

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XI CONGRESO CHILENO

CALCULO DE LOS APORTES HIDRICOS DISTRIBUIDOS DE UN CURSO DE
AGUA UTILIZADO CON FINES DE RIEGO : UNA SOLUCION ORIGINAL

ANDREA NARDINI¹ y DANIEL MONTOYA²

Resumen

En el marco de un estudio de gestión de recursos hídricos de un sistema existente en la cuenca del río Biobío, nace el problema de determinar los aportes hídricos distribuidos en un tramo del río Laja. En este trabajo se presenta una solución basada en un enfoque original. En efecto, no es posible realizar un simple balance hídrico debido a la inexistencia de series hidrológicas completas y a la falta de mediciones de los caudales extraídos por los canales de riego existentes. Se recurre, entonces, a un modelo conceptual de la operación de los canales, que junto a la aplicación de un modelo estocástico permiten la reconstrucción de una serie histórica de los aportes distribuidos.

¹Ingeniero Civil Hidráulico, Coordinador Grupo Ingeniería
Centro EULA-Chile, Prof. Visitante, Universidad de Concepción.

²Ingeniero Civil, Investigador Centro EULA-Chile, Instructor
Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

1. Introducción

Modificaciones relevantes en la estructura y/o manejo de sistemas de recursos hídricos en operación provocan, en general, reacciones de protesta de parte de grupos sociales involucrados, debido a que éstos temen ser perjudicados. Este es el caso del Proyecto Laja-Diguillín, un gran canal de riego de 65 m³/s de capacidad, cuyo estudio y diseño lleva a cabo la Dirección de Riego (DR) del Ministerio de Obras Públicas (IPLA, 1990). Los estudios hidrológicos (Brown y Ferrer, 1992) encargados por el organismo público concluyen que la obra es técnicamente factible. Sin embargo, aún persisten fuertes dudas, en particular, respecto a la disponibilidad de aportes hídricos distribuidos. Estos aportes, conformados por esteros, retornos de riego y aportes de la napa subterránea serían, según la DR, de tal magnitud que permitirían recuperar el caudal del río Laja, donde tiene su origen el futuro canal, de modo de no crear impactos negativos aguas abajo de su bocatoma (menor seguridad de abastecimiento de los canales de riego, disminución del valor estético del Salto del Laja y el empeoramiento de la calidad del agua del río Biobío).

Con el fin de aclarar este aspecto de la hidrología del río Laja y de llegar a una cuantificación de estos aportes, se ha desarrollado, dentro de un proyecto más general (Nardini y Montoya, 1993), una investigación específica respecto a este tema y que se describe en este trabajo. Tal como se muestra en lo que sigue, no es posible calcular los aportes distribuidos a partir de un simple balance hídrico entre dos secciones del río, especialmente por la falta de mediciones de caudales extraídos históricamente por los canales de riego existentes. Es necesario, entonces, recurrir a un modelo conceptual simple del funcionamiento del sistema, que permite resolver el problema.

2. Descripción del Sistema

En la Fig. 1 se presenta un esquema de la parte del sistema físico considerado en el presente estudio. Se indican en ella : la bocatoma Tucapel, desde donde tendría su origen el canal Laja-Diguillín (punteado) y a partir de la cual nace el principal canal existente en el sistema: el canal Laja; las estaciones hidrológicas de interés, con el periodo durante el cual existen series de caudal mensual (paso temporal adoptado en el estudio de gestión (Nardini y Montoya, 1993)).

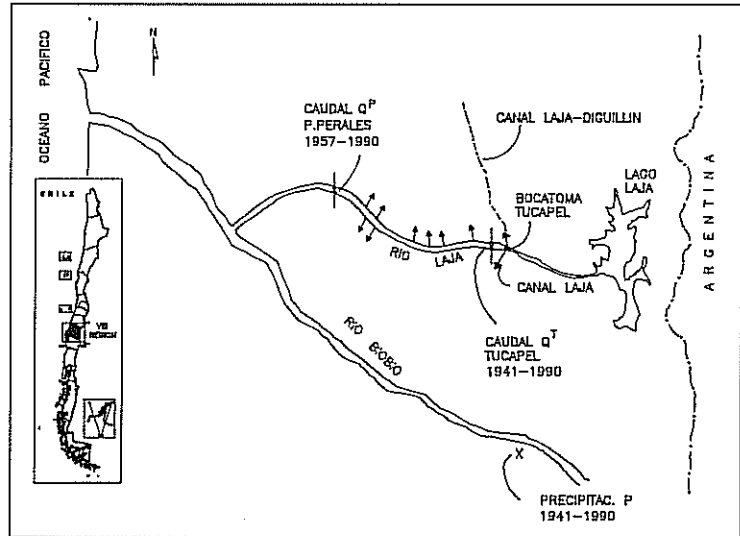


Fig. 1. Esquema del sistema físico de interés en el estudio

El periodo hidrológico utilizado en el estudio más general antes mencionado, corresponde a los años 1941-90 y, por lo tanto, en este trabajo se considera el mismo periodo. Tal como se aprecia en la Fig. 1, la serie de la estación de Pte. Perales cubre sólo los años 1957-90 y, por lo tanto, no es posible realizar un balance hídrico, necesario para evaluar los

aportes distribuidos en el periodo requerido. El otro obstáculo, aun más grave, para efectuar el balance, se refiere a la inexistencia de series de caudales derivados por los canales existentes en el tramo. En el intento de lograr una evaluación cuantitativa, al menos aproximada, de la hidrología del río Laja, se ha decidido enfrentar el problema construyendo un modelo simple, capaz de describir la modalidad de extracción de estos canales. De esta forma es posible efectuar el balance en el periodo 1957-90. La serie de aportes distribuidos así obtenida puede luego ser utilizada para construir un modelo causa-efecto, de modo de poder extender la misma serie al periodo faltante 1941-56. Un modelo de este tipo resulta además útil para evaluar si eventuales mejoramientos en la eficiencia de riego del distrito agrícola correspondiente al canal Laja, producirían menores aportes distribuidos al río Laja (de retornos de riego), cosa que agravaría el problema generado por la eventual construcción del canal Laja-Diguillin.

3. Una Solución Original

Ninguno de los canales existentes aguas abajo de la bocatoma Tucapel posee obras de toma fijas, capaces de regular la extracción. Por ello, al inicio de cada temporada de riego (octubre-abril) se realiza una obra provisoria casi paralela a la línea de corriente, compuesta por un relleno reforzado por caballetes ("patas de cabra"), tal como se muestra en la Fig. 2.

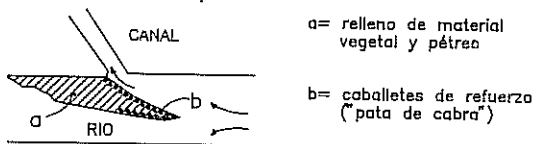


Fig. 2. Esquema de una obra de toma provisoria

Es razonable, entonces, asumir que el canal i -ésimo

($i=1,2,\dots,8$) capta en el instante t una fracción γ^i (con $0 < \gamma^i < 1$) del caudal Q_t^i que presenta el río en ese instante frente dicho canal. Se asume además, que cuando el caudal extraído $\gamma^i Q_t^i$ es superior a la demanda d_t^i del canal, éste sólo deriva la parte d_t^i , mientras que el excedente es devuelto al cauce del río. Lo anterior es posible, puesto que los canales están provistos de sistemas de compuertas capaces de efectuar tal operación. Si se indica entonces con q_t^i el caudal captado por el canal i -ésimo en el instante t , lo anterior se puede expresar formalmente como:

$$q_t^i = \min [\gamma^i Q_t^i ; d_t^i] \quad (1a)$$

con:

$$Q_t^i = Q_t^T - \sum_{j=1}^{i-1} q_t^j + a_t l_i \quad (1b)$$

donde Q_t^T es el caudal del río Laja en la estación Tucapel (inmediatamente aguas abajo de la captación del canal Laja), a_t el aporte distribuido [$m^3/s \cdot km$] entre Tucapel y Pte. Perales (se asume uniforme) y l_i la distancia de la bocatoma del canal i -ésimo a la estación Tucapel. Lógicamente, para $i=1$ la sumatoria del segundo término de la Ec.(1b) debe asumirse nula.

La Ec.(1a) se puede representar gráficamente, como se muestra en la Fig. 3:

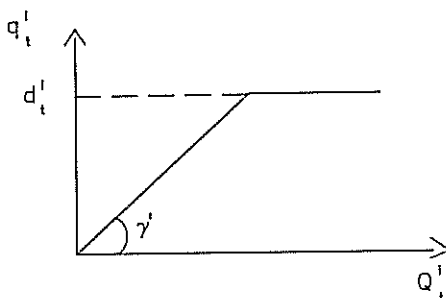


Fig. 3. Regla de derivación del i -ésimo canal

Habiendo introducido este simple modelo conceptual del funcionamiento de los canales, es posible ahora efectuar un

balance hidrico entre las estaciones de Tucapel (caudal Q_t^T) y Pte. Perales (caudal Q_t^P), distanciadas en L [km]:

$$Q_t^P = Q_t^T - \sum_{i=1}^8 q_t^i + a_t L \quad (2)$$

donde q_t^i ($i=1,2,\dots,8$) está dado por la Ec.(1a), que a su vez depende de (1b), en la cual aparecen los valores de a_t y q_t^i .

La Ec.(2) no se puede resolver directamente para obtener el valor de a_t , debido a que no se conoce a priori que parte de la curva de la Fig. 3 debe ser utilizada. Es posible entonces proceder, para cada instante t, con un algoritmo basado en dos pasos (a) y (b):

- a - se asume estar dentro del primer tramo de la curva ($\gamma^i Q_t^i$); se puede, entonces, resolver en forma directa la Ec.(2), haciendo uso de una simplificación (descrita en breve); se obtiene así el valor de \hat{a}_t
- b - con el valor recién calculado \hat{a}_t se calcula de las Ecs.(1) el valor Q_t^i (para cada canal) y se verifica si la hipótesis de partida se cumple: si es así, $a_t = \hat{a}_t$, en caso contrario, se procede a calcular a_t por medio de un algoritmo iterativo de búsqueda monodimensional, descrito más adelante

Naturalmente, es posible utilizar siempre sólo el segundo paso, renunciando a una mayor rapidez de cálculo.

Para resolver el punto (a) es necesario simplificar el sistema hasta obtener un máximo de tres canales, ya que de otra forma se obtiene una ecuación de grado superior a tres. Esta simplificación consiste en introducir un solo canal equivalente en lugar de dos canales muy próximos entre si y de repetir esta operación sucesivamente. Es posible introducir un canal equivalente cuando se puede escribir:

$$q^{oq} = q^j + q^k = \gamma^j Q^j + \gamma^k Q^k \quad (3a)$$

con

$$q^{oq} = \gamma^{oq} Q^j \quad (3b)$$

donde q^{oq} es la extracción efectuada por el canal equivalente y Q^j (Q^k) el caudal del río en la sección j (k). La formulación (3) es correcta sólo si entre los dos canales j y k no existen aportes distribuidos ($Q^j = Q^k$), de otra forma se introduce un error, tanto mayor cuanto mayor es la distancia entre los canales. En el tramo del río Laja estudiado, esta condición se cumple con una aproximación aceptable, de modo que es posible la simplificación. Se verifica fácilmente que para dos canales en serie (uno aguas abajo del otro) y próximos entre sí, se tiene:

$$\gamma^{oq} = \gamma^j + \gamma^k - \gamma^j \gamma^k \quad (4)$$

Para resolver, en cambio, el problema expuesto en el punto (b), es posible utilizar un algoritmo de bisección (Wagner, 1969), con el fin de encontrar el cero de la función que representa el error o desviación del balance hídrico (2):

$$F(a_L) = -Q_L^P + Q_L^T - \sum_{i=1}^n q_L^i + a_L L \quad (5)$$

donde los símbolos tienen el mismo significado especificado en (2). Se verifica, en base a las Ecs. (5) y (2), que la función $F(a_L)$ se puede reducir siempre a una expresión del tipo $F(a_L) = m a_L + c$, donde m y c son coeficientes dependientes de a_L , de modo que $F(a_L)$ resulta continua, lineal por tramos y monótona creciente. Esta función, por lo tanto, posee un único cero en el intervalo $(-\infty, +\infty)$ y de ahí que el método de la bisección sea aplicable. Cabe destacar que la solución a_L puede ser negativa, sin embargo, esto no se contradice con la realidad física, pues es frecuente que en algunos tramos el río Laja presente pérdidas en lugar de recuperaciones.

Una vez obtenida la serie de aportes distribuidos para el periodo disponible 1957-90, se ha construido un modelo de tipo autoregresivo con ingresos exógenos. Las series históricas

(relativas al mismo período) utilizadas como ingreso, son la precipitación p_t de una estación cercana, el caudal de la estación río Laja en Tucapel Q_t^T y las extracciones efectuadas por el Canal Laja (el único que posee un registro completo de caudales). Se ha descubierto así que este último ingreso no tiene ninguna influencia sobre a_t , lo que se debe, probablemente, a que el distrito de riego de este canal no drena significativamente hacia el río Laja. Por lo tanto, se puede afirmar que un eventual programa de mejoramiento de la eficiencia de riego en el distrito del Canal Laja no produciría, de no alterarse el régimen hidrológico en Tucapel y las extracciones desde el río Laja, ninguna modificación apreciable en el régimen de este último aguas abajo. El tipo de modelo considerado es el siguiente:

$$a_t = \alpha a_{t-1} + \beta Q_t^T + p_t + \delta + \varepsilon_t \quad (6)$$

donde α , β , γ , δ son parámetros estimados con el método de los mínimos cuadrados y ε_t es el ruido o error estocástico del modelo. Para seleccionar el mejor modelo, en primer lugar se ha calibrado (estimado los parámetros), utilizando para ello la mitad de la serie disponible (1957-74). Luego, se ha procedido a efectuar la validación, para lo cual se ha utilizado la otra mitad de la serie (1975-90), calculando los indicadores representativos de las prestaciones del modelo, que permiten entonces elegir el que entrega mejores resultados. La calibración se ha efectuado utilizando el modelo en forma de previsión, es decir:

$$a_t = f(\bar{a}_{t-1}, \bar{u}_t) \quad t \geq 1 \quad (7)$$

donde \bar{a}_{t-1} es el valor conocido (perteneciente a la serie calculada anteriormente) y \bar{u}_t representa los ingresos exógenos, también conocidos. Como es sabido, esta forma no es la más correcta en el caso en que se esté desarrollando un modelo de simulación (como en este caso) y no de previsión; sin embargo, la forma (7) permite transformar el problema de estimación de los parámetros en un problema lineal. Esto hace posible, entonces, resolver de forma algorítmicamente muy simple el

problema de estimación con mínimos cuadrados, por medio del álgebra de matrices.

En cambio, en la fase de validación, las prestaciones del modelo se han calculado usando el modelo en forma de simulación:

$$a_t = \begin{cases} f(\bar{a}_0, \bar{u}_0) & \text{si } t=1 \\ f(a_{t-1}, \bar{u}_t) & \text{si } t>1 \end{cases} \quad (8)$$

Es decir, en este caso, para el cálculo del aporte a_t en un instante $t>1$ dado, se utiliza el valor calculado (no el valor conocido) en el instante anterior. Esto, debido a que el modelo se utiliza precisamente de esta forma, efectuando una simulación para reconstruir los aportes en el periodo 1941-56, para el cual faltan las series hidrológicas en las estaciones de interés del río Laja.

Algunos indicadores representativos de las prestaciones del modelo obtenido (de tipo (6)) son los siguientes: coeficiente de correlación $\rho^2 = 0.83$; "varianza explicada" $v = 1 - \sigma_e^2 / \sigma_a^2 = 0.69$ (con σ_e^2 se indica la varianza del error ε_t y con σ_a^2 la de la variable a_t); una razón datos utilizados por número de parámetros calibrados cercana a 33. Si bien, estos valores no son excelentes, considerando los supuestos asumidos, en este caso específico, son del todo aceptables.

Finalmente, utilizando las series disponibles de precipitaciones p_t y de caudales Q_t^T , se ha reconstruido la serie de aportes a_t del periodo faltante 1941-56 mediante el modelo obtenido. La serie completa se muestra en la Fig. 4.

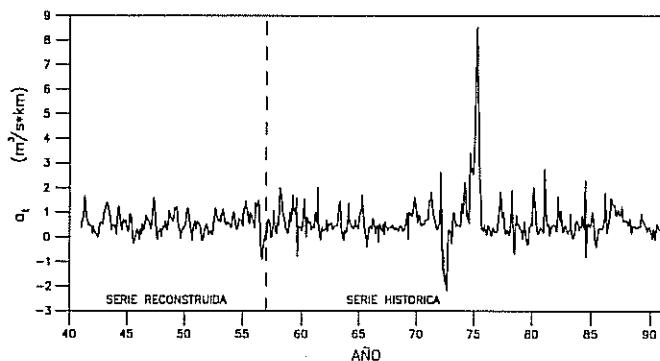


Fig. 4. Serie completa de aportes distribuidos q_t entre Tucapel y Puente Perales

4. Conclusiones

En este trabajo se ha enfrentado el problema de la cuantificación de los aportes hidricos distribuidos en un tramo del río Laja. La necesidad de conocer estos aportes nace de un estudio más general sobre la gestión del sistema lago Laja - río Laja.

Para el periodo en que se tienen series de caudal en las secciones extremas del tramo (1957-90), se recurre a un modelo conceptual estático del funcionamiento de los canales. Se obtiene así la serie de aportes distribuidos que permite calibrar y validar un modelo autoregresivo con ingresos exógenos (ARX), que es utilizado para completar la serie (1941-56).

Los resultados obtenidos son aceptables y concordantes con la realidad física del sistema. Se observa, sin embargo (Fig. 4), un comportamiento anormal durante los años 1973-74, atribuible probablemente a errores de medición de los caudales del río Laja.

5. Referencias Bibliográficas

- Brown E., Ferrer G., *Estudio de recursos de agua para el Canal Laja - Diguillín* (1992). Dirección Nacional de Riego, Santiago, Chile.
- IPLA (Ingeniería y PLANificación ltda), *Proyecto Canal Laja-Diguillín* (1990). Comisión Nacional de Riego, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.
- Nardini A., Montoya D., *Planteamiento de un modelo decisonal para la gestión integrada del sistema lago Laja - río Laja en relación al Proyecto Canal Laja-Diguillín* (1993). Serie Monografías Científicas, Vol.3, Proyecto EULA-Chile, Universidad de Concepcion, Chile.
- Wagner H.M., *Principles of Operations Research* (1969). Prentice-Hall.