

# HIDROLOGIA Y RECURSOS HIDRAULICOS

Estudios en honor de  
Francisco Javier Domínguez  
AUCH, 5ª Serie, N° 8 (1985): 591-609

## EVOLUCION DE LA HIDROLOGIA EN EL MUNDO Y EN CHILE

ANDRÉS BENÍTEZ GIRÓN  
Universidad de Chile

### 1. INTRODUCCIÓN

Era mi primer propósito realizar un estudio sobre la forma como ha ido evolucionando la Hidrología en Chile, especialmente la evolución de las metodologías utilizadas a través del tiempo, así como su ligazón con el desarrollo de la Hidrología en el mundo.

En Chile la Hidrología se ha estudiado como ciencia desde hace poco tiempo, siendo difícil encontrar publicaciones y estudios realizados hace 50 o más años y que permitan conocer las metodologías empleadas.

Para ello sería necesario revisar acuciosamente todos los proyectos hidráulicos realizados en Chile, ya que casi toda obra hidráulica lleva consigo un estudio de los recursos hídricos disponibles y uno de crecidas, como mínimo.

La posible información era tan grande y el tiempo disponible tan corto, que en este trabajo se ha utilizado la experiencia y los estudios y trabajos que se encontraban más a mano, por lo cual, forzosamente, se deben haber cometido omisiones lamentables.

El enfoque dado a la evolución de la Hidrología en Chile ha sido la de analizar tres puntos básicos; la Hidrometría, la enseñanza e investigación y diversos aspectos de los estudios hidrológicos realizados con el fin de proyectar o planificar obras individuales o a nivel de cuenca.

Para comenzar, preferí hacer una breve relación de la evolución de la Hidrología en el mundo ya que, como es lógico, tiene una gran influencia en la evolución de la Hidrología en Chile.

## 2. NOTAS SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA HIDROLOGÍA EN EL MUNDO. APARICIÓN DEL CONCEPTO DE CICLO HIDROLÓGICO

En el desarrollo de la Hidrología se distinguen tres fases:

La primera fase, durante la cual se hacen mediciones vinculadas a las primeras obras de ingeniería y que termina cuando el francés Pierre Perrault publica, en 1674, su obra *De l'origine des fontaines*, en la que demuestra que el agua de los ríos proviene de las precipitaciones y nevadas, dando origen al concepto de ciclo hidrológico. Es por esto que el año 1674 se considera como el comienzo de la hidrología como ciencia, por lo cual la UNESCO, la OMM y la IAHS, conmemoraron el año 1974 el "Tricentenario de la Hidrología Científica". A partir de este momento, el avance de la Hidrología en el mundo se torna espectacular.

La segunda fase abarca desde este instante hasta el momento en que el computador empieza a ser utilizado en los cálculos y estudios hidrológicos.

La tercera fase se puede estimar que comienza hace 25 ó 30 años con el uso intensivo de los computadores.

Durante el primer período, la ingeniería hidrológica o hidráulica se había desarrollado al proyectarse y construirse obras, para abastecimiento de agua, construcción de defensas contra inundaciones, canales de riego, etc.

Las primeras civilizaciones de los valles del Nilo y de los ríos Tigris y Eufrates, dependieron del riego y al aumentar su habilidad para regar, alcanzaron los niveles más altos de civilización. Los primeros intentos se realizaron en el Egipto predinástico, alrededor del año 3400 A.C. En esta época el sistema de riego consistía en dividir las planicies que bordeaban el río Nilo, en cajas que se llenaban de agua con los desbordes del río y era retenida cerrando los diques construidos. El agua acumulada era llevada a zonas más bajas en las que se realizaban las siembras. De esta forma se les presentó a los egipcios un problema hidrológico, la determinación de la altura de agua durante una probable avenida. A mayor nivel se podría regar una superficie más grande; pero a partir de un determinado nivel la crecida era grave ya que los diques serían rebasados y destruidos, en cuyo caso la superficie regada era menor. Por otra parte, un nivel alto en un lugar podría ser perjudicial en una zona y beneficiosa en otras. Esto obligó a los egipcios a diseñar un sistema para medir la altura del agua en numerosos puntos a lo largo del río Nilo. Con ello se inició la Hidrometría.

Alrededor del año 2200 a.C., aguas arriba de la segunda catarata, se registraban lecturas y se enviaban al Faraón para que tomara las medidas

del caso. Serían los primeros pronósticos de crecidas que se conocen. Esta teoría está corroborada por los registros y lecturas que se han encontrado grabadas en rocas. Estos sistemas de medida se instalaron entre el año 2200 a.C. y el año 716 de nuestra era.

En la Mesopotamia, regada por los ríos Tigris y Eufrates, hay evidencias que antes del año 3000 a.C. los pueblos habían aprendido a drenar y regar los terrenos por medio de canales. En este caso, los problemas hidrológicos eran más complejos y los caudales eran más difíciles de pronosticar que los del río Nilo. Las avenidas eran imprevisibles y cuando no eran simultáneas se podían controlar en las partes bajas, pero cuando los caudales máximos eran simultáneos los efectos eran devastadores. El temor a la inundación obligó a defender los centros poblados con muros de contención. Esto necesariamente debe haber obligado a establecer puntos de vigilancia contra las inundaciones.

También hay indicios que en las antiguas civilizaciones de la India, así como en el valle del río Amarillo en China, se midieron niveles de agua.

Las medidas del caudal comenzaron a realizarse en forma rudimentaria hacia el año 1400 a.C., para lo cual se usaban clepsidras de agua, siendo la clepsidra un recipiente análogo a un reloj de arena. Naturalmente que esta medida no estaba expresada en unidades de caudal.

En la Europa húmeda, al ser la demanda menor que las disponibilidades, no se necesitó ni se desarrolló el conocimiento hidrológico.

En la antigua Roma el problema más grande era abastecer de agua la ciudad a través de un sistema constituido por ocho acueductos. Entre los años 103 y 97 a.C., el comisionado del agua, Frontinus, trató de balancear los aportes con las entregas midiendo el área transversal de escurrimiento "A", pero al no considerar otros factores, no tuvo mucho éxito. Es la primera vez, en la historia de la hidrometría, que se quiso relacionar el caudal con A.

La idea entre los antiguos griegos y romanos era que los océanos eran el origen de todas las aguas, las que avanzaban en forma subterránea a la cima de las montañas, perdían la sal y generaban los ríos.

Vitruvio, tratadista de arquitectura, que vivió alrededor del año 27 a.C. escribió el libro *De Architectura*, obra de 10 tomos, de los cuales los tres últimos tratan de hidráulica, geometría, astronomía y otras materias. En ellos estableció, según Meinzer, en forma clara y breve la teoría, hoy generalmente aceptada, que el agua subterránea procedía principalmente de la infiltración de la lluvia y nieve. Sus obras fueron estudiadas durante el Renacimiento.

Durante el período comprendido entre las edades Antigua y Media la ciencia avanzó muy poco.

Los principios de la ciencia hidrológica, no así el arte de la hidráulica, empezaron a insinuarse a fines del siglo xv y comienzos del xvi.

Leonardo da Vinci (1452-1519), al parecer, fue uno de los primeros en reconocer el ciclo hidrológico como se acepta hoy día. En forma independiente llegó al mismo juicio Barnard Palissy (1509-1589). Leonardo da Vinci utilizó, por primera vez, el método de los flotadores para medir la velocidad de la corriente en los ríos. Sin embargo, su comprensión sobre la circulación del agua en la tierra, parece que se debió más a su genio que al producto del análisis de las mediciones cuantitativas, que eran pocas o no existían.

Fue Pierre Perrault, en 1674, el que basándose en los valores obtenidos con toscos instrumentos instalados en la cuenca del río Sena, demostró que el volumen de agua caída era el adecuado para originar los caudales de los ríos y vertientes. Para ello estimó el área de la cuenca del río Sena en un punto de Borgoña y midió la lluvia durante un período de tres años, así como los caudales del río en ese punto, llegando a la conclusión de que el volumen de agua caída era seis veces superior al volumen escurrido, lo que era adecuado para generar dicho escurrimiento. También realizó estudios experimentales de la evaporación natural del agua.

Hacia 1700, Halley investiga la evaporación de aguas salinas, análogas a las del Mediterráneo, concluyendo que la evaporación desde el Mediterráneo y los océanos era suficiente para balancear el volumen de agua que desaguaban los ríos en el mar.

Fijar la fecha en que nace una ciencia es difícil, especialmente en el caso de la Hidrología que está íntimamente ligada con otros temas como la geografía física, la meteorología, la hidráulica, etc., pero siendo el "Concepto de ciclo hidrológico" básico para el desarrollo de esta ciencia, es adecuado considerar que una vez establecido, empezó a progresar y ampliar el conocimiento del agua en la tierra.

Es por eso que, como se dijo al comienzo, la fecha que puede considerarse como el nacimiento de la ciencia hidrológica es el año 1674, que corresponde a la publicación del libro de Perrault.

No es casualidad que ello haya ocurrido en el siglo XVII que ha sido uno de los más fecundos en la historia de las ciencias, ya que ésta se liberó del estancamiento que prevalecía en Europa desde la Antigüedad.

Este momento y especialmente el comienzo de la revolución industrial, obligan a perfeccionar el estudio del recurso hídrico para surtir la demanda de los grandes centros urbanos, de las industrias, de la minería, del

riego, etc., ya que el agua se va haciendo más escasa y las fuentes se encuentran más alejadas de los centros de consumo. En este momento puede decirse que empieza un nuevo período de la ciencia hidrológica.

Durante la segunda etapa, la Hidrología va muy unida a la hidráulica, ya que uno de los problemas mayores era el mejoramiento de la medición de caudales y del correspondiente instrumental, o sea empieza a tener cada vez más importancia la Hidrología cuantitativa o Hidrometría. Entre los investigadores merece mencionarse a Antoine Chezy que en 1775 anuncia que "la velocidad de un río varía con la pendiente de su superficie" y establece la relación tan conocida. Esta fórmula entregó a los hidrólogos una poderosa herramienta para sus estudios. Citar a los numerosos investigadores que aportaron su esfuerzo a la ciencia hidrológica sería lato. En forma muy resumida se podría decir que en este período se desarrolla el conocimiento de la circulación del agua en la tierra, por lo cual empiezan a relacionarse la meteorología con la hidrología, estableciéndose relaciones entre la precipitación y la escorrentía, se incluye el estudio del agua subterránea y su importancia en el balance hidrológico, se analiza la metodología para estudiar los fenómenos catastróficos, crecidas y sequías, y se empieza a aplicar la estadística y la teoría de las probabilidades para analizar estos fenómenos (Fuller, Hazen, Gumbel, etc.), o sea, se sientan las bases para la tercera etapa.

La tercera etapa comienza hace 25 ó 30 años, con la introducción masiva de los computadores que ha permitido aplicar nuevos planteamientos del análisis hidrológico y ha motivado la creación de modelos conceptuales para resolver muchos de los variados y complejos procesos hidrológicos, dando lugar a los modelos estocásticos y de simulación. Al mismo tiempo se empiezan a crear sistemas para la elaboración y archivo de datos en los ordenadores, lo que facilita el manejo de la gran cantidad de información recopilada y a recopilar en el futuro, la que va aumentando en progresión geométrica. También adquiere gran importancia en la utilización de nuevas técnicas, como son el empleo de los radioisótopos, ambientales o no, el uso de los satélites y sensores remotos, etc.

Por otra parte, la Organización Meteorológica Mundial y la UNESCO establecen programas de ayuda técnica y material a todos los países, como el de Hidrología Operativa (OMM), el Decenio Hidrológico Internacional (DHI) (1965-1974) y el Programa Hidrológico Internacional (PHI) (1975 en adelante), ambos de la UNESCO, que benefician principalmente a los países de escasos recursos y menor nivel técnico-científico.

No sin razón R. Nace, teniendo en cuenta los avances tecnológicos, instrumentales y de cooperación internacional y la forma como se han ido

perfeccionando las metodologías hasta llegar al momento actual, considera que "La Hidrología se encuentra o está, posiblemente, entrando en su Edad de Oro".

### 3. EVOLUCIÓN DE LA HIDROLOGÍA EN CHILE

Como se expresó en la Introducción, es difícil precisar cuál ha sido la evolución de la Hidrología en Chile, sin cometer omisiones involuntarias debido, más que nada, a la falta de antecedentes o a la dificultad para encontrarlos.

Por este motivo se ha considerado conveniente desarrollar en primer lugar, dos aspectos de la Hidrología que facilitan la comprensión de cómo ha sido su evolución en Chile. Estos aspectos básicos son: la Hidrometría y la enseñanza de la Hidrología. La primera proporciona los antecedentes cuantitativos de los fenómenos hidrometeorológicos medidos en el terreno; la segunda prepara a los ingenieros para utilizar dichos antecedentes y al mismo tiempo se nutre de la experiencia adquirida por ellos en el ejercicio de la profesión o en las instituciones dedicadas al proyecto de obras hidráulicas, produciéndose un ciclo de traspaso de tecnologías de la Universidad al exterior y de éste a la Universidad.

También es necesario destacar que la investigación científica-hidroológica, se empieza a desarrollar en forma masiva, especialmente en las Universidades, a partir de mediados de la década del 60, por las razones que se indican más adelante.

Ya en esta fecha la investigación hidráulica había logrado su apogeo, lo que unido al incremento de la Hidrología, supone un aumento en el número de ingenieros dedicados a estas disciplinas, por lo cual, bajo la dirección del profesor Francisco J. Domínguez, se constituye la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, acontecimiento muy importante, ya que a partir del año 1971 y cada dos años, organiza Congresos Nacionales de Hidráulica, en los cuales se presentan trabajos sobre los estudios e investigaciones realizados a lo largo de Chile.

#### 3.1 *Desarrollo de la hidrometría*

Por ser la Hidrometría la base primaria de la Hidrología, es conveniente, en primer lugar, analizar su evolución a través del tiempo, así como los métodos de medida utilizados.

En la década de 1910 se empezaron en Chile los controles limnimétricos y los aforos mediante molinete, de algunos ríos, a cargo del Ministerio de Obras Públicas y a través del organismo encargado de los problemas

relacionados con la agricultura. Alrededor de 1920, la Braden Copper Co. y la Compañía Chilena de Electricidad, iniciaron los primeros controles con fines hidroeléctricos. En el año 1925 la Dirección de Riego comenzó a controlar los proyectos de regadío y mercedes de agua en el Norte Grande y Chico. Debido a la crisis del año 1930, durante un decenio, hubo una paralización de la mayor parte de las estaciones hidrométricas instaladas. En 1940 la Dirección de Riego mantenía solamente el control de 65 limnímetros. La *CORFO* con el fin de obtener antecedentes hidrológicos y meteorológicos para proyectos hidroeléctricos, decidió establecer una red a partir de 1940, habiendo instalado hasta 1941, 25 estaciones hidrométricas. A partir de este momento se inicia por parte de la *ENDESA* y Dirección de Riego un programa para establecer una red hidrometeorológica que fuera útil para el desarrollo de sus proyectos.

En 1960 se inicia en Chile el Proyecto Hidrometeorológico financiado por el Fondo Especial de la *ONU* (hoy *PNUD*), dirigido y supervisado por la *OMM*. Este Proyecto fue el primero de este tipo que se llevó a cabo en el mundo y fue considerado como Plan Piloto, habiéndose efectuado posteriormente Proyectos análogos en numerosos países. Durante los 5 años que duró el Proyecto, hasta septiembre de 1965, se instalaron:

- 109 estaciones fluviométricas, casi todas limnigráficas,
- 219 meteorológicas,
- 30 nivométricas,

número superior a lo comprometido, y se mejoraron las ya existentes, instalándoles limnigrafos.

Además se construyeron e implementaron 3 laboratorios de sedimentos, 1 laboratorio meteorológico y un laboratorio para calibración de molinetes que sustituyó al que existió en la Quinta Normal que, de acuerdo a don Gustavo Lira, funcionaba todavía en la década del 30.

Desde este momento, la red hidrometeorológica chilena se ha ido desarrollando, aunque no con la intensidad necesaria debido a razones económicas propias de los países en desarrollo.

Respecto a los métodos de medida de caudales, el más usado ha sido el de los aforos con molinetes y para cauces pequeños el de vertederos de varios tipos.

En 1951 se empezaron a realizar las primeras experiencias para medir caudales utilizando el aforo químico en corrientes torrentosas. La primera sal utilizada fue el cloruro de sodio, que proporcionó resultados poco alentadores. En 1954 se propone utilizar el  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , obteniéndose éxito en 1955 durante experiencias realizadas en varios ríos de Chile pertenecientes a cuencas entre los ríos Molles y Aconcagua. Sin embargo, debido

a la complejidad del análisis químico, se ha utilizado sólo en forma esporádica.

A comienzos de la década del 70, se empezaron a utilizar los radioisótopos como trazadores de aguas subterráneas y se realizaron en forma experimental los primeros aforos, utilizando un método análogo al del aforo químico. Estas experiencias se repitieron posteriormente, dirigidas por el experto Dr. Antonio Plata B. y la colaboración del CCHEN. Como en el caso anterior, no se ha utilizado en forma masiva por la escasez del instrumental necesario.

Las medidas de arrastre de sedimentos en suspensión se empezaron a realizar en forma sistemática a partir del año 1957 con motivo del proyecto de la central Rapel. A partir de ese año, la red sedimentométrica ha sido extendida a lo largo de Chile por la Dirección General de Aguas y la ENDESA, existiendo actualmente unas 50 estaciones.

### *3.2. Evolución de la enseñanza de la Hidrología*

Así como la Hidráulica, desde hace muchos años ha tenido muchos y grandes cultores que han ido formando una escuela, en Hidrología hasta hace muy pocos años esto no había ocurrido. Se puede decir que la Hidrología científica en Chile se ha desarrollado desde mediados de la década del 60, con la creación de los centros de investigación de las Universidades de Chile, Católica y Santa María, principalmente. Anteriormente sólo se hicieron estudios de investigación para resolver los problemas que se presentaban para ejecutar el proyecto, la construcción y la operación de las Obras Hidráulicas.

En Chile pueden considerarse precursores de la Hidrología a los profesores don Gustavo Lira M. y don Arturo Quintana A.

Para las generaciones de estos últimos 35 ó 40 años, tal vez sea una sorpresa, como lo fue para mí, el descubrir una de las tantas facetas de don Gustavo Lira, su interés por la Hidrología.

Por casualidad "cayó en mis manos" un libro de Hidrología de don Gustavo, editado por Gálvez-Lorca el año 1938, correspondiente a sus clases. No debiera sorprender que el profesor Lira, entre sus inquietudes tuviera ésta, ya que siempre se interesó en esta materia, como lo demostró en su paso por el Ministerio de Obras Públicas, período durante el cual se instalaron numerosas estaciones fluviométricas, desgraciadamente de corta duración.

Este libro de 316 páginas tiene gran importancia, porque en él estudiaron muchos de los ingenieros del MOP y los que formaron posteriormen-

te la *ENDESA*, quienes dirigieron los primeros estudios hidrológicos que se hicieron en ellas.

Se puede apreciar que mucha de la metodología utilizada en los primeros estudios hidrológicos corresponde a lo explicado en ese libro.

En él aparece la descripción de todos los instrumentos meteorológicos e hidrométricos utilizados en esa fecha y que generalmente son empleados hoy, con pocas variaciones. Se incluye un estudio completísimo de la atmósfera y de los factores meteorológicos.

El estudio de la precipitación incluye el estudio de la variación de la precipitación en el tiempo, define el año hidrológico en función de la lluvia, analiza la intensidad y la frecuencia, así como la probabilidad de la precipitación anual utilizando como abscisa la raíz cuadrada del logaritmo natural del tanto por ciento, para que en un gráfico la curva de probabilidad quede representada por una recta y sus extremos puedan ser mejor extrapolados.

Realiza un estudio completísimo sobre la evaporación y el agua subterránea.

Respecto a la Hidrometría, expone todo lo referente a los métodos de aforo y es digno de destacar que en esa época la calibración de los molinetes los efectuaba "la Dirección de Obras Públicas de Chile en un estanque de calibración en la Quinta Normal de Agricultura de Santiago que tiene 75 m de largo, 2,20 m de ancho y 1,30 m de profundidad y sobre él un carro accionado por un motor eléctrico" canal que posteriormente fue eliminado. También describe el método del aforo químico de inyección continua.

Las curvas de descarga se trazaban en forma analítica, proponiendo las fórmulas de:

Boussinesq	$Q = M (H + H_1)^{3/4}$
Lombardini	$Q = N H^{3/4} + P H^{5/2}$
Racional	$Q = A + BH + CH^2$
Binomial	$Q = A (H + H_0)^2$

esta última utilizada en el río Aconcagua en Las Vizcachas.

Además de incluir el régimen hídrico de algunos ríos de Chile, entrega el concepto de balance hídrico y del coeficiente de escurrimiento o rendimiento de la cuenca hidrográfica, con ejemplos de algunos países de la Tierra, así como la forma que adquiere la ecuación del escurrimiento en las cuencas hidrográficas de los climas húmedos, secos y desérticos.

Es interesante consignar que para calcular la escorrentía de los climas

húmedos, entre las fórmulas empíricas que entrega (Rafter, Iskowsky y Binrie) se encuentra la muy conocida de Grunsky como:

$$R = 0,000394 H^2 \text{ para } H \leq 1\ 270 \text{ mm}$$

$$R = H - 625 \text{ para } H \geq 1\ 270 \text{ mm}$$

Finalmente hace un estudio de las creces, entregando fórmulas utilizadas en esa época (Faning, Dickens, Ganguillet, Kuichling, Murphy, Burge y Craig).

Es interesante consignar dos hechos, por la importancia que tuvieron posteriormente:

- Uno es la inclusión de las fórmulas de Fuller en la que se toma en cuenta el período de retorno en años.
- El otro, es el cálculo de una crece en distritos urbanos en el cual el planteamiento teórico es análogo al del Método de Grunsky tan utilizado en Chile. La diferencia básica estriba en el cálculo de la intensidad de la lluvia y del coeficiente de escurrimiento.

Tal vez me he extendido en exceso en el libro de don Gustavo Lira, pero ha sido necesario, porque creo que es el primer libro de Hidrología editado en Chile, con antecedentes obtenidos en el país.

También es necesario destacar al profesor Arturo Quintana A., quien por muchos años fue profesor de Hidrología de la Escuela de Ingeniería. Entre otras muchas cosas, don Arturo Quintana estudió la intensidad de las lluvias en la zona de Santiago, San Felipe y Pta. Angeles, introdujo la fórmula de Grunsky para calcular la intensidad de la Precipitación y la conocida Ley de Peñuelas para obtener la escorrentía anual a partir de la precipitación anual.

Actualmente la enseñanza de la Hidrología se puede considerar que se encuentra en un nivel óptimo, análogo al de las Universidades extranjeras, debido a la formación científica que los profesores de las Escuelas de Ingeniería de las Universidades de Chile, Católica de Santiago y Federico Santa María, principalmente, han recibido en Universidades extranjeras de un alto nivel científico-hidrológico, formando hidrólogos investigadores en dichas Universidades y realizando una transferencia tecnológica de gran utilidad para el país.

Debe destacarse que estas Universidades están dotadas de avanzados equipos computacionales que les ha permitido aplicar las adelantadas tecnologías obtenidas en el extranjero, realizando importantes estudios e investigaciones sobre modelos estocásticos, de simulación hidrológica, etc., algunos de los cuales se encuentran en la Bibliografía.

### 3.3. Metodología para evaluar el recurso hídrico

El análisis de la evolución que ha tenido en Chile la metodología para estimar los recursos hídricos, debe realizarse a partir de los estudios realizados para la ejecución de los proyectos hidráulicos o a través de las publicaciones efectuadas en revistas o congresos.

En forma muy resumida se puede decir que los primeros estudios se realizaban con muy pocos antecedentes hidrométricos y con los métodos básicos indicados en el punto anterior. Se realizaban para un lugar específico del río y como las estadísticas eran cortas, si era posible, se ampliaban a partir de correlaciones con estadísticas largas. En caso de no ser esto posible, se utilizaba la estadística existente de solamente unos años, o bien, aprovechando que la pluviometría poseía más antecedentes que la hidrometría, se utilizaban relaciones anuales de precipitación escorrentía como las leyes de Grunsky y Peñuelas ya citadas. Las curvas de duración general se trazaban ajustando una recta a los puntos en un papel log-prob., utilizándose la fórmula de Allen-Hazen para colocar los puntos.

A partir de finales de la década del 50, se empiezan a abordar los estudios de modo diferente, comenzándose a utilizar en forma sistemática otras metodologías; como por ejemplo, las curvas doble acumuladas para la homogeneización de las precipitaciones y caudales, las curvas de duración se trazan gráficamente en forma de curva para representar mejor los extremos, se aplican leyes de distribución para el ajuste de las series (Gumbel, Allen-Hazen, Ven Te Chow), etc.

Al mismo tiempo se cambia el criterio para estudiar los recursos hídricos, realizándose estudios integrales de cuencas que se adoptan como básicos para determinar los correspondientes a los proyectos específicos.

También es necesario recalcar los estudios de carácter nacional sobre temas específicos, como el de las producciones específicas de cuencas y subcuencas, de la extensión e intensidad de las sequías, el Balance Hídrico Nacional y otros.

Al final de la década del 60 comienza el auge de la investigación hidrológica orientada tanto a aspectos teóricos como operativos, lo que origina el uso de metodologías de tipo estocástico, de simulación y otros.

Muchos de estos estudios quedan bien reflejados en los trabajos presentados en los Congresos Nacionales de Hidráulica celebrados a partir de 1971. En la Bibliografía se han incluido algunos de los títulos que se han considerado más representativos.

### 3.4. Estimación de crecidas

Durante muchos años el estudio de las crecidas se redujo al método

probabilístico, ajustando gráficamente una recta a los puntos colocados en un gráfico log-prob, lo que supone que los logaritmos de los caudales máximos medios diarios o instantáneos siguen la ley log-normal. También se utilizó el método de Grunsky para estimar ondas de crecida.

En 1951 se analiza la ecuación de la distribución de frecuencias en función del "factor de frecuencia", explicando la forma de aplicar los métodos de Fuller, Hazen, Forter, tipo I y tipo III y Gumbel. De todos ellos sólo se utilizó en algunas ocasiones, el método de Fuller.

A fines de la década del 50, se hace un estudio más profundo de las leyes de distribución, basándose en un trabajo de Ven Te Chow "La ley logarítmica-probabilidades". Pero después de analizar numerosas series de precipitaciones y caudales máximos, a partir de 1966, se utiliza preferentemente el método de Gumbel. También se ha empleado el método de ajustar a las series, diferentes leyes de distribución (Normal, log-normal, gamma 2 y 3, Gumbel) eligiendo aquella que se ajusta mejor de acuerdo a la aplicación de test de significación (Chi-cuadrado, Kolmogorov).

El método del Hidrograma Unitario (*H.U.*) para calcular ondas de crecida se empezó a utilizar a comienzos de la década del 50, con motivo del proyecto de la Central Rapel; método que ha seguido siendo utilizado hasta la fecha. La aplicación de la precipitación máxima probable (*PMP*), para calcular la crecida máxima probable (*CMP*), se ha utilizado en escasas ocasiones a partir de fines de la década del 70.

El hidrograma unitario sintético (*H.U.S.*) de Snyder se empezó a utilizar en forma intensiva, a partir de finales de la década del 50, habiéndose realizado varios estudios basados en mapas de escala 1 : 250 000, para calcular las constantes  $C_t$  y  $C_p$  válidas para Chile. Actualmente se están recalculando aprovechando la existencia de más datos hidrométricos y planchetas en escala 1 : 50 000.

También se han realizado varios estudios para determinar curvas intensidad-duración-frecuencia válidas para Chile.

Sobre estos temas se han presentado varios trabajos en los Congresos Nacionales de Hidráulica.

### 3.5. *Pronóstico de caudales de deshielo*

La mayor parte de las centrales hidroeléctricas y las zonas de riego se surten preferentemente del agua proveniente del deshielo de masas de nieve y glaciares cordilleranos. Por eso es de gran importancia pronosticar el volumen de agua disponible durante el período de deshielo, para programar el abastecimiento de la demanda.

En 1951 se inician estos estudios instalándose la primera ruta de nieve

(R.N.) en Portillo y, a partir de ese momento, empieza sistemáticamente esta investigación. Primero, se analizan los avances realizados en otros países sobre esta materia y la metodología utilizada. Posteriormente, se aplica el método de Weather Bureau (USA), consistente en analizar y corregir las estadísticas fluviométricas y pluviométricas y, utilizando correlaciones múltiples, se estima la importancia de cada estación fluviométrica, de cada mes y la influencia del año anterior.

Desde comienzos de esta década, se tienen en operación varias plataformas recolectoras de datos, que envía la información obtenida en la alta cordillera a través de satélites Landsat.

Actualmente realizan regularmente este tipo de pronósticos la Dirección General de Aguas y la ENDESA.

### *3.6. Pronóstico de caudales a corto plazo*

Esta metodología ha sido utilizada en contadas ocasiones, siendo la primera, con motivo de la construcción y operación de la central Rapel. Para ello fue necesario establecer un sistema para pronosticar con cierta antelación los caudales que iban a tenerse en la presa durante la construcción y de los afluentes al embalse durante la operación.

La metodología utilizada consistió en obtener cada 6 horas la precipitación media de la cuenca a partir de los pluviógrafos instalados en ella. A partir de una infiltración estimada se calculaba la precipitación efectiva y, aplicando el método del H.U., se calculaba una onda de crecidas que se ajustaba a la real cada 6 horas. El sistema funcionó perfectamente durante la construcción, siendo necesario controlar en forma permanente el fenómeno hidrometeorológico que se estaba desarrollando durante su operación.

Con el mismo fin, el Departamento de Obras Hidráulicas de la Universidad Católica, por encargo de la ENDESA, realizó un estudio para la previsión de escurrimiento en el río Polcura en la B.T. de la central Antuco. En este caso, el pronóstico se hace a través de una computadora que recibe los datos de terreno y en forma automática entrega la tendencia a corto y mediano plazo.

Actualmente se está estudiando efectuar este tipo de pronósticos para la protección y operación de otros proyectos.

### *3.7. Estudios de arrastre de sedimentos*

Las primeras medidas de sedimentos en suspensión de las que se tienen antecedentes corresponden a las que se realizaron en los años 1945 y 1946

para estudiar los desarenadores de las centrales Volcán, Queltehues y Puntilla, en las que intervinieron los ingenieros señores Carlos Palma, Pedro Godoy y E. Grumbaum. En los años 1945 y 1946 tomó parte en la investigación un equipo dirigido por el ingeniero don Carlos Croxato e integrado por don Harmut Vogel y don Jovino García. Las medidas se realizaron muestreando varios puntos por vertical según el método de Luby. Se aforaron las secciones transversales de los canales de entrada y salida, se midieron las velocidades en los desarenadores y se hizo un levantamiento topográfico del embanque. El mayor problema radicó en el análisis de las muestras, para lo cual se dejaba decantar la muestra 1/2 hora, se sifoneaba el agua clara y se dejaba secar el residuo. También se intentó filtrar la muestra con un embudo Brüchner y una bomba de vacío, el que se abandonó por el exceso de sedimento. Estos estudios continuaron en 1950 a cargo de los señores Sergio Radrigán y Alberto Martínez.

Pero cuando se empieza a medir y estudiar el arrastre de sedimentos en forma sistemática es a partir de 1957 con motivo del proyecto de la central Rapel.

A partir de esta fecha se empieza la instalación de estaciones sedimentométricas en los ríos de Chile, especialmente durante la ejecución del Proyecto Hidrometeorológico (*F. E.* de la *NU*).

Como instrumento de muestreo, en un comienzo se utilizó una botella que se llenaba en el punto elegido. Posteriormente se construyeron varios muestreadores con resultados no muy satisfactorios.

En 1957 se adquiere el muestreador integrador D-49, del Weather Bureau de *U.S.A.*, que hoy día es de uso común.

Actualmente existen unas 50 estaciones sedimentométricas a lo largo de Chile, instaladas por la *ENDESA* y la *DGA*.

Los primeros estudios conocidos están relacionados con el proyecto de la central Rapel (1962), que se realizaron con muy pocos antecedentes.

La metodología para calcular el sedimento en suspensión se realizó utilizando la curva de descarga de sedimentos y para el cálculo del arrastre por el fondo se utilizaron los métodos de Meyer-Peter y Müller, Einstein y Shields. Actualmente se utilizan estos mismos métodos, pero dándole preferencia al primero, por considerarlo más apropiado a las características de nuestros ríos, pero dividiendo en tramos la curva granulométrica.

También se ha abordado, con los antecedentes existentes, el embanque producido en el embalse, utilizando los métodos de Brune y Churchill para calcular la eficiencia de retención, la fórmula de Lane y Koelzer para

calcular la densidad del sedimento y el método de Lane para estimar su distribución en el embalse.

Actualmente se ha estudiado, con los escasos antecedentes existentes, el embanque producido en el embalse de la central Rapel entre los años 1968 y 1979, y se están tomando medidas para medir el embanque futuro en algunos embalses de Chile.

El estudio del acarreo de sólidos en suspensión y por el fondo, ha tenido gran incremento, como puede observarse en los trabajos presentados a los Congresos Nacionales de Hidráulica.

## BIBLIOGRAFÍA

- G. LIRA M., *Hidrología*. Ed. Gálvez y Conca, 1938.
- R.G. KAZMANN, *Hidrología Moderna*, C.E.C.S.A., 1969 (USA, 1948).
- O.E. MEINZER, *Hidrology*, Dover Publ., 1942.
- LINSLEY, KOHLER, PAULHUS, *Hidrología para Ingenieros*, Mc Graw Hill, 1958.
- UNESCO, OMM, AISH, *Tres Siglos de Hidrología Científica*, 1974.
- OMM-PNUD, *Mejora y Ampliación de la Red de Estaciones Hidrométricas e Hidrometeorológicas de Chile*, Ginebra, 1967.
- A. QUINTANA, *Apuntes de Hidrología*.
- R. SCHRODERS, *Informes Varios*, Endesa.
- R. SCHRODERS, *Estudio Hidrológico de Maule en Armerillo*, ENDESA, 1959.
- R. SCHRODERS, *Resumen de la Revisión y Ampliación de las Estadísticas del Río Maule*, ENDESA, 1960.
- A. BENÍTEZ, F. VERNI, *Estudio de los Recursos del Laja Alto*, Endesa, 1970.
- G. HENRÍQUEZ, *Hidrología del Alto Valdivia*, ENDESA, 1972.
- J. SWETT, *Hidrología del Maule Alto*, ENDESA, 1973.
- A. BENÍTEZ, *Estudio Hidrometeorológico de las Cuencas del Río Lauca y Laguna Chungará*, ENDESA, 1975.
- H. KING, *Recursos Hídricos de los Ríos Baker y Pascua*, ENDESA, 1975.
- F. VERNI, *Hidrología de las Centrales Maule-Melado*, ENDESA, 1979.
- S. HADAD, *Producción Específica de las Cuencas Hidrográficas de Chile*, CORFO, 1973.
- A. PÉNDOLA, *Análisis Hidrológico de las Sequías*, ENDESA, 1975.
- C. JURICIC, *Balance Hídrico de las Cuencas entre los Ríos Rapel y Puelo*, ENDESA, 1982.
- J. OELSNER, *Estudio de la Crece de Diseño del Embalse Rapel y Obras de Evacuación*, Memoria, 1955.
- C. RODRÍGUEZ, A. BENÍTEZ, *Determinación de H.U.S. en Chile*, ENDESA, 1974.
- A. BENÍTEZ, F. VERNI, *Hidrología de la Central Colbún*, ENDESA, 1966.
- E. ARIAS., *Medidas de Nieve*, ENDESA, 1955.
- M. CAMPERO, *Métodos Empleados en la Predicción de Escurrimientos*, ENDESA, 1955.
- E. BASSO, A. BENÍTEZ, L. AYLWIN, *Pronósticos Anuales de Deshielo*, ENDESA.
- F. VERNI, *Análisis de la Operación de la Plataforma Colectora de Datos por Medio de Satélite*, ENDESA, 1982.
- H. PEÑA, M. CABEDO, *Pronóstico de Caudales de Deshielo Mediante el Análisis de Componentes Principales en el Dominio Temporal*, DGA, 1982.
- H. PEÑA, B. NAZARALA, F. ESCOBAR, F. VIDAL, *Pronóstico de Disponibilidad de Agua*, DGA (anual).
- A. BENÍTEZ, L. AYLWIN, *Estudio de las Previsiones de Escurrimiento de Deshielo*, ENDESA, 1976.
- E. ARIAS, E. BASSO, *Medida del Gasto Sólido para el Proyecto de Central Rapel*, ENDESA, 1956.
- J. OELSNER, E. BASSO, H. MORALES, *Medidas de Sedimentación para el Proyecto de Central Rapel*, ENDESA, 1959.
- E. BASSO, F. RABÍ, H. MORALES, *Nueva Estimación para la Sedimentación del Embalse de Central Rapel*, ENDESA, 1962.

- A. BENÍTEZ, *Estimación de la Distribución de los Depósitos de Sedimento en un Embalse. Aplicación al Embalse C. Colbún*, ENDESA, 1983.
- E. ARIAS, C. DÍAZ, *Experiencias Hechas para Estudiar el Método de Aforo por Titulación de Soluciones Salinas en el Río Blanco*, ENDESA, 1952.
- M. CAMPERO, *Aforos Químicos con Bicromato de Sodio*, ENDESA, 1955.
- E. IRAGÜEN, *Medida de Caudales en la Aducción de una Turbina Hidráulica Mediante Radioisótopos*, ENDESA, 1980.
- F. VERNI, A. MATTE, *Estudio Filtraciones de Lago Laja*, ENDESA, 1965.
- A. ARRIAGADA, A. BENÍTEZ, Laboratorio Radioquímica (U.Ch.), *Medidas de Velocidad y Dirección con Radioisótopos del Agua subterránea en L. Invernada*, ENDESA, 1965.
- A. PLATA, *Estudio Preliminar de las Filtraciones del Lago Laja con Trazadores Radioactivos*, ENDESA, CCHEN, AIEA, 1976.
- A. PLATA, *Experiencias con Isótopos para el Estudio de Filtraciones en el Lago Pirehueico*, ENDESA, CCHEN, 1977.
- C. SILVA, O. SUZUKI, O. GALLEGUILLOS, *Estudio de las Filtraciones del Lago Pirehueico*, CCHEN, 1977.
- I COLOQUIO NACIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA (1971)
- B. ESPÍLDORA, *Estimación de Curvas IDF Mediante Coeficientes Generalizados*, U. Ch.
- A. LÓPEZ, *Experimentación de los Fenómenos de Acarreo en Cursos de Agua Superficial*, U. Ch.
- E. VARAS, *Generación Estocástica de Información Hidrológica*, U. Ch.
- II COLOQUIO NACIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA (1973)
- P. FERRER, E. BROWN, L. AYALA, *Simulación de Gastos Medios Mensuales en una Cuenca Pluvial*, U. Ch.
- F. ALAMOS, F. RODRÍGUEZ, O. SUZUKI, *Uso de Técnicas Isotópicas en el Estudio Hidrológico de la Cuenca del Río Aconcagua*, CORFO-OIEA.
- L. AYALA, P. FERRER, *Análisis de Datos de Frecuencia de Datos Hidrológicos Mediante Computación*, U. Ch.
- F. VERNI, H. KING, *Automatización en el Procesamiento de Datos Hidrológicos*, ENDESA.
- A. ALTAMIRANO, G. PULIDO, *Método de Simulación Aplicado a la Zona del Río Maule*, D. de R. (MOP).
- III COLOQUIO NACIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA (1977)
- E. VARAS, *Modelos de Precipitaciones Horarias*, U.C.
- A. BENÍTEZ, *Estudio Crítico sobre la Forma de Utilizar la Fórmula de Meyer-Peter y Müller para el Cálculo del Arrastre por el Fondo*, ENDESA.
- E. BROWN, E. TORRETI, *Algunas Consideraciones sobre la Aplicación del Modelo de Markov en Generación Estocástica de Caudales*, U. Ch.
- H. PEÑA, M. ARAYA, J. NARBONA, *Empleo de Satélites Artificiales en el Estudio de los Recursos de Agua en Chile*, DGA-U. Ch.
- E. BROWN, E. CISTERNAS, *Formulación de un Modelo de Generación Estocástica de Precipitaciones Diarias*, U. Ch.
- B. ESPÍLDORA, G. PALMA, *Modelo de Simulación Hidrológica en la Cuenca del Río Elqui*, U. Ch.

- E. IRAGÜEN, *Radioisótopos en la Medición de Caudales con Alta Precisión*, ENDESA. IV COLOQUIO NACIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA (1979)
- S. VEGA, *Transporte de Sedimentos en Lechos Granulares Gruesos en Equilibrio*.
- L. STOWHAS, G. SEGEL, *Método Sintético para maximización de Crecidas*, U. Ch. y U.S.M.
- B. ESPÍLDORA, A. ECHAVARRÍA, *Criterios para la Caracterización y Selección de Lluvias de Diseño*, U. Ch.
- E. VARAS, B. FERNÁNDEZ, *Predicción de Escurrimientos a Corto Plazo en el Río Polcura*, U.C.
- H. PEÑA, B. NAZARALA, *Aplicación del Análisis de Componentes Principales en el Dominio Temporal al Pronóstico de Caudales*, DGA (MOP).
- E. VARAS, *Probabilidades de Transición en Lluvias Horarias*, U.C.
- P. FERRER, R. SEGUEL, *Generación Estocástica de Series Cíclicas*, B.F. Ing.
- A. BENÍTEZ, *Pronóstico de Niveles del Río Rapel en el Pueblo de Rapel y su Verificación*, ENDESA.
- V CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA (1981)
- G. GALLEGUILLOS, C. ARRATIA, *Pronóstico de Precipitaciones Mediante Análisis Discriminante*, U.S.M.
- E. VARAS, *Simulación de Caudales de Deshielo*, U.C.
- E. BROWN, R. SEGUEL, *Régimen de Gastos Máximos de Deshielo en Algunas Cuencas de Chile*, U. Ch.-U.S.M.
- H. PEÑA, C. GARÍN, *Estimación de Caudales Medios de Cuencas de Montaña en Función de sus Características Fisiográficas*, DGA.
- E. BROWN, F. ESCOBAR, *Simulación Hidrológica en la Cuenca del Río Maipo*, U. Ch.
- A. LÓPEZ, L. LARROUCAU, *Estimación del Gasto Sólido de Fondo en Ríos con Lecho de Granulometría Gruesa y Extendida y Fuertes Pendientes*, U.C.
- VI CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA (1983)
- A. BENÍTEZ, *Estimación del Gasto Sólido Afluente y del Embarque Producido en el Embalse de la Central Rapel Durante el Período de 11 años 68/79*, ENDESA.
- L. AYALA, M.L. CÓRDOVA, *Formulación y Desarrollo de un Modelo Matemático para Simular la Erosión Pluvial Difusa de Suelos*, U. Ch.
- L. AYALA, M.L. CÓRDOVA, *Simulación de la Erosión de Suelos Producida en un Simulador de Lluvias Utilizando un Modelo Matemático*, U. Ch.
- L. ARRAU, *Modelo de Hidrología de Nieves para Pronosticar Escurrimientos por Deshielo*, D. de R. (MOP).
- H. PEÑA, B. NAZARALA, *Pronóstico de Caudales de Deshielo en el Corto Plazo*, DGA (MOP).
- L. STOWHAS, R. LUNA, *Determinación de la Tasa de Derretimiento Máxima Probable en un Manto de Nieve*, U.S.M.
- E. VARAS, M.T. RUIZ TAGLE, *Aplicación de Modelos de Box-Jenkins a las Series de Caudales Medios Mensuales*, U.C.
- E. VARAS, S. SÁNCHEZ, *Relaciones I-D-F. Generalizadas*, U.C.
- E. BROWN, I. MERILLAN, *El Método del Vector Regional de Hiez para el Análisis de Homogeneidad de Series Pluviométricas*, U. Ch.

- X. VARGAS, E. BROWN, J.P. SALAS, *Modelo Arima. El Proceso de Identificación, U. Ch.*  
E. BROWN, X. VARGAS, J. ARRESE, *Generación de Precipitaciones Diarias Mediante un Proceso de Markov Simple, U.Ch.*