

CORRIENTES DE DETRITOS EN LA QUEBRADA DE MACUL, CHILE. ESTUDIO DE CAUDALES MÁXIMOS

Ximena Vargas¹

RESUMEN: Se analiza la ocurrencia de corrientes de detritos en una cuenca andina en la que no se dispone de información fluviométrica y que se desarrolla en los primeros contrafuertes de la Cordillera de Los Andes, en una zona cercana a la ciudad de Santiago, Chile. Se estiman los caudales líquidos asociados a los mayores eventos históricos que de acuerdo a la literatura pueden clasificarse como flujos de barro o de detritos y se analiza la forma tradicional de determinación de caudales de diseño en cuencas pluvionivales. Dada la incidencia que estos eventos tienen sobre la población de zonas aledañas al cauce, se evalúa la crecida máxima probable susceptible de ocurrir en la cuenca en estudio.

INTRODUCCIÓN

Chile puede considerarse como un país de relieve variado ya que presenta una extendida zona litoral bordeada por la Cordillera de la Costa que en la zona central alcanza alturas de hasta 2000 msnm; el valle central, donde se desarrollan extensas zonas urbanas, se ubica entre la cordillera citada y la cordillera de Los Andes, que corresponde al límite natural con los países vecinos. Las cumbres más altas en esta última alcanzan alturas considerablemente superiores a las de la cordillera de La Costa, llegando hasta los 6500 msnm.

Las cordilleras indicadas ejercen importantes influencias en el clima ya que modifican el comportamiento de los sistemas frontales provenientes del océano Pacífico. Es así como el macizo costero ejerce un efecto de "cono de sombra" en las precipitaciones, que se manifiesta como un mínimo en el perfil pluviométrico normal anual en el valle central. En la cordillera de Los Andes se aprecia un claro aumento de la precipitación con la altura, que en términos de valores anuales representa, en la zona central de Chile, una tasa de variación de precipitación de 30 mm cada 100 m de altura (Aceituno *et al.*, 1988). La cordillera de Los Andes ejerce además un importante efecto en la distribución de los caudales, por cuanto la acumulación de nieve en el período invernal constituye una instancia natural de almacenamiento, que contribuye a la escorrentía en la época de deshielo. Además, las altas pendientes que caracterizan a esta cordillera otorgan un carácter torrencial a los ríos de la zona central de Chile en sus sectores precordilleranos y cordilleranos.

Debido a la intensificación del uso del suelo en la zona central de Chile, en los últimos años la población ha ido ocupando zonas montañosas donde los fenómenos denominados corrientes de detritos son de ocurrencia relati-

vamente frecuente. Esto ha motivado la realización de investigaciones y estudios de ingeniería relacionados con el tema, que han puesto de manifiesto la escasez tanto de información como de conocimientos respecto a los procesos físicos involucrados en el fenómeno.

Entre los aspectos que se consideran relevantes para la producción del fenómeno se señalan tanto la ocurrencia de altas precipitaciones, a las que se asocian altas intensidades en zonas donde existe material suelto que puede ser arrastrado por el flujo, como la ocurrencia de precipitación en condiciones de temperatura tales que llueve en zonas donde frecuentemente ocurre precipitación sólida. Esto último originaría caudales aportantes de magnitud tal que pueden provocar grandes erosiones en los cauces con los consiguientes aportes de material al flujo.

De los eventos referenciados en la literatura para la zona en estudio (Lara, 1996) destaca el ocurrido el día 3 de mayo de 1993 donde avalanchas y rodados destruyeron el camino internacional a Mendoza, Argentina, en la zona alta del río Aconcagua; corrientes detriticas causaron la muerte de 50 personas y 3500 damnificados en cuencas precordilleranas de la ciudad de Santiago, produciéndose además cuantiosos daños en las centrales hidroeléctricas Pangal y Coya ubicadas en el río Coya, afluente del río Cachapoal. La zona descrita se ubica entre los 32°30' y los 34°30' de latitud sur, lo que pone de manifiesto la extensión del fenómeno. A los caudales líquidos estimados (Lara, 1996) en las cuencas afectadas se les ha asociado un período de retorno del orden de 50 años, aunque las precipitaciones diarias resultan significativamente inferiores a las asociadas a períodos de retorno 10 años. La temperatura media durante el evento alcanzó a los 16°C, valor al que se asocia una probabilidad de excedencia inferior al 9%, para días con precipitación.

¹ Universidad de Chile

Figura 1. Esquema de ubicación del sector de la zona de estudio



Los resultados que aquí se presentan para una de las cuencas de la zona en estudio, corresponden a la evaluación los caudales líquidos susceptibles de haber ocurrido en los eventos de este tipo referenciados en la literatura y a la evaluación de la crecida máxima probable. La cuenca seleccionada corresponde a la de la quebrada de Macul, cuyo sector de ubicación se esquematiza en la *Figura 1*.

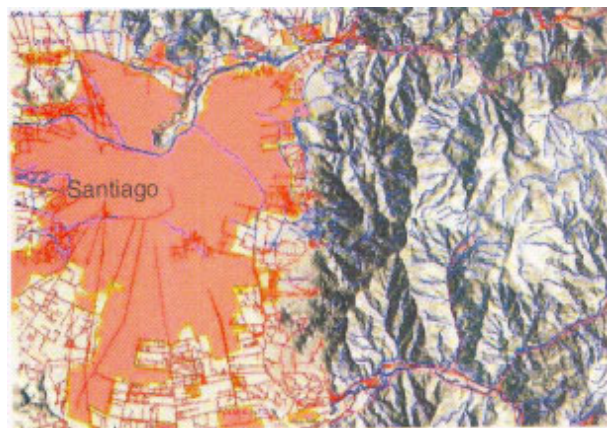
ANTECEDENTES DE LA CUENCA EN ESTUDIO

La quebrada de Macul se emplaza en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes al suroriente de la ciudad de Santiago (latitud sur $33^{\circ}30'$ y longitud oeste $70^{\circ}30'$). La región se caracteriza por un clima templado cálido, con lluvias invernales (abril-septiembre) y estación seca prolongada. En relación con las características geomorfológicas de la zona, puede señalarse que ésta presenta rápidos ascensos en distancias cortas, lo cual origina una rápida concentración de caudal y flujos en régimen supercrítico.

La información fluviométrica en las cuencas precordilleranas de la región es escasa, por lo que la mayoría de los estudios se basan en los antecedentes pluviométricos disponibles en las estaciones de la zona. En base al análisis de los antecedentes de temperatura, obtenidos tanto de las estaciones existentes como de un radiosonda, se ha determinado que durante eventos de precipitación la temperatura media diaria es inferior a 11°C y la interfase lluvia-nieve se ubica alrededor de los 2000 msnm (Garreaud, 1992). La cuenca en estudio presenta un 50% de su área bajo esta cota tal como se indica en la *Tabla 1*, donde también se señala la variabilidad de otras características con la altura como son la longitud del cauce principal, L ; la distancia desde el centro de gravedad de la cuenca al punto de salida, L_G ; la pendiente media de la cuenca, S , estimada con la fórmula de Mociornita; y el tiempo de concentración, t_c , estimado este último como el promedio de los obtenidos con las fórmulas de California Highways and Public Works,

Cota (msnm)	Área (km ²)	L (km)	L _G (km)	S (%)	t _c (hrs)
1500	6,09	5,0	2,0	0,54	0,7
2000	12,98	6,8	3,8	0,56	0,9
2500	21,59	7,8	5,0	0,53	1,0
3000	25,29	8,6	5,2	0,53	1,1
3200	25,57	9,0	5,3	0,53	1,1

Tabla 1. Características de la cuenca en estudio



Giandotti y sobre la base de velocidades medias de los diferentes tramos de la cuenca.

ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE EVENTOS SELECCIONADOS

Las referencias bibliográficas (Urrutia y Lanza, 1993 y Lara, 1996) y periodísticas permiten concluir que desde el año 1945 la zona en estudio se ha visto afectada por 17 eventos que han originado comentes de detritos en algunas cuencas de la zona. En 12 de estos eventos se dispone de información meteorológica registrada en algunas estaciones. Existen evidencias de que al menos en 4 de esos eventos la quebrada de Macul fue afectada por corrientes detríticas. Las características de estos eventos se presentan en la *Tabla 2*, donde se aprecia que la del año 1987 corresponde a la de mayor precipitación diaria (P_{24}) observada en la estación Quinta Normal, ubicada en el sector poniente de Santiago. Dicho valor, sin embargo, es inferior al asociado al período de retorno $T = 10$ años ($P_{24}^{10} = 71$ mm).

Por otra parte, las estimaciones de la intensidad de precipitación máxima en la cuenca durante un tiempo igual al de concentración de la cuenca aportante (i_{tc}) indican que el mayor valor ocurrió en el año 1993, coincidiendo además en esa fecha la mayor área aportante debido a las altas temperaturas ocurridas durante el evento. Se observa también que en general en todos los eventos ocurridos (a excepción del ocurrido el año 1987) el índice de precipitación antecedente (IPA) estimado sobre la base de la precipitación caída en la estación Quinta Normal durante los 30 días anteriores al evento, es mayor que el 30% de la precipitación normal anual ($P_o = 312,5$ mm) y, según lo señalado por Vargas y Lara (1996) a excepción del año 93, la precipitación durante el día anterior al de ocurrencia del fenómeno ($P_{24}(t-1)$) puede ser considerada siempre superior al 50% de la asociada a un período de retorno $T = 10$ años

Finalmente, se indica en la *Tabla 2* las estimaciones del caudal líquido susceptible de haber ocurrido en estos eventos. Dicho caudal fue obtenido usando como relación precipitación-escorrentía el método del hidrograma unitario (Vargas y Lara, 1996), con parámetros calibrados para la región. Los hietogramas de lluvia efectiva en cada evento, fueron calibrados basándose en la información fluviométrica registrada en cuencas vecinas de características similares.

Fecha	P ₂₄ (t) (mm)	P ₂₄ (t-) (mm)	ite (mm/ hr)	IPA (mm)	H _{L,N} (msnm)	Área (km ²)	Q (m ³ / s)
06/27/82	20,2	61,0	11,3	145,0	2300	17,9	22,7
06/16/86	18,6	40,6	10,2	137,0	2230	16,9	18,6
07/14/87	51,1	64,9	13,6	6,9	2170	15,9	24,1
05/03/93	14,6	2,9	23,6	101,7	3240	25,6	47,5

Tabla 2. Características de eventos ocurridos en Quebrada de Macul

ANÁLISIS DE CAUDALES DE DISEÑO

Para el diseño de obras hidráulicas, cuando no existe información pluviométrica registrada en el punto de interés, se recurre a métodos indirectos que se basan en la información pluviométrica disponible. Para dichos efectos, en Chile es práctica común escoger una posición promedio de la línea de nieves para evaluar el área pluvial aportante y estimar la precipitación máxima diaria sobre la cuenca asociada al período de retorno de interés para el diseño. Esta precipitación se usa como base para la estimación de la intensidad de precipitación efectiva para la duración que se estime apropiada.

Como cuenca aportante promedio se ha considerado la definida por la cota 2000 msnm, y se ha estimado la precipitación máxima diaria asociada al período de retorno de 10 años basándose en el mapa de isoyetas (DGA, 1990) de la región y cuyo valor se indica en la *Tabla 3* junto a los valores asociados a otros períodos de retorno obtenidos sobre la base de coeficientes de frecuencia propios para la región extraídos de la publicación ya citada.

Al igual que antes, para obtener el caudal asociado a cada período de retorno se ha escogido como relación precipitación-escorrentía el hidrograma unitario sintético considerándose una lluvia de duración igual al doble del tiempo de concentración de la cuenca de manera de maximizar el caudal máximo del hidrograma de escorrentía directa. La intensidad media máxima de precipitación efectiva en dicho intervalo ($i_{\Delta t}$) se ha estimado usando la fórmula de Grunsky, que se presenta en la ecuación 1, y adoptando un índice de infiltración $\phi = 2,5$ mm/hr, que corresponde al valor medio obtenido en la etapa de calibración.

$$i_{\Delta t} = i_{24} (24 / \Delta t)^{1/2} \quad (1)$$

Los resultados obtenidos se indican también en la *Tabla 3*. Se aprecia que al caudal obtenido para el evento ocu-

Período de Retorno (años)	Precipitación Máxima Diaria (mm)	Int. Máxima en @t = te (mm/hr)	Caudal (m ³ /s)
5	70,2	15,1	22,1
10	86,0	18,5	28,6
20	101,8	21,9	35,0
50	123,1	26,5	43,7
100	139,8	30,1	50,5

Tabla 3. Caudales de diseño, según isoyetas de precipitación máxima diaria

rrido en 1993, $Q = 47,5$ m³/s, se asociaría un período de retorno cercano a los 100 años, valor superior al que se asignan Vargas y Lara (1996) usando la información histórica que resulta ser de $T = 50$ años.

Lo anterior pone de manifiesto la necesidad de recurrir a procedimientos más laboriosos para la estimación de los caudales máximos en cuencas sin control fluviométrico donde el área pluvial aportante puede variar significativamente de una tormenta a otra. Se propone en consecuencia el análisis conjunto de los antecedentes meteorológicos (precipitación, temperatura) durante los eventos, para estimar tanto la cuenca aportante como la precipitación máxima diaria media sobre ésta. Con el objeto de disminuir el trabajo, se pueden seleccionar aquellos eventos que, en cada año, hayan ocasionado los mayores caudales en cuencas vecinas de régimen similar. Para la cuenca vecina elegida en este estudio, aquella controlada por la estación fluviométrica Arrayán en La Montosa, se obtiene que, desde 1951 a 1993, los años de mayores caudales, en orden decreciente, corresponden a 1987, 1972, 1986, 1978, 1993, 1953, 1960, 1982. Tal como se muestra en el análisis de los 4 eventos en que ocurrieron corrientes de barro en la quebrada de Macul, detectados sobre la base de información periodística, donde se supuso que estos correspondían a los mayores caudales ocurridos en el período, los 4 eventos se encuentran dentro del grupo más desfavorable. Conviene destacar que, como era de esperar, el ordenamiento de éstos es en todo caso diferente, 1993, 1987, 1982, 1986, debido a que los tiempos de concentración de cada cuenca son distintos y, en consecuencia, las intensidades de lluvia que originan los máximos caudales en cada cuenca no son iguales.

CAUDAL MÁXIMO PROBABLE

De acuerdo a lo indicado anteriormente, el crecimiento urbano de la ciudad de Santiago, ha expuesto a la población a fenómenos de tipo aluvional que pueden tener consecuencias fatales, tal como ocurrió en 1993, donde perdieron la vida cerca de 50 personas. Teniendo presente este hecho y la necesidad de definición de zonas de cauce con prohibición de establecer asentamientos urbanos, se ha estimado conveniente calcular la crecida máxima probable susceptible de ocurrir en la cuenca.

El procedimiento utilizado se basa en la determinación de la precipitación máxima probable a través de la maximización de tormentas observadas; para ello se define el factor de maximización como la cantidad de agua precipitable máxima disponible en la atmósfera para la época del año en que ocurre la tormenta y aquella existente cuando ocurrió la tormenta. Para tener en cuenta los efectos orográficos se trazan las isoyetas para cada evento seleccionado y se consideran las condiciones térmicas imperantes para definir la interfase lluvia-nieve, lo que condiciona el área máxima afectada por precipitación líquida. Las curvas Precipitación-Duración-Área (PDA) de cada evento seleccionado, se maximizan por el factor anterior, trazando luego la curva envolvente para cada duración, las que se presentan en la *Figura 2*.

Tabla 4. Caudal máximo probable en la Quebrada de Macul

Duración (horas)	Precipitación (mm)	Caudal (m ³ /s)
2	74,1	172
4	127,4	220
6	166,2	237
8	191,4	221

Para estimar el Caudal Máximo Probable (CMP) se consideran las curvas de distribución de precipitación presentadas por Varas (1987) válidas para lluvias de distintas duraciones y distintas probabilidades de excedencia, las que se presentan en la Figura 3. En cuanto a infiltración, al igual que para el análisis de caudales de diseño, se consideró apropiado suponer el mismo valor considerado en la etapa anterior del estudio, es decir se adoptó un índice $\phi = 2,5$ mm/hr. Con relación al área aportante, lo más desfavorable desde el punto de maximización del caudal, es considerar la totalidad de la cuenca recibiendo precipitación líquida. La relación precipitación-escorrentía seleccionada para el análisis es el método del hidrograma unitario, evaluándose en este caso el correspondiente a toda la cuenca aportante. Hay que hacer notar que estudios en otras zonas del país (Garreaud, 1992; Carvallo, 1986) han mostrado que el caudal máximo no aumenta en más del 10% si se considera derretimiento del manto de nieve por efecto de la lluvia que cae sobre éste, por lo que este efecto no se ha tomado en cuenta en la evaluación. En la Tabla 4, se señalan los valores de la precipitación máxima probable y los caudales máximos que se obtienen en la cuenca, para las diferentes duraciones analizadas. Se aprecia en consecuencia que el caudal máximo probable que puede generarse en la quebrada de Macul corresponde a $Q = 237$ m³/s, el que se produce para una tormenta de 6 horas de duración.

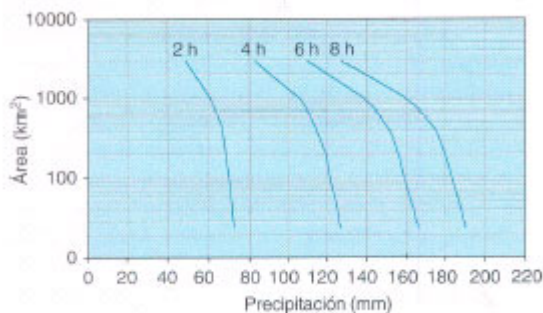


Figura 2. Curvas PDA maximizadas

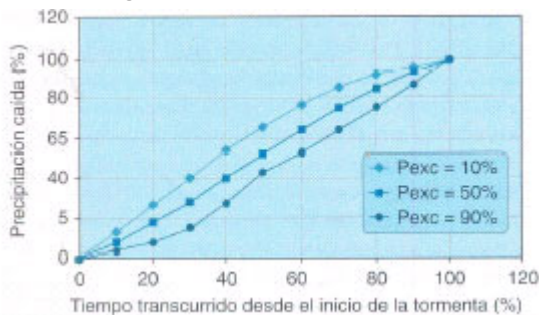


Figura 3. Curvas de distribución de temporales (Varas 1987)

CONCLUSIONES

Los antecedentes presentados ponen de manifiesto la complejidad presente en la evaluación de caudales en cuencas cordilleranas, especialmente en aquellas situaciones en que existe variación de las áreas aportantes durante las tormentas. Por otra parte, los resultados obtenidos indican que con métodos simples pueden subestimarse los caudales de diseño, por lo que debe enfatizarse el uso de procedimientos más elaborados, en especial cuando la vida humana está en juego. Finalmente, es conveniente destacar que el caudal máximo estimado para la crecida que ha causado mayor daño en la zona de la quebrada de Macul representa sólo el 20% de la crecida máxima probable, factible de ocurrir en el lugar. La ocurrencia de un evento como el indicado, debe en todo caso analizarse en forma global en la zona, con el objeto de tomar medidas que permitan paliar los efectos negativos que se produzcan.

AGRADECIMIENTOS

Para la realización de este trabajo se ha contado con la colaboración de los estudiantes de ingeniería civil Srta. Scarlett Vásquez y Sr. Mauricio Ruz. La investigación ha sido financiada por FONDECYT a través del proyecto 1940545.

REFERENCIAS

- Aceituno P., Rutlland J., Ulriksen P. y J. Vergara (1988) Estudio de los aspectos meteorológicos que inciden en el régimen de explotación de la mina Sur-Sur de la División Andina. Centro de Investigación Minero Metalúrgica, Chile
- Carvallo C. (1989) Determinación de la crecida máxima probable por métodos hidrometeorológicos. Aplicación en la hoya del Alto Bío-Bío. Central Pangué. Tesis para optar al título de ingeniero civil. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- DGA (1990) Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile
- Garreaud R. (1992) Estimación de la línea de nieve en cuencas andinas de Chile central *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*. Chile. Vol. 7 N° 2, pp. 21-32
- Lara P. (1996) Caracterización Hidrológica de las Corrientes de Detritos en Chile Central Tesis para optar al título de ingeniero civil. Universidad de Chile. Santiago, Chile
- Urrutia R. y E. Lanza (1993) Catástrofes en Chile. 1541-1992. Editorial La Noria, Santiago, Chile
- Varas E. (1987) Tormentas de Diseño *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*. Chile. Vol. 2 N° 1, pp. 39-55
- Vargas X. y P. Lara (1996) Caudales máximos asociados a eventos aluvionales en cuencas del piedemonte de Santiago. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Santiago, Chile. Vol. 1, pp. 243-253