

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**REPRESENTACIÓN DE LA OFERTA DE AGUA EN ZONAS CON ESCASA
INFORMACIÓN REGISTRADA HACIENDO USO DE
MODELOS PERIÓDICOS MULTIVARIADOS CONTEMPORÁNEOS**

FERNANDO HARAMBOUR P.¹

RESUMEN

En este artículo se presentan y discuten los resultados obtenidos al emplear un modelo estocástico, de tipo periódico y multivariado, para representar las series de caudales medios mensuales en un sistema de abastecimiento de agua que se surte de varias cuencas hidrográficas con comportamiento pluvionival.

Debido a la disponibilidad parcial de información registrada, con la información disponible se desarrollan relaciones regionales para calcular los momentos y coeficientes de correlación espacial y temporal de las series de caudales medios mensuales en los puntos de captación del sistema.

Los resultados obtenidos con el modelo desarrollado se comparan con los obtenidos haciendo uso de modelos más simples, con la finalidad de mostrar la importancia real de modelar la estructura de dependencia del sistema y su periodicidad.

¹ Ingeniero Civil, Consultor, - mail: fhp1@terra.cl

1. INTRODUCCIÓN

Para optimizar la operación de un sistema de abastecimiento de agua y calcular su seguridad hidrológica, resulta conveniente disponer de modelos de generación sintética de caudales medios mensuales. Cuando se dispone de varias fuentes, estos modelos deben representar los momentos de cada serie y su estructura de dependencia espacio - temporal. Representar inadecuadamente esta estructura puede conducir a errores en la determinación de la oferta de agua (Harambour, F. y Vargas, X., 2002).

Existe una gama amplia de modelos estocásticos lineales capaces de reproducir las propiedades estadísticas exhibidas por series de caudales medios (Bras y Rodríguez – Iturbe, 1993). En Chile también se ha explorado el uso de modelos estocásticos no lineales para modelar series de caudales medios diarios (Santa Cruz, J. y Fernández, B., 1993). Sin embargo, por diversas razones, entre las que se destaca la carencia de información fluviométrica, en los sistemas chilenos reales de abastecimiento de agua potable es habitual emplear modelos muy simples, que normalmente no representan adecuadamente la estructura de dependencia espacio - temporal de las series de caudales medios mensuales afluentes a los puntos de captación, por lo que se determina sólo de manera aproximada la oferta real de agua.

Con la finalidad de mostrar que la carencia de información registrada, no es, necesariamente, un impedimento para ajustar modelos estocásticos periódicos multivariados, en este artículo se discute el uso de un modelo periódico, multivariado, contemporáneo, autoregresivo de primer orden, para representar el comportamiento conjunto de las series de caudales medios mensuales afluentes a la totalidad de las captaciones del sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de Punta Arenas, y se comparan los resultados obtenidos con este modelo, con los obtenidos con modelos más simples.

Para lograr este objetivo, con la información registrada se establecen relaciones regionales que permiten calcular los parámetros del modelo estocástico seleccionado. Este procedimiento no es nuevo. Ha sido empleado, por ejemplo, para efectuar estimaciones regionales de recursos hídricos en cuencas nivopluviales de la región central de Chile haciendo uso de Funciones de Transferencia de bajo orden entre la precipitación total y los caudales a nivel mensual (Fernández, B. y Pizarro, G, 1995).

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La ciudad de Punta Arenas se sitúa en la XII Región de Chile, en la ribera poniente del Estrecho de Magallanes. Cuenta con una población de 120.000 habitantes, que obtiene agua desde los ríos Las Minas, Tres Brazos y Leñadura; del estero Lynch, y del Lago Parrillar.

Por el estero Lynch escurre el caudal liberado desde el Embalse Lynch (que es alimentado por su propia cuenca de drenaje y con trasvases provenientes de los esteros El Cable y Ciervos Sur), más el caudal generado por la cuenca localizada entre el embalse y la captación para agua potable.

De acuerdo con lo anterior, para simular este sistema de abastecimiento de agua es necesario representar el comportamiento hidrológico conjunto de las siguientes cuencas hidrográficas: Río Las Minas en bocatoma (LM); Río Tres Brazos en captación (TB); Río Leñadura en captación (LD); Embalse Lynch (EL); Cuenca intermedia del estero Lynch en bocatoma (LY); Estero El Cable en bocatoma (EC); Estero Ciervos Sur en bocatoma (CS), y Lago Parrillar en bocatoma (LP). La superficie total de este sistema es de 283 Km².

Actualmente sólo se mide el caudal generado por las cuencas del río Las Minas y del río Tres Brazos, donde la Dirección General de Aguas (D.G.A.) cuenta con estaciones fluviométricas ubicadas a corta distancia de las respectivas captaciones para agua potable. Como la superficie de estas dos cuencas en los puntos de captación es de aproximadamente 141 Km², se deduce que sólo el 50% de la superficie total del conjunto de cuencas que aportan agua al sistema cuenta con control fluviométrico. En el río Leñadura existió una estación fluviométrica que funcionó por pocos años, pero que aporta información importante para validar el modelo.

La D.G.A. también dispone de una estación fluviométrica en la desembocadura del río San Juan, que corresponde a una de las cuencas más importantes de la península donde se localiza Punta Arenas (Península Brunswick). La hoya hidrográfica de este río tiene una superficie de 1.256 km² y en su extremo superior se encuentra el Lago Parrillar.

3. DESARROLLO DEL MODELO

El comportamiento hidrológico de los ríos Las Minas, Tres Brazos y Leñadura, por ser de donde se extrae la mayor parte del agua que abastece Punta Arenas, ha sido recientemente estudiado por Harambour y Vargas (2002), y por Valenzuela, M. (2004). En el primer caso se analizó cómo incide la representación de la estructura de dependencia espacio - temporal de las series de caudales medios mensuales de estos tres ríos, en la evaluación de la disponibilidad de agua en el estiaje, y se investigó la precisión con que es posible calcular el volumen de agua generado en ese periodo debido al ajuste de un modelo multivariado con series hidrológicas de corta longitud. En el segundo caso se estudió la incertidumbre estadística asociada con el ajuste de modelos CARMA y ARMAX, y un modelo conceptual de estanques.

Sin embargo, en ambos casos, además de no haber sido incorporadas todas las cuencas que surten de agua a la ciudad, se ajustó modelos que no permiten reproducir la periodicidad del coeficiente de autocorrelación de las series de caudales medios mensuales, lo que constituye una limitante en cuencas pluvionivales.

Para desarrollar el modelo que se presenta en este trabajo, se usó la información fluviométrica y pluviométrica indicada en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1: Información hidrológica

Estación	Tipo	Años con información
Río Las Minas en Bt. Sendos	Fluviométrica	1982 a 2005
Río Tres Brazos antes Bt. Sendos	Fluviométrica	1982 a 2005
Río San Juan en Desembocadura	Fluviométrica	1980 a 2005
Punta Arenas	Pluviométrica	1973 a 2005
Laguna Lynch	Pluviométrica	1979 a 2005
Las Minas	Pluviométrica	1995 a 2005
Parrillar	Pluviométrica	1990 a 2005
San Juan	Pluviométrica	1990 a 2005

Con esta información se determinó que los ríos Las Minas, Tres Brazos y San Juan tienen un comportamiento hidrológico similar, de tipo pluvionival. En general presentan sus caudales máximos en el mes de Octubre y un periodo de estiaje que se inicia en Diciembre y finaliza en Marzo (según se ilustra en la Figura 1). No obstante este hecho, la distribución mensual de su escorrentía varía considerablemente de año en año, no pudiendo ser explicada esta variación en términos de la magnitud del caudal medio anual, ni de la precipitación anual y/o mensual que cae sobre cada cuenca. Este es un fenómeno característico de las cuencas hidrográficas de baja altura situadas en la Región de Magallanes, donde pequeñas variaciones en la temperatura de cada temporal inciden significativamente en el tipo de precipitación (sólida o líquida) que cae sobre la cuenca.

Considerando este hecho, el primer momento de las series de caudales medios mensuales de cuencas sin información fluviométrica, se calculó suponiendo que su rendimiento unitario es similar al de cuencas vecinas con control fluviométrico; lo que fue validado con mediciones realizadas en el río Leñadura.

La información fluviométrica también permitió determinar que en los tres ríos recién indicados, el coeficiente de variación (CV) del caudal medio mensual: (1°) se distribuye similarmente a lo largo del año; (2°) es mayor a medida que disminuye el tamaño de la cuenca, y (3°) en los primeros meses del estiaje adopta un valor más alto que en el resto del año. El que al ser menor el tamaño de una cuenca disminuya su capacidad para retener agua, explica parcialmente estas propiedades. Por lo anterior, se ajustó el siguiente modelo para estimar el coeficiente de variación en cuencas sin control fluviométrico:

$$CV_k^i = a_i \cdot A_k^{-0,074} \quad (1)$$

En esta ecuación a_i corresponde al factor de distribución mensual del coeficiente de variación que se ilustra en la Figura 2, en tanto que A_k corresponde al área de la cuenca, expresada en kilómetros cuadrados.

Considerando que las series de caudales medios mensuales siguen una distribución lognormal, el primer (μ_k^i) y segundo (s_k^{2i}) momento de este modelo, se calculó resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$\mu_k^i = \ln(m_k^i) - 0,5 \cdot s_k^{2i} \quad (2)$$

$$s_k^i = \sqrt{\ln \left[1 + \frac{v_k^{i2}}{m_k^{i2}} \right]} \quad (3)$$

En ambas expresiones m_k^i corresponde al valor medio (para el mes i en la cuenca k) de la serie de caudales medios mensuales y v_k^i representa la desviación estándar correspondiente.

La estructura de dependencia espacial del modelo se determinó analizando el comportamiento del coeficiente de correlación de las series logarítmicas de caudales medios mensuales concurrentes, para parejas de ríos con control fluviométrico. Considerando que el coeficiente así determinado presenta un comportamiento similar en todas las parejas analizadas y que este coeficiente normalmente disminuye al ser mayor la distancia entre los ríos que forman cada pareja, se ajustó el siguiente modelo para calcular el coeficiente de correlación espacial en cuencas sin control fluviométrico:

$$R_{kj}^i = \beta_i \cdot D_{kj}^{-0,042} \quad (4)$$

En esta ecuación R_{kj}^i , corresponde al coeficiente de correlación del mes i , entre las series de caudales logarítmicos de las cuencas k y j ; β_i es el factor de distribución mensual que se ilustra en la Figura 3, en tanto que D_{kj} corresponde a la distancia entre las cuencas hidrográficas que se correlacionan, expresada en kilómetros.

Finalmente, para estudiar la estructura de dependencia temporal se calculó el correlograma de los tres ríos que cuentan con información fluviométrica. Los resultados indicaron, por una parte, que sólo el coeficiente de autocorrelación de primer orden tiene significación estadística. Por otra parte, mostraron que si bien el nivel de dependencia temporal entre un mes y otro es pequeño, es consistentemente mayor de Noviembre a Febrero que en los restantes meses del año, lo que refuerza la idea de ajustar modelos periódicos. También se determinó que este coeficiente es levemente más grande en las cuencas de mayor superficie. Este resultado condujo a proponer el siguiente modelo para calcular el coeficiente de autocorrelación mensual de primer orden en cuencas sin control fluviométrico:

$$R_k^i = ?_i \cdot A_k^{0,074} \quad (5)$$

En esta ecuación R_k^i , corresponde al coeficiente de autocorrelación de primer orden del mes i en la cuenca k ; $?_i$ es el factor de distribución mensual indicado en la Figura 4, en tanto que A_k corresponde a la superficie de la cuenca hidrográfica, expresada en kilómetros cuadrados.

Los modelos desarrollados para calcular los momentos de primer y segundo orden, junto con las ecuaciones propuestas para calcular los coeficientes de correlación espacial y temporal, permitieron determinar las propiedades estadísticas de las series logarítmicas de caudales medios mensuales en cuencas sin información fluviométrica registrada. Ello posibilitó la representación del sistema de abastecimiento de agua, con el siguiente modelo periódico, multivariado, contemporáneo, autoregresivo de primer orden:

$$Y_i = \mu_i + A_i \cdot (Y_{i-1} - \mu_{i-1}) + B_i \cdot ?_i \tag{6}$$

$$E(?_i \cdot ?_i^T) = I \tag{7}$$

$$E(?_i \cdot ?_{i-r}^T) = 0, \quad \forall r \neq 0 \tag{8}$$

En estas ecuaciones Y_i es un vector columna de ocho componentes (cada uno de ellos corresponde al logaritmo natural del caudal medio mensual del mes i , en una de las cuencas hidrográficas que abastecen de agua a la ciudad); μ_i corresponde al vector de medias logarítmicas del mes identificado con el subíndice señalado; A_i corresponde a una matriz que se introduce para representar la estructura de dependencia temporal de cada cuenca durante el mes i , en tanto que B_i es una matriz que representa la varianza y estructura de dependencia espacial del sistema. Por su parte, $?_i$ es un vector de variables aleatorias normalizadas.

Para validar el modelo se generó series de caudales medios mensuales en las ocho cuencas representadas y se comparó el valor medio, la desviación estándar y los coeficientes de correlación espacial y temporal de estas series, con los obtenidos a partir de la información fluviométrica registrada. La comparación gráfica se ilustra en las Figuras 5 y 6.

4. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO

Para comparar los resultados que se obtienen con el modelo propuesto en este trabajo, con los que han sido obtenidos usando modelos más simples, se generó con el modelo desarrollado series de caudales medios mensuales de mil años de extensión, y a partir de ellas se calculó para diferentes probabilidades de excedencia: (1º) el caudal medio que en conjunto generan durante el estiaje las cuencas de los ríos Las Minas, Tres Brazos y Leñadura, y (2º) el caudal medio producido durante el estiaje por la totalidad de las cuencas que surten de agua a Punta Arenas. Los resultados obtenidos se indican en las siguientes Tablas 2 y 3.

Tabla 2: Caudales medios (m³/s) de estiaje calculados con modelo propuesto

Probabilidad de excedencia	LM + TB + LD	Todas las cuencas
90%	0,606	0,919
95%	0,506	0,774
99%	0,362	0,561

De la Tabla 2 se deduce que la totalidad de las cuencas desde donde se extrae agua para abastecer a Punta Arenas, genera, en el periodo de estiaje de años secos, un caudal significativamente mayor que el producido por las cuencas de los ríos Las Minas, Tres Brazos y Leñadura. También indica que el cociente entre el caudal de estiaje generado por todas las cuencas y el caudal equivalente generado por las tres cuencas recién señaladas, aumenta levemente en los años más secos.

Tabla 3: Caudal generado en el estiaje por ríos Las Minas, Tres Brazos y Leñadura

Probabilidad de excedencia	Dependencia plena ⁽¹⁾	Modelo actual	CARMA ⁽²⁾
90%	0,411	0,606	0,698
95%	0,325	0,506	0,612
99%	0,210	0,362	0,478

⁽¹⁾ Suma de caudales con la misma probabilidad de excedencia en todos los ríos y en todos los meses (Harambour y Vargas, 2002).

⁽²⁾ Modelo no periódico propuesto por Harambour y Vargas (2002)

Según se aprecia en la Tabla 3, el caudal medio de estiaje generado por los ríos Las Minas, Tres Brazos y Leñadura, que se obtuvo con el modelo desarrollado en este trabajo, es significativamente superior (47% a 72%) que el obtenido suponiendo que estos tres ríos tienen plena dependencia temporal y espacial, y es inferior (13% a 24%) que el determinado con modelos CARMA que no consideran la variabilidad mensual de la estructura de dependencia espacio - temporal de las series de caudales medios mensuales.

Este resultado se explica, por una parte, considerando que los coeficientes de correlación temporal y espacial son diferentes de 1,0 para todos los ríos y meses del año, y, por otra parte, recordando que en los meses del estiaje estos coeficientes son, en promedio, mayores que en el resto del año, lo que no puede ser reproducido por los modelos CARMA ajustados por Harambour y Vargas (2002), ni por los modelos propuestos por Valenzuela, (2004).

5. CONCLUSIONES

No es necesario disponer de información fluviométrica en todas las cuencas que abastecen un sistema de agua, para ajustar un modelo Periódico Multivariado Contemporáneo que represente las propiedades estadísticas de las series de caudales medios mensuales relevantes.

Para determinar la oferta de agua y optimizar la operación de sistemas de abastecimiento que se surten de varias cuencas pluvionivales, es necesario modelar la estructura de dependencia de las series de caudales medios mensuales haciendo uso de modelos periódicos multivariados, capaces de representar la periodicidad que en este tipo de cuencas presenta su estructura de dependencia espacio - temporal.

REFERENCIAS

Bras, R.L and I.Rodríguez-Iturbe (1993). “Random Functions and Hydrology”. Dover Publications, Inc.

Fernández, B. y Pizarro, G. (1995). “Estimación Regional de Recursos Hídricos en Cuencas Nivopluviales”. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XII Congreso Chileno. Santiago.

Harambour, F. y Vargas, X. (2002). “Evaluación de la Disponibilidad de Agua en Sistemas Hidrológicos Complejos”. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana. Cuba.

Minder, E. (1997). “Modelación Hidrológica en el Sistema Interconectado Central”. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.

Salas, J.D. (1993) “Analysis and Modelling of Hydrologic Time Series“. Ch. 19 Handbook of Hydrology. Ed. D. R. Maidment. McGraw-Hill, Inc.

Santa Cruz, J. y Fernández B. (1993) “Modelos Estocásticos No - Lineales en Hidrología”. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XI Congreso Chileno. Concepción.

Valenzuela, M. (2004). La Incertidumbre en Modelos de Generación de Caudales. Aplicación en Proyectos Complejos y con Escasa Información. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas. Universidad de Chile.





