

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO DEL EVENTO DE ABRIL DE 2016 EN EL RÍO
MAPOCHO**

XIMENA VARGAS M.¹
JAMES McPHEE T.²
TOMÁS GÓMEZ Z.³
FELIPE SAAVEDRA M.⁴

RESUMEN

Desde el día jueves 14 de Abril de 2016 los medios informativos anunciaban que el fin de semana ocurrirían precipitaciones del orden de 40 a 60 mm en la cuenca del río Mapocho. Al mismo tiempo se anunciaba que la isoterma cero se encontraría a una cota cercana a 3300 m.s.n.m. En esa semana, aún no se había finalizado la construcción del túnel denominado CS-CN, que uniría la Costanera Sur con la autopista Costanera Norte, por lo que el río Mapocho estaba intervenido en un tramo del orden de 800 m, permitiendo que un caudal del orden de hasta 80 m³/s fuera desviado hacia una canalización en la ribera sur del lecho del río. En este artículo se analizan los hidrogramas, que se estima, ocurrieron durante este evento y se discute sobre el origen de las inundaciones acaecidas, las que afectaron extensas zonas de la ciudad de Santiago.

¹Profesor Adjunto, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. xvargas@uchile.cl

²Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. jmcphoe@u.uchile.cl

³Ingeniero Civil, Centro Avanzado para la Minería, Universidad de Chile. tgomez@ing.uchile.cl

⁴Ingeniero Civil, Centro Avanzado para la Minería, Universidad de Chile. felipesaam@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En la madrugada del día domingo 17 de Abril de 2016, sectores de las comunas de Las Condes, Vitacura y de Providencia, ubicados aledaños al río Mapocho y aguas abajo del túnel entre la Costanera Sur y la autopista Costanera Norte (CS-CN), fueron inundados debido a la ocurrencia de un evento de precipitación que afectó a la Región Metropolitana. Las vías con tránsito en dirección poniente de la autopista Costanera Norte también se vieron afectada por este evento.

Las causas de esta inundación se atribuyeron a un desborde del río Mapocho, producto de las intensas precipitaciones ocurridas (entre 30 y 60 mm) durante ese fin de semana, en conjunto con una alta posición de la isoterma cero (entre 3100 y 3400 m.s.n.m.). Sin embargo, el análisis de la información registrada entre los días 14 a 19 de abril en las estaciones fluviométricas existentes aguas arriba de los sectores amagados, permitió determinar que los caudales ocurridos fueron significativamente inferiores a la capacidad del cauce, estimada del orden de los 800 m³/s para el tramo Lo Saldes- Bellavista asociado a un período de retorno T=20 años (Ingendesa, 2002). Estos antecedentes permiten señalar que la causa de las inundaciones puede ser atribuible a obras existentes en el cauce, que modificaron las condiciones naturales de escurrimiento de las aguas. Dichas obras corresponden específicamente a las efectuadas con fines de construcción del túnel CS-CN en el cauce del río Mapocho y que se identifican en el panel izquierdo de la figura 1. Como se aprecia en esta figura, la salida del túnel CS-CN se encontraba abierta hacia el cauce por lo que la falla de las obras de desviación del río habría ocasionado la entrada de las aguas a dicho túnel. Al tenerse una cota inferior en la boca de entrada de la Costanera Sur, las aguas escurrieron hacia esta zona, ocasionando el paso de parte del caudal del río a la superficie de la calle, que luego escurriría hacia aguas abajo. Al inundarse la Costanera Sur el agua ingresó al túnel Lo Saldes (que no estaba aún terminado), llegando por medio de este túnel a la Costanera Norte e inundando la autopista en dirección al poniente.

En este artículo se presenta el análisis hidrológico del evento y se discute sobre la posible falla de diseño de las obras de desviación.

2. ZONA DE ESTUDIO

Las obras existentes en la zona de estudio consistían en el desvío y canalización del río Mapocho hacia su ribera sur con el objetivo de la construcción de los túneles Costanera Sur-Costanera Norte (CS-CN), Costanera Norte-Costanera Sur (CN-CS) y Lo Saldes, todos en la fase 2 de construcción en el momento del evento (Figura 1).

De acuerdo a los antecedentes disponibles, la canalización fue diseñada para una crecida de diseño de periodo de retorno de 10 años ($Q=61\text{ m}^3/\text{s}$) y verificada para un periodo de retorno de 20 años ($Q=79\text{ m}^3/\text{s}$). En la canalización se incorporó un pretil fusible conformado por material fluvial local. Este pretil fue diseñado para evacuar el agua desde la canalización al lecho del río Mapocho ante eventos de crecida de magnitud superiores a la de diseño. Aguas abajo del pretil fusible estaba en construcción el túnel CS-CN el cuál, durante el evento, se encontraba abierto (Figura 1 panel i).

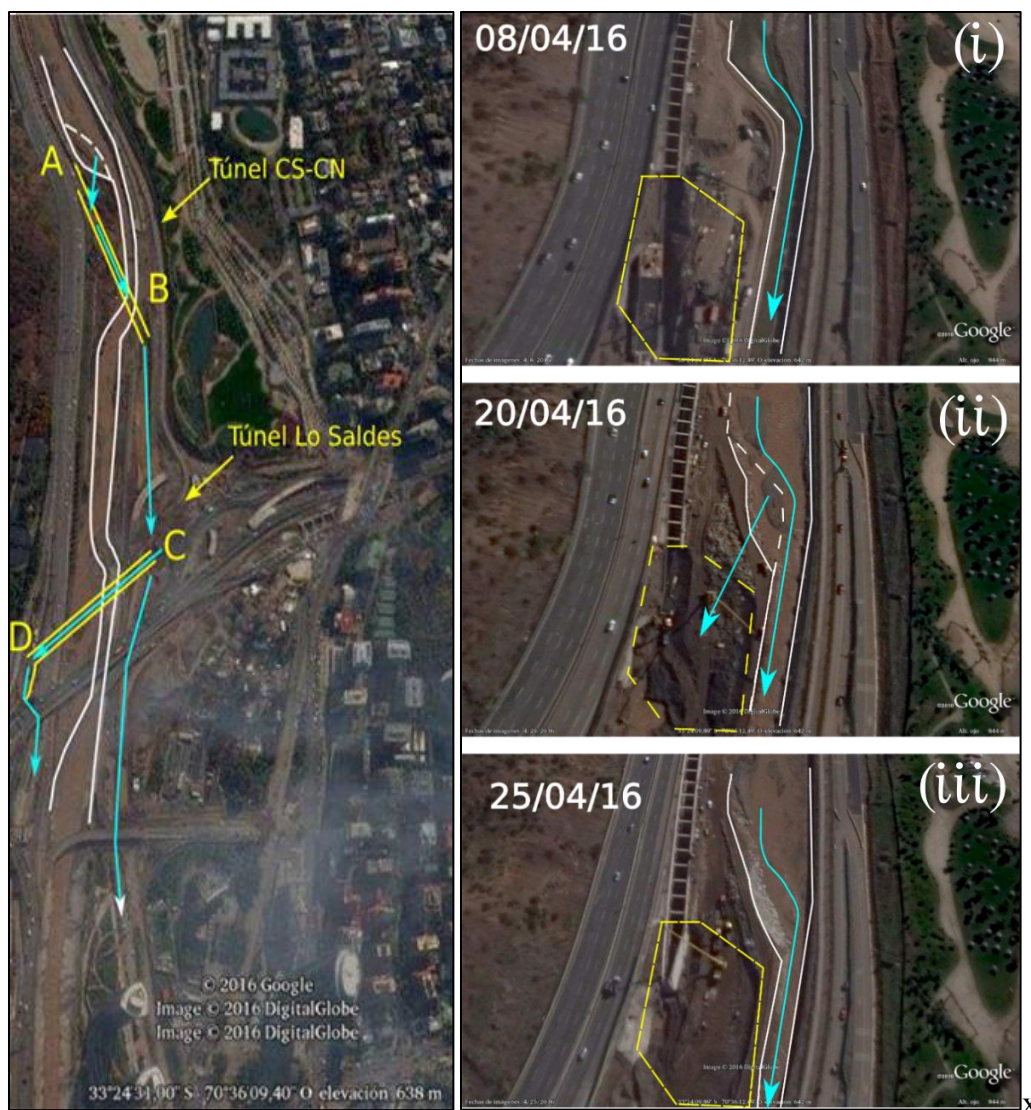


Figura 1. Descripción de las obras. En el panel izquierdo se muestra una vista general de los túneles CS-CN, CN-CS y Lo Saldes. En el panel derecho: (i) salida túnel CS-CN días antes del evento, (ii) y (iii) salida túnel CS-CN días posteriores al evento.

La zona de estudio comprende la cuenca aportante a la ubicación de las obras civiles a 640 m.s.n.m. en el lecho del río Mapocho (Figura 2). La cuenca definida por este punto posee un área de 1060 km² y presenta un régimen principalmente nival. Sin embargo, los caudales máximos instantáneos históricos se han registrado en periodo pluvial, asociado a las temporadas de otoño e invierno, las que comprenden el periodo entre los meses de abril y septiembre en esta zona geográfica.

Se utilizan los datos registrados en dos estaciones fluviométricas, Estero Arrayán en La Montosa y Río Mapocho en Los Almendros (Figura 2), y una estación meteorológica, Cerro Calán, ubicada a la cota 848 m.s.n.m. Las estaciones fluviométricas, que registran caudales cada 15 min, definen a las subcuencas de régimen nival. Se rescata de la estación meteorológica Cerro Calán datos de precipitación horaria para el análisis. La precipitación media anual registrada es de 417 mm para el periodo 1979-2015.

En la Figura 3 se presenta la curva hipsométrica de la cuenca aportante a la zona de estudio. De esta figura se rescata que del total del área de la cuenca, un 36% de la superficie se encuentra bajo la cota 2000 m.s.n.m., mientras que si se considera la cota 3000 m.s.n.m., se obtiene un área de 742 km², equivalente a un 70% de la superficie total de la cuenca.

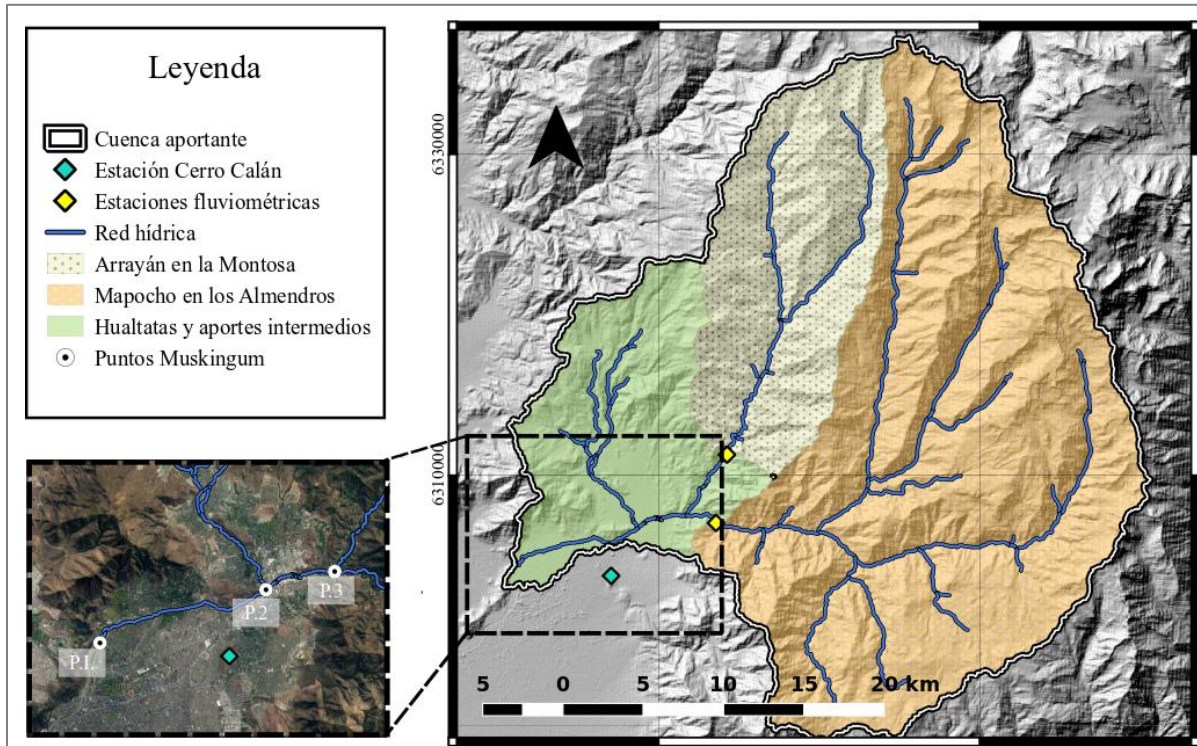


Figura 2. Descripción de la zona de estudio.

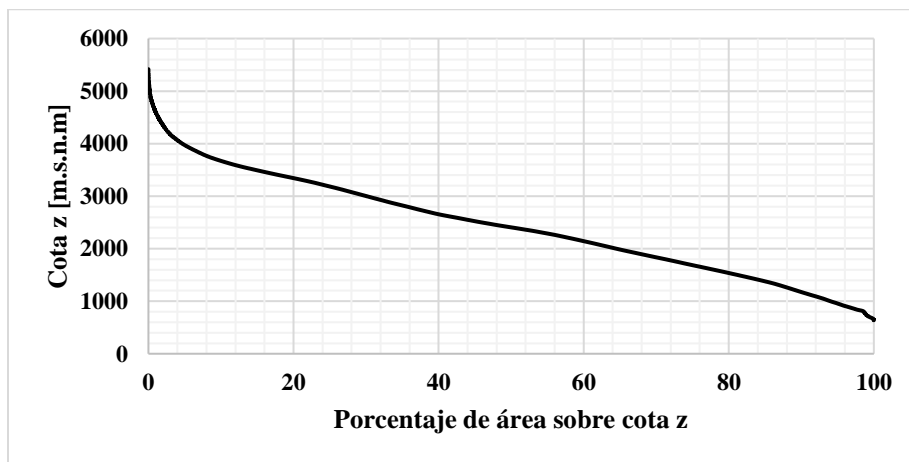


Figura 3. Curva hipsométrica de cuenca aportante a zona de estudio.

3. METODOLOGÍA

Se aborda el análisis hidrológico del evento meteorológico en tres etapas: en primer lugar, a base de registros observados en estaciones fluviométricas aguas arriba del punto de interés se estima el hidrograma de crecida a partir de un rastreo hidrológico ; como segundo punto, se desarrolla un análisis de frecuencia a base de la serie anual de caudales máximos instantáneos de las mismas estaciones usadas en el punto anterior; finalmente, se plantea un análisis de frecuencia de la serie anual de precipitaciones máximas diarias de una estación meteorológica considerada representativa de las cuencas de estudio y se lleva a cabo la estimación de hidrogramas, que podrían haberse previsto en el lugar de interés a base de los pronósticos meteorológicos, usando el método del hidrograma unitario sintético.

3.1. Estimación del hidrograma ocurrido en el punto de interés usando información registrada en estaciones fluviométricas

Este análisis tiene por objetivo estimar el caudal máximo instantáneo ocurrido en la zona en estudio y determinar el hidrograma de la crecida. Se identifican cuatro aportes principales a dicho punto, los cuales corresponden a:

- i. La cuenca hidrográfica aportante definida por la estación Estero Arrayán en La Montosa
- ii. La cuenca hidrográfica aportante definida por la estación Río Mapocho en Los Almendros
- iii. La cuenca hidrográfica del estero Las Hualtatas
- iv. La cuenca intermedia definida por la diferencia de la cuenca hidrográfica del punto de interés con las tres cuencas anteriores.

Para estimar el hidrograma de crecidas ocurrido en la zona de estudio, se realizó un rastreo de crecidas utilizando el método de Muskingum, de modo de compatibilizar temporalmente los distintos aportes. Los valores de los parámetros k y x requeridos para este método fueron estimados utilizando relaciones aproximadas (Fatorelli y Fernández, 2011) que dependen de la forma del cauce y del cociente entre la velocidad del flujo (v) y la velocidad de la onda (v_w). Además, para abordar la incertidumbre que pueden tomar estos coeficientes, se realizó un análisis de sensibilidad con un rango de valores de k y x suponiendo condiciones de flujo lento y rápido. La relación entre las distintas cuencas aportantes y como están relacionadas a través de dos secciones de rastreo se presenta en la Figura 4. Adicionalmente, en la Tabla 1 se resume el procedimiento para obtener la serie de caudales en cada uno de los puntos interés.

Para determinar los caudales de cada una de las cuencas aportantes, se recopilaron los antecedentes de los caudales registrados en las estaciones fluviométricas Arrayán en La Montosa (ALM) y Mapocho en los Almendros (MLA), así como las precipitaciones medidas en la estación Cerro Calán. Ambos hidrogramas se suman, obteniéndose el aporte total desde la zona alta de la cuenca hasta la confluencia del río Mapocho con el estero Arrayán, correspondientes al punto P1 de la Figura 4. Para estimar la contribución de la cuenca del estero Las Hualtatas en el punto P2, para la cual no se cuenta con información fluviométrica, se utiliza el rendimiento de caudal por mm de precipitación efectiva por unidad de área aportante, de la cuenca Estero Arrayán en La Montosa. Adicionalmente, para la distribución temporal del volumen de escorrentía total generada, se supone similitud con el hidrograma producido en la estación Arrayán en la Montosa. La misma

relación de escorrentía directa por unidad de área y de temporalidad se utiliza para las cuencas intermedias no incorporadas comprendidas entre el punto de interés y el punto de confluencia.

Tabla 1. Descripción de los puntos de estudio.

Punto	Fuente de información de caudales
P1	Suma de caudales registrados en las estaciones fluviométricas ALM y MLA.
P2	Rastreo de la crecida desde P2 a P1 (Muskingum 1), más la serie de caudales estimados para Las Hualtatas ⁵
P.I. (punto de interés)	Rastreo de crecida desde P2 hasta el Punto de Interés, más una serie de caudales extra, de cuencas intermedias no incorporadas. ⁶

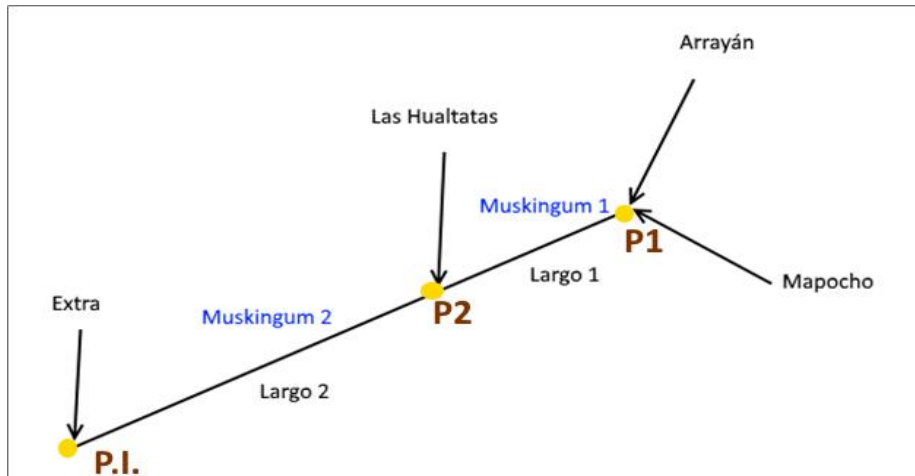


Figura 4. Esquema de distribución espacial de los aportes de caudal.

3.2. Estimación del periodo de retorno asociado al evento

Para realizar un análisis probabilístico de caudales máximos es relevante verificar que las muestras utilizadas provengan de la misma población, de manera que estén idénticamente distribuidas entre sí. Por su naturaleza hidrológica, los caudales máximos producto de crecidas pluviales corresponden a un fenómeno físico diferente y, por lo tanto, a una población distinta de los caudales máximos producto del deshielo de nieves y glaciares.

⁵ La serie de caudales estimados como aporte del sector Las Hualtatas considera adicionalmente al área aportante de la cuenca, el área comprendida entre el punto de confluencia del estero Arrayán y el río Mapocho y las estaciones de medición y otros sectores adicionales aledaños al río no considerados.

⁶ Estimación de aporte de esta área se realiza de manera análoga al punto anterior (área de la cuenca extra representa un 15% de la cuenca definida por ALM).

Por esto, al igual que en DGA (2012), CNR (1984) y ENDESA (1990), en la zona central de Chile, se analizan separadamente los eventos ocurridos en los períodos de deshielo (octubre a marzo) y pluvial (abril a septiembre), sin hacer distinción entre el mes específico de ocurrencia del evento dentro de cada período característico.

Se realizó un análisis de frecuencia de la serie anual de máximos conformada por la suma de los registros de caudales horarios de ambas estaciones en los períodos estacionales ya mencionados, entre los años 1980 a 2015, de modo de hacerla comparable con el valor máximo determinado en el punto anterior. La frecuencia de los eventos máximos históricos se estimó con la distribución empírica de Weibull y se analizó el ajuste con las distribuciones analíticas de probabilidad de Gumbel, Pearson, Log-Pearson, Normal y Log-Normal, así como también con un ajuste gráfico. Para calificar la bondad del ajuste de las distribuciones probabilísticas se empleó el test chi-cuadrado, y la evaluación del r^2 entre los valores ajustados y los observados. Adicionalmente, se realizó un análisis de frecuencia de la serie anual de precipitaciones máximas diarias de la estación Cerro Calán. La frecuencia de los eventos máximos históricos se estimó con la distribución empírica de Weibull y se analizó el ajuste con las distribuciones analíticas de probabilidad de Gumbel, Pearson, Log-Pearson, Normal y Log-Normal, así como con un ajuste gráfico. Para calificar la bondad del ajuste de las distribuciones probabilísticas se empleó el test chi-cuadrado.

3.3. Estimación de caudales previsible en función de los pronósticos meteorológicos

Se realiza un análisis retrospectivo de las estimaciones que se podrían haber efectuado utilizando como base la información de los pronósticos meteorológicos previos al evento. En función de estas precipitaciones, se estima una serie de caudales, mediante el método del hidrograma unitario sintético (HUS) de Linsley (DGA, 1996), considerando distintas elevaciones para la cota de la línea de nieve según los diferentes pronósticos.

Se calculó la esorrentía directa, en base al método de la Curva Número (USCS, 1972) estimando la precipitación efectiva a través de la ecuación 1. La ecuación 2 define el valor del número de curva (CN) que representa las condiciones de impermeabilidad de la cuenca.

$$P_{ef} = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \quad (1)$$

$$CN = \frac{25400}{254+S} \quad (2)$$

donde P_{ef} es la precipitación sobre la cuenca y S es la retención potencial máxima que se obtiene de la curva número (CN). El valor de Curva Número se obtuvo ajustando las ecuaciones mencionadas anteriormente a la crecida registrada por las estaciones Mapocho en los Almendros y Arrayán en la Montosa el día 13/07/2006. Se eligió esta tormenta entre 8 tormentas analizadas, debido a las condiciones similares de temperatura en la estación Cerro Calán, lo que apunta a una cota similar de la isoterma cero. La isoterma estimada de la tormenta del 2006 es de 3.200 msnm, y se calculó en base a un gradiente adiabático lineal de $-5,5$ [$^{\circ}\text{C}/\text{km}$] y a la temperatura en la

estación Calan (11°C) durante la tormenta. El valor adoptado finalmente para el parámetro de curva número es de $CN=77,2$.

Para la generación de una serie temporal de caudales en función de los pronósticos de precipitaciones, se utiliza el método del hidrograma unitario sintético (HUS) de Linsley, en base a las relaciones propuestas por la DGA (DGA, 1996).

Para distribuir temporalmente los montos de precipitación pronosticados, se utilizó las distribuciones de Varas (1985). Se analizaron los 4 grupos de tormentas propuestos por Varas, adoptándose como supuesto que la tormenta tendría una duración de 24 horas.

4. RESULTADOS

4.1. Estimación y rastreo de caudales para el punto de interés

Para determinar el hidrograma de crecidas en la zona de estudio, se realizó un rastreo de crecidas utilizando el método de Muskingum. Los valores de los parámetros k y x requeridos para este método fueron estimados en base a los antecedentes que se indican en la Tabla 2 utilizando la consideración de cauce rectangular ancho y la razón $v_w/v= 1,67$. Para abordar la incertidumbre de estos valores, según el rango señalado en la misma tabla, se adoptan valores de k que varían entre 9 y 22 minutos en el primer tramo, y de 18 a 44 minutos en el segundo, manteniendo el valor de x en torno a 0,3.

Tabla 2 Características del tramo para el rastreo hidrológico.

Variable	Magnitud
Longitud (km)	13,5 (tramo 1:4,5 y tramo 2: 9)
Velocidad del flujo (m/s)	2 – 5
Velocidad de la onda (m/s)	3,3 - 8,4
Intervalo de tiempo de rastreo (min)	18 - 6

Del análisis realizado, se obtiene el hidrograma que se observa en la Figura 5 estimado para el punto de interés en el río Mapocho próximo al túnel Costanera Sur – Costanera Norte, durante los días 17 y 18 de abril. El valor máximo del caudal afluente al tramo alcanzó un valor $Q=145 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que en el punto de interés este habría llegado a un máximo de $153,5 \text{ m}^3/\text{s}$. En dicha figura, la banda roja representa el rango estimado en base al análisis de sensibilidad desarrollado para los parámetros asociados al rastreo de crecida, mientras que la curva azul representa la suma de los caudales registrados en las estaciones ALM y MLA.

4.2. Estimación del periodo de retorno asociado al evento

Según lo descrito en la metodología, es necesario que las muestras provengan de la misma población para que se distribuyan idénticamente, por lo cual, en este estudio, se diferencia entre

caudales máximos producto de crecidas pluviales de aquellas cuyo origen es producto del deshielo de nieves y glaciares.

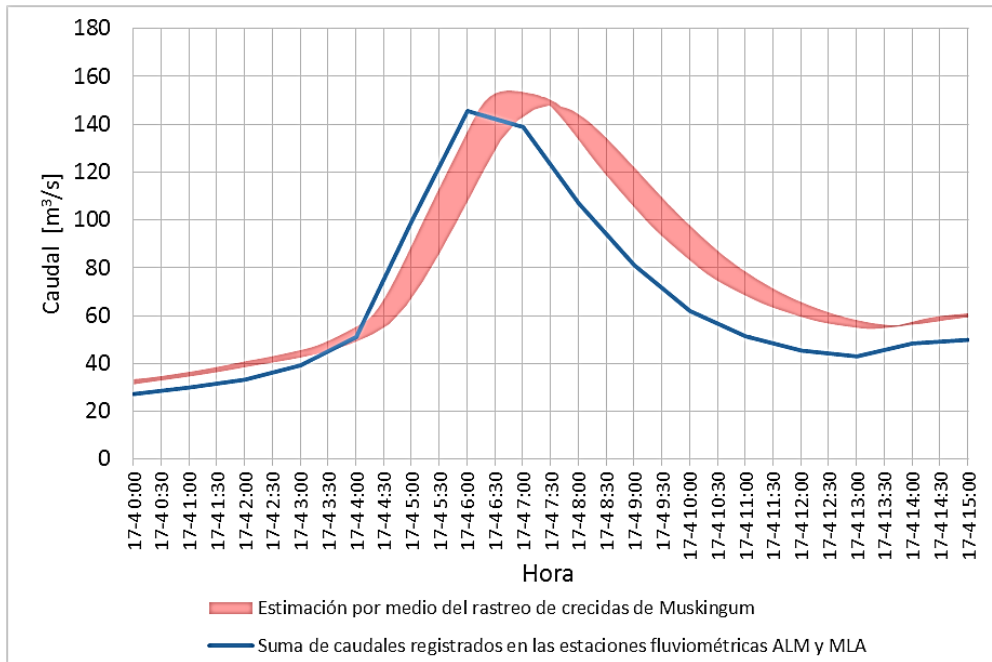


Figura 5. Hidrograma de crecidas estimado para el punto de interés de las obras e hidrograma aportante al tramo modelado (suma de registros en Arrayán en La Montosa y Mapocho en Los Almendros).

En consecuencia, para determinar la probabilidad del evento se recopilaron los antecedentes de los caudales horarios en las estaciones fluviométricas Río Mapocho en Los Almendros y Estero Arrayán en la Montosa, obteniendo la serie de máximos anuales para la suma de ambos aportes tanto en el período pluvial (abril a septiembre) como de deshielo (octubre a marzo) entre los años 1980 a 2015.

Se realizó un análisis de frecuencia de la serie anual de máximos, según estacionalidad, conformada por la suma de los registros de caudales horarios de ambas estaciones, y se determinó el período de retorno del caudal máximo instantáneo registrado en el evento. La frecuencia de los eventos máximos históricos se estimó con la distribución empírica de Weibull y se analizó el ajuste con las distribuciones analíticas de probabilidad de Gumbel, Pearson, Log-Pearson, Normal y Log-Normal, así como con un ajuste gráfico. Para calificar la bondad del ajuste de las distribuciones probabilísticas se empleó el test chi-cuadrado.

En base al test chi-cuadrado y el criterio experto, se eligen las distribuciones que mejor representan la estadística de caudales máximos instantáneos, que se observan en la **Error! Reference source not found.** y **Error! Reference source not found.** se presentan los valores obtenidos de los caudales máximos instantáneos asociados a los períodos de retorno T= 5, 10, 20 y 50 años.

De acuerdo al análisis de frecuencia realizado, el caudal máximo combinado entre el Estero Arrayán y Río Mapocho registrado durante el evento tiene un período de retorno asociado del orden de 4 años en el período pluvial.

Tabla 3 Caudales Máximos Instantáneos (QMI) en confluencia Arrayán-Mapocho.

Periodo Análisis	Caudal Máximo Instantáneo [m ³ /s]				Tipo de ajuste
	Tr = 5 [años]	Tr = 10 [años]	Tr = 20 [años]	Tr = 50 [años]	
Abr- Sep	194	286	363	448	Gráfico
Oct -Mar	39	52	66	87	Log-Normal

Análisis de frecuencia de precipitaciones observadas

En este caso, para las precipitaciones máximas anuales en 1 y 3 días registradas en la estación Cerro Calán se ajusta una distribución de probabilidades de tipo Log-Pearson y Log-Normal, respectivamente, que se muestran en las **Error! Reference source not found.** y **Error! Reference source not found.**. En la Tabla 4 se presentan los valores de estas variables asociados a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Para el evento en estudio, la estación Cerro Calán registró precipitaciones máximas de 51,8 mm y 85,6 mm en uno y tres días, respectivamente. Según los valores obtenidos de este análisis, el periodo de retorno asociado es del orden de 2 años para ambos casos.

Tabla 4. Precipitación del evento y periodo de retorno asociado del análisis de frecuencia en la estación Cerro Calán.

Análisis de frecuencia estación Cerro Calán	Precipitación [mm]					
	Evento	Tr = 2 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años
Pp máxima en 24h	51,8	50,2	73	92	119	142
Pp máxima en 72h	85,6	77,5	121	152	195	229

4.3. Estimación de hidrogramas a base de información meteorológica pronosticada y otros análisis

Se analizan los hidrogramas estimados a base de pronósticos meteorológicos reportados en días previos al evento por los medios de comunicación⁷ y por la Dirección de Meteorología de Chile (DMC)⁸. Se pronosticó entre 30 y 60 mm de precipitación para el viernes 15 de abril, y la isoterma 0°C a una altura de 3100 m.s.n.m. El día viernes la DMC pronosticó la altura de la isoterma 0°C a 3400 msnm. A base de esta información se estima el hidrograma de crecida mediante el método

⁷ Diario El Mercurio, día 14 de abril de 2016

⁸ Día 15 de Abril de 2016

hidrograma unitario sintético (HUS) de Linsley (DGA, 1996) para elevaciones de la isoterma 0°C de 3100 y 3400 m.s.n.m.

Se obtienen los hidrogramas de escorrentía directa para precipitaciones en 24 horas de 30, 40, 50 y 60 mm para los 4 grupos de tormentas. La Tabla 5 muestra los caudales máximos estimados para cada distribución y precipitación, considerando una cota de línea de nieves ubicada a 3100 m.s.n.m. Se observa que los caudales estimados superan el de diseño (79 m³/s) desde lluvias de 40 mm en 24 horas. Es importante notar que este escenario corresponde a una cota inferior en comparación a lo que sucedería con respecto al escenario donde la línea de nieves se ubicaría a 3400 m.s.n.m..

Tabla 5. Caudales máximos estimados con el HUS Linsley para diferentes precipitaciones y distribuciones de tormentas. Cálculos realizados en base a pronósticos del día jueves 14 de abril de 2016.

Escenario de precipitación pronosticado [mm]	Caudal Máximo Grupo I [m ³ /s]	Caudal Máximo Grupo II [m ³ /s]	Caudal Máximo Grupo III [m ³ /s]	Caudal Máximo Grupo IV [m ³ /s]
30	27,1	28,5	25,4	22,1
40	67,8	71,1	63,4	55,1
50	120,8	126,8	113,0	98,3
60	183,0	192,1	171,3	148,9

Del análisis efectuado se obtiene que los mayores caudales ocurren para la distribución del grupo II. La **Error! Reference source not found.** muestra el hidrograma de escorrentía directa en la zona de las obras para precipitaciones entre 20 y 60 mm en 24 horas según la distribución temporal de tormenta grupo II, para elevaciones de la isoterma 0°C de 3100 y 3400 m.s.n.m. Con el pronóstico del día jueves 14 de abril los caudales calculados superan el caudal de diseño de la obra de canalización desde precipitaciones de 40 mm en 24 horas. Al actualizar el pronóstico de la altura de la isoterma 0°C, los caudales calculados aumentan, llegando a 214 m³/s para precipitaciones de 60 mm en 24 horas.

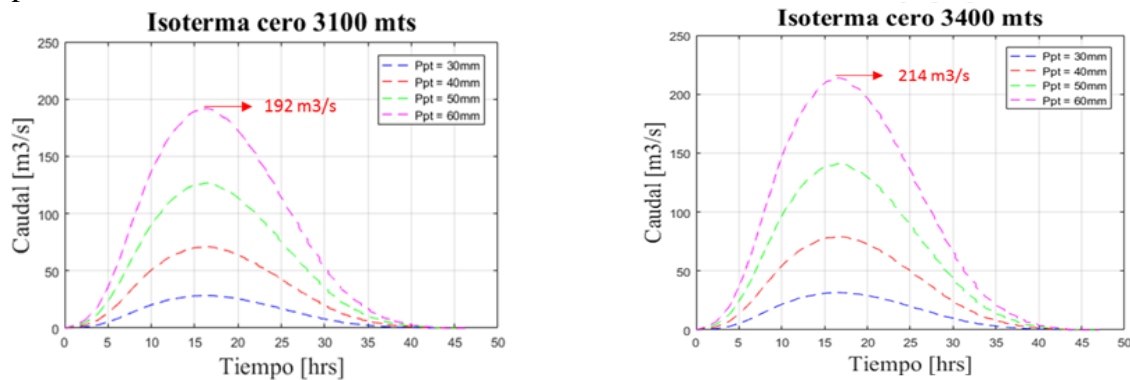


Figura 6 Hidrograma de crecida zona de obras, para precipitaciones entre 20 y 60mm en 24 horas según la distribución de tormenta Grupo II de Varas para altura de la isoterma 0°C de 3100 m.s.n.m. (pronóstico jueves 14 abril) y 3400 m.s.n.m. (pronóstico viernes 15 abril).

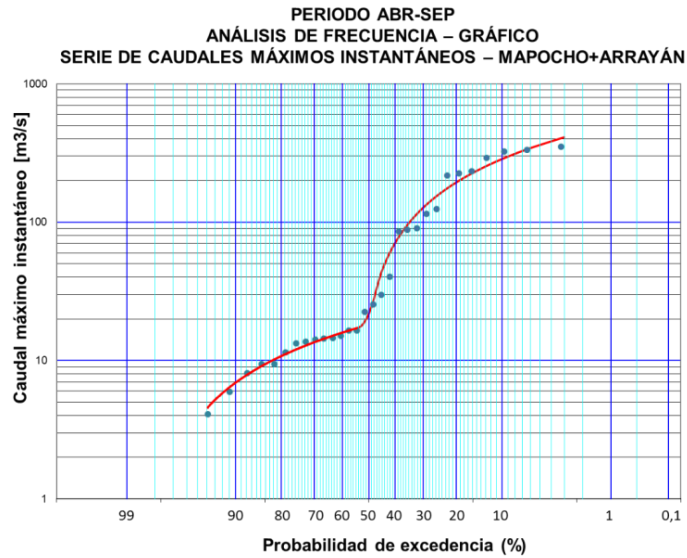


Figura 7 Análisis de frecuencia periodo abril-septiembre. Serie anual de máximos 1980-2015.

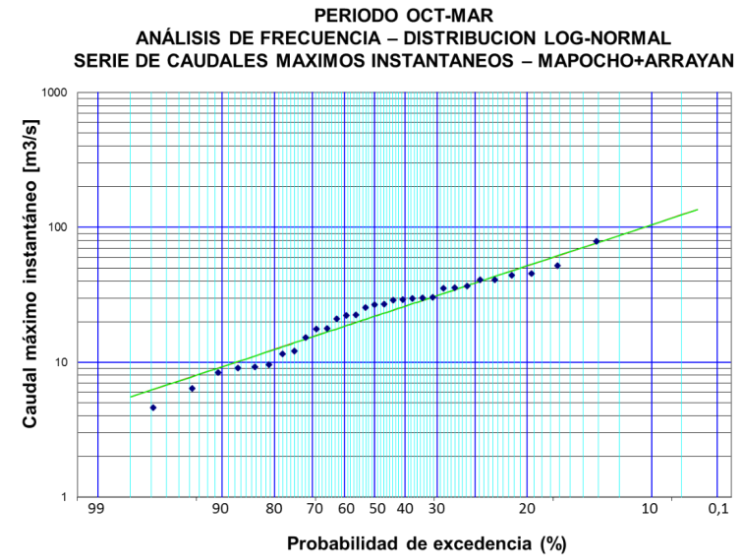


Figura 8 Análisis de frecuencia periodo octubre – marzo. Serie anual de máximos 1980-2015.

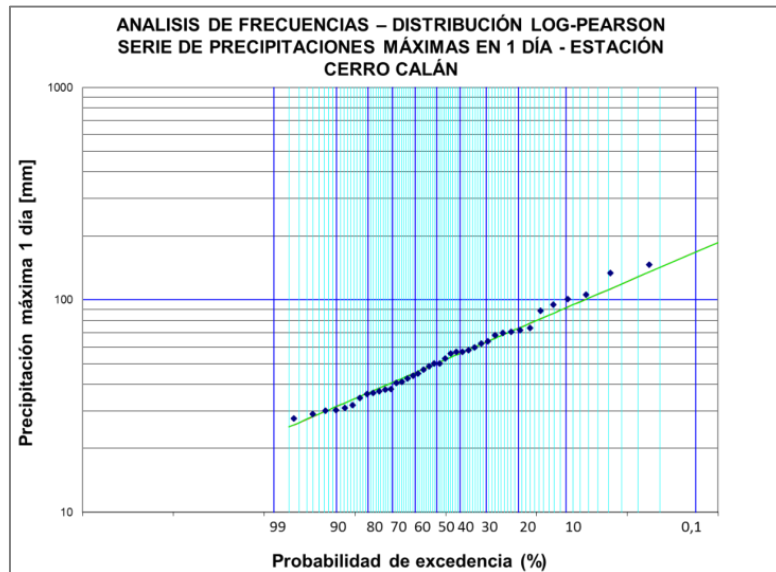


Figura 9. Análisis de frecuencia precipitaciones máximas en 1 día. Serie anual de máximos 1980-2015.

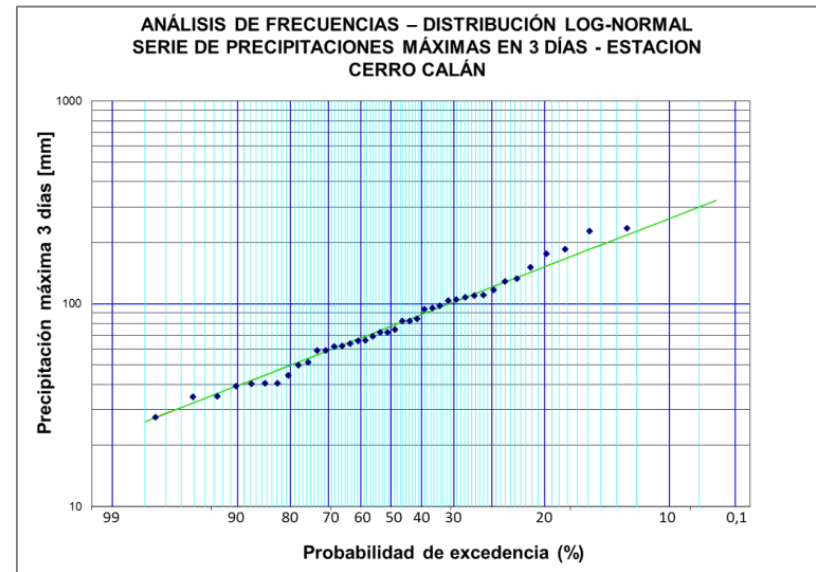


Figura 10. Análisis de frecuencia precipitaciones máximas en 3 días. Serie anual de máximos 1980-2015.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los antecedentes presentados es posible concluir lo siguiente:

- Al caudal observado en el evento de abril de 2017 en la confluencia del estero Arrayán y el río Mapocho, $Q = 145 \text{ m}^3/\text{s}$, se le asocia un período de retorno inferior a 5 años.
- Las obras de desvío existentes en el cauce no tenían capacidad para contener esta crecida.
- La precipitación máxima diaria registrada tiene asociado un período de retorno de 2 años.
- No se previó con antelación los caudales que ocurrirían frente a los pronósticos meteorológicos disponibles y las consecuencias que podrían ocasionar la falla de las obras de desvío.

Finalmente, es conveniente destacar que aunque puede ser aceptable el criterio de diseñar una obra no permanente con un período de retorno de 20 años, la falla de la obra (en este caso un pretil fusible) no debería aumentar las consecuencias de la falla. Un pretil fusible está diseñado para erosionarse y dejar libre el escurrimiento del agua, de manera de evitar daños mayores en caso de que se sobrepase el caudal de diseño. Al tener este pretil fusible, aguas arriba de la apertura del túnel, aumenta el potencial daño en vez de disminuirlo.

REFERENCIAS

CNR. (1984) “Proyecto Maipo, estudio hidrológico e hidrogeológico”. Publicación del Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.

DGA. (1996) “Manual de eventos extremos. Caudales máximos y mínimos”. Publicación del Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.

DGA. (2012) “Pronóstico de disponibilidad de agua temporada de riego 2012-2013”. Publicación del Ministerio de Obras Públicas, Santiago. Chile.

ENDESA. (1990) “Estudio de los recursos hídricos, Central Ralco”. Publicación del Ministerio de Obras Públicas.

Fatorelli S. & Fernández P. (2011) “Diseño hidrológico”. Water Assessment & Advisory Global Network. 2° Edición digital.

Ingendesa. (2002). “Plan de Contingencia en el río Mapocho. Tramo Lo Salde- Bellavista. Capacidad del cauce natural con puentes”. Solicitado por Costanera Norte Concesionaria. documentos.dga.cl/PROY2826v5.pdf

United States Soil Conservation Service (USCS). (1972). “SCS National Engineering Handbook”. Section 4: hydrology. The Service,

Varas, E. (1985). Hietogramas de Tormentas de Diseño, VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Soc. Chilena de Ingeniería Hidráulica, 7-9 Noviembre, Concepción.