NACIONES UNIDAS

CONSEJO
ECONOMICO
Y SOCIAL

LIMITADO

ST/ECLA/CONF.7/L.3.13
31 de julio de 1961

ORIGINAL: ESPAÑOL

SEMINARIO LATINOAMERICANO DE ENERGIA ELECTRICA

Auspiciado por la Comisión Económica para América Latina, la Dirección de Operaciones de Asistencia Técnica y la Subdirección de Recursos y Economía de los Transportes de las Naciones Unidas, conjuntamente con el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos

México D.F., 31 de julio a 12 de agosto de 1961

EVALUACION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS SUPERFICIALES

por

Eduardo Cravioto, de la Dirección de Hidrología
de la Secretaría de Recursos Hidráulicos
México

NOTA: Este texto será revisado editorialmente.

EVALUACION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS SUPERFICIALES

Procedimientos seguidos por la Secretaría de Recursos Hidráulicos

I N D I C E

NOTA: Por razones de tiempo, no ha sido posible reproducir el material gráfico que lleva este estudio. Se incorporará a la versión definitiva.

/I. GENERALIDADES

I. GENERALIDADES

a).- Lluvia.

El agua, elemento fundamental en la vida de todo ser viviente, describe en la naturaleza un ciclo con sus transformaciones sucesivas, tomando como punto de partida la evaporación principalmente en las grandes masas de agua como mares y lagos, circulando después hacia la atmósfera como vapor de agua, para volver a precipitarse en la tierra en forma de lluvia, nieve etc.

En la República Mexicana la precipitación del vapor de agua en forma de nieve, es muy reducida y sólo en algunas partes del norte, como en la Sierra de Chihuahua se pueden presentar aportaciones de alguna consideración, pero en el resto de la República el vapor de agua se precipita exclusivamente en forma de lluvia.

En nuestro País se presentan las cuatro clases de lluvias siguientes:

1).- Lluvia Convectiva.- Esta clase de lluvias llega a presentarse en las costas de Veracruz, Tabasco y Campeche y algunas veces con condiciones especiales, también en la Mesa Central. Frecuentemente se presenta en combinación con la lluvia de origen orográfico.

2).- Lluvia Orográfica o de Relieve.- Esta clase de lluvia es la que más se presenta en nuestra República, ya que tenemos cadenas de montañas que van casi paralelas a la costa tanto en el Pacífico como en el Golfo, siendo en dichas zonas en donde se registran las más fuertes precipitaciones, sobre todo en la Vertiente del Golfo.

Las cadenas de montañas son: paralela a la costa del Pacífico tenemos la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre del Sur y la Sierra de Chiapas; en la costa del Golfo se encuentran la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Oaxaca. Uniendo los dos macizos de montañas tenemos la Coordillera Neovolcánica en donde se encuentran los

/picos más

picos más elevados de nuestro País. En la Baja California y También paralela a la costa se localiza la Sierra de Baja California.

3).- Lluvia ciclónica.- Nuestro país se encuentra expuesto a los ciclones tanto del Oceano Atlántico, como del Pacífico, siendo los más peligrosos los que se generan en el Caribe, que han provocado grandes crecientes en los ríos de la Vertiente del Golfo y aún de la Altiplanicie.

4).- Lluvia por choque de masas de aire.- Durante el invierno principalmente, grandes masas de aire frío polar se trasladan hacia el sur y al chocar con masas de aire húmedo que circulan hacia el norte producen este tipo de lluvia.

En el norte de la República, en los estados de Sonora y Sinaloa, estas lluvias han provocado las máximas crecientes.

b).- Escurrimiento Superficial.

La mayor parte del agua de lluvia caída en nuestro País, se pierde por evapotranspiración de la cubierta vegetal, otra parte importante se pierde por infiltración en el terreno y sólo una parte escurre superficialmente por ríos y arroyos, dependiendo de los factores principales siguientes:

1).- Régimen pluvial.- Cantidad e intensidad de las lluvias.
2).- Características topográficas.- Area, forma y pendiente de la cuenca.
3).- Posición geográfica.
4).- Geología.
5).- Vegetación.
6).- Almacenamientos naturales.

La forma alargada de nuestro País, con cadenas montañosas paralelas a las costas, hace que la mayoría de las corrientes sean de reducida longitud y sólo se tengan

/ríos muy

ríos muy caudalosos en las zonas donde las lluvias son abundantes como en los estados de Tabasco, Chiapas y Veracruz.

El escurrimiento superficial de todas nuestras corrientes, se ha estimado en 357 miles de millones de m3. medios anuales, pero de este escurrimiento cerca del 50% corresponde a la zona Golfo Sur en donde se tiene una aportación unitaria de 910 000 m3. por Km2. en cambio por ejemplo en Baja California la aportación unitaria es de sólo 8 400 m3. por Km2. y en algunas zonas de la Península de Yucatán, en la región de el Salado y en el Bolsón de Mapimí se tiene un escurrimiento prácticamente nulo.

En una misma cuenca las variaciones de los escurrimientos anuales varía de un año a otro y así en los ríos de la zona húmeda de Veracruz y Tabasco, el escurrimiento máximo anual es del orden de 3 o 4 veces el escurrimiento anual mínimo, en cambio en las zonas áridas del noroeste, el máximo anual llega a ser hasta de 200 veces el mínimo anual y se registra un año muy abundante y después una sucesión de años muy escasas. Es por esto que en nuestro País es completamente indispensable tener estadísticas hidrológicas de un largo período de tiempo que permitan estudiar con mayor probabilidad de éxito, el aprovechamiento de los recursos hidráulicos de una cuenca.

Para la formulación de las estadísticas hidrológicas es necesario previamente tener un Servicio Hidrométrico para la instalación y operación de las estaciones y también para la revisión y cálculo de datos, así como la formación de las estadísticas.

/II. SERVICIO

II. SERVICIO HIDROMETRICO DE LA SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS.

a).- Origen y crecimiento.

Para la evaluación de los recursos hidráulicos superficiales es necesaria la medida directa de los escurrimientos de los ríos o arroyos, para lo cual se han instalado estaciones hidrométricas en gran parte de las corrientes de nuestro país; sin embargo, es imposible medir los escurrimientos de todas las corrientes y sus afluentes, por lo que en algunos casos hay necesidad de recurrir a los datos de lluvia para estimar los escurrimientos en sitios convenientes para las obras de la Secretaría o de otras Dependencias, pero prestando aún en estas deducciones un gran servicio los datos de escurrimiento procedentes de aforos. Por esta razón también se ha incrementado el establecimiento de estaciones climatológicas repartidas en todo el territorio. En estas estaciones, además de las lluvias, se registran las temperaturas máximas y mínimas diarias de donde se deducen las medias, la evaporación en pequeños tanques y en algunos casos la humedad relativa.

La instalación y operación de las estaciones hidrométricas y climatológicas las efectúa el Servicio Hidrométrico dependiente de la Dirección de Hidrología de la Jefatura de Irrigación y Control de Ríos.

Desde fines del siglo pasado se empezaron a hacer mediciones de los escurrimientos de algunas corrientes de nuestro País, pero hasta principios del siglo se instalaron algunas estaciones hidrométricas en las cuencas de los ríos Lerma, Bravo y Nazas.

En el año de 1921 la Dirección de Irrigación dependiente de la Secretaría de Agricultura y Fomento, dió el primer impulso al Servicio Hidrométrico al crear la Sección de Hidrología y las siguientes Dependencias Foráneas:

/División Inspectora

División Inspectora de Sonora y Sinaloa.
Comisión Irrigadora del Estado de Chihuahua.
Comisión del Río Salado.
Comisión del Río San Juan.
Comisión Inspectora del Río Nazas.
Comisión Reglamentadora del Río Santiago.
Comisión Inspectora de Guadalajara.
Comisión Irrigadora del Lago de Yuriria.

En esa época no todos los datos se concentraban en la Sección de Hidrología y la mayoría de ellos los archivaban las Dependencias Foráneas.

Al crearse la Comisión Nacional de Irrigación en el año de 1926, el Departamento de Estudios y Proyectos tuvo a su cargo la operación del Servicio Hidrométrico y fué cuando se le empezó a dar el mayor impulso a los estudios hidrométricos, incrementando el número de las estaciones hidrométricas. En el año de 1926 se operaban por esta oficina 40 estaciones hidrométricas las que se fueron aumentando paulatinamente hasta llegar a 322 en el año de 1946 en que desapareció la mencionada Comisión Nacional de Irrigación.

En el año de 1947 al crearse la actual Secretaría de Recursos Hidráulicos la oficina de Hidrología se convirtió en la actual Dirección de Hidrología la que ha tenido a su cargo la operación del Servicio Hidrométrico a través de su Departamento de Hidrometría.

La Dirección de Hidrología ha continuado la ampliación del número de estaciones hidrométricas teniéndose actualmente 801 estaciones incluyendo las de las Comisiones Independientes. En la gráfica No. 1 anexa puede verse el crecimiento del número de estaciones hidrométricas desde la creación de la Comisión Nacional de Irrigación hasta la fecha.

También el número de estaciones climatológicas ha ido en aumento y así en 1926 se tenían 306 estaciones y actualmente llegan a 1 200. Este número de estaciones se refiere exclusivamente a las operadas por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, ya que otras Dependencias también tienen establecidas estaciones climatológicas.

/b).- Organización

b).- Organización y funcionamiento actuales.

Todas las labores del Servicio Hidrométrico, son controladas en las Oficinas Centrales por el Jefe del Departamento de Hidrometría del que dependen tanto las oficinas foráneas como las auxiliares de Oficinas Centrales.

Para los trabajos de campos se ha subdividido el País en "Divisiones Hidrométricas", teniendo en cuenta tanto el agrupamiento debido de las cuencas hidrográficas, como las facilidades de acceso a las estaciones para un mejor control del personal de las mismas.

Actualmente se tienen 20 Divisiones que dependen directamente de la Dirección de Hidrología, denominadas:

Alto Lerma	Alto Pánuco
Los Altos	Baja California
Bajo Lerma	Balsas
Chiapas	Conchos
Ensenada	Orígenes del Lerma
Región Lagunera	San Juan
Sinaloa	Sonora
Tabasco	Tamaulipas
Tehuantepec	Valle de México
Veracruz	Yucatán

Además se tienen las Divisiones de las Comisiones Independientes siguientes: Comisión del Río Fuerte, Comisión del Papaloapan y Comisión del Tepalcatepec.

En el plano de la República del anexo No. 2 puede verse la distribución de las 23 Divisiones Hidrométricas, junto con la división política por Estados. En este plano puede verse que hay "Divisiones" que abarcan parte hasta de 7 estados como la No. 15 y en cambio otras sólo un estado como la No. 2.

/Cada División

Cada División tiene un jefe ingeniero o una persona con muchos años de experiencia en hidrometría, que tiene bajo su control el presupuesto, el personal y el equipo de cada División.

Los Jefes de División Hidrométrica se encargan también de la construcción y vigilancia de la operación de todas las estaciones hidrométricas y climatológicas de su jurisdicción.

El personal de campo envía sus datos a las oficinas de la División, en donde son revisados y después enviados todos juntos a las Oficinas Centrales en México para su cálculo, archivo y publicación en algunos casos.

La medición de los escurrimientos en los ríos y arroyos y en algunos canales, se efectúa por medio del procedimiento de sección y velocidad media. El área se mide por sondeos en varios tramos de la sección y la velocidad con el molinete hidráulico. Actualmente se determina la velocidad por el método de "Dos Puntos" o sea con observaciones a los 2/10 y 8/10 de la profundidad. En aquellos casos en que el tirante de agua es menor de 1.00 m. y la velocidad inferior a 1 m/s. o en donde las avenidas son muy rápidas y por lo tanto de escasa duración, se hace la observación de la velocidad a los 6/10. Cuando la corriente tiene bastante velocidad o lleva muchos cuerpos flotantes en suspensión se hace la observación a los 2/10, pero en este caso para determinar la velocidad media tiene que aplicarse un factor correctivo determinado en la misma estación. Sólo en casos especiales en que no puede seguirse ninguno de los métodos anteriores, se hacen observaciones superficiales.

Por lo general las estaciones constan de un cable-vía con una canastilla desde donde se hacen los sondeos y la medición de la velocidad, y de escalas y limnígrafos que registran las variaciones de los niveles del agua.

En algunos casos en que por economía o por ser demasiado anchos los ríos, no se puede instalar el cable-vía,

/se utilizan

se utilizan puentes carreteros o de ferrocarril o se hacen los aforos con barca. La experiencia nos ha indicado que por lo general los puentes y sobre todo los antiguos, no son apropiados para hacer los aforos, ya que en ocasiones están esviajados o tienen varias pilas que provocan remolinos durante las crecientes, modificando el régimen de escurrimiento del río y dando lugar a errores en la determinación de la velocidad. Unicamente los puentes modernos, con grandes claros y perpendiculares a las corrientes, sirven para la práctica de los aforos.

En corrientes muy anchas, no se han establecido estaciones de cable-vía, ya que además del costo, se dificulta bastante la práctica del aforo desde la canastilla, por lo que en estos casos se afora la corriente utilizando barcas pequeñas y de poco calado, las cuales se aseguran por medio de un cable tendido a través del río. Unicamente en la región de Tabasco se tienen estaciones de este tipo.

En corrientes pequeñas y en canales, cuando esto es posible, se han instalado vertedores o medidores Parshall en los cuales se conoce el escurrimiento exclusivamente registrando los niveles del agua con las escalas o limnígrafos.

Las estaciones hidrométricas sobre ríos, se procura que estén atendidas por un aforador y un ayudante o lector de escala, que de preferencia vivan en sitios inmediatos a la estación para que puedan aforar el mayor número de crecientes, para lo cual en muchas ocasiones hubo necesidad de construirles las casas. Los aforadores trabajan todo el año, aún en época de secas y aunque se tengan instalados aparatos registradores (limnígrafos); en cambio los ayudantes en la mayor parte de los casos únicamente trabajan en la época de crecientes. Sólo en casos especiales, un aforador atiende 2 o más estaciones hidrométricas.

Los aforadores y lectores de escala también atienden las estaciones climatológicas instaladas cerca de las hidrométricas.

Como en las estaciones climatológicas únicamente se hace una observación al día a las 8 hrs., todas aquellas estaciones que no son atendidas por el personal de aforadores y lectores de escala, son operadas por personal que no recibe

sueldo sino únicamente una pequeña gratificación mensual, ya que de otra manera este servicio sería más costoso. Aunque al principio se tuvieron algunas fallas por este sistema de pago, actualmente esta etapa se ha superado y todos prestan sus servicios con bastante eficacia.

El Jefe de División y su ayudante periódicamente hacen visitas a las estaciones para asegurar la mejor obtención de los datos.

En Oficinas Centrales en México, se tienen las oficinas siguientes auxiliares del Jefe de Hidrometría:

OFICINA TECNICA, en donde se tienen inspectores que hacen visitas a las Divisiones Hidrométricas y proyectistas de las estaciones hidrométricas nuevas.

OFICINA DE CALCULO HIDROMETRICO, en donde se concentran todos los datos hidrométricos del campo, haciéndose el cálculo de los gastos medios diarios, mensuales y anuales, los gastos máximos y mínimos y los volúmenes mensuales y anuales, formulándose y archivándose las estadísticas de datos diarios, mensuales y anuales.

OFICINA ADMINISTRATIVA, para el control administrativo del personal, equipo y presupuestos de las Divisiones.

LABORATORIO DE TARA DE MOLINETES, en el que se tiene el equipo y personal necesario para tarar y reparar los molinetes, así como también el demás equipo usado en el Servicio Hidrométrico como limnígrafos, pluviógrafos, etc. La experiencia ha indicado que cada año deben tararse todos los molinetes aunque aparentemente estén en buenas condiciones y es así como durante la época de estiaje con un calendario riguroso, se van tarando los molinetes de todas las Divisiones, extendiéndose también el servicio a otras Dependencias Oficiales.

III. PROCEDIMIENTOS SEGUIDOS PARA AMPLIAR EL PERIODO DE DATOS

Es evidente que para una correcta evaluación de los recursos hidráulicos superficiales, el mejor procedimiento

/es medir

es medir directamente los escurrimientos por un largo período de tiempo que cubra tantos años de abundancia como de escasez, pero en nuestro País únicamente en algunos casos se tienen estadísticas hidrométricas suficientes, por lo que en la mayoría de los estudios hay necesidad de ampliar el período de datos disponible.

En la mayoría de los casos la ampliación del período de datos hidrométricos se hace basándose en la lluvia media en la cuenca, por lo que en primer lugar hay necesidad de completar los datos pluviométricos.

a).- Datos pluviométricos.- Con frecuencia se tienen registros de lluvias de un período más o menos largo de tiempo, pero faltan algunos meses, o se tienen varios años de registro con una pequeña interrupción, por lo que en estos casos es conveniente deducir los datos faltantes para completar un período razonable de datos.

Cuando el dato faltante corresponde a un mes de la época de secas o estiaje, se considera suficiente calcular el promedio registrado en dicho mes en los años con observaciones. Por lo general durante el estiaje las lluvias representan un porcentaje relativamente reducido del total anual y por lo tanto cualquier error en el dato estimado no tiene influencia en la lluvia anual. En la mayor parte de la República la época lluviosa del año se tiene de junio a octubre y el estiaje de noviembre a mayo, pero en cada caso especial se determina cual es la época de secas para saber en qué meses pueden estimarse los datos faltantes en esta forma tan rápida y sencilla.

En el procedimiento anterior no tiene influencia lo normal o anormal de los meses en que hay observaciones en el año incompleto, como sucede en el "método racional deductivo" que se menciona a continuación.

Método racional deductivo.- Este método se basa en la suposición de que la lluvia mensual está en relación directa de la lluvia anual o sea que depende de si el año es escaso,

/normal abundante.

normal abundante. De acuerdo con lo anterior se tiene:

$$x = \frac{P\,K}{1200 - K}$$

X = Suma de las precipitaciones mensuales desconocidas en el año.

y también

$$\frac{P_1}{X} = \frac{k_1}{K}$$

$$X = P_1 + P_2 + p_3 + \text{----------}$$

$$\therefore\ P_1 = X\ \frac{k_1}{K}$$

P = Suma de las precipitaciones mensuales conocidas en el año que se desea completar.

sustituyendo el valor de X

K = Suma de los porcientos de la lluvia media mensual, en los meses faltantes.

$$P_1 = \frac{P\ K_1}{1200 - k}$$

$$K = k_1 + k_2 + k_3 \text{ ----------}$$

1200 - K = Suma de los porcientos de la lluvia media mensual en los meses que tienen datos de precipitación.

Por lo tanto el procedimiento consiste en determinar para cada uno de los años con datos completos de la estación, el porcentaje de la precipitación de cada mes con relación a la media mensual respectiva. La suma de los porcientos mensuales en cada año es de 1200 y la columna que los contiene representa la ley de variación mensual en el año. El promedio de los porcientos para un mes determinado en los años completos, se admite que es el porciento (k_1) en el mes de precipitación (p_1) desconocida.

En este procedimiento se admite que hay una ley media de variación mensual para cada estación, pero si el mes desconocido resulta excepcional en las otras estaciones pluviométricas de la misma región, en lugar de este procedimiento se usa el de correlación.

CORRELACION.- Este procedimiento consiste en buscar gráficamente la correlación mensual entre los datos de la estación con registros incompletos y los de alguna o algunas otras cercanas con datos completos, que tengan un período común de

/observaciones y

observaciones y que se puedan considerar como representativa de la incompleta, no en altura media de precipitación mensual, sino en su ley de variación. Por lo general hay necesidad de utilizar datos de 2 o más estaciones vecinas para ver con cual de ellas los puntos dibujados en las gráficas se alínean mejor, o sea para determinar cuál de las estaciones tiene variaciones de lluvias más parecidas a las de la estación con datos faltantes.

Estos métodos también se utilizan para la estimación de lluvias anuales, con el fin de completar un período común de datos en todas las estaciones seleccionadas en una cuenca. La aplicación del método racional se hace por medio de estaciones Piloto o sean aquellas que tienen completo el período de datos.

b).- Datos hidrométricos.- Dos son los procedimientos más usuales para la ampliación del período de datos hidrométricos: por medio del coeficiente de escurrimiento y lluvias medias, y por medio de correlaciones con datos de cuencas vecinas.

Coeficiente de escurrimiento.- Cuando se tienen varios años de datos hidrométricos y un amplio período de datos pluvimétricos, pueden usarse éstos para prolongar el período de datos observados, para lo cual es necesario primero determinar la lluvia media en la cuenca para cada año.

La lluvia media en una cuenca puede determinarse por dos procedimientos: trazando curvas isoyéticas o de igual lluvia o por áreas de influencia o método de Horton.

Para el trazo de curvas isoyéticas, en un plano de la cuenca se localizan las estaciones climatológicas y se pone la lluvia correspondiente a cada estación, trazándose las curvas isoyéticas interpolando entre los datos de las estaciones y teniendo en cuenta cuando es posible la orografía de la región. Después se determinan los volúmenes llovidos cubicando como si fuera un plano topográfico. Este procedimiento es el que representa con mayor fidelidad la precipitación en la cuenca, pero es sumamente laborioso cuando se

/tiene un

tiene un largo período de datos pluviométricos.

El método de las áreas de influencia consiste en suponer que cada estación pluviométrica tiene un área de influencia en donde la lluvia es igual a la de la misma estación. Para determinar dichas áreas de influencia se unen las estaciones con rectas y se trazan perpendiculares en los puntos medios, los polígonos que forman estas perpendiculares definen las áreas de influencia. El volumen llovido se obtiene sumando los productos de las áreas de influencia por la lluvia en la estación correspondiente. Este método tiene la ventaja de que las áreas de influencia son constantes y por lo tanto el cálculo es muy rápido, pero no se tiene en cuenta la orografía de la región.

En ocasiones se sigue un procedimiento combinado, es decir, se trazan las curvas isoyéticas medias anuales de todo el período de estudio y se determina la precipitación media anual en la cuenca. Después por el método de áreas de influencia se determina el volumen llovido para cada año, haciéndose un pequeño ajuste para que el promedio coincida con el estimado por medio de las curvas isoyéticas.

Una vez determinadas las lluvias medias anuales para cada año, se calculan los coeficientes de escurrimiento.

En una gráfica de ejes cartesianos se marcan los puntos correspondientes a cada uno de los años con datos hidrométricos, considerando la lámina de lluvia en un eje y el coeficiente de escurrimiento en el otro. Si los puntos definen más o menos una curva, ésta será la ley del coeficiente de escurrimiento. Con esta gráfica y las láminas de lluvia media en los años sin observaciones hidrométricas, se estiman los coeficientes de escurrimiento y se calculan los volúmenes anuales escurridos.

Correlaciones.- Este método rápido y sencillo consiste en determinar la correlación entre los volúmenes escurridos en la cuenca en estudio y en otra cuenca vecina que tenga un

/amplio período

amplio período de datos, para así con éstos y la relación estimar los datos faltantes. Estas relaciones generalmente se hacen con datos mensuales o anuales.

Cuando se tiene una buena correlación, con este método se obtienen resultados bastante satisfactorios, pero en nuestro País por lo general no se tienen cuencas con un período de datos suficientes y por lo tanto no siempre puede seguirse este procedimiento.

Cuando no se tienen datos para seguir alguno de los métodos antes descritos, se hace una estimación aproximada trazando una correlación entre la lluvia media en las estaciones pluviométricas de la cuenca en estudio que tengan un largo período de datos y la lámina media escurrida. Si las estaciones están bien repartidas en la cuenca, los resultados serán buenos, pero si no es así, sólo representan una tosca aproximación.

Los métodos anteriormente descritos para prolongar el período de datos climatológicos e hidrométricos son los más usuales, pero en algunos casos se siguen otros procedimientos, dependiendo de la información y tiempo disponible para el estudio.

Estos procedimientos se refieren a los casos en que se dispone de algunos datos hidrométricos de la misma cuenca, sin embargo hay ocasiones, sobre todo en cuencas de magnitud reducida, en que sólo se tienen datos climatológicos, por lo que hay necesidad de basarse en los resultados obtenidos en cuencas vecinas cuyas condiciones sean más o menos semejantes. En estos casos se determina la lluvia media para cada año en la cuenca en estudio y se le aplica la ley del coeficiente de escurrimiento basada en los datos de la cuenca vecina, y en los casos en que no es posible hacerlo, se aplica un coeficiente de escurrimiento constante.

/IV. Proyectos hidroeléctricos

IV. PROYECTOS HIDROELECTRICOS EN LAS OBRAS DE LA SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS

a).- Coordinación de los diversos usos en las presas para gran irrigación.- En las primeras grandes obras hidráulicas construidas para el regadío de terrenos, el único objetivo de la construcción de la presa era el riego, sin embargo, con el tiempo se fue palpando la necesidad de construir presas que, además del riego, sirvieran para otros usos como abastecimiento de poblaciones, generación de energía, control de avenidas, navegación, etc.

Hay algunos aprovechamientos o usos que son compatibles entre sí y otros no.

Por lo general el control de avenidas no se interpone con los demás usos, ya que para dicho control, sólo se necesita ampliar la capacidad de la presa y hay ocasiones que dicha capacidad se aprovecha durante algunos meses para almacenar agua y por lo tanto sirve como ayuda a los demás usos. Unicamente en el caso en que topográfica o económicamente se tenga limitada la capacidad del vaso de almacenamiento, el control de avenidas se opondrá al riego, pero éste es un caso particular y no general.

En grandes presas construidas para fines de riego, la cantidad de agua que puede usarse para el abastecimiento de agua potable para poblaciones es tan pequeña comparada con las necesarias para el riego, que nunca constituye un problema. En presas chicas sí puede oponerse el riego, pero en este caso prácticamente se elimina la oposición al considerar el abastecimiento de aguas potables como esencial o primordial y el riego y generación de energía como secundarios.

Sólo los ríos del Sureste de la República son navegables, pero en esa zona el riego es de poca importancia por la enorme precipitación pluvial que se registra y la generación de energía no se interpone con la navegación sino al contrario,

/los dos

los dos aprovechamientos son completamente compatibles, pues el régimen de las extracciones que se hacen para la generación de energía, favorece la navegación.

Por ser el caso más importante en nuestras obras, quise referirme al último, al riego y generación de energía firme, dos aprovechamientos que por lo general son incompatibles y que trataré con mayor detalle.

El principal problema que se necesita resolver para poder aprovechar las aguas almacenadas en una presa, tanto en riego como en generación de energía, es coordinar las dos demandas para tener el máximo aprovechamiento. Para la generación de energía se necesita extraer agua todo el año con muy pocas variaciones, en cambio para riego las extracciones por lo general se concentran en unos cuantos meses, que son los de estiaje y en la época lluviosa se hacen extracciones reducidas o nulas. Varias soluciones pueden aceptarse para resolver este problema, dependiendo naturalmente de las condiciones de cada caso particular.

1a.- Construcción de una presa de recaptación inmediatamente aguas abajo de la presa principal. Esta es la mejor solución, porque permite hacer las extracciones para generación de energía independientemente de las extracciones para riego, ya que éstas se harán de la presa inferior. Sin embargo no siempre es posible tener un buen sitio para la construcción de la presa inferior y por lo general su construcción es costosa.

2a.- Generación de energía con las extracciones para riego y además, instalación de una planta termoeléctrica. Esta solución permite hacer las extracciones para riego libremente ya que el faltante en energía se abastece con la planta termoeléctrica. Esta solución siempre puede adaptarse y es de recomendarse si desde el punto de vista económico es aceptable. Si las extracciones para riego no disminuyen mucho en la época de avenidas esta solución es la mejor,

/pues sólo

pues sólo se necesitará una pequeña planta termoeléctrica para completar la demanda de energía, pero si las extracciones para riego llegan casi a anularse en algunos meses, esta solución también es costosa pues se necesitará una planta termoeléctrica de gran capacidad.

3a.- Generación de energía secundaria con las extracciones para riego, interconectando la planta hidroeléctrica con un sistema de varias plantas que incluyen, plantas termoeléctricas. Esta es la solución más práctica porque la presa se opera teniendo en cuenta únicamente el riego, sólo se necesita que el sistema cuente con una o varias plantas térmicas con la suficiente capacidad para poder generar los faltantes que se tengan con las plantas hidroeléctricas.

4a.- Generación de energía firme y además abastecimiento de las demandas para riego. Esta solución sólo es posible cuando el agua almacenada en la presa, permite abastecer totalmente el riego y todavía sobre agua, que puede utilizarse para la generación de energía o cuando las variaciones de la demanda de riego no son muy grandes y por lo tanto con un pequeño desperdicio de agua puede completarse la generación.

Todo lo anterior se refiere a una sola presa de almacenamiento pues cuando se tienen dos o más presas se pueden hacer varias combinaciones como por ejemplo generar energía firme en las presas superiores y usar la presa inferior sólo para riego; generar energía en la presa inferior con las extracciones para riego y completar la demanda con la generación en las presas superiores, etc.

El caso más común ha sido el tercero, teniéndose varios ejemplos, como los de las plantas construidas en las grandes presas del noroeste (estados de Sinaloa y Sonora).

/La solución

La solución del punto 4 es la mejor, pero sólo en contadas ocasiones puede llevarse a cabo como en la presa Alemán (Excamé) en el estado de Zacatecas o en el proyecto de la presa de Pujal, en la cuenca del Río Pánuco, que se tratará en el capítulo siguiente.

Actualmente en todos los proyectos de grande irrigación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, además del objetivo principal que es el riego, se toman en cuenta el control de avenidas y la generación de energía, pero sin olvidar que en nuestro País la superficie regable es relativamente reducida, ya que se estima que cuando más se podrá regar un 15% de la superficie total y teniendo en cuenta también, que el regadío de terrenos sólo puede hacerse con agua, no así la generación de energía que puede ser termoeléctrica.

b).- Estudio hidrológico del río Tampaón, Vaso de Pujal.

1.- Datos generales.

Descripción.- El río Tampaón o Tamuín es uno de los afluentes más importantes del río Pánuco, el cual a su vez representa, en el panorama general del país, uno de los ríos más caudalosos tanto por su cuenca que le proporciona una área tributaria muy amplia, como porque dadas su situación geográfica y su orografía, las precipitaciones llegan a alcanzar valores muy superiores a los de otras cuencas de la República.

El área total de la cuenca del río Pánuco, hasta la confluencia con el Tamesí es de 75 649 Km2., incluyendo la cuenca cerrada del llamado Valle de México, que en forma artificial se ha incorporado a este río. De esta cuenca 25224 Km2., corresponden al Tampaón, hasta el cruce con la carretera México Laredo, en el sitio llamado Pujal, y aunque la cuenca de este afluente no es de las que gozan de mayor precipitación, los escurrimientos son de gran magnitud a causa de su enorme superficie y de las aportaciones de algunos manantiales.

/La cuenca

La cuenca del río Tampaón hasta Pujal está situada entre los 21° 05' y 22° 40' de latitud norte y los 98° 55' y 101° 55'de longitud oeste, comprendiendo parte de los estados de Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí y Tamaulipas, siendo sus principales afluentes los ríos Sta. María, Verde, Gallinas y El Salto. Los dos primeros nacen en la Altiplanicie Central y tienen sus cauces sensiblemente paralelos en dirección general W.E. confluyendo en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, siendo las longitudes de sus cauces principales de 300 Km. el río Sta. María y 215 Km. el Río Verde. Los ríos Gallinas y El Salto nacen en la parte noreste de la cuenca en la Sierra Madre Oriental y corren paralelamente en dirección NNE - SSE con longitudes de cauce hasta sus confluencias con el río Tampaón de 82 Km. y 145 Km. respectivamente. Estos dos últimos ríos por estar situados en la zona más llovedora de la cuenca tienen las aportaciones unitarias más altas.

Se han llevado a cabo diversos estudios de tipo hidrológico, topográfico y geológico para la captación del río Tampaón, cuya alternativa final más conveniente resultó la llevada a cabo en el vaso de Pujal con el eje de cortina 200 mts., aguas arriba del puente construido sobre la carretera México Laredo.

Datos hidrométricos.- Se dispone de datos hidrométricos en la estación Pujal, localizada en el puente de la carretera México-Laredo próximo al eje de la cortina, pero las observaciones se iniciaron en el año de 1954. Esta estación ha funcionado bien durante todo el tiempo e incluye datos muy valiosos de las grandes crecientes registradas el año de 1955, así como datos de años extremadamente secos como 1957.

A continuación se presenta un resumen de los escurrimientos registrados en la estación de Pujal.

/Gastos en

Año	Gastos en m3/s. Medio	Máximo	Mínimo	Vol. anual en millones de m3.
1954	168	3 100	17.	5 284
1955	370	8 000	32.	11 658
1956	249	2 400	80.	7 881
1957	86	560	46.	2 696
1958	284	3 060	26.	8 957
1959	134	710	55.	4 214

Escurrimiento medio anual en los 6 años 6 782.

Datos climatológicos.- Se tienen varias estaciones localizadas dentro de la cuenca en estudio, aunque sólo algunas cubren un amplio período de datos como se mencionará después.

/Datos topográficos

Datos topográficos.- Se dispone de levantamiento del Vaso y por lo tanto de las curvas de áreas y capacidades necesarias para la determinación de las pérdidas por evaporación y para el cálculo de la generación de energía y control de avenidas.

2.- Determinación del régimen del río Tampaón en Pujal

Se hizo una recopilación de las precipitaciones anuales disponibles llegándose a la conclusión de que el estudio debería iniciarse en el año de 1925, ya que en los años anteriores los datos eran muy escasos.

Como solo algunas estaciones tenían los datos completos hubo necesidad de seleccionar aquellas con mayor número de observaciones como guía y se les denominó "estaciones piloto" o simplemente "pilotos".

El área de la cuenca se subdividió en cinco zonas y en cada una de ellas se escogieron las tres estaciones siguientes:

Zona 1.- Río Verde, San Luis Potosí y Arriaga
Zona 2.- Guanajuato, Ocampo y Villa Victoria.
Zona 3.- Río Verde, Jacala y Doctor.
Zonas 4 y 5.- Antiguo Morelos, A. Obregón y Tantizohuiche.

Estas estaciones piloto, distribuidas dentro de la propia cuenca y fuera de ella, se utilizaron para discriminar los períodos normales, abundantes y escasos, a fin de ajustar de acuerdo con ellas, las observaciones obtenidas en las demás estaciones que no cubrían todo el período.

Aunque las estaciones piloto se escogieron entre las más completas, aún a estas les faltaban datos en algunos meses. Cuando los faltantes eran datos de meses de estiaje, se completaron por un simple promedio del mes faltante y cuando correspondían a meses de lluvia se empleó el Método Racional Deductivo.

Una vez completados los datos de las estaciones piloto, se tabularon por zonas, se promediaron anualmente las lluvias de las 3 estaciones y después se determinó el porciento de cada uno de estos promedios con relación al medio de todo el

/período de

período de estudio. Estos porcientos se utilizaron para deducir los datos faltantes en las demás estaciones aplicando el método racional deductivo.

Una vez completados los datos de todas las estaciones al mismo período de tiempo, se determinó la lluvia media anual y se marcaron en el plano de la cuenca, trazándose las curvas isoyéticas correspondientes, teniendo en cuenta el relieve orográfico de la región (véase anexo No. 3)

Se determinó la lluvia media en cada una de las 5 zonas en que se subdividió la cuenca y la media en toda ella resultando una lluvia media anual de 661 mm.

La lluvia media para cada año en cada zona se estimó en función de la variación de las lluvias en las estaciones piloto de dicha zona y después se calculó la de toda la cuenca. En esta forma se estimaron las lluvias medias para cada uno de los años de 1925 a 1953.

Para los años con datos hidrométricos observados, se calculó la lluvia media por medio de isoyéticas anuales, para así poder determinar mejor la relación entre la lluvia y el coeficiente de escurrimiento.

En la tabla siguiente se muestran las lluvias medias en la cuenca y las correspondientes láminas de escurrimiento.

Año	Lluvia media anual en mm.	Esc. anual en lámina de agua mm.
1954	657	209
1955	1 033	462
1956	703	312
1957	480	107
1958	994	355
1959	670	167

Con estos datos se encontró la relación entre la lluvia media anual y el coeficiente de escurrimiento y con esta relación y las lluvias medias de cada uno de los años de 1925 a 1953 estimadas como se explicó con anterioridad, se

/determinaron

determinaron los escurrimientos medios anuales hasta Pujal, siendo los siguientes:

Año	Escurrimiento en millones de m^3	Año	Escurrimiento en millones de m^3
1925	9 634	1945	1 808
1926	4 486	1946	6 267
1927	10 360	1947	6 612
1928	4 336	1948	4 990
1929	2 834	1949	2 142
1930	5 156	1950	2 874
1931	6 517	1951	3 572
1932	3 328	1952	6 760
1933	8 468	1953	4 009
1934	5 666	1954	5 284
1935	8 691	1955	11 658
1936	8 920	1956	7 881
1937	3 688	1957	2 696
1938	4 088	1958	8 957
1939	4 260	1959	4 214
1940	4 325	Prom	5 661
1941	10 419	Max.	11 658 (1955)
1942	4 546	Min.	1 808 (1945)
1943	3 335	Datos observados de 1954 a 1959.	
1944	5 357		

De 1925 a 1953 se tiene un escurrimiento medio de 5 429 millones de m^3. que corresponde al 80% del medio observado de 1954 a 1959.

Para calcular los volúmenes mensuales escurridos se tomó en cuenta la distribución media mensual del período registrado correspondiente a tres tipos de años:

a).- Años con ciclones.
b).- Años con aciclonamientos.
c).- Años sin ciclones.

Esta distribución se basó en las fechas y trayectorias de los ciclones que se han registrado en el Golfo de México, según las recopilaciones del Servicio Meteorológico Mexicano.

3.- Capacidad para riego y generación.- La capacidad total de la presa de Pujal está limitada para no inundar Ciudad Valles, por lo que el nivel máximo del agua en tiempo de avenidas no debe pasar de la elevación 69 m. a la que

/corresponde

corresponde una capacidad total de 3 635 millones de m^3. Por estudios preliminares se llegó a la conclusión que para un mejor aprovechamiento de usos múltiples en la presa, pero considerando como primordial el control de avenidas, la capacidad para azolves, riego y generación de energía en época de avenidas debería limitarse a la elevación 59 m. a la que corresponde un almacenamiento de 1 865 millones de m^3.

De acuerdo con estas limitaciones se determinó la superficie máxima de riego que podía abastecerse, resultando de 267 000 Has. con un coeficiente bruto de riego anual de 1.50 m. En este caso la generación de energía sería secundaria y dependería de las extracciones para riego.

Considerando exclusivamente un aprovechamiento para generación de energía firme, se llegó a la conclusión de que la generación sería de 13.6 millones de KWH mensuales. Para calcular la generación de energía mensual se supone que la carga media es igual al promedio entre la del primer día del mes en consideración y la del primer día del mes siguiente y se aplicó la fórmula siguiente:

$$KWH = 2\ 179.333\ V\ h$$

En donde KWH = KWH generados en el mes.
V = Extracción mensual en millones de m^3.
h - Carga media mensual en metros.

En esta fórmula se considera una eficiencia media total en turbina, generador y conductos, de 80% que se considera razonable para esta clase de estudios.

Por investigaciones posteriores de campo se vió que la superficie regable podía reducirse a 142 000 Has. considerando que solo se regaría en la margen izquierda y que la zona de la margen derecha del río Tampaón podría regarse con otros pequeños afluentes del río Pánuco cuyo aprovechamiento sería económico por contarse con gastos de estiaje de mucha

/consideración

consideración provenientes de manantiales. También se recomendó un coeficiente bruto de riego anual de 1.15 m. de acuerdo con el estudio agrológico efectuado. En estas condiciones la demanda de riego se redujo a los volúmenes siguientes:

	Millones de m3.		Millones de m3.
E	112.8	J	131.8
F	158.8	A	134.0
M	187.5	S	53.0
A	204.0	O	99.1
M	202.3	N	80.1
J	139.5	D	131.1
		Anual	1 634.0

Con estos nuevos datos se estudiaron varias alternativas del funcionamiento de la presa de Pujal para riego y generación de energía considerándose la más aceptable la de la alternativa No. 7 que consiste en lo siguiente:

a).- El desfogue se considera a la elevación 36.00 m.

b).- El almacenamiento mínimo es de 521 millones de m3. que corresponde a la elevación 51.00 m. ó sea que la carga mínima es de 15.00 m.

c).- El nivel máximo del agua permisible de octubre a mayo es 65.00 m. con un almacenamiento total de 2 861 millones de m3., por lo que la carga máxima resulta de 29.00 m. La relación entre carga mínima y máxima es de 52%. La carga de diseño es de 25.00 m.

d).- La generación de energía es de 13.6 millones de KWH mensuales.

e).- Como la presa es de uso múltiple hay necesidad de coordinarlos en la mejor forma posible, por lo tanto para el cálculo del funcionamiento del Vaso se obligó a que todos los años del 1o. de junio al 30 de septiembre el nivel del agua no suba de la cota 59.00 m. para tener totalmente libre la capacidad para control de avenidas. Aprovechando

/las avenidas

las avenidas de octubre en adelante se permite que a partir del día 1o. de dicho mes el nivel del agua pueda subir hasta la cota 65.00 m. con el fin de tener un mayor almacenamiento y también una mayor carga para generación de energía. En todos los casos estudiados se compararon las demandas de riego con las de energía, haciéndose la extracción que fuera mayor para alcanzar a cubrir las dos demandas, sin embargo en esta alternativa 7, las demandas de energía en todos los meses fue superior a la demanda de riego, por lo que en realidad el funcionamiento de la presa de Pujal es para generación de energía firme.

En el anexo No. 4 se dibujó el funcionamiento de la presa de Pujal para esta alternativa 7. En la gráfica superior se tienen las entradas mensuales a la presa; en la que sigue se dibujaron los derrames, los cuales son de consideración casi todos los años y solo en años escasos como los de 1949 a 1951, estos son nulos o reducidos. La gran cantidad de derrames se debe a que el aprovechamiento es de sólo el 48%, ya que como se indicó anteriormente, el escurrimiento medio anual es de 5 661 millones de m^3. y la extracción media anual para energía es únicamente de 2 710 millones de m^3. y por lo tanto el derrame es superior al volumen aprovechado. En la gráfica siguiente se tienen los almacenamientos en la presa en donde puede verse que exceptuando los años muy escasos, en todos los demás niveles se conservan todo el año arriba de la cota 59.00 m. (almacenamiento de 1 865 millones de m^3.) En la gráfica siguiente se compararon las demandas de riego y energía en donde se ve que las de energía siempre son superiores a las de riego. En la gráfica inferior se tiene la generación de energía.

4.- Control de avenidas y obra de excedencias.

Avenida máxima ordinaria.- La estación hidrométrica de Pujal tiene pocos años en operación, pero incluye las avenidas del año de 1955 que se consideran las máximas

/registradas

registradas en muchos años, ya que fueron debidas a varios aciclonamientos y ciclones del Golfo de México, por lo tanto la avenida de 1955 puede considerarse como la máxima ordinaria.

Avenida máxima probable.- Para la estimación de la avenida máxima probable se tienen pocos datos de la cuenca en que basarse, por lo que se consideró más indicado hacer la estimación en función de las curvas de envolventes de Gastos Máximos de la zona que incluye los datos de todos los ríos de la región tanto de cuencas pequeñas como de cuencas grandes, aunque el período de datos disponibles es reducido. Con la envolvente definida por el gasto máximo registrado en la estación Barretal sobre el río Purificación, se tiene un gasto unitario de 0.45 m^3/s./Km2. y un gasto total de 11 300 m^3/s. el cual se incrementó un 25%, por estar basado en un período reducido de datos, resultando un gasto máximo de 14 000 m3/s.

Para la forma de la avenida se tomó como base la del año de 1955, pero como en esa ocasión se presentaron en serie 3 crecientes, se supuso que para la máxima probable únicamente se presentarían las dos últimas incrementadas ambas en la proporción de 14 000 / 8 000 = 1.75.

El resultado fue un hidrograma de dos avenidas cuyos picos distan 10 días y tienen como magnitudes 8 400 y 14 000 m^3/s. respectivamente.

Control de avenidas.- Para el estudio del paso de las avenidas por la presa, se estudiaron tres alternativas:

1.- Control preferente de la avenida máxima ordinaria.
2.- Control preferente de la avenida máxima probable.
3.- Control combinado de las avenidas máxima, ordinaria y máxima probable.

Del estudio de las tres alternativas se llegó a la conclusión de que el caso 3 era el más conveniente. En este caso se tiene el siguiente plan de operación:

/Nivel del

Nivel del agua entre las elevaciones: (Alternativa C-1)	Gastos de salida por las compuertas en m^3/s.
59.00 a 64.30	2 000
64.30 a 66.50	3 500
66.50 a 69.00	5 000

El nivel del agua al pasar la avenida máxima probable llega a la elevación 69.00 m.

Con este plan de operación se tienen las ventajas siguientes:

1.- Las avenidas más frecuentes, incluyendo la máxima ordinaria, se regularizan a un gasto moderado de 2 000 m^3/s.

2.- Una creciente ligeramente superior a la máxima registrada se regulariza a un gasto de 3 500 m^3/s.

3.- La avenida máxima probable se regulariza a un gasto de 5 000 m^3/s. que es superior a la capacidad del cauce, pero la posibilidad de que se presente es remota.

4.- Las avenidas se regularizan a un gasto que depende de la magnitud de dichas avenidas tanto en gasto como en volumen, la descarga del volumen temporalmente almacenado, también se hace de acuerdo con la magnitud de la avenida.

Obra de excedencias.- En el caso C-1 de control de avenidas considerado como el más recomendable, la avenida máxima probable se regulariza a un gasto máximo de 5 000 m^3/s., sin embargo, como hay ocasiones que en la práctica se modifica el plan de operación cerrando más las compuertas para tratar de disminuir el gasto del río al confluir las crecientes de los otros ríos sin control, en este caso los ríos Tempoal y Moctezuma y además por la escasez que se tiene de datos, para seguridad de la obra y por lo tanto, de la zona de aguas abajo, se considera que la obra de excedencias debe tener la capacidad máxima ó sea de 14 000 m^3/s.

En resumen en la presa de Pujal se tendrán los siguientes usos múltiples:

/1.-Capacidad

1.- Capacidad disponible para acumulación de azolves.
2.- Riego de 142 000 Has.
3.- Generación de 163 millones de KWH anuales de energía firme.
4.- Control de la avenida máxima ordinaria con pico de 8 000 m^3/s. a un gasto regularizado de 2 000 m^3/s.

A N E X O S

1.- Incremento de las estaciones hidrométricas.

2.- Divisiones hidrométricas.

3.- Plano general de la cuenca del Río Tampaón con curvas isoyéticas.

4.- Funcionamiento del Vaso de Pujal para riego y generación de energía.