

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE CRECIDAS DE LA CUENCA DEL RÍO  
MAPOCHO MEDIANTE HEC-HMS**

**IGNACIO GONZÁLEZ G.<sup>1</sup>**  
**LINA CASTRO H.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

Las inundaciones son unos de los riesgos naturales más costosos en países desarrollados y subdesarrollados alrededor del mundo. Hay una necesidad sustancial de anticiparse a ese riesgo para así reducir consecuencias de pérdidas humanas, daños ambientales y pérdidas económicas. Sin embargo, los pronósticos de inundación siguen siendo un desafío, debido a las incertidumbres meteorológicas y ambientales, a la escala espacial y temporal en que se desarrollan. Idealmente, un pronóstico hidrológico de crecientes requiere: i) un pronóstico meteorológico en tiempo real, espacial y temporalmente representativo de la zona de estudio, ii) un modelo hidrológico calibrado a escala subdiaria. Este trabajo tiene como objetivo aplicar el modelo hidrológico HEC-HMS a escala subdiaria aplicando herramientas de distribución espacio - temporal de las variables meteorológicas, con el fin de ser usado para la predicción de crecientes con pronósticos meteorológicos. Se evaluó la ejecución del modelo, los métodos de distribución de las variables meteorológicas, y los parámetros obtenidos. La aplicación se hizo en la cuenca del río Mapocho para el periodo comprendido entre los años 2002-2016.

---

<sup>1</sup> Alumnos Memorista, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María– [ignacio.gonzalez@alumnos.usm.cl](mailto:ignacio.gonzalez@alumnos.usm.cl)

<sup>2</sup> Profesor Auxiliar, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María– [lina.castro@usm.cl](mailto:lina.castro@usm.cl)

## **1. INTRODUCCIÓN**

Una inundación es una catástrofe causada por crecidas de los ríos debido a precipitaciones, que generan un aumento en el flujo del río haciendo que sobrepase su capacidad y se desborde. Chile, debido a sus características geográficas, la distribución de las principales ciudades cerca de ríos o cuencas andinas, sumada a la deforestación, lo hacen bastante vulnerable a las crecidas de ríos y, en consecuencia, a inundaciones. Adicionalmente, los eventos hidrometeorológicos extremos se están volviendo más recurrentes y potencialmente peligrosos, por lo que se hace necesario tener un pronóstico meteorológico e hidrológico que permita, con algún sesgo de tiempo, anticipar o emitir algún tipo de alerta. Para ello entonces, hay que contar con un modelo meteorológico que entregue pronósticos certeros y adicionalmente un modelo hidrológico que entregue la respuesta ante eventos extremos.

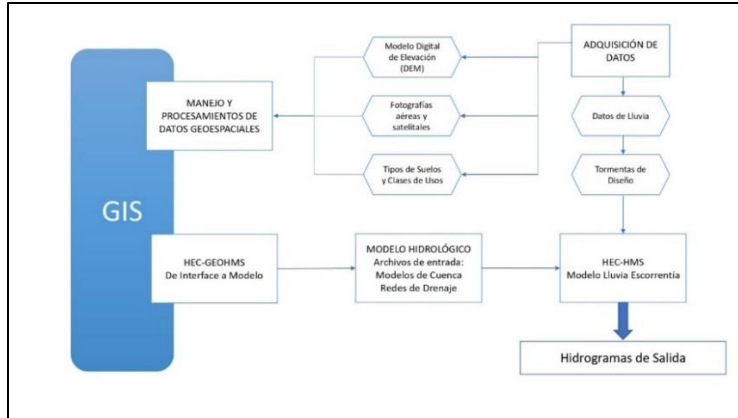
El objetivo del presente trabajo es calibrar y validar el modelo HEC-HMS con los hidrogramas horarios de las crecientes reportadas entre los años 2002-2016 en el punto “Mapocho en los Almendros” y evaluar los parámetros obtenidos mediante la validación del modelo durante el mismo periodo. La evaluación del modelo se hizo en función de la magnitud del caudal peak y del tiempo al peak. Para lograr esto, se hizo la configuración de la cuenca de estudio en HEC-HMS, estimando las variables meteorológicas a la escala espacial y temporal que requiere el modelo, además de las características geomorfológicas y de uso del suelo. Se implementaron métodos de interpolación tanto espacial como temporal para obtener datos de precipitaciones horarias a partir de datos diarios, para luego ser ingresados en el modelo.

### **Descripción HEC-GeoHMS**

HEC-GeoHMS es una extensión para ArcMap (ArcGIS) que ha sido desarrollada como un grupo de herramientas hidrológicas geoespaciales para ingenieros e hidrólogos con una limitada experiencia en sistemas de información geográfica (SIG). El programa permite visualizar información espacial, documentar características de la cuenca, realizar análisis espaciales, delinear cuencas y ríos, construir las entradas para modelos hidrológicos y ayudar en la preparación de informes. Para trabajar con HEC-GeoHMS es necesario un modelo digital de elevación (DEM), la localización digital de los cauces y de las estaciones de aforo. Cuando la preparación de los datos está lista, HEC-GeoHMS procesa al terreno y la información espacial para generar una serie de entradas hidrológicas, donde se pueden estimar los parámetros hidrológicos a partir de las características de la cuenca y los cauces, precipitación medida y datos de caudales, los cuales darán un modelo inicial para trabajar en HEC-HMS (US Army Corps, 2013), tal y como se muestra en el esquema de la Figura 1.

## **2. ZONA DE ESTUDIO**

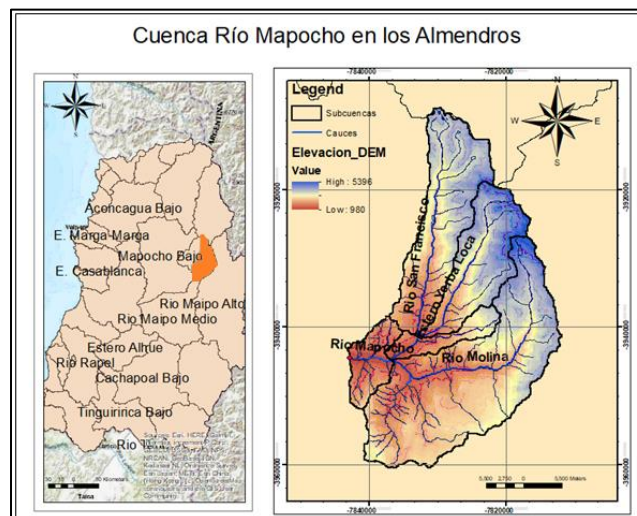
La zona de estudio está ubicada dentro de la cuenca del río Mapocho en la Región Metropolitana cuyo afluente principal atraviesa la ciudad de Santiago. De la cuenca del río Mapocho se escogió la subcuenca que drena hacia la estación fluviométrica “Mapocho en los Almendros” a 560 msnm, que se extiende entre los paralelos 33°05’-33°30’ latitud sur y meridianos 70°10’-70°28’ longitud oeste, y que tiene un área de 638.22 km<sup>2</sup> (Figura 2).



**Figura 1.** Esquema Sistema Hidrológico, Fuente: (Chow, 1994)

La cuenca en estudio posee un régimen hidrológico nivo-pluvial, caracterizado por tener caudales medios mensuales mayores en los meses de deshielo y en el período de invierno donde se concentran los eventos de precipitación. El principal uso del agua en la cuenca es para riego, tanto de cultivos agrícolas como plantaciones forestales o praderas naturales. La temperatura media anual es de 13,9°C, en tanto que el mes más cálido corresponde al mes de enero, alcanzando una temperatura de 22.1°C, y el mes más frío corresponde al mes de julio con 7,7°C con un caudal promedio de 18.26 (m3/s).

La red hidrometeorológica empleada en la modelación consta de 12 estaciones meteorológicas, ubicadas tanto dentro como fuera de la cuenca de Mapocho en Los Almendros, principalmente datos de temperatura y precipitación diarios, obtenidos desde la dirección General de Aguas (DGA, 2019) y del Explorador Climático del CR2 ((CR)2, 2013), a excepción de la estación meteorológica “Cerro Calán”, única con datos horarios de temperatura y precipitación.



**Figura 2.** Mapa de la zona estudio, Cuenca Mapocho en los Almendros.

### 3. METODOLOGÍA

#### Preproceso

##### *Recopilación de información para selección de tormentas*

Se hizo un catastro de los eventos extremos en la cuenca del río Mapocho empleando los registros de la página de DesInventar (Corporación OSSO, 1994), donde se eligieron las 8 tormentas con desborde entre 2002 y 2016. En la Tabla 1 se muestran estas ocho tormentas, con su respectiva duración y los valores de caudal máximo y promedio presente en cada una. Estas tormentas fueron analizadas en base a los datos históricos de precipitación y caudal, lo que llevó a descartar la tormenta uno (T1) y la tormenta tres (T3), por el escaso contenido de información en cuanto a datos de precipitación. Los datos de calibración y validación son caudales horarios observados a la salida de la cuenca en la estación “Mapocho en los Almendros”, a escala horaria.

##### *Delimitación de la cuenca*

Para la demarcación de la cuenca de análisis, se utilizó un archivo DEM como formato Raster de extensión \*.TIFF, con una resolución de 90x90 m obtenido desde la página STRM Data Search (SRTM, 2004 - 2019), y con el programa SIG ArcMap y la extensión HEC-GeoHMS, se demarcaron los límites para las cinco subcuencas con sus respectivas características geofísicas como lo son la pendiente media, la longitud del cauce principal, la ubicación del centroide, etc. Valores que se ocuparon para calcular los parámetros de entrada y calibración que se explican más adelante.

##### *Línea de Nieve*

Esta línea define el límite físico que separa la precipitación líquida de la sólida. La modelación hidrológica de crecientes que se pretende mostrar en este trabajo contempla la respuesta hidrológica ante crecientes de precipitación que se representan de manera instantánea. Por lo tanto, se hizo necesario estimar la línea de nieve para definir el área pluvial aportante en la modelación mediante la siguiente fórmula:

$$T_u = T_{i,estación\ base} - \gamma * (Cota_{LN} - Cota_{estación\ base}) \quad (1)$$

Donde  $T_i$  es la temperatura índice en la estación base,  $Cota_{LN}$  es la cota de la Línea de Nieve;  $Cota_{estación}$  es la cota de la estación base;  $T_i$  es la temperatura índice en la estación base;  $\gamma$  es el gradiente pseudo adiabático saturado de 5 [°C/km]; y  $T_u$  es la temperatura Umbral igual a 0.9 [°C]. (Stowhas B., 2016).

**Tabla 1.** Tormentas de estudio.

Tormenta	Días	Mes	Año	Qmax [m3/s]	Qmedio [m3/s]
Tormenta 1 (T1)	04-05-06-07-08-09-10	Agosto	2002	75.3	16.78
Tormenta 2 (T2)	26-27-28-29-30-01-02	Junio-Julio	2005	65.4	16.59
Tormenta 3 (T3)	25-26-27-28-29-30-31	Agosto	2005	325.64	39.31
Tormenta 4 (T4)	10-11-12-13-14-15-16	Julio	2006	198.65	33.15
Tormenta 5 (T5)	19-20-21-22-23-24-25	Mayo	2008	213.28	26.38
Tormenta 6 (T6)	02-03-04-05-06-07-08	Junio	2008	218.49	29.83
Tormenta 7 (T7)	15-16-17-18-19-20-21	Agosto	2008	122.46	17.9
Tormenta 8 (T8)	15-16-17-18-19-20-21	Abril	2016	136.77	12.87

## Distribución espacio temporal de la precipitación

### *Interpolación Espacial*

#### *Método IDW (Inverse Distance Weighting)*

La interpolación espacial de la precipitación es uno de los temas más estudiado en la hidrología. Existen varias metodologías de interpolación en función de su naturaleza, tipo de datos, etc. La interpolación mediante distancia inversa ponderada (IDW), modelo determinístico y método que será utilizado en este trabajo, determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. El IDW asume que cada punto medido tiene una influencia local que disminuye con la distancia. Se puede también especificar la cantidad de puntos a utilizar directamente o especificar un radio fijo dentro del cual se incluirán los puntos en la interpolación. (Toro & Melo, 2009). Su fórmula es la siguiente:

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^L P_i \cdot \frac{1}{d_{ij}^2}}{\sum_{i=1}^L \frac{1}{d_{ij}^2}} \quad (2)$$

$$L: \#\{i : d_{i,j} < 40 [km]\}$$

Donde,  $P_j$  es la precipitación que se quiere conocer en el punto  $j$ ;  $P_i$  es la precipitación conocida en la estación  $i$ ;  $d_{ij}$  es la distancia entre la estación  $i$  y el punto  $j$ .

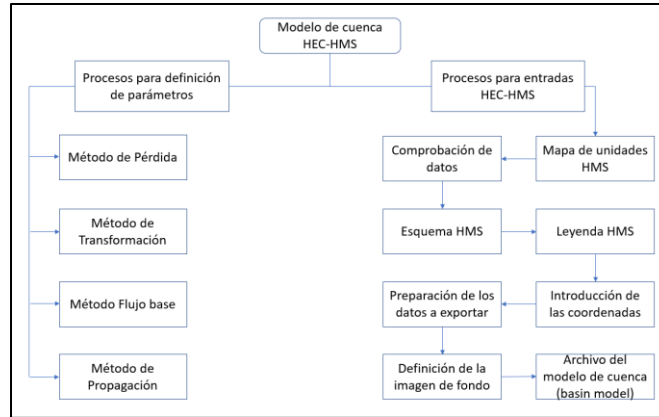
### *Desagregación Temporal*

Los registros de precipitación en la zona de estudio, así como en la mayor parte del territorio Chileno, es de resolución temporal diaria. Para aplicaciones hidrológicas que requieren conocer el hidrograma de creciente, se necesita una resolución temporal de la precipitación en intervalos menores. Por lo tanto, se hace necesario un procedimiento de desagregación temporal de la precipitación diaria a escala subdiaria. Dentro de las alternativas, se tienen los métodos de orden empírico, como las curvas Huff (1967) con su aplicación a Santiago de Chile realizada por Varas (1985). Sin embargo, en este trabajo no se implementó este método, debido a que los resultados mostraron no representar la temporalidad de las tormentas, ya que la distribución de precipitaciones representaba una curva muy suave y continua, lo que no sucede realmente, ya que las lluvias tienden a ser más discontinuas y abruptas. Por esta razón, se decidió ocupar una estación de referencia, la cual posee registros horarios de precipitación, y replicar su patrón de distribución, asumiendo que la precipitación en toda la cuenca tendría la misma distribución temporal y comportamiento que la observada en esta estación, llamada “Cerro Calan”.

### **Modelo de cuenca HEC-HMS**

Una vez que se tiene la cuenca delimitada, se requiere transformarla a un nuevo formato para que puede ser leída por HEC. Esto es, crear el archivo “modelo de cuenca” con el cual se trabajó. Los primeros pasos para llegar al modelo de cuenca es extraer las características físicas de los cauces y las subcuencas, como los son la longitud de los cauces, la pendiente del río, la longitud de cauce principal, el centroide de la cuenca, su elevación, etc. Todo esto para más adelante poder calcular

algunos parámetros que servirán para el modelo de cuenca HEC-HMS. Por último, queda definir los procesos y entradas HMS que se utilizarán en este estudio. En el esquema de la Figura 3 se muestra el proceso a seguir para la definición de los parámetros hidrológicos y las entradas a HEC-HMS.



**Figura 3.** Esquema de procesos para la definición de los parámetros hidrológicos de HEC-HMS.

## Definición de procesos y parámetros

### Modelación

En el proceso de modelación, se busca predecir la escorrentía total que se produce a la salida de la cuenca, generadas a partir de las 5 subcuencas con a tormentas específicas. Para lograr una predicción de la escorrentía, se cuenta con los datos obtenidos a partir de lo mencionado en las secciones anteriores, los cuales serán utilizados en el procedimiento de modelación que se explica, de manera general, en los siguientes puntos.

- 1) Método del Flujo Base: El caudal que se extrae desde la DGA se puede separar en un caudal base y una escorrentía directa debido a las lluvias. Con este método se busca separar ambos caudales, pues las tormentas a modelar y la respuesta se asumen como de escorrentía directa.
- 2) Método de Pérdida: Para estimar las abstracciones se requiere ocupar el Método de Pérdida Curva Número y así determinar la precipitación que se genera solo por escorrentia directa.
- 3) Método de Transformación: Para este método se requiere emplear el Hidrograma Unitario de Snyder, incluido el programa HEC-HMS obteniendo así la escorrentía directa a través de un hidrograma de salida. Se probaron diferentes hidrogramas, el propuesto por el SCS-CN y el hidrograma de Snyder, siendo este último el que mejor se comportó
- 4) Método de propagación: Se empleó el método de Muskingum que representa la distribución geográfica del caudal a lo largo del cauce por medio de sus parámetros de ponderación y tránsito.

## Calibración y Validación

Para la calibración del modelo, se trabaja con los datos horarios registrados en la estación “Mapocho en los Almendros”. Para evaluar el proceso se escogen cuatro de las seis tormentas para

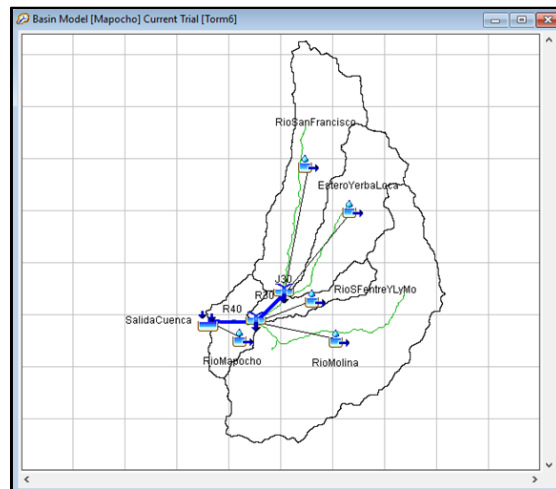
utilizarlas en la fase de calibración y el resto en la validación. Sin embargo, como son pocos los eventos que se tienen para el análisis se realizaron combinatorias, de forma de tener más valores para encontrar alguna convergencia o referencia. De todas las combinaciones posibles, que son 15, se seleccionaron 7 de estas, y en cada una se obtuvo cuatro parámetros de calibración para las cuatro tormentas elegidas en cada subcuenca y, con ese mismo valor, se validó el modelo con las dos tormentas restantes. La función objetivo que se opta por ocupar es Percent Error Peak, debido a que simula de mejor manera el caudal máximo de la tormenta y, se escogió el método de Gradiente-Univariante como método de búsqueda.

## 4. RESULTADOS

### Preprocesos

#### *Delimitación de la cuenca y conceptualización HEC-HMS*

La cuenca del Río Mapocho se subdividió en cinco subcuencas: Río San Francisco antes junta estero Yerba Loca (RSF), Estero Yerba Loca antes junta río San Francisco (EYL), Río San Francisco entre confluencia estero Yerba Loca y río Molina (RSFeYLyMo), Río Molina antes junta río San Francisco (RMo), y Río Mapocho entre confluencia río San Francisco y Los Almendros (RMap). Se presenta en la Figura 4 el modelo de cuenca (basin model) con las entradas HMS, esquema de la cuenca, las leyendas y los archivos de forma de fondo, como subcuencas y cauces.

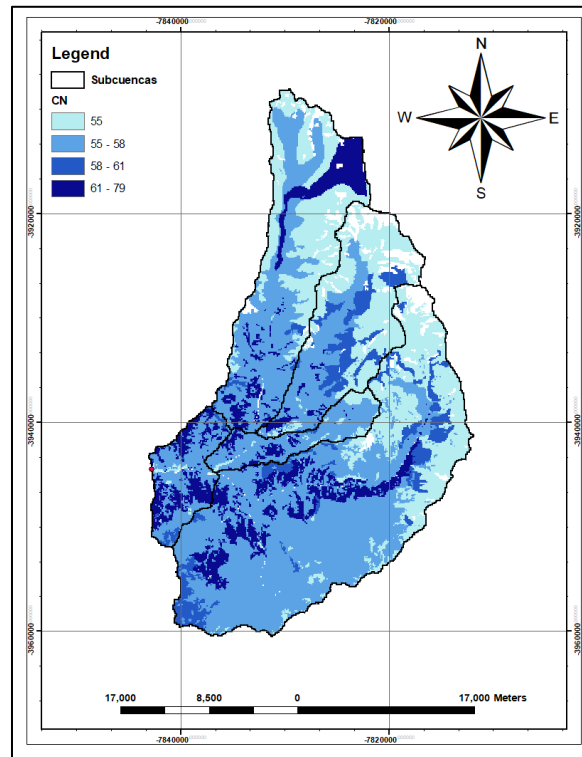


**Figura 4.** Modelo de Cuenca (“Basin Model”).

### Definición de procesos y parámetros

#### *Método de Pérdidas*

En la Figura 5 se muestra la intersección, realizada en ArcGIS, entre la de los valores de CN del SCS y el mapa de uso de suelos obtenido desde el IDE (Ministerio de Bienes Nacionales, 2006). Con esto, se realizó una ponderación para finalmente obtener una aproximación al valor que tendría el número de curva para las distintas subcuencas de estudio. Estos fueron los valores finales que se utilizaron como entrada para el modelo en HEC-HMS. Una vez obtenido el valor de CN, se calculó el valor de la Ia y fue ingresada, junto con el valor de CN, como parámetros iniciales al programa, valores que se muestran en la Tabla 2.



**Figura 5.** Número de Curva discretizado para la Cuenca.

**Tabla 2.** Tabla con los valores iniciales de CN y Ia.

Subcuenca	CN <sup>1</sup>	Ia <sup>2</sup>
Rio Molina	68.98	22.85
Rio Mapocho	68.66	23.18
Rio Sf e YL y Mo	71.04	20.70
Estero Yerba Loca	74.02	17.83
Rio San Francisco	74.39	17.49

### *Método de Transformación*

Para el método de transformación lluvia-escorrentía, se utiliza el Hidrograma Unitario de Snyder. Para calcular los parámetros que pide este modelo, se necesita la pendiente media de todas las subcuencas, la longitud del cauce principal, pendiente del río, ubicación del centroide. Con estos valores se obtuvo el tiempo de retardo  $T_p$  y el coeficiente peak  $C_p$  para el cálculo del Hidrograma de salida de la cuenca. Éstos son ingresados al software HEC-HMS, como parámetros iniciales de entrada, y se muestran en la Tabla 3.

Estos dos parámetros del método de Transformación sumado con los otros dos parámetros del método de Pérdida corresponden, en total, a los cuatro valores que serán ocupados como parámetros de calibración en este estudio, para cada tormenta y subcuenca.

<sup>1</sup> CN: Valor de Curva Número, primer parámetro de calibración.

<sup>2</sup> Ia: Abstracción inicial, segundo parámetro de calibración.



**Tabla 3.** Parámetros requeridos para el Hidrograma de Snyder.

Snyder			
L, centroide [km]	Ct	Tp <sup>3</sup> [h]	Cp <sup>4</sup>
15.81	2.85	13.81	0.69
10.98	2.61	11.77	0.69
13.54	2.53	10.93	0.69
8.98	2.40	8.21	0.69
2.81	2.60	5.20	0.69

#### *Método de propagación*

El método de Muskingum también depende de dos parámetros, los cuales son X, que es un factor de ponderación y K que es un coeficiente de proporcionalidad. Según la literatura, el valor de X por recomendación se ocupa 0,2. Por otro lado, el valor de K, que depende de la celeridad de la onda, se calcula a través del caudal de entrada y el área de la sección transversal del río. Se consiguió el valor de la constante K para cada una de las tormentas, como se muestran a continuación en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Valores de K para río San Francisco y río Mapocho en cada tormenta.

Tormenta	San Francisco K30 [h]	Mapocho K40 [h]
T2	0.24	0.43
T4	0.15	0.27
T5	0.15	0.26
T6	0.15	0.26
T7	0.19	0.33
T8	0.17	0.31

#### **Calibración**

En la Tabla 5 se muestran los valores de los parámetros iniciales que se ocuparon para comenzar a iterar en el proceso de calibración. Para llevar a cabo esto se tienen los siete escenarios de calibración señalados en la Sección 3. A modo de ejemplo, la Tabla 6 muestra los parámetros que resultan del escenario de calibración 6 se calibra con tormentas T2, T4, T5 y T8 y se valida con T6 y T7). De estos resultados, se desprende que los valores de los cuatro parámetros calibrados no se alejaron demasiado de los valores iniciales. Con respecto al valor de  $t_p$ , en las subcuencas 1, 3, 4 y 5 los valores de los cuatro parámetros no tuvieron un cambio relevante (mayor cambio porcentual fue de 2,7%). Sin embargo, el valor de  $t_p$  en la subcuenca 2 varió un 25%, esto puede deberse a que en el cálculo de dicho valor influye linealmente la inclinación y esta subcuenca tiene la pendiente más alta de las cinco subcuencas. El cambio en el valor de Cp en todas las cuencas es esperable debido a que en todas las subcuencas se propuso el mismo valor inicial. En la subcuenca 5 por ejemplo, el cambio de 8,7% en el valor de  $I_a$ , es consecuencia del cambio en torno al 3% del valor de CN, ya que  $I_a$  es función de CN. Estos cambios se deben a que inicialmente para obtener el valor de CN se realizó una estimación para sus valores en los distintos suelos y su uso en la cuenca.

<sup>3</sup> Tp: Tiempo de retardo de Snyder, tercer parámetro de calibración.

<sup>4</sup> Cp: El coeficiente de peak es un término adimensional y varía entre 0,56 y 0,69. Cuarto parámetro de calibración.

**Tabla 5.** Parámetros iniciales de calibración

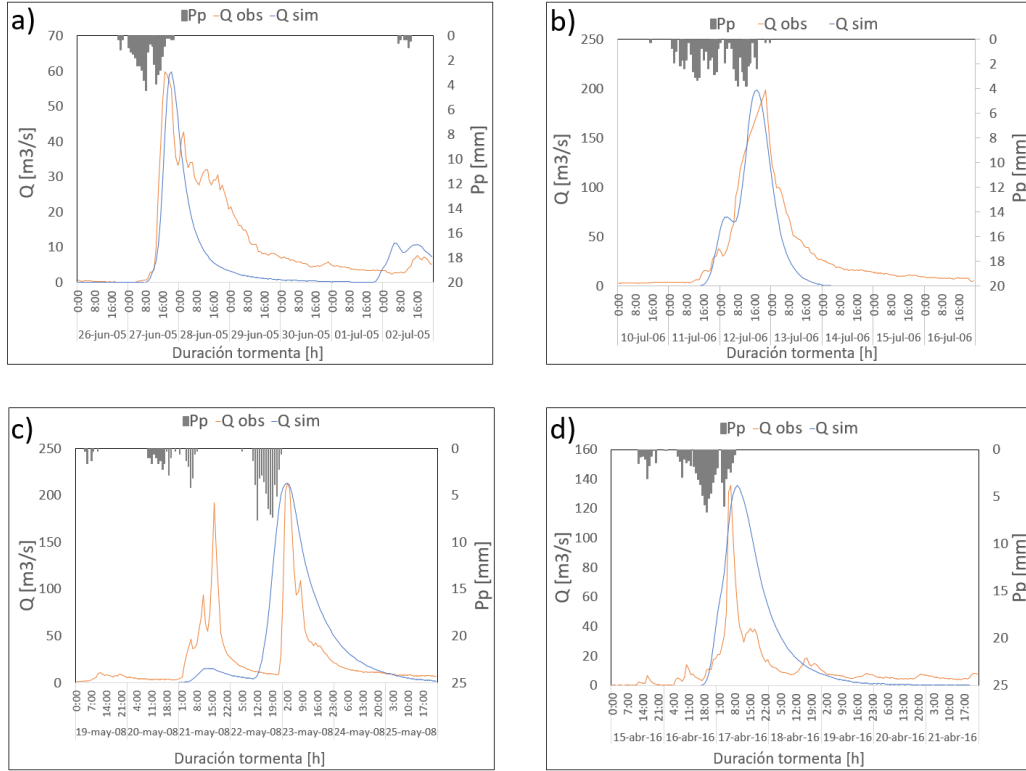
Subcuenca	tp [h]	Cp	Ia	CN
Rio San Francisco	6.5	0.69	17.4	74.3
Estero Yerba Loca	5.8	0.69	17.8	74.0
Rio SF entre YL y Mo	4.6	0.69	20.7	71.0
Rio Mapocho	2.7	0.69	23.1	68.6
Rio Molina	6.0	0.69	22.8	68.9

**Tabla 6.** Parámetros escenario 6

Subcuenca	Nombre	tp [h]	Cp	Ia	CN
1	RioSanFrancisco	6.4	0.62	18.0	73.7
2	EsteroYerbaLoca	7.2	0.62	16.6	75.2
3	RioSFentreYLyMo	4.5	0.82	20.7	71.0
4	RioMapocho	3.6	0.72	22.1	69.6
5	RioMolina	6.2	0.62	20.8	70.8

En la Figura 6, se presentan los resultados de la simulación en HEC-HMS del escenario 6. En color azul se observa el resultado de la escorrentía simulada y en color naranja el caudal en la estación de aforo “Mapocho en los Almendros”. Con una inspección visual se ve claramente que la curva simulada alcanza el valor del caudal máximo observado, el valor del tiempo al que llega al caudal peak es muy cercano y en cuanto al volumen del hidrograma existe una diferencia entre el observado y simulado. Por ejemplo, el volumen de los hidrogramas a) y b) de la Figura 6 difieren en 43,67% y 32,11% respectivamente, con relación al volumen observado. Cabe mencionar también que la Figura 6 c) el hidrograma observado aparece con dos valores que se pueden considerar peak, sin embargo, el programa sólo simuló el valor mayor de los dos peak, ya que la función objetivo escogida le da más preponderancia al valor máximo. Además, el primer peak no se observa debido a que ese caudal está asociado a las pérdidas de precipitación presentes en el día anterior a que se genere ese caudal. Por otro lado, en Figura 6 d) se tiene un error en el volumen de 55,89%. Una posible causa del valor de este error es que la cuenca para esa tormenta actuó de manera muy eficaz en cuanto a la capacidad de infiltración de los suelos, ya que la masa de agua observada es menor en comparación a la simulada. También la pobre cobertura de estaciones pluviográficas en la zona es un serio impedimento cuando se desea capturar la evolución espacio-temporal de una tormenta a la escala de modelación requerida (en este caso horaria).

En la Figura 7, se muestran los errores del caudal máximo, volumen y tiempo al peak, por tormenta, dejando evidencia estadística de lo mencionado en el párrafo anterior. El error en el caudal máximo es 0% para las cuatro tormentas, pero la diferencia de tiempo en que se llega al caudal máximo para T2, T4, T5 y T8 son 3, 4, 2 y 3 horas, respectivamente. En resumen, se logró ajustar la calibración para el modelo en el punto de salida, que es el principal objetivo de esta etapa.



**Figura 6.** Resultados de la calibración del escenario 6: a) Tormenta 2; b) Tormenta 4; c) Tormenta 5; d) Tormenta 8

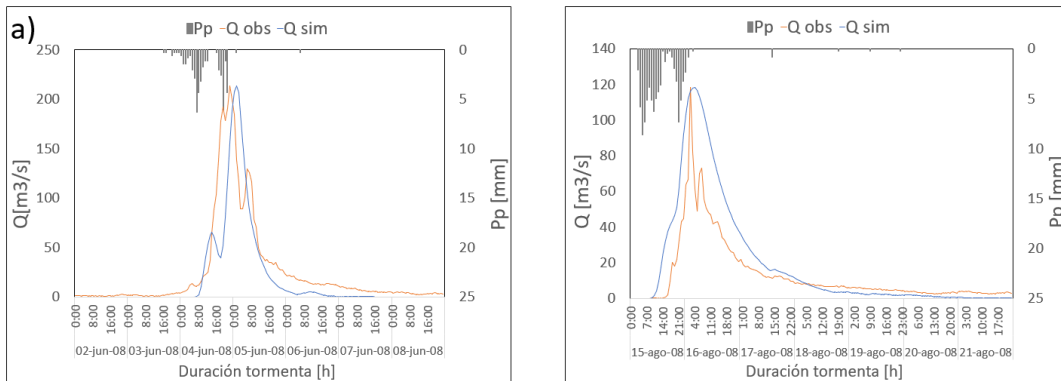
Tormenta 2					Tormenta 4				
Medida	Simulado	Observado	Diferencia	Error [%]	Medida	Simulado	Observado	Diferencia	Error [%]
Volumen [MM]	5,85	10,38	4,53	43,67	Volumen [MM]	21,33	28,45	10,09	32,11
Caudal peak [m3/s]	59,8	59,8	0,0	0,0	Caudal peak [m3/s]	195,5	195,5	0,0	0,0
Tiempo al peak	27jun2005, 20:00	27jun2005, 17:00	3 horas		Tiempo al peak	12jul2006, 17:00	12jul2006, 21:00	4 horas	
Tormenta 5					Tormenta 8				
Volumen [MM]	29,14	23,85	5,30	22,20	Volumen [MM]	17,20	11,03	6,17	55,89
Caudal peak [m3/s]	213,3	213,3	0,0	0,0	Caudal peak [m3/s]	135,6	135,6	0,0	0,0
Tiempo al peak	23may2008, 02:00	23may2008, 02:00	0 horas		Tiempo al peak	17abr2016, 09:00	17abr2016, 06:00	3 horas	

**Figura 7.** Error en calibración para tormentas T2, T4, T7 Y T8

## Validación

La validación del modelo para la cuenca “Mapocho en los Almendros” se realiza con las otras dos tormentas señaladas en cada escenario. En la Figura 8 se muestran la tormenta 6 y la tormenta 7 del escenario de calibración 6. Se aprecia que los resultados son similares al de la calibración, ya que el valor de caudal simulado es cercano al valor del caudal máximo registrado, el tiempo en que se alcanza ese valor también lo es, pero el volumen difiere entre lo simulado y lo observado. En la Figura 8 a) el error del volumen es 23,58% donde el volumen simulado es menor que el observado y, en la Figura 8 b), el error en el volumen corresponde a un 24,23%, lo que también puede deberse a la capacidad eficaz de infiltración de los suelos debido a que el volumen observado es menor que el simulado. Sin embargo, se alcanzó en su totalidad el valor del caudal máximo que se obtiene al transformar la precipitación en escorrentía, valor con el que se puede estimar una crecida potencial.

Los errores de validación se muestran en la Figura 9. Aquí se observa que el tiempo en que se llega al caudal peak son 3 horas de diferencia para ambas tormentas, y la diferencia entre el caudal observado y simulado es de 0%. Debido a la baja diferencia de error entre los valores simulados y observados en este proceso, se puede concluir que los parámetros calibrados logran representar las características de la cuenca y subcuencas. En conclusión, el proceso de validación se llevó a cabo y se cumplió satisfactoriamente, porque los resultados obtenidos en este proceso son similares e incluso mejoran con respecto al proceso de calibración.



**Figura 8.** Resultados validación del escenario 6: a) Tormenta 6; b) Tormenta 7

Tormenta 6					Tormenta 7				
Medida	Simulado	Observado	Diferencia	Error [%]	Medida	Simulado	Observado	Diferencia	Error [%]
Volumen [MM]	17,79	23,29	5,49	23,58	Volumen [MM]	18,23	14,68	3,56	24,23
Caudal peak [m3/s]	213,2	213,2	0,0	0,0	Caudal peak [m3/s]	118,4	118,4	0,0	0,0
Tiempo al peak	05jun2008, 01:00	04jun2008, 22:00	3 horas		Tiempo al peak	16ago2008, 05:00	16ago2008, 02:00	3 horas	

**Figura 9.** Error en validación para tormentas T5 Y T6

## 5. CONCLUSIONES

HEC-HMS cuenta con varias funciones objetivo, que se pueden elegir según el fin del trabajo a realizar. Por ejemplo, en este estudio se buscaba encontrar el valor máximo de caudal para obtener una aproximación de las crecidas que pueden generarse a partir de datos de precipitación, por lo que la función objetivo más adecuada es la que da más peso al caudal máximo (Percent Error Peak) y genera los parámetros a partir de ello. Sin embargo, si el objetivo hubiese sido predecir el volumen, el programa cuenta con una función más adecuada para esto. El ejercicio conjunto de calibración y validación del modelo HEC-HMS, en la cuenca del río Mapocho, evidencia que se pueden tener parámetros estables para el modelo.

Respecto a las evaluaciones realizadas, es relevante destacar que las simulaciones hechas con respecto al caudal real son bastante apropiadas para el objetivo con el que estas fueron generadas, debido a que en todas las tormentas el valor del caudal máximo se simula sin errores, no así para el tiempo en que se genera este caudal máximo, debido a que cierto porcentaje de tormentas llegaban con un sesgo apreciable, pero ninguno con más de cuatro horas de diferencia.

Por último, sería interesante para poder ampliar el estudio, así como para poder mejorar el modelo hidrológico, realizar la incorporación de más y nuevos eventos, implementar el modelo con más

parámetros y funciones como puede ser por ejemplo la opción de incorporar el elemento ‘nieve’ (“*Snowmelt Method*”) o la utilización de un mayor número de datos, mediante la inclusión de otras o de nuevas estaciones meteorológicas, pluviómetros, etc. y que no han sido incluidos en este estudio.

## REFERENCIAS

CADE-IDEPE, 2004. Diagnóstico y clasificación de los cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Maipo, Santiago, Chile: Gobierno de Chile. Ministerio de Ibras Públicas. Dirección General de Aguas.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2013. *Explorador Climático*. [En línea] Available at: <http://explorador.cr2.cl/> [Último acceso: 30 Junio 2019].

Chow, V. T., 1994. *Hidrología Aplicada*. Santa Fe de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL.

Corporación OSSO, 1994. *DesInventar*. [En línea]. Available at: <https://www.desinventar.org/es/> [Último acceso: 30 Junio 2018].

DGA, 2019. *DGA*. [En línea]. Available at: <http://www.dga.cl/Paginas/default.aspx>. [Último acceso: 2019].

Freites, J. G., 2019. *CursosGeoMin*. [En línea]. Available at: <http://www.cursosgeomin.com.ve/recmin-idwa/>. [Último acceso: 30 Mayo 2019].

Huff, 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, 3(4), pp. 1007-1019.

Mendoza et. al., 2012. *Uncertainty in flood forecasting: A distributed modeling*, Temuco.

Ministerio de Bienes Nacionales, I. d. d. g. I. C., 2006. *IDE Chile*. [En línea] Available at: <http://www.ide.cl/descarga/capas.html> [Último acceso: 20 julio 2018].

Ollero Ojeda, A., 1997. CRECIDAS E INUNDACIONES COMO RIESGO HIDROLÓGICO. *Lurralde inves. esp.*, 20(1), pp. 261-283.

Ponte Ramírez, R. R. & Bosque Sendra, J., 1997. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LA VARIABLE PRECIPITACIÓN EN UN SIG. *Estudios Geográficos*, 58(226), pp. 227-255.

Sánchez, F., 2001. *Análisis y evaluación comparativa de siete modelos precipitación-escorrentía en la cuenca del río Malleco, IX Región*, Talca: Biblioteca Central Universidad de Talca.

Socolofsky, S. A. E. & E. D., 2001. Disaggregation of Daily Rainfall for Continuous Watershed Modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(4), pp. 300-309.

SRTM, D. S., 2004 - 2019. *SRTM Data Search*. [En línea]. Available at: <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>. [Último acceso: 1 junio 2018].

Stowhas B., L., 2016. *Fundamentos de Hidrología Aplicada*. Julio 2016 ed. Valparaíso: Editorial USM.

Toro, G. A. & Melo, C. E., 2009. Aplicación de métodos de interpolación geoestadísticos para la predicción de niveles digitales de una imagen satelital con líneas perdidas y efecto sal y pimienta. *Tecnura*, 12(24), pp. 55-67.

US Army Corps, 2000. *Technical Reference Manual*, Davis, CA: Hydrologic Engineering Center.

US Army Corps, o., 2013. *User's Manual*. 10.1 ed. Davis CA.

Varas E., 1985. *Hietogramas de tormentas de diseño*. Concepción, VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica.