

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XI CONGRESO CHILENO

APROXIMACION AL REGIMEN NATURAL DE CUENCAS ALTERADAS POR EFECTO  
DEL RIEGO MEDIANTE UNA METODOLOGIA SIMPLIFICADA

FRANCISCO VERNI M. (1)

EMILIO IRAGÜEN I. (2)

CARLO CARVALLO A. (3)

RESUMEN

Para el caso de una cuenca intermedia limitada por dos estaciones fluviométricas en un mismo cauce, en que la situación más general considera que ambas tienen su régimen natural alterado por extracciones de carácter consuntivo de tipo agrícola, se sugiere un método simple de análisis a nivel mensual de las estadísticas fluviométricas de entrada y salida de dicha cuenca intermedia que, bajo ciertas condiciones que se exponen más adelante, conduce a desagregar tanto el aporte de esta última como el valor esperado del uso consuntivo.

Se presenta, además, un caso ejemplo que corresponde a una aplicación real. En éste se exponen las condiciones que deben cumplir los datos iniciales, y también, los algoritmos utilizados para la corrección y ajuste de resultados intermedios hasta determinar las estadísticas en régimen natural finales, objetivos del análisis.

- 
- (1) Ingeniero Civil U de Chile. Consultor INGENDESA.  
(2) Ingeniero Civil U de Chile. Jefe de Proyectos INGENDESA.  
(3) Ingeniero Civil U de Chile. Ingeniero de Proyectos INGENDESA.

## 1.- INTRODUCCION

Es sabido que el régimen hidrológico natural de los ríos resulta alterado en ciertos puntos de su cauce debido a la actividad humana que se desarrolla aguas arriba de dichos puntos. Una de esas actividades es la agricultura, la que demanda cierta cantidad de agua que las plantas utilizan en su metabolismo, constituyendo por este motivo un uso del recurso de tipo consuntivo. Consecuencia de lo anterior es que algunas de las estaciones de la red fluviométrica de una cuenca midan caudales alterados en su régimen natural, otras en cambio, las de cabecera, sufren pequeña o nula alteración en general. Mientras más baja está localizada la estación, mayor suele ser la alteración que sufre su régimen natural.

Por otra parte, la economía del uso de recursos hídricos persigue utilizarlos con máxima eficiencia, para lo cual suelen desarrollarse modelos operacionales que toman en cuenta los factores involucrados, a saber, cultivos, superficie de suelo agrícola, derechos de agua, roles de regantes, clima, demandas de agua y recursos disponibles, entre los más importantes. El último factor mencionado resulta a veces de compleja obtención cuando la cuenca se encuentra intervenida de la forma descrita anteriormente. En efecto, suele recurrirse a modelos que simulan el ciclo hidrológico para reproducir el régimen natural en los puntos de interés. La operación y calibración de estos modelos hidrológicos es compleja y normalmente no cuentan con toda la información hidrométrica que se desea, sin embargo, un profesional experimentado puede lograr con esta herramienta de análisis resultados muy buenos.

El presente trabajo tiene por objeto exponer una metodología más simple que permite también estimar los caudales naturales en los distintos puntos de la cuenca en que se han producido alteraciones del régimen. El método se basa en las estadísticas de caudales observados, toda vez que ellas contienen en sí mismas el resultado del ciclo hidrológico, faltando solamente desagregar las componentes que las generaron, vale decir, la hoya intermedia entre dos estaciones de un mismo cauce y el uso consuntivo habido entre ellas.

Esta metodología contempla, en general, partir desde los controles de cabecera, que en la mayoría de los casos presentan régimen natural, para descender hacia aguas abajo estimando el caudal natural de las cuencas intermedias que existen entre las estaciones de control.

## 2.- METODOLOGIA

### 2.1.- Análisis teórico

Considerando la subcuenca de un cauce que cuenta con controles de caudal en las secciones de entrada por aguas arriba Q1 y de salida por aguas abajo Q2, puede demostrarse que los dos parámetros que definen la correlación lineal entre Q1 y Q2 son suficientes para definir las variables que entran en la ecuación de balance de la referida subcuenca, vale decir el aporte natural de la cuenca intermedia HI y el uso consuntivo debido al riego.

En efecto, como se verá a continuación, en los tres casos que se analizan la pendiente de la recta de regresión K define el aporte natural de la cuenca intermedia y el término constante N el valor esperado del uso consuntivo.

Para los efectos del presente análisis, se considera solamente el tratamiento de las estadísticas a nivel mensual.

- CASO 0 : Q1 y Q2 con régimen natural. (Q1n y Q2n)

Como se ilustra en la figura 1, para dos estaciones ubicadas en el mismo cauce es dable suponer una relación lineal entre los caudales observados en ellas de la forma:

$$Q2n = K * Q1n \quad (1)$$

El aporte natural de la cuenca intermedia HI estaría dado por:

$$HI = (K - 1) * Q1n \quad (2)$$

en que K es mayor que uno y resulta ser el parámetro representativo de la cuenca intermedia. Si  $K < 1$ , corresponde al caso en que la cuenca intermedia posee una infiltración importante; situación no contemplada en el presente estudio (ver acápite 2.2).

- CASO 1 : Q1 en régimen natural y Q2 alterado por el uso consuntivo D2. (Q1n y Q2)

De acuerdo a la figura 2, y retomando la ecuación (1), puede escribirse:

$$(Q2 + D2) = K * Q1n \quad (3)$$

La ecuación (3) se puede escribir también:

$$Q2 = K * Q1n - D2 \quad (4)$$

en que D2 es el caudal extraído para uso consuntivo aguas arriba del punto 2, como promedio en un mes determinado durante el período de registro estadístico.

La ecuación (4) muestra que la correlación de caudales observados conserva el factor K y equivale a que la correlación en régimen natural (ecuación 1) se desplace paralelamente en la cantidad D2 (figura 2), o sea la constante de la correlación N vale:

$$N = D2 \quad (5)$$

- CASO 2 : Q1 y Q2 alterados por uso consuntivo D1 y D2

De acuerdo a la figura 3 y retomando la ecuación (1), puede escribirse ahora:

$$(Q2 + D1 + D2) = K * (Q1 + D1) \quad (6)$$

en que: D1 = uso consuntivo aguas arriba de la estación 1.  
D2 = uso consuntivo entre las estaciones 1 y 2.

$$\text{Luego: } Q2 = K * Q1 - (D2 - D1 * (K - 1)) \quad (7)$$

$$\text{y por lo tanto: } N = D2 - D1 * (K - 1) \quad (8)$$

Según se observa en la ecuación (7) el factor K de los valores naturales se conserva en la correlación de los valores observados.

En este punto, para desagregar los usos consuntivos D2 y D1 es necesario disponer de una relación adicional a la ecuación (8). Esta se obtiene suponiendo que los usos consuntivos D1 y D2 son proporcionales a las superficies de riego S1 y S2, es decir:

$$\frac{D1}{D2} = \alpha = \frac{S1}{S2} \quad (9)$$

$$\text{De lo que se obtiene: } D2 = \frac{N}{1 - (K - 1) * \alpha} \quad (10)$$

$$\text{y } D1 = \frac{\alpha * N}{1 - (K - 1) * \alpha} \quad (11)$$

## 2.2.- Condiciones que requiere el método expuesto

La aplicación de este método requiere de ciertas condiciones que deben cumplirse a saber:

- La determinación de los parámetros de las correlaciones entre caudales mensuales debe hacerse durante el período en que el uso consuntivo se haya mantenido constante o casi constante o que no sea apreciable un aumento sostenido del mismo. Este aspecto puede apreciarse mediante curvas dobles másicas entre los caudales de entrada y salida de la cuenca intermedia, ya que una variación sostenida en el uso consuntivo se verá reflejada en dicha curva como un cambio de tendencia.

- Es recomendable, por otra parte, que las estadísticas observadas sean lo más extensas posibles y no se utilicen estadísticas

ampliadas, por las distorsiones puntuales que pueden inducir dichas ampliaciones.

- En general, debe considerarse el método para casos en que los regímenes de escurrimiento de la cuenca intermedia y de la estación de cabecera son similares.

- Otro aspecto del método que hay que tomar en cuenta, es que los puntos de control de Q1 y Q2 queden suficientemente separados de tal manera que el caudal de la cuenca intermedia sea importante frente a la magnitud de Q1. Así, el caudal de la cuenca intermedia no quedará oculto por la variabilidad propia de los datos. Cabe recordar que la cuenca intermedia HI vale:

$$HI = Q2n - Q1n \quad (12)$$

y los errores relativos de Q1n y Q2n se amplifican frente a la diferencia, pudiendo ocurrir que sean más importantes los errores que la magnitud que se quiere medir. Por tal motivo el método se debe aplicar a la máxima HI compatible con la existencia y calidad de datos disponibles. Debe también tomarse en cuenta las eventuales infiltraciones que ocurran en la cuenca intermedia.

### 2.3.- Cálculo de la HI entre los puntos de observación 1 y 2

Como se ha explicado anteriormente los coeficientes determinados por las correlaciones definen el aporte natural de la cuenca intermedia HI.

Se verá a continuación que es posible calcular tres estimadores de la HI, los que pueden considerarse independientes por el hecho de expresarse dichos estimadores en función de datos generados de forma independiente unos de otros.

- **Estimador HI1** : Este estimador deriva de la ecuación (2) la que toma en cuenta solamente el caudal que entra en la cuenca intermedia Q1n.

$$HI1 = (K - 1) * Q1n \quad (13)$$

- **Estimador HI2** : En este caso, combinando las ecuaciones (2) y (4), puede expresarse la HI en función de Q2 y el uso consuntivo esperado mensual.

$$HI2 = \frac{(K - 1)}{K} * (Q2 + N) \quad (14)$$

- **Estimador HI3** : Este estimador deriva directamente de la ecuación de balance en la cuenta intermedia.

$$HI3 = Q2 + N - Q1n \quad (15)$$

El cálculo de HI3 suele poner de manifiesto de manera exagerada los errores relativos a que está sujeta la medición de caudales Q1 y Q2 y la transmisión de los mismos a la diferencia de ellos. Lo anterior hace necesario contemplar, junto al cálculo de HI3, correcciones de las estadísticas Q1 y Q2 cuando ocurren valores que no tendrían significado físico como es el caso de cuenta intermedia negativa en un determinado mes.

En este caso, cuando no existen aparentes errores en los trazados de las curvas de descarga se puede aplicar algún método de corrección estadístico, como por ejemplo el principio basado en que si dos variables observadas X e Y, adolecen de errores y cumplen la relación:

$$Y = K * X - N \quad (16)$$

un mejor valor para X e Y, sean estos <X> e <Y>, se consiguen haciendo que los nuevos valores <X> e <Y> conserven el promedio de los valores originales X e Y, es decir:

$$\frac{\langle X \rangle + \langle Y \rangle}{2} = \frac{X + Y}{2} \quad (17)$$

Combinando (16) y (17) puede escribirse:

$$\frac{X + Y}{2} = \frac{\langle X \rangle + K * \langle X \rangle - N}{2} = \frac{(K + 1) * \langle X \rangle - N}{2} \quad (18)$$

luego los valores corregidos quedan como:

$$\langle X \rangle = \frac{X + Y + N}{K + 1} \quad (19)$$

$$\langle Y \rangle = K * \langle X \rangle - N$$

**- Cuenca Intermedia HI adoptada**

No existiendo razones objetivas para preferir uno u otro de los estimadores de la HI, debería utilizarse el promedio de ellos como valor más probable. Tal procedimiento resulta adecuado en la gran mayoría de los valores mensuales por cuanto las estadísticas siguen siendo compatibles.

Cabe señalar que las ecuaciones (13), (14) y (15) utilizadas para el cálculo de los estimadores HI1, HI2 y HI3 respectivamente, consideran el caudal de entrada Q1n como régimen natural; vale decir el punto de medición de Q1n se ubica aguas arriba de las tomas de canales de riego, lo que representa el esquema del CASO 1.

Cuando la situación existente corresponde al CASO 2, con un uso consuntivo aguas arriba del punto de medición de Q1, las ecuaciones de cálculo cambian como se indica a continuación.

- Ecuación (13) modificada para el CASO 2

$$HI1 = (K - 1) * (Q1 + \frac{\alpha * N}{(\alpha + 1) - K * \alpha}) \quad (20)$$

- Ecuación (14) modificada para el CASO 2



$$HI2 = \frac{(K - 1)}{K} * Q2 + N * \left( \frac{1}{(\alpha + 1) - K * \alpha} - \frac{1}{K} \right) \quad (21)$$

- Ecuación (15) modificada para el CASO 2

$$HI3 = Q2 + N - Q1 \quad (22)$$

o bien:

$$HI3 = Q2 - Q1 + \frac{N}{(\alpha + 1) - K * \alpha} \quad (23)$$

Para  $\alpha = 0$  la ecuación (23) se hace idéntica a la (15).

### 3.- CASO EJEMPLO: CUENCA AFLUENTE AL EMBALSE RECOLETA IV REGION

El embalse Recoleta se encuentra en la IV Región geográfica del país, aproximadamente en las coordenadas 71° 06' Long. Oeste y 30° 28' Lat. Sur. El caudal afluente al embalse Recoleta está constituido casi en su totalidad por el caudal que llega por el río Hurtado. El afluente lateral al embalse lo aporta principalmente la quebrada Higuierilla, de 298 km<sup>2</sup> pero de muy baja escorrentía. (figura 4).

El presente caso ejemplo ilustra la aplicación de la metodología descrita en la determinación del régimen natural de la estación Hurtado en Angostura Pangué (Q2), la que controla más del 80 % de la cuenca afluente al embalse Recoleta y cuyo gasto natural se ve alterado por extracciones de riego aguas arriba de esta sección. Dicha estación controla una cuenca de 1821 km<sup>2</sup>.

Como estación de aguas arriba (Q1n) se considera Hurtado en San Agustín, la que mide prácticamente el régimen natural del río en ese punto por encontrarse aguas arriba de las extracciones para el regadío. Este control fluviométrico lo lleva la DGA y corresponde a una cuenca de 672 km<sup>2</sup>.

La respectiva cuenca intermedia entre las dos estaciones mencionadas, contiene una superficie agrícola de 2615 há, siendo la única causa del uso consuntivo que altera el régimen natural de aguas abajo y que se quiere restituir en este estudio.

De acuerdo a los antecedentes señalados, el presente ejemplo contempla una situación definida como **CASO 1** en la metodología.

De acuerdo a la metodología antes descrita, se realizaron correlaciones entre los caudales medios mensuales de las dos estaciones indicadas, de modo que se obtuvo para el término constante de las ecuaciones de regresión los valores que se indican en la figura 5. En la misma figura se muestran los valores teóricos de la evapotranspiración en la cuenca intermedia calculados con el método de Blaney y Criddle, de donde puede verse que las correlaciones representan bien los valores esperados para el uso consuntivo promedio en el mes.

Siguiendo el método propuesto, se calcularon los tres estimadores de la cuenca intermedia HI y la cuenca intermedia promedio, de modo que el caudal natural de Hurtado en Angostura Pangué se obtuvo sumándole al de San Agustín la cuenca intermedia adoptada.

Las correcciones a las estadísticas originales, que contempla el método, produjeron un ajuste global de sólo algo más de un 4 %, manteniendo constante el promedio de ellas según se especificó en el criterio de corrección antes explicado.

La homogeneidad de los resultados obtenidos para las estadísticas finales se muestra en las curvas doble acumuladas de la figura 6. En dichas curvas se grafican los gastos naturales de San Agustín en comparación con Molles en Ojos de Agua, tomando esta última como estadística patrón, la que mide el gasto natural en las nacientes del río Rapel (afluente al embalse Paloma). También en la figura 6 se grafican los gastos naturales de Hurtado en Angostura Pangué en función de Hurtado en San Agustín.

En las curvas mencionadas anteriormente se presenta una tendencia única con puntos en el entorno de dicha tendencia con pequeña dispersión. En cuanto a la cuenca intermedia, ésta se graficó en la misma figura 6 en comparación con la estadística patrón. El gráfico presenta una tendencia única con saltos en los años extremadamente lluviosos 1984 y 1987, que no modifican la tendencia.

Otro aspecto que se consideró para evaluar la calidad de las estadísticas naturales que se obtuvieron fue verificar la escorren-tía anual de las cuencas con la precipitación caída sobre ellas. Para esto se consideró las isoyetas e isotermas medias anuales trazadas en la publicación Balance Hídrico de Chile, DGA 1987, estimando el déficit de escorren-tía empíricamente mediante la fórmula de Turc. La verificación arrojó variaciones de no más de un 3 %, lo que es bastante bueno.

#### 4.- COMENTARIOS

##### 4.1.- El método

Aún cuando el resultado del análisis que se ha expuesto tiene como producto final la estadística en régimen natural de la estación de aguas abajo, la esencia del método consiste en definir el régimen de la cuenca intermedia HI. Ello permite obtener por adición al caudal natural de aguas arriba el respectivo régimen en la estación de aguas abajo.

El método propuesto se basa en el hecho que la simple correlación lineal de los caudales observados en las estaciones de entrada y salida de la HI contiene los parámetros (pendiente K y constante N) que definen las dos variables necesarias para lograr el balance hidrológico de la cuenca, es decir la HI y el uso consuntivo.

Para el cálculo de la cuenca intermedia se han definido tres estimadores independientes HI1, HI2 y HI3, que se basan ya sea en la estadística de cabecera, en la de aguas abajo o en la diferencia de ambas, adoptándose el promedio de estos estimadores como valor

de la HI. El procedimiento, a nuestro juicio, abre el espectro de posibilidades de lo que pudo ocurrir en la cuenca intermedia durante el registro histórico disponible.

#### 4.2.- El caso estudiado

Presentándose como caso ejemplo se mostró el análisis realizado en el río Hurtado entre las estaciones de San Agustín y Angostura Pangué.

La aplicación del método ha sido satisfactoria a juzgar por la bondad de las verificaciones que se indican a continuación:

- Se ha verificado la concordancia entre el uso consuntivo calculado según fórmulas de aplicación usual en Chile (Blaney y Criddle) y el que acusan las correlaciones de los caudales observados en cada mes.
- Se ha comprobado la consistencia entre el régimen natural a la entrada y a la salida de la HI con la precipitación media anual y su respectivo déficit de escorrentía.
- Se ha probado la homogeneidad de las estadísticas resultantes mediante curvas doble acumuladas, realizadas entre las estaciones y con el patrón de caudales utilizado para la extensión de las estadísticas originales (Molles en Ojos de agua).

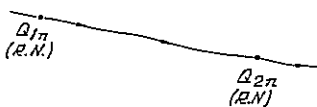
Todo lo anterior nos conduce a pensar que los resultados obtenidos concuerdan razonablemente con la respuesta que la cuenca habría tenido en el punto de aguas abajo si hubiese conservado el régimen natural.

#### 5.- BIBLIOGRAFIA

- INGENDESA, 1991, Consultoría OME-04 Mejoramiento Sistema Paloma IV Región Estudio Hidrológico, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego.

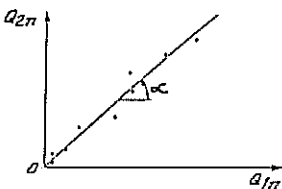
FIGURA 1

CASO 0



$$Q_{2n} = K * Q_{1n}$$

$$HI = (K-1) * Q_{1n}$$



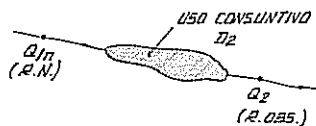
CORRELACION DEL CAUDAL MEDIO MENSUAL

$$K = \tan \alpha$$

$N =$  INTERCEPTO DE LA RECTA DE CORRELACION

FIGURA 2

CASO 1

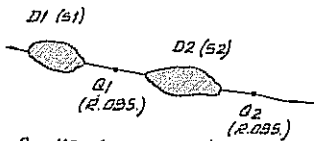


$$Q_2 = K * Q_{1n} - D_2$$

$$N = D_2$$

FIGURA 3

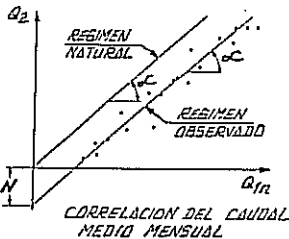
CASO 2



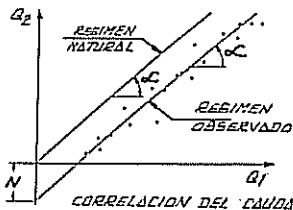
$$Q_2 = KQ_1 - (D_2 - D_1 (K-1))$$

$$N = D_2 - D_1 * (K-1)$$

51, 52 SUPERFICIES DE RIEGO



CORRELACION DEL CAUDAL MEDIO MENSUAL



CORRELACION DEL CAUDAL MEDIO MENSUAL

FIGURA 4  
CUENCAS AFLUENTES AL EMBALSE RECOLETA

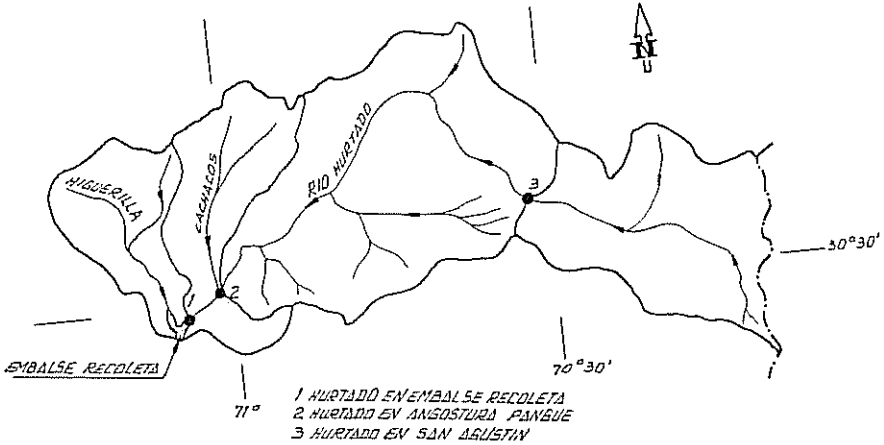
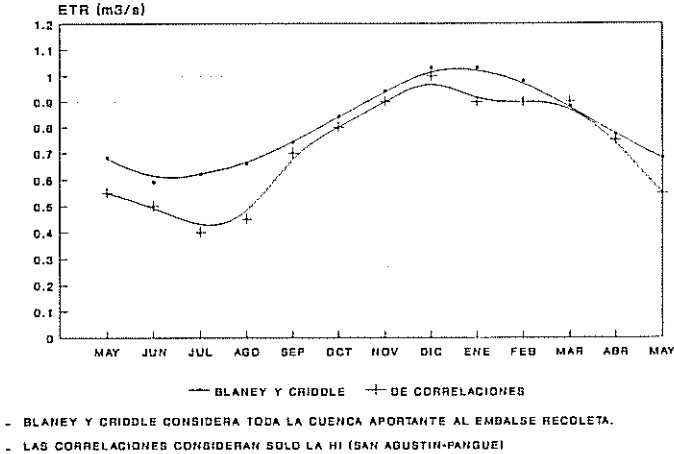


FIGURA 5  
EVAPOTRANSPIRACION TEORICA Y REAL  
VALLE DEL RIO HURTADO



# CURVAS DOBLE ACUMULADA

