

Determinación empírica de los parámetros que modelan el tránsito de avenidas, por el método de Muskingum, en zonas de clima mediterráneo de Chile central.

Empiric estimation of parameters for flood routing through Muskingum method, in Mediterranean zones of central Chile.

Roberto Pizarro T.¹; Manuel Hormazábal V.²; Lastenia León G.¹; Carolina Morales C.¹

¹ Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Gestión Forestal y Ambiental. Tel.: (56-071) – 200375 - Fax (56-071) - 200455, e-mail: rpizarro@utalca.cl

² Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP). Tel.: (56-073) – 321592 / 321517 – Fax (56-073) – 323630, e-mail: mhormazabal@indap.cl

Resumen

En esta investigación, se evaluó si el método de Muskingum de tránsito de avenidas, es aplicable a cuencas de la Región del Maule, zona central de Chile, en zonas de clima mediterráneo. Para ello se utilizó la información hidráulica de tres estaciones fluviométricas vecinas ubicadas en el río Perquilauquén, a saber, San Manuel, Ñiquén y Quella, considerando 20 crecidas controladas, 10 de las cuales se utilizaron para la calibración del método y 10 para la validación. Con estos datos se realizó la determinación de los parámetros (K y X) y los coeficientes (C_1 , C_2 y C_3) del método de Muskingum. Para la calibración y la validación, se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste, Coeficiente de Determinación, Error Estándar de Estimación, prueba de concordancia de Bland y Altman y U de Mann Whitney.

En lo que concierne a los coeficientes C_i del método de Muskingum, éstos presentaron disparidad en sus valores, no mostrando uniformidad en sus resultados, de lo que se desprende que cada crecida se comporta totalmente diferente a otra. Cabe destacar que en todas las crecidas donde el factor de ponderación fue igual a 0.5, el coeficiente C_1 presentó valores iguales a 1, por lo que los coeficientes C_2 y C_3 presentaban los mismos valores, siendo uno negativo y el otro positivo. Asimismo, el parámetro K en algunas oportunidades presentó valores negativos, producto que los volúmenes encauzados son incrementados por aportaciones intermedias en el tramo, desvirtuando la características del método Muskingum.

Por otra parte, se verificó que mientras más altas eran las diferencias entre los volúmenes que entraban al tramo y los que salían, las medidas de bondad de ajuste acusaban menores valores de calidad en sus resultados, lo que habla de la importancia que se cumpla que la modelación represente exactamente un tránsito de avenidas y de que no se produzcan aportaciones intermedias.

La situación de mayor diferencia entre los volúmenes de entrada y salida, se advirtió en el tramo entre las estaciones de San Manuel y Ñiquén, al contrario de lo que ocurre en el tramo entre las estaciones de Ñiquén y Quella. Este último se encuentra a menor distancia, razón por la cual es menor la probabilidad de encontrar aportaciones intermedias.

De lo anterior se desprende que el principal factor que influye en la modelación del tránsito de avenidas a través del método de Muskingum, son las aportaciones intermedias, ya que en todas las crecidas que no pudieron ser modeladas, se verificó que el volumen medido en la segunda estación, era mayor que el de la primera.

Finalmente se recomienda una serie de parámetros para la aplicación del método y que su aplicación sólo se haga cuando se posee la certeza que los volúmenes de entrada y salida del tramo son similares y no existen aportaciones intermedias de relevancia.

Palabras clave: Tránsito de avenidas, Aplicación del método Muskingum, estimación de parámetros del método Muskingum

Summary

In this research, Muskingum method for flood routing, was evaluated in order to define if it was possible to fit the necessary parameters in river basins of Maule, central zone of Chile, in zones under Mediterranean climate. For this objective, hydraulic information derived from three hydrometric stations located in Perquillauquén river basin, was used. These hydrometric stations were San Manuel, Ñiquén and Quella.

In order to reach the objectives, 20 maximum floods were considered, and 10 of them were used for calibration and the rest for validation of Muskingum method. With these data, it was carried out the determination of the parameters (K and X) and the coefficients (C_1 , C_2 and C_3) of the method of Muskingum. For the calibration and the validation, several tests of goodness of fit were applied, such as Coefficient of Determination, Standard Error of Estimate, Test of agreement of Bland and Altman and Test U of Mann Whitney; all of them for non parametric data.

With respect to C_i coefficients, they presented disparity in their values, not showing uniformity in their results and it is possible to conclude, that each flood showed a different behavior to another. It is important to highlight that in all the floods when rate factor X was 0,5, C_1 coefficient reached value 1; in addition, C_2 coefficient was equal to C_3 , but one of them with a negative value and the other with a positive value. Also, parameter K in some opportunities showed negative value, because volume of routing flood is increased for volume derived from another flows not considered in an application of Muskingum method.

On the other hand, it was verified that while higher was the difference between entering volume in the routing and exit volume, measures of goodness of fit showed lowest quality results,

so it is very important in Muskingum method application, do not verify another flow contributions, different to entrance floods in routing.

The most different between entrance volumes and flow out, was noticed in the route between San Manuel's station and Ñiquén, contrary to what happens in the route between the stations of Ñiquén and Quella. This last one is a smaller distance, reason for which is smaller the probability of finding intermediate flow contributions.

As it was above mentioned, the main factor that influences modeling of flood routing, through Muskingum method, is the intermediate flood contributions, since in all the floods that could not be modeled, it was verified that the volume measured in the second station, was bigger than that of the first one.

Finally a series of parameters are recommended for the application of the method and is recommended that Muskingum application must be only made when the certainty is possessed that the entrance volumes and flow out of the route, are similar, and also there are not intermediate flood contributions.

Key words: Flood routing, Muskingum method application, Muskingum parameters estimation

1. Introducción,

El tránsito de avenidas corresponde a la simulación de la variación de un hidrograma al recorrer un cauce, (Solís, J. 2003) y su aplicación desempeña una gran función en el dimensionamiento de presas y obras para el control de inundaciones.

Los métodos existentes para el tránsito de avenidas en cauces se pueden dividir en dos tipos: hidráulicos e hidrológicos. Los métodos hidráulicos se basan en la solución de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, para escurrimiento no permanente. Mientras que los métodos hidrológicos utilizan simplificaciones de las ecuaciones de conservación de masa y conservación de cantidad de movimiento, para llegar a soluciones más simples, pero menos aproximadas que las que se logran con los métodos hidráulicos (Linsley *et al*, 1988).

El método de Muskingum fue presentado por primera vez en 1938. Utiliza la ecuación de continuidad simplificada, y una relación algebraica entre el almacenamiento en el tramo y las entradas y salidas.

El objetivo de este estudio es determinar si el método Muskingum de tránsito de avenidas, es aplicable a cuencas de la Región del Maule, en la zona central de Chile y específicamente en la cuenca del río Perquilauquén.

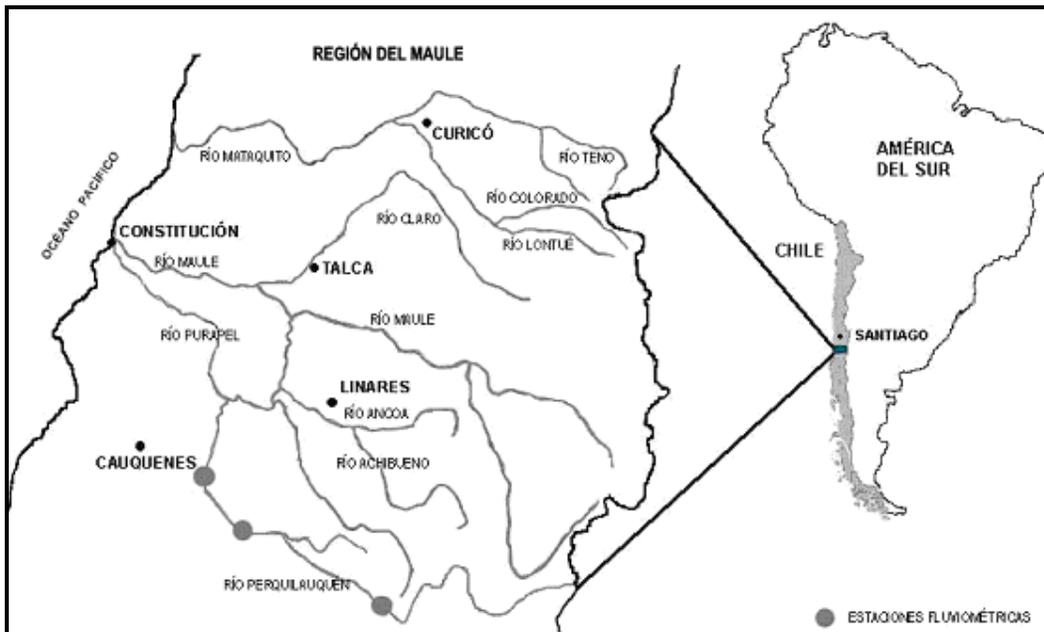
1.1. Antecedentes generales

El área de estudio de la cuenca del río Perquilauquén, se encuentra dominado por condiciones anticiclónicas durante buena parte del año y por condiciones frontales intermitentes

durante el invierno. En consecuencia, en la cuenca de Perquillauquén, existe una variedad de tipos climáticos que van desde un templado cálido con lluvias intermitentes y bastante nubosidad, en la cordillera de la costa y valle central, hasta el tipo frío lluvioso en la Cordillera de los Andes. Durante la estación seca se presentan las máximas temperaturas medias de 19° C, y extremas de 30° C, en los valles y cuencas interiores; mientras que en el periodo húmedo las temperaturas mínimas medias son de 7° C. El río Perquillauquén se extiende por 190 Km. que drenan una hoya de 5.023 km²; las aguas del río Perquillauquén son utilizadas principalmente en el riego de terrenos agrícolas.

Para la realización del estudio, se seleccionaron tres estaciones fluviométricas que están ubicadas en serie en el cauce del río, las cuales son: Estación San Manuel, que se encuentra a 280 m. sobre el nivel de mar y está localizada en los 36° 25' 00'' de Latitud S y los 71° 30' 00'' de Longitud O; Estación Ñiquén, que se ubica a 140 m. sobre el nivel de mar y se localiza en los 36° 14' 00'' de Latitud S y los 72° 00' 00'' de Longitud O; y Estación Quella, ubicada a 120 m. sobre el nivel de mar y está localizada en los 36° 03' 00'' de Latitud S y los 72° 05' 00'' de Longitud O. Las tres estaciones pertenecen a la cuenca del río Maule, subcuenca río Perquillauquén alto. (Cade-Idepe, 2004).

Figura N° 1: Mapa de ubicación de las estaciones fluviométricas

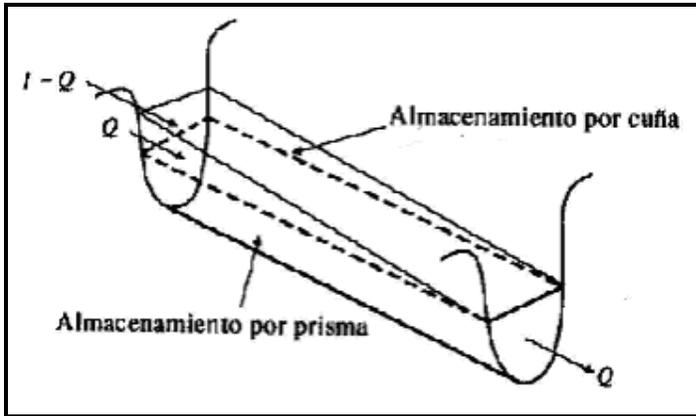


1.2. Revisión bibliográfica

El método Muskingum, fue desarrollado por G. T. Mc Carthy en 1934, y se basa en el principio que una onda de crecida desplazándose en un río, se amortigua a causa de la fricción del fondo y de las márgenes, así como por los almacenamientos naturales en el lecho de inundación (Llamas, 1993). La ecuación de Muskingum está planteada pensando en que el almacenamiento en un tramo de río se puede dividir en dos partes. El primero es un

almacenamiento en prisma, que depende solamente de las salidas y sería el único si el nivel de superficie libre del agua fuera paralelo al fondo del río. Este almacenamiento se puede comparar con el que se tiene en el caso de un vaso. El otro tipo de almacenamiento, que en general no existe en el caso de vasos, llamado almacenamiento en cuña, se debe al efecto de la pendiente de la superficie libre del agua en el gasto. Esta pendiente depende tanto de las entradas como de las salidas, y en el método de Muskingum el almacenamiento en cuña se toma como una función lineal de la diferencia de ambas

Figura N° 2: Almacenamiento durante el paso de una avenida. (Fuente: Aparicio, 2003)



Durante el periodo de crecida, el caudal de entrada en una sección aguas arriba es superior al de salida en una sección aguas abajo. El almacenamiento toma la forma de un prisma con la base aguas arriba. En el bajante de la crecida, la situación es inversa y el prisma de almacenamiento tiene su base en la sección aguas abajo (Llamas, 1993). Así y suponiendo que el área de la sección transversal del flujo de creciente es directamente proporcional al caudal en la sección, el volumen de almacenamiento por prisma es igual a KQ donde K es un factor de proporcionalidad, y el volumen de almacenamiento por cuña es igual a $KX(1-Q)$, donde X es un factor de ponderación dentro del rango $0 < X < 0.5$. El almacenamiento total es por consiguiente la suma de dos componentes,

$$S = K[Q + (1 - Q)X]$$

La cual puede reordenarse para dar la función de almacenamiento para el método de Muskingum,

$$S = K[Q + X - QX]$$

Y representa un modelo lineal para el tránsito de caudales en corrientes $K[Q(1-X)+X]$.

El valor de X depende de la forma de almacenamiento por cuña modelado. El valor de X varía desde 0.0 para un almacenamiento tipo embalse, hasta 0.5 para una cuña completamente desarrollada. Cuando $X = 0.0$, no existe cuña y por consiguiente no existe curva de remanso. En

este caso la ecuación anterior resulta en un modelo de embalse lineal $S = KQ$. En corrientes naturales, X se encuentra entre 0.0 y 0.3 con un valor medio cercano a 0.2; asimismo, no se necesita una gran precisión en la determinación de X debido a que los resultados del método son relativamente insensibles al valor de este parámetro. El parámetro K es el tiempo de tránsito de una onda de creciente a través del tramo de canal. Para el tránsito hidrológico, los valores de K y X se suponen especificados y constantes para todo el rango de flujo (Chow *et al*, 1994).

Los valores de almacenamiento en el tiempo j y $j+1$ pueden escribirse, respectivamente como,

$$S_j = K[X I_j + (1-X)Q_j] \quad \text{y} \quad S_{j+1} = K[X I_{j+1} + (1-X)Q_{j+1}]$$

Utilizando las ecuaciones anteriores, el cambio del almacenamiento durante el intervalo de tiempo Δt es

$$S_{j+1} - S_j = K\{[X I_{j+1} + (1-X)Q_{j+1}] - [X I_j + (1-X)Q_j]\}$$

El cambio en el almacenamiento, también puede expresarse, como:

$$S_{j+1} - S_j = \frac{(I_j + I_{j+1})}{2} \Delta t - \frac{(Q_j + Q_{j+1})}{2} \Delta t$$

Combinando las ecuaciones anteriores y simplificando, se obtiene la siguiente ecuación

$$Q_{j+1} = C_1 I_j + C_2 I_{j+1} + C_3 Q_j$$

que es la ecuación de tránsito para el método de Muskingum, donde

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{\alpha}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{\alpha}$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{\alpha}$$

Donde, $\alpha = 2K(1-X) + \Delta t$

Si se encuentran disponibles hidrogramas de entrada y salida observados para un tramo de río, pueden determinarse los valores de K y X . Suponiendo varios valores de X y utilizando valores conocidos de caudal de entrada y caudal de salida, pueden calcularse valores sucesivos del numerador y denominador para la siguiente expresión de K ,

$$K = \frac{0.5\Delta t [(I_{j+1} + I_j) - (Q_{j+1} + Q_j)]}{X(I_{j+1} - I_j) + (1-X)(Q_{j+1} - Q_j)}$$

Los valores calculados de denominador y de numerador se grafican para cada intervalo de tiempo, con el numerador en la escala vertical y el denominador en la escala horizontal. Esto usualmente produce una gráfica en forma de rizo. El valor de X que produzca el rizo más parecido a una línea única se toma como el valor correcto para ese tramo, y K, de acuerdo con la ecuación anterior, es igual a la pendiente de esa línea. Como K es el tiempo requerido para que la onda de creciente incremental atraviese el tramo, su valor también puede estimarse como el tiempo de tránsito observado del pico de flujo a través del tramo (Chow *et al*, 1994; Gill, 1978)

2. Metodología,

La primera etapa metodológica, fue la captura de los limnigramas y curvas de descarga con los que se construyeron los hidrogramas de 20 crecidas controladas del río Perquilauquén, en las tres estaciones estudiadas (San Manuel, Ñiquén y Quella). Asimismo, las 20 crecidas se seleccionaron aleatoriamente del periodo 1997 y 2001;

Una segunda etapa consistió en calcular para 10 primeras tormentas, (calibración), las parejas de valores (V, [xI+(1-x)O]), para todos los tiempos establecidos, por medio de gráficas que relacionaron el volumen total almacenado y el resultado de la expresión [xI+(1-x)O]; con ello se determinó el parámetro X, lo que se hizo a partir de la gráfica que más se ajustó a una línea recta. A través de la pendiente de dicha recta, se obtuvo el parámetro K.

En una tercera etapa y con los parámetros K y X, factor de proporcionalidad y factor de ponderación respectivamente, se determinaron los coeficientes C₁, C₂ y C₃ de la ecuación de Muskingum.

Con los parámetros y coeficientes obtenidos de las primeras 10 crecidas utilizadas para la calibración del método, obtenidas de las estaciones fluviométricas de San Manuel, Ñiquén y Quella, se validó el modelo descrito anteriormente a través de la ecuación final del método de Muskingum, con 10 nuevas crecidas controladas, utilizadas exclusivamente para la validación.

Los procesos de calibración y validación, se analizaron estadísticamente para determinar si los datos obtenidos, eran paramétricos, o no paramétricos; como resultaron ser no paramétricos, se utilizaron los siguientes métodos de bondad de ajuste específicos:

a. Coeficiente de Determinación (R²)

Una vez determinada la nube de observaciones es importante disponer de una medida que evalúe la bondad del ajuste realizada y que permita decidir si el ajuste lineal es suficiente o se deben buscar modelos alternativos. Como medida de bondad del ajuste, se utiliza el coeficiente de determinación, definido como sigue

$$R^2 = \frac{scE}{scG} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Como $scE \leq scG$, se verifica que $0 \leq R^2 \leq 1$, siempre y cuando se utilice estadística paramétrica. Con casos no paramétricos, R^2 puede ser negativo.

El coeficiente de determinación mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente (Y) respecto a su media, que es explicada por el modelo (Gujarati, D. 1992).

b. Error Estándar de Estimación (EEE)

El error estándar de la estimación mide la dispersión de los valores observados alrededor de la recta de regresión. Su expresión es la siguiente:

$$S_{y.x} = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{n-2}}$$

Donde, n = N° de observaciones

c. Prueba U de Mann Whitney

La hipótesis nula del contraste es que las dos muestras, de tamaño n_1 y n_2 , respectivamente, proceden de poblaciones continuas idénticas; $H_0: f_1(x) = f_2(x)$. La hipótesis alternativa puede ser unilateral o bilateral y únicamente supone que la tendencia central de una población difiere de la otra, pero no una diferencia de forma o de dispersión. Por esta razón esta prueba es el equivalente no paramétrico de la prueba t para la diferencia de dos medias, cuando las muestras son independientes, pero no puede suponerse la normalidad de las poblaciones de origen (Canavos, G. 1993).

d. Prueba de concordancia de Bland & Altman

Esta prueba, es un método gráfico y analítico que permite discriminar cuánto difiere un método de otro ya establecido, es decir, permite discriminar cuál de los métodos en estudio se aproxima de mejor forma al valor real de la variable. Se basa en las diferencias promedio existentes entre el valor real y el estimado, y la comparación de las gráficas residuales. Además, permite apreciar la homogeneidad del error en la misma unidad de medida que los datos (Bland y Altman, 1999).

En términos estadísticos, el nivel de concordancia lo asignan las diferencias promedio (dp) entre el valor real y el estimado y la desviación estándar (SD) de dichas diferencias. Además,

establece un límite de concordancia (LC) con un 95% de nivel de significación, definido por la expresión:

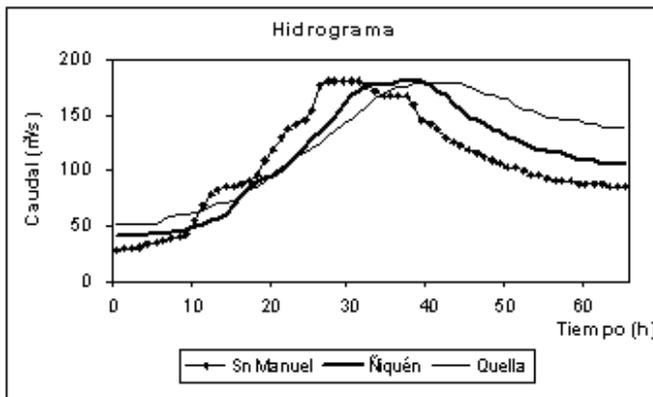
$$LC = dp \pm 1.96 * SD$$

De esta forma, el mejor ajuste será la relación valor real v/s valor estimado, con un valor dp lo más cercano a cero. En caso de existir diferencias mínimas del valor dp, se determina como mejor ajuste aquel que presente un menor valor SD y sus LC sean más estrechos (Bland y Altman, 1999). Adicionalmente, esta prueba utiliza el coeficiente de correlación lineal.

3. Resultados y discusión,

Las crecidas seleccionadas seleccionadas en las tres estaciones, se comportaron en términos generales como lo muestra la figura N° 3 , para la crecida 7.

Figura N° 3: Hidrograma de entrada, Crecida 7



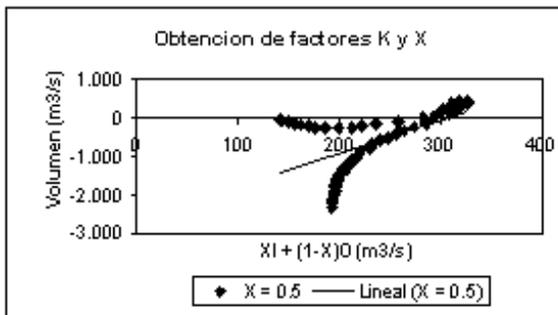
Para encontrar el factor de ponderación (X), se tomaron valores discretos cada 0,05 puntos, es decir 0.0, 0.05, 0.1, 0.15, ..., 0.5, y se graficó el resultado de la expresión, $XI + (1 - X) O$, versus el volumen acumulado. De este gráfico, se determinó que la nube de puntos que más se aproximase a una línea recta, definía el valor de X a utilizar. Así, se alcanzaron los siguientes valores para los tramos comprendidos entre las estaciones de San Manuel – Ñiquén y Ñiquén – Quella.

Tabla N° 1: Determinación del Parámetro X

	San Manuel - Niquén	Niquén - Quella
Crecida 1	0	0
Crecida 2	0	0,5
Crecida 3	0	0,5
Crecida 4	0,5	0,4
Crecida 5	0,5	0
Crecida 6	0	0,5
Crecida 7	0,5	0
Crecida 8	0	0
Crecida 9	0,5	0,5
Crecida 10	0,5	0,5

Siguiendo con la metodología, una vez determinado el factor de ponderación se calculó el factor de proporcionalidad, K. Para tales efectos se tomó la gráfica que más se aproximó a una línea recta y se determinó la pendiente de dicha recta. Del cálculo se desprende que, en el caso de la crecida N° 2, el factor de proporcionalidad es igual a 2.51 (K = 2.51), tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura N° 4: Determinación del factor de proporcionalidad, para la crecida N° 2



$$K = \frac{V_2 - V_1}{X_2 - X_1}$$

$$K = \frac{430.66 - -34}{327 - 141.6}$$

$$K = 2.51$$

Los factores de proporcionalidad, según cada crecida, para los tramos comprendidos entre las estaciones de San Manuel – Ñiquén y Ñiquén – Quella son los siguientes:

Tabla N° 2: Determinación del Parámetro K

	San Manuel - Niquén	Niquén - Quella
Crecida 1	-1,66	-14.29
Crecida 2	4,37	2.51
Crecida 3	-7,20	4.90
Crecida 4	3,63	-2.19
Crecida 5	1,30	2.17
Crecida 6	9,64	-2.05
Crecida 7	7,74	15.40
Crecida 8	-2,30	-14.51
Crecida 9	3,18	8.17
Crecida 10	0,52	4.05

Para construir la ecuación de Muskingum, se determinó el factor alfa (α), a través de la ecuación $2K(1-X)+\Delta t$. A modo de ejemplo se muestra el cálculo de dicho factor para la crecida N° 2.

$$\alpha = 2K(1 - X) + \Delta t$$

$$\alpha = 2 * 2.51(1 - 0.5) + 1$$

$$\alpha = 3.51$$

A partir de esto se alcanzaron los siguientes valores para cada crecida.

Tabla N° 3: Determinación del factor Alfa

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
San Manuel - Niquén	-1,16	4,87	-6,70	2,32	1,15	10,14	4,37	-1,80	2,09	0,76
Niquén - Quella	-13,79	3,51	2,95	-0,81	2,67	-0,53	15,90	-14,01	4,59	2,53

En relación a la determinación de los coeficientes C1, C2 y C3, se obtuvieron los siguientes valores para cada tramo en estudio

Tabla N° 4: Coeficientes C₁, C₂ y C₃ alcanzados.

Crecidas consideradas	Coeficiente C ₁		Coeficiente C ₂		Coeficiente C ₃	
	San Manuel - Ñiquén	Ñiquén - Quella	San Manuel - Ñiquén	Ñiquén - Quella	San Manuel - Ñiquén	Ñiquén - Quella
Crecida 1	-0,43	-0,04	-0,43	-0,04	1,86	1,07
Crecida 2	0,10	-0,43	0,10	1	0,79	0,43
Crecida 3	-0,08	1	-0,08	-0,66	1,15	0,66
Crecida 4	1	0,46	-0,57	-1,69	0,57	2,23
Crecida 5	1	0,19	-0,13	0,19	0,13	0,63
Crecida 6	0,05	1	0,05	-2,91	0,90	2,91
Crecida 7	1	0,03	-0,77	0,03	0,77	0,94
Crecida 8	-0,28	-0,04	-0,28	0,04	1,56	1,07
Crecida 9	1	1	-0,52	-0,78	0,52	0,78
Crecida 10	1	1	0,32	-0,60	-0,32	0,60

En esta fase de calibración, se aplicaron las medidas de bondad de ajuste, cuyos resultados son los siguientes para el coeficiente de determinación y el error estándar de estimación. Asimismo, se analizó la diferencia en volumen que presentaban las crecidas entre las entradas y las salidas; ello porque la diferencia de volumen, es de vital importancia para el tránsito de avenidas, ya que dicho tránsito asume que no existen aportaciones intermedias, ni hay diferencias de volumen entre las entradas y salidas en una crecida, por lo tanto de existir diferencias de volúmenes, esto quiere decir que existen aportaciones intermedias de consideración. Para la determinación de la diferencia de volumen porcentual se utilizó la siguiente expresión: $[(V_E - V_S) / V_E] * 100$ donde; V_E: Volumen de entrada y V_S: Volumen de salida

Tabla N° 5: Resultados de la aplicación del análisis, para el tramo comprendido entre las estaciones de San Manuel – Ñiquén.

	R²	EEE (m³/s)	Diferencia de Volumen (%)
Crecida 1	0,02	9,05	15.98
Crecida 2	0,01	9,07	25.86
Crecida 3	0	9,10	29.48
Crecida 4	0,24	7,94	-7.71
Crecida 5	0,06	8,85	11.43
Crecida 6	0,20	8,17	11.07
Crecida 7	0,53	6,23	8.50
Crecida 8	0,04	8,95	12.23
Crecida 9	0,25	7,90	-0.28
Crecida 10	0,68	5,17	5.7

Tabla N° 6: Resultados de la aplicación del análisis, en el tramo comprendido entre las estaciones de Ñiquén - Quella.

	R²	EEE (m³/s)	Diferencia de volumen (%)
Crecida 1	0,49	10,97	-6.9
Crecida 2	0,62	9,46	11.47
Crecida 3	0,50	10,87	17
Crecida 4	0,03	15,17	41.90
Crecida 5	0,13	14,36	27.05
Crecida 6	0,36	12,33	21.84
Crecida 7	0,65	9,12	8.70
Crecida 8	0,90	4,96	7
Crecida 9	0,04	15,10	-22.8
Crecida 10	0,27	13,12	23.99

Del análisis anteriormente expuesto, se determinó que las crecidas que presentaban mejores resultados, eran las crecidas 4, 6, 7, 9 y 10, para el tramo comprendido entre las estaciones de San Manuel y Ñiquén. En tanto, los mejores resultados para el tramo entre las estaciones de Ñiquén y Quella, los presentaron las crecidas 1, 2, 3, 7 y 8. A continuación, se presentan los coeficientes y parámetros, con los cuales se validó el método de Muskingum en el río Perquilauquén.

Tabla N° 7: Coeficientes y parámetros por crecidas seleccionadas para el tramo San Manuel y Ñiquén.

San Manuel - Ñiquén							
	X	K	Alfa	C ₁	C ₂	C ₃	Δt
Crecida 4	0,5	3,63	2,32	1	-0,57	0,57	1
Crecida 6	0	9,64	10,14	0,05	0,05	0,90	1
Crecida 7	0,5	7,74	4,37	1	-0,77	0,77	1
Crecida 9	0,5	3,18	2,09	1	-0,52	0,52	1
Crecida 10	0,5	0,52	0,76	1	0,32	-0,37	1

Tabla N° 8: Coeficientes y parámetros por crecidas seleccionadas para el tramo Ñiquén y Quella.

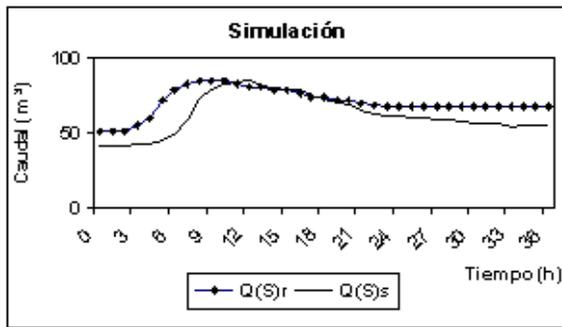
Ñiquén - Quella							
	X	K	Alfa	C ₁	C ₂	C ₃	Δt
Crecida 1	0	14,29	-13,79	-0,04	-0,04	1,07	1
Crecida 2	0,5	8,68	4,84	1	-0,79	0,79	1
Crecida 3	0,5	4,90	2,95	1	-0,66	0,66	1
Crecida 7	0	15,40	15,90	0,03	0,03	0,94	1
Crecida 8	0	14,51	-14,01	-0,04	0,04	1,07	1

Para la validación del método, se utilizaron 10 crecidas adicionales, las que se simularon con los coeficientes alcanzados en la fase de la calibración. Así, el conjunto de simulaciones alcanzó un total de 50 validaciones en cada tramo analizado. A continuación se presentan algunos ejemplos representativos de las situaciones encontradas. Así, en el tramo San Manuel – Ñiquén, se simuló con la crecida N° 4 de calibración,(c) que modela la crecida N° 1, de validación (v). En la tabla N° 9, se muestran los coeficientes del método de Muskingun, para la crecida N° 4(c), resultantes de la calibración y por medio de los cuales se simuló la crecida N° 1(v).

Tabla N° 9: Coeficientes del método de Muskingun.

Parámetros				
X	K	C ₁	C ₂	C ₃
0.5	3.63	1	-0.568	0.568

Figura N° 5: Hidrograma modelado a través de la crecida N° 4(c) en el tramo San Manuel – Ñiquén.



Donde:

Q(S)r: Caudal de salida real

Q(S)s: Caudal de salida simulado

En la tabla N° 10, se muestran los resultados obtenidos de la aplicación del coeficiente de determinación (R^2), el error estándar de estimación (EEE), la prueba U de Mann Whitney y la prueba de concordancia de Bland y Altman para la validación de la crecida N° 1(v).

Tabla N° 10: Resultados del análisis estadístico aplicado a la crecida N° 1(v)

Bondad de Ajuste						
R^2	EEE (m^3/s)	U Mann Whitney	Bland y Altman			
0,03	10.88	Se rechaza H_0	DP = -5E-08	SD = 1.7E-08	LC- = -4E-09	LC+ = 2.8E-8

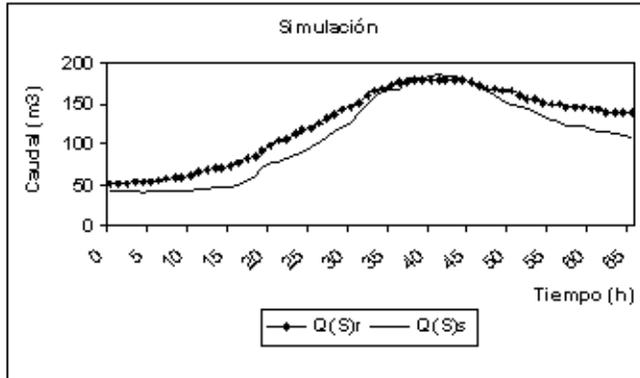
Según el análisis estadístico, esta crecida presenta una mala validación, ya que el coeficiente de determinación indica que el modelo sólo está siendo explicado en 3%, lo que es demasiado bajo. Además la prueba U de Mann Whitney rechaza el modelo, y la diferencia promedio arrojada por Bland y Altman es bastante alta.

Otro ejemplo es la simulación con la crecida N° 7 de calibración, (c), que modela la crecida N° 5 de la validación (v). Así, en la tabla N° 11, se muestran los coeficientes del método de Muskingum, para la crecida N° 7(c), resultantes de la calibración y por medio de los cuales se simuló la crecida N° 1(v).

Tabla N° 11: Coeficientes del método de Muskingum

Parámetros				
X	K	C_1	C_2	C_3
0	15,4	0,031	0,031	0,937

Figura N° 6: Hidrograma modelado a través de la crecida 7(c), en el tramo Ñiquén – Quella



Donde:
 Q(S)r: Caudal de salida real.
 Q(S)s: Caudal de salida simulado

En la tabla N° 12, se muestran los resultados obtenidos de la aplicación del coeficiente de determinación (R^2), el error estándar de estimación (EEE), la prueba U de Mann Whitney y la prueba de concordancia de Bland y Altman para la validación en la crecida N° 1(v).

Tabla N° 12: Resultados del análisis estadístico aplicado a la crecida N° 1(v).

Bondad de Ajuste						
R^2	EEE (m³/s)	U Mann Whitney	Bland y Altman			
0,95	10,43	Se acepta Ho	DP = -13,19	SD = 10,89	LC- = -34,53	LC+ = 8.15

Según el análisis estadístico, esta crecida presenta una buena validación, ya que el coeficiente de determinación indica que el modelo esta siendo explicado en 95%, lo que es aceptable. Asimismo la prueba U de Mann Whitney acepta el modelo y además la diferencia promedio arrojada por Bland y Altman es de 13,19 m³/s, la cual es baja.

4. Conclusiones o consideraciones finales,

En lo que concierne a los coeficientes C_i del método de Muskingum, éstos presentaron disparidad en sus valores, no mostrando uniformidad en sus resultados, de lo que se desprende que cada crecida se comporta totalmente diferente a otra. Cabe destacar que en todas las crecidas donde el factor de ponderación fue igual a 0.5, el coeficiente C_1 presentó valores iguales a 1, por lo que los coeficientes C_2 y C_3 presentaban los mismos valores, siendo uno negativo y el otro positivo.

Por otra parte, se verificó que mientras más altas eran las diferencias entre los volúmenes que entraban al tramo y los que salían, las medidas de bondad de ajuste acusaban menores valores de calidad en sus resultados, lo que habla de la importancia que se cumpla que la modelación represente exactamente un tránsito de avenidas y de que no se produzcan aportaciones intermedias.

La situación de mayor diferencia entre los volúmenes de entrada y salida, se advirtió en el tramo entre las estaciones de San Manuel y Ñiquén, al contrario de lo que ocurre en el tramo entre las estaciones de Ñiquén y Quella. Este último se encuentran a menor distancia, razón por la cual es menor la probabilidad de encontrar aportaciones intermedias.

De lo anterior se desprende que el principal factor que influye en la modelación del tránsito de avenidas a través del método de Muskingum, son las aportaciones intermedias, ya que en todas las crecidas que no pudieron ser modeladas, se verificó que el volumen medido en la segunda estación, era mayor que el de la primera.

Finalmente, se recomienda usar los siguientes factores, para la simulación de tránsito de avenidas por el método de Muskingum, ya que éstos son los que mejor modelaron el tránsito de avenidas en el río Perquilauquén, en los tramos comprendidos entre las estaciones de San Manuel – Ñiquén y Ñiquén – Quella, existiendo una combinación de parámetros de buena calidad para San Manuel Ñiquén y dos de muy buena calidad, para Ñiquén Quella, en virtud de los resultados del análisis estadístico de bondad de ajuste.

San Manuel - Ñiquén					Ñiquén - Quella				
K	X	C ₁	C ₂	C ₃	K	X	C ₁	C ₂	C ₃
7,7	0,5	1	-0,771	0,771	15,4	0	0,031	0,031	0,937
					Ñiquén - Quella				
K	X	C ₁	C ₂	C ₃					
2.5	0.5	-0.43	1	0.43					

5. Agradecimientos: Los autores desean agradecer a la Dirección General de Aguas de Chile, por el aporte de información básica para el desarrollo de este estudio.

6. Referencias bibliográficas

Bland, J., D. Altman. 1999. Statistical methods in medical reserarch. Measuring agreement in methods comparative studies. Volumen 8 number 2 U.S.A. 135 – 160 p.

Cade – Idepe. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cuerpos de agua, según objetivos de calidad. Cuenca del río Maule. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. Santiago, Chile. 152 p.

Canavos, G., 1993. Probabilidad y Estadísticas, aplicaciones y métodos. Mc Graw – Hill. España. 646 p.

Chow, V., D.R. Maidment & L.W Mays. 1994. Hidrología aplicada. Mc Graw – Hill. México. 584 p.

Gill M.A. 1978. Flood routing by the Muskingum method. *Journal of Hydrology*, 36, (3-4): 353- 363 p.

Gujarati, D. 1992. *Econometría*. Editorial Mc Graw – Hill latinoamericana. México. 597 p.

Linsley, R., M. Kohler & J. Paulhus. 1993. *Hidrología General principios y aplicaciones*. Editorial de la Universidad del país Vasco. España. 635 p.

Llamas, J. 1993. *Hidrología General*. Editorial del País Vasco. España. 635p.

Solís, J. 2003. *Paquete interactivo para análisis hidrológico*. Tesis Ing. Civil. Universidad de las Américas, Escuela de Ingeniería. Puebla, México. 133p.