estaciones, topografía y sitios que se consideren de importancia en el estudio hidrológico.
- Mapa con isohyetas medias anuales para el período de registros y para los años extremos (seco y húmedo).
- Diagrama de barras de los períodos de registro de las estaciones.
- Diagrama de doble acumulación para control de los datos de estaciones pluviométricas.
- Diagramas de distribución de la frecuencia del máximo de precipitaciones para varias duraciones.
- Gráfico de las curvas de descarga utilizadas.
- Gráfico de las curvas de duración de los caudales medios diarios.
- Gráfico de las curvas probabilísticas de los caudales máximos instantáneos en las estaciones y de las precipitaciones máximas diarias.
- Gráficos que muestren la variación temporal de caudales y precipitaciones medias mensuales.

- Gráfico de los perfiles longitudinales de los ríos de la cuenca y perfiles transversales en el sitio de captación.
- Cuadros de caudales, lluvias, temperatura y humedad mensuales y anuales.
- Cuadro de caudales diarios.
- Cuadro de la distribución porcentual de volúmenes medios mensuales dentro del año.

3. CONSIDERACIONES ADICIONALES

3.1.

Al realizar un estudio hidrológico para proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas, los resultados obtenidos pueden de una u otra manera controlarse mediante el análisis de ciertos índices de relación, generalmente vinculados con el balance hídrico de la cuenca de drenaje.

Este balance, generalmente se lo considera de la forma más simple como la relación de volúmenes de caudales y precipitaciones que pasan en un determinado período de tiempo.

Sin embargo la realidad no es tan sencilla, pues en él intervienen una serie de factores adicionales, muchos de ellos susceptibles de ser cuantificados pero con un proceso más complicado y en base de un conjunto de datos debidamente registrados sobre evaporación, calidad del agua, evapotranspiración, catastro agrícola, etc., que requieren de una compleja infraestructura de registros.

El coeficiente de escurrimiento de una cuenca es una variable aleatoria, por lo tanto las correlaciones que se pueden establecer entre precipitaciones y caudales deben ser tomadas como referenciales ya que no existe una ley de relación directa entre estos factores.

3.2.

Para control de la calidad de los datos registrados, especialmente de las estaciones pluviométricas, se utiliza comúnmente el método de doble acumulación.

Este método permite detectar situaciones estadísticas normales, principalmente relacionadas con errores sistemáticos en el proceso de registro y medición de los fenómenos hidrológicos.

Cuando se produce una situación anormal en el control de la doble acumulación (doble-masa), es importante revisar la historia de las estaciones analizadas, pues muchas veces, la distorsión de la curva de control coincide con cambio de equipo de medición, o de operador e inclusive de ubicación de la estación que presenta esa anomalía.

Si el error es de ésta naturaleza, la desviación es sistemática y es posible mediante un análisis, determinar un coeficiente de corrección de la información distorsionada.

El método citado sirve exclusivamente para control de calidad de información, en base a registros de varias estaciones.

Sin embargo no se debe utilizar este método para relleno o extrapolación de series.

3.3.

Antes de intentar encontrar un coeficiente de correlación entre las series de datos hidrológicos, es necesario su propio control.

Al utilizar métodos de correlación lineal, el coeficiente de regresión aceptable no será menor que 0.7.

3.4.

Al estudiar el problema de crecidas extraordinarias para diseños en estaciones provistas de reglas y lecturas de nivel, es de fundamental importancia la revisión de la curva de descarga o ecuación de transformación de niveles de agua y caudales.

Generalmente el rango de validez de la ecuación de descarga está verificado para caudales normales.

Los niveles que alcanza el agua en las crecidas, son poco comunes y generalmente sobrepasan la forma de sección transversal que rige la ecuación de transformación, produciéndose una subestimación considerable del valor de las crecidas.

Una solución rápida para este problema, es el de obtener las características hidráulicas del sitio de control: su sección transversal, la pendiente longitudinal, y la estimación de la rugosidad, para en base a ellos realizar el cálculo hidráulico correspondiente para la determinación del control que podría sacar bajo determinada altura.

De esta manera se puede realizar el análisis probabilístico de los niveles máximos instantáneos registrados en la estación, determinar su valor garantizado para diseño y transformarlo a caudal con el método de Manning o Chezy, según las condiciones específicas de la sección.

3.5.

Cuando se disponga de información hidrológica de zonas características lo suficientemente densa, es recomendable determinar parámetros regionales que ayuden a la rápida evaluación de los recursos hídricos de un Proyecto.

Estos pueden ser los siguientes:

- isohyetas medias mensuales y/o anuales.
- coeficientes de escurrimiento media, para todos los puntos de control disponibles, que permita el trazado de isocaudales en el mapa regional.
- caudal unitario medio anual y de los períodos secos y lluviosos característicos.
- caudal unitario máximo registrado y ponderado con métodos probabilísticos.

Para la fase de evaluación de un proyecto hidroeléctrico, el uso de estos parámetros regionalizados, puede significar una gran ayuda para la estimación rápida de sus recursos, conociendo el área de drenaje.

3.6.

Se debe tener en cuenta que los resultados hidrológicos producto de registros de sus eventos, son siempre de mayor confiabilidad que los resultados obtenidos por métodos empíricos.

El instrumento principal de la hidrología es el análisis estadístico y probabilístico de los valores naturales cuantificados.

Por esta razón un sistema ideal de información y procesamiento de datos debería estar conformado por el suficiente número de estaciones fluviométricas, optimamente distribuidas en el territorio de un país o región y debidamente interconectadas a un sistema central de análisis electrónico, con el objeto de registrar los eventos en el momento de su ocurrencia conformando un banco de datos dinámico.

En el centro de análisis electrónico, debería contarse con todo el juego de programas computarizados que permitan responder en forma rápida cualquier inquietud sobre problemas estadísticos referente a cualquier punto. Así por ejemplo en el río X se registra una crecida extraordinaria. Al día siguiente se puede conocer la incidencia de su valor en la distribución probabilística de la serie en dicha estación o en cualquier otro sitio que este correlacionado a él.

Esto significaría un proceso de actualización dinámica con la opción adicional de optimización de los coeficientes de control y sus procedimientos.

Mientras este sistema ideal no se disponga, el trabajo del hidrólogo deberá apoyarse en mucho de los argumentos teóricos y metodológicos aquí descritos, en su experimentado criterio y a veces en algo de fantasía.

4. ANEXOS Y BIBLIOGRAFIA

Los cuadros y gráficos que se presentan a continuación como anexos, son tomados de varios proyectos de centrales hidroeléctricas que han sido desarrollados en varios niveles.

Se han seleccionado aquellos que presentan mayor comprensión del método utilizado para su obtención.

Estos anexos han sido agrupados de acuerdo a temas principales que abarca un estudio hidrológico para pequeñas centrales hidroeléctricas.

4.1.

Sobre generalidades: registros disponibles, tipo y calidad de estaciones, curvas de descarga, perfiles longitudinales de los ríos.

Anexo 1.- Estaciones meteorológicas y pluviométricas existentes.

Anexo 2.- Estaciones limnigráficas y limnimétricas existentes.

Anexo 3.- Diagrama de barras de registros pluviométricos.

Anexo 4.- Diagrama de barras de registros fluviométricos.

Anexo 5.- Perfil longitudinal de los ríos que conforman el proyecto.

Anexo 6.- Control de registros por el método de doble masa.

Anexo 7.- Curva de descarga determinada en base a aforos.

ESTACIONES METEREOLÓGICAS Y PLUVIOMÉTRICAS EXISTENTES

No.	ESTACION	TIPO	C O O R D E N A D A S		ALTITUD (m.s.n.m.)	Inicio de las Observ.	UBICACION
			LONGITUD	LATITUD			
13 - 54	INTAG EN APUELA	PLUV.	78°30'74" W	00°21'24" N	1.500	—63	Apuela
2 - 30	CAMBUGAN	PLUV.	78°23'55" W	00°46'22" N		6-AG-65	Hda. "Cambu- gán".
2 - 18	OTAVALO	MET. 2o.	78°15'57" W	00°14'10" N	2.556	—63	Coleg. de Agr.
2 - 14	ATUNTAQUI	MET. 2o.	78°12'33" W	00°20'19" N	2.350	20-II-63	Esc. 2 de Marz.
2 - 23	CARCHI	PLUV. MET.	78°10' W	00°40' N	1.200		Carchi. Estd. Ferrocarri
2 - 8	CAHUASQUI	PLUV. MET.	78°12' W	00°31' N	2.340		Imbabura— Prop. Partic.
2 - 9	TUMBABIRO	MET. PLUV.	78°12' W	00°28' N	2.030		Imbabura Prop. Partic.
2 - 15	COTACACHI		78°16' W	00°18' N	2.340		Imbabura Centro Agríc.

ESTACIONES, LIMNIGRÁFICAS Y LIMNIMÉTRICAS EXISTENTES

RIO	ESTACION	TIPO	C O O R D E N A D A S		Area de Drenaje (km ²)	Inicio de las Observacion.	AFOROS
			LONGITUD	LATITUD			
INTAG	En apuela	Lg.	78°30'54" W	00°21'16" N	498.3	01 - Nov.- 63	6
Guaylla- bamba	A.J. Cubi	Lg.	78°25'42" W	00°05'38" N	4.190.0	10 - Mar.- 64	44
Guaylla- bamba	D.J. Alambi	Lg.	78°44'30" W	00°14'15" N	6.464.7	01 - Ene.- 66	25
INTAG	D.J. Pamplona	Lg.	78°37'25" W	00°13'20" N	1.014.0	Jun.- 76	—

PROYECTO HIDROELECTRICO

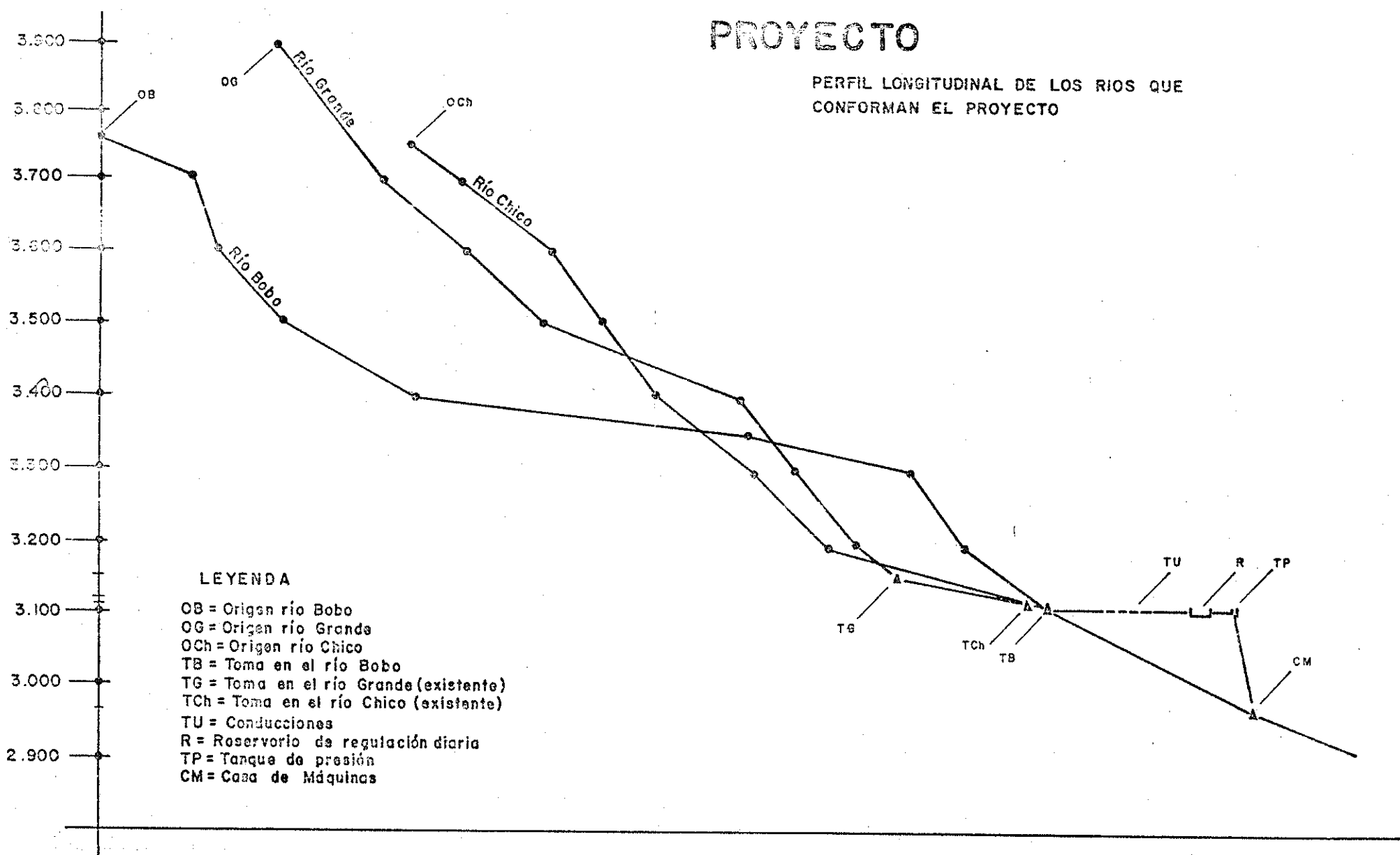
[illegible]

PROYECTO HIDROELECTRICO

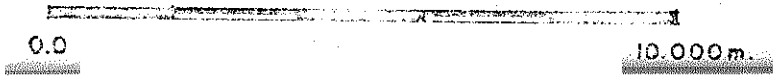
[illegible]

PROYECTO

PERFIL LONGITUDINAL DE LOS RIOS QUE
CONFORMAN EL PROYECTO



ESCALA HORIZONTAL : 1:125.000



METODO DE DOBLE MASA

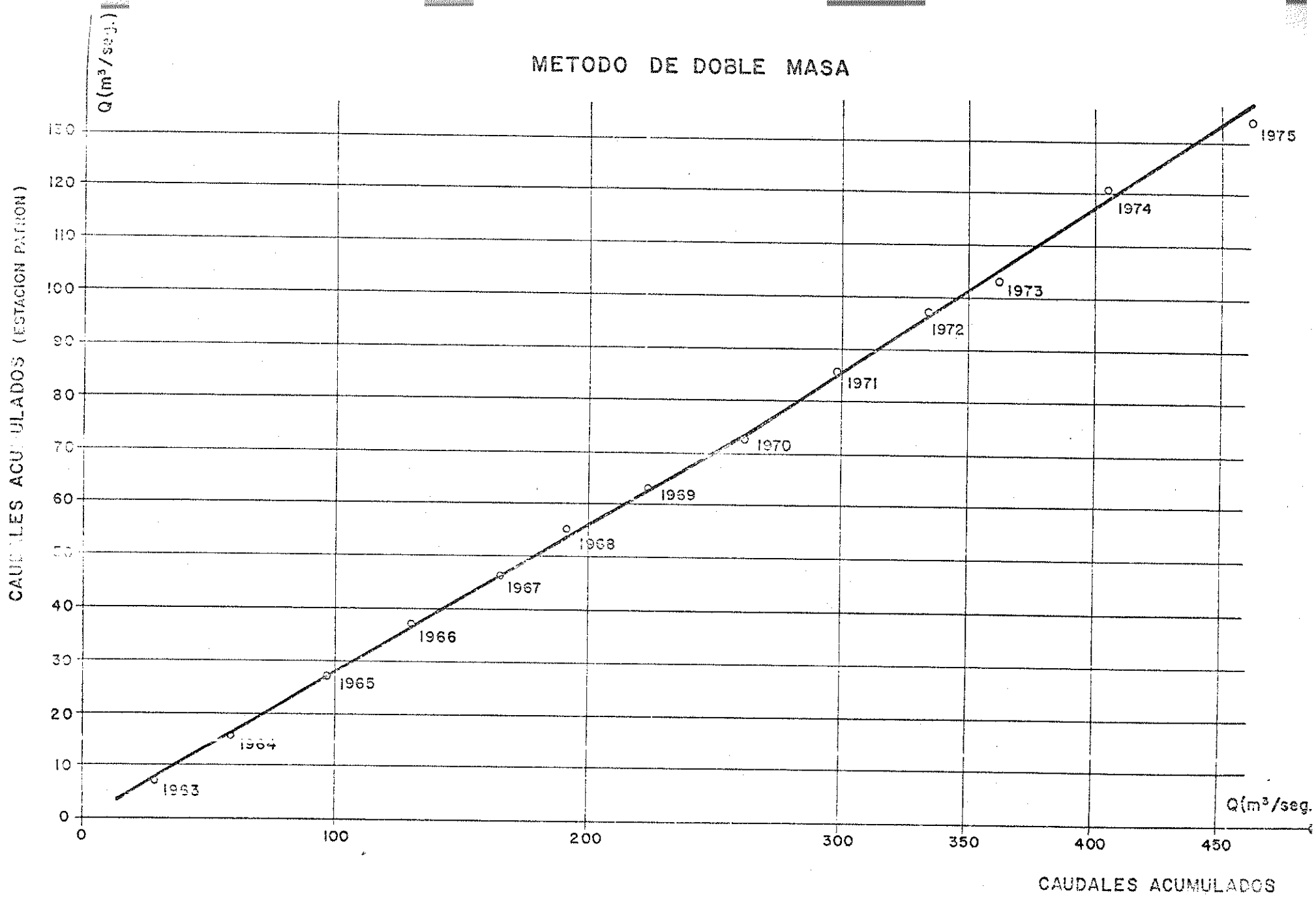
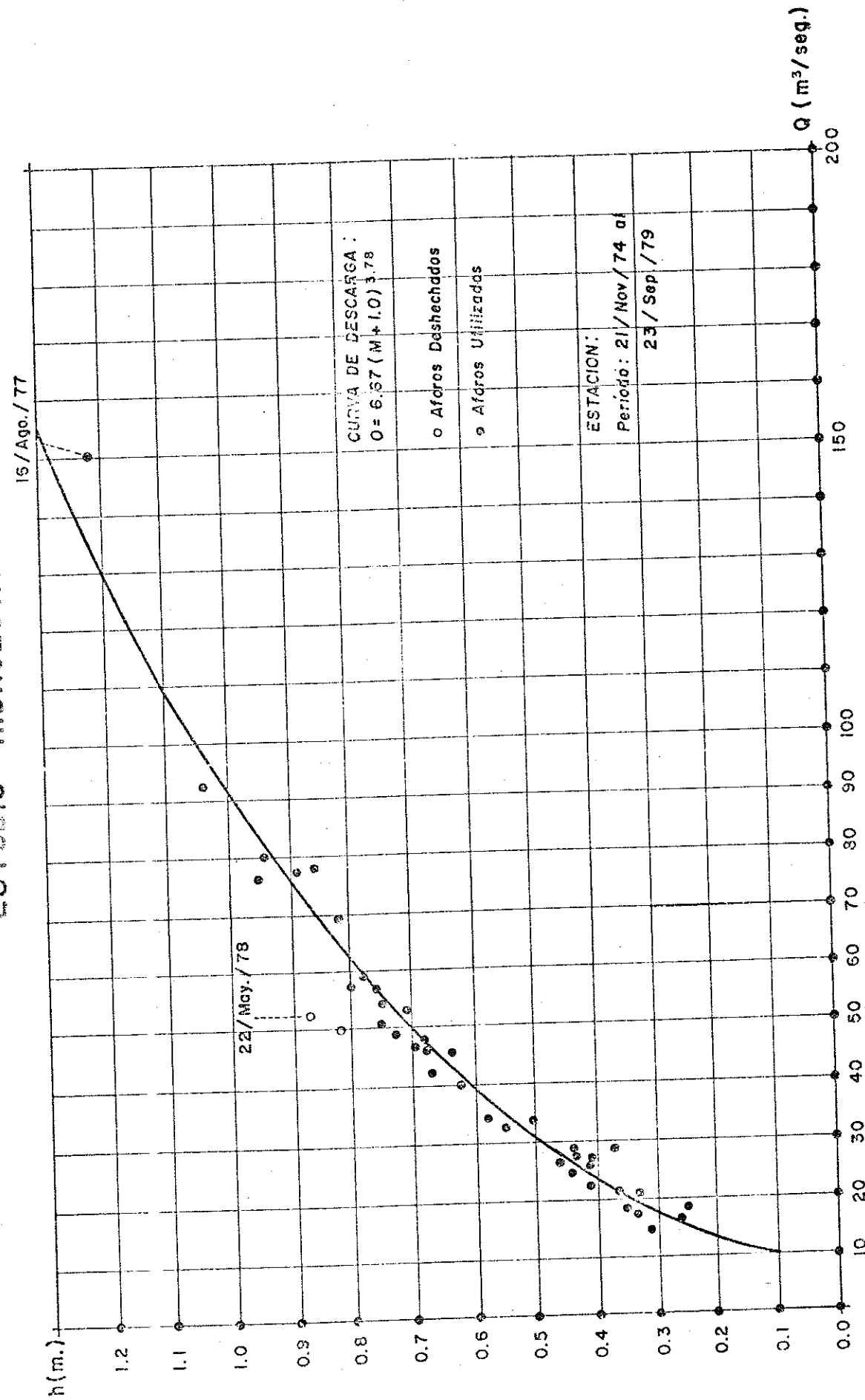


Gráfico N°
ESTUDIO HIDROLOGICO



4.2.

Sobre caudales y precipitaciones mensuales y sus garantías: tabulación, distribución durante el año, garantía de caudales mensuales, variación estacional.

Anexo 8.- Precipitaciones medias mensuales.

Anexo 9.- Caudales medios mensuales

Anexo 10.- Distribución mensual de caudales.

Anexo 11.- Hidrograma de caudales mensuales.

Anexo 12.- Curva de duración general y frecuencia de caudales medios mensuales.

Anexo 13.- Garantía de caudales medios mensuales.

Anexo 14.- Curvas de variación estacional de caudales medios mensuales garantizados.

PROYECTO HIDROELECTRICO

CUADRO No.

PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES

ESTACION														
Año	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL	Max24 H
1964	196.9*	224.3*	223.7*	288.8*	146.8*	66.9*	38.1*	86.9	73.5	139.2	215.9	253.6	1612.2	8.8
1965	289.3	171.5	133.3	339.4	132.8	15.1	3.5	1.8	81.2	138.8	249.9	212.2	1555.8	65.3
1966	189.9	63.8	142.8	93.3	189.1	51.8	45.2	11.9	37.2	215.3	296.7	192.7	1256.2	65.8
1967	318.1	391.8	138.9	151.7	128.1	39.2	48.8	2.3	38.6	161.5	28.3	147.4	1414.5	8.8
1968	179.9	214.8	185.2	385.8	39.3	48.8	34.3	28.4	153.6	88.6	91.7	58.6	1369.6	65.8
1969	277.5	214.1	229.4	288.8	174.1	147.8	4.4	13.3	186.3	73.2	224.8	188.7	1672.9	8.8
1970	131.3	326.4	223.7	164.7	194.2	48.9	28.9	17.1	99.5	81.8	184.4	178.1	1484.1	8.8
1971	389.8	332.4	362.9	169.3	163.3	117.3	4.3	23.4	74.4	171.3	57.8	188.4	1785.4	55.4
1972	225.3	228.8	227.8	214.8	153.8	82.8	31.3	183.3	66.1	98.8	384.7	142.8	1727.1	52.9
1973	87.4	88.6	187.7	325.1	241.7	75.1	25.8	78.9	128.8	104.9	81.8	284.7	1416.2	83.8
1974	235.1	354.4	278.2	149.3	98.4	61.6	16.8	1.8	113.2	285.9	191.7	168.8	1696.8	52.8
1975	158.5	351.9	233.6	182.3	167.6	81.8	118.6	37.7	42.8	178.4	98.3	17.9	1625.9	45.7
1976	173.7	151.7	311.5	273.5	188.8	94.6	2.9	1.9	43.9	38.6	155.3	193.3	1435.6	69.9
1977	128.3	95.5	298.6	119.6	68.5	55.9	28.8	51.2	89.3	82.4	88.1	144.6	1185.4	57.2
1978	141.8	156.7	179.2	227.1	122.8	24.5	53.9	2.2	71.3	28.8	68.2	156.7	1858.9	8.8
MED	196.9	224.3	223.7	288.8	146.8	66.8	38.1	38.2	88.7	118.8	154.7	156.7	1481.1	

PROYECTO HIDROELECTRICO

CUADRO No.

CAUDALES MEDIOS MENSUALES (M³/S)

RIN														
ESTACION														
AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	MEDIO	PERIODO
1963	8.6*	18.6*	12.8*	18.6*	8.8*	5.9*	4.2*	2.8*	4.9	4.8	6.7	8.8	7.4	
1964	7.3	8.5	6.8	13.9	18.5	9.1	7.4	5.8	5.8	6.8	11.3	13.8	8.8	
1965	16.3	16.8	11.8	28.8	18.3	8.8	7.6	5.6	5.2	6.8	16.4	18.2	12.8	
1966	13.8	11.6	12.5	18.1	11.3	7.2	6.8	6.1	5.8	7.9	18.9	15.8	9.8	
1967	13.3	27.4	16.9	18.1	12.2	9.3	5.7	4.1	3.8	3.8	3.5	4.5	9.5	
1968	7.6	14.2	17.3	17.8	9.4	5.8	3.8	2.3	2.6	5.1	5.2	3.6	7.8	
1969	18.4	13.4	18.4	23.4	12.8	6.6	1.9	2.3	2.7	3.1	7.7	9.4	8.7	
1970	8.6	28.5	28.4	7.7	11.2	4.9	2.6	4.4	4.1	4.5	8.4	11.1	9.8	
1971	23.6	29.1	25.3	17.8	15.5	7.8	5.6	5.2	6.2	8.7	12.8	9.8	13.8	
1972	15.6	24.8	15.5	13.5	13.8	8.8	5.1	3.8	2.8	2.5	6.8	8.7	18.8	
1973	6.1	6.8	6.8	13.3	9.2	6.8	4.5	4.3	5.8	6.5	5.1	6.6	6.7	
1974	14.1	27.4	26.8	19.5	19.7	14.8	12.8	11.2	11.3	16.4	18.3	28.2	17.6	
1975	28.8	29.4	23.5	14.1	11.5	8.2	18.6	7.3	7.3	7.4	8.2	11.8	13.3	
1976	14.8	19.1	16.6*	15.6*	13.5*	15.9	12.6	18.8	9.2	8.8	18.8	15.2	13.5	
1977	13.2	13.8	15.3	16.5	14.6	13.2	9.8	8.7	8.5	9.9	9.8	9.8	11.9	
1978	18.2	14.3	17.4	21.7	19.4	12.5	18.9	6.8	8.9	6.8*	9.4*	13.4	13.5	
1979	15.5	18.3	23.3	15.6*	13.8*	9.2*	7.1*	6.8*	5.8*	6.8*	9.4*	18.7*	11.7*	
MED	13.3	17.8	16.3	15.3	13.2	9.8	7.8	5.8	5.8	6.8	9.4	18.7	11.7	18.9

DISTRIBUCION MENSUAL DE LOS CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACION :

Período 19 -19

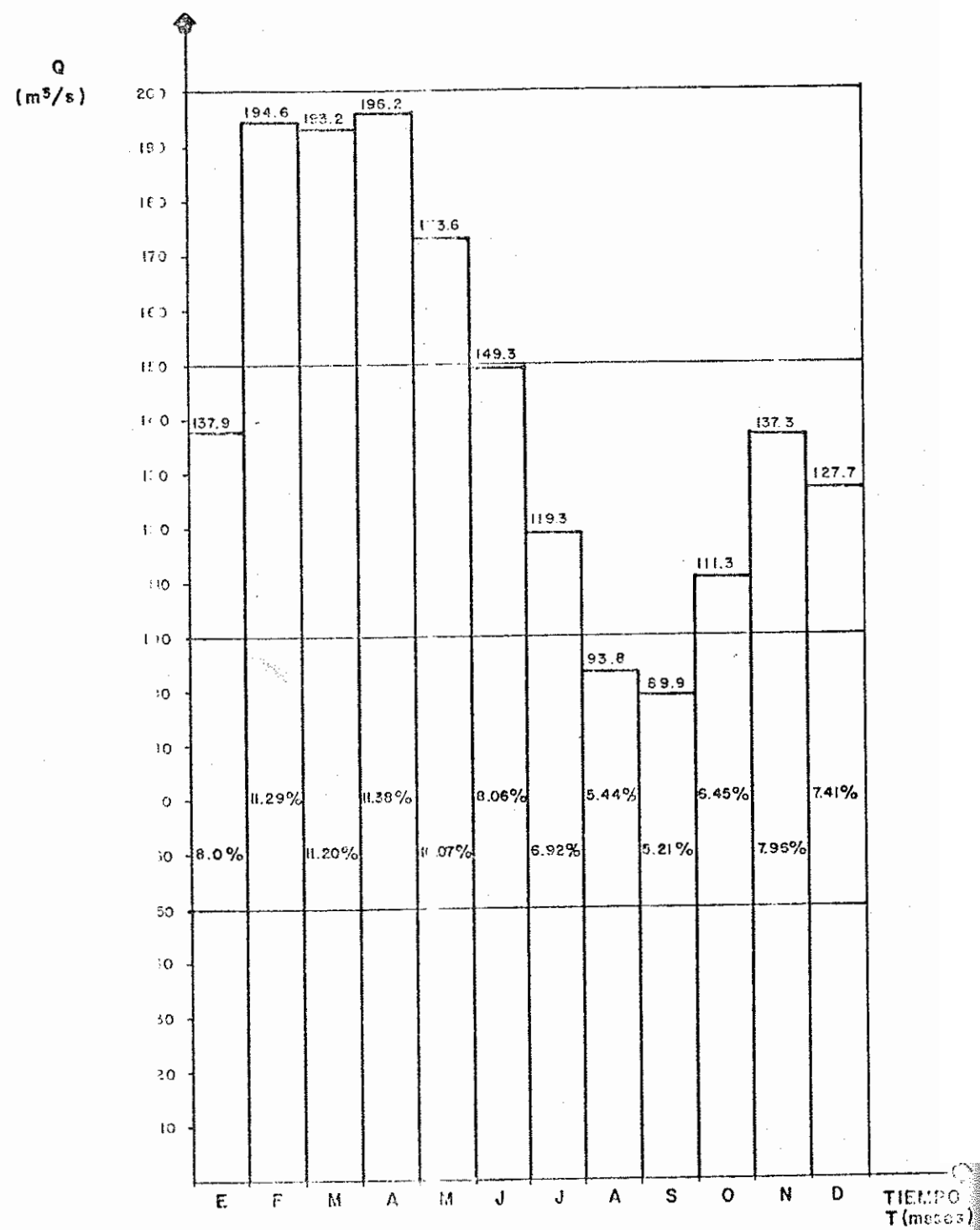
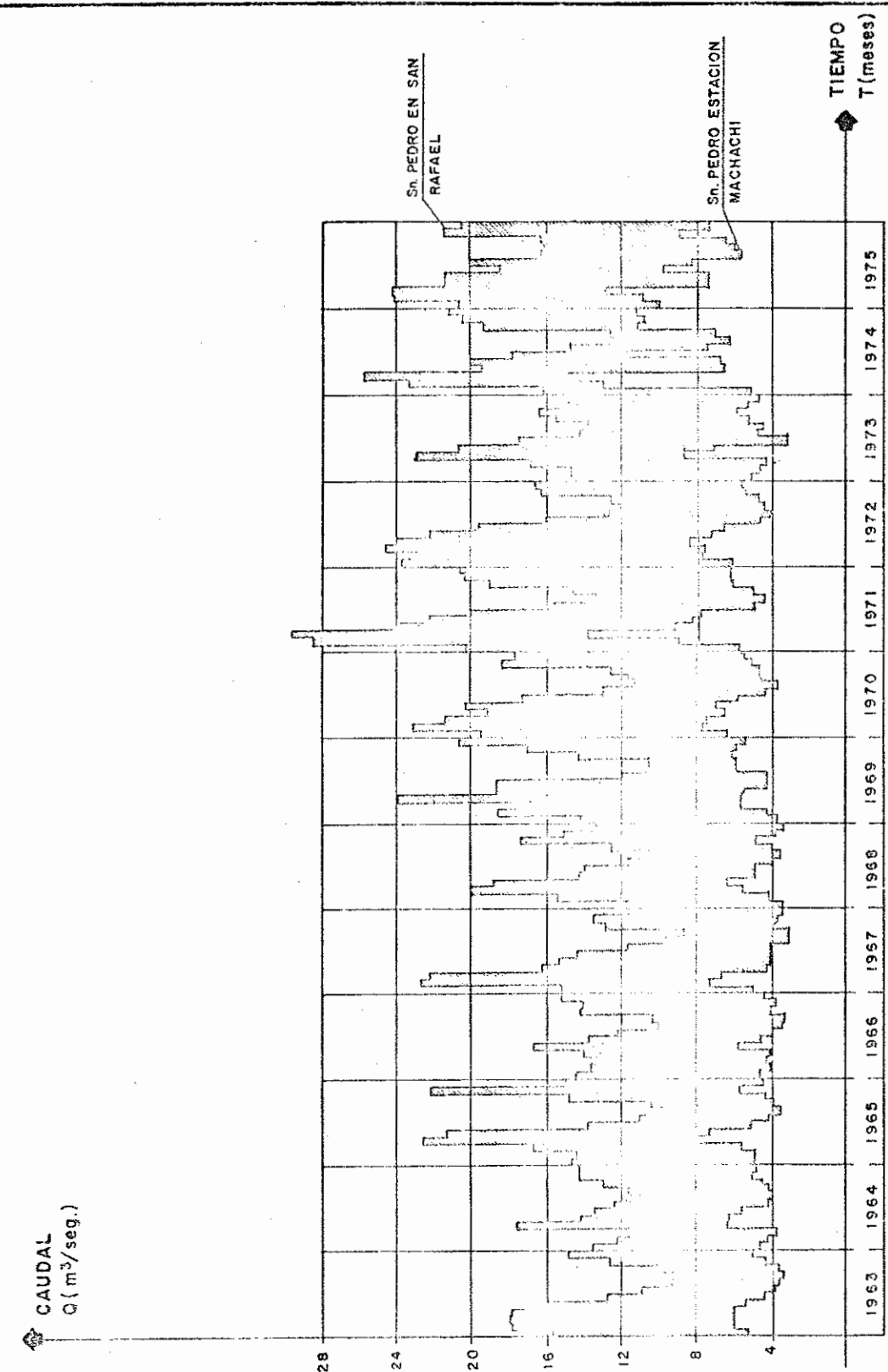


Gráfico N° HIDROGRAMAS DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES Período: 19 - 19



CURVA DE DURACION GENERAL Y FRECUENCIA

ESTACION :

(Caudales medios mensuales)(m³/s)

Período 19 - 19

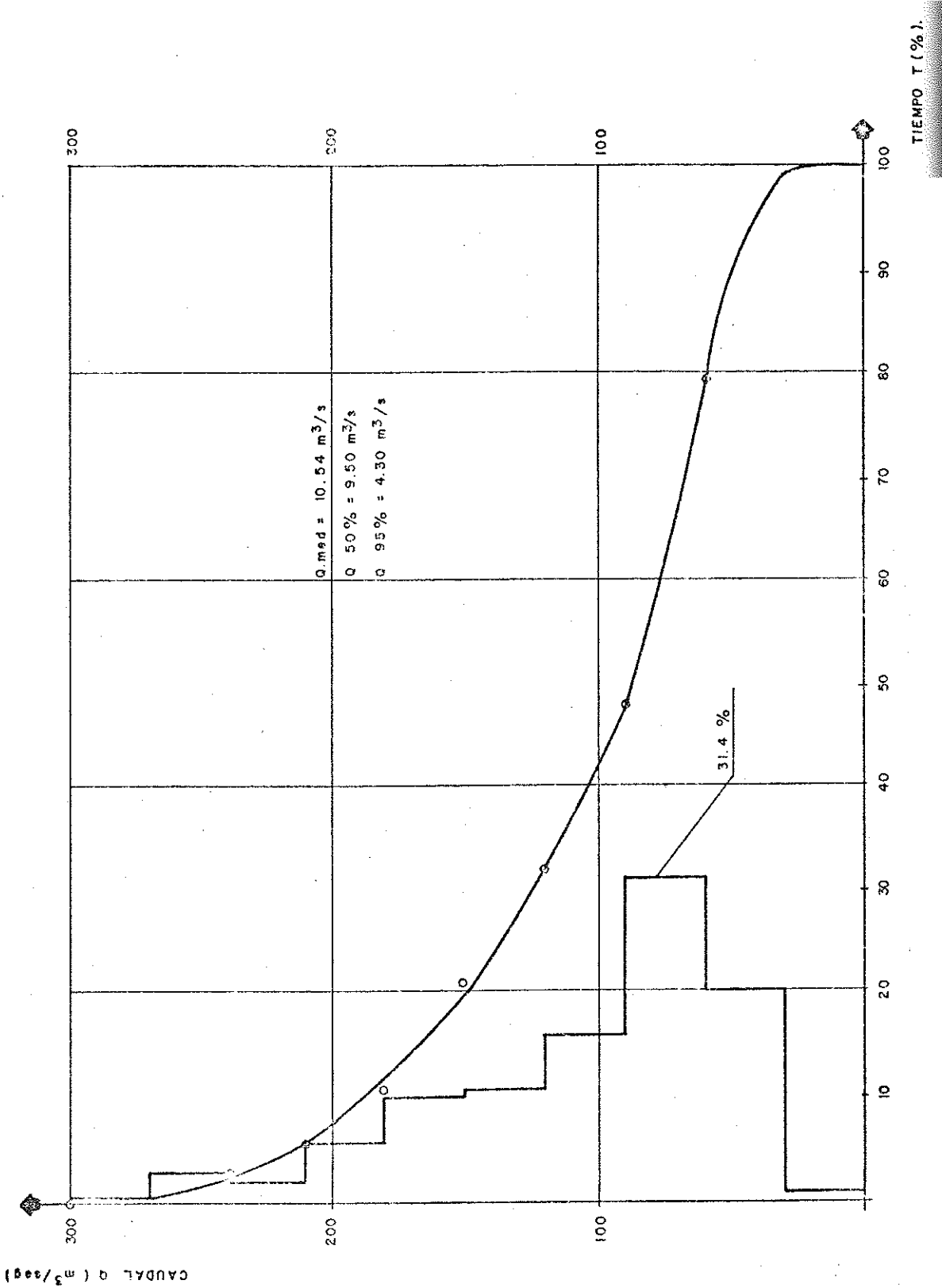
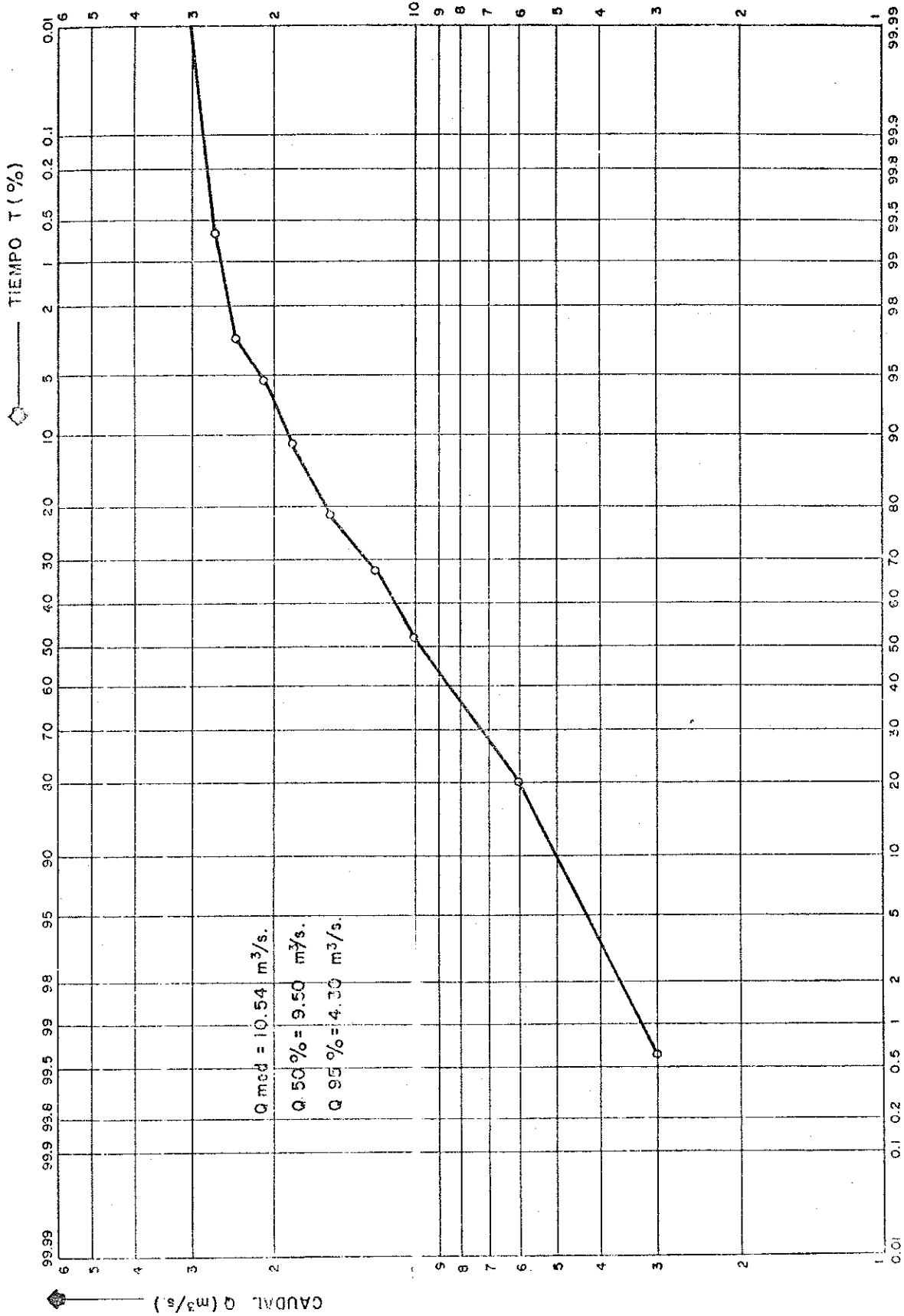


Gráfico Nº

CURVA DE DURACION GENERAL

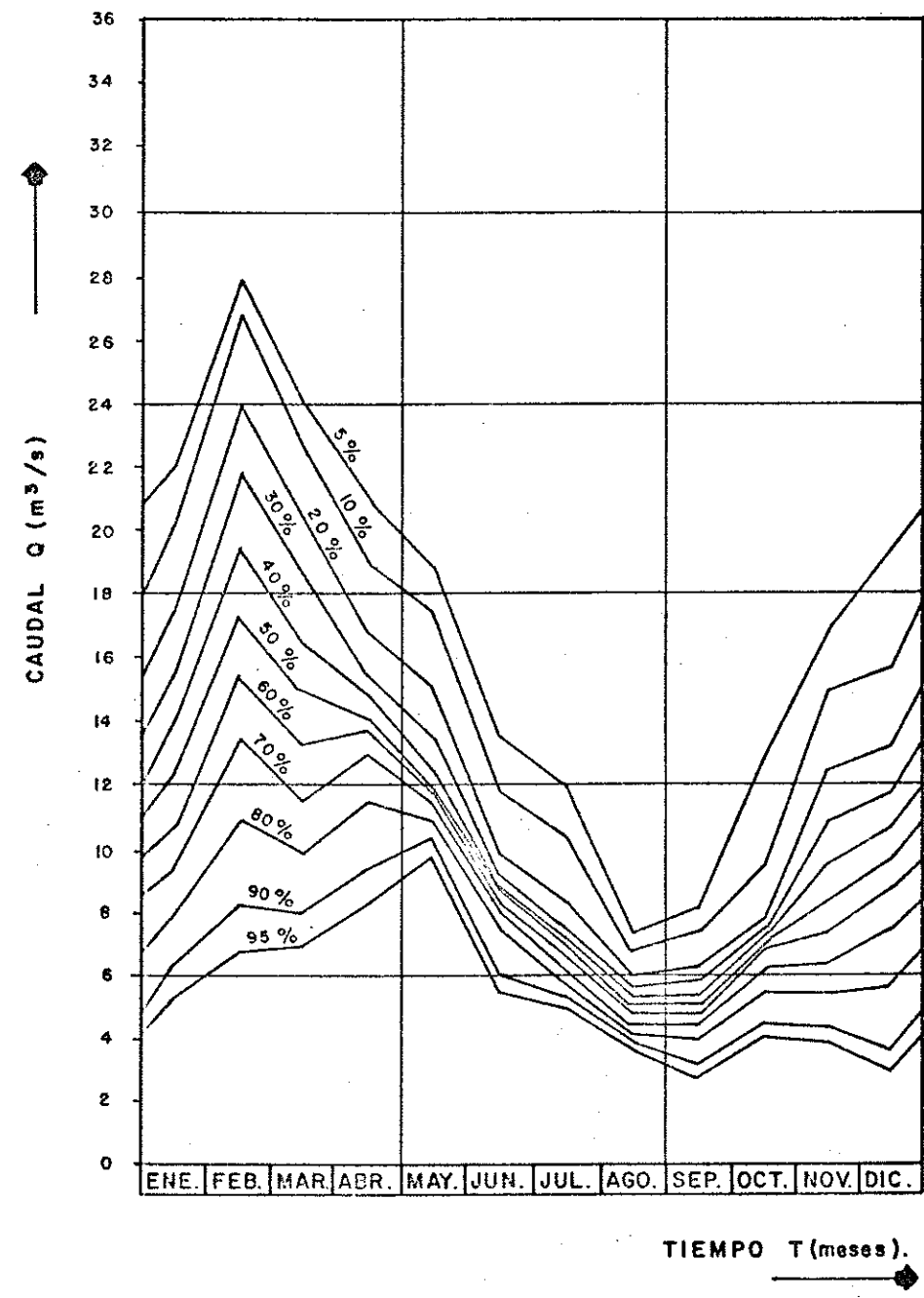
ESTACION: (Caudales medios mensuales) (m³/s.)

Período 19 - 19



CURVAS DE VARIACION ESTACIONAL

ESTACION :
Período 19 -19



4.3.

Sobre caudales medios diarios y su garantía: tabulación, análisis de frecuencias, curvas de duración.

Anexo 15.- Caudales medios diarios

Anexo 16.- Frecuencia de caudales diarios.

Anexo 17.- Curva de duración general de caudales medios diarios.

CUADRO

CLACULO DE FRECUENCIAS

ESTACION

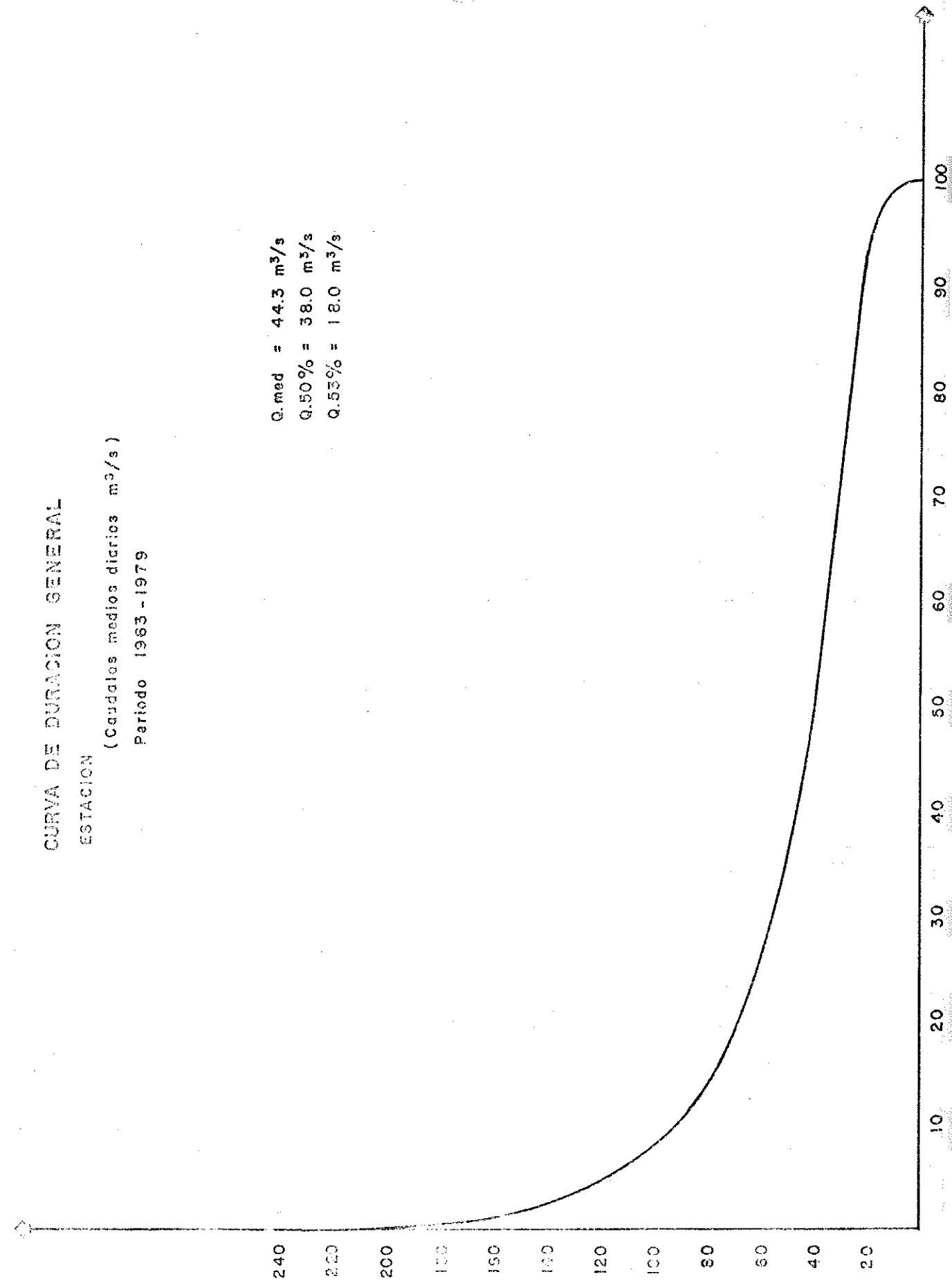
CAUDALES MEDIO (M³/S)

PERIODO:

AÑO

DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	21.9	72.5	34.1	51.8	8.8	46.9	58.8	38.9	31.6	78.3	33.6	31.6
2	21.3	75.5	29.7	45.5	8.8	76.9	44.7	51.7	85.7	51.8	38.1	38.5
3	21.8	45.5	26.4	38.9	8.8	51.8	55.6	61.8	96.4	48.6	38.6	44.3
4	21.8	36.4	37.8	37.5	8.8	45.3	69.4	45.9	63.8	35.4	29.3	44.8
5	21.3	38.1	21.5	63.8	8.8	88.1	136.7	58.9	58.2	37.6	31.2	44.8
6	21.8	31.3	45.8	42.2	38.3	68.5	95.8	51.7	51.4	36.8	28.6	46.8
7	21.8	48.2	39.4	42.7	31.6	51.7	58.8	41.7	53.7	46.6	26.8	41.8
8	27.2	78.7	36.6	38.8	34.8	54.5	78.6	39.8	41.3	32.1	25.5	31.6
9	32.8	37.1	64.9	34.5	37.4	66.4	63.5	48.1	38.8	41.4	24.1	32.5
10	25.1	45.5	110.0	36.9	58.6	49.5	56.0	41.1	42.8	41.3	36.2	30.8
11	21.3	72.1	63.3	64.8	47.8	41.3	168.4	38.4	34.1	47.2	33.8	124.4
12	28.7	72.7	48.1	181.6	126.8	93.4	98.3	34.9	54.7	68.3	38.1	148.9
13	28.7	71.4	48.8	72.9	126.4	47.5	58.7	34.1	48.4	62.8	23.4	78.3
14	28.7	71.7	39.9	56.9	59.3	41.7	44.2	53.2	43.5	58.7	24.1	67.8
15	28.4	88.8	64.6	348.7	46.2	38.9	188.2	54.3	83.5	36.8	29.3	35.8
16	17.4	77.8	77.4	133.8	41.3	47.3	66.3	97.7	95.1	38.2	44.8	32.8
17	18.5	90.9	76.0	89.7	143.9	48.5	66.5	72.8	40.7	100.4	44.7	16.9
18	19.3	79.3	126.8	65.9	74.8	48.8	46.6	42.7	36.6	117.7	42.1	15.2
19	22.4	59.6	112.2	58.4	52.4	35.8	42.5	117.3	34.2	163.1	55.2	15.5
20	10.2	53.6	79.6	42.7	58.3	34.5	84.7	46.7	33.3	99.4	106.2	15.2
21	28.5	49.6	73.2	48.8	45.1	34.5	76.9	34.1	38.1	73.2	54.6	19.2
22	27.8	44.4	49.9	43.7	43.7	55.4	53.8	32.5	34.8	75.9	35.3	22.5
23	37.8	48.3	47.5	43.6	41.6	41.4	46.8	31.9	38.5	54.5	31.6	28.1
24	51.2	42.1	48.3	44.3	47.7	58.4	58.1	8.8	36.2	43.7	36.7	18.2
25	48.8	68.5	89.6	48.8	185.3	185.3	42.7	42.5	56.8	48.8	31.6	15.9
26	37.4	48.8	47.3	43.4	47.1	192.6	189.4	88.2	75.5	44.6	35.4	15.5
27	38.1	48.8	88.8	39.8	95.6	132.7	51.2	42.8	69.8	45.2	38.5	18.8
28	31.6	38.4	62.1	38.6	75.8	63.8	65.1	41.1	39.8	34.1	34.5	25.1
29	36.5	8.8	84.8	37.5	68.9	143.8	56.6	38.8	38.6	33.4	28.6	27.5
30	36.7	8.8	51.1	31.6	77.8	128.2	59.5	55.4	43.8	31.5	33.7	27.9
31	58.1	8.8	42.3	8.8	49.2	8.8	41.9	8.8	8.8	66.5	8.8	24.4
qme	27.2	56.1	68.8	62.1	67.4	67.4	68.7	58.9	58.4	57.8	36.6	37.2
qmx	51.2	98.9	126.8	348.7	143.9	192.6	168.4	117.3	96.4	163.1	186.2	148.9
qmn	17.4	38.1	36.4	31.6	31.6	34.5	41.9	8.8	38.1	31.5	23.4	15.2

No.	LIM. SUP.	N	FRECUENCIA	F.ACUM
1	5.00	0	0.00	100.00
2	10.00	2	8.13	99.87
3	15.00	35	2.34	97.53
4	20.00	126	8.41	89.12
5	25.00	165	11.81	78.18
6	30.00	155	10.35	67.76
7	35.00	184	12.28	55.47
8	40.00	139	9.28	46.19
9	45.00	138	9.21	36.98
10	50.00	95	6.34	38.64
11	55.00	71	4.74	25.98
12	60.00	68	4.54	21.36
13	65.00	45	3.88	18.36
14	70.00	37	2.47	15.89
15	75.00	36	2.48	13.48
16	80.00	29	1.94	11.55
17	85.00	24	1.68	9.95
18	90.00	21	1.48	8.54
19	95.00	28	1.34	7.21
20	100.00	10	8.67	6.54
21	105.00	9	0.69	5.94
22	110.00	14	0.93	5.81
23	115.00	4	8.27	4.74
24	120.00	11	8.73	4.01
25	125.00	10	0.67	3.34
26	130.00	10	0.67	2.67
27	135.00	5	0.33	1.34
28	140.00	5	0.33	2.00
29	145.00	5	0.33	1.67
30	150.00	5	0.33	1.34
31	155.00	2	0.13	1.20
32	160.00	3	0.20	1.00
33	165.00	1	0.07	0.93
34	170.00	2	0.13	0.00
35	175.00	2	0.13	0.67
36	180.00	1	0.07	0.68
37	185.00	2	0.13	0.47
38	190.00	0	0.00	0.47
39	195.00	2	0.13	0.33
40	200.00	2	0.13	0.28
41	205.00	1	0.07	0.13
42	210.00	0	0.00	0.13
43	215.00	0	0.00	0.13
44	220.00	1	0.07	0.07
45	225.00	1	0.07	0.00



4.4.

Sobre la estimación de crecidas: precipitaciones máximas en 24 horas, análisis de tempestades, distribución porcentual, probabilidad de crecidas.

Anexo 18.- Análisis probabilístico de los caudales máximos anuales.

Anexo 19.- Curva: caudal máximo - probabilidad.

Anexo 20.- Análisis de tempestades.

Anexo 21.- Análisis probabilístico de precipitaciones máximas en 24 horas.

Anexo 22.- Curva: precipitación máxima en 24 h. - probabilidad.

Anexo 23.- Distribución porcentual de tempestades registradas.

Anexo 24.- Precipitaciones máximas en intervalos cortos de tiempo.

Anexo 25.- Intensidades máximas horarias.

Anexo 26.- Distribución porcentual de precipitaciones máximas en 24 horas.

CUADRO No.

ANALISIS PROBABILISTICO DE LOS CAUDALES MAXIMOS ANUALES

Estación

Area de Drenaje : 126.45 km²

Curva de Descarga : Q = 0.0076 (h + 1.0)^{8.96}

AÑO	NIVEL DE AGUA	Q max.	AÑOS ELIMINADOS	RANGO	PROBABILIDAD
—	cm.	m ³ /seg.	—	—	o/o
1965	124	10.45	XXXX	—	—
1966	150	27.95		8	72.73
1967	150	27.95		9	81.82
1968	118	8.19	XXXX	—	—
1969	175	65.65		6	54.55
1970	278	1135.38	XXXX	—	—
1971	156	34.57		7	63.64
1972	195	123.15		5	45.45
1973	202	156.51		3	27.27
1974	198	134.83		4	36.36
1975	222	269.90		2	18.18
1976	224	285.30		1	9.09
1977	140	19.39		10	90.91

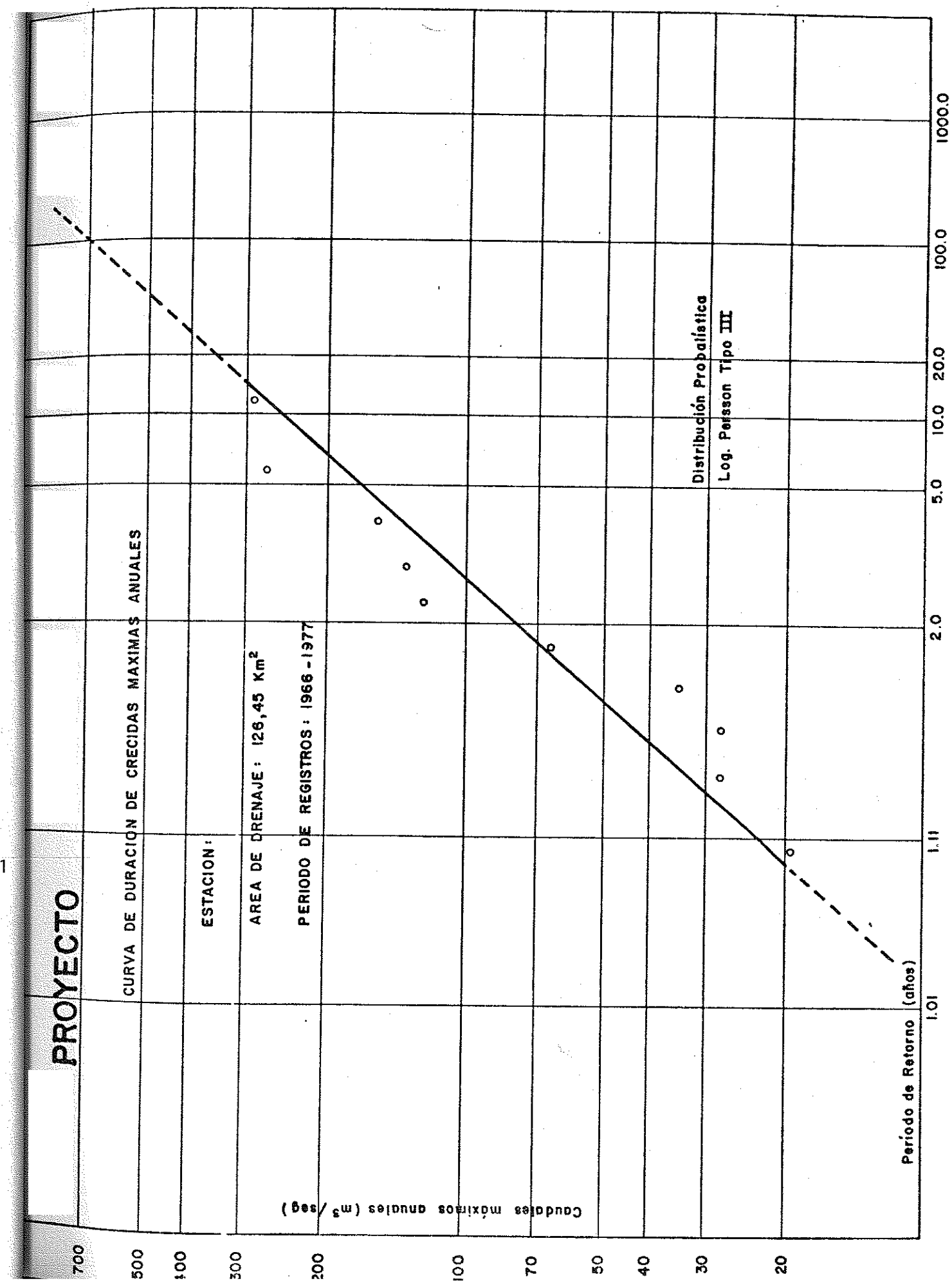
$$Q = 114.52 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$Cu = \frac{S}{M} = 0.22$$

$$G = - \frac{N \sum (\log Qi - M)^3}{(N - 1)(N - 2) S^3} = - 0.006$$

$$M = \frac{\sum \log Qi}{N} = 1.884$$

$$S = \frac{\sum (M - \log Qi)^2}{N} = 0.411$$



CUADRO No.								
ANALISIS DE TEMPESTADES EN LA CIUDAD (en Milímetros)								
AÑO	MINUTOS					HORAS		
	5	10	15	20	30	1	2	6
1956	9.0	15.5	21.1	24.5	26.6	28.3	31.6	(37.9)
1957	6.0	12.0	16.0	18.5	20.0	23.7	24.0	(28.8)
1958	5.4	9.4	10.7	12.6	13.1	14.6	18.0	(21.6)
1959	9.0	18.0	26.0	32.2	43.8	57.7	80.5	95.7
1960	3.3	4.1	5.5	7.2	9.0	15.8	23.2	(27.9)
1961	5.6	8.3	10.7	13.0	17.2	20.0	32.3	34.0
1962	10.0	20.0	24.5	24.5	33.5	42.7	(53.7)	(64.5)
1963	8.7	12.8	17.4	18.4	21.5	25.8	37.3	(44.8)
1964	6.5	10.0	13.5	14.5	15.8	24.9	34.9	(41.9)
1965	8.5	10.5	14.8	15.8	19.1	21.7	24.4	29.3)
1968	8.5	12.0	18.0	20.2	26.2	34.0	36.8	43.7
1969	8.0	12.0	13.0	15.6	18.5	22.5	26.8	36.8
1970	9.6	15.0	22.0	24.5	34.2	38.8	39.2	(47.1)
VALOR MEDIO	7.2	11.5	15.3	17.7	21.2	26.5	33.0	39.5
1 o/o (*)	14.6	28.1	39.1	43.4	55.0	63.4	78.7	93.6

NOTA:

() Valores asumidos por correlación

* Distribución probabilística teórica tipo Log-Normal.

CUADRO No.			
ANALISIS PROBABILISTICO DE LAS PRECIPITACIONES MAXIMAS EN 24 HORAS			
ESTACION:			
Año	Precipitación Máx. en 24 h. (M.M.)	Rango	Probabilidad de excedencia (o/o)
1964			
1965	23.7	7	70
1966	32.1	3	30
1967	17.6	8	80
1968	30.5	4	40
1969	53.0	1	10
1970	26.0	5	50
1971	36.5	2	20
1972	25.4	6	60
1973	13.5	9	90

Distribución probabilística TIPO log-normal

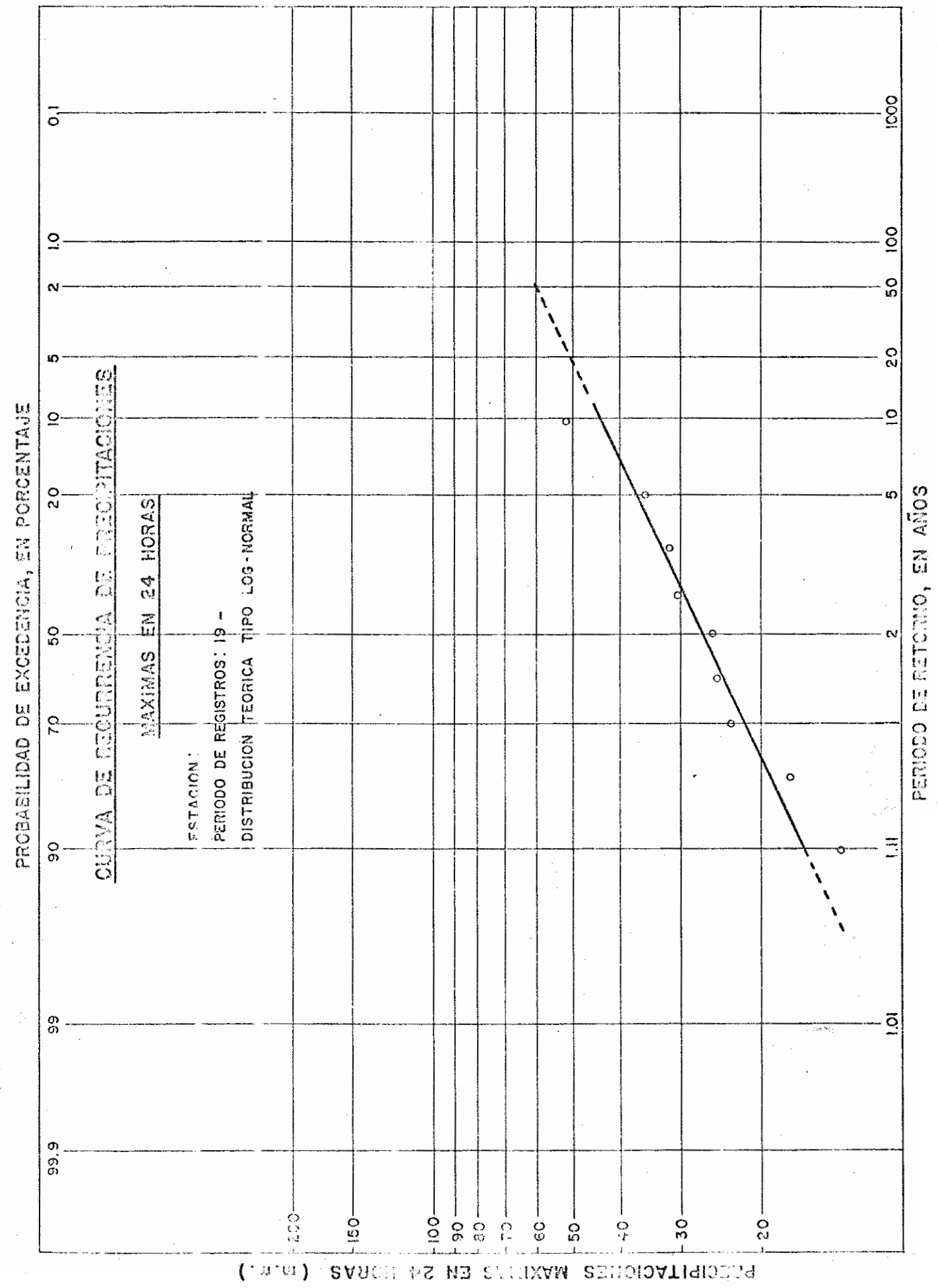
$$M = \frac{\sum \lg x}{n} = 1,4275 \qquad S = 0,1734$$

$$X_{99 \text{ o/o}} = 10,6 \text{ MM.}$$

$$X_{50 \text{ o/o}} = 26,8 \text{ MM.}$$

$$X_{1 \text{ o/o}} = 67,7 \text{ MM.}$$

Máxima registrada en el período 53,0 mm.



DISTRIBUCION PORCENTUAL DE TEMPESTADES REGISTRADAS

ESTACION:

AÑO	MINUTOS					HORAS				
	5	10	15	20	30	1	2	6	12	24
1979	25,5	27,3	28,6	29,3	35,9	53,1	72,2	78,8	100,0	100
1972	23,2	30,2	38,0	46,1	54,5	63,7	65,9	98,3	98,8	100
Promedio	24,3	28,8	33,3	38,0	45,2	58,4	69,1	88,6	99,5	100

ESTACION:

AÑO	MINUTOS					HORAS				
	5	10	15	20	30	1	2	6	12	24
1959	12,2	16,0	20,8	24,4	33,6	44,0	61,9	74,9	79,8	100
1961	13,0	17,1	20,7	27,6	38,6	53,7	68,7	80,5	98,5	100
1962	10,8	14,9	19,3	23,7	30,1	45,3	51,6	76,9	83,2	100
1963	18,0	22,5	26,2	31,3	35,6	28,2	56,6	62,2	72,3	100
1964	15,6	18,8	21,9	28,1	35,1	43,8	53,1	75,8	92,2	100
1965	8,0	13,0	18,6	22,0	27,3	35,0	54,1	80,1	94,2	100
1969	16,1	18,4	20,7	23,0	26,0	34,9	53,3	73,6	100,0	100
1970	20,1	29,3	33,0	34,4	35,9	48,7	74,7	97,4	100,0	100
1971	15,8	21,4	25,4	28,2	35,2	43,9	57,7	80,0	95,0	100
1972	22,1	29,1	39,5	43,0	50,0	63,3	74,4	87,6	89,9	100
Promedio (10 años)	15,2	20,4	24,6	28,6	34,8	45,1	60,6	78,9	90,0	100
Promedio (70 y 72)	21,1	29,2	34,3	38,7	43,0	55,9	74,6	98,5	95,0	100

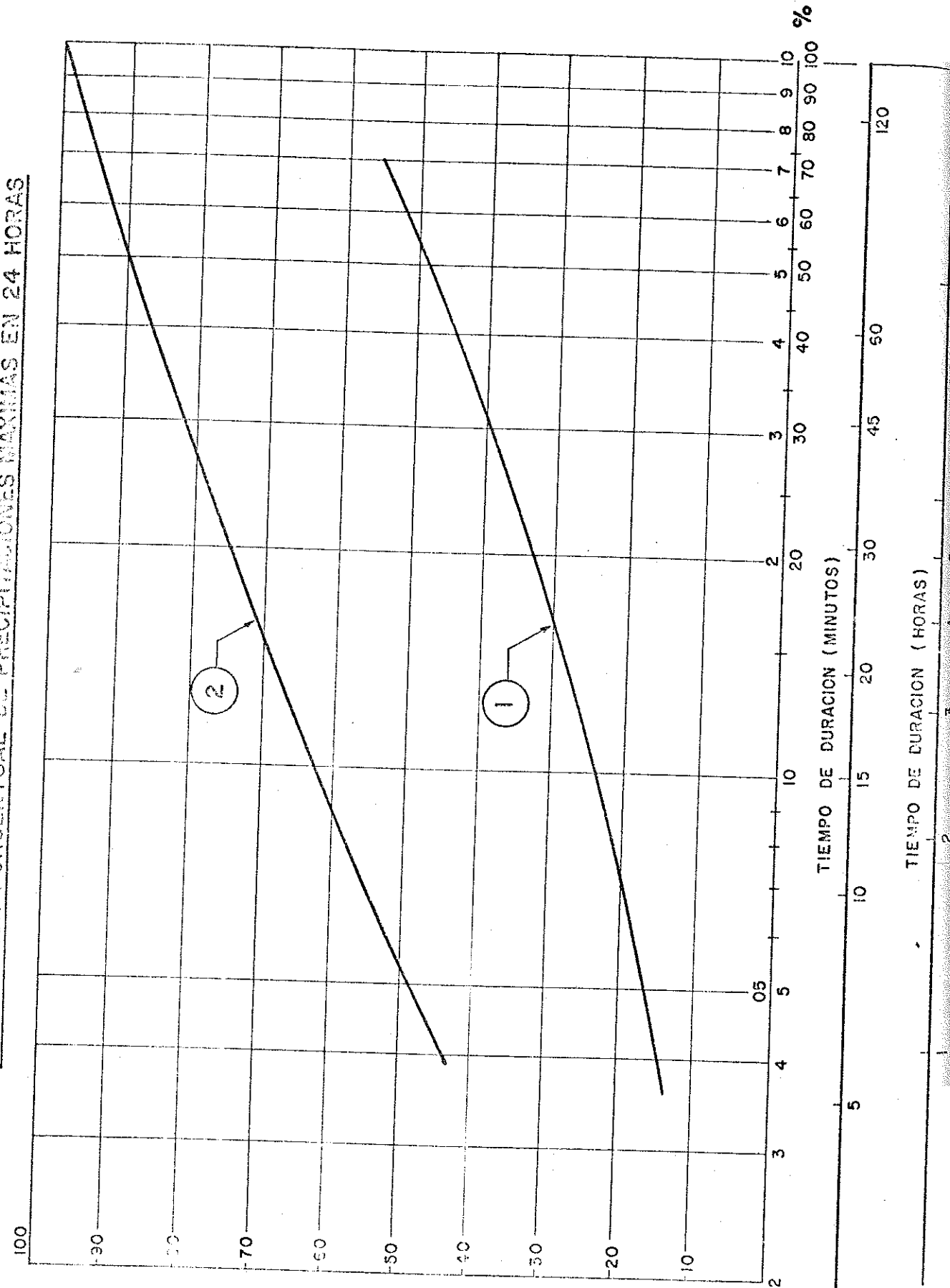
PRECIPITACIONES MAXIMAS EN INTERVALOS CORTOS DE TIEMPO

Período de Retorno (años)	PRECIPITACIONES MAXIMAS (MM)									
	MINUTOS					HORAS				
	5	10	15	20	30	1	2	6	12	24
ZONA A										
5	6	8	10	12	14	18	24	32	36	40
10	8	10	13	15	18	23	30	40	45	50
25	9	12	15	18	21	27	36	48	54	60
50	10	13	16	20	23	29	39	52	59	65
ZONA B										
	5	10	15	20	30	1	2	6	12	24
5	8	11	14	17	19	25	33	44	50	55
10	10	13	16	20	23	29	39	52	59	65
25	12	16	20	24	28	36	48	64	72	80
50	14	18	23	27	32	41	54	72	81	90
ZONA C										
	5	10	15	20	30	1	2	6	12	24
5	8					23	30	40	45	50
5	8	10	13	15	18	23	30	40	45	50
10	9	12	15	18	21	27	36	48	54	60
25	11	14	18	21	25	32	42	56	63	70
50	12	16	20	24	28	36	48	64	72	80

INTENSIDADES MAXIMAS HORARIAS

Período de Retorno (Años)	Tiempo de Duración (Minutos)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
ZONA A										
5	72	48	40	36	31	28	26	23	20	18
10	90	60	50	45	38	35	32	29	25	23
25	108	72	60	54	46	42	38	35	30	27
50	117	78	65	59	50	46	40	38	33	29
ZONA B										
5	99	66	55	50	42	39	36	32	28	25
10	117	78	65	59	50	46	40	38	33	29
25	144	96	80	72	61	56	51	47	40	36
50	162	108	90	81	69	63	59	53	45	41
ZONA C										
5	90	60	50	45	38	35	32	29	25	23
10	108	72	60	54	46	42	38	35	30	27
25	126	84	70	63	54	49	45	41	35	32
50	144	96	80	72	61	56	51	47	40	36

DISTRIBUCION PORCENTUAL DE PRECIPITACIONES MAXIMAS EN 24 HORAS



4.5.

Sobre análisis hidroenergético para determinación del volumen mínimo de reservorio de regulación diaria: en base a la adopción del régimen diario de trabajo de una central hidroeléctrica, que cubra proporcionalmente la curva de demanda diaria de un sistema, se determina el volumen mínimo necesario de un reservorio de regulación diaria que opere sobre esta hipótesis.

Anexo 27.- Registro de demanda para el día típico de un sistema.

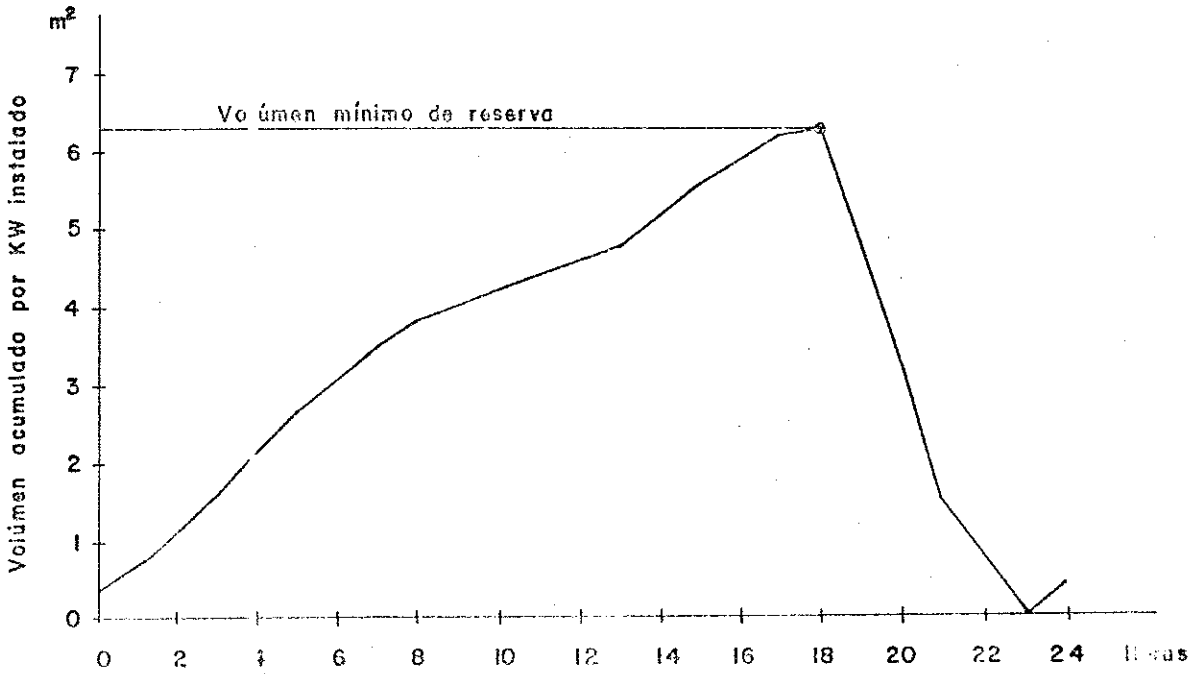
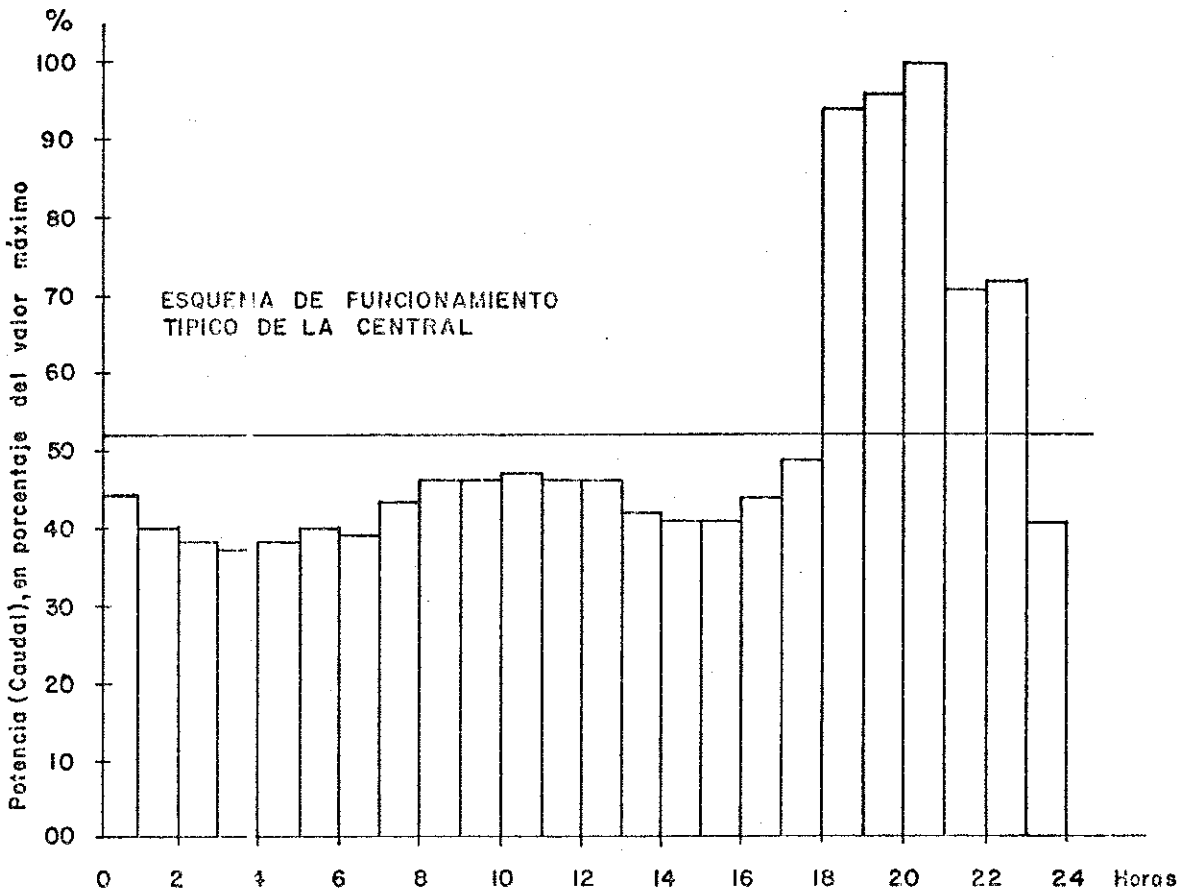
Anexo 28.- Simulación de la operación de un reservorio de regulación diaria.

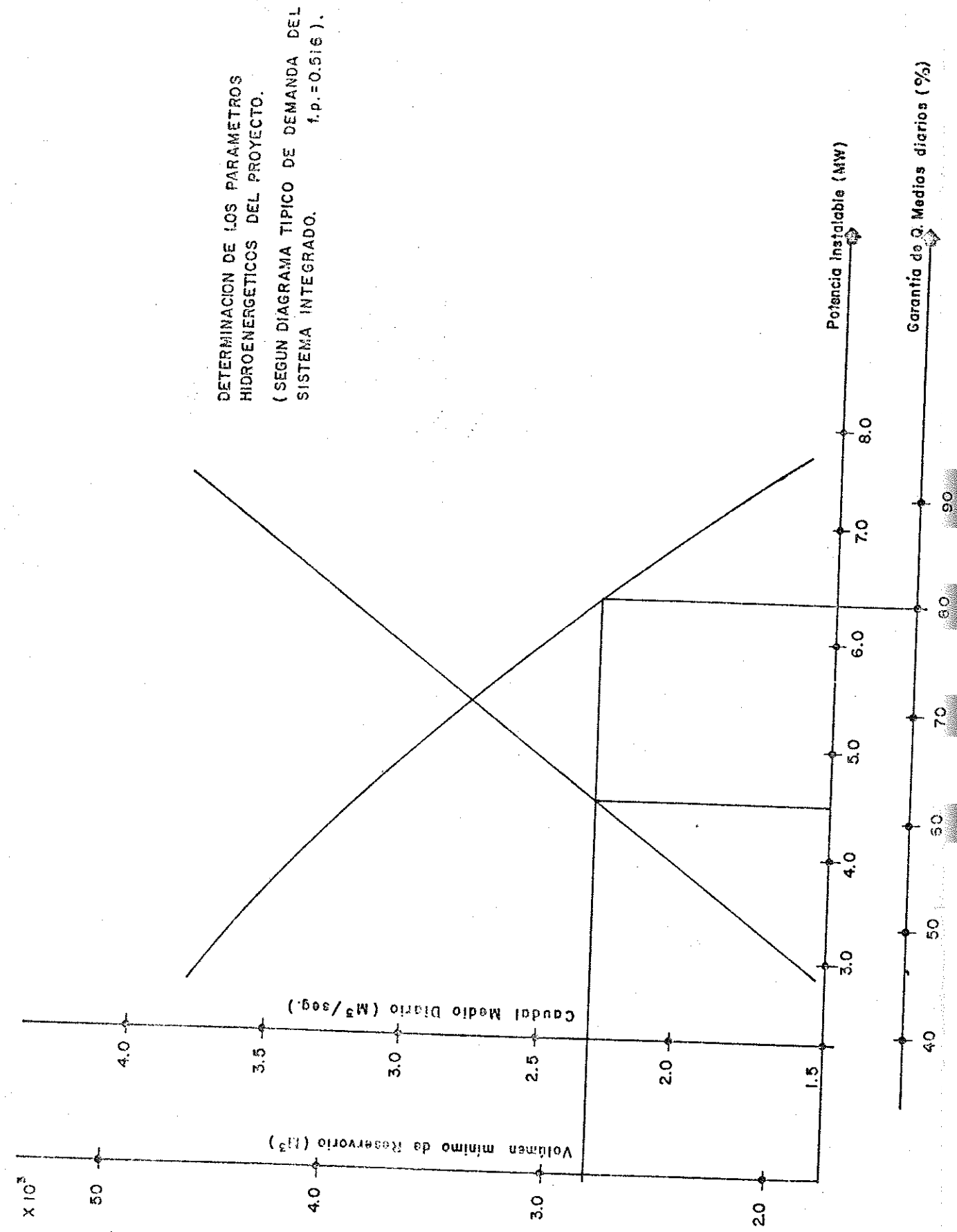
Anexo 29.- Parámetros hidroenergéticos del proyecto.

REGISTRO DE CARGA DEL DIA DE MAXIMA DEMANDA
DEL DIA TIPICO

HORAS	CARGA KW	
	DIA DE MAX. DEMANDA	DIA TIPICO
0:00	3.260	3.520
1:00	2.840	3.230
2:00	2.685	3.010
3:00	2.635	2.970
4:00	2.690	3.010
5:00	2.940	3.200
6:00	3.135	3.100
7:00	3.600	3.420
8:00	4.350	3.670
9:00	4.220	3.700
10:00	4.640	3.770
11:00	4.380	3.670
12:00	3.780	3.660
13:00	3.410	3.390
14:00	3.740	3.250
15:00	4.330	3.270
16:00	4.445	3.550
17:00	7.985	3.930
18:00	9.130	7.480
19:00	10.480	7.640
20:00	9.765	7.980
21:00	8.175	5.700
22:00	6.725	5.770
23:00	4.410	3.270
ENERGIA GENERADA (KWH)	117.750	99.160

PROYECTO
Simulación de la operación del embalse de
regulación diaria.





4.6.

Sobre presentación de resultados.

Anexo 30.- Parámetros hidrológicos en los sitios de proyectos hidroeléctricos.

PARAMETROS HIDROLOGICOS EN LOS SITIOS DE PROYECTOS HIDROELECTRICOS

CUADRO Nº 1													
No.	PROYECTO	RIO	LATITUD (N)	LONGITUD (W)	COTA (m)	LONG. RIO (km)	AREA CUENCA (km ²)	ELEV. MEDIA CUENCA (m)	PRECIP. MEDIA ANUAL (mm)	CAUDAL MEDIO MULTI- ANUAL (m ³ /s)	RENDIMIENTO MEDIO MULTIANUAL		OBSERVACIONES
											1.9	-1.9	
											(l/s/km ²)	(mm)	

CUADRO N° 2										
N°.	PROYECTO	RIO	CAUDALES MAXIMOS INSTANTANEOS (m /s) DE PROBABILIDADES ESTADISTICAS				VOLUMENES MEDIOS ANUALES DE SEDIMENTOS (Mm³/año)	CAUDALES MEDIOS DIARIOS ASEGURADOS		OBSERVACIONES
			0.01 %	0.1 %	1 %	4 %		80 %	95 %	

CUADRO Nº 3															
No.	PROYECTO	RIO	CAUDALES MENSUALES PROMEDIOS MULTIANUALES 1.9 -1.9 (m /s)												DURACION DEL ESTIAJE INTER AN (meses)
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	

No.	PROYECTO	RIO	DISTRIBUCION PORCENTUAL DE VOLUMENES MEDIOS MENSUALES DENTRO DEL AÑO (%)											
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

No.	ESTACION HIDROMETRICA	CAUDALES MEDIOS ANUALES (m ³ /s) DE PROBABILIDADES ESTADISTICAS												COEF K = $\frac{Q_{99.9\%}}{Q_{0.999\%}}$ O CIP. 50 %					PROBABILIDADES ESTADISTICAS				
														3 %	5 %	10 %	20 %	50 %	80 %	90 %	95 %	97 %	
		3 %	5 %	10 %	20 %	50 %	80 %	90 %	95 %	97 %	3 %	5 %	10 %	20 %	50 %	80 %	90 %	95 %	97 %				

4.7.

Sobre el costo de las Investigaciones necesarias para la evaluación del medio físico:

Anexo 30.- Cuadro No. 1 Porcentaje del costo global de los trabajos de Hidrología, Geología y Geotécnica.

EVALUACION DEL MEDIO FISICO

El siguiente cuadro presente los porcentajes del costo global que significa, dentro del estudio de pequeñas centrales hidroeléctricas, las investigaciones relacionadas con la evaluación del medio físico.

Estos valores son tomados de la experiencia de Consultora Hidrotécnica del Ecuador COHIEC C. LTDA., que ha realizado varios proyectos de centrales de pequeñas y mediana capacidad a diferentes profundidades del estudio.

PROYECTO	CAPACIDAD	NIVEL DEL ESTUDIO	Porcentaje del Costo Global	
			Hidrología	Geología Geotecnia
El Ambi	8.000	Revisión y rediseño	20	20
Intag (*)	44.000	Factibilidad .	10	20
San Miguel de Car	4.500	Diseño	12	18
Macas-Abanico (*)	140.000	Prefactibilidad	18	—
Centrales Medianas (*)	40.000	Factibilidad	10	16
Saymirin (*)	14.000	Diseño	—	12

(*) NOTAS:

El Proyecto Intag tiene un total de 44.000 Kw. de potencia instalable en un sistema en cascada de 3 aprovechamientos.

El Proyecto Macas-Abanico, está considerado en este cuadro pues su concepción inicial prevé la utilización de 6.000 Kw. El estudio realizado por COHIEC C. LTDA. demostró la factibilidad de un aprovechamiento mayor.

El Proyecto de Centrales Medianas (INECEL) tiene un total de 40.000 Kw. de potencia considerando tres aprovechamientos.

En el Proyecto Saymirín no se realizó trabajos de Hidrología, por cuanto es una central existente que disponía de parámetros hidrológicos anteriormente definidos.

4.7. BIBLIOGRAFIA:

— Introduction to Hydrology	W. Viessman y otros
— Ingeniería de los Recursos Hidráulicos	R. K. Linsley J. B. Franzini
— Centrales Hidroeléctricas	F. F. Gubin (en ruso)
— Problems in Applied Hydrology	E. F. Schulz
— Análisis de Intensidades Máximas en el Ecuador.	A. Zurita M. de la Rosa
— Frequency and risk Analises in Hydrology	G. W. Kite
— Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey	H. C. Riggs Frequency Curves
— Idem. General Procedure for Gangin Streams	R. W. Carter
— Manual of Hidrology: Part 3 Flood-Flow techmiques, Flood-Frecuency Analises	T. Dalrymple
— Energía Hidroeléctrica	M. Viejo Zumbicaray P. Alonso
— Hydrology of spillway desing: Small Structures - 21 - Limited data (Jaurnal of the Hydraulies Division ASCA)	H. Ogrosky
— Hidrologie Statistique Approgondie	D. Duband
— Tratado de Hidrología Aplicada	G. Remeneiras
— Manual de Hidrología	Rafael Heras

II

**02. ELEMENTOS DE GEOLOGIA, GEOTECNIA
GEOMORFOLOGIA Y ECOLOGIA**

RAUL MARURI

INDICE

1. INTRODUCCION
2. LA INVESTIGACION GEOTECNICA
3. LA INVESTIGACION GEOTECNICA EN LOS PROYECTOS PEQUEÑOS
 - 3.1. El terreno
 - 3.1.1. Las Rocas
 - a) Tipos de Rocas
 - b) Estructuras rocosas
 - 3.1.2. Los suelos
 - 3.1.3. Geomorfología
 - 3.2. La investigación
 - 3.2.1. Revisión bibliográfica
 - 3.2.2. Mapeo geotécnico
 - 3.2.3. Zonificación geotécnica
 - 3.2.4. Localización de proyectos
 - 3.2.5. Etapas de construcción y operación
4. ECOLOGIA
 - 4.1. Período de construcción
 - 4.2. Variación térmica
 - 4.3. Acción en la Fauna Acuática
 - 4.4. Erosión Aguas Abajo
 - 4.5. Efectos menores
 - a) Proliferación de algas
 - b) Plantas acuáticas
 - c) Vida salvaje

5. BIBLIOGRAFIA

- 5.1. Bibliografía básica
- 5.2. Bibliografía adicional

6. ANEXOS

1. Zonificación geotécnica del proyecto hidroeléctrico de TENA
2. Figuras
3. Cuadro de costos referenciales

ELEMENTOS DE GEOLOGIA, GEOTECNIA, GEOMORFOLOGIA Y ECOLOGIA

1. INTRODUCCION

En el presente documento se discute algunos elementos de Geología, Geotecnia, Geomorfología y Ecología, directamente relacionados con el diseño de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH).

Se intenta orientar la discusión, antes que mediante una separación en cuatro subtemas, a través de una discusión integral de los correspondientes conceptos, por otro lado interrelacionados entre sí y por lo tanto difíciles de separar.

Este enfoque es válido en general para la investigación Geotécnica de toda obra de Ingeniería Civil, pero tiene mayor validez en el caso de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. En las PCH, su pequeña magnitud por un lado, y la necesidad de hacer un enfoque regional por otro, hace indispensable la realización de un estudio integral, de mayor efectividad, y de menor costo.

Una ventaja adicional es la de que este enfoque integral asegurará una cabal comprensión de los problemas geotécnicos involucrados en un proyecto, y la incorporación en el diseño de sus adecuadas soluciones; se plantea la conveniencia de una investigación de cuencas o subcuencas, y de una zonificación geotécnica, como enfoque más efectivo para pequeñas Centrales.

El replanteamiento del tema que se propone hacer, podría definirse entonces como: "La investigación Geotécnica en el diseño de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas".

2. LA INVESTIGACION GEOTECNICA

Aceptado lo anterior, es necesario revisar el concepto de la investigación Geotécnica, como un proceso continuo que se inicia a nivel del estudio preliminar y culmina finalmente con el control de la operación del proyecto.

La investigación cubriría entonces, las siguientes etapas de un proyecto:

1. Estudio preliminar,
2. Estudio de Prefactibilidad,
3. Estudio de Factibilidad,
4. Diseño,
5. Construcción; y
6. Operación.

La aceptación de este esquema es generalizada; existe un consenso a nivel de los países subdesarrollados, de que no es siempre necesario que las anteriores etapas sean independientes. Este criterio está condicionado al tipo de proyecto o la modalidad de análisis elegida, aunque la decisión final estará todavía condicionada a las exigencias de

los entes de crédito nacionales o internacionales.

El conflicto que se presenta con frecuencia es el de la factibilidad económica vs. la función social de la obra, conflicto que debe ser definido a nivel de Políticas.

En el caso concreto de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, amerita la necesidad de eliminar ciertas etapas, limitándolas a las siguientes:

1. Estudio preliminar de factibilidad,
2. Diseño,
3. Construcción; y
4. Operación.

Se limitará la discusión a plantear cuales son las condiciones y características que deberá tener la investigación geotécnica en general y luego su aplicabilidad a las denominadas Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

El objetivo específico de toda investigación geotécnica es el de maximizar el conocimiento de las condiciones y propiedades del terreno en que se proyecta la implantación de una obra de ingeniería, al menor costo posible y a la brevedad posible. Estos variarán evidentemente de acuerdo con las condiciones del sitio determinado, y a la habilidad del ingeniero geotécnico de seleccionar el método, o la combinación de métodos más adecuados para la investigación del subsuelo.

Todos los métodos de investigación geotécnica tienen limitaciones, debiendo ser utilizados en conjunto y dentro de un fuerte esquema o marco geológico.

El ingeniero geotécnico tiene que estar consciente de las limitaciones de los métodos e instrumentos. Muy frecuentemente los fabricantes, y también los ingenieros, sobrevaloran la capacidad de los métodos e instrumentos.

El uso simultáneo de dos o más métodos permitirá su mutuo control, complementándose sus limitaciones.

La investigación geotécnica deberá ser un proceso continuo y creciente en profundidad, desarrollándose a manera de vueltas (loops), (Stevenson and Moore, 1976) (15) en cada una de las cuales se profundiza la investigación, tanto de los problemas no totalmente dilucidados en la vuelta anterior o se analiza nuevos problemas que se presentan, hasta poder determinar con razonable certeza las características y magnitud de los factores geotécnicos presentes, su interrelación, y su influencia en las obras proyectadas.

El esquema geológico de que se habla arriba, implicará conocimientos de la Geología Histórica, la Geomorfología, la Estratigrafía y la Geología Estructural del área; ello permitirá al Ingeniero Geotécnico inferir los factores geotécnicos posibles y los problemas involucrados, orientándolo en la selección de los métodos de investigación más apropiados, en cada vuelta (loop) a realizarse, y en la elaboración del programa de ensayos en sitio y en laboratorio que deban efectuarse (en caso de ser necesarios), a fin de poder evaluar las propiedades geomecánicas de los materiales geotécnicos involucrados.

Es difícil definir una "Investigación Geotécnica adecuada", porque ello dependerá de las características en cada sitio.

Existe siempre la posibilidad de no detectar un factor crítico, aún con un programa de investigación bien planeado; un programa de investigación geotécnica adecuado deberá por tanto minimizar esta posibilidad.

El Ingeniero Geotécnico deberá esforzarse al máximo para poder determinar las condiciones geotécnicas detalladas de un sitio, pero más aún para poder interpretar apropiadamente sus efectos en el comportamiento de la obra de Ingeniería.

Las fallas de tipo geotécnico de las obras hidráulicas de ingeniería muestran a lo largo del tiempo, y para diferentes condiciones, dos casos bien diferenciados:

1er. Caso: Factores no detectados:

- a) Factor pequeño
- b) Limitación de los métodos de investigación,
- c) Investigación insuficiente.

2do. Caso: Mala interpretación de la información.

En los proyectos pequeños (8 - 12), lo mismo que en los grandes (2), las mayores fallas corresponden a problemas geotécnicos, e hidrológicos.

Ortiz (12) reporta fallas en proyectos de la Secretaría de Recursos Hidráulicos de México, debidas a las siguientes causas:

Problemas geotécnicos del vaso o boquilla	40	o/o
Problemas hidrológicos	40	o/o
Otros problemas	20	o/o

Martínez (8) analiza fallas en proyectos pequeños de la Secretaría de Agricultura y Ganadería de México y señala también que las principales causas son dos: hidrológicas y geotécnicas.

Estas últimas se identifican como: Tubificación, agrietamiento, grietas en el vaso, y deslizamiento de taludes.

3. LA INVESTIGACION GEOTECNICA EN LOS PROYECTOS PEQUEÑOS.

Una revisión de buena parte de la literatura relacionada con pequeñas Centrales Hidroeléctricas permite evaluar las tendencias respecto a su investigación geotécnica.

En el Simposio de México (24) hay contribuciones muy interesantes y valiosas, sin embargo en la mayoría de ellas se subestimaba las investigaciones geotécnicas. Se analiza tan solo la factibilidad de obtener el volumen de agua requerido, la selección morfológica del sitio, la disponibilidad de materiales de construcción, la permeabilidad, la estabilidad de taludes y los métodos constructivos.

En muchas ocasiones, poco o ningún estudio geológico ha sido efectuado en programas de pequeños Proyectos Hidroeléctricos (8, 10).

Se ejecuta algo de estudios de suelos y se hace solo la suposición de roca dura o suelo. En casi todos los estudios se ha enfatizado los problemas de materiales y métodos de construcción.

De la bibliografía consultada, se nota en general una tendencia a utilizar métodos de investigación y de construcción similares a los utilizados en grandes proyectos.

Pero, como plantea Orozco (11), "Hasta cuando se puede simplificar la metodología de investigación? y Hasta donde se puede ir en los riesgos a tomar?". . .

Se podría plantear varias respuestas a estas preguntas. La una sería, la de mantener el nivel geotécnico de la investigación en base a paquetes de proyectos, esto es efectuar el estudio de un conjunto de proyectos pequeños en una misma cuenca o subcuenca.

Otra respuesta no excluyente de la anterior, sino más bien complementaria, sería de suplir los pocos datos bibliográficos previos o actuales posibles (nivel o profundidad de la investigación) con un criterio Ingenieril agudo (Marsal, 1).

Esta segunda respuesta, como muy bien lo apunta el mismo Marsal, implica el hecho de que la falta de información sobre Cimentaciones hace correr un riesgo al Ingeniero (y obviamente al pueblo contribuyente).

Los proyectos pequeños implican que con la menor inversión de dinero se obtiene un máximo de conocimientos. Pero por ningún caso esto debe entenderse como que se debe escatimar gastos necesarios o indispensables para su ejecución.

El conflicto que se le presenta al Planificador de pequeñas Centrales Hidroeléctricas, es el de tener que escoger entre: Costo elevado de los estudios detallados geotécnicos e hidrotécnicos; y

Elevación de costos de construcción al diseñar obras con factores de seguridad elevados.

Estos factores de seguridad elevados intentarán (?) cubrir el desconocimiento de importantes factores geotécnicos que pueden estar presentes en un sitio determinado.

A estos, Ralph Peck los llamó "Coeficiente de Ignorancia".

No se debería desdeñar como alternativa válida, aquella que planteara Terzaghi para estudios en terrenos de características altamente heterogéneas, como los depósitos glaciales, donde cualesquier investigación por detallada que fuese, sería siempre insuficiente.

El método de "observación" como lo llamó Terzaghi y fue aplicado en los estudios para la Presa Vermellón consistió en minimizar la investigación, y efectuar un diseño suficientemente flexible para que pueda ser modificado en el período de construcción, de acuerdo con los factores geotécnicos que se encontrasen en el terreno. Esta inquietud queda aquí planteada ante ustedes, y es solamente el Ing. el que en cada caso particular deberá tomar las decisiones.

En general, se planteará a continuación dos conclusiones, que son clara conciencia entre los Ingenieros que trabajan en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en todo el mundo:

1. Es necesario y conveniente que se efectúe estudios regionales, antes que de proyectos individuales; y
2. Es conveniente la participación de ingenieros geotécnicos de vasta experiencia, lo que solo resulta económicamente posible, al efectuar estudios regionales.

3.1. EL TERRENO

El terreno, denominación genérica con la que se llama la parte exterior de la corteza terrestre donde el ingeniero inserta sus obras, está constituido por dos tipos básicos de materiales: roca y suelo.

Ambos materiales son agregaciones de partículas: cristalinas o amorfas, todas ellas producto del proceso geológico de alteración o cambio de la corteza terrestre.

El Ing. Geotécnico desarrolla sus actividades en directa relación con dichos materiales, y específicamente en relación con sus propiedades físico-químicas y en especial su comportamiento geomecánico ante la acción de fuerzas o sollicitaciones que le son transmitidas por las obras de ingeniería, o los procesos tendientes a su construcción.

Se encuentra también el Ing. Geotécnico involucrado en la búsqueda y localización de materiales con propiedades geomecánicas adecuadas para la construcción de dichas obras.

Requerirá por lo tanto de conocimientos suficientes de geología para entender las rocas y de la mecánica de suelos que estudia los suelos.

3.1.1. Las Rocas

La geología es la ciencia que estudia a la tierra, los materiales que la constituyen, su historia, los procesos que la han estado y están modelando, así como las estructuras resultantes.

Para efectos didácticos, los conocimientos de que disponemos de la corteza terrestre se agrupan en una serie de disciplinas como son: Geología Física, Geología Estructural, Geomorfología, Mineralogía, Petrografía, Estratigrafía, etc.

A través de su estudio se intenta obtener un conocimiento sistemático de las características y propiedades de la Tierra.

Para efecto del análisis geológico en relación a las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, se intentará una metodología más de acuerdo con las características de las PCH, esto es el estudio integrado de las diferentes disciplinas relacionadas con la Geología, enfocando el problema frente a una dicotomía: substancia rocosa y macizo rocoso, lo que facilitará el enfoque geotécnico a realizarse.

En verdad, la actividad del ingeniero geotécnico se va a desarrollar sobre una porción muy pequeña de la tierra, que se la denomina la corteza terrestre, aunque en ella influyan muy fuertemente todos los fenómenos más profundos que se desarrollan en la tierra.

Se puede asegurar con bastante certeza, que la tierra no está en un estado estático, sino más bien en un proceso dinámico en el que las formas y masas de la corteza están en un permanente proceso de cambio.

Este proceso implica ya sea, desplazamientos de masas de diferentes tamaños, levantamientos, hundimientos y erosión permanente desde su origen, esto es durante un período de tiempo estimado al momento en aproximadamente cinco mil millones de años.

Dentro de este proceso, la acción del hombre, cuya existencia probable se estima en cuatro millones de años, solo ha significado un pequeñísimo rasguño, siendo su incidencia mas importante en los últimos 100 años, en razón del notable desarrollo tecnológico asociado con las grandes obras de ingeniería y explotación del medio ambiente: Presas, Túneles, Carreteras, explotación minera y de hidrocarburos, etc.

Las rocas, elementos básicos que forman la corteza terrestre están constituidas por uno o más minerales, diferentes en composición y proporción. Sin embargo, el comportamiento ingenieril de las rocas estará condicionado no solo por los minerales que las constituyen, sino también por su origen y sus estructuras.

Los minerales que constituyen las rocas y suelos de la corteza terrestre son predominantemente los silicatos que acreditan el 90 o/o de ellos, seguidos por los óxidos, sulfuros, carbonatos y sulfatos que acreditan el 10 o/o restante.

a) Tipos de rocas

Respecto a su origen, las rocas se clasifican en tres grupos:

1. Rocas ígneas.

Son aquellas producidas por enfriamiento rápido o lento de un magma y su consecuente cristalización. La rapidez con que ocurra este proceso dará origen a rocas ígneas con cristales de diferentes tamaños, existiendo la posibilidad de que cuando el fenómeno es muy rápido, de origen a rocas amorfas, y cuando el enfriamiento es lento de origen a rocas de cristales gruesos.

2. Rocas metamórficas.

Son aquellas producidas a partir de cualesquier roca, sea ígnea, sedimentaria u otra metamórfica, a consecuencia de altas presiones y temperaturas. El fenómeno produce un cambio estructural de la roca original, con crecimiento de cristales, formación de nuevos minerales, y orientación preferencial de los mismos, lo que le confiere a la roca metamórfica una estructura especial con superficies predominantes de foliación, y hacen imposible las mas de las veces de reconocer la roca primitiva.

3. Rocas sedimentarias.

Producidas por acumulación de sedimentos provenientes de una roca preexistente transportados (agua, viento, gravedad) y posteriormente diagenetizados (convertidos en roca) por cementación y compactación gravitacional. De acuerdo al tamaño de los granos, las rocas sedimentarias se clasifican en: conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas.

El modo de deposición le da a la roca una estructura estratificada.

b) Estructuras rocosas

Existen dos tipos; clasificando las estructuras de acuerdo a su origen con respecto al de la roca.

Estructuras primarias, que están directamente relacionadas con el tiempo en que se constituyó la roca: diferenciación magmática de las rocas ígneas, planos de estratificación de las rocas sedimentarias, o superficies de foliación (asociadas con microfisuras y vacuolas) en las rocas metamórficas. Estas estructuras primarias afectan básicamente a la sustancia rocosa.

El segundo tipo está constituido por las estructuras secundarias, producto de fenómenos mecánicos que han afectado a un macizo rocoso, y han sido producidas por fenómenos tectónicos, relajamiento de tensiones, etc., dentro de las que se agrupa a las fallas, zonas cizalladas, y diaclasas, o discontinuidades en general.

Las estructuras primarias dan en general direcciones preferenciales de debilidad a lo largo de las que puede presentarse superficies de falla.

Las estructuras secundarias son ya zonas falladas, por lo tanto débiles, con una resistencia residual, a lo largo de las que preferentemente se puede producir un fallamiento del terreno.

Tanto las estructuras primarias como las secundarias, no solo condicionan el comportamiento geomecánico del terreno, sino que son factor decisivo en el flujo preferencial del agua a través del mismo, y en la acción de las presiones hidrostáticas e intertiales en los terrenos y en las obras en ellos insertadas.

Su importancia en el comportamiento de las rocas y de los macizos rocosos, tienen cada vez más reconocimiento.

El comportamiento de un macizo en el que no se presentan estructuras secundarias de ningún tipo, estaría solamente condicionado por las propiedades de la sustancia rocosa, y por la anisotropía que le imparten las estructuras primarias.

Sin embargo, en la mayor parte de los casos, el comportamiento de un macizo estará predominantemente condicionado por las estructuras secundarias, que convierten al macizo en un medio eminentemente discontinuo.

El ingeniero geotécnico tiene en general que tratar con macizos fuertemente influenciados por estructuras secundarias, y deberá analizar la relación, entre las direcciones y magnitud de las fuerzas transmitidas por las obras de ingeniería y las direcciones de las estructuras secundarias y la resistencia disponible.

Sin embargo, las rocas, y en general los macizos rocosos no se encuentran generalmente a nivel de superficie. En la mayor parte de las superficies continentales, y en los fondos marinos, los macizos rocosos se encuentran parcial o totalmente recubiertos de gruesos depósitos de suelos, producto de la meteorización de las rocas, y del transporte y deposición de una parte de los productos resultantes.

La forma exterior que tiene la corteza depende de las características y propiedades de la roca original y del suelo resultante, así como de las características de los agentes de transporte y medio de deposición, y del estado de equilibrio en que la corteza se encuentra en un momento determinado.

Es decir que, la forma actual de la corteza es solo un estado en un proceso dinámico permanente de cambio.

3.1.2. Los suelos

La meteorización es probablemente el factor que mas influye en la modelación de las formas terrestres. Consiste básicamente en la alteración del terreno mediante dos procesos:

1. Un proceso físico, en el que se produce la fracturación del terreno por acción de los agentes meteoricos; y
2. Un proceso químico, en el que se produce alteración química.

La meteorización física se inicia con la eliminación de capas de cobertura por erosión, subsecuente relevamiento de tensiones preexistentes y presencia de fracturas. Proseguirá el proceso de fracturación por dilatación y contracción del terreno, generalmente no elástico, y la acción del agua producto de la lluvia dentro de las fracturas.

En climas fríos la congelación del agua generará fuerzas expansivas adicionales que contribuirán al fracturamiento cada vez mayor del material.

El acceso del agua al macizo del terreno a través de las fracturas produce fenómenos de disolución de los minerales más solubles, así como acción química del anhídrido carbónico y ácidos existentes en las aguas meteoricas, y de los ácidos húmicos arrastrados por infiltración.

Se podría resumir en que: la meteorización física actúa en las rocas desagregándolas y descomponiéndolas en sus minerales constitutivos, mientras la meteorización química va a actuar sobre dichos minerales, alterándolos y produciendo otros nuevos.

En las rocas ígneas y metamórficas la meteorización va a convertir los minerales constitutivos de las rocas en minerales arcillosos, mientras que en las rocas sedimentarias, la meteorización va a disolver los materiales cementantes.

La meteorización o intemperismo de las rocas está en relación inversa con la presión y temperatura en que se formó la roca. Las rocas más estables y menos intemperizadas son aquellas formadas a temperaturas y presiones menos bajas a las existentes al momento en la corteza terrestre.

La rapidez relativa del intemperismo químico tiene el mismo orden que las series de reacción de Bowen para la recristalización del magma en las rocas ígneas (Fig. 1).

La meteorización va a provocar que una parte de los materiales producto de la misma permanezcan en el sitio, constituyendo los suelos residuales.

Las condiciones de precipitación pluvial, pendiente y drenaje del terreno, van a causar el desarrollo de diferentes niveles de meteorización, con propiedades peculiares bien diferenciadas, en el llamado perfil de meteorización (Fig. 2).

La erosión consiste en la remoción de materiales preexistentes en la superficie del terreno por alguno de los agentes identificados con el desgaste de masas:

1. Gravedad,
2. Agua,
3. Hielo; y
4. Viento.

Esta remoción se efectuará en aquellos materiales producto de la meteorización o en depósitos sueltos, y hacia abajo de la pendiente de los taludes naturales, y transportados ya sea en solución o suspensión, por los agentes de transporte, para ser finalmente depositados como materiales sueltos, constituyendo los suelos transportados, los que son de 4 tipos diferentes según sea el agente de transporte:

1. Depósitos coluviales de pie de talud,
2. Depósitos aluviales,
3. Depósitos glaciales y
4. Depósitos eólicos.

Todos ellos con características estructurales y geomorfológicas bien diferenciadas.

La remoción de los materiales superficiales sueltos, permitirá el acceso de los agentes de meteorización a una mayor profundidad. Seguirá un proceso de disección del macizo, una regresión del talud, y finalmente un peneplanamiento del área.

La geología va a influir en forma decisiva en el patrón de drenaje, cuya observación permitirá inferir los tipos de roca subyacentes.

La interestratificación de rocas sedimentarias por otro lado con diferentes resistencias a la erosión permite el desarrollo de patrones geomorfológicos característicos.

La meteorización de rocas calizas va a producir cráteres por colapso de los techos de las cavernas, característicos en una morfología Karstica.

3.1.3. Geomorfología

El estudio de la forma de la corteza terrestre no significará entonces solo un conocimiento físico de la forma actual de la corteza, sino también de los procesos que la están modificando.

Solo ese conocimiento nos permitirá inferir la forma en la que las solicitaciones transmitidas por las estructuras influirán en los procesos, las formas resultantes; las que a su vez podrán interaccionar con las obras construídas.

Las formas del terreno están directamente relacionadas con la geología, y concretamente con las características intrínsecas y extrínsecas de las rocas subyacentes, así como con los fenómenos de modelación de la superficie de la corteza terrestre, por toda la serie de agentes que producen el desgaste de las masas. Una geología existente afectada por procesos a lo largo del tiempo, da lugar a formas de la superficie determinadas.

Los procesos incluyen la meteorización, la erosión y la deposición. Pudiendo distinguirse formas del terreno correspondientes a erosión y a deposición.

Dentro de estos procesos, el tiempo tiene una importancia especial, así como el conocimiento de la historia geomorfológicas, y de los suelos que cubren las formas actuales.

La evaluación geomorfológica regional se hace principalmente mediante interpretación de imágenes, y al nivel considerado, mediante fotointerpretación en la escala conveniente. Para el efecto se utiliza pares de imágenes o de fotografías aéreas de acuerdo al caso y un estereoscopio, a fin de obtener imágenes tridimensionales del terreno, que permitan el estudio de la morfología.

3.2. LA INVESTIGACION

El costo de las investigaciones geotécnicas de las pequeñas Centrales Hidroeléctricas, amerita consideraciones especiales, que ya han sido tratadas en varios foros internacionales.

Los países subdesarrollados no pueden permitirse el lujo de tener fallas en sus obras de ingeniería, aunque estas obras sean pequeñas.

El compromiso que los ingenieros tenemos para con nuestros pueblos, nos obliga a ejecutar investigaciones eficientes que aseguren el éxito de las obras.

La ejecución de estudios geotécnicos con la profundidad necesaria para proyectos pequeños resulta frecuentemente muy onerosa, lo que desanima en general al administrador público en su ejecución.

La solución para el problema, como ya fue mencionado anteriormente es la de efectuar el estudio de cuencas o subcuencas completas, donde se proyectaría la instalación de varias microcentrales.

En base a lo anterior, se planteará a continuación una metodología orientada a la investigación geotécnica de una cuenca o subcuenca completa, donde se proyecta la construcción de varias microcentrales.

En el cuadro 1 adjunto se detalla el o/o de costos de los estudios geotécnicos para varias centrales hidroeléctricas pequeñas estudiadas por Constructora Hidroeléctrica del Ecuador (COHIEC) para el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL).

3.2.1. Revisión Bibliográfica

La primera etapa de la investigación está constituída por una revisión bibliográfica lo más completa posible de toda la información disponible sobre el área a ser investigada.

La información a recopilarse deberá incluir informes y estudios geológicos y geotécnicos, demográficos, edafológicos, geográficos, socio-económicos, meteorológicos, etc. así como Memorias, planos, especificaciones y más información disponible, sobre obras de ingeniería efectuadas o proyectadas en el área.

Esta información podrá ser obtenida de entidades públicas y privadas dedicadas a la ejecución de dichas obras.

Especialmente deberá obtenerse las hojas geológicas y topográficas así como imágenes por sensores remotos disponibles que cubran el área a estudiarse.

En base al análisis de la anterior información podrá el ingeniero geotécnico tomar un primer conocimiento general de las condiciones geotécnicas del área a investigarse. Procederá de inmediato a localizar en las imágenes o fotos aéreas y mapas, los diferentes factores geotécnicos identificados previamente en la investigación bibliográfica.

Especial énfasis se pondrá en este nivel, en la identificación de paleodeslizamiento, paleocanales, y las estructuras geológicas mas relevantes, y en la determinación de las características sísmicas del área.

3.2.2. Mapeo geotécnico

En una segunda etapa se procederá a verificar en el terreno inferencias efectuadas a nivel de la interpretación de sensores remotos y a efectuar un mapeo geotécnico general del área, definiendo en lo posible los siguientes puntos:

1. Diferentes tipos de terreno (suelo y roca) presentes en el área, y extensión en superficie de su ocurrencia. Para el efecto se efectuará simultáneamente su muestreo para efectuar análisis de identificación en el laboratorio.

Este muestreo se efectuará en superficie, o con el auxilio de trincheras y calicatas.

2. Identificación de las discontinuidades constituyendo las estructuras secundarias predominantes en el área.

Esta identificación deberá incluir:

- a) Tipo de discontinuidad
- b) Ubicación en el caso de fallas y zonas cizalladas,
- c) Orientación: Rumbo y buzamiento,
- d) Espaciamiento o frecuencia,
- e) Abertura,
- f) Tipo de superficie: planar, ondulada,
- g) Rugosidad de la superficie,
- h) Material de relleno de las discontinuidades abiertas.

3. Condiciones hidráulicas de drenaje terreno, incluyendo informaciones sobre:

- a) Subsistema de flujo en superficie
- b) Subsistema de flujo subterráneo

- c) Posibles interconexiones,

- d) Flujo a través de estructuras primarias y secundarias.

4. Factores geotécnicos especiales como ser:

- a) Indicios de la presencia de paleodeslizamientos: escarpas: de corona y laterales, bulbos de pie, diferencias de vegetación, humedecimiento anormal del talud;
- b) Indicios de la presencia de paleocanales: rastros de meandros abandonados, cortes anormales de taludes, diferencias anormales de vegetación, etc.
- c) Indicios de zonas de reptación (condición de flujo); inclinación de postes, cercas y árboles; pequeñas escarpas parciales subparalelas al rumbo del talud; pequeñas cochas (pisadas de vaca); humedecimiento anormal del talud, etc.;
- d) Indicios de fallas: escarpas anormales; desplazamiento de cercas, hileras de árboles, etc. diferencias de vegetación siguiendo lineaciones conspicuas, etc.

3.2.3. Zonificación geotécnica

En una tercera etapa se deberá proceder a efectuar una zonificación geotécnica del terreno.

Pese a que la zonificación geotécnica ideal sería la denominada paramétrica (5) ella solo puede usarse en general en casos muy simples, donde la superimposición de unos pocos mapas conteniendo los límites de cada factor o parámetro geotécnico, pueda permitir la delimitación de zonas y subzonas geotécnicas y la elaboración del correspondiente mapa de zonificación. Aparentemente no se justifica en la investigación de PCH una tal zonificación que involucraría costos elevados.

Se plantea a continuación un sistema de clasificación del terreno basado en gran parte en el sistema parámetro (5) y en experiencias del grupo de COHIEC en Proyectos de pequeñas Centrales para INECEL en el Ecuador. La clasificación considerada como más recomendable es la basada en la determinación de unidades geomorfológicas modificadas luego en base a la evaluación de un conjunto de parámetros de interés para el geotécnico. La unidad regional del terreno a zonificarse se subdividiría en unidades geomorfológicas denominadas zonas fáciles de identificar y diferenciar por fotointerpretación, y estas en subunidades denominadas subzonas.

Verificada en el terreno, una zona, esta debe estar definida por su geología, clima, similares parámetros geotécnicos y un rango determinado de pequeñas subunidades: las subzonas.

Las subzonas también estarán definidas por su geología, régimen hidráulico y un conjunto de parámetros geotécnicos comunes: pero en forma mucho más restringida que en la zona.

La subzona tendrá en general una forma simple, un substrato homogéneo y un sistema hidrológico (superficial y profundo) simple.

Los parámetros geotécnicos a ser considerados en la zonificación serán aquellos que tengan mayor importancia para el análisis del comportamiento del terreno frente a las solicitaciones a ser transmitidas por las obras, debiendo por lo tanto jerarquizarse la importancia de los mismos, a fin de que las diferentes unidades determinadas representen un patrón similar de comportamiento geotécnico.

En cada caso el Ingeniero seleccionará dichos parámetros, les dará el peso adecuado, y procederá a la delimitación de zonas y sub-zonas.

En general todas las subdivisiones reflejarán el uso que se pretende dar al terreno, pero en forma inevitable involucrará un cierto grado de generalización, ya que no es posible efectuar una completa diferenciación o agrupamiento de los principales parámetros geotécnicos considerados.

Si se quiere que los costos de la investigación se mantenga dentro de un rango aceptable para las pequeñas Centrales Hidroeléctricas, será necesario que la mayor parte del trabajo de zonificación a niveles de zonas y aún de subzonas sea hecho a nivel de fotografías aéreas, con un adecuado control en el terreno.

Algunos de los parámetros más importantes utilizados para la zonificación geotécnica son los siguientes:

1. Morfología y pendiente del terreno;
2. Características climáticas: temperatura y lluvia;
3. Tipo y características del terreno: roca o suelo, y del sustrato existente bajo el suelo y estructura primaria;
4. Patrón de estructuras secundarias;
5. Sistema hidrológico; superficial y profundo;
6. Conductibilidad hidráulica de los terrenos;
7. Disponibilidad de recursos materiales de construcción, hídricos, minerales y aún humanos.

En el anexo 1 se plantea un caso de zonificación geotécnica hecho por COHIEC para un proyecto pequeño de INECEL en el Ecuador.

3.2.4. Localización de Proyectos.

En una cuarta etapa, el Ingeniero Geotécnico ubicará los proyectos en las mejores subzonas geotécnicas, y donde el conjunto de parámetros geotécnicos sea óptimo.

Seleccionados los sitios en que se implantará los diferentes proyectos, muy poca investigación adicional será necesaria, a menos que los diseños seleccionados ameriten la ejecución en sitios concretos de investigaciones de campo adicionales, las que se efectuarán utilizando trincheras y calicatas, y cuando las características de las obras lo exijan perforaciones y recuperación de muestras del terreno para la ejecución de los ensayos geomecánicos que se considere necesarios.

Se determinará a este nivel los parámetros sísmicos a usarse en el diseño, así como la conductibilidad hidráulica de las áreas de implantación de los diferentes proyectos.

En esta etapa se deberá evaluar las fuentes de materiales de construcción para los proyectos, las mismas que fueron ya identificadas en la zonificación. Ellas incluirán áridos para hormigón, materiales para filtros, y materiales para enrocamiento y protección.

Esta cuarta etapa se concluye con el diseño de las obras.

3.2.5. Etapas de construcción y operación

En estas últimas dos etapas que se desarrollan durante los procesos de construcción y operación no se requerirá de una participación permanente del ingeniero geotécnico, sino más bien de un seguimiento, a fin de verificar que las hipótesis e inferencias efectuadas especialmente en las tres primeras etapas se cumplan, o para recomendar cambios en el diseño, cuando ello fuere necesario.

La magnitud de las pequeñas centrales hidroeléctricas no amerita en general la utilización de una sofisticada instrumentación de control. En todo caso sería recomendable que se disponga en las áreas específicas de cada proyecto de un adecuado sistema de control (horizontal y vertical) que permita en cualquier momento verificar el comportamiento de las obras construídas.

4. ECOLOGIA

Toda la bibliografía referente a Pequeñas Centrales Hidroeléctricas coincide en señalar que, la influencia ecológica de los pequeños proyectos individualmente considerados, es pequeña (4, 19, 20).

Pese a ello conviene considerar que la respuesta de la vegetación a la acción del hombre involucrado suelo-agua son a menudo acelerados por la velocidad del cambio, la extensión del cambio, y a veces por la época en que se hizo.

4.1. PERIODO DE CONSTRUCCION

Durante el período de construcción de las obras, deberá arbitrarse severas medidas de control del agua a fin de mitigar la contaminación del agua (Peters, 3). La principal fuente de contaminación durante el proceso de construcción, lo constituye las aguas turbias producidas por:

1. Excavación de fundaciones,
2. Procesamiento de agregados; y
3. Fundida del concreto.

Las aguas así contaminadas y sin tratamiento, podrán:

1. Afectar el agua de consumo humano;
2. Alterar las actividades de riego;
3. Dañar físicamente los recursos pesqueros comerciales o deportivos;

4. Afectar las actividades recreacionales de pesca o navegación;

De acuerdo con la importancia que tenga el consumo de agua, aguas abajo de los sitios de proyecto, sería necesario tratar las aguas residuales del proceso de construcción mediante:

1. Sedimentación
2. Floculación
3. Filtración

4.2. VARIACION TERMICA

Cuando las aguas de una corriente libre son embalsadas, ocurren una serie de fenómenos físicos, químicos y biológicos, en razón del cambio de flujo libre a embalse en un ambiente lacustrino.

En el caso de un conjunto de proyectos pequeños contruídos en un mismo sistema o subsistema fluvial, si bien, no se va a producir un verdadero embalse con características de ambiente lacustrino, se va a producir un cambio de un sistema de flujo libre a uno de flujo retardado, donde se podrán producir algunos de los fenómenos señalados, aunque se trate de condiciones isotérmicas diferentes de las de estratificación térmica presentes generalmente en un embalse; también se podrá observar una cierta deficiencia de oxígeno disuelto.

4.3. ACCION EN LA FAUNA ACUATICA

Las características ambientales de un curso de agua de flujo libre incluyen entre otras: velocidades del agua, temperatura del agua, y configuración del lecho. Si se modifica estas características, puede evolucionarse hasta un nuevo ambiente, que puede o no conservar las características esenciales para soportar la vida de los peces que existían originalmente (Fowler, 3).

4.4. EROSION AGUAS ABAJO

La erosión se produce aguas abajo y es causa básicamente por la descarga de aguas limpias, una vez producida la sedimentación en la obra de contención. En los proyectos pequeños, el cambio del sistema de flujo producido por la presa de derivación, va a provocar sedimentación aguas arriba, y descarga de aguas limpias aguas abajo, aunque en menor magnitud que en un embalse. Eventualmente podrá ser necesario diseñar obras de defensa aguas abajo de los proyectos a fin de prever los efectos erosivos consecuentes.

4.5. EFECTOS MENORES

Los efectos observados en grandes presas de:

1. Desarrollo de algas
2. Desarrollo de vegetación acuática; y
3. Vida animal en el área.

Parece no tener ninguna influencia en los pequeños proyectos hidroeléctricos que no cuenten con un verdadero embalse de regulación.

Aquellas pequeñas Centrales Hidroeléctricas que requieran de un embalse de regulación, tendrán los problemas antes mencionados, y en menor magnitud los ya planteados anteriormente.

Analizaremos brevemente los efectos producidos en los embalses por las cuatro causas arriba mencionadas.

a) Proliferación de algas

La proliferación de algas, unicelulares o filamentosas, pueden constituir un grave problema, ya sea obstruyendo filtros y equipos de los proyectos, o causando problemas por descomposición sobre las márgenes.

Su proliferación está favorecida por la acumulación de carbono, nitrógeno y fósforo que son nutrientes estimulantes de fundamental importancia.

Su influencia puede ser grande en las grandes presas, pero de relativamente menor importancia en las pequeñas centrales.

b) Plantas Acuáticas

El crecimiento explosivo, y las características de dispersión migratoria de ciertas especies exóticas, permite la intrusión e infestación de ciertas especies, poniendo en peligro la flora y fauna nativa, constituyendo riesgos para la salud y seguridad pública.

Esta influencia es prácticamente despreciable en los pequeños proyectos, aunque deberá ser tomada en cuenta en aquellos proyectos que dispongan de embalses.

c) Vida salvaje

El impacto ecológico que los reservorios producen en la vida salvaje son totalmente inexistentes en las pequeñas centrales hidroeléctricas que no requieren de un reservorio de regulación. En este último caso deberá preverse su influencia y las modificaciones que inducirá en la ecología del área.

5.1. BIBLIOGRAFIA BASICA

1. ALBERRO, J. MARSAL, R., y OTROS (1975). Resumen del Reportero en el Symp. sobre Almacenamientos Pequeños, Soc. Mex. de M. de S., pp. 107 - 111.
2. ASCE/USCOLD (1975). "Lessons from Dam Incidents, USA".
3. CHADWICK, W.L., y OTROS (1978). "Environmental Effects of large Dams", Rep. by the Committee on Env. Effects of the OSCOLD.
4. GEEN (1980). Environmental Impacts of Small Hydro.
5. Institution of Civil Engineers, (1976). "Manual of Applied Geology for Engineers". London, U.K.

6. MARSAL, R.J., (1975). "El Proyecto de un Almacenamiento Pequeño", en Simposio sobre almacenamientos pequeños, Soc. Mex. de Mec. de Suelos, pp. 5 - 20.
 7. MARSAL, R.J., (1975). "Comentarios del Relator: Geología y Geotecnia", en Simposio sobre Almacenamientos pequeños. Soc. Mex. de M. de Suelos, pp. 61 - 63.
 8. MARTINEZ, F., (1975) "Contribución No. 1 de la Sec. de Agricultura y San.", en Symp. sobre Almacenamientos Pequeños, Soc. Mex. de Mec. de Suelos, pp. 81 - 86.
 9. MARURI, R., (1975). "Geological investigations for Dam Foundations", M.S. Thesis in Geology, University of Illinois.
 10. NEYOLA, P., (1975) "Contribución No. 3 de la Sec. de Agr. y an.", en Synp. sobre Almacenamientos Pequeños, Soc. Mex. M. de S., pp. 93.
 11. OROZCO, J.V., (1975). "Resumen del Moderador" en Symp. sobre almacenamientos Pequeños, Soc. Mex. de M. de S., pp. 105 - 106.
 12. PRTIZ A., (1975). "Contribución No. 1 de la Sec. de Recursos Hidráulicos", en Symp. sobre Almacenamientos Pequeños, Soc. Mex. de M. Suelos, pp. 67 - 70.
 13. RIEDMULLER. G., (1981) "Geological & Geotechnical Studies in small Hydro Projects", in Symposium on Project Design & Installation os small Hydro Power Plants, Viena, Austria, pp. 41 - 58.
 14. Secretaría de Recursos Hidráulicos, (1975). "Pequeños Almacenamientos".
 15. STEVENSON, P.C., and MOORE, W. R. (1976) "A logical loop for the geological investigation of Dam sites", Q.J. Engng. Geol. 1976, Vol. 9, pp. 65 - 71.
- 5.2. BIBLIOGRAFIA ADICIONAL**
16. ALEXANDER, T., and OTHERS (1970). "Social & Geological aspects of Irrigation & Drainage", Specialty Conf., Nber 4 - 6, 1970, Miami Beach, Fla. Sponsors: ASCE and others.
 17. Bureau of Reclamation (1966). "Diseño de Presas Pequeñas.
 18. KELLER, E.A., (1979). "Environmental Geology", Merrill.
 19. MARSAL, R., (1974). "Presas pequeñas, notas sobre diseño y Construcción", UNAM, Pub. 326, México.
 20. OLADE, 1980). "Requerimientos y metodologías para la implementación masiva de pequeñas centrales hidroeléctricas en Latinoamérica".
 21. OLADE, (1980). "El desarrollo de pequeñas Centrales Hydroeléctricas en Latinoamérica y el Caribe". 37 pp.
 22. OLADE, ONUDI, (1981). "Minicentrales Hidroeléctricas, Manual para toma de decisiones".
 23. OROZCO, Carlos (1975). "Geotecnia", en Synposio sobre Almacenamientos pequeños, Soc. Mex. de M. de Suelos, pp. 23 - 38.
 24. Soc. Mex de Mec. de Suelos (1975). "Symposio sobre Almacenamientos Pequeños.

ANEXO 1

ZONIFICACION GEOTECNICA DEL PROYECTO HIDROELECTRICO
DE TENA

ANEXO I

ZONIFICACION GEOTECNICA DEL PROYECTO HIDROELECTRICO
DE TENA

El proyecto hidroeléctrico de Tena está localizado sobre la orilla derecha del río Misahuallí, frente a la población de Archidona. El área zonificada abarca aproximadamente 1,2 km² (Fig. No. 3).

El propósito de la zonificación geotécnica efectuada fue el de diferenciar zonas con características y factores geotécnicos comunes, que permitan un eficiente diseño de las obras. Se utilizó para el efecto fotografías aéreas tomadas en Septiembre de 1973, en escala 1:60.000.

A. Las unidades de terreno identificadas en el área son las siguientes:

1. Roca

Formación Mesa (Plioceno-Cuaternario), constituida por abanicos aluviales de areniscas tobáceas y arcillas tobáceas, con varios horizontes de conglomerados gruesos, con constituyentes igneos. Se presenta como varios niveles de terrazas hacia el Este de la cordillera de los Andes.

Al Occidente de Archidona, la formación Mesa está representada por un nivel de conglomerados de bloques, cantos rodados, gravas y arenas de composición principalmente granítica, en menor grado volcánica, y esporádicamente sedimentaria. La matriz del conglomerado es arenosa.

2. Suelos transportados

a) Sedimentos relictos del río Misahuallí.

Se sobreponen a la formación Mesa en varios niveles de paleoterrazas (cinco niveles). Están constituidos por bloque, gravas, arenas y limos arcillosos.

La naturaleza de los componentes gruesos de estos sedimentos es bastante similar a la de aquellos de la Formación Mesa, pero la proporción de fragmentos de rocas sedimentarias es mayor, y se presenta además un pequeño porcentaje de fragmentos de rocas metamórficas.

b) Sedimentos actuales del río Misahuallí.

En el cauce actual del río Misahuallí, en sus brazos de crecida y en sus lechos de inundación se encuentran lentes de gravas, arenas y limos arcillosos entre cantos rodados y bloques subredondeados a redondeados de variadas formas entre las que predominan las subesféricas.

La naturaleza de estos sedimentos es muy similar a la de los sedimentos relictos aterrazados, pero aquellos se encuentran frescos o muy ligeramente meteorizados.

c) Depósitos coluviales.

Entre los depósitos coluviales se incluyen los productos de deslizamientos y de otros tipos de erosión (e. g., escurrimientos superficiales). Ambos tipos de suelos se

acumulan al pie de los taludes formando masas inestables, especialmente los primeros.

Estos suelos son predominantemente limo arcillosos, ocasionalmente con algunos fragmentos de gravas muy meteorizadas o descompuestas.

Los espesores de los suelos coluviales son variables. Generalmente no son mayores que 2 metros, pero en las vertientes que drenan directamente hacia el río Misahuallí pueden ser mayores que 5 metros.

3. Suelos residuales

Recubriendo prácticamente toda el área se encuentran los suelos residuales de los sedimentos relictos del río Misahuallí. Son suelos limo arcillosos, ocasionalmente limo arenosos, de aproximadamente 1 metro de espesor, de color café oscuro. En algunos sectores muy expuestos a la acción solar, se observan indicios de retracción.

Sobrepuesto al suelo residual se encuentra un suelo húmico muy poco desarrollado, que raramente tiene un espesor mayor que 0,20 m.

B. ZONIFICACION GEOTECNIA

De acuerdo con los factores geotécnicos encontrados en el área del producto, se ha dividido el área total en cinco zonas de Norte a Sur, habiendo sido la geomorfología, y pendiente del terreno, el flujo de agua subterránea los factores principales para esta división.

A su vez, las zonas han sido divididas en sub-zonas atendiendo principalmente a los terrenos encontrados y a las condiciones de drenaje.

Zona I

Comprende la parte baja y plana que se encuentra en el extremo Norte del área estudiada.

Esta zona ha sido subdividida en las subzonas I₁, I₂, I₃.

Subzona I₁

Corresponde a terrazas relictas.

Contiene intercalaciones de limos arenosos y arenas con un total de 1.5 metros de espesor que cubren gravas arenosas.

No se llegó al nivel freático con una excavación de 1.60 m. de profundidad.

El área es inundable con las crecientes extraordinarias del río Misahuallí.

Subzona I₂

El material predominante es una arena gruesa gravosa. El nivel freático es aflorante. El área es inundable con las crecientes ordinarias del río Misahuallí.

Subzona I₃

Se encuentra hacia el Norte de las subzonas anteriores. Corresponde a una terraza relictas.

Contiene alternancias de limos arenosos y arenas limosas con un espesor variable entre 1.5 m. (al sur) y más de 2.5 m. (al Norte).

No se encontró el nivel freático. La subzona es inundable por las crecientes extraordinarias del río Misahuallí sólo en el extremo sur.

Zona II

Comprende la parte calinada septentrional. Contiene terrazas relictas del río Misahuallí. Ha sido subdividida en tres subzonas.

La secuencia estratigráfica que corresponde a toda la zona II es: un suelo residual limo arcilloso de 1 a 1.5 m. de espesor yace sobre limos arenosos y gravosos, y gravas y bloques en matriz areno-arcillosa de las terrazas relictas, de 2 a 6 m. de espesor; éstas, a su vez, yacen sobre el conglomerado medianamente meteorizado de la Formación Mesa, que en esta subzona muestra espesores visibles variables entre 5 y 10 m. En la base de la secuencia, cerca del nivel del río, se observan bloques medianamente meteorizados de composición granítica de hasta 2 m. de diámetro, siendo la mayoría de 0.50 a 1 m. de diámetro.

Fenómenos de tubificación y los correspondientes manantiales activos se han observado en las trincheras, en el tope de la Formación Mesa.

Subzona II₁

Está cubierta principalmente por depósitos coluviales limosos deslizados desde el nivel superior de terraza. Varias huellas de deslizamientos se observan aún en las cotas superiores de esta subzona. En las escarpas de los deslizamientos se observa la secuencia de materiales que componen la subzona II₃.

Las pendientes varían desde 10° y 45°; las primeras corresponden a coluviales estabilizados; las segundas, a las acumulaciones aún activas. El espesor máximo del coluvial es del orden de 3 m.

El flujo de agua subterránea ha influido notablemente en la genética de estos depósitos coluviales.

Subzona II₂

Comprende parte de la vertiente abrupta que bordea el río Misahuallí. Las pendientes predominantes son del orden de 45°, pero ocasionalmente llegan a 23°.

Los suelos que cubren esta subzona son en su mayoría coluviales limosos, generalmente no mayores que 1 m. de espesor, aunque hacia el Norte del área llegan a tener 3 a 4 m. de espesor.

Debido a la posición de esta subzona es una curva exterior del río Misahuallí, éste erosiona continuamente el pie de talud, colaborando así a la generación de nuevos y continuos deslizamientos de los suelos de los niveles superiores.

Los depósitos coluviales yacen directamente sobre los conglomerados de la Formación Mesa, la cual aflora en pequeños parches no cubiertos por el coluvial.

Subzona II₃

Comprende la parte de superficies aterrazadas que se encuentra hacia el Oeste de la subzona anteriormente descrita (II₂). Las pendientes varían entre 2° y 30°, predominando las de 12°.

Las superficies de las terrazas tienen una ligera inclinación aproximadamente paralela al gradiente del río Misahuallí. La subzona está cubierta de pastos en los tercios septentrional y meridional, y de cafetales en el tercio central.

Los suelos residuales cubren prácticamente toda la subzona, con espesores variables alrededor de 1 m.

El nivel freático se encuentra por debajo de los 3 m. desde la superficie.

Zona III

Es una zona baja y corresponde a terrazas relictas. El relieve es casi plano, con drenaje hacia el Este.

Subzona III₁

Comprende el tercio septentrional de la Zona III. La pendiente máxima es de 5° hacia el río Misahuallí.

El suelo predominante es el residual limo arcilloso, con espesores que oscilan alrededor de 1 m. Debajo de este suelo yace un conglomerado descompuesto, con matriz limo arenosa y cantos rodados de hasta 30 cm. de diámetro. El nivel frático está por debajo de los 2 m. de profundidad, excepto hacia el Este del área, que es pantanosa.

Subzona III₂

Comprende los dos tercios meridionales de la Zona III. La pendiente es de aproximadamente 2° hacia el río Misahuallí. El relieve es muy plano.

El suelo predominante es el residual limo arcilloso, con espesor aproximado de 1.20 m. Debajo del suelo residual yace un conglomerado descompuesto, con matriz limo-arenosa.

El nivel freático está por debajo de los 2 m. en la mitad septentrional de la subzona, pero es prácticamente aflorante (0.20 m. a 1.20 m.) en la mitad meridional.

Zona IV

Se encuentra en la vertiente occidental de la zona ligeramente colinada meridional hacia el final del canal.

Subzona IV₁

Ocupa la parte baja de la colina, con pendientes muy suaves del orden de 5°.

El suelo residual que cubre la subzona es limo arcilloso, de espesor menor que 1 m, y yace sobre un conglomerado descompuesto de matriz limosa, el mismo que aflora en los caminos de herradura que cruzan las partes ligeramente colinadas del área. No se ha determinado la profundidad del nivel freático en esta subzona.

Subzona IV₂

Se encuentra a media ladera y en la misma vertiente occidental de la Subzona IV₁, pero con pendientes del orden de 10°.

Los suelos son similares a los de la subzona anteriormente descrita (IV₁). Tampoco se ha determinado el nivel freático en esta subzona.

Subzona IV₃

Corresponde al área de la hondonada que separa las dos colinas cerca del extremo sur del canal, y drena hacia el Oeste con una pendiente menor que 4°.

El suelo limoso que cubre esta área es producto de la evolución normal de las vertientes que se encuentran en los niveles superiores.

El sector que se encuentra al Occidente de esta subzona, y que tiene relieve casi plano, es anegadizo en parte.

Subzona IV₄

Corresponde al área colinada en la que se asentará el tanque de presión. Las pendientes mapeadas varían entre 12° y 22°, predominando las segundas.

El terreno lo constituye un suelo residual limoso muy poco desarrollado (erosionado), sobre un limo gravoso descompuesto, potente. Hacia abajo, un conglomerado con matriz arenolimoso, rojizo, yace directamente sobre el conglomerado gris claro, de matriz arenosa, de la Formación Mesa, medianamente meteorizado.

No se encontró el nivel freático hasta los 4 m. de profundidad.

Subzona IV₅

Se extiende hacia el Sur de la Subzona IV₄, y consiste de una pequeña planicie. Esta subzona tiene relieve casi plano, con gradientes hacia el sur, y pendientes de 5° a 7°.

El suelo consiste de acumulaciones limosas coluviales de evolución de vertientes de hasta 1 m. de espesor, hacia el Oeste de la subzona. Este suelo se adelgaza hacia el Este, hasta desaparecer en las vecindades del límite con la subzona IV₆. Debajo del suelo coluvial, se encuentra el limo gravoso descompuesto que es característica de toda la zona IV, y que está sobrepuesto al conglomerado de matriz limo-arenosa. A su vez, esta capa de conglomerado medianamente meteorizado yace sobre el conglomerado gris claro, descompuesto, de la Formación Mesa.

El nivel freático en esta subzona no ha sido encontrado.

Subzona IV₆

Esta subzona consiste de las áreas cubiertas con materiales coluviales, vecinas al río Misahuallí, y que tienen pendientes entre 25° y 45°. Las pendientes más tendidas se encuentran hacia el sur de la Subzona IV₅; las pendientes más fuertes, en los taludes que drenan directamente hacia el río Misahuallí.

La característica más impresionante del área son los deslizamientos que ocurren en el talud que vierte al río, donde se encuentran árboles inclinados hasta 70° con la vertical. El espesor de los coluviales en este sector puede ser mayor que 10 m. Los deslizamientos pueden ser provocados por el flujo subterráneo y por la continua erosión del pie de talud por obra del río Misahuallí que corre aquí en una curva exterior. En el sector Sur de la subzona, el flujo subterráneo parece ser el factor más influyente en los deslizamientos.

Zona V

Corresponde al área baja y muy plana, con pendientes menores que 3°, que se encuentra en el extremo sur de toda el área estudiada. La zona contiene los niveles inferiores y más recientes de las terrazas del río Misahuallí.

Los depósitos aluviales de este sector contienen una capa de arena limosa alternada con arena gravosa que recubren parcialmente depósitos de gravas con bloques de menos de 50 m. de diámetro. Los materiales están frescos a ligeramente meteorizados, especialmente en el sector sur del área. El sector norte contiene una cubierta más potente de arenas limosas y limos y es, además anegadizo en las vecindades del sitio propuesto para la casa de máquinas.

El nivel freático en toda el área es prácticamente aflorante.

C. MATERIALES DE CONSTRUCCION

Como materiales de agregados para hormigón se ha localizado tres fuentes, dos de ellas corresponden a sedimentos recientes del río Misahuallí: la una se encuentra en la subzona I₂ con un volumen estimado de 250 m³, y la segunda se ubica en la zona V, 150 metros aguas abajo del sitio propuesto para casa de máquinas, con un volumen estimado de 10.000 m³.

La otra fuente corresponde a la terraza relictas más baja del río Misahuallí, en un islote pequeño cerca de la orilla derecha del río, 200 metros aguas abajo del sitio propuesto para desarenador, con un volumen estimado de 1.200 m³.

La mayor parte de los sedimentos de las terrazas relictas del río Misahuallí se encuentran en estado de avanzada meteorización por lo que pueden ser utilizados tan solo terraplenes.

ANEXO 2

FIGURAS

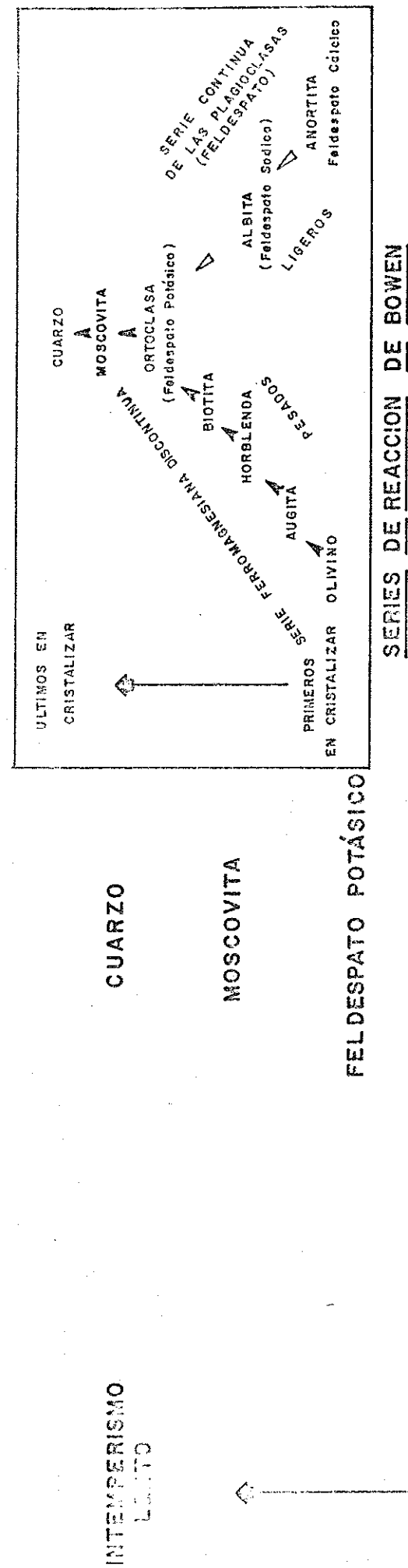


FIG. 1

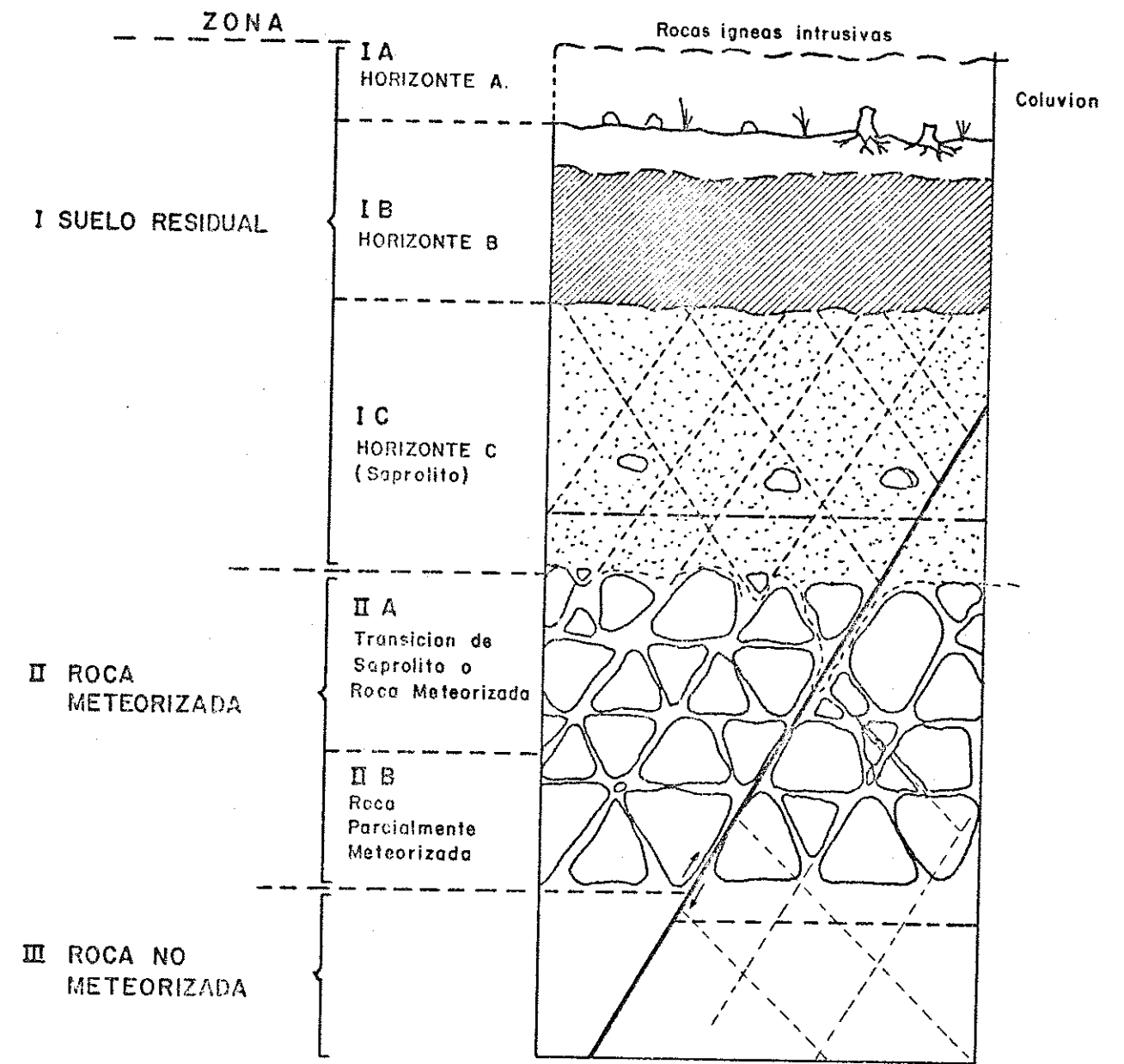
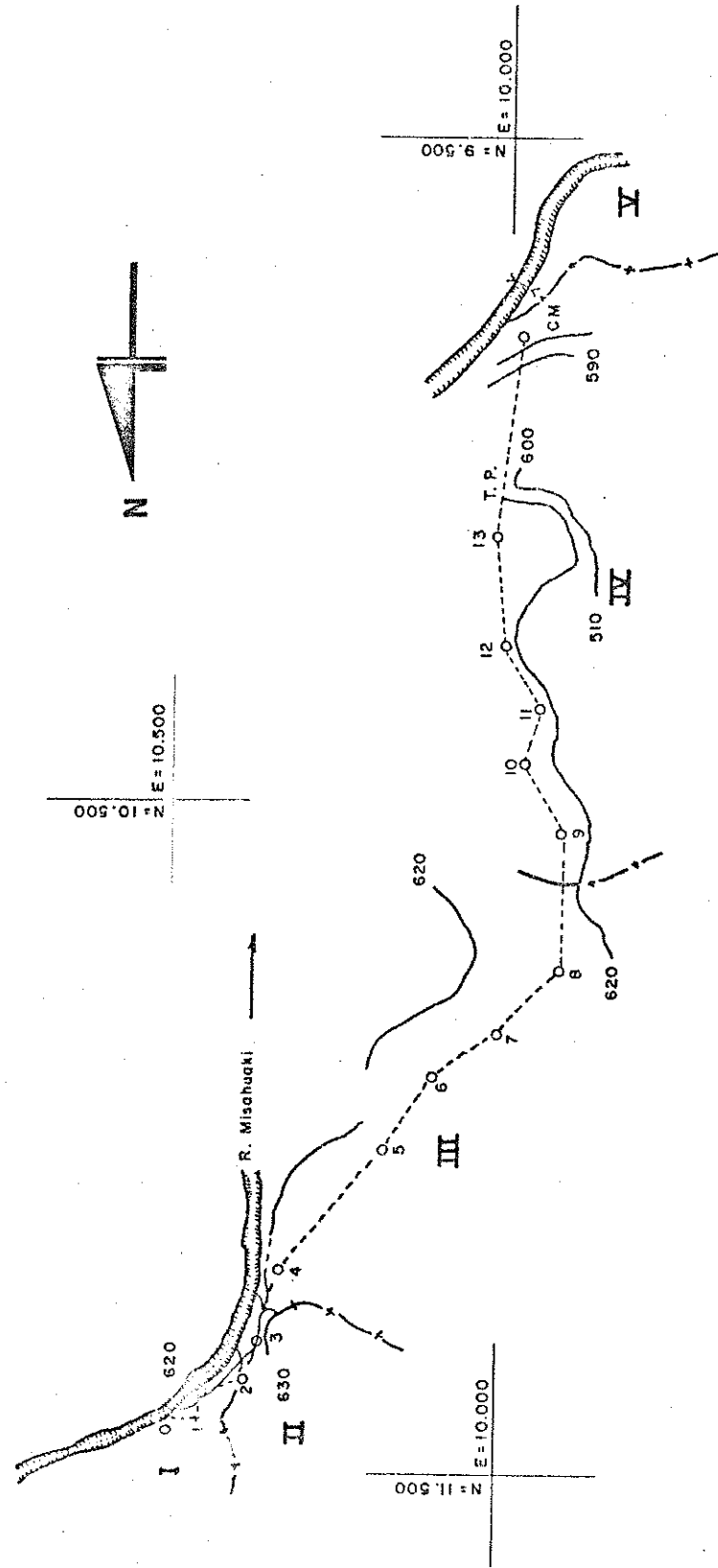


Figura (2)
PERFIL TÍPICO DE METEORIZACION DE ROCAS IGNEAS INTRUSIVAS



ZONIFICACION GEOTECNICA DEL PROYECTO HIDROELECTRICO DE TENA

Figura Nº 3

ANEXO 3

CUADROS

Cuadro No. 1

EVALUACION DEL MEDIO FISICO

El siguiente cuadro presenta los porcentajes del costo global que significa, dentro del estudio de pequeñas centrales hidroeléctricas, las investigaciones relacionadas con la evaluación del medio físico.

Estos valores son tomados de la experiencia de Consultora Hidrotécnica del Ecuador COHIEC C. LTDA., que ha realizado varios proyectos de centrales de pequeña y mediana capacidad a diferentes profundidades del estudio.

PROYECTO	CAPACIDAD	NIVEL DEL ESTUDIO	PORCENTAJE DEL COSTO GLOBAL	
			HIDROLOGIA	GEOLOGIA GEOTECNIA
El Ambi	8.000	Revisión y rediseño	20	20
Intag (*)	44.000	Factibilidad	10	20
San Miguel de Car	4.500	Diseño	12	18
Macas-Abanico (*)	140.000	Prefactibilidad	18	—
Centrales Medianas (*)	40.000	Factibilidad	10	16
Saymirin (*)	14.000	Diseño	—	12

(*) NOTAS:

El Proyecto Intag tiene un total de 44.000 Kw. de potencia instalable en un sistema en cascada de 3 aprovechamientos.

El Proyecto Macas-Abanico, está considerado en este cuadro pues su concepción inicial prevé la utilización de 6.000 Kw. El estudio realizado por COHIEC C. LTDA. demostró la factibilidad de un aprovechamiento mejor.

El Proyecto de Centrales Medianas (INECEL) tiene un total de 40.000 Kw. de potencia considerando tres aprovechamientos.

En el Proyecto Saymirín no se realizó trabajos de Hidrología, por cuanto es una central existente que disponía de parámetros hidrológicos anteriormente definidos.

II

0.3 APLICACIONES DE CARTOGRAFIA Y TOPOGRAFIA

TEODORO LOPEZ GALARZA

INDICE

- I ELEMENTOS DE CARTOGRAFIA
- TERMINOLOGIA UTILIZADA
- II ELEMENTOS DE TOPOGRAFIA

I ELEMENTOS DE CARTOGRAFIA

Consideraciones Generales

Definición de Cartografía

Cartografía es el arte y ciencia de hacer mapas, cartas, globos y modelos de relieve.

Mapa

Es una representación selectiva, simbolizada y generalizada de un área grande, usualmente de la superficie de la Tierra, a escala pequeña.

Carta

Es un mapa usado para navegación aérea o para navegación marítima. También toman este nombre los mapas o diagramas de propósitos específicos. Las llamadas Cartas Nacionales, generalmente confeccionadas a escala 1:100,000, 1:50,000 ó 1:25,000, son mapas que contienen información de relieve a base de curvas de nivel.

Globo

Es un cuerpo esférico pequeño que, en cartografía, representa la Tierra.

Modelo en Relieve

Es la representación de una porción del terreno a escala con las dimensiones verticales de la configuración de sus valles, cerros, picos y demás formas.

Requerimientos cartográficos

Cuando nace la idea de una central el primer elemento que se requiere es un plano de ubicación; este plano debe proporcionar la posición geográfica de la localidad o localidades que utilizarán el servicio.

Cuando la idea es aceptada como buena, se requiere de un plano con detalles generalizados de los recursos de posible utilización que será la base para un posterior estudio de reconocimiento.

Cuando la idea es convertida en proyecto, entonces se requiere de un plano con los detalles provenientes de un estudio de reconocimiento que muestre con la mayor claridad posible las alternativas de aprovechamiento de los recursos.

Fuentes de información cartográfica

Normalmente se puede disponer de la siguiente información:

Mapas del País a escalas de	1:500,000	a	1:2'000,000
Cartas Nacionales a escalas de	1:25,000	a	1:200,000
Fotografías aéreas a escalas de	1:10,000	a	1:60,000

Otros tipos de información cartográfica, como la procedente de los satélites Surveyor o imágenes de radar no son de mucha utilidad por su pequeña escala.

Evaluación de la información cartográfica

Los mapas de un país, son generalmente mapas físico-políticos y cubren ampliamente la información que requiere un plano de ubicación, que entre otras pueden ser:

- Posición geográfica de la localidad o localidades.
- Apreciaciones de las distancias de acceso.
- Vías de comunicación, telégrafo, teléfono, etc.

Las cartas nacionales, por tener una mayor escala generalmente están referidas a un sistema de coordenadas que cubre todo el país y tienen información del relieve a base de curvas de nivel. Dependiendo de la escala de la carta, se pueden obtener con alguna aproximación las longitudes de los canales, altura de los saltos, características topográficas e hidrológicas. Las cartas están apoyadas en una red geodésica y la información planimétrica y altimétrica provienen de trabajos de campo ejecutados por métodos convencionales y/o por los métodos modernos utilizando las fotografías aéreas.

Las fotografías aéreas constituyen un magnífico elemento para cualquier estudio de evaluación preliminar. Si las fotografías han sido utilizadas para confeccionar las Cartas se puede hacer un análisis cualitativo de las áreas de interés, utilizando un estereoscopio de espejos u otro similar. Dependiendo de la escala de la fotografía y de la habilidad para hacer fotointerpretación se puede hacer una evaluación de alternativas previas a un recorrido de reconocimiento en el terreno; de igual forma puede hacerse una evaluación de tipo geológico.

Cuando el lugar carece de la información cartográfica que se ha esbozado, se procederá a la obtención de datos básicos mediante uno o varios trabajos de reconocimiento del área de influencia a cargo de un profesional de reconocida experiencia tanto en el campo cartográfico como en el estudio de pequeñas centrales hidroeléctricas a fin de que exista consistencia y compatibilidad en la información que se obtenga.

Provisto de una brújula tipo Brunton, un altímetro tipo Thomen, debidamente compensado y una máquina fotográfica, se harán los recorridos necesarios hasta agotar las posibilidades de aprovechamiento de los recursos. En esta etapa es indispensable el concurso de un Geólogo.

A base de rumbos, distancias aproximadas y diferencias de altura, se puede confeccionar un croquis con el mayor detalle posible, complementado con una buena y profusa documentación de vistas fotográficas.

Terminología utilizada

Los términos de uso más frecuente, tienen a menudo significados adicionales, pero en este caso solo consideraremos los que tienen relación directa con cartografía.

Azimuth	: Angulo horizontal, medido en el sentido de las agujas del reloj, del Sur de 0° a 360°
Proyección Azimutal	: Proyección de una parte del globo sobre un plano a partir de un punto de referencia.
Barómetro	: Instrumento para medir la presión atmosférica.
Barómetro Aneroide	: Usa el vacío en una caja y son denominados altímetros.
Batimetría	: Medida de las profundidades en los océano, mares, lagos y ríos con fines de obtener el relieve.
Curva de nivel	: Línea imaginaria en el terreno cuyos puntos se encuentran a la misma elevación con respecto a un dato específico de la superficie.
Intervalo de curva	: Diferencia de elevación entre dos curvas de nivel consecutivas
Cuadrícula	: Llamado también reticulado, es un sistema de líneas paralelas espaciadas uniformemente que se intersectan perpendicularmente.
Control terrestre	: Sistema de control de estaciones establecidas por métodos geodésicos. El control horizontal se establece por triangulación y el control vertical por nivelación diferencial o por medida de ángulos verticales.
Datum	: Elemento de referencia que puede ser una línea o un plano cuya posición está referida a otros elementos.
Diapositiva	: Fotografía positiva en vidrio o película usada en restitución fotogramétrica.
Escala	: Relación entre una distancia en el mapa y la correspondiente distancia en el terreno.
Fotogrametría	: Ciencia y arte para obtener medidas confiables para confeccionar mapas a partir de las fotografías.
Fotograma	: Fotografía obtenida con una cámara métrica.
Marca fiducial	: Marcas en los extremos opuestos de una fotograma, utilizadas para determinar el "punto principal".
Visión estereoscópica	: Proceso mental por el cual se fusionan las imágenes de los dos ojos dando una impresión tridimensional.
Estereoscopio	: Instrumento para obtener visión estereoscópica.
Fotointerpretación	: Habilidad para reconocer e identificar la información cualitativa de las imágenes fotográficas.

Latitud	: La distancia del arco desde la línea ecuatorial, medida en grados.
Longitud	: La distancia del arco desde un meridiano principal, medido en grados.
Esferoide	: Figura matemática que en forma y medidas se aproxima al geoide y es usado como superficie de referencia en geodesia.
Geode	: Forma de la tierra considerada como la superficie del nivel medio del mar extendida en forma continua debajo de los continentes.
Geodesia	: Ciencia que trata matemáticamente la forma y medida de la tierra y la posición de puntos, líneas y áreas contenidas en ella.
Gradiente	: Un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal. La gradiente de un río es su perfil a lo largo de su curso.
Leyenda	: Explicación de los símbolos utilizados en un mapa.

Clasificación de los Mapas

Con respecto a la escala y contenido, los mapas pueden ser clasificados en la forma siguiente:

Mapas Generales

- Mapas topográficos, elaborados a escala grande y mediana conteniendo información general y relieve.
- Mapas planimétricos de las mismas características anteriores, pero sin relieve.
- Mapas representando grandes regiones, países, continentes o todo el mundo a escala mediana y pequeña. Los Atlas pertenecen a esta clase.
- Mapas del mundo conteniendo información general.

Mapas especiales

- Cartas de navegación marítima o aérea a escala mediana.
- Mapas temáticos: Geológicos, Forestales, Viales, Estadísticos, Arqueológicos, etc.
- Mapas de usos de la tierra.
- Mapas de ciudades.

- Mapas políticos, físicos.
- Mapas de ciencias varias.
- Mapas para ilustraciones y advertencias.
- Mapas catastrales, elaborados a escala grande, que muestran los linderos de las propiedades.

II ELEMENTOS DE TOPOGRAFIA

Consideraciones Generales

Definición de topografía

Es la ciencia, artísticamente ejecutada, de medir las características físicas de la superficie de la tierra y el arte científicamente controlado de delinearla.

La topografía está estrechamente vinculada a la geodesia y a otras ingenierías de medición.

Mapa Topográfico

Puede ser definido como un mapa que muestra toda la información de los objetos naturales y artificiales, incluyendo el relieve del terreno, razonablemente de acuerdo a la escala utilizada.

Escala de los planos topográficos

Los mapas topográficos, llamados también planos topográficos, se confeccionan generalmente a escalas grandes, porque en la mayoría de los casos están destinados al desarrollo de proyectos de ingeniería. Se dice que la escala es grande cuando su rango se encuentra entre 1:5,000 y 1:10.

En el caso de pequeñas centrales el rango varía desde 1:2,000 a 1:100.

Requerimientos topográficos

Cuando se ha decidido la ejecución del proyecto de una central, es imprescindible contar con la información topográfica adecuada.

Esta información debe cubrir las siguientes áreas y a las escalas que se indican:

AREAS	ESCALA	Intervalo entre curvas
— Captación	1:200	0.50
— Canal de aducción	1:2,000	2.00
— Desarenador	1:200	0.50
— Cámara de carga	1:200	0.50
— Aliviadero	1:200	0.50
— Caída	1:200	0.50
— Casa de máquinas	1:100	0.50
— Canal de descarga	1:2,000	2.00
— Caminos de acceso	1:2,000	2.00
— Líneas de transmisión	1:2,000	2.00
— Poblaciones	1:500	1.00

Características del levantamiento topográfico

La topografía será ejecutada para que el proyectista pueda desarrollar los planos de diseño necesarios para la construcción de las obras civiles y electromecánicas de la central. Reunirá las siguientes características:

- Estará apoyado en una poligonal cerrada. Si la longitud del canal es menor de 2 Kms. el cierre será taquimétrico; para longitudes mayores el cierre se hará a base de mediciones de precisión de distancias y ángulos.
- Tendrá orientación, referida al sistema de coordenadas de la red geodésica nacional.
- La nivelación estará referida a los valores de un B. Mark de la línea de niveles de la red nacional.
- El relleno taquimétrico se hará con una densidad razonable de puntos, de tal manera que los detalles del terreno resulten representados convenientemente a la escala utilizada.
- Los planos serán dibujados en cartulina del tipo canson, previamente cuadriculado con líneas espaciadas 10 cms.; a cada línea se le asignará el valor de la coordenada correspondiente.
- Se adoptará un tamaño para las hojas a base del cual se preparará un índice. Del original en cartulina canson se copiará en el tamaño escogido para cada hoja en papel transparente para obtener las copias azlid que se deseen.

Especificaciones

Es de carácter básico contar con especificaciones para la ejecución de los trabajos de campo:

- Rango de precisión de las medidas de distancias.
- Rango de precisión de las medidas de los ángulos.
- Tolerancia en los cierres de nivelación entre BMs colocados cada 500 m.
- Densidad de Ptos. taquimétricos.
- Rango de lecturas sobre la estadía.

De igual modo, es necesario contar con especificaciones para los trabajos de gabinete:

Dimensión de las láminas

Escalas

Intervalo de curvas

Precisión de los cálculos.

Equipo

El instrumental requerido para los levantamientos topográficos de mini y micro centrales, podría ser el siguiente:

1 Teodolito Taquímetro

1 Nivel

1 Jgo. de miras, jalones, winchas, etc.

Tratándose de centrales pequeñas, el instrumental puede ser incrementado con:

1 Teodolito al segundo

1 Distanciómetro

Dimensiones de las áreas y franjas topográficas

Para el diseño de las obras de captación el área es función de la configuración del lugar elegido; pero, en general cubrirá al menos 50 m. a lo largo del cauce y en las márgenes, hasta 5 m. por encima del nivel de captación.

Para el canal se necesita una franja no mayor de 10 m. a cada lado del eje si es que no está contemplado construir la plataforma de acceso; en caso contrario la franja será de 15 m. a cada lado del eje como mínimo.

El eje del canal será ubicado de acuerdo a la línea de gradiente y será estacado cada 20 m. Si se considera que el canal debe ser trazado, entonces cada estaca será nivelada y en cada una se tomará la sección transversal correspondiente.

Para el desarenador, bastará incrementar el ancho de la franja del canal en un 25 a 30 o/o en una longitud de 50 m. Se puede asumir el mismo criterio para la cámara de carga.

El aliviadero suele ubicarse para que las demasías sean devueltas al río por una quebrada cercana que no requiera canalización; en todo caso se hará un levantamiento en una franja de 10 m. de ancho.

La caída o salto suele representarse en un eje con topografía de 10 m. a cada lado y un perfil longitudinal con suficiente detalle para el diseño de la tubería de presión, los apoyos y los anclajes.

El plano para la casa de máquinas es el más detallado y puede abarcar un área de 50 x 50 m. de modo que incluya las áreas de acceso para el manipuleo de las maquinarias.

El canal de descarga debe ser trazado en el terreno con el mismo criterio que el canal de aducción.

II

04. RECURSOS HIDRAULICOS

LUCIEN MONITION

RECURSOS HIDRAULICOS

CONTENIDO

1. El agua recurso energético. El tiempo. El espacio
2. El agua recurso energético y los azares climáticos
3. El caudal de un río. Incertidumbres del recurso.
 - 3.1. Medición de los caudales de un río
 - 3.2. Explotación de los resultados
4. El caudal explotable. Su determinación.

1. EL AGUA RECURSO ENERGETICO. EL TIEMPO. EL ESPACIO.

El potencial hidráulico es la combinación de la potencialidad del caudal con la distribución de la pendiente. El recurso hidráulico es el potencial hidráulico confrontado con los datos económicos. Las P.C.H. pueden tomar una parte de ese recurso: el recurso explotable y recuperar así la energía potencial de las aguas corrientes que es usada insensiblemente durante la escorrentía natural del río.

El recurso hidráulico debe su perenidad y su denominación de recurso renovable al flujo variable de una cierta cantidad de agua en los ríos. El agua es abastecida por las lluvias y siempre está en movimiento, y continuando su curso llega al mar o se evapora en la atmósfera en un ciclo inmutable impuesto por dos fuerzas antagonistas, el calor del sol y la gravedad terrestre.

Un yacimiento de agua (glaciar, río, capa subterránea) es un objeto dinámico, dado que fluctúa sobre el efecto de las aportaciones (lluvia), de las pérdidas por evaporación o consumisión de la disminución del movimiento debido a los obstáculos dispuestos en su recorrido (turbulencias de un torrente, permeabilidad de los terrenos atravesados) y tienden a retener el agua llevando continuamente su estado de potencial gravítico al más bajo: el océano.

Los diferentes atrasos acumulados durante el paso en el "laberinto" geológico modulan la variabilidad de las lluvias y determinan los diferentes regímenes de los ríos. En la Fig. 1. se muestra el gráfico de filtraciones geológica y topográfica de lluvias caídas en una CUENCA, considerando su variación en el espacio.

El fenómeno del "filtro" geológico tiene como consecuencia que el caudal dependa de los sucesos climáticos anteriores.

El tiempo dado por el aplazamiento de respuesta de la cuenca está en función de los diversos atrasos de la llegada de los componentes de la escorrentía medidos en una estación (desde unas horas, hasta unos meses). El caudal de un río es así indisociable de la noción de duración y debe ser entendido no como valor estático único sino como un conjunto de valores teniendo cada uno su propia probabilidad de existencia en un período de tiempo (año, mes, días).

Es preferible hablar de los caudales de un río que serán caudales característicos, conceptos abstraídos elegidos en función del uso previsto. Esos caudales característicos serán determinados por análisis estadísticos de las mediciones instantáneas efectuadas en el campo.

2. EL AGUA, RECURSO ENERGETICO Y LOS AZARES CLIMATICOS.

2.1. Ciclo del agua y realización del balance, carácter aleatorio del recurso.

Sobre una superficie suficientemente ancha (unas decenas de kilómetros cuadrados) y durante un lapso de tiempo suficiente, es posible admitir la relación del equilibrio.

$$P = R + I + E \quad (1)$$

Esta fórmula relaciona la precipitación (P) con la escorrentía (R) y con la infiltración (I) y con la evapo-transpiración (E). Esa relación exprime un equilibrio medio en el cual cada término es continuamente modificado por las fuerzas de gravedad y la energía solar (fig. 2).

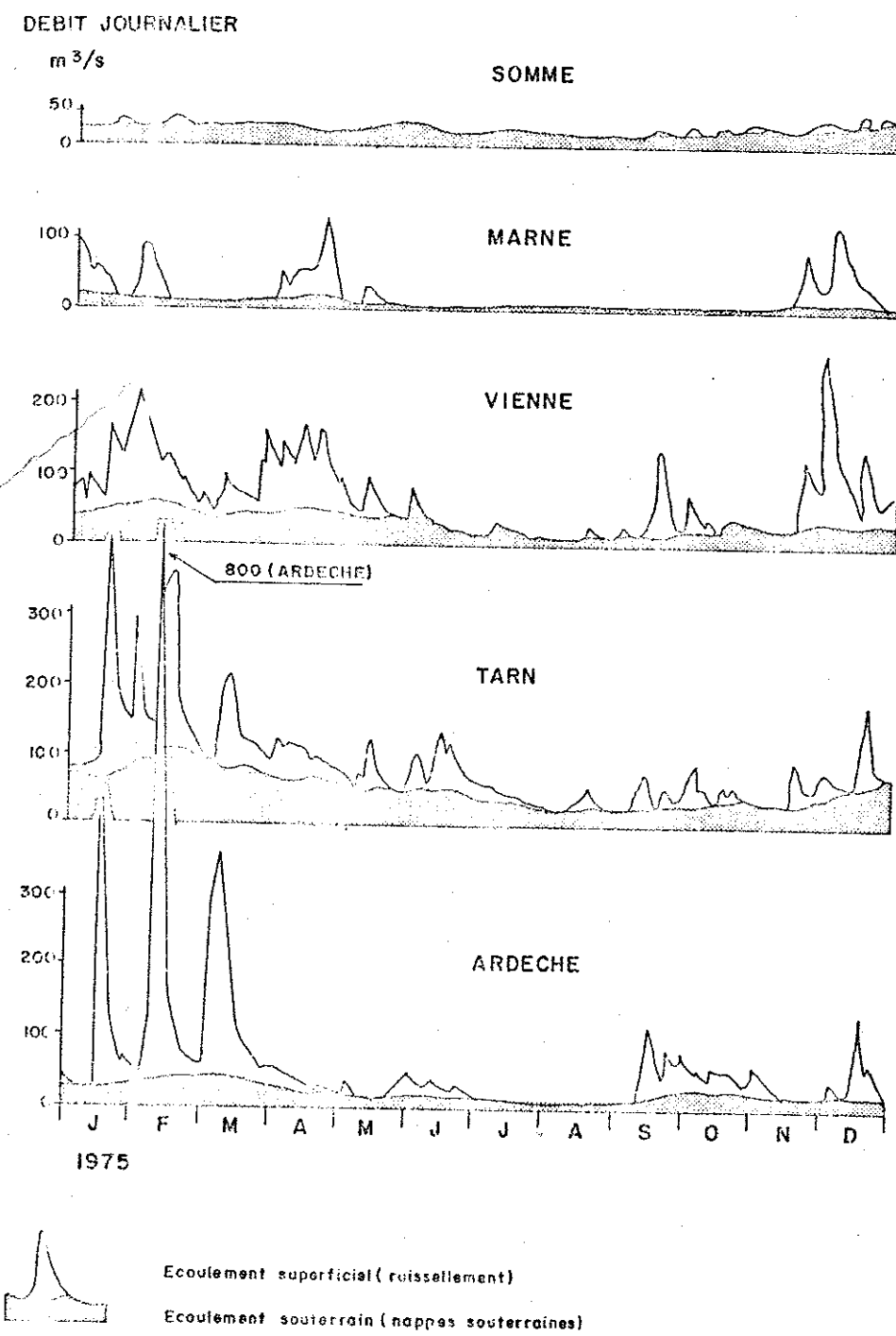


Figura Nº 1

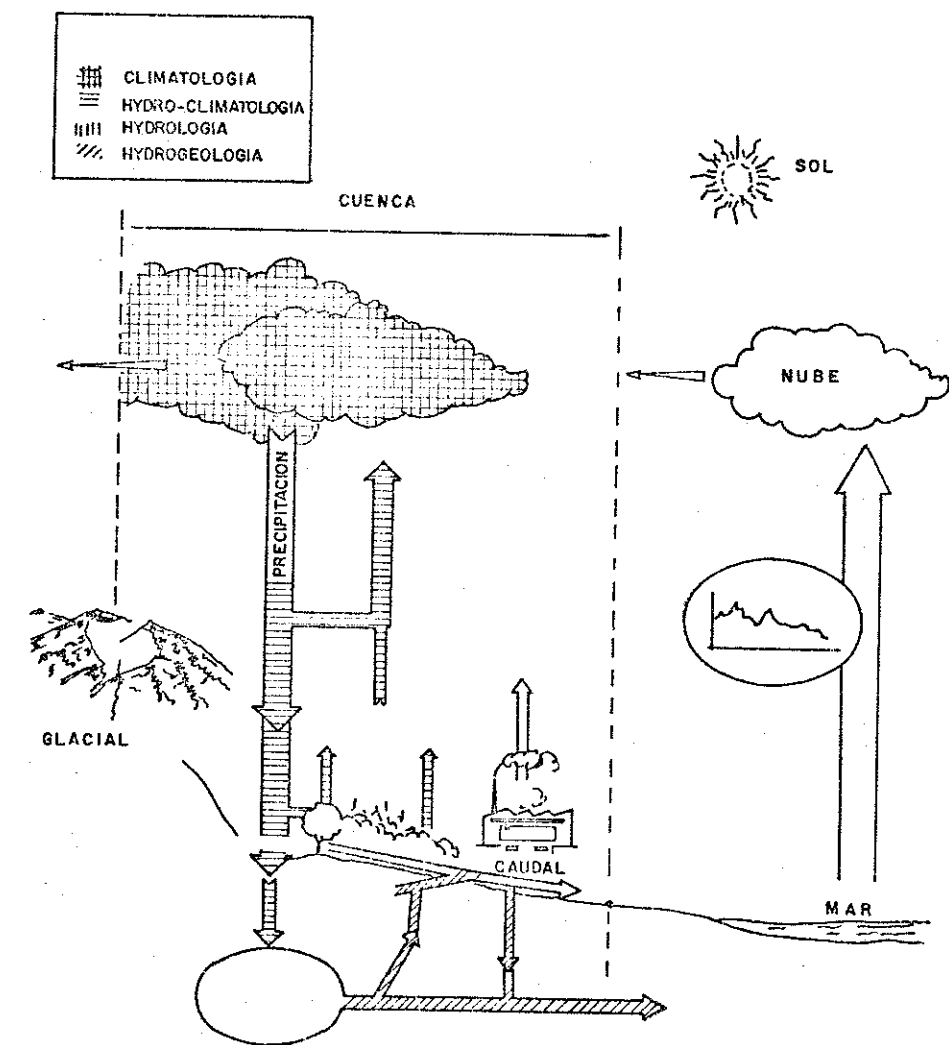


Figura. 2
CICLO ESQUEMATICO DEL AGUA

El reajuste continual se traduce por la dinámica del ciclo del agua.

El ciclo puede ser dividido arbitrariamente en cuatro fases:

- condensación de la humedad de una masa de aire en precipitación P
- evaporación del agua directamente al contacto del aire o indirectamente por el consumo o transformación producida por los vegetales: es la evapo-transpiración (E).
- la infiltración (I) del agua hacia las capas subterráneas. Una parte del agua alcanza los ríos por drenaje en ciertos trozos del cauce para formar el caudal básico B de los períodos de estiaje.
- la escorrentía (R) del agua no infiltrada procedente del reenjugado del suelo. Esa escorrentía se concentra para constituir una parte del caudal del río, conjuntamente con la parte procedente del drenaje de las aguas subterráneas.

El caudal de un río (Q) que es la parte energéticamente usable para la producción de energía eléctrica es la suma de la escorrentía (R) y del drenaje (B) y puede expresarse según la forma:

$$Q = B + R = P - E - I + B$$

Los términos escorrentía e infiltración son a menudo agrupados en el término de lluvia eficaz.

$$Pe = R + I$$

que representa la cantidad de agua disponible en la escorrentía y la infiltración, puesto que hay intercambio constante entre esos dos términos en cada punto de la cuenca.

La variabilidad recurso-caudal se deduce del cambio de la oferta (atmósfera), de la evapo-transpiración (temperatura), de la infiltración (estado de la saturación del suelo) y del drenaje (posición de la capa relación con el río).

Las precipitaciones punto de salida del ciclo, tiene una gran variabilidad en el tiempo. Las mejores previsiones meteorológicas no exceden 24 horas y más, su validez no incide en el comportamiento medio de una región es decir, una superficie de unas centenas o unos millares de kilómetros cuadrados. La previsión tiene únicamente un carácter cualitativo y no indica las cantidades de las precipitaciones esperadas sobre una superficie dada.

Se considera que el reconocimiento de la precipitación está lleno de probabilidades y que sólo el estudio estadístico de una larga serie de valores por varios años (30) permitirá tener un enfoque más claro.

El caudal de un río, es resultado de la interacción en el ambiente de las especificaciones, señaladas y presenta el mismo carácter aleatorio y necesitará el empleo de las mismas técnicas estadísticas para la determinación de sus características.

Sin embargo, hay casos en los cuales el caudal en un punto del río no fue medido durante un período lo suficientemente largo para permitir un estudio directo y en tal

caso se necesita reconstituir una larga serie de caudales con la ayuda de los términos de la fórmula 2.

Conviene antes de describir los métodos de determinación del caudal explotable (caudal relacionado con el objetivo y dependiente de las condiciones económicas) examinar los diferentes términos del balance (fórmula 2) y las nociones contenidas en ellos.

2.2. Los elementos del balance hidrológico - Medida y cálculo a las precipitaciones.

Las precipitaciones son la cantidad de agua meteórica que cae sobre una región considerada en su superficie horizontal sea en forma líquida, sea en forma sólida (nieve, granizo).

Esas cantidades de aguas medidas en diferentes estaciones pluviométricas son representadas por curvas de igual valor a los mapas pluviométricos.

Medida de las precipitaciones:

La lluvia se mide por la altura de agua que alcanza sobre una superficie plana y horizontal antes de sufrir pérdidas (volumen de agua colectada dividida por la sección pluviométrica). Esa definición sencilla esconde numerosas dificultades, causas de errores y de imprecisiones en la medida:

Cualquiera sea el tipo, el pluviómetro crea una perturbación aéreo dinámica que afecta la cantidad de lluvia captada. Así, la ubicación, el tamaño, la altura del pluviómetro influye sobre las medidas y conviene utilizar aparatos normalizados para comparar las medidas entre ellas. Los pluviómetros pueden ser de registro (puviógrafos) o no (pluviómetros sencillos). La elección del pluviómetro depende del objeto de la medida, de la capacidad de almacenamiento posible, del tipo de precipitación y de la frecuencia de las observaciones deseadas. El pluviómetro instalado resulta así de un compromiso entre las necesidades técnicas y la financiación disponible. En Francia hay un pluviómetro por 150 km², en Italia un pluviómetro por 80 km², en Inglaterra uno por 40 km²; por otra parte, la densidad de las estaciones debe ser más elevada en las sierras que en las llanuras para considerar la marcada heterogeneidad de las precipitaciones.

Las medidas son efectuadas por la meteorología nacional, Electricidad de Francia, puentes y caminos, aguas y selvas, marina, ejército, ... los benevolantes. La centralización de las medidas está hecha en zonas de la dirección de meteorología del ministerio de los transportes.

Esas medidas son publicadas en numerosos boletines:

- boletín cotidiano de informaciones
- resumen mensual del tiempo en Francia que da las medidas mensuales (comparadas con las "normales" 1931 - 1960) de 900 estaciones.
- boletín pluviométrico mensual medidas diarias de 3000 estaciones.
- análisis meteorológicos con sumas mensuales y anuales de cada año.

Tratamiento de los datos y cálculo de la lámina de agua caída en una cuenca.

El número de años de observaciones modifica a la vez el valor característico investigado y la precisión de ello, si se considera un número mayor de años, aumenta sustancialmente la precisión, pero, la adquisición de los datos será más costosa. Entonces conviene saber cuál es el número de años mínimo necesario para un cálculo suficientemente preciso. Binnie ha estudiado la influencia de la duración sobre el valor medio de la lluvia anual de 53 estaciones ubicadas en diferentes países (tab. 1). Se necesita al mínimo 10 años de medidas para tener una precisión, en esa medida, inferior a 10 o/o. A partir de 20 - 30 años de medidas el valor calculado no varía muy levemente (bajas unidades de porcentaje).

Las largas series de valores a ser tratadas deberán considerar, el carácter aleatorio de las medidas. El tratamiento estadístico permite aislar parámetros o valores característicos en relación con el uso particular considerado con el fin de hacer un resumen de la serie de mediciones, con el número de valores que sea posible. Los valores que representan la lluvia, se presentarán en un cálculo, un mapa, un gráfico.

Esos valores característicos se orientan en primer lugar a dar el valor central o dominante tal como:

- La medida diaria, mensual, estacional, anual.
- La medida interanual (media del mismo y de años posteriores).

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

- El índice de pluviosidad que es igual al cociente de la altura de precipitación anual (o mensual) por la altura de precipitación anual, media anual (o mensual).
- El coeficiente pluviométrico es el cociente de la altura de precipitación de un período de la altura de precipitación media anual considerando la misma duración.

Ese valor dominante debe ser examinado en relación con las otras observaciones, eso es dado por parámetro de dispersión tales como:

- el intervalo de variación $cu = X_{max} - X_{min}$
- la curva de distribución de frecuencia
- la desviación absoluta media:

$$e_{med} = \frac{1}{n} \sum |X_i - \overline{X}|$$

- la desviación típica:

$$= \sqrt{\frac{\sum (X_i - \overline{X})^2}{n - 1}}$$

TABLEAU I

Influence du nombre d'années de mesures sur la précision du module moyen (BINNIE)

Ecart en o/o par rapport á la valeur calculée sur une longue periode suivant le groupe d'années utilisé dans cette longue période

Nombre d'années	
1	+ 51a — 40 o/o
2	+ 35a — 31 o/o
3	+ 27a — 25 o/o
5	+ 15a — 15 o/o
10	+ 8a — 8 o/o
20	+ 3a — 3 o/o
30	+ 2a — 2 o/o

El dato básico necesario a la escritura del balance es la lámina de agua que cae sobre la cuenca. Numerosos métodos permiten la evaluación de su valor, a partir de las medidas colectadas en las diferentes estaciones pluviométricas de la cuenca.

El método de THIESSEN o método de polígonos parece el mejor (fig. 3).

La evapo-transpiración.

La evapo-transpiración, elemento del balance, es la suma de dos términos:

- La evaporación directa a partir de aguas libres (río, lago, glaciar . . .) y de las partes mojadas de la cuenca (suelo, vegetación, superficies urbanizadas, carreteras . . .).
- La evaporación indirecta procedente de la transpiración de los vegetales es un fenómeno biológico.

Esa distinción es arbitraria y depende de la elección de la cortadura del ciclo del agua. El consumo natural del agua (consumo sin incluir la irrigación) está integrada a la evaporación indirecta y no contabilizada en la toma sobre un recurso previamente determinado.

En efecto, la evaporación, a partir de superficie libre, de los suelos, del abrigo vegetal y de la transpiración de los vegetales son fenómenos difícilmente mensurables y separadamente sin numerosas observaciones.

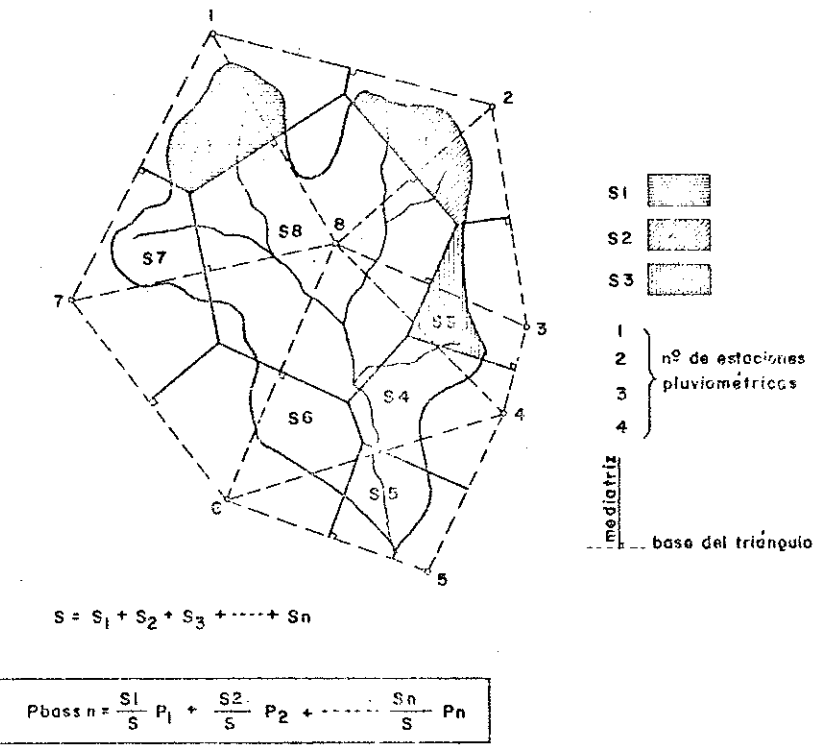
Estos términos han sido globalizados en "evapo-transpiración". Esa globalización es justificada en parte, puesto que muchos parámetros (temperatura, humedad del aire, insolación, presión) son comunes a los términos elementarios. Se han investigado expresiones sencillas permitiendo el cálculo directo de la evapotranspiración (E). Dado a que está ligada a las cantidades de agua disponible; los métodos de cálculo, investigan en primer lugar la evapotranspiración máxima posible, suponiendo que las cantidades de aguas disponibles (ilimitadas), después de esa evaporación potencial (Ep) está comparada a la disponibilidad de agua por obtener por un período dado, la evaporación término (E) de la fórmula del balance hidrológico.

En los métodos modernos el cálculo de la evapotranspiración real de la disponibilidad de agua del suelo está asimilada a una cantidad de agua reserva útil (RV) existente en un suelo de capacidad máxima (RV MAX).

Si la lluvia no es suficiente para alimentar la evapotranspiración (evapotranspiración máxima = evapotranspiración potencial) una parte o la totalidad de la reserva es tomada por la evapotranspiración.

Si la precipitación es suficiente, se va a satisfacer en primer lugar la evapotranspiración (E) pues va a completar la reserva útil del suelo (RU). Si queda un excedente éste constituye la lluvia eficaz (Pe), cantidad de agua disponible para la escorrentía y la infiltración.

El cálculo se hace en un "paso de tiempo" intervalo de tiempo determinado (día, década, mes). Después de un paso de cálculo, la reserva del suelo ha cambiado y el cálculo puede ser continuado por el período de tiempo siguiente. Este método, si es una verdadera simplificación de los fenómenos naturales presenta también la ventaja de tener en cuenta las variaciones de almacenamiento superficial del recurso.



CALCULO DE LA LAMINA DE AGUA CAIDA EN UNA CUENCA

Figura Nº 3

FORMULAS DE CALCULO DE LA EVAPO-TRANSPIRACION

Doc 1 Exemples de formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle moyenne d'un mois considéré

Formule de Penmann :

$$E = 0,22 \cdot 10^3 (qS - q) (0,93 + u_2)$$

E = évaporation d'une nappe libre peu profonde en kg/m²/jour.

qS = concentration massique ou taux d'humidité de saturation (sans dimension) de l'air à la température ambiante.

q = concentration massique en vapeur d'eau mesurée au-dessus de la surface évaporante.

u₂ = vitesse du vent (mètre par seconde) mesurée à 2 m au-dessus de la surface évaporante.

Cette formule a fourni de bons résultats sous une large gamme de climats (tendance légère à surestimer l'évaporation) mais nécessite pour son application la connaissance de paramètres rarement disponibles.

Formule de Turc :

$$ETp = K (I_g + 50) \frac{t}{t + 15}$$

ETp est l'évapotranspiration potentielle exprimée en mm/mois.

t est la température moyenne mensuelle en degré Celsius du mois considéré.

I_g est la radiation solaire globale moyenne en cal/cm²/jour

$$I_g = I_g A (0,18 + 0,62 \frac{h}{H})$$

I_gA est l'énergie radiative qui atteindrait le sol sans atmosphère en cal/cm²/jour.

h est la durée d'insolation effective mesurée en heure.

H est la durée astronomique du jour en heure.

K est un coefficient dépendant de la période de calcul et de l'humidité relative du sol (hr).

• formule de Turc décadaire

K = 0,13 pour les décades à 10 jours

K = 0,123 pour les décades à 8 jours

K = 0,143 pour les décades à 11 jours

• formule de Turc mensuelle : K = a.b.

avec b = 1 si hr > 50 % tous les mois de l'année

$$b = 1 + \frac{50 - hr}{70} \text{ si } hr < 50 \% \text{ un ou plusieurs mois dans l'année}$$

a = 0,37 pour le mois de février

et a = 0,4 pour les mois de 30 et 31 jours

En pratique, sous nos latitudes, hr > 50 % tous les mois de l'année.

Formule de Thornthwaite :

$$ETp = 16 \left(10 \frac{1}{t}\right)^2$$

ETp = évapotranspiration mensuelle en millimètre pour un mois fictif de 30 jours et une durée théorique d'ensoleillement de 12 heures sur 24.

t est la température moyenne mensuelle en degré Celsius pour le mois considéré.

$$a = \frac{1,6}{100} t - 0,5$$

I est la somme des indices mensuels i de l'année avec $i = \left(\frac{1}{5}\right)^{1,514}$

Cette formule est critiquable par l'abondance de coefficients numériques d'une précision illusoire. De plus, cette formule fait intervenir la valeur d'un indice I annuel déterminé par extrapolation dans l'avenir de la valeur de l'indice i, pour la détermination d'une valeur mensuelle.

Formule de L. Serra

$$ETp = 22,5 \left(\frac{1,5 m}{0,25}\right) \left(1 - \frac{r^2}{1000}\right) e^{-0,0011 T_m}$$

T_m = température moyenne du mois en °C.

El organigrama (fig. 4) presenta las etapas de cálculo que puede ser realizado manualmente o automáticamente con los computadores.

Un ejemplo de cálculo por método manual se encuentra en la tabla 2. Los métodos de cálculo en forma ordenada serán presentados ulteriormente.

La infiltración (I) y el drenaje de las aguas subterráneas por los ríos (B).

La lluvia eficaz determinada en el párrafo precedente representa la disponibilidad de agua para la escorrentía y la infiltración hacia las capas de agua subterráneas.

El balance hidrológico establecido por Francia indica que la aportación de las capas al mar representa menos de 1 o/o de las precipitaciones aunque la infiltración es igual a 23 o/o. La escala de las grandes cuencas, la discontinuidad de las capas geológicas, imponen drenaje casi total (término B) de las aguas subterráneas, a más o menos largo plazo, por los ríos.

A la salida de tales cuencas y para cuencas de tamaño más pequeño, consideradas como impermeables, el caudal aforado representa entonces las precipitaciones disminuidas de la evapotranspiración únicamente pues en la ecuación del balance (ecuación 2).

$$\text{Sea } I = B \text{ (grandes cuencas) y } Q = P - E$$

$$\text{Sea } I = 0 \text{ (pequeñas cuencas impermeables) y } Q = P - E$$

$$B = 0$$

$$Q_B = 0$$

A pesar de esa identidad de la formulación del balance, el régimen hidrológico de los 2 tipos de cuencas será fundamentalmente diferente. En el caso de grandes cuencas, el término B representa la cantidad de agua que ha caminado a veces durante mucho tiempo en el subsuelo antes de llegar a ser de nuevo un componente de la escorrentía superficial mientras que en una cuenca pequeña impermeable, el término B que representa una aportación atrasada de una respuesta mucho más rápidamente, de manera más brusca con relación a las precipitaciones que recibe. Por el contrario, el regreso del agua subterránea al área superficial es progresivo en el espacio. Para las pequeñas cuencas que conciernen las P.C.H. el agua infiltrada no regresa sino parcialmente al río. Lo que queda constituye la sobre escorrentía de la figura 2 con lo que en la ecuación de la fórmula 2 el balance es equilibrado, sólo si se tiene en cuenta ese nuevo término.

Las medidas directas de la infiltración son principalmente técnicas agronómicas. En efecto, si es posible con la ayuda de medidas puntuales de estimar con buena precisión la infiltración de una parcela cultivada (zona de características homogéneas), es muy difícil extrapolar las medidas puntuales al conjunto de la cuenca, en la cual la cubierta vegetal, la pendiente, la naturaleza del suelo varían según los lugares.

La determinación aislada de la aportación de las capas de aguas subterráneas a los ríos dependen de las técnicas de la hidrología. Así, para el caudal explotable por una P.C.H. se utilizan los métodos indirectos de determinación global de la infiltración (I) y del drenaje (B).

UTILIZACION MANUAL DEL ORGANIGRAMA DE CALCULO DE E

Exemple d'utilisation manuelle de l'organigramme de calcul de l'évapotranspiration réelle (E):

Calcul de l'infiltration cumulée et de l'évapotranspiration
au pas de temps de 5 jours dans le cas particulier d'une zone semi-aride où
RUMAX = 40 mm. Précipitation (P) - Évapotranspiration potentielle (ETP).

Périodes de Calcul	Novembre 75				Décembre 75						Janvier 76					
	15	20	25	30	5	10	15	20	25	31	5	10	15	20	25	31
P mm	0	0	23	0	0	0	90	0	32	0	11	9	9	50	45	0
EIP mm	34	34	34	34	30	30	30	30	30	35	31	31	31	31	31	34
P-ETP	-34	-34	-11	-34	-30	-30	+60	-30	+2	-35	-20	-22	-22	+19	-14	-34

RU = Réserve maximum utile du sol
 I = Infiltration totalisée vers la nappe souterraine (dans l'exemple I = P car il n'y a pas de ruissellement : R =

RU max = 40 mm	RU	0	0	0	0	0	0	+40	+10	+12	0	0	0	0	+19	+33	0
I		0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
I min		0	0	23	0	0	0	30	30	30	12	11	9	9	31	31	33

RU = Réserve maximum utile du sol

I = Infiltration totalisée vers la nappe souterraine (dans l'exemple $I = P_e$ car il n'y a pas de ruissellement : $R = 0$)

Pentes de Calcul	Février 76						Mars 76					
	5	10	15	20	25	28	5	10	15	20	25	31
P mm	62	0	12	0	0	23	0	75	0	44	0	10
ETP mm	25	25	25	25	25	15	15	15	15	15	15	18
P-ETP	+ 37	- 35	- 13	- 25	- 25	+ 8	- 15	+ 60	- 15	- 29	- 15	- 8

RUMAK 40 mm	RU	+ 37	+ 12	0	0	0	+ 8	0	+ 40	+ 25	- 40	+ 25	+ 17
	I	20	20	20	20	20	20	20	40	40	54	54	54
Emm		25	25	24	0	0	15	8	15	15	15	15	18

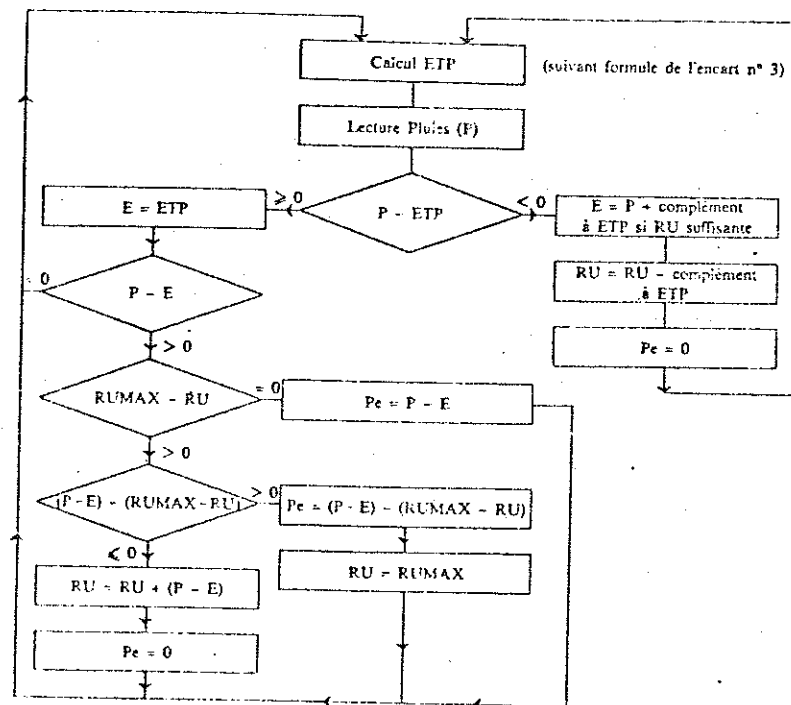


FIG. 4. - Organigramme schématique des calculs de l'évapotranspiration (E) et de la pluie efficace (Pe).

ETP : évapotranspiration potentielle
E : évapotranspiration réelle
P : précipitation
Pe : plume efficace (eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration)
RU : eau disponible dans la réserve du sol pour l'évapotranspiration
RU_{MAX} : capacité maximum de la réserve du sol

PENTADE DE CALCUL		NOVIEMBRE 75				DICIEMBRE 75						ENERO 76					
		15	20	25	30	5	10	15	20	25	31	5	10	15	20	25	31
P min		0	0	23	0	0	0	90	0	32	0	11	9	9	50	45	0
ETP mm		34	34	34	34	30	30	30	30	30	35	31	31	31	31	31	34
P-ETP		-34	-34	-11	-34	-30	-30	+60	-30	+2	-35	-20	-22	-22	+19	+14	-34
RUMAX ± 40 mm	RU	0	0	0	0	0	0	+40	+10	+12	0	0	0	0	+19	+33	0
	t	0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
E mm		0	0	23	0	0	0	30	30	30	12	11	9	9	31	31	33

PENTADES DE CALCUL	FEBRERO 76						MARZO 76					
	5	10	15	20	25	28	5	10	15	20	25	31
P mm	62	0	12	0	0	23	0	75	0	44	0	10
ETP mm	25	25	25	25	25	15	15	15	15	15	15	18
P-ETP	+37	-35	-13	-25	-25	+8	-15	+60	-15	+29	-15	-8

RUMAX = 40 mm	RU I	+37	+12	0	0	0	+8	0	+40	+25	+40	-25	+17
		20	20	20	20	20	20	20	40	40	54	54	54
E mm		25	25	24	0	0	15	8	15	15	15	15	18

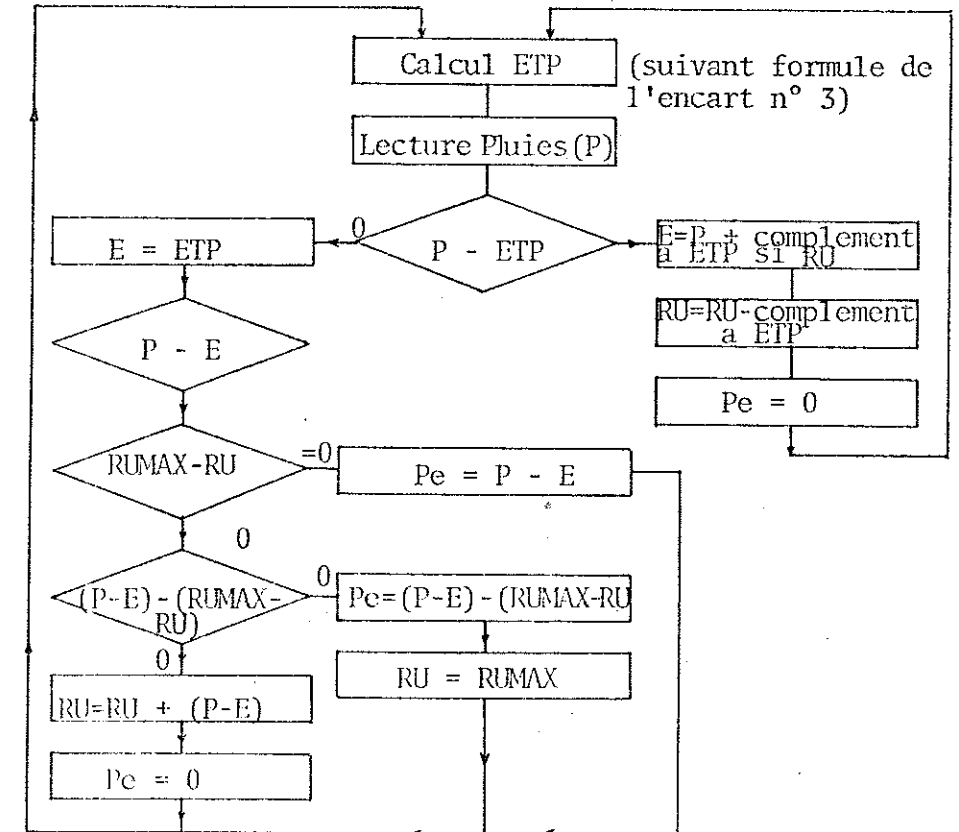


Figura. 4

ORGANIGRAMA SINQUEMATICO DEL CALCULO DE EVAPOTRANSPIRACION

Sin embargo, como estos métodos están directamente ligados a ellos permiten realizar el cálculo del caudal de un río a partir de la lluvia y serán tratadas en el párrafo siguiente.

3. El caudal de un río - incertidumbres y certidumbres del recurso.

La medición de los caudales y el análisis del régimen de un río es el prólogo obligatorio del estudio de la ordenación hidráulica de una cuenca.

La fórmula del balance definida precedentemente permite en teoría el cálculo del caudal de un río a partir de las medidas climatológicas. Sin embargo, las incertidumbres que pesan sobre los valores utilizados a causa sea de los errores sistemáticos debidos al método de medida sea de los errores inherentes a las hipótesis simplificadoras adoptadas, conducen a preferir cuando es posible (aforos realizados durante más de 10 años) el tratamiento directo de las medidas registradas en la estación más cercana al sitio estudiado.

A veces es imposible extrapolar los datos disponibles, en particular en los terrenos cársticos en los cuales no hay proporcionalidades entre los caudales y las superficies de la cuenca a causa de la preponderancia de las pérdidas o de las resurgencias en el río que pueden renovar o aportar brutalmente aguas a veces extrañas a la cuenca superficial.

Serán estudiados en primer lugar los métodos de aforos y presentación de los resultados. Las estaciones de aforos oficiales y su repartición tanto geométrica como administrativa, después los métodos de explotación de los resultados sea en el caso de largas series disponibles en la estación más cercana, sea por extrapolación o estudio de los caudales de una corta serie de aforo realizado para la necesidad de las P.C.H. (se recomienda realizarlo durante un tiempo mínimo). En ese último caso, las medidas están relacionadas con una larga serie disponible de una estación vecina o a datos climatológicos representativos.

Esos métodos recurren ampliamente al cálculo automático a causa de los numerosos datos que deben ser tratados pero para cada uno será desarrollado un método de aproximación manual a veces suficiente en la estadía de los estudios preliminares.

3.1. Mediciones de los caudales de un río

Los métodos disponibles pertenecen a dos grandes familias:

— Métodos mecánicos

- . vertederos tarados
- . medida directa de las velocidades de escorrentía en una sección de flujo.

-- Los métodos químicos con medida de dilución de un producto inyectado con una concentración conocida.

a) Los vertederos

Esas estaciones son las más corrientemente utilizadas. Las alturas de agua son leídas una o dos veces al día sobre una escala limnimétrica o registrada por limnógrafo.

La correspondencia entre las alturas de aguas y los caudales está determinada por medio de una curva de taraje establecida previamente por mediciones directas de caudal o por fórmulas teóricas, relacionando el caudal de un orificio o de un vertedero geométricamente conocido a la altura del agua, agua arriba (y eventualmente a la altura del agua, agua abajo en el caso de un orificio anegado).

El aforo de los ríos pequeños (caudal inferior a $5 \text{ m}^3/\text{s}$) puede ser efectuado con un vertedero a pared delgada. Un vertedero es un orificio abierto en su parte superior, las más de las veces rectangular y vertical (fig. 5).

La posición y la forma de los vertederos determinan los umbrales adaptados a la medición de una banda de caudal bien definida.

En el documento 2 se encuentran las fórmulas de aplicación de los principales vertederos de uso fácil. Esa medición puede ser del orden de 1 a 2 o/o tomando precauciones de utilización.

Es preferible utilizar un vertedero a contracción lateral para tener una lámina libre. El vertedero está cortado en una chapa de tamaños apropiados. El caudal que debe ser medido (fig. 6). Se esforzará obtener $H = 0,05 \text{ m}$. $h \geq 0,05 \text{ m}$ (fig. 7).

Se puede también realizar un ensamblaje de planchas y disponer una placa de chapa, agua arriba de la abertura del umbral y de las mojillas para tener una pared delgada y así utilizar las fórmulas precedentes.

Cuando la pared no puede ser considerada como delgada la fórmula general de vertedero $Q = \mu \Omega \sqrt{2gH}$ es aceptable pero el coeficiente debe ser medido por un taraje de la estación, o con un modelo reducido. Este tipo de vertedero no conviene por una campaña de aforos destinados a la estimación rápida y poco costosa de una P.C.H. de baja potencia.

La medición de H se realiza sea con un nivel y una mira para nivelación sea con una varilla graduada a una distancia al menos $4 H$ agua arriba del vertedero. La escala de lectura está colocada sobre la pared del canal o con preferencia en un pozo lateral comunicando con el río por una conducción de sección pequeña para amortiguar las oscilaciones.

b) Los umbrales naturales o artificiales de forma cualquiera.

Umbrales naturales o artificiales de forma cualquiera, por ejemplo al nivel de las pilas de un puente se pueden utilizar. En este caso, la relación $Q = f(H)$ se obtiene por contraste del lugar con muchos caudales entre los caudales mínimos del estiaje y los caudales máximos de crecida (fig. 8).

Las alturas de agua son medidas con escalas limnimétricas dispuestas en un punto de referencia generalmente en una orilla del río. La escala debe ser nivelada para permitir su reemplazo en caso de deterioración en período de crecida. La lectura está hecha en general cerca de 1 cm. Las escalas se presentan en la forma de segmentos métricos estandarizados que pueden ser puestos cabeza a cabeza. Dispositivos de registro automático de mediciones de alturas están igualmente utilizados: limnógrafos.

Las mediciones de caudal se hacen sea utilizando los molinetes sea con el método de un concentrado conocido.

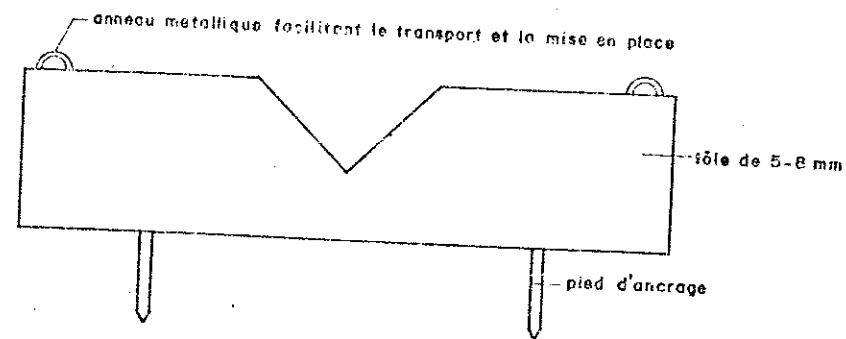


Figure N° 6

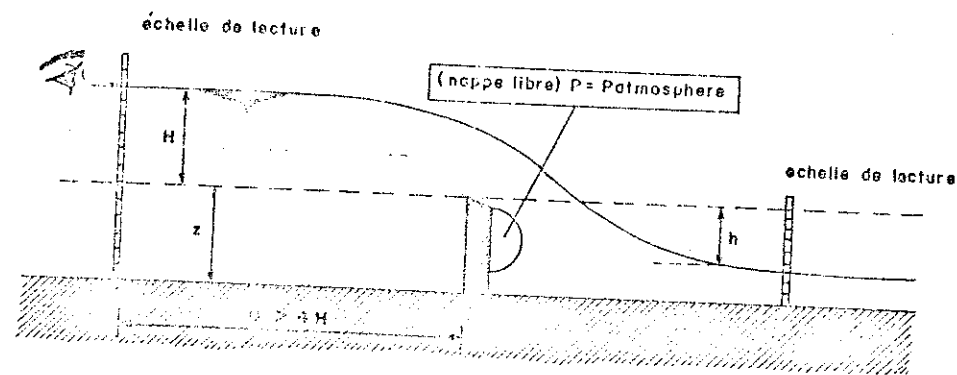


Figure N° 7

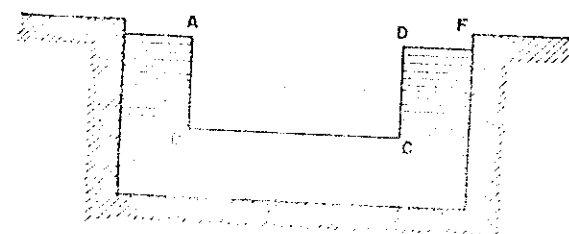


Figure N° 5

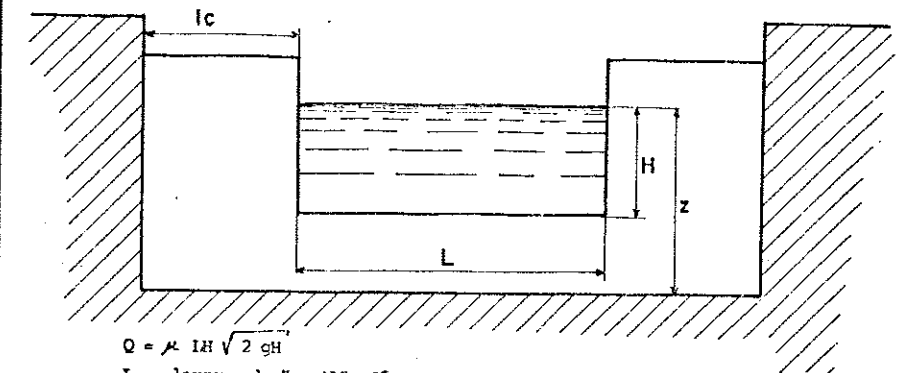
TIPOS Y ESCALA DE UTILIZACION

Doc. 2

$$Q = \mu \Omega \sqrt{2g h}$$

Ω = section
 μ = coefficient de déversant

Déversoir rectangulaire vertical en paroi mince



$$Q = \mu L H \sqrt{2g h}$$

L = largeur du "seuil" déversant; (z-H) = "pelle" du déversoir

H doit être mesuré en amont du déversoir à une distance égale au moins à 4 H pour éviter l'influence de l'abaissement du plan d'eau au niveau du seuil

Lc = contraction latérale.

1. Si Lc = 0 (pas de contraction latérale):

$$\mu = (0,405 + \frac{0,003}{H}) [1 + 0,55 (\frac{H}{H+2})^2]$$

pour	0,5	L	2 m
	0,1	H	0,6 m
	0,2	z	2 m

soit $\mu \neq 10,43$

2. Si Lc $\neq$ 0 (contraction latérale)

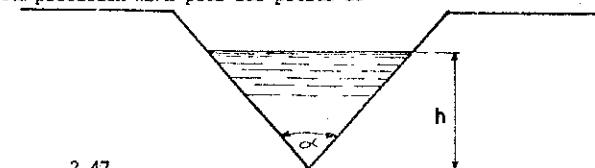
$$\mu = (0,405 - 0,03 \frac{Lc}{L+Lc} + \frac{0,0027}{H}) [1 + 0,55 (\frac{H}{(Lc+L)(H+2)})^2]$$

(formule de Hégly)

avec:	0,1	H	0,6 m	0,4	L	1,8 m
	0,4	z	0,8	0	$\frac{Lc}{L+Lc}$	0,9

généralement: $\mu \neq 0,40$

Déversoir triangulaire en paroi mince (garde une bonne précision même pour les petits débits)



$$Q = 1,32 \tan \frac{\alpha}{2} h^{2,47} \quad (\text{Formule de Fourley et Grimp})$$

Q m³/s pour	$\alpha = 90^\circ$	$Q = 1,32 h^{2,47}$
h m	$\alpha = 60^\circ$	$Q = 0,76 h^{2,47}$
	$\alpha = 45^\circ$	$Q = 0,55 h^{2,47}$

(remarque: $h^{2,47}$ est calculé directement par la plupart des petites calculatrices de poche)

Tabla Nº 3

CHOIX DE DEVERSOIRS DANS LA MESURE DES FAIBLES DEBITS
($Q \leq 5 \text{ m}^3/\text{s}$)

Gamme de débits à mesurer		Type de déversoir à utiliser	Lama d'eau correspondante		Observations
Mini	Maxi		Mini	Maxi	
1 l/s	140 l/s	Triangulaire type x = 90°	5 cm	40 cm	La pelle doit avoir si possible plus de 0,45 m donc le canal doit avoir plus de 0,85 m hauteur
20 l/s	200 l/s	Rectangulaire de 0,30 m de largeur	10 cm	40 cm	pelle $\geq 40 \text{ cm}$
50 l/s	500 l/s	Rectangulaire de 1m de largeur	10 cm	40 cm	hauteur canal $\geq 80 \text{ cm}$
100 l/s	1000 l/s	Rectangulaire largeur: 1 a 2m	15 cm á 10 cm	65 cm á 45 cm	hauteur canal $\geq 1,30\text{m}$ hauteur canal $\geq 90 \text{ cm}$
500 l/s	5 m ³ /s	Rectangulaire largeur: 5 a 10m	15 cm á 10 cm	65 cm á 40 cm	hauteur canal $\geq 1,30\text{m}$ hauteur canal $\geq 90 \text{ cm}$.

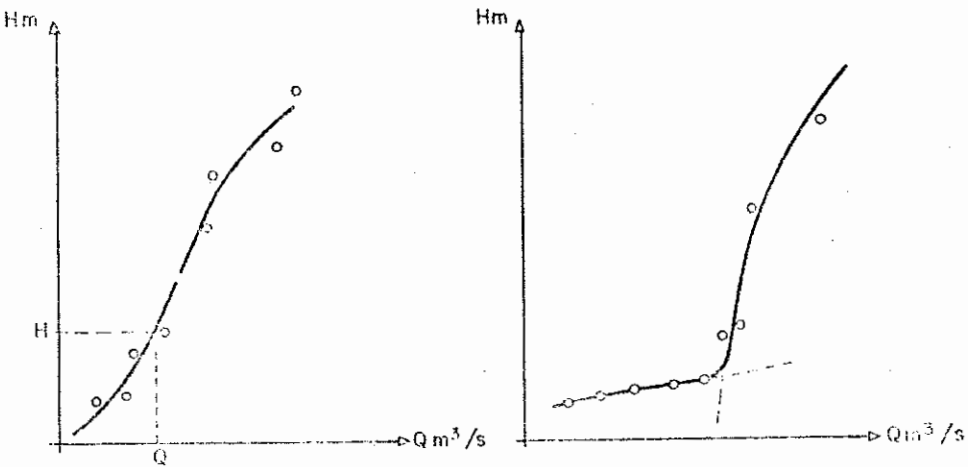


Figure. 8. EJEMPLOS DE CURVAS

Afores con molinetes

El molinete embarca una hélice cuya velocidad de rotación permite medir la velocidad de la corriente; esa hélice está fijada a un galápago, lastre prefilado, que hace bajar dicha hélice a la profundidad deseada con una turbulencia mínima gracias a su forma. El conjunto, hélice y galápago, está colocado a diferentes profundidades siguiendo diferentes verticales de la sección del río que se quiere aforar sea con un bastón metálico sobre el cual corre el galápago (pequeños caudales) sea con cable trasladándose sobre una horca (teleférico a través del río para medir los caudales importantes).

Los diferentes puntos de una sección de un río pueden igualmente ser aforados por molinetes transportados con canoa neumático.

A partir de esas mediciones, está estimada la velocidad media en cada vertical y después el caudal pasando a través de la sección aforada. El análisis de los resultados se hace con programas de cálculo insertados en las calculadoras de bolsillo.

La precisión de un aforo con molinete es casi siempre superior a 3 o/o porque los errores sistemáticos son raros y bajos y los errores aleatorios son reducidos gracias al gran número de mediciones en una misma sección, buena precisión está obtenida cuando la escorrentía es considerada uniforme con pocos remolinos. Al contrario cuando el régimen es inestable (en un torrente por ejemplo) los vectores velocidades no son más paralelos a causa de los remolinos y el aforo con molinete, en este caso, no es el más adecuado.

Aforo por dilución química

Una solución concentrada de una sal inyectada en un trozo del río y se mide su dilución agua abajo a una distancia suficiente para permitir una buena homogenización. El valor del gasto es:

$$Q = A \times \frac{C \text{ solución}}{C \text{ agua abajo}}$$

A . coeficiente relacionado con el aparato y el procedimiento.

El caudal medido es el caudal medido entre la sección agua arriba de inyección y la sección agua abajo de la medición. Ese caudal será tanto más cerca del caudal instantáneo del río cuando que la distancia entre las dos secciones será corta. Ahora bien, la distancia depende de la rapidez de la mezcla y de la obtención de una dilución homogénea. El aforo por dilución se aplica de preferencia a un régimen de escorrentía irregular. Existen dos procedimientos principales:

por integración (inyección de un volumen V de solución concentrada agua arriba y toma de muestra agua abajo durante todo el tiempo (t) entre la llegada del trazo y su desaparición). El valor del gasto es:

$$Q = \frac{V}{t} \times \frac{C \text{ solución}}{C \text{ agua abajo}}$$

por inyección con caudal constante (y medición de la concentración agua abajo hacia la estabilización. El valor del gasto es:

$$Q = q \frac{C_{\text{solución}}}{C_{\text{agua abajo}}} \quad q = \text{caudal de inyección}$$

Ese último procedimiento tiene la ventaja de ser más seguro que el primero sobre todo si debe ser puesto en obra por un experimentador neófito. En cambio necesita cantidades de sal 2 a 3 veces superiores y un equipo más grave y un tiempo de presencia más importante.

Las sales utilizadas son el bicromato de Na (1), la rodamina B (12) los radios isotopos, el nitrato de Na (3), el sulfato de Mn (u), el cloruro de Na (5), el cloruro de Li (6).

El trazador ideal debe ser muy soluble en agua, tener una buena estabilidad química en solución con las aguas de los ríos, no ser absorbido por las arcillas en suspensión en las aguas turbias, no preexistir en el estado natural, estar analizado fácilmente en concentraciones las más bajas posibles, tener un poco precio estar y tener una toxicidad nula para el hombre, la flora, la fauna por las concentraciones usadas.

Hasta ahora el trazador más utilizado ha sido el bicromato de Na, sin embargo la toxicidad del ion exovalente cr, Cr, implica la reducción de su uso.

Para realizar una buena mezcla, la longitud mínima del trozo de medición depende sobre todo de la anchura del río.

Así, en primera aproximación, se necesita 50 a 75 veces el ancho del río. El análisis de las muestras se hace generalmente por colorimetría (resistividad por Na Cl) comparando la muestra a una serie de soluciones de referencia. La precisión es del orden de 1 a 2 o/o.

3.2. Tratado de los resultados

La larga serie de cifras procedentes de las mediciones de caudales durante muchos años debe ser tratada por métodos facilitando su análisis, antes abarcar un caso concreto. Estos resultados dependen del análisis estadístico.

Sin embargo, a diferencia de las precipitaciones que son independientes las unas de las otras, los caudales de un día no son independientes de los caudales de los días precedentes a causa de la inercia de la cuenca. Esta dependencia será menos estrecha si los caudales son separados por un intervalo de tiempo más largo.

La inercia de la cuenca depende por una parte de la aptitud del suelo y del subsuelo a almacenar, después a restituir el agua al río. Esta inercia varía en unos días para una pequeña zona impermeable y en varios meses, para una gran cuenca que tiene zonas extensas de almacenamiento (aguas subterráneas, glaciares).

El almacenamiento puede tener un papel regulador sobre el caudal del río; la regulación es máxima para las aguas subterráneas y mínimo para el almacenamiento nivel a causa de la restitución brutal del agua almacenada durante el deshielo.

UNOS TRAZADORES UTILIZADOS EN FRANCIA

	NaCr ₂ O ₂ (1)	C ₁₀ H ₂₁ Cl O ₃ N ₂ (2)	NaNO ₂ (3)	MnSO ₄ (4)	NaCl (5)	LiCl (6)
Solubilité normale en g/l	600	10	750	500	200	500
Concentration minimale pour une analyse directe (mg/l) [2]	0.2	0.1	1	2	530	0.2

a) Unas definiciones

Las medidas son aritméticas

- Caudal natural: caudal real sin influencia ó reconstituido a partir de mediciones de caudales influenciados (presa, toma de agua . . .)
- Caudal medio diario: media de las mediciones de un mismo día. En período de crecida o en los ríos de régimen glaciar, el caudal puede variar fuertemente entre una hora y la otra. La frecuencia de las mediciones puntuales deben, en ese caso, ser más elevadas para una mejor definición del valor real. En particular, el registro de los fenómenos rápidos tal como la subida de una crecida que requiere mediciones horarias (fig. 9).
- Caudal medio mensual: media de los caudales diarios del mes considerado.
- Caudal medio mensual del año medio: media de los caudales registrados en un mismo mes durante todos los años de observación.
- Caudal medio anual o "módulo": media de los caudales medios diarios o media de 12 caudales medios mensuales ponderados con el número de días de cada mes.

La noción de año medio no expresa la variabilidad de los caudales entre los diferentes años. Conviene al mínimo completar el estudio de los caudales del año medio con aquellos del año seco y del año "húmedo" caracterizados por una frecuencia de aparición que puede ser por ejemplo la del año más seco y la del año más húmedo durante un período de 10 años.

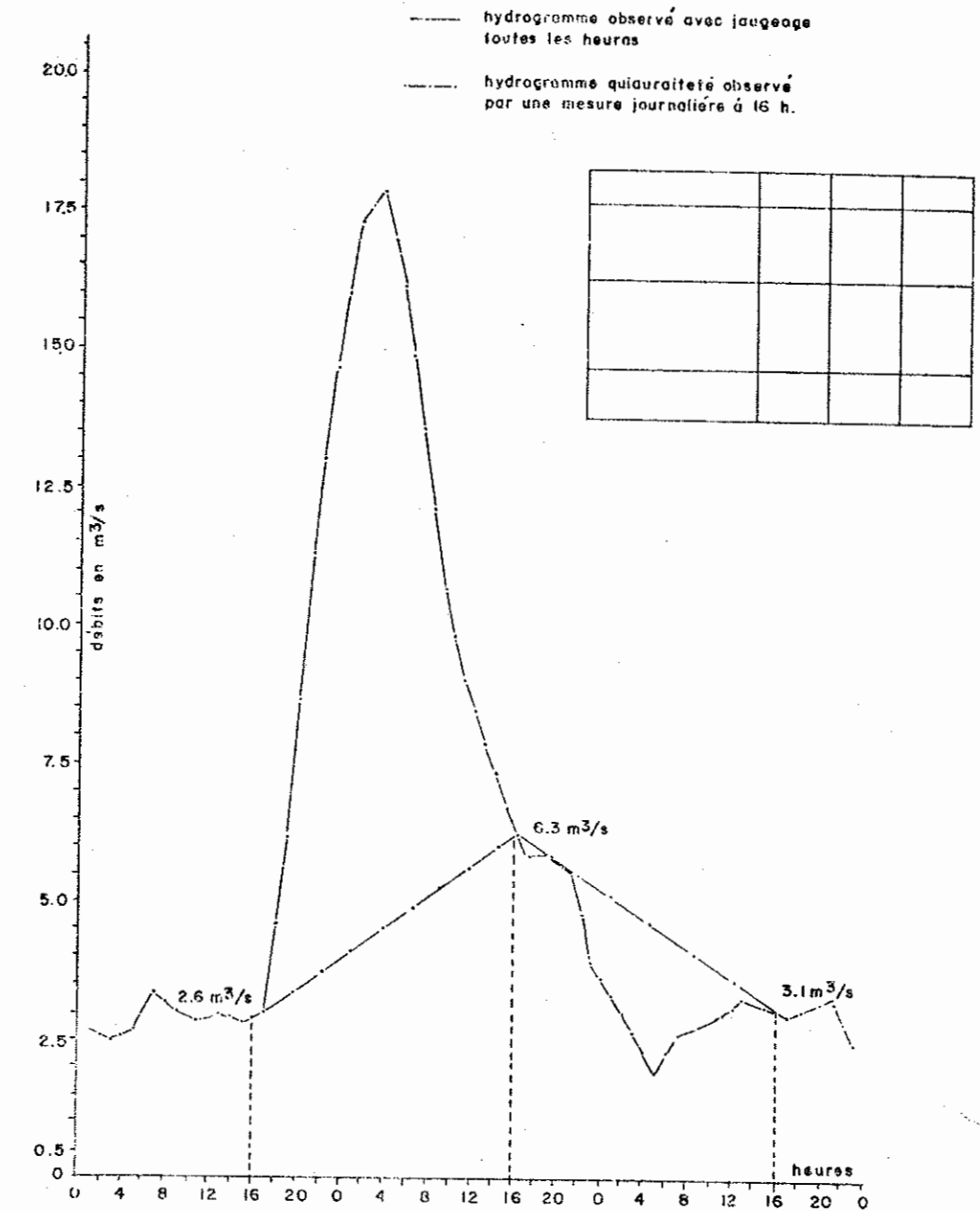
La ubicación en un mismo gráfico de curvas de caudales establecidos por diferentes frecuencias permite además enfocar el régimen de un río que la única curva del año medio.

Los valores de caudal pueden ser traducidos en muchos tipos de curvas, cada una estando elegida según el objetivo; en particular la curva de caudales acumulados permite la evaluación de la capacidad mínima de un embalse descretador de crecida o regulador en función del caudal regulado elegido por un período dado.

Las curvas de caudales clasificados son más utilizadas para el cálculo del tamaño de una P.C.H. (sin embalse regulador) y el del caudal reservado. Son curvas que serán estudiadas en detalle en el párrafo siguiente.

Ciertos caudales de frecuencia particular han recibido una definición convencional a causa de sus numerosas utilidades:

- Caudal característico máximo: es el caudal diario sobrepasado solamente 10 días consecutivos o no cada año. Está considerado como el caudal máximo pues la precisión de los aforos disminuye en los valores extremos y el máximo registrado es poco utilizado.
- Caudal medio característico caudal diario mediano (frecuencia 0,5).
- Caudal característico de meses: caudal mensual sobrepasado x meses consecutivos o no en el año (frecuencia $x/12$).



INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA DE LOS AFOROS
SOBRE LA ESTIMACION DEL CAUDAL

Figura Nº 9

- Caudal característico del estiaje: caudal diario sobrepasado 355 días en el año.
- Caudal del estiaje absoluto que es el caudal diario el más bajo (valor de poca utilidad).

b) Construcción práctica de la curva de caudales clasificados:

La construcción de esa curva necesita 10 años de mediciones al mínimo, para su aplicación a los P.C.H. Si el número de años no es suficiente, se necesita alargar la serie disponible a 10 años utilizando por ejemplo modelos de simulación lluvia-caudal o métodos de correlaciones con las estaciones vecinas que tienen series de mediciones de duración suficiente.

La curva de los caudales clasificados, en todo rigor, debe ser hecha a partir de los caudales diarios de manera que sean muy bien cercados los problemas de crecidas (tamaño del aliviadero de crecidas) y los problemas del estiaje (definición de los caudales reservados).

Sin embargo ese tratamiento necesita el uso de un computador a causa del gran número de valores que tienen que ser clasificados. En primer lugar, para las cuencas menores de 100 km² en clima oceánico, es posible establecer manualmente a partir de los caudales medios mensuales de los años considerados (Doc. 3).

Ese método simplificado introduce en general poco error a excepción de los valores extremos. En particular, el caudal característico del estiaje no puede ser calculado por ese método.

c) Precisión de los cálculos característicos (Doc. 4).

La precisión de los resultados depende de 3 parámetros:

- El caudal característico investigado (caudal medio anual de 6 meses, 3 meses, mensual).
- El número de años de observación.
- El régimen del río caracterizados por la variabilidad del caudal expresado por la desviación típica del caudal característico.

Mas la variabilidad del caudal característico es baja y si el número de años es elevado, será mejor la precisión del caudal característico.

d) Problema de las series de observaciones de corta duración.

Una cuenca de unas decenas hacia unas centenas de km² incluye en un contexto climático, morfológico y geológico regional que permite a veces una transposición de los resultados de los caudales de una cuenca vecina hacia una otra. Es muy útil en el caso de un sitio que no ha sido aforado o que dispone solamente de unos años de mediciones.

El Doc. 4 muestra el riesgo de utilizar directamente esos caudales a causa de las bandas de incertidumbres concerniendo las características dadas por las series cortas.

**METODO PRACTICO MANUAL DE OBTENCION DE LA CURVA DE CAUDALES
CLASIFICADOS
DOC. 3**

1. Classement par ordre croissant des six débits mensuels de chaque période hivernale (classement par ligne) (tableau 2).
2. Classement par ordre croissant des n premières valeurs (n = nombre d'années = 17 ans). des n deuxièmes valeurs, des n sixièmes valeurs (classement par colonne) (tableau 3).
3. Lecture des résultats:

- la première colonne du tableau 3 donne les débits garantis six mois sur six;
- la deuxième colonne les débits garantis 5 mois sur 6;
- la k ième colonne les débits garantis 6 - k + 1 mois sur 6.

Chaque colonne représente les n observations (nombre d'année) d'un débit caractéristique.

Chaque débit caractéristique varie d'une année à l'autre; il forme une population de n valeurs (ici n = 17).

Cette population peut être caractérisée par exemple par:

- sa médiane: valeur centrale
- la valeur garantie x année sur 100

soit n = nombre d'années

la valeur garantie x ans/100 est la valeur de la i^{ème} colonne telle que:

$$i = (1 - \frac{x}{100}) n + 0,5$$

ex.: débit garanti 5 mois sur 6, 8 années sur 10 (soit 80 années sur 100)
n = 17 x 80

valeur de (colonne 2, ligne i)

$$\text{avec } i = (1 - \frac{80}{100}) 17 + 0,5 = 3,9$$

- on prend la pondération (90% ligne 4 et 10% ligne 3):

$$Q = (2,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 10\% + 3,9 \text{ m}^3/\text{s} \times 90\%) = 3,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

de même: HIVER

Nombres de mois garantis	6 mois sur 6	5 mois sur 6	4 mois sur 6	3 mois sur 6
médiane	3.4	6.3	8.3	13.5
8 années sur 10	2.0	3.8	6.0	9.9

Sin embargo se necesita la prudencia y la comparación entre cuencas que tienen el mismo carácter:

- mismo orden de tamaño superficial
- misma altitud y mismo relieve
- mismo régimen hidroclimático
- mismo tipo de vegetación
- misma facies geológica

En ese último caso, si la cuenca es representada por terrenos calizos con circulación cárstica, ninguna comparación entre cuencas o extrapolación del caudal no puede ser hecha sin la más grande prudencia. En esos terrenos, las pérdidas o las aportaciones brutales de caudal debidos a la red, la no superposición entre cuencas superficial y subterráneo no permite comparaciones entre las zonas drenadas. En los casos más favorables, la comparación de los caudales de dos o muchas cuencas similares con ciertas precauciones:

- el cálculo del caudal de la subcuenca S a diferencia de los caudales aguas arriba (AM) y aguas abajo (AV) introduce errores que pueden ser considerables sobre todo si S es pequeño en relación con la cuenca AV, entonces se necesita evitar ese tipo de cálculo.

Cuando existe una larga serie de observación en una cuenca cercana A, un método de comparación consiste en poner en el eje de las abscisas los caudales mensuales de la cuenca A y en el eje de las ordenadas los caudales mensuales de la cuenca estudiada B durante un período de medición común. Se necesita separar los períodos de estiaje de los períodos de altas aguas.

En efecto, durante las aguas altas, la escorrentía es preponderante y en general existe una buena correlación entre cuencas y vuelve sensiblemente proporcional a la superficie de la cuenca.

En período de aguas bajas, al contrario, el caudal depende principalmente de las características intrínsecas de las cuencas de las cuales dependen directamente las posibilidades de sostenimiento de los estiajes por las capas subterráneas.

Muchas veces, las extrapolaciones brutales conducen a graves errores.

e) Extensión de serie de datos de aforos - aplicación al tratamiento de series cortas

La extensión de series de datos de aforos significa la constitución de una historia de caudales diarios a partir de series pluviométricas diariamente conocidas. Eso implica una representación del ciclo hidrológico con relaciones matemáticas que traducirán el balance de los flujos. Ha sido mostrado previamente que los elementos del balance podrían ser calculados con una buena precisión solamente por períodos de tiempo suficientemente largos para despreciar la variación de almacenamiento del agua.

El intervalo de tiempo considerado el día, no permite despreciar la variación de almacenamiento y la complejidad de los fenómenos orientales de nuevo a conducir e investigar relaciones empíricas, forma que no es justificada por consideraciones físicas y cuyos parámetros no tendrán relación directa con los parámetros complejos que caracterizan las cuencas.

1 - Calcul de la moyenne m des n observations (x_i):

$$m = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (\Sigma \text{ signifie « somme »})$$

2 - Calcul de la somme des carrés de chaque observation x : $S_2 = \sum x_i^2$

3 - Calcul de l'écart-type: (touche de calcul direct sur certaines calculatrices de poche)

$$s = \sqrt{\frac{S_2 - nm^2}{n - 1}}$$

4 - Calcul de l'intervalle de confiance à 80 %:

On calcule la quantité d qu'il faut reporter de part et d'autre de la valeur calculée pour avoir les limites de l'intervalle de confiance à 80 %. Le calcul se fait par l'intermédiaire de la variable t (variable de Student) telle que:

$n - 1$	2	3	4 et 5	6 à 12	12
t	1.9	1.6	1.5	1.4	1.3

• pour la médiane: $d = \frac{s \cdot t}{\sqrt{n - 1}}$

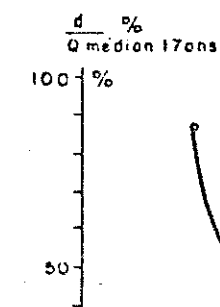
• pour le débit garanti 8 années sur 10: $d = \frac{1.16 \cdot s \cdot t}{\sqrt{n - 1}}$

• pour le débit garanti 9 années sur 10: $d = \frac{1.35 \cdot s \cdot t}{\sqrt{n - 1}}$

5 - Report graphique: exemple de variation de l'intervalle de confiance à 80 % sur le débit médian de la période hivernale de l'Elle (débit garanti 3 mois sur 6) suivant le nombre d'années de référence.

n pre- mières années	q médian	m	s	t	d
3	10.6	12.8	8.84	1.9	11.88
5	19.3	17.64	6.80	1.5	5.22
7	19.3	16.4	6.90	1.4	3.9
9	15.5	15.8	6.18	1.4	3.1
11	15.5	15.5	5.68	1.4	2.5
13	13.9	15.2	5.16	1.4	2.1
15	13.5	14.6	5.27	1.3	1.83
17	13.5	14.19	5.21	1.3	1.67

augmentation de la précision avec le nombre d'années de référence (Elle)



Sin embargo, si la descripción física de los fenómenos no puede ser completa, las relaciones empíricas no son totalmente privadas de significación física. Esas relaciones dan una imagen global a partir de fenómenos más sencillos pero de la misma naturaleza. El suelo por ejemplo será asimilado a una sucesión de embalses simulando las retenciones de agua que se hacen a diferentes niveles: retención temporaria por la vegetación, por el suelo, por el subsuelo.

Cada capa de retención puede restituir su agua a las capas directamente inferiores o superiores según una lógica intuitiva que implique por ejemplo que el agua de un depósito profundo no está disponible para la evapotranspiración porque no hay relaciones capilares con el suelo que es la zona de toma con las raíces vegetales.

Los modelos de correlación precipitación-caudal va a "globalizar" los fenómenos debidos a la cuenca investigando las precipitaciones a través del "filtro" geológico.

Es posible buscar directamente una correlación entre las precipitaciones y los caudales en una misma cuenca. En efecto, el "filtro geológico" constituido por la cuenca causa un retraso, una deformación de la "respuesta", de la estimulación, que depende de las precipitaciones anteriores (de unos días hacia unos meses). El filtro geológico tiene una memoria que hace muy flexible toda tentativa de correlación directa.

El filtro no es explicitado. Los modelos se interesan solamente a las entradas y a las salidas, el filtro está simulado con parámetros artificiales no mensurables directamente en el campo. Se necesita tener una serie de referencias que serán el histórico de los caudales diarios medidos para ajustar el valor de los parámetros que ligan el más exactamente posible los caudales a las precipitaciones del mismo período. En realidad el ajuste debe hacerse con las precipitaciones relativas a un período anterior a los primeros caudales medidos para tener en cuenta el efecto de memoria de la cuenca.

En fase de ajuste se llama fase de calibración del modelo (fig. 10).

Después un histórico de precipitaciones por una larga duración es parovechada al modelo calibrado que da entonces un histórico de los caudales diarios por el período correspondiente. Ese histórico es después analizado por los métodos estadísticos habituales.

La precisión de los resultados de un modelo de extensión de datos es muy superior a la salida de un tratamiento estadístico considerado por ejemplo 5 años de mediciones.

Precedentemente, ha sido mostrado que el intervalo de confianza de 80 o/o por el caudal mediano del período invernal (6 meses) del río era:

$$\frac{11,88}{13,5} = 88 \text{ o/o}$$

por 3 años de observaciones y de 39 o/o por 5 años de observaciones.

La utilización del modelo de simulación calibrado en un solo año de caudal observado se encuentra utilizando 8 años de lluvia lo que un intervalo de confianza a 80 o/o, según el año de calibrado considerado, igual a 5 o/o del caudal mediano del período invernal.

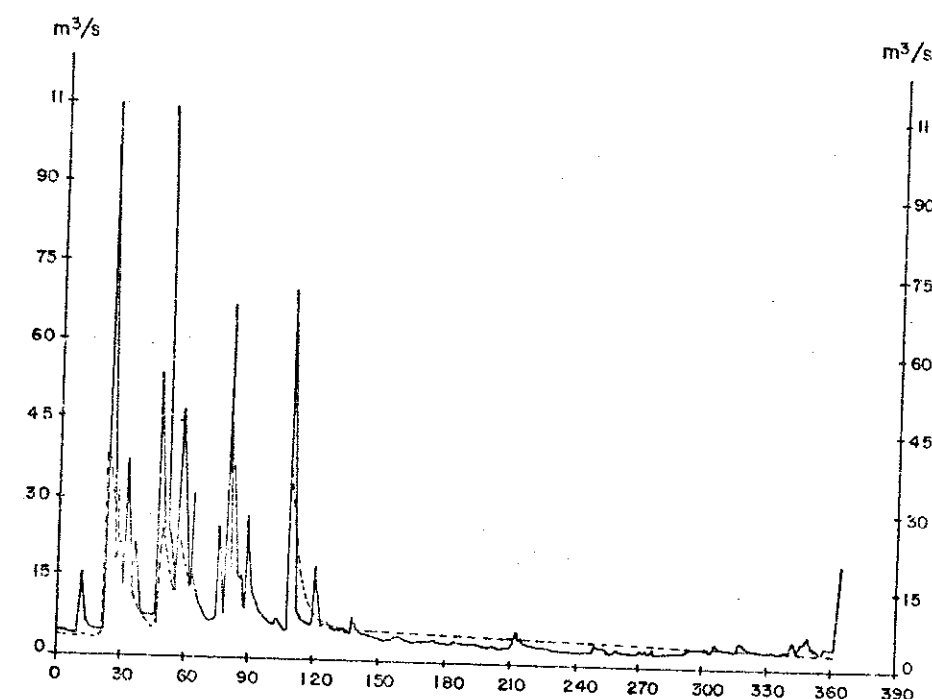


Figura. 10

RECONSTITUCION DE LOS VALORES DE CAUDAL

En conclusión, cuando existe una corta serie de observación (1 a 7 años) es preferible utilizar los métodos de extensión de datos que extrapolar los resultados obtenidos en las cuencas vecinas.

En efecto la ventaja de la corta serie que debe ser tratada pertenece a la cuenca. La investigación de una correlación precipitaciones-caudales efectuada por una corta serie permite librarse del estudio de los efectos de las características propias de la cuenca puesto que esos efectos están incluidos en los aforos disponibles.

Ese método no necesita investigaciones en el campo porque está fundido sobre los datos hidroclimáticos existentes. Es un método poco costoso (unos días de trabajo) que da una garantía indispensable al estudio de la del proyecto P.C.H.

El caso donde no existen serie de caudales utilizables, los plazos de realización de un proyecto F.C.H. permiten efectuar un año de medición diaria con una estación ligera y aplicar el método de reconstitución de datos propuesta.

f) Valores extremos: Los estiajes y las crecidas:

A los extremos de la curva de caudales clasificados corresponden los estiajes (caudales bajos) y las crecidas (caudales elevados). Del mismo modo que por el caudal de un río que está particularizado por los caudales característicos, los estiajes y las crecidas son variables debiéndose relacionar que con una frecuencia de aparición para separar lo que es normal de lo que es extraordinario y elegir los valores que serán los más representativos de las fluctuaciones anuales de caudales.

Así el término de estiaje (o crecida excepcional o absoluta que representa el mínimo del caudal crecido (o máximo mínimo tiene solamente un interés histórico y el estiaje (o crecida) se representará mejor por el estiaje (o crecida) característico medio que es la medida sobrepasada durante 355 días al año (o 10 día/año) cada año, durante el número de años de observación.

Las consecuencias de los caudales extremos son diferentes según el grado de continuidad de ellos y los usos de la producción eléctrica prevista. Aunque las crecidas y los estiajes sean fenómenos muy diferentes, la reducción de la producción que ocasiona a veces, es más sensible en el caso de una consumición en una red aislada que en el caso de una contribución a la red nacional disponiendo de otras fuentes de producción. Así el número de días de bajos y altos caudales serán examinados unas veces como falta de ganancia otras como parada de funcionamiento en relación con la consecutividad de los días considerados con desórdenes tales que 10 días consecutivos de mal funcionamiento no son equivalentes a 10 veces 1 día distribuido en un largo período de tiempo.

Sin embargo los estiajes y las crecidas que son fenómenos fundamentalmente diferentes deberán ser examinados separadamente.

Los caudales de estiaje representan la aportación de las aguas subterráneas al río, corresponden al término B de la ecuación del balance:

$$Q = B + R = P - E - I + B$$

Esos caudales permiten a la administración definir el valor del caudal reservado. Permiten igualmente al productor autónomo conocer las potencialidades mínimas en el sitio de las P.C.H., y de ubicarlas en el año y examinar si son compatibles con el tipo de utilización previstas (calefacción invernal, funcionamiento de una red aislada).

Los caudales de crecidas son creados por las aportaciones brutales de la escorrentía (término B de la ecuación del balance). Los caudales de crecidas sirven al cálculo del tamaño de las obras de ingeniería civil:

- protección de las instalaciones
- tamaño del aliviadero de crecida

En el caso de salto bajo ($H \leq 5$ m) la crecida puede disminuir fuertemente y en ciertos casos suprimir la altura de caída y por consecuencia afectar y anular la producción producida. El número de días de crecida es un dato importante.

Así los caudales extremos tienen consecuencias para la producción de energía, por la perenidad de las obras y para la vida social.

El conocimiento de los caudales es muy delicado. Por ejemplo, los caudales del estiaje pueden ser influenciados por las intervenciones humanas aguas arriba: toma por la irrigación, abastecimiento de pueblos, maniobras de compuertas de embalses...

Las crecidas son de medición difícil a pesar de aparatos sofisticados.

4. EL CAUDAL EXPLOTABLE -- SU DETERMINACION

4.1. Incidencia en la elección del caudal de "armamento" por la producción eléctrica

Las turbinas pueden funcionar con un buen rendimiento solamente en una banda de caudal bien determinada y las condiciones económicas no permiten la colocación de varios grupos. Conviene elegir la banda adaptada al objetivo.

El caudal de "armamento" es el valor mínimo del caudal que permite el desarmado, el arranque y el funcionamiento de la turbina. El valor de ese caudal condiciona el modo de utilización y el número de kilovatios horas que serán producidos.

Si no se turbiniza el agua en el estiaje significa una imposibilidad de utilizar la PCH para calefacción en las cuencas de régimen nival (estiaje de invierno). Al contrario, un caudal de armamento elevado permite una producción elevada fuera del estiaje superior a una producción continua y regular con un caudal de armamento inferior.

Así la investigación de la productividad máxima es incompatible con el auto-consumo que necesite a una producción regular con pocos días de interrupción en el año.

4.2. Ejemplo de cálculo del caudal de explotación

Potencialidades de la Semouse en Aillervillers en Francia. Superficie de la cuenca 97 km².

El estudio hidrológico da el número de días de funcionamiento garantizado por diferentes caudales (tabla 5).

El número de días de funcionamiento es en relación inversa del caudal nominal de la turbina; por ejemplo el funcionamiento garantizado es en el período estival de 123 días por 750 l/s pero inferior a 60 días por 1500 l/s.

Para un salto de 2 metros, las turbinas Kaplan tienen un rendimiento satisfactorio en una banda de caudal entre el caudal nominal y eso dividido por dos.

Así, para un caudal máximo turbinado de 3 m³/s, las elecciones posibles pueden ser esquematizadas por:

- 1 turbina entre 3 y 1,5 m³/s (1)
- o 1 turbina entre 2 y 1 m³/s (2)
- o 1 turbina entre 1 y 0,5 m³/s (3)

La potencia máxima disponible P max 40 KW no justifica la instalación de 2 turbinas por causas económicas.

La elección de la turbina 3 Pmax = 14 KW Pmin = 7 KW permite un funcionamiento casi continuo con poco riesgo de interrupción.

La turbina 2 Pmax = 28 KW L min = 14 KW P tendrá un funcionamiento satisfactorio en invierno pero poco en verano.

La turbina 1 P max = 42 KW P min = 21 KW no funcionará, generalmente en verano pero su producción invernal (120.000 KWh) será casi igual a la turbina 2 (41.000 KWh en verano y 84.000 KW h en invierno).

4.3. El caudal reservado

En las pequeñas cuencas los caudales del estiaje son bajos y discrepancias de interés pueden existir entre la producción eléctrica y la vida social, y otros usuarios del río.

Se necesita definir un caudal mínimo en el cauce del río para satisfacer usos antagónicos.

En Francia el caudal característico medio del estiaje DCE355 representa el caudal diario medio sobrepasado durante 355 días durante diez años al mínimo y el caudal reservado es evaluado según las comarcas, así en la región Anvergne - Limousin (Centro de Francia) ese caudal es 1,3 DCE355 en verano, y 0,7 DCE355 en invierno.

Ese valor del caudal reservado influye directamente en la rentabilidad de la P.C.H. y sobre todo en verano porque en invierno los caudales son superiores a las posibilidades de la altura.

EJEMPLO DE DURACION DE FUNCIONAMIENTO

Tabla Nº 5

PERIODO DE VERANO Iro. ABRIL -30 SEPTIEMBRE					
Fonctionnement assure	Nombre de jours de fonctionnement assure á un certain débit pendant les 183 jours de la period estivale				
	500 ls	750 ls	1 000 ls	1 250 ls	1 500 ls
9 années sur 10	115	73	< 60	< 60	< 60
8 années sur 10	156	93	66	< 60	< 60
5 années sur 10	> 173	123	90	75	< 60
2 années sur 10	> 173	160	126	109	90
1 années sur 10	> 173	> 173	143	116	100

PERIODO DE INVIERNO Iro. OCTUBRE - 31 MARZO							
Fonctionnement assuré.	Nombre de jours de fonctionnement assuré a un certain débit pendant les 182 jours de la période hivernale						
	500 ls	1 000ls	1500 ls	2000 ls	2500 ls	3000ls	3500 ls
9 ans sur 10	156	105	60	< 60	< 60	< 60	< 60
8 ans sur 10	162	140	80	67	< 60	< 60	< 60
5 ans sur 10	> 172	157	137	117	102	75	< 60
2 ans sur 10	> 172	> 172	162	142	120	105	90
1 ans sur 10	> 172	> 172	> 172	147	130	110	95