



UNC



FCEFYN



CETA

CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA a corto y largo plazo del Dique La Viña

Práctica Supervisada  
Ingeniería Civil

OCTUBRE 2019

Autor: Juan Pablo Guida  
Director: Dr. Msc. Ing Nicolás Guillén  
Supervisor Externo: Msc. Ing. Javier Álvarez

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a la Universidad Nacional de Córdoba, que me permitió formarme personal y profesionalmente de forma gratuita, siendo una casa de estudios para todos, con alto prestigio a nivel internacional y con más de 400 años de historia.

También quiero expresar mi agradecimiento a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales por el excelente nivel académico, profesional y humano que ofrece para la formación como Ingeniero Civil, incluyendo a tantos profesores que con mucha dedicación transmiten sus conocimientos.

Al Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) y el equipo humano que la compone, donde tuve el gusto de trabajar como ayudante hace varios años, en esta oportunidad desarrollar mi Práctica Supervisada y donde me gustaría especializar y continuar mi formación.

Al motor que me motivó a seguir adelante y no bajar los brazos: mi familia. Con su apoyo incondicional pude cumplir este objetivo, que se veía tan lejos y un buen día llegó. Este logro es por y para ellos.

Un agradecimiento especial a mi amigo de hace tantos años, con quien tuve el gusto de compartir experiencias académicas y no académicas, y quien fue tutor de este trabajo: Nicolás Guillén. Gracias Nico por estar al lado mío prácticamente desde los inicios de mi carrera, siempre ofreciéndome tu ayuda, tus conocimientos, tu tiempo y paciencia.

Finalmente agradecer a todos mis amigos, a quienes no voy a nombrar particularmente porque tengo la suerte de que sean muchos y no quiero olvidarme de ninguno. Gracias, por esos mates, charlas y horas de estudio compartidos, que hicieron este camino más llevadero.

## RESUMEN

La disponibilidad del recurso hídrico es fundamental para el desarrollo de actividades humanas, como provisión de agua potable, riego, regulación de caudales durante crecidas y producción de energía hidroeléctrica. La provincia de Córdoba se caracteriza por tener un potencial hídrico de importancia, contando con numerosos embalses que cumplen las funciones antes mencionadas. Como la cantidad de agua disponible en una cuenca depende de la época del año considerada y de las condiciones climáticas que caracterizan épocas de abundantes precipitaciones o sequías, surge la necesidad de estudiar el aprovechamiento hídrico y el manejo adecuado de los diques.

En este trabajo, se analiza la cuenca del Dique La Viña (Valle de Traslasierra), realizando un detallado estudio hidrológico que permita desarrollar herramientas y modelos, los cuales contribuyen a una adecuada gestión sustentable de los recursos hídricos.

Se describe el área de estudio, las características de la cuenca y del dique; además, se desarrollan aquellos conceptos y métodos teóricos a ser aplicados durante el análisis de datos y estudios de predicción para la modelación (tales como el ciclo hidrológico, el proceso de transformación lluvia-caudal, el tránsito de caudales, etc). Se ha sistematizado y actualizado la información hidrometeorológica existente en la cuenca de estudio, de tal manera de poder ajustar adecuadamente cada uno de los modelos y herramientas desarrolladas.

Se han desarrollado modelos de manejo de embalse de corto (semanal) y largo plazo (semestral): por un lado se presenta un modelo de predicción semanal del comportamiento del dique ante precipitaciones en la cuenca para manejo de eventos severos; y además se propone un modelo de predicción de niveles del embalse semestral para planificación de embalses y desembalses a partir de la utilización de las precipitaciones pronosticadas a partir de modelos climáticos globales.

## INDICE

### CAPÍTULO 1 – MARCO TEÓRICO

1.1	Introducción .....	2
1.2	El Dique La Viña .....	3
1.2.1	<i>Ubicación</i> .....	3
1.2.2	<i>Cuenca La Viña</i> .....	4
1.2.3	<i>Presa y órganos de descarga</i> .....	5
1.3	Ciclo Hidrológico .....	6
1.3.1	<i>Precipitación</i> .....	6
1.3.2	<i>Escurrimiento - Caudal</i> .....	7
1.4	Modelos de transformación lluvia – caudal .....	8
1.4.1	<i>Método racional</i> .....	9
1.4.2	<i>Parámetros de una cuenca</i> .....	10
1.4.3	<i>Método del Hidrograma Unitario</i> .....	11
1.5	Métodos de propagación de caudales .....	12
1.5.1	<i>Método de Pulz - propagación de caudales en embalses</i> .....	12
1.5.2	<i>Método de Muskingum Cunge - propagación de caudales en cauces</i> .....	12
1.6	Objetivos .....	15
1.6.1	<i>Objetivo general</i> .....	15
1.6.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	15
1.7	Metodología .....	15

### CAPÍTULO 2: SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN HISTÓRICA DEL EMBALSE

2.1	Introducción .....	16
2.2	Serie de niveles históricos del embalse .....	16
2.3	Cálculo de volúmenes y caudales ingresados medios mensuales .....	18
2.4	Estimación de precipitaciones medias mensuales .....	21
2.5	Estimación de coeficientes de escurrimiento medios mensuales .....	25

### **CAPÍTULO 3: MODELO DE MANEJO DE EMBALSE DE CORTO PLAZO**

3.1	Introducción .....	27
3.2	Explicación del modelo hidrológico para el manejo de embalses a corto plazo .....	27
3.3	Selección de eventos extremos .....	28
3.3.1	<i>Evento del 27/12/2018</i> .....	28
3.3.2	<i>Evento del 31/12/2017</i> .....	31
3.3.3	<i>Evento del 9/2/2018</i> .....	33
3.3.4	<i>Evento del 4/3/2019</i> .....	35

### **CAPÍTULO 4: MODELO DE MANEJO DE EMBALSE DE LARGO PLAZO**

4.1	Introducción .....	38
4.2	Sistema de pronóstico estacional Multi-Modelo NMME .....	38
4.2.1	<i>Descripción</i> .....	38
4.2.2	<i>Aplicación del NMME en la cuenca</i> .....	39
4.2.3	<i>Aplicación de modelo hidrológico y análisis de resultados</i> .....	41

### **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**

5.1	Técnicas del trabajo realizado .....	44
5.2	Personales de la Práctica Supervisada .....	44
5.3	Trabajos futuros .....	45

<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	46
---------------------------	----

## CAPÍTULO 1 – MARCO TEÓRICO

### 1.1 Introducción

La provincia de Córdoba cuenta con numerosos embalses y represas alimentados por ríos que nacen en sus cordones montañosos, con aportes variables durante el año. Estos espejos de agua se utilizan con varios fines, entre los que se destaca el riego, la provisión de agua para grandes ciudades, regulación de caudales durante las crecidas y la producción de energía hidroeléctrica. Entre los diques más importantes de la provincia, pueden mencionarse el San Roque, Los Molinos, Río Tercero, La Quebrada, La Viña y Cruz del Eje.

Las cuencas tienen su mayor aporte de caudal durante los meses de verano, donde las lluvias pueden variar de acuerdo con la zona y el año. Existen períodos de grandes sequías y otros con eventos extremos y crecidas, en los que se debe regular la escorrentía. Si a esta variabilidad de agua que ingresa a los diques, se le suman los cambios de uso de suelo en los últimos años, el consecuente impacto ambiental, el crecimiento urbano y la necesidad del hombre de contar con una cierta cota para sus actividades, se observa que el manejo de nivel de los embalses requiere una especial atención.

El potencial hídrico de la provincia de Córdoba es un recurso muy valioso, que debe analizarse y estudiarse para aprovecharlo adecuadamente, permitiendo disponibilidad de agua en todas las épocas del año, no sólo en cantidad sino en calidad. La tarea del manejo de embalses ha sido desarrollada mediante el trabajo conjunto de organismos como EPEC (Empresa Provincial de Energía de Córdoba), consorcios de riego y abastecimiento de agua, y la Secretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Servicios Públicos; estos entes poseen una amplia base de datos de parámetros hidrológicos tales como precipitación en distintas zonas de la provincia, cotas y erogaciones de los diques a lo largo de la historia.

Particularmente en este trabajo, se estudió la cuenca La Viña perteneciente al Valle de Traslasierra, cuyo dique que lleva el mismo nombre tiene la principal función de generación de energía hidroeléctrica y riego para la zona. Debido a su envergadura, este embalse es uno de los más importantes de Córdoba y a partir del análisis de la información disponible, se realizó un estudio hidrológico detallado cuyo principal objetivo fue el desarrollo de herramientas y modelos que permitiesen la optimización en el uso y la gestión de los recursos hídricos de manera sustentable.

## 1.2 El Dique La Viña

Este dique, también conocido como embalse Ing. Luis Antonio Medina Allende en honor a su impulsor, terminó de construirse en el año 1944. 8 años más tarde, comenzó a emplazarse la Central Hidroeléctrica La Viña, en el marco del Primer Plan Quinquenal donde se impulsaron proyectos energéticos que involucraron otros diques de la provincia. La obra permitió el progreso del oeste provincial.

La central hidroeléctrica posee el segundo paredón más alto de Argentina, con 106 m de alto por 317 m de largo, se sostiene sobre una base de 35 m de ancho y su coronamiento es de 4 m de ancho. Para clasificar la presa según el material empleado, la misma es de hormigón armado; según la forma de resistir el empuje, es una presa en arco de radio variable y ángulo constante. El muro de contención consta de tres secciones: una principal curva, otra sección de gravedad y la sección vertedero. El espejo de agua tiene un volumen de 230 Hm<sup>3</sup>, en una superficie de 1.050 ha. Su franja de operación normal oscila entre los 100 y los 80 m de profundidad.

### 1.2.1 Ubicación

El Dique La Viña se encuentra al oeste de la provincia de Córdoba, en el Valle de Traslasierra. Dista 180 km de la ciudad de Córdoba y a 25 km de la ciudad de Villa Dolores (ver Fig. 1). Está emplazado sobre el curso del río de los Sauces en el departamento San Alberto. El espejo de agua ocupa aproximadamente 1050 hectáreas.

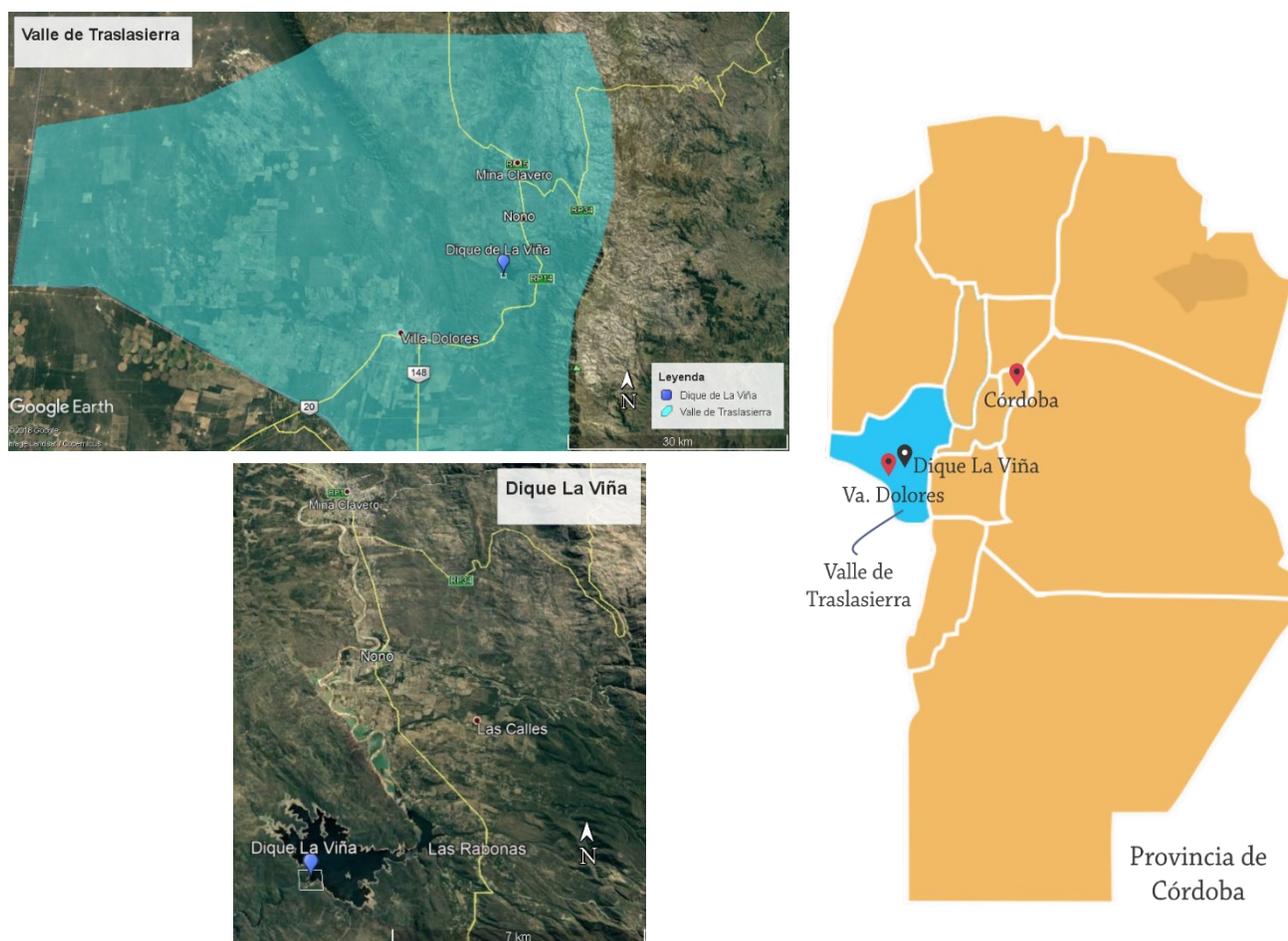


Fig. 1 - Ubicación del Dique La Viña y Valle de Traslasierra (Imágenes de Google Earth)

### 1.2.2 Cuenca La Viña

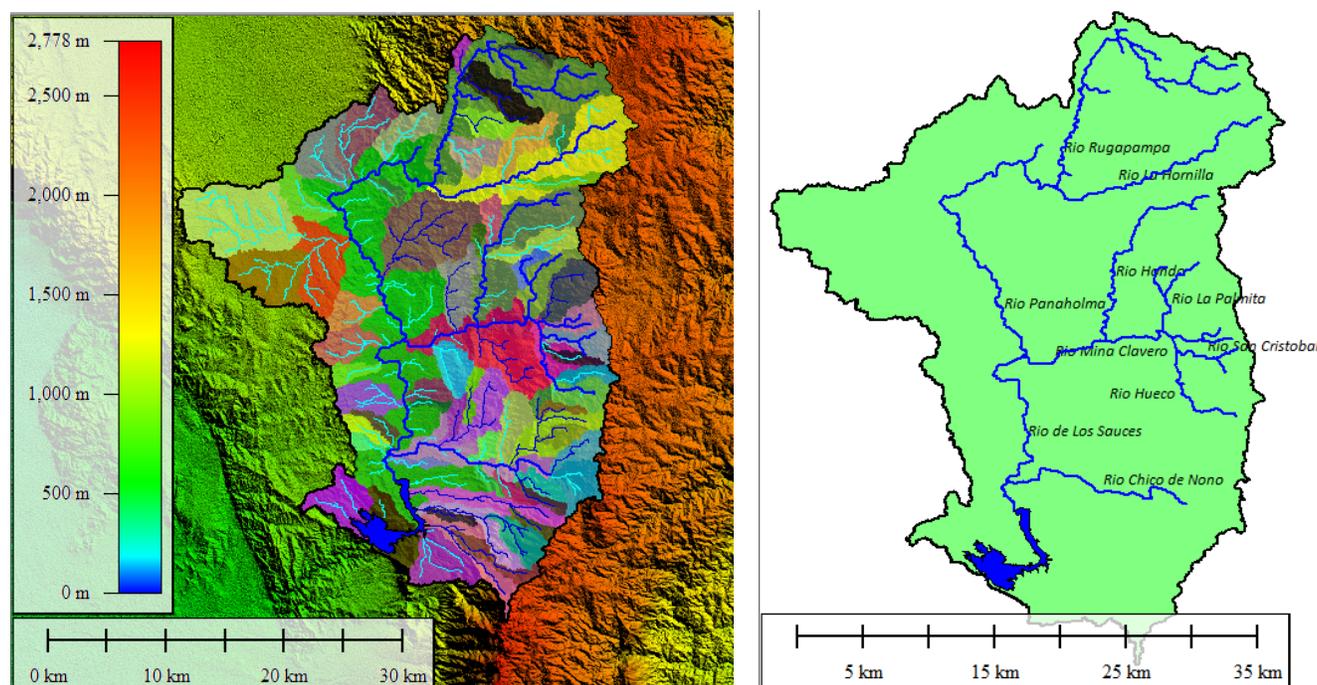
A través de la delimitación del área de aporte al dique, se pudo determinar que la cuenca tiene una superficie de 888 km<sup>2</sup>.

Los principales cursos de agua son los ríos Mina Clavero y Panaholma, los cuales se unen para formar el Río de los Sauces. Se pueden mencionar otros afluentes importantes a este sistema, como ser el Río Rugapampa, La Hornilla, La Palmita, San Cristobal, Hueco y el Río Chico de Nono. Estos ríos nacen en las Sierras Grandes de Córdoba, siguiendo la pendiente natural Oeste – Este, y hacia el sur a menores alturas, hasta desembocar en el Dique La Viña.

En la Fig. 2 se puede observar la delimitación de la Cuenca La Viña realizada con el software Gobar Mapper, a partir de datos del IGN (Instituto Geográfico Nacional).

El procedimiento para la modelación de la cuenca consistió en seleccionar imágenes correspondientes a la zona de Traslasierras, provistas por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) en su página web, partiendo de un MDE (Modelo Digital de Elevación) en complemento con la SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con una resolución espacial de 30 metros y precisión vertical de aproximadamente 3 metros. Estas imágenes se procesaron en Global Mapper, obteniendo como resultado numerosos cursos de agua según las curvas de nivel y sus determinadas subcuencas.

Con la ayuda de Google Earth se ubicó el vertedero del Dique la Viña y demás coordenadas de referencia, para poder delimitar la cuenca e identificar los principales cursos de agua. El resultado permitió diferenciar cursos ocasionales de agua por escorrentía superficial, arroyos y ríos, agrupando las subcuencas y obteniendo el área total de la Cuenca La Viña, como puede verse en las imágenes.

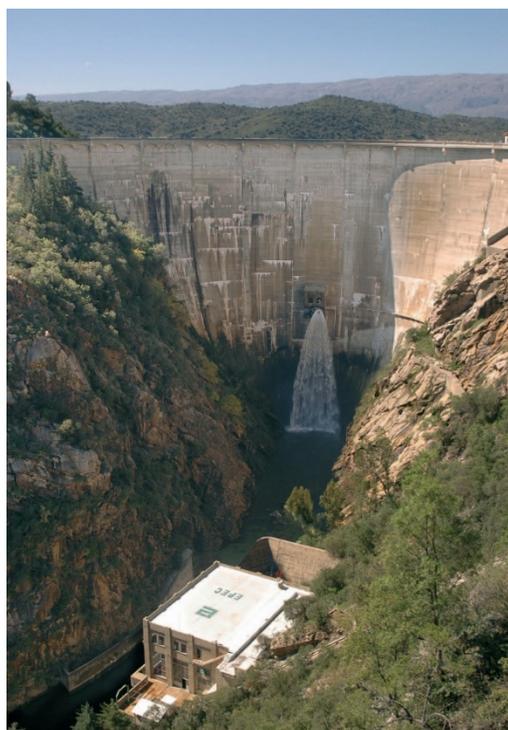
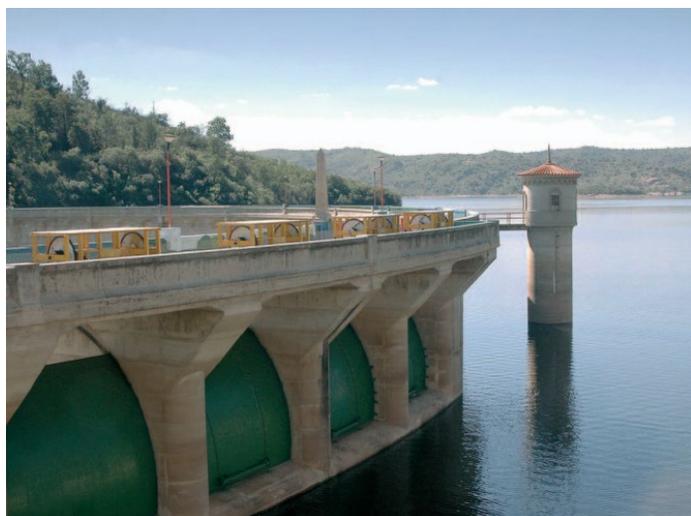


**Fig. 2** – Izquierda: Cursos de Agua y Subcuencas La Viña / Derecha: Ríos de la Cuenca La Viña

### 1.2.3 Presa y órganos de descarga

La zona se caracteriza por tener altas pendientes en tramos cortos, con lo cual, ante crecidas y eventos extremos el agua desciende rápidamente en un breve período de tiempo. El módulo medio anual de caudal que ingresa a la presa es de  $5,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . La regularización de los ríos a través del almacenaje de sus aguas en el dique hace que el 90% del caudal medio anual se aproveche.

Por un lado, el embalse permite el riego de más de 24.000 hectáreas y la provisión de agua para consumo a la ciudad de Villa Dolores. Por otro, la Central Hidroeléctrica La Viña opera fundamentalmente en los picos del despacho de carga, cuando se requiere generar rápidamente. Está equipada con dos turbinas Francis de eje vertical de 8.000 kW, con un rodete de 1.18 mm de diámetro. Estas turbinas cuentan con dos descargadores de sobrepresión por golpe de ariete (descargadores sincrónicos que protegen la tubería). Los equipos generadores están conectados a una estación transformadora que cuenta con dos autotransformadores de tensión (a 66 y 132 kV). Finalmente, dos líneas de 66 kV y dos de 132 kV se encargan de transportar un promedio de 36 millones de kWh por año.



**Fig. 3** - Dique La Viña aguas arriba (compuertas) y aguas abajo (válvulas) FUENTE: EPEC

El vertedero tiene cresta elevada a 95 metros sobre el lecho del río. Puede evacuar  $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$  por medio de 8 compuertas de  $6,50 \text{ m} \times 5,50 \text{ m}$  cada una. Si se requiere la evacuación de agua, las compuertas pueden operarse en forma simultánea o alternativa a la Central. El muro cuenta además con dos válvulas de chorro hueco de 1 m de diámetro cada una, que se accionan cuando no se puede evacuar agua por medio de las máquinas o del vertedero. Finalmente se disponen dos válvulas de 60 cm de diámetro, ubicadas en la base del murallón, las cuales tienen la función de descargadores de fondo. La obra de toma cuenta con 16 rejillas de  $4,40 \text{ m} \times 1,60 \text{ m}$  que filtran el agua y protegen las turbinas. Para realizar la tarea de mantenimiento de las máquinas, existe una compuerta (accionada electromecánicamente) que permite el cierre aguas arriba de la Central.

### 1.3 Ciclo Hidrológico

El ciclo del hidrológico describe el proceso natural mediante el cual, el agua presente principalmente en lagos, ríos y océanos se evapora cuando es calentada por el sol, aportando vapor de agua a la atmósfera; el aire caliente y húmedo se eleva y así se forman las nubes, por condensación. El agua contenida en las nubes precipita, dando lugar a la lluvia y a la nieve. Observando la Fig. 4, se pueden ver con más detalle los numerosos factores que comprenden el ciclo del hidrológico.



Fig. 4 - Ciclo Hidrológico (Fuente: USGS)

#### 1.3.1 Precipitación

La precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo, pero no virga, neblina ni rocío, que son formas de condensación y no de precipitación. La cantidad de precipitación sobre un punto de la superficie terrestre es llamada pluviosidad, o monto pluviométrico. Para determinar las precipitaciones pluviales de corta duración y alta intensidad se utilizan pluviómetros y los pluviógrafos. La precipitación pluvial se mide en mm, que sería el espesor de la lámina de agua que se formaría, a causa de la precipitación, sobre una superficie plana e impermeable y que equivale a litros de agua por metro cuadrado de terreno ( $l/m^2$ ).

Los registros de lluvias en todos los casos son puntuales. Cuando ocurre un evento, en un horario y punto determinado, se puede obtener la información de cuántos milímetros llovieron. Para los cálculos de diseño es necesario conocer la lluvia media en una zona dada, como es el caso de una cuenca. Existen distintos métodos de análisis de los datos de precipitación, como ser la determinación de la media aritmética (obteniendo el promedio de las alturas de precipitación), el método de las isohietas (trazando líneas que unen puntos de igual altura de precipitación) y la utilización de polígonos Thiessen, lo cual se desarrolla con más detalle en el siguiente apartado.

El método de los **Polígonos Thiessen** consiste en:

1. Ubicar las estaciones meteorológicas que tengan influencia sobre la cuenca en estudio.
2. Unir entre sí las que estén más cercanas por medios de líneas, de manera que se formen triángulos en cuyos vértices estarán las estaciones pluviométricas.
3. Trazar mediatrices a las líneas dibujadas en el punto anterior.
4. Las estaciones quedan rodeadas por las líneas mediatrices o por los límites de las cuencas. El área encerrada por los polígonos y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente  $A_i$ .
5. La relación de cada área de influencia frente al área total de la cuenca, dará el factor  $k$  (Ec.1), determinando la importancia de los datos de cada estación pluviométrica, permitiendo el cálculo de la precipitación media areal  $P_m$  (Ec. 2) que tiene en cuenta las precipitaciones registradas en cada estación  $P_i$ , frente a la influencia en el área total de la cuenca.

$$k_i = \frac{A_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

$$P_m = k_1P_1 + k_2P_2 + k_3P_3 + \dots \quad (2)$$

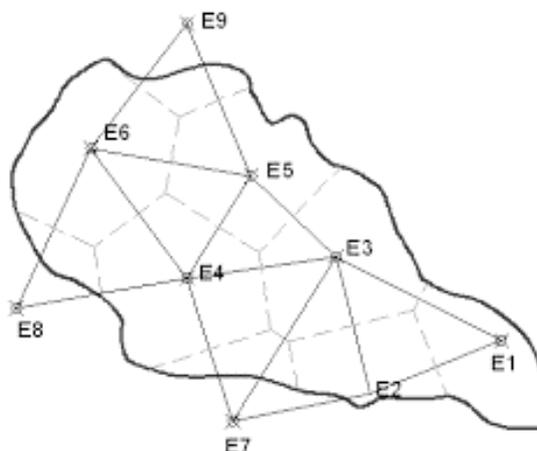


Fig. 5 - Cálculo de precipitación media - Polígonos Thiessen

### 1.3.2 Esguerrimiento - Caudal

Al producirse la lluvia, el movimiento del agua es determinado por fuerzas gravitacionales y capilares. Esta penetra hacia adentro del suelo o circula sobre la superficie terrestre hasta una corriente, para finalmente ser drenada a la salida de la cuenca. Las **pérdidas** comprenden la retención en depresiones o charcos, evaporación, interceptación vegetal e infiltración (esta última es la más importante de las 4). En cuanto al **esguerrimiento** se puede clasificar como superficial, subsuperficial o subterráneo.

Cuando la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta saturar las capas superiores. Luego comienzan a llenarse las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua esguerra sobre su superficie. Este esguerrimiento, llamado **flujo** en la superficie del terreno, se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos (que son aquellos cursos de agua que no desaparecen entre dos tormentas sucesivas). En su trayectoria hacia la corriente más próxima, el agua que fluye sobre el terreno se sigue infiltrando y también se evapora en pequeñas cantidades. Al

llegar a un cauce bien definido se convierte en **escurrimiento en corrientes**. El flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes, forma el **escurrimiento superficial**.

Una parte del agua que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él. A esta parte del escurrimiento se le llama **escurrimiento subsuperficial**; la otra parte, que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina **escurrimiento subterráneo**.

De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca, relacionándose en forma directa con una tormenta particular, ya que proviene de la precipitación en exceso o efectiva. Por otro lado, el escurrimiento subsuperficial puede emerger a la superficie si en su camino se encuentra con un estrato muy permeable que aflora en una ladera (vertiente). Estos factores, determinan la rapidez con que una cuenca responde a una tormenta y por lo tanto la magnitud de las correspondientes crecidas.

#### 1.4 Modelos de transformación lluvia – caudal

Por lo general, no se cuenta con registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas. En la práctica los datos de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento y, además, no se afectan por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por esto, es conveniente contar con métodos que permitan determinar:

-El **escurrimiento**, teniendo en cuenta las características de la cuenca, las cuales se conocen por medio de planos topográficos y de uso de suelo.

-La **precipitación**, a través de mediciones directas en el caso de predicción de crecidas frecuentes, o bien aplicando métodos para avenidas de diseño.

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

1. Área de la cuenca.
2. Altura total de precipitación.
3. Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.).
4. Distribución de la lluvia en el tiempo.
5. Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca.

Debido a que, por un lado, la cantidad y calidad de la información disponible varían en gran medida de un problema a otro y a que, por otro, no siempre se requiere la misma precisión en los resultados, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para analizar la relación lluvia-escurrimiento. La complejidad de los métodos aumenta a medida que se toman en cuenta más de los parámetros citados anteriormente. En este sentido también aumenta su precisión, pero los datos que se requieren son más y de mejor calidad.

La **transformación lluvia-caudal** comprende un modelo que simplifica al sistema para poder aplicar una simulación, diferenciando dos procesos independientes desde el punto de vista conceptual:

- 1- **Producción**: estima qué porcentaje del volumen total caído sobre la cuenca en forma de precipitación, se convierte en caudal a la salida. Sólo una parte de la precipitación llega rápidamente a la salida de la cuenca, el resto queda retenido, se evapora o infiltra, llegando a la salida como flujo subterráneo. Los métodos de producción son: Método racional (C), SCS-CN, índice  $\phi$ , y de infiltración (Horton, Phillips, etc.).

- 2- **Transferencia:** está asociada con el recorrido que el agua realiza desde los distintos puntos de la cuenca hasta la salida de la misma. Busca establecer la forma en la cual llega repartido en el tiempo ese volumen de producción a la salida de la cuenca, obteniendo así, el hidrograma de escurrimiento directo en la sección de salida. Los métodos de transferencia son: Hidrograma unitario, HU sintético (triangular, adimensional), curva S.

En el próximo apartado, se desarrollan con más detalle un método de producción (racional) y un método de transferencia (Hidrograma unitario).

#### 1.4.1 Método racional

La formulación básica del método establece que en una cuenca hipotética 100% impermeable y totalmente lisa existe una proporcionalidad entre el caudal máximo producido por la lluvia ( $Q$ ) y la intensidad media máxima de lluvia para una duración dada ( $i$ ), donde el área de la cuenca de aporte ( $A$ ) actúa como “factor de escala”:

$$Q = iA \quad (3)$$

Siguiendo esta idea, en cuencas reales con rugosidad y pérdidas la relación entre  $Q$  e  $i$  es:

$$Q = CiA \quad (4)$$

Siendo  $C$  el coeficiente de escurrimiento de la cuenca (ver apartado 1.4.2).

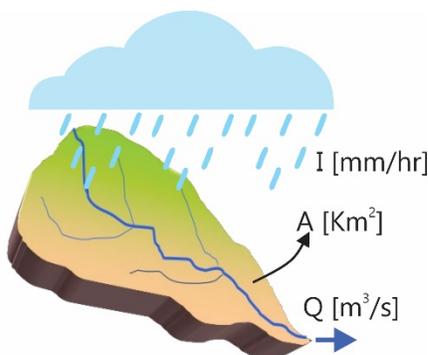


Fig. 6 - Variables del método racional

#### Premisas básicas del método

1. El caudal pico ocurre cuando toda la superficie de aporte pasa a contribuir al escurrimiento.
2. La lluvia presenta uniformidad espacial y temporal siendo su duración igual al tiempo de concentración de la cuenca ( $t_c$  – ver apartado 1.4.2).
3. Las condiciones de permeabilidad de la cuenca se mantienen constantes durante la lluvia.

#### Hipótesis que deben cumplirse para que sea válido aplicar el método

1. La duración de la tormenta ( $d$ ) es mayor o igual al tiempo de concentración de la cuenca ( $t_c$ ).
2. La intensidad de lluvia ( $i$ ) es uniforme en el espacio dentro de la cuenca.
3. El área de la cuenca de aporte ( $A$ ) es menor que  $2 \text{ km}^2$ .
4. La duración de la tormenta ( $d$ ) es menor que 30 minutos.
5. El caudal pico es la única variable de interés.

Ventajas del método

1. Simplicidad de aplicación.
2. Permite dimensionar los componentes de la red a medida que el cálculo avanza.
3. Buen predimensionado para análisis más elaborados (tránsito de hidrogramas).

Desventajas del método

1. Sólo permite estimar el caudal de proyecto o caudal pico (un punto del hidrograma).
2. Presupone que el T (tiempo de retorno) asociado a la lluvia también corresponde al caudal máximo calculado. (T – ver apartado 1.4.2).
3. Cuando la cuenca se torna compleja, con varias subcuencas, tiende a sobreestimar el caudal máximo.
4. Encierra algunas incertidumbres (tiempo concentración, C).

Aplicabilidad del método: Este método puede aplicarse sin problemas para sistemas hidrológicos con las siguientes características:

1. Pequeñas cuencas urbanas y rurales.
2. Ampliamente utilizado en el proyecto del sistema de drenaje urbano (cordón cuneta, sumideros, etc.).
3. Las “Pequeñas cuencas” deben reunir las siguientes condiciones:
  - a. Lluvia asumida como uniforme en espacio y tiempo.
  - b. La duración de tormentas habitualmente excede el tiempo de concentración.
  - c. Escurrimiento es básicamente por flujo superficial.
  - d. El proceso de almacenamiento en canales es despreciable.

**1.4.2 Parámetros de una cuenca**

Es importante definir algunos conceptos para la aplicación del método racional y el estudio hidrológico de una cuenca.

Tiempo de concentración (tc): es el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca aporten agua de escorrentía simultáneamente al punto de salida. Si se toma el punto hidrológicamente más alejado de la salida de la cuenca, el tc será el tiempo que tarda el agua en recorrerlo, con caudal de escorrentía constante.

Tiempo de retorno (T): tiempo medio entre dos sucesos de baja probabilidad, por ejemplo, entre crecidas originadas por precipitaciones iguales o superiores a otras determinadas.

Curvas IDF: Una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia es una relación matemática, generalmente empírica, entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa. La probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones intensas puede caracterizarse mediante períodos de retorno, obtenidos a partir de la inversa de la frecuencia acumulada. Estas curvas pueden tomar diferentes expresiones matemáticas, teóricas o empíricas, que se ajustan a los datos de precipitación de una determinada estación. Para cada duración (ej. 5, 10, 60, 120, 180... minutos), se estima la función de probabilidad empírica, y se fija una frecuencia o período de retorno determinado. Por lo tanto, la curva IDF empírica viene dada por la unión de los puntos de igual frecuencia de ocurrencia y diferente duración e intensidad.

Coefficiente de escurrimiento (C): Es un coeficiente que presenta mayor incertidumbre dentro del método racional. Relaciona el caudal máximo y la intensidad de lluvia que lo origina (ambos en iguales unidades) y también es el cociente entre el escurrimiento directo y el total precipitado (relación de volúmenes). En caso de cuencas no uniformes, es común ponderar C en función de las áreas.

Para la estimación del coeficiente de escurrimiento  $C$  es común la utilización de tablas que dan distintos valores según características de la superficie (áreas urbanizadas o no urbanizadas, pendientes, presencia de árboles, vegetación, construcciones, etc.) y períodos de retorno.

### 1.4.3 Método del Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario de una cuenca es el correspondiente a la esorrentía directa que se produciría en la salida de la misma, si sobre la cuenca hidrográfica ocurriera una precipitación neta de una duración determinada y uniformemente distribuida (por ejemplo, 1 mm durante 1 hora). Se admite que el sistema es lineal, por lo que los hidrogramas de otras lluvias de duración y distribución semejantes presentarán el mismo tiempo base, con ordenadas de caudal proporcionales al volumen del fluido.

El método suele utilizarse en cuencas aforadas donde hay disponibilidad de datos suficientes de precipitaciones y caudal. Con esta información, se procede a la construcción del hidrograma como puede verse en la Fig. 7: se elige entre todas las lluvias alguna de corta duración ( $D$ ) y uniforme espacialmente. Se estudia el hidrograma generado por dicha precipitación y luego se separan las esorrentías (parte a y b). La esorrentía directa se representa sola (parte c), calculando el volumen correspondiente a ese hidrograma. El área rayada de la parte c (en  $m^3$  por ser volumen) se divide por el área de la cuenca (en  $m^2$ ), obteniéndose finalmente la altura de lluvia efectiva en m (o mm) representado en la parte d.

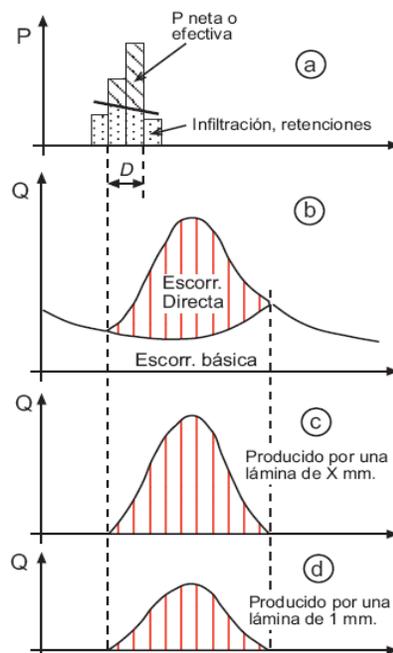


Fig. 7 - Hidrograma unitario

El sistema lineal considera las siguientes hipótesis:

1. El tiempo base  $t_b$  de la precipitación en exceso es constante.
2. Las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo  $t_b$  son directamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo, o sea al volumen total de la lluvia efectiva. Las ordenadas de dichos hidrogramas son proporcionales entre sí.

3. El hidrograma resultante de un período de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de periodos de lluvias anteriores.
4. Se aplica el principio de invariancia en el tiempo, con lo cual no se “recuerdan” precipitaciones anteriores.

### 1.5 Métodos de propagación de caudales

El tránsito de crecidas es una técnica hidrológica utilizada para calcular el efecto del almacenamiento en un canal, río, o embalse, teniendo en cuenta la forma y movimiento de una onda de creciente. Si se conoce el caudal en un punto aguas arriba, aplicando el proceso de tránsito se puede estimar el caudal de una sección aguas abajo. El almacenamiento es efectivo cuando se produce la formación de la onda de creciente y los métodos de propagación pueden utilizarse para calcular el hidrograma que resultará de un patrón específico de lluvias.

El escurrimiento superficial obedece leyes físicas como la conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía, que dependen de variables como caudal, profundidad, y velocidad. Se puede clasificar el escurrimiento en función del tiempo (permanente, no permanente) y en función del espacio (uniforme, variado).

#### 1.5.1 Método de Pulz - propagación de caudales en embalses

Este es uno de los métodos más conocidos para la simulación del escurrimiento en embalse. El método utiliza la ecuación de continuidad concentrada, sin contribución lateral y la relación de almacenamiento y caudal es obtenida considerando el nivel de agua del embalse como horizontal.

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - Q_t + Q_l \quad (5)$$

Discretizando la expresión de continuidad, resulta:

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} \quad (6)$$

Donde  $I_t$  y  $I_{t+1}$  son caudales de entrada al embalse en los tiempos  $t$  y  $t+1$ ;  $Q_t$  y  $Q_{t+1}$  son caudales de salida del embalse para los tiempos  $t$  y  $t+1$ ;  $S_t$  y  $S_{t+1}$  el almacenamiento en los tiempos de referencia.

Las dos incógnitas del problema son  $Q$  y  $S$  en el tiempo  $t+1$ . Reorganizando la ecuación en base a las variables conocidas de un lado y las desconocidas de otro, resulta:

$$Q_{t+1} + \frac{2S_{t+1}}{\Delta t} = I_t + I_{t+1} - Q_t + \frac{2S_t}{\Delta t} \quad (7)$$

Como existen una ecuación y dos incógnitas, la ecuación adicional para resolver el problema es la dada por  $Q=f(S)$ . Que por lo general adopta la siguiente forma y que normalmente se encuentra tabulada (y es la curva de almacenamiento cota – volumen de un embalse).

$$Q = f\left(Q + \frac{S}{\Delta t}\right) \quad (8)$$

#### 1.5.2 Método de Muskingum Cunge - propagación de caudales en cauces

El escurrimiento en ríos se desarrolla en una sección más estrecha, con menor profundidad y mayor velocidad que en reservorios. Uno de los dos métodos más utilizados para la simulación del escurrimiento en ríos es el modelo de Muskingum. El método se basa en la ecuación de continuidad y en la ecuación de almacenamiento, que pondera el efecto del caudal entre la entrada y la salida del trecho.

Este modelo es del tipo concentrado en el espacio y es de almacenamiento. En este caso, el almacenamiento se define como:

$$S = K[xI + (1 - x)Q] \quad (9)$$

Derivando la ecuación con relación al tiempo y sustituyendo en la ecuación de continuidad, resulta la ecuación diferencial del modelo:

$$K(1 - x)\frac{dQ}{dt} + Q = I - Kx\frac{dI}{dt} \quad (10)$$

Esta ecuación es diferencial ordinaria y será lineal cuando los coeficientes K y x sean constantes. Utilizando la misma discretización que en el método de Pulz, dicha ecuación queda expresada como:

$$Q_{t-1} = C_1 I_{t+1} + C_2 I_t + C_3 Q_t \quad (11)$$

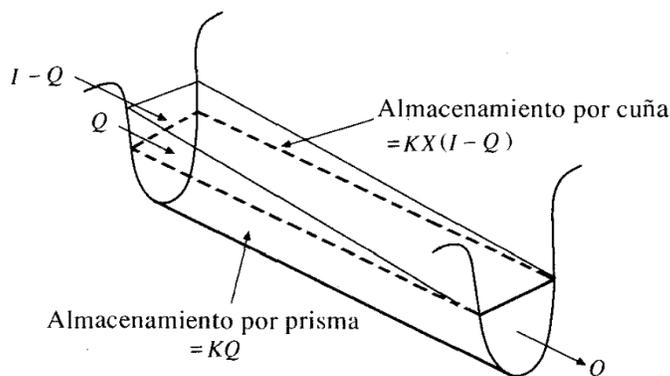
Donde

$$C_1 = \frac{-Kx + \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - x) + \frac{\Delta t}{2}}; C_2 = \frac{Kx + \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - x) + \frac{\Delta t}{2}}; C_3 = \frac{K(1 - x) - \frac{\Delta t}{2}}{K(1 - x) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (12)$$

El parámetro X representa el peso de la integración de caudales en el espacio. Debido a las condiciones de estabilidad numérica  $x \leq 0,50$  y dado que un valor negativo de ponderador no tiene sentido físico, el intervalo de variación del mismo es:  $0 \leq x \leq 0,5$ , con  $x=0.50$  la ecuación diferencial ordinaria se transforma en la de reservorio lineal (método de Pulz).

El parámetro K tiene unidades de tiempo y representa el tiempo medio de decaimiento de la onda entre aguas arriba y aguas abajo.

Originalmente, la determinación de los parámetros K y x era basada en el concepto de cuña de almacenamiento, provocada por la influencia de la pendiente de la onda de crecida (Fig. 8).



**Fig. 8** - Almacenamiento por prisma y por cuña en un tramo de un canal. (Fuente: Chow, 1999).

Cunge (1969) combinó métodos hidráulicos con la simplicidad del método de Muskingum. Demostró que siendo los fundamentos del modelo una relación biunívoca entre el almacenamiento y el caudal (o área y caudal), la derivada parcial del área con respecto al tiempo puede ser expresada por:

$$\frac{\delta A}{\delta t} = \left. \frac{dA}{dQ} \right| + \frac{\delta Q}{\delta t} \quad (13)$$

Donde el primer término del lado derecho es el gradiente del área con relación al caudal para una sección  $X_0$ . La derivada total de Q en función de t y x es nula para un caudal constante, es:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{-\delta Q/\delta t}{\delta Q/\delta x} = \frac{\delta Q/\delta t}{\delta A/\delta t} = \frac{dQ}{dA} = c \quad (14)$$

La derivada de Q en función de x fue obtenida de la ecuación de continuidad con contribución lateral nula. Substituyendo esta expresión en la ecuación de continuidad, resulta que:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + c \frac{\delta Q}{\delta x} = 0 \quad (15)$$

Que es la ecuación de los modelos de Onda Cinemática y de almacenamiento que usa el concepto de la relación biunívoca entre caudal y área. Cunge demostró que la solución original del modelo de Muskingum es una solución numérica de esta ecuación a través del siguiente esquema numérico:

$$\frac{\delta Q}{\delta t} \cong X \frac{(q_j^{t+1} - q_j^t)}{\Delta t} + (1 - X) \frac{(q_{j+1}^{t+1} - q_{j+1}^t)}{\Delta t} \quad (16)$$

$$\frac{\delta Q}{\delta x} \cong \frac{q_{f+1}^{t+1} - q_f^{t+1} + q_{f+1}^t - q_j^t}{2\Delta x} \quad (17)$$

Se puede observar que X es un ponderador espacial de la discretización numérica. La modificación del hidrograma, a medida que se mueve hacia aguas abajo, se debe a la variación de las secciones del río (morfología) y a los efectos de las fuerzas dinámicas involucradas. Los modelos de tipo almacenamiento y onda cinemática desprecian los efectos de las fuerzas de presión e inercia, y, como resultado, el hidrograma propagado por la tercera ecuación de este apartado se deforma solamente debido a las variaciones de sección. Para un canal de sección constante ocurren traslaciones de onda, la solución numérica del modelo de Muskingum produce un amortiguamiento artificial debido a su discretización. Por lo que se determinó que la difusión numérica substituyendo el esquema numérico en la ecuación diferencial y expandió los términos numéricos con base en la serie de Taylor con una aproximación de segundo orden, resultando:

$$D = (0,5 - X)c\Delta x \quad (18)$$

Este término es denominado como de difusión numérica, y produce el amortiguamiento de la onda simulada. Cunge igualo la difusión numérica al valor de D obtenido por la ecuación de Difusión (real), transformando de esta forma, el modelo de Muskingum en un modelo de difusión. Por lo que es posible expresar el valor del parámetro X como:

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{BS_0c\Delta x} \right) \quad (19)$$

Donde Q es el caudal, B el ancho del cauce,  $S_0$  la pendiente media del cauce,  $\Delta x$  es la longitud del tramo de cauce considerado; y c es la celeridad de la onda (y se estima como la velocidad media en el tramo del cauce por un factor "m" que vale aproximadamente 5/3 para cauces naturales amplios).

Como fuera definido con anterioridad el parámetro K representa el tiempo medio de decaimiento de la onda que es:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (20)$$

## 1.6 Objetivos

### 1.6.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es modelar hidrológicamente a corto (semanal) y largo plazo (semestral) la cuenca del Dique La Viña.

Se propone estudiar de manera detallada la cuenca de este embalse, analizando su respuesta hidrológica ante eventos de precipitación, teniendo en cuenta la distribución de áreas, cursos de agua, estaciones de medición, precipitaciones, niveles históricos y erogaciones, con lo cual se podrán aplicar métodos de transformación lluvia-caudal, generando modelos que permitan un manejo óptimo del embalse a corto y largo plazo, según la estimación de precipitaciones futuras.

### 1.6.2 Objetivos específicos

Para lograr el objetivo previamente planteado, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Sistematizar la información histórica del embalse (tales como niveles, caudales erogados, precipitaciones) para poder contar con una base de datos ordenada y actualizada.

- Modelar hidrológicamente la cuenca del embalse La Viña y desarrollar una herramienta de manejo de embalse de corto plazo (semanal).

- Modelar hidrológicamente la cuenca del embalse La Viña y desarrollar una herramienta de manejo de embalse de largo plazo (semestral).

## 1.7 Metodología

Este trabajo se divide en tres apartados principales:

En el **capítulo 2**, con el aporte de datos de niveles históricos y erogaciones del dique proporcionados por EPEC y el APRHi, sumado a estudios realizados por CETA, se procede a la digitalización y análisis de los mismos, realizando la sistematización y actualización de la información existente. A su vez, aplicando un modelo de balance hídrico, se calcula el caudal y/o el volumen histórico ingresado al dique a paso mensual. También se recopila información sobre precipitaciones en las estaciones de medición que comprenden el área de estudio, utilizando información provista por el INA CIRSA (Instituto Nacional del Agua - Subgerencia Centro de la Región Semiárida).

En el **capítulo 3**, se procede a validar y calibrar un modelo de transformación lluvia caudal del embalse de corto plazo (es decir de duración semanal) a partir de eventos de lluvias extremas de los últimos 3 años en la cuenca del dique La Viña. Conociendo las precipitaciones y niveles alcanzados por el embalse, se calibra y valida el modelo hidrológico; el cual a futuro será utilizado para manejo de eventos de precipitación y permitirá optimizar el manejo del embalse.

En el **capítulo 4** se desarrolla un modelo hidrológico de manejo del embalse semestral (a largo plazo) para analizar las proyecciones de niveles esperados en el embalse frente a las precipitaciones pronosticadas en los próximos 6 meses por modelos climáticos globales. Este modelo se calibra con la información existente y se aplica de manera mensual ante los próximos eventos de precipitación esperados. El modelo se valida comparando la evolución del nivel del dique proyectada por el modelo con la finalmente ocurrida.

## CAPÍTULO 2: SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN HISTÓRICA DEL EMBALSE

### 2.1 Introducción

En los cuerpos de agua de importancia, las cotas de los embalses son registradas diariamente. En el caso del Dique La Viña se recabó información sobre niveles diarios desde el año 1990 hasta el año 2019 inclusive. Por otro lado, se pudieron conocer volúmenes medios mensuales ingresados y erogados en el período 1955-2019. Por último, se incorporaron los valores de precipitaciones ocurridas en la cuenca en los años de estudio.

La sistematización de la información disponible es un paso fundamental para realizar el análisis de la cuenca, evaluando el comportamiento del Dique frente a períodos secos y húmedos, lo que permite aplicar métodos, modelar y estimar a futuro para el manejo óptimo del embalse.

### 2.2 Serie de niveles históricos del embalse

Al comenzar el estudio sobre la Cuenca La Viña, los datos disponibles en forma digital de niveles diarios del dique, comprendían períodos con meses incompletos y años sin registros (Fig. 9).

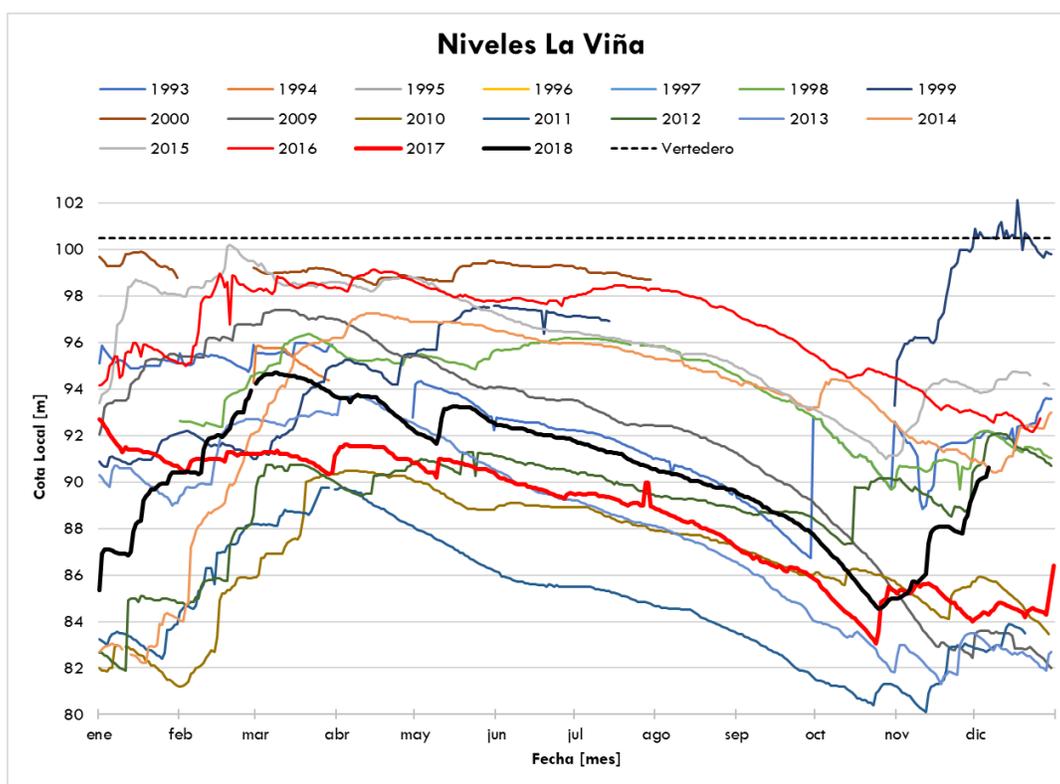


Fig. 9 - Niveles históricos Dique La Viña (marzo 2019)

Posterior a la digitalización y análisis de datos (Fig. 10), puede observarse una mayor densidad de información, completando tantos niveles diarios como pudieron recabarse, entre el año 1990 y 2019. Esto permitió evaluar los valores históricos mínimos y máximos de cotas del dique en los últimos 30 años, como puede verse en la Fig. 11. Además, se disponen en líneas punteadas la mediana (promedio), el cuartil 25 (es decir, el 25% de los datos son menores o iguales a este valor) y cuartil 75.

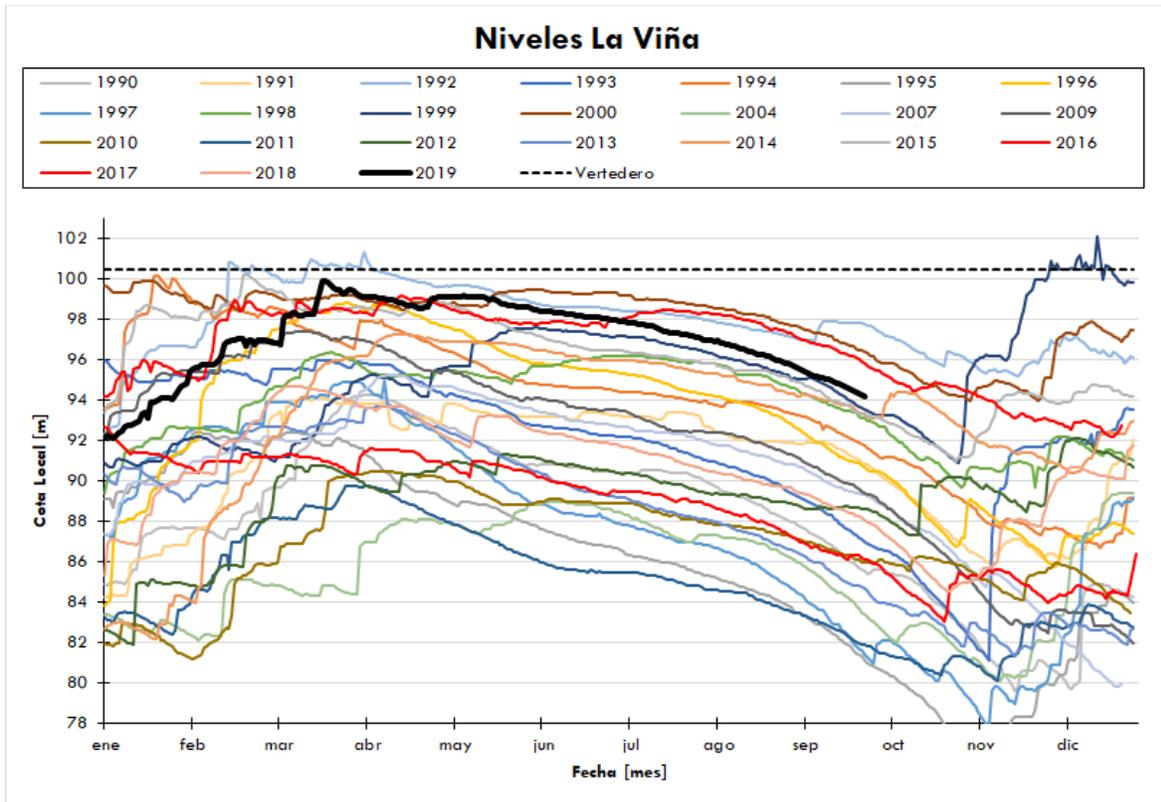


Fig. 10 - Niveles históricos Dique La Viña (septiembre 2019)

Para ejemplificar, se muestran en la Fig. 11 los niveles de los dos últimos años. Puede verse que, en el año 2018, el dique tuvo un nivel muy cercano al promedio de niveles históricos. En cambio, el año 2019 comenzó con una cota superior, manteniendo una tendencia muy cercana al máximo histórico en los últimos meses, superando valores del cuartil 75, lo que resulta muy favorable en cuanto a la disponibilidad de agua del embalse.

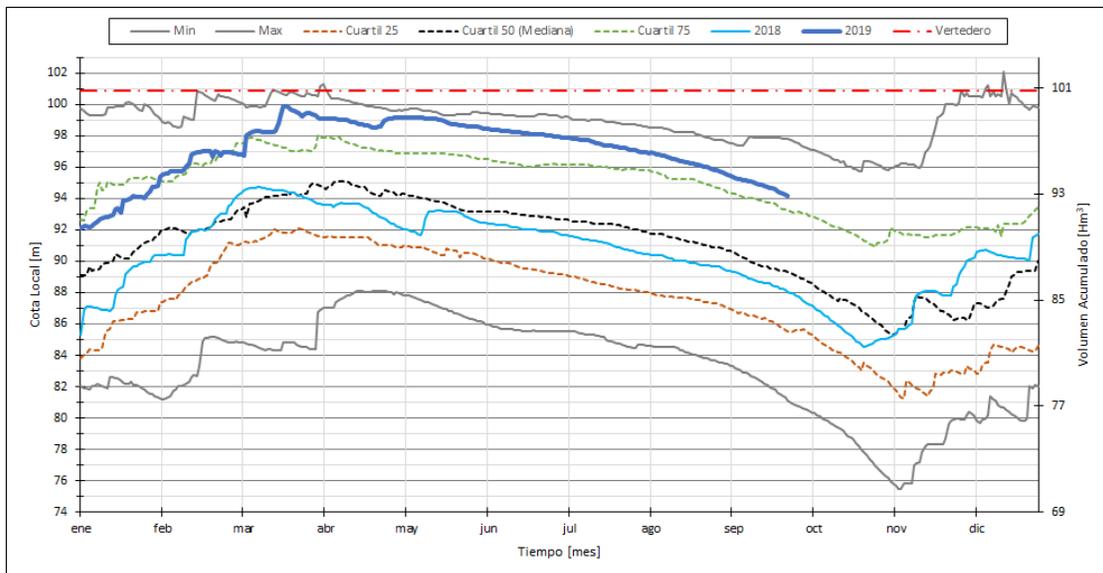


Fig. 11 - Análisis de Niveles del Dique La Viña entre 1990 y 2019

Evaluando niveles extremos, como era esperable, puede observarse que el dique ha tenido cota máxima cercana al vertedero en los períodos más lluviosos (diciembre a marzo) con valores próximos a los 100 metros. En cuanto a las cotas mínimas históricas se observan en los meses previos al verano (septiembre a noviembre), alcanzando en períodos más secos una cota histórica inferior a los 77 metros. En promedio, el nivel oscila entre 85 y 95 metros.

Cada dique tiene su curva altura – volumen, la cual permite identificar a qué volumen del embalse corresponde determinada cota. Esta curva es muy importante ya que se utiliza durante toda la modelación, permitiendo usar datos de cota o volumen según sea necesario. Seguidamente se muestra la curva H-V del Dique La Viña en la Fig. 12.

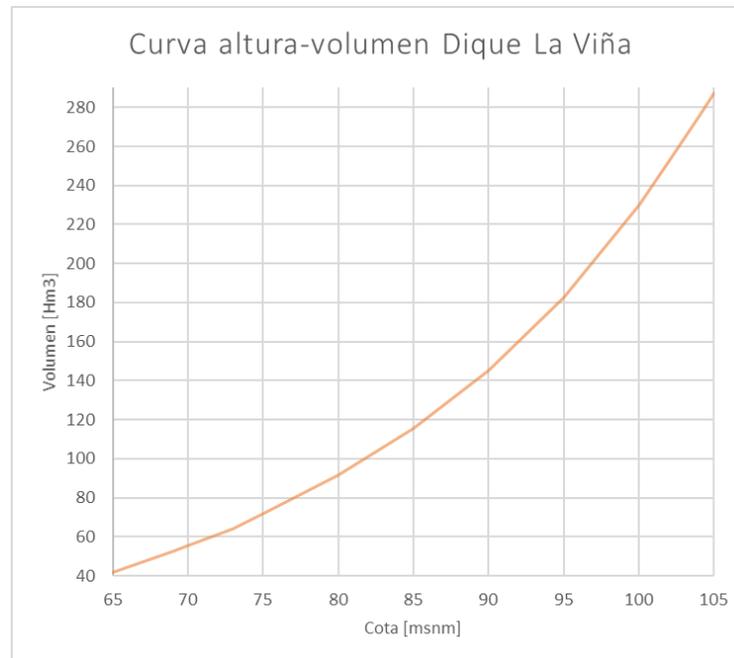


Fig. 12 - Curva Altura - Volumen Dique La Viña

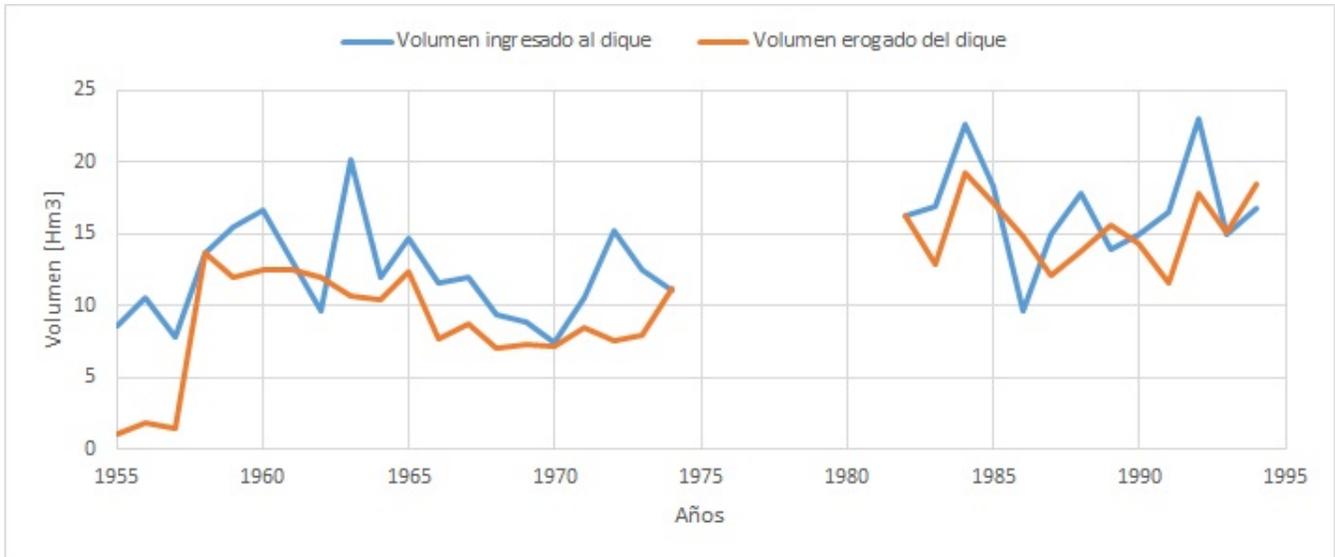
### 2.3 Cálculo de volúmenes y caudales ingresados medios mensuales

Por medio de datos proporcionados por la SRH (Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba) y EPEC se recopilaban las erogaciones del Dique la Viña, desde el año 1955 hasta la actualidad. En algunos casos la información disponible fue a paso diario, en otros a paso mensual.

Como ya se mencionó, las estructuras de descarga del dique son:

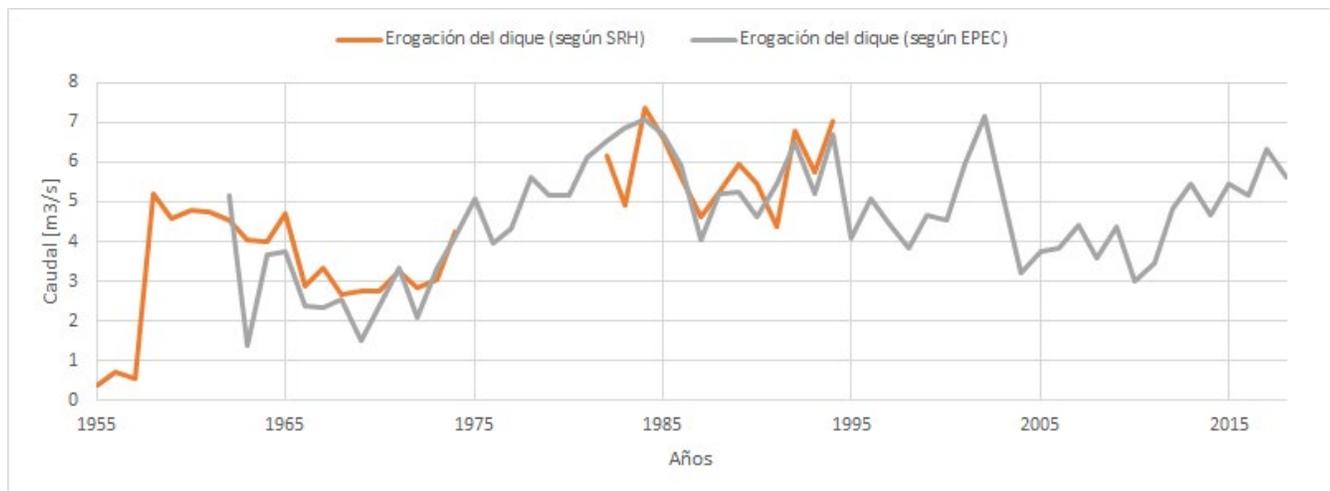
1. Una usina con una serie de turbinas generadoras de electricidad;
2. Dos válvulas para alivio o aprovechamiento alternativo a la Central;
3. Un vertedero con cota local 95 m con 8 compuertas (cuya cota local superior es 100,65 m).

El caudal erogado total del embalse es la suma de los caudales erogados de todas estas estructuras de descarga. En el período comprendido entre los años 1955 y 1994 (con falta de datos entre los años 1975 a 1979 y 1981), la SRH proporcionó registros de volúmenes totales ingresados y erogados (ver Fig. 13). El volumen ingresado al embalse a paso mensual fue calculado mediante balance hídrico, a partir de los datos de erogaciones del embalse y los niveles del mismo. La siguiente figura muestra el resultado de la digitalización de planillas dato, los cuales permitirán aplicar los modelos propuestos por el presente trabajo.



**Fig. 13** – Vol. medios mensuales ingresados y egresados del Dique La Viña según SRH (1955 a 1994)

Para completar la serie entre los años 1975 a 1979, 1981 y desde 1995 en adelante, se tomaron datos de proporcionados por EPEC (se obtuvo información sobre caudales erogados por válvulas y usina). La comparación de caudales erogados mostrada en la Fig. 14 muestra un comportamiento similar entre ambas fuentes, con lo cual se decide optar por la fiabilidad de la SRH (la cual ya aplicó balance) para los años donde se conoce la entrada y salida de agua al Dique, completando la serie con los datos proporcionados por EPEC y conociendo los niveles del primer día de cada mes.



**Fig. 14** – Caudales erogados medios mensuales Dique La Viña entre 1955 y 2018 (distintas fuentes)

Es fundamental conocer los caudales y volúmenes mensuales ingresados al embalse; para poder estudiar el comportamiento hidrológico del mismo a lo largo de su historia. Las Fig. 15 y Fig. 16 muestran la serie completa de caudales medios mensuales ingresados y erogados al Dique La Viña entre el año 1955 y 2019. A su vez, la Fig. 17 muestra los caudales anuales ingresados como resultado del análisis de ambas fuentes de información en el período de estudio.

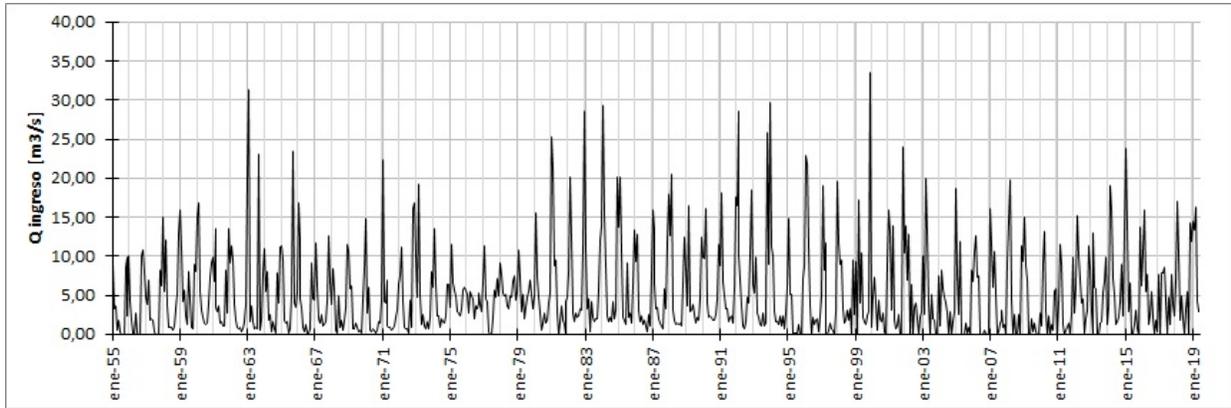


Fig. 15 - Serie de caudales medios mensuales ingresados Dique La Viña (1955-2019)

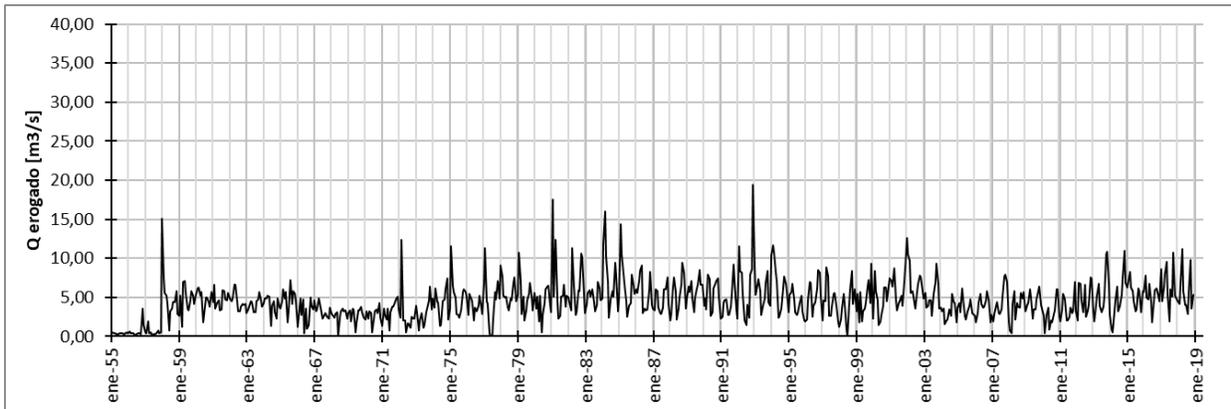


Fig. 16 - Serie de caudales medios mensuales erogados Dique La Viña (1955-2019)

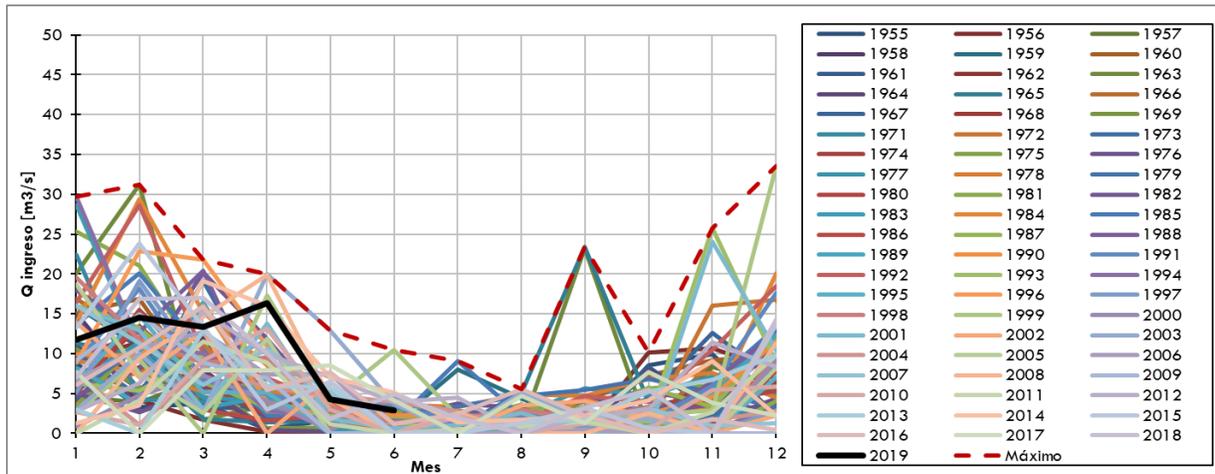


Fig. 17 - Caudales anuales ingresados al Dique La Viña (1955-2019)

A continuación, en la Fig. 18 se resumen los caudales ingresados del cuartil 25, 50, 75 y valores máximos en el período en estudio. Como puede observarse, durante el año 2018 los caudales ingresados superaron la mediana durante casi todos los meses, teniendo un período muy seco el mes de noviembre. A su vez, estos valores se encuentran alejados de los máximos históricos. Para el año 2019, también se observa una tendencia de valores de caudales ingresados que superan la mediana, con valores cercanos al máximo histórico para el mes de abril, seguidos de una caída para los meses siguientes.

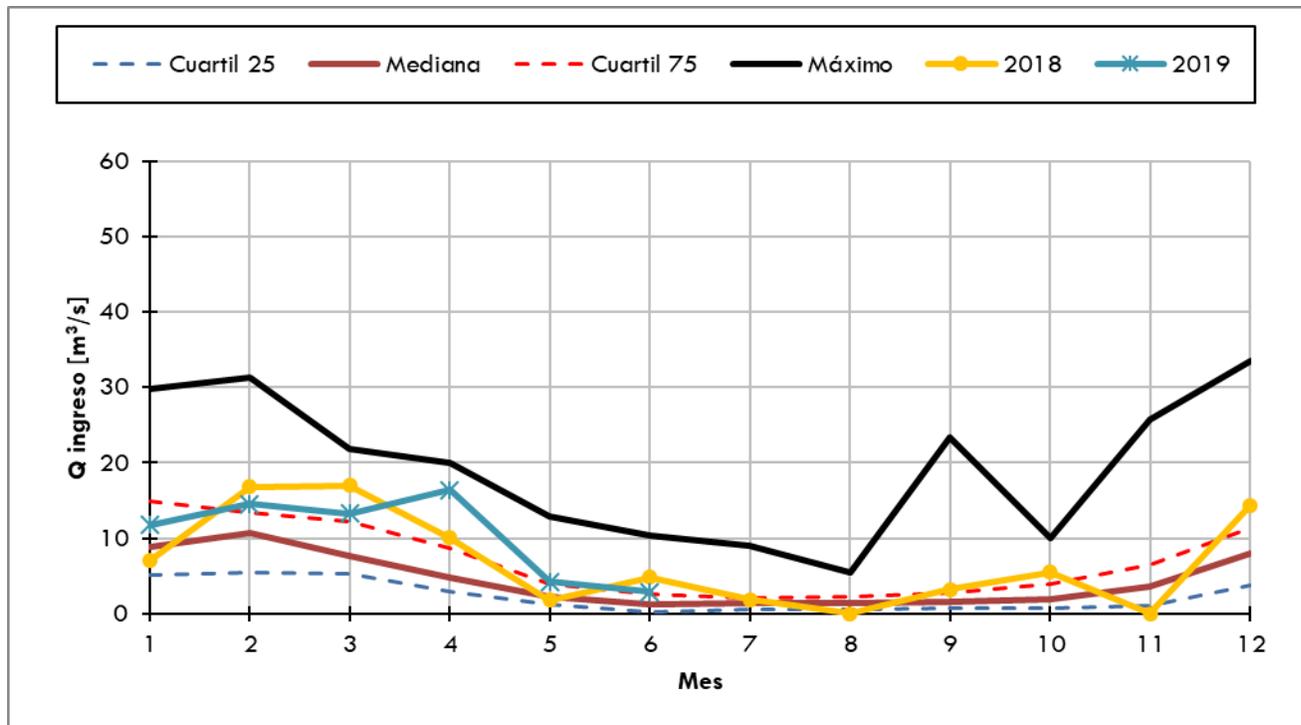


Fig. 18 – Comparación entre series de caudales medios mensuales ingresados máximo, cuartil 25, 50 y 75 respecto a los del año 2018 y 2019 en el Dique La Viña

Vale recalcar la importancia del balance hidrológico desarrollado. El mismo es fundamental para poder analizar el comportamiento hidrológico de los diques a lo largo del tiempo. Si esta información se contrasta con las precipitaciones registradas a lo largo de la historia es posible relacionar los volúmenes precipitados con los escurridos en la cuenca y con ello analizar los coeficientes de escurrimiento en cada una de las cuencas a lo largo de los años, lo cual es muy útil para estudiar el comportamiento hidrológico de la cuenca de aporte.

## 2.4 Estimación de precipitaciones medias mensuales

Para determinar las precipitaciones históricas registradas en la cuenca en estudio, se recopilieron los datos proporcionados por el INA CIRSA. Este ente, posee estaciones de medición repartidas en la provincia de Córdoba.

Se seleccionaron aquellas estaciones que tienen influencia en la cuenca:

- 1) 2500 – Escuela Ceferino Namuncurá
- 2) 3350 – Va. Rafael Benegas
- 3) 3400 – La Posta
- 4) 3500 – La Palmita
- 5) 3600 – Puesto El Manzano
- 6) 3700 – Puesto Las Calles
- 7) 4000 – Puesto López

Con la ayuda de Google Earth, se ubicaron las 7 estaciones en el área de la cuenca previamente determinada en Global Mapper, como puede verse en la Fig. 19.

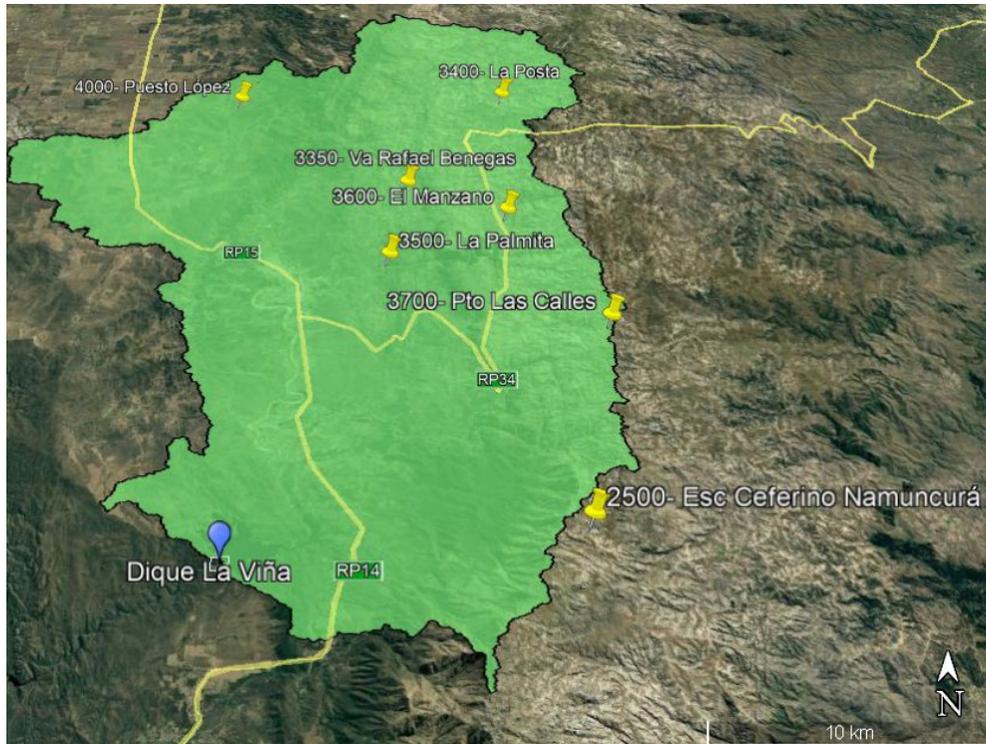


Fig. 19 - Estaciones pluviométricas en Cuenca La Viña (Google Earth)

Posteriormente, se exportó toda la información a AutoCad, para obtener las áreas de influencia que permitan aplicar el método de polígonos Thiessen. Se unieron con líneas rectas las estaciones pluviométricas geolocalizadas, trazando las mediatrices. Los polígonos resultantes del procedimiento, representan las áreas de influencia de cada estación, como puede verse en la Fig. 20.

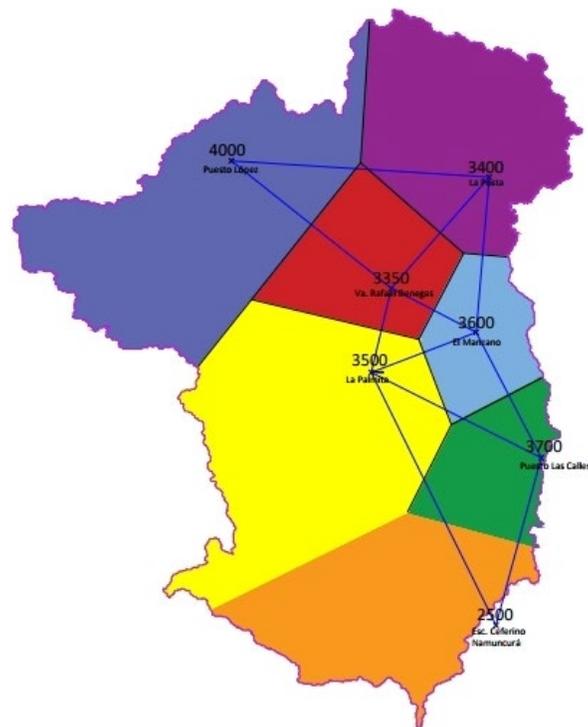


Fig. 20 - Estaciones Pluviométricas y áreas de influencia en Cuenca La Viña

Una vez delimitada la cobertura de cada estación, se recabaron los datos pluviométricos. Como es de esperar, el período comprendido entre el año 1954 hasta 2018 requiere una gran cantidad de información de precipitaciones para cada estación pluviométrica. La estación 2500 (Escuela Ceferino Namuncurá) posee una serie de datos muy completa en el período de interés, mientras que de las demás se obtuvieron registros de lluvias sólo para los últimos años. En la Tabla 1 se pueden observar los datos relevados para cada estación y la precipitación media anual.

	Estación Pluviométrica	Nº de años	P media anual (mm)
2500	Escuela Ceferino Namuncurá	64	80
3350	Va. Rafael Benegas	3	62
3400	La Posta	3	81
3500	La Palmita	3	39
3600	Puesto El Manzano	3	69
3700	Puesto Las Calles	3	80
4000	Puesto López	3	54

Tabla 1 - Estaciones pluviométricas, número total de años hidrológicos registrados y precip. media anual

Para el cálculo de la precipitación medial areal histórica de la cuenca, se adoptó la siguiente metodología: En primer lugar, utilizando la información de todas las estaciones de los últimos 3 años (entre 2016 y 2019), se aplicó el método de Thiessen para obtener la precipitación media areal (Pm). Seguidamente se graficó la relación existente entre la Pm y las precipitaciones registradas en la estación 2500 (Fig. 21). La línea de tendencia mostrada, da la ecuación que vincula la precipitación media y la correspondiente a la estación 2500. Utilizando este ajuste es que, con esta ecuación se puede estimar Pm a partir de los datos históricos de la serie completa de la estación 2500. Esta ecuación se aplicó para los datos mensuales donde no se tenía información de todas las estaciones. Así, haciendo una extrapolación a los años anteriores, se obtuvo un registro completo de precipitaciones representativo para toda la cuenca, el cual se graficó en las Fig. 22 y Fig. 23.

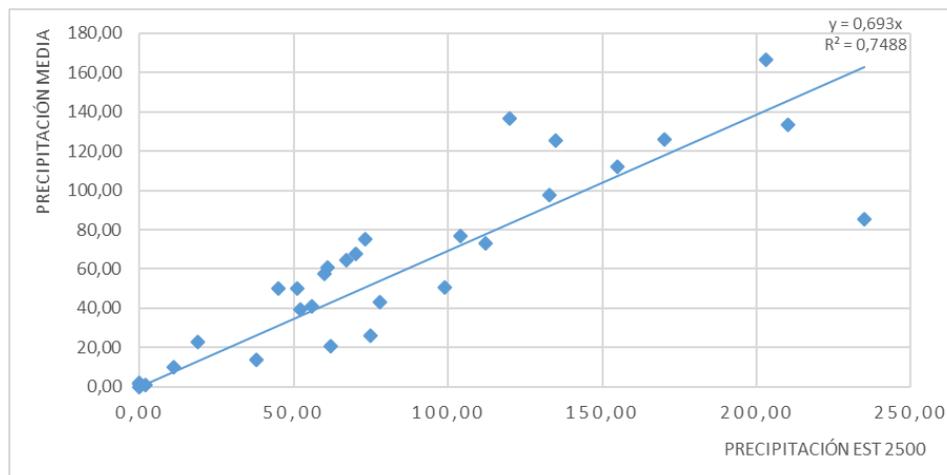


Fig. 21 - Relación entre precipitaciones media y de estación 2500 - Cuenca La Viña

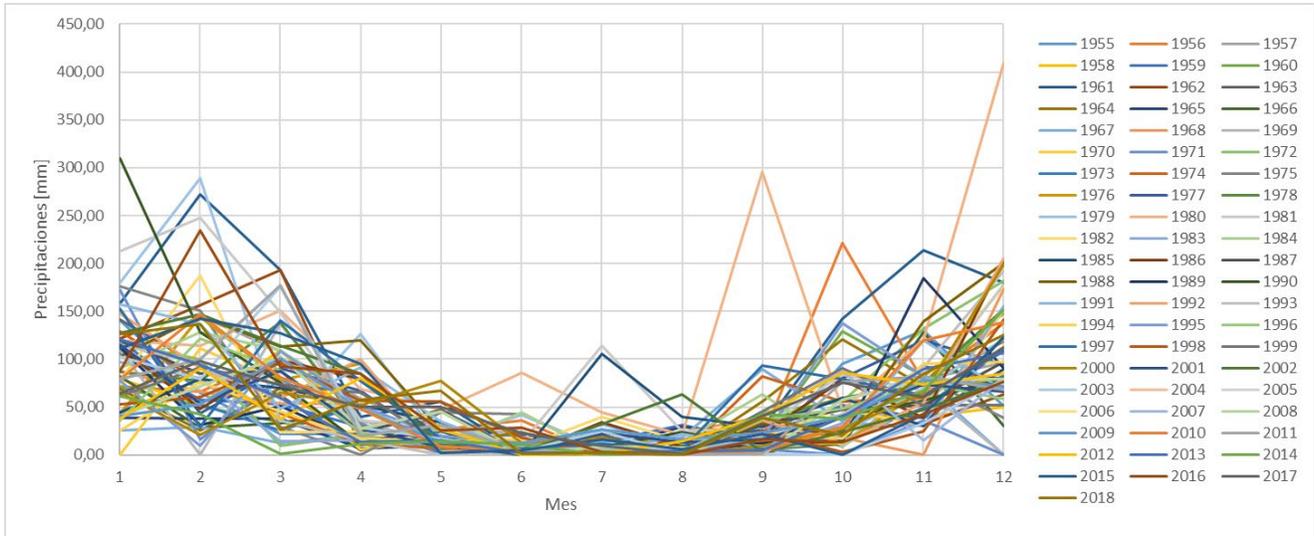


Fig. 22 - Precipitaciones medias mensuales - Cuenca La Viña (1955-2018)

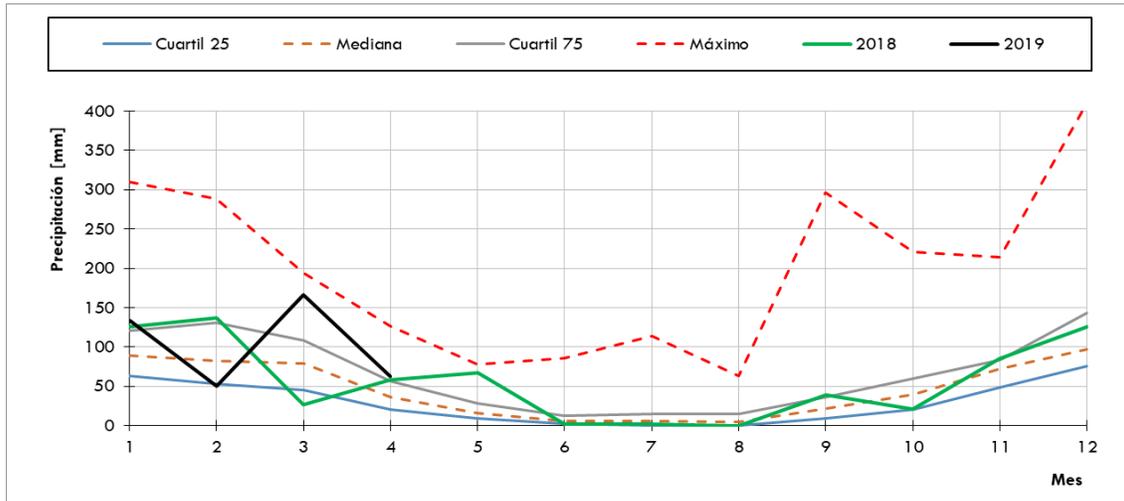


Fig. 23 – Cuartil 25, 50, 75, máximo y años 2018, 2019 de precipitaciones medias mensuales - Cuenca La Viña

Finalmente, en la Fig. 24 se puede observar la serie completa, resultado de la extrapolación de precipitaciones a lo largo de los años en la cuenca La Viña.

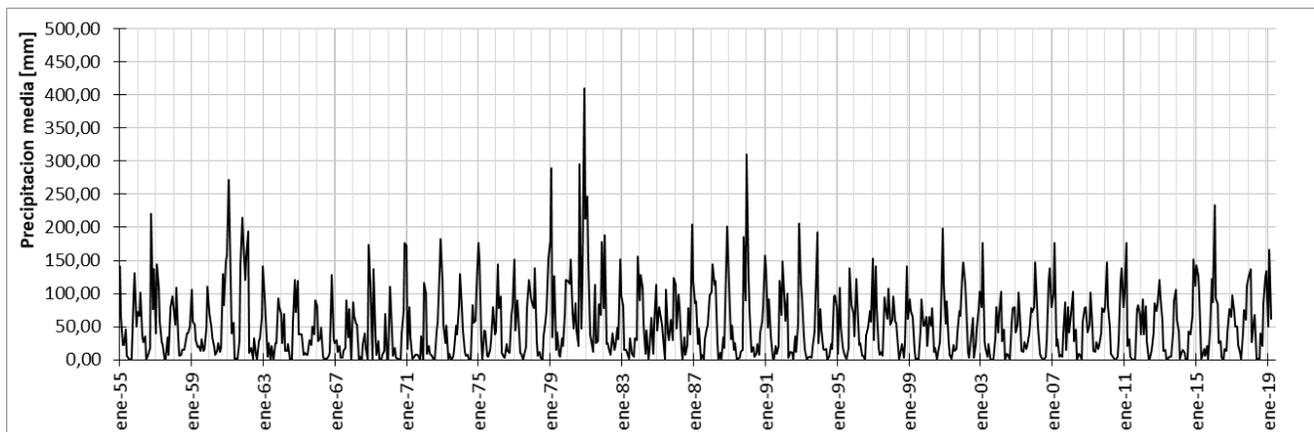


Fig. 24 - Serie de precipitaciones medias mensuales Cuenca La Viña (1955-2019)

## 2.5 Estimación de coeficientes de escurrimiento medios mensuales

En base a la estimación y análisis realizado de los caudales medios mensuales ingresados a cada uno de los embalses y a las precipitaciones históricas registradas en la cuenca, se procedió a la determinación de los coeficientes de escurrimiento a paso mensual. Partiendo del método racional (ecuación 4 – Cap 1) se sabe que:

$$Q = CiA \quad (21)$$

Sabiendo que  $i$  es la intensidad de la precipitación,  $Q$  es el caudal ingresado y  $A$  el área de la cuenca, el coeficiente de escurrimiento  $C$  mensual promedio será:

$$C = \frac{Q}{iA} \quad (22)$$

Realizando el análisis dimensional, donde  $n$  es el número de días del mes que corresponda:

$$[C] = \frac{\frac{m^3}{s}}{\frac{mm}{mes} Km^2} = \frac{\frac{m^3}{s} \frac{3600 s}{1 h} \frac{24 h}{1 día} \frac{n día}{1 mes}}{\frac{mm}{mes} \frac{m}{1000 mm} Km^2 \frac{1000000 m^2}{Km^2}} \rightarrow C = \frac{Q \cdot 3,6}{A \left(\frac{i}{n} 24\right)} \quad (23)$$

Esta ecuación es válida si  $Q$  se ingresa en  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ ,  $A$  en  $[Km^2]$ ,  $n$  en  $[días]$  y la intensidad  $i$  en  $\left[\frac{mm}{mes}\right]$ .

A partir de los datos de caudales medios mensuales históricos ingresados al embalse y las precipitaciones medias areales registradas a lo largo de los últimos años previamente calculados, utilizando Microsoft Excel, se aplicó la ecuación precedente a cada mes de la serie de datos en el período de estudio, obteniendo el coeficiente de escurrimiento promedio mensual. Este cálculo es fundamental para poder conocer el estado de humedad actual de la cuenca; cómo es el mismo si se lo compara con su historia registrada; y con esto poder predecir el comportamiento futuro de la cuenca y los volúmenes escurridos potenciales que podrían generarse a partir de las lluvias que ocurrirán en los meses futuros (es decir de los volúmenes precipitados sobre las cuencas). La variación del coeficiente  $C$  en el período de estudio, puede verse en la Fig. 25; como es esperable este gráfico guarda una correlación con los años más húmedos y secos, según precipitaciones y caudales ingresados al dique, dando como resultado una gran variabilidad del mismo según las condiciones de la cuenca en el período considerado.

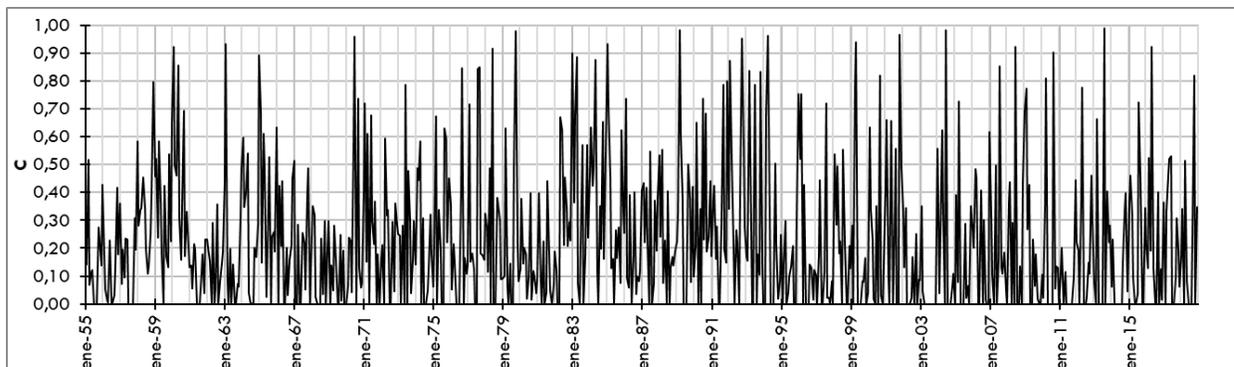


Fig. 25 - Serie de coeficientes de escurrimiento de la cuenca del Dique La Viña (1955-2019)

La Fig. 26 compara los coeficientes del año 2019 (Enero-Abril) respecto a los percentiles 25, 50 y 75. Se observa una tendencia con amplias variaciones superando al promedio en los meses que se obtuvieron datos.

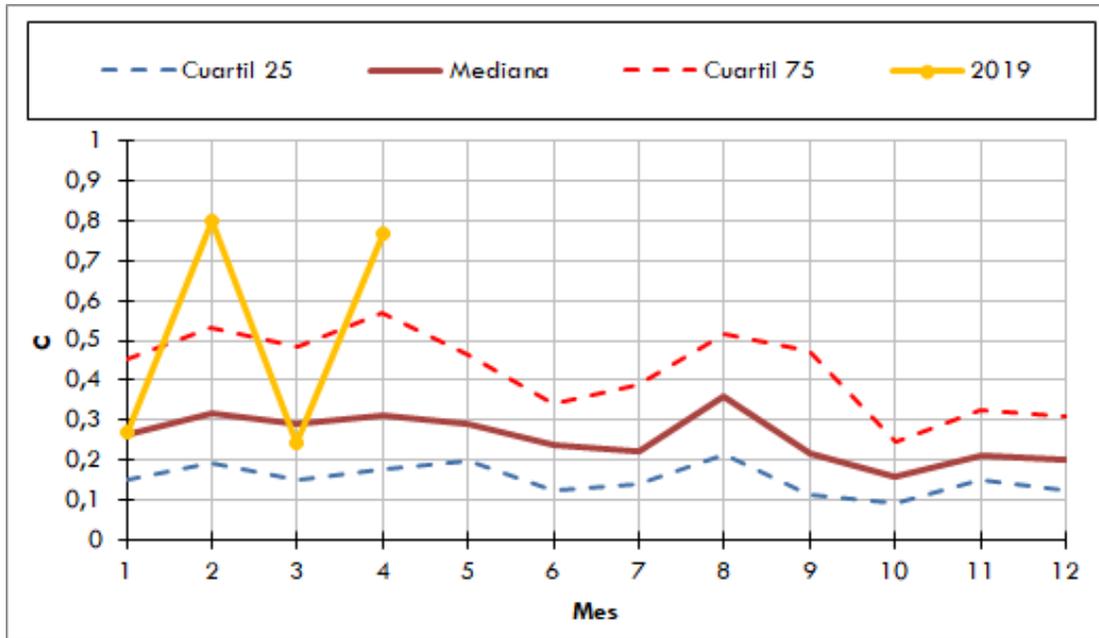


Fig. 26 - Comparación de series de coeficientes de escurrimiento máximo, mínimo, percentil 25, 50 y 75 respecto a los del año 2019 en la cuenca del Dique La Viña

## CAPÍTULO 3: MODELO DE MANEJO DE EMBALSE DE CORTO PLAZO

### 3.1 Introducción

Previamente al desarrollo de este trabajo, Ingenieros del Ministerio de Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba, habían desarrollado un modelo hidrológico de transformación lluvia caudal concentrado por eventos de duración semanal para manejo de embalses aplicable a varios diques de la provincia. Particularmente se había trabajado con el Dique San Roque, Los Molinos y Embalse de Río Tercero. Utilizando Microsoft Excel, se programó una herramienta de manejo sencillo y eficaz para poder operar de manera sistemática y rápida el funcionamiento de los embalses modelados. Se desarrolló un modelo concentrado por eventos, ante precipitaciones de duración diaria y/o escurrimientos directos en los cauces afluentes a los Diques San Roque, Río Tercero y Los Molinos.

La propuesta fue utilizar este mismo modelo y aplicarlo al Dique La Viña, calibrando los resultados con eventos extremos ocurridos en la cuenca en los últimos 3 años, evaluando parámetros propios de la cuenca como ser el CN, tiempo de concentración, contribución de afluentes, etc.

### 3.2 Explicación del modelo hidrológico para el manejo de embalses a corto plazo

El modelo desarrollado en Microsoft Excel comprende una serie de planillas de cálculo dispuestas en distintas hojas, donde el usuario puede ingresar datos de precipitación, escurrimiento, erogaciones y condiciones del dique previas al evento. En la Fig. 27 se puede visualizar la pestaña inicial del modelo, con una breve descripción sobre el uso del programa, además de observar datos propios de la cuenca, como ser: subcuencas principales y su área de aporte (Nono, Panaholma, Mina Clavero y Los Sauces) y por otro lado el CN y el tiempo de concentración de la cuenca.

Vale aclarar que el tiempo de concentración de la cuenca se calculó aplicando el método de Kerby Kirpich propuesto por el manual de hidráulica del departamento de transporte de Texas (TXDOT); mientras que el CN fue calibrado en base a las precipitaciones de los últimos años en la cuenca.

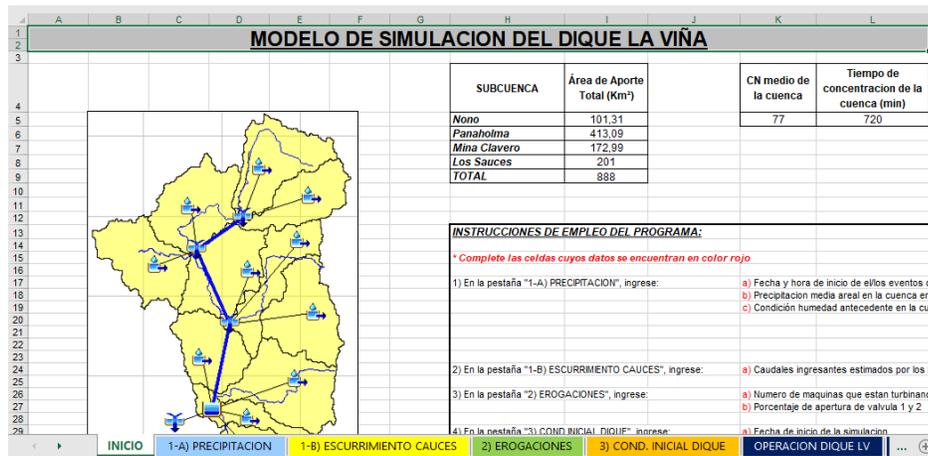


Fig. 27 - Modelo de simulación a corto plazo: Pestaña de inicio

El programa permite incorporar hasta 3 eventos de lluvia diaria en la cuenca con su respectiva condición de humedad antecedente y transforma dicho evento en una crecida tipo que ingresará el embalse. Además, permite establecer caudales en los ríos tributarios antes de un evento de precipitación (o si esta no existiera) para analizar la evolución del embalse ante la incorporación de caudales fijos y permanentes diferentes en cada uno de los afluentes. El programa desarrollado incorpora recesión del hidrograma a través de la modelación del flujo base, herramienta muy importante para analizar la inercia de la cuenca luego de una precipitación dada en la misma.

También permite regular las erogaciones del embalse ante un escenario a simular, cambiando no solo la cantidad de turbinas en funcionamiento sino también los porcentajes de apertura de válvulas y analizar sus efectos en el embalse ante diferentes combinaciones de apertura de órganos de evacuación de escorrentías.

### 3.3 Selección de eventos extremos

Para realizar la calibración del programa y la aplicación del modelo, se seleccionaron 4 eventos en los últimos años, que hayan ocasionado una notable variación del nivel en el dique (posible precipitación y crecida extrema). Con datos provistos por el INA CIRSA se pudo obtener la variación horaria de los registros de precipitación, tomando como pico la precipitación máxima y evaluando la evolución de la lluvia antes y después de dicho pico.

Se desarrollará en detalle uno de los eventos explicando cómo se trabajó con el programa paso a paso. Se selecciona el evento que tuvo pico máximo el día 27/12/2018, por ser la máxima precipitación entre los 4 eventos relevados, y del que además se tienen datos de variación horaria del Dique el día de la crecida. De todos los eventos se analizarán resultados y conclusiones.

#### 3.3.1 Evento del 27/12/2018

Observando la variación diaria de niveles del Dique La Viña, entre los días 28 de diciembre del año 2018 y 1 de enero del año 2019, la cota varió más de 2 metros. Esto acusa la presencia de un posible evento extraordinario: una precipitación abundante. Recurriendo a los registros de medición horaria de precipitaciones en las correspondientes estaciones del INA CIRSA, se pudo identificar la evolución de la lluvia acontecida en ese período, diferenciando dos eventos:

-Uno que comenzó el día 27/12 aproximadamente a las 7:00 am, extendiéndose hasta la madrugada del día siguiente. Este evento tuvo una precipitación media acumulada de 54 mm.

-Un segundo evento ocurrido en horas de la madrugada del día 30/12, con una precipitación media acumulada de 20 mm.

La precipitación media acumulada, proviene de considerar las 7 estaciones previamente descritas y su influencia en el área de la Cuenca La Viña. Cabe aclarar que, para la correcta aplicación del método, se observó la posibilidad de existencia de eventos de magnitud similar 7 días antes y después del pico de precipitación, los cuales deberían ser considerados en la simulación y determinar las condiciones iniciales de humedad de la cuenca. Lo anteriormente descrito puede verse en la Fig. 28.

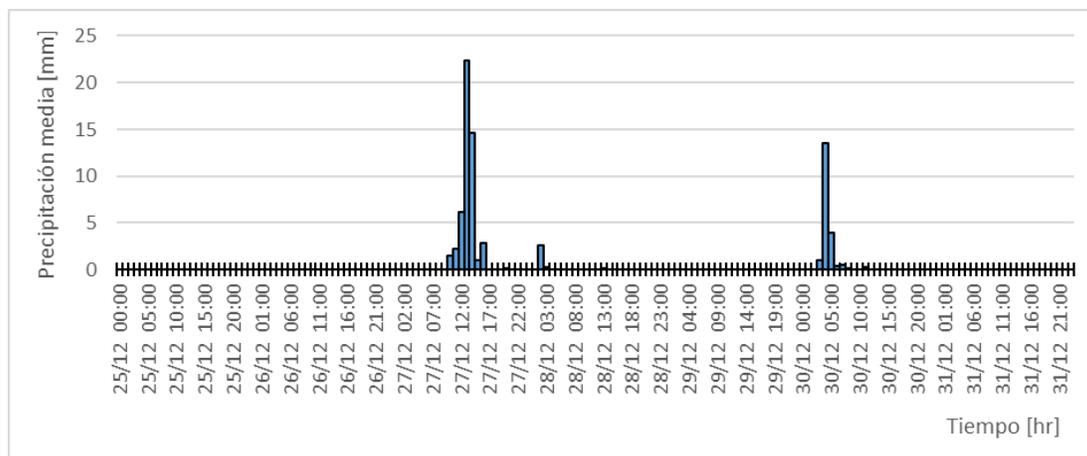


Fig. 28 - Precipitación media entre los días 25/12 y 31/12 en Cuenca La Viña

Con los datos de precipitación media acumulada, se procedió a llenar los campos del programa y comenzar la simulación. En la pestaña “Precipitación” se colocaron la fecha y horario aproximado del comienzo del evento, el valor de precipitación y la condición previa de humedad. Para esto último se consideró una humedad “Normal” ya que el mes de diciembre habitualmente es lluvioso y no existieron períodos de grandes sequías o intensas lluvias previas al evento. En la Fig. 29 se pueden ver los datos de precipitación de los eventos cargados en la planilla de Excel.

	A	B	C	D	E	F	G
1	<b>EVENTOS DE PRECIPITACION A MODELAR</b>						
2							
3	<b>A) Volúmenes Ingreso al Embalse por Precipitación</b>						
4							
5	<b>Evento 1</b>						
6	Fecha y Hora Inicio	27/12/2018	8:00				Volumen Aportado por cuenca (Hm <sup>3</sup> )
7		Precipitación Media en la cuenca (mm)	Condición humedad antecedente (S=seco, N=normal, H=húmedo)	CN medio en la cuenca	Precipitación Efectiva en la cuenca (mm)		Método CN
8		54	N	77	13		11,68
9							
10	<b>Evento 2</b>						
11	Fecha y Hora Inicio	30/12/2018	4:00				Volumen Aportado por cuenca (Hm <sup>3</sup> )
12		Precipitación Media en la cuenca (mm)	Condición humedad antecedente (S=seco, N=normal, H=húmedo)	CN medio en la cuenca	Precipitación Efectiva en la cuenca (mm)		Método CN
13		20	N	77	0		0,26
14							
15	<b>Evento 3</b>						
16	Fecha y Hora Inicio						Volumen Aportado por cuenca (Hm <sup>3</sup> )
17		Precipitación Media en la cuenca (mm)	Condición humedad antecedente (S=seco, N=normal, H=húmedo)	CN medio en la cuenca	Precipitación Efectiva en la cuenca (mm)		Método CN

Fig. 29 - Modelo de simulación a corto plazo: Eventos de precipitación a modelar

Seguidamente, se procedió a cargar el escurrimiento de los cauces en la siguiente pestaña. Como ya se mencionó, entre los principales afluentes al sistema se encuentran los ríos Mina Clavero, Panaholma y Nono. Si bien el programa permite discretizar el caudal aproximado aportado por cada río, el dato que realmente importa es el caudal total que aporta el escurrimiento al dique. Al no contar con mediciones en los cauces mencionados, se pudo estimar el caudal aproximado que entró al Dique aplicando balance: teniendo la variación de cota (delta volumen) y los datos de caudal erogado por válvula y central, se calculó que el caudal total que estaba ingresando al dique previo al primer evento era de 4,3 m<sup>3</sup>/s.

A continuación, se cargaron las erogaciones totales previas al evento, observando los mismos caudales erogados que se mencionaron en el párrafo anterior. El programa permite cargar un número de máquinas turbinando, un caudal aproximado de 10 m<sup>3</sup>/s. Si se sabe que el caudal erogado por la Central para ese día era de 8,7 m<sup>3</sup>/s, se puede cargar un valor de 0,87 para “máquinas” erogando 10 m<sup>3</sup>/s. Además, se pueden cargar otros datos como erogación por válvulas, vertedero, porcentaje de apertura de compuertas, si correspondiera, tal como puede verse en la Fig. 30.

Finalmente, el último dato a cargar en el programa de simulación es la condición inicial del dique previa al primer evento, colocando la fecha y el valor de la cota, que en este caso sería:

- Fecha Inicio Simulación: 26/12/2018
- Cota local Inicial Embalse: 90,14 (m)

### CAPÍTULO 3 – MODELO DE MANEJO DE EMBALSE DE CORTO PLAZO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>EROGACIONES POR TURBINAS Y VÁLVULAS</b>								
2	<b>2-A) Caudales Erogados por Central</b>								
3									
4									
5			<b>Caudal por Máquina (m³/s)</b>	<b>Número de Máquinas Turbinando</b>	<b>Q total Turbinado (m³/s)</b>				
6			10	0,87	8,7				
7			* Se debe colocar un valor entre 0 y 2						
8									
9	<b>2-B) Caudales Erogados por Válvulas</b>								
10									
11			<b>Porcentaje Apertura Valvula 1 (%)</b>	<b>Porcentaje Apertura Valvula 2 (%)</b>					
12			0	0					
13			* Se debe colocar un valor entre 0 y 100						
14									
15	<b>2-C) Caudales Erogados por Compuertas de Vertedero</b>								
16									
17			<b>Número de compuertas Abiertas</b>	<b>Apertura de compuertas (m)</b>	<b>Ancho de compuertas (m)</b>	<b>Alto de compuertas (m)</b>			
18			0	0	6,5	5,65			
19			* Se debe colocar un valor entre 0 y 8		* Se debe colocar un valor entre 0 y 5,65				
			INICIO		1-A) PRECIPITACION		1-B) ESCURRIMIENTO CAUCES		2) EROGACIONES

Fig. 30 - Modelo de simulación a corto plazo: Erogaciones

La siguiente pestaña se llama “Operación del Dique” y muestra una planilla de cálculo extensa, sólo a modo de visualización (no se pueden editar los campos, ya que son cálculos y resultados), donde se expresa en una tabla cómo va variando por ejemplo el nivel, el volumen y la erogación del dique hora a hora. Todos estos valores permiten graficar los dos resultados más importantes que arroja el programa: el hidrograma y la variación de nivel.

Por un lado, el hidrograma mostrado en la Fig. 31 grafica el caudal total ingresado y erogado del Dique La Viña según la simulación del programa (integral del área bajo la gráfica).

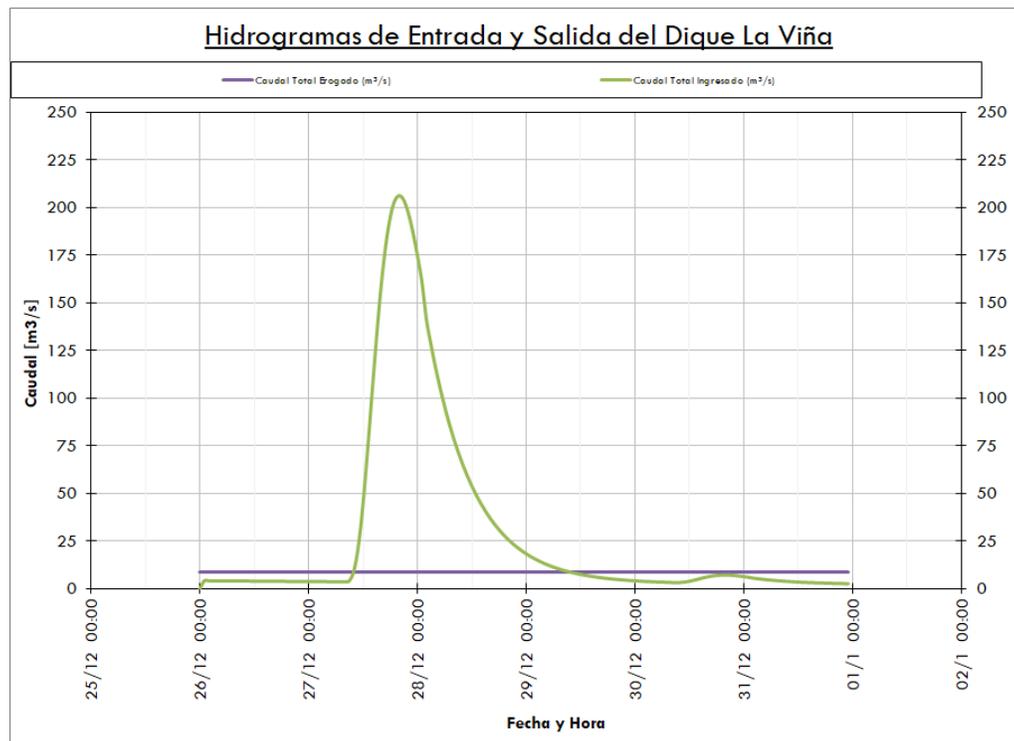


Fig. 31 - Caudales ingresados y erogados según simulación a corto plazo Dique La Viña

Por otro lado, se puede observar en la Fig. 32 la variación de la cota del Dique en el período en estudio. Puede verse en trazo rojo el nivel del embalse estimado por la simulación para los eventos cargados en el programa, y con cruces los valores reales de los registros históricos para esa fecha y hora. Como es claro en la imagen, la simulación se ajusta muy bien a los registros, resultando una validación fiable para aplicar a eventos futuros a corto plazo.

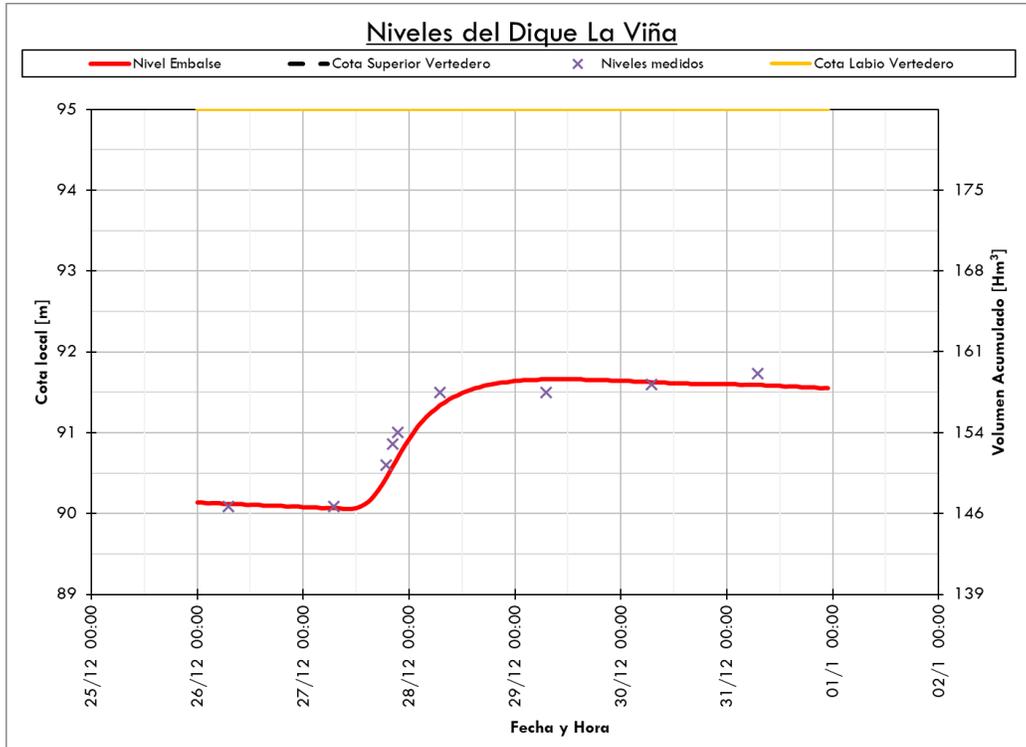


Fig. 32 - Niveles medidos y simulados en el Dique durante los eventos acontecidos entre el 25/12/18 al 01/01/19.

### 3.3.2 Evento del 31/12/2017

Análogamente a lo desarrollado previamente es que se procedió a simular el evento de precipitación registrado el 31 de diciembre de 2017. Para este evento los datos ingresados al programa se resumen en la Tabla 2. La Fig. 33 muestra el hietograma de la lluvia, repartida en dos eventos.

DATOS A INGRESAR EN EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN				
	Fecha	Hora	P (mm)	Humedad
Evento 1	31/12/2017	03:00	9	N
Evento 2	31/12/2017	19:00	55	N
Escorrentamiento total de cauces (m³/s)=				4,3
Caudal erogado total (m3/s)=				6,2
Fecha Inicio Simulación:				30/12/2017
Cota local Inicial Embalse (m)				85

Tabla 2 - Datos Evento 31/12/2017

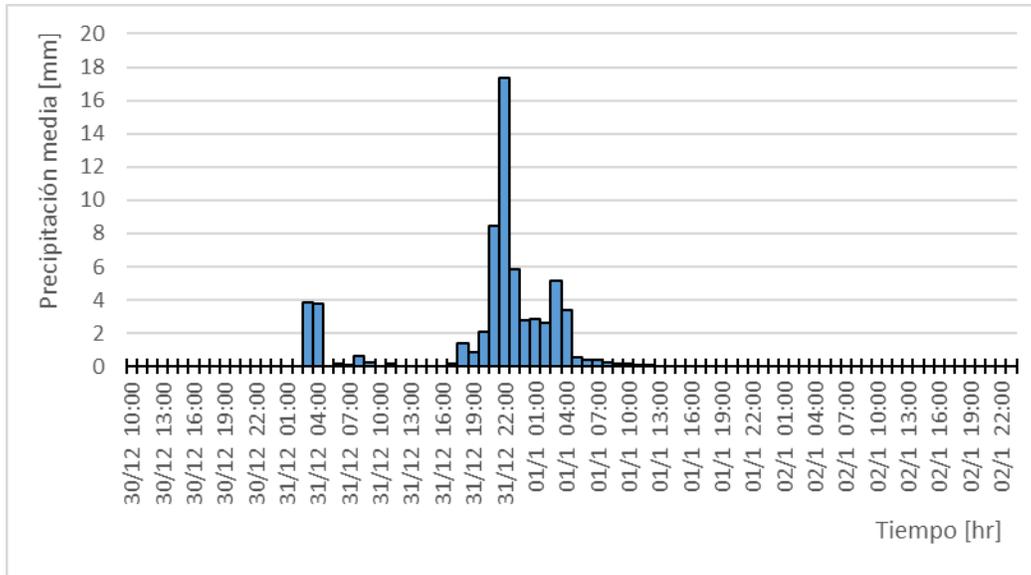


Fig. 33 - Hietograma de la lluvia acontecida entre el 31/12/2017 y el 01/01/2018 en Cuenca del Dique La Viña

A continuación, se presentan los hidrogramas ingresados y erogados del embalse en este evento (Fig. 34); y la comparación entre los niveles simulados y los observados (Fig. 35).

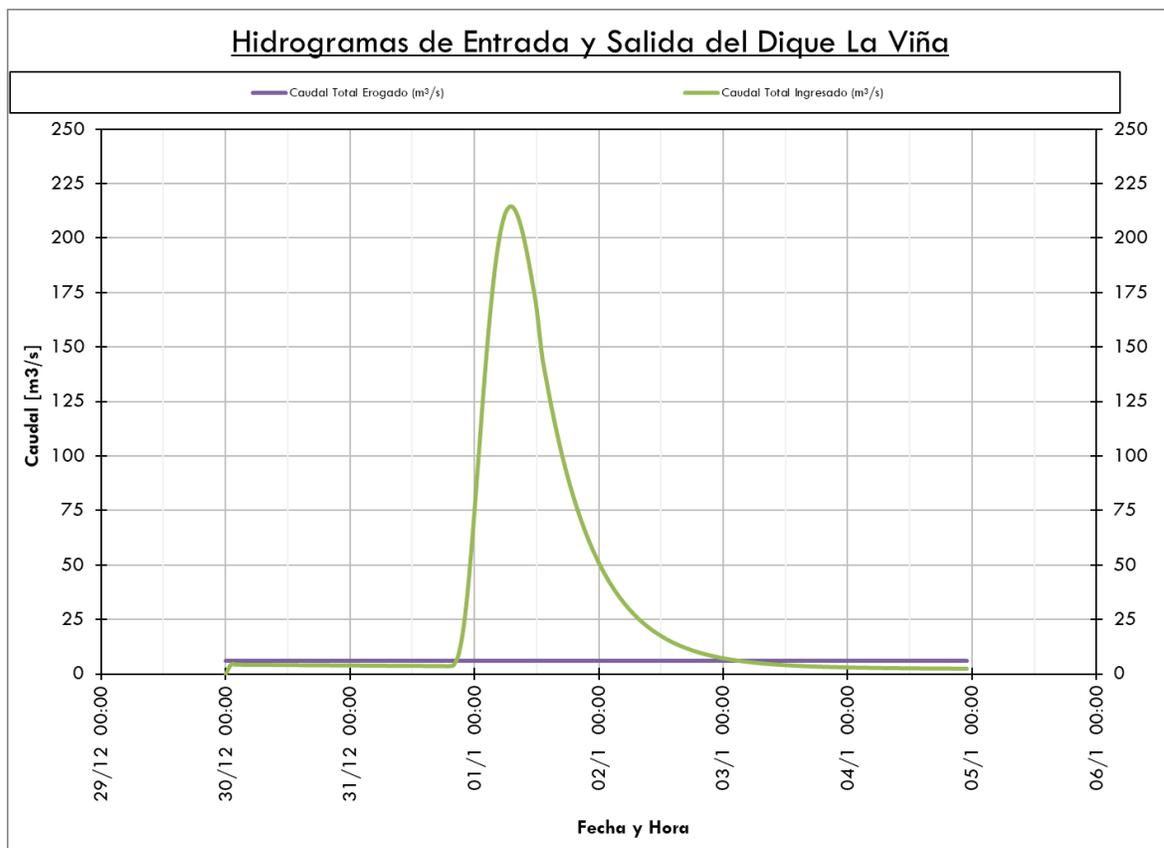


Fig. 34 - Hidrograma de entrada y salida Dique La Viña – 31 de Diciembre 2017 al 3 de Enero 2018

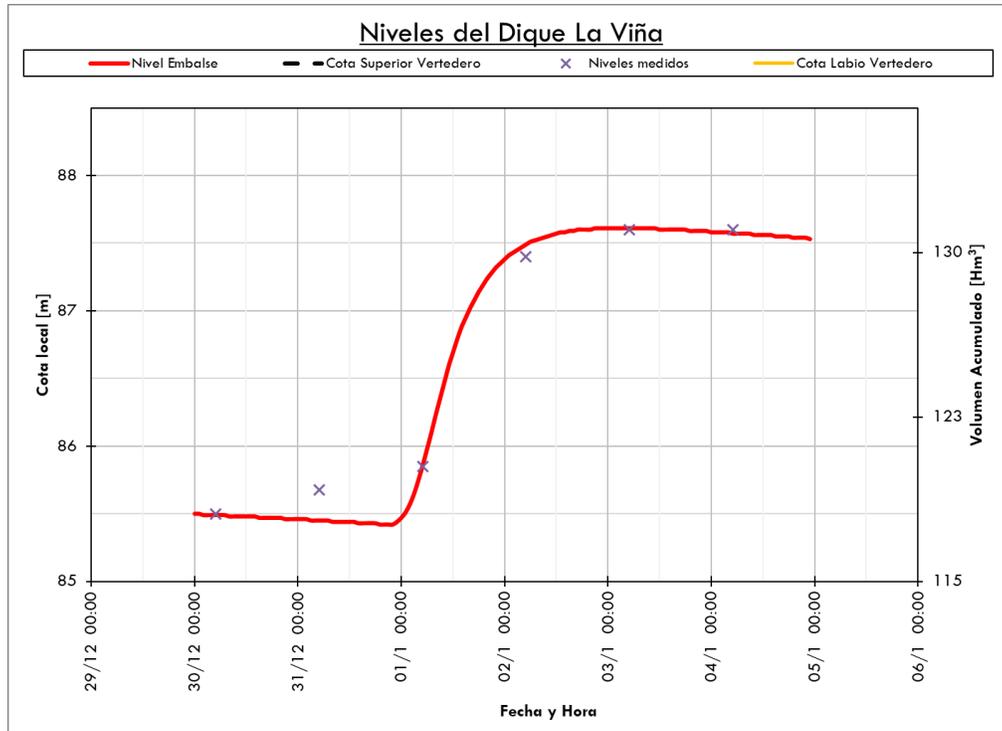


Fig. 35 - Comparación entre niveles estimados y medidos en el Dique La Viña – Evento del 31/12/2017

Como comentario de la Fig. 35 exceptuando un punto en particular, puede observarse una tendencia de la simulación muy cercana a los niveles medidos en la realidad.

### 3.3.3 Evento del 9/2/2018

Una vez más, se reitera el procedimiento anterior, aplicándolo a un evento acontecido en febrero del año 2018. En la Tabla 3 se resumen los datos que fueron ingresados al programa, y en la Fig. 36 puede verse el hietograma compuesto por 3 eventos, el primero de mayor intensidad y los dos restantes de menor intensidad.

DATOS A INGRESAR EN EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN				
	Fecha	Hora	P (mm)	Humedad
Evento 1	8/2/2018	20:00	38	N
Evento 2	10/2/2018	10:00	15	N
Evento 3	11/2/2018	00:00	15	N
Escorrentamiento total de cauces (m <sup>3</sup> /s)=				7,7
Caudal erogado total (m <sup>3</sup> /s)=				3,4
Fecha Inicio Simulación:				8/2/2018
Cota local Inicial Embalse (m)				90,35

Tabla 3 - Datos Evento 9/2/2018

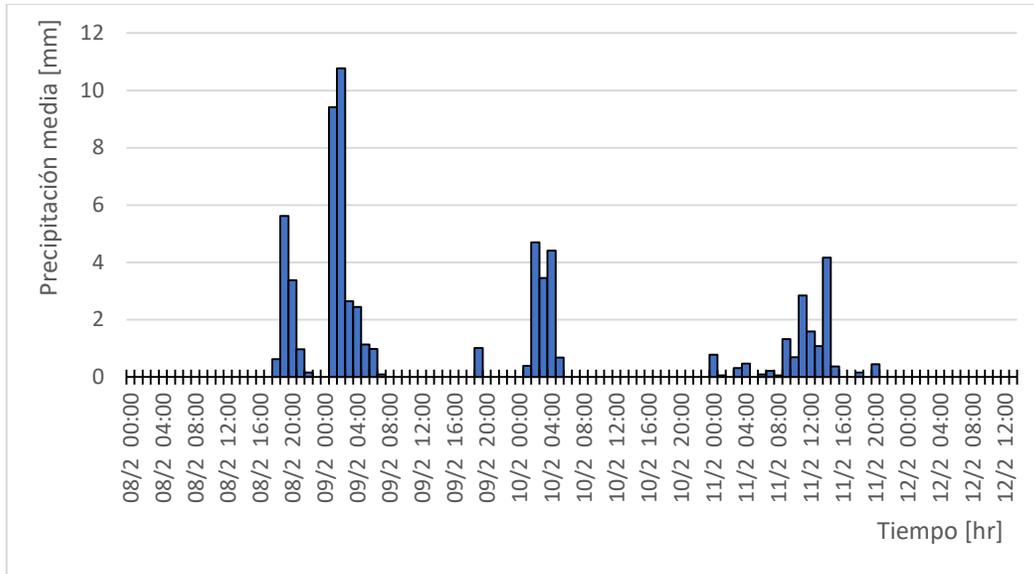


Fig. 36 - Hietograma de la lluvia acontecida entre el 8/2/2018 y el 11/2/2018 en Cuenca del Dique La Viña

En las Fig. 37 y Fig. 38 se puede observar la gráfica del hidrograma de entrada y salida del dique durante el evento, al igual que la variación de niveles respecto a lo simulado y lo medido, observando una vez más, una simulación muy similar a lo ocurrido.

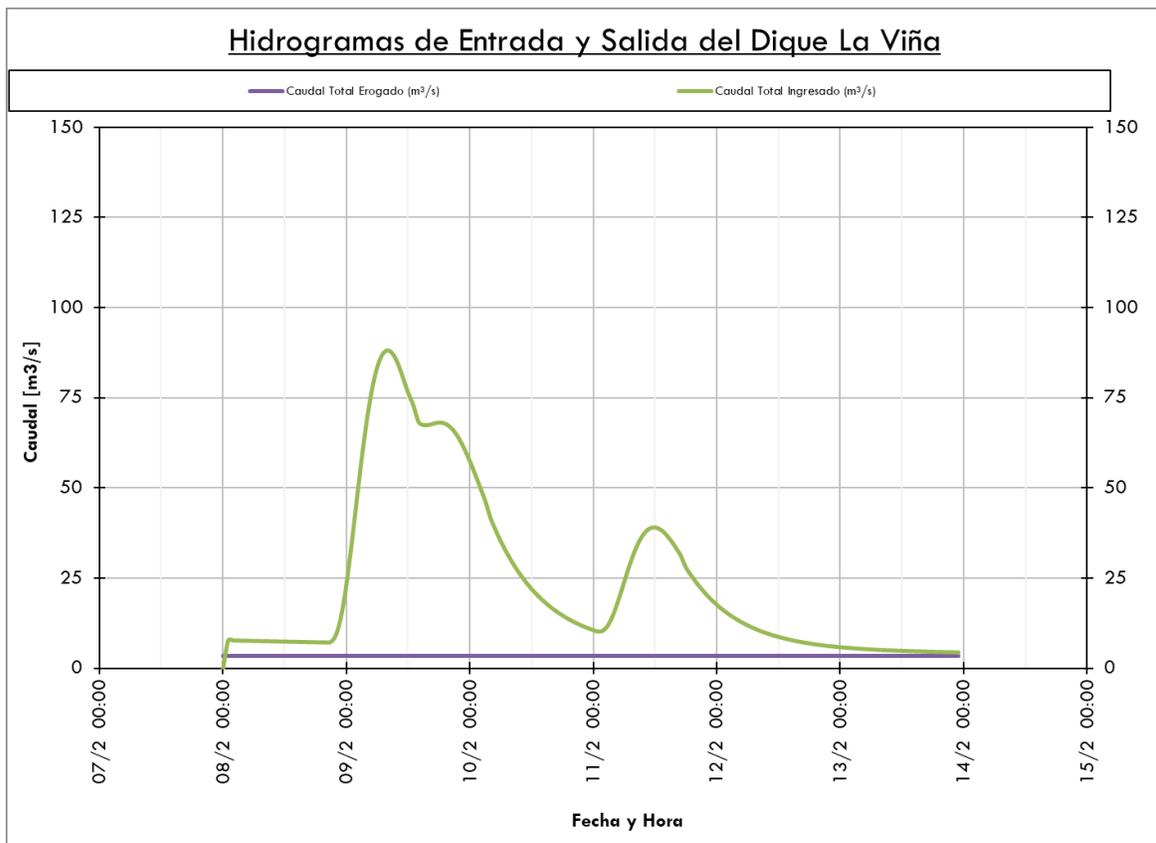


Fig. 37 - Hidrograma de entrada y salida Dique La Viña – 8 de Febrero 2018 al 13 de Febrero 2018

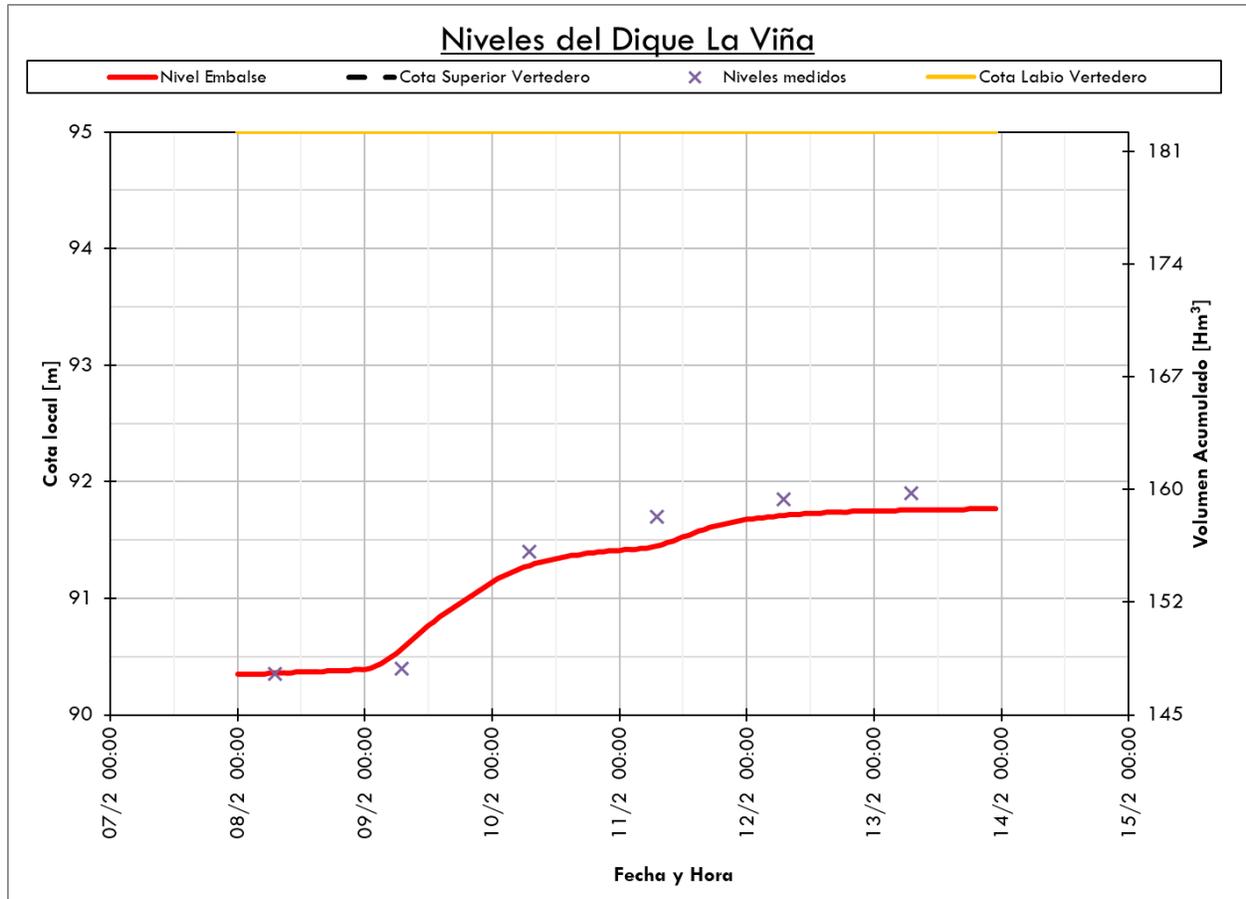


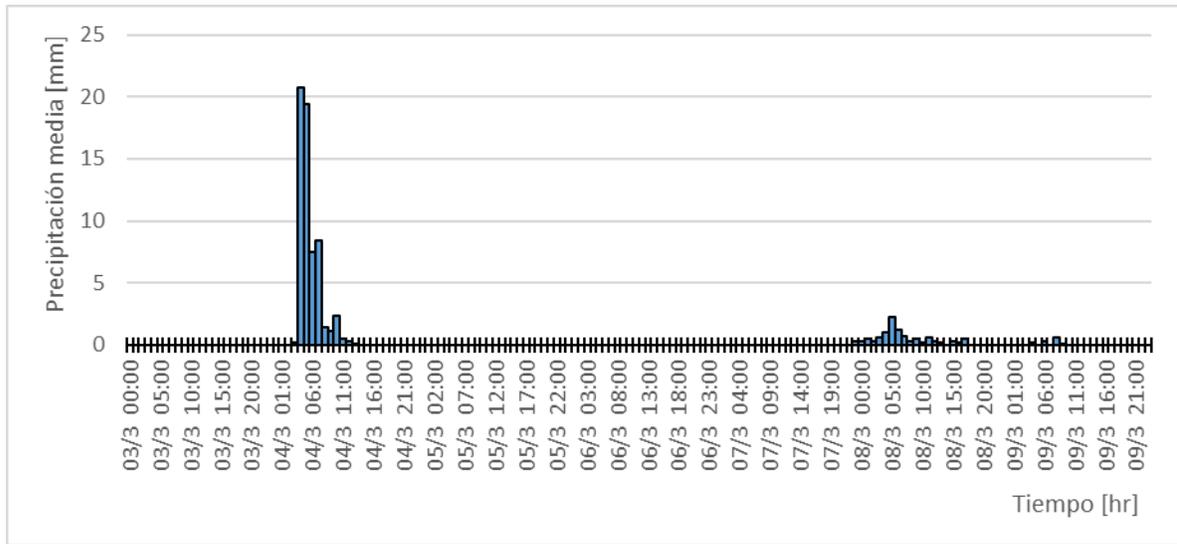
Fig. 38 - Comparación entre niveles estimados y medidos en el Dique La Viña – Evento del 9/2/2018

### 3.3.4 Evento del 4/3/2019

Finalmente se trabajó con un evento ocurrido en marzo de 2019, el cual tuvo las características que se resumen en la Tabla 4 y Fig. 39.

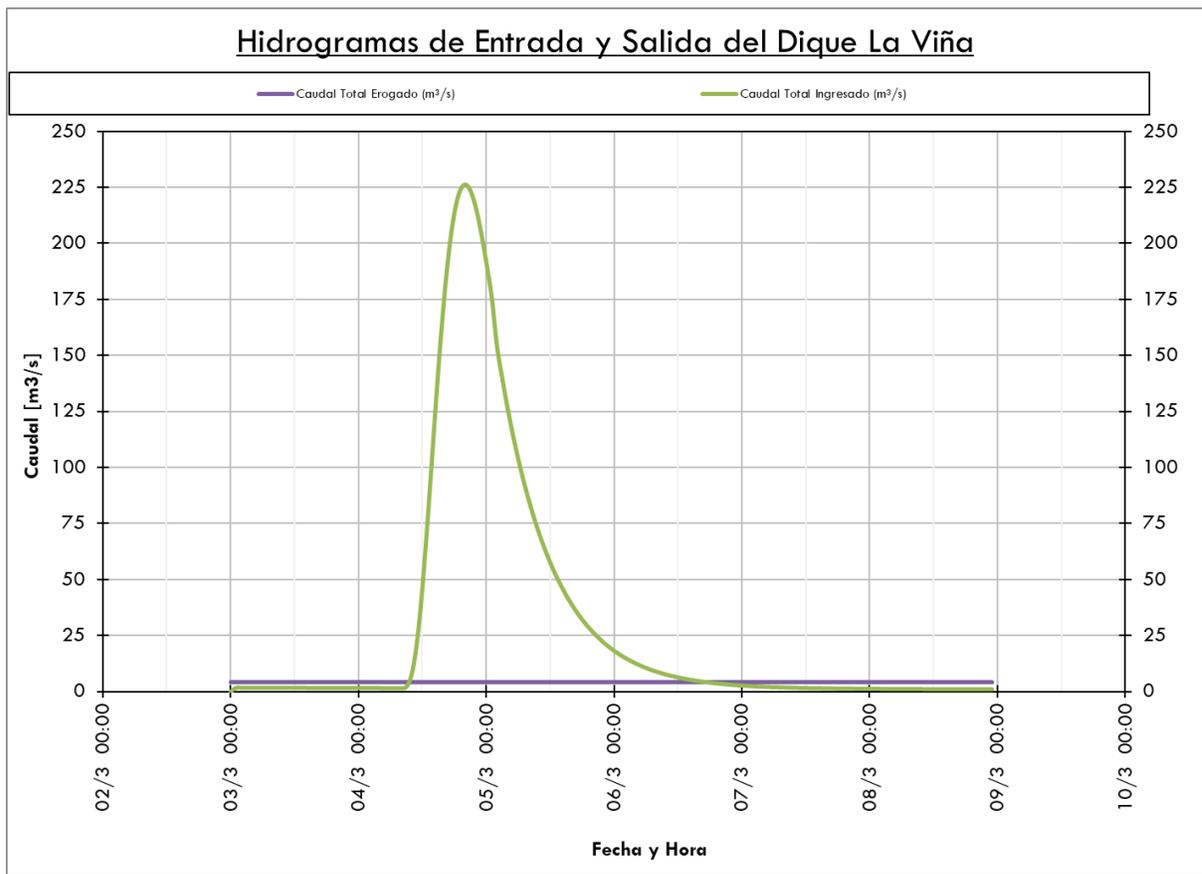
DATOS A INGRESAR EN EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN				
	Fecha	Hora	P (mm)	Humedad
Evento 1	4/3/2019	08:00	62	N
Evento 2	8/3/2019	06:00	11	N
Esguimiento total de cauces (m³/s)=				1,7
Caudal erogado total (m3/s)=				4,1
Fecha Inicio Simulación:				3/3/2019
Cota local Inicial Embalse (m)				96,80

Tabla 4 – Datos del evento 4/3/2019



**Fig. 39** - Hietograma de la lluvia acontecida entre el 4/3/2019 y el 9/3/2019 en Cuenca del Dique La Viña

Las Fig. 40 y Fig. 41 muestran los resultados de la simulación, observando el hidrograma de entrada y salida del Dique durante el evento y la comparación entre niveles medidos y estimados por el programa.



**Fig. 40** - Hidrograma de entrada y salida Dique La Viña – 4 de Marzo 2019 al 7 de marzo 2019

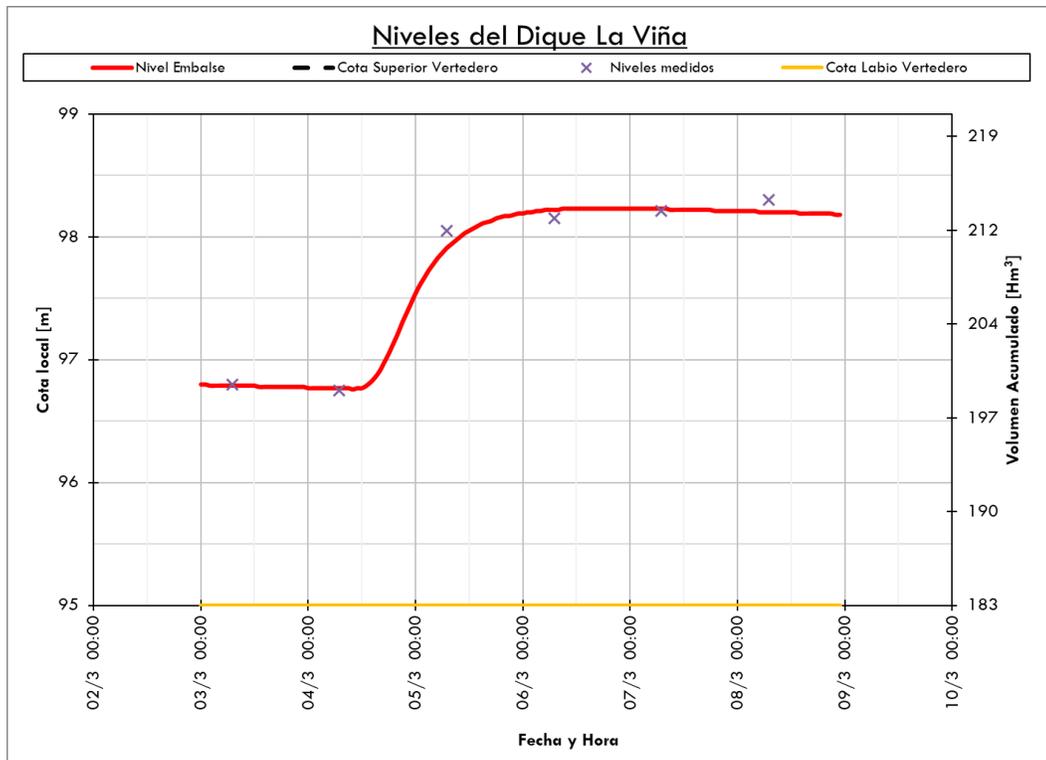


Fig. 41 - Comparación entre niveles estimados y medidos en el Dique La Viña – Evento del 4/3/2019

## CAPÍTULO 4: MODELO DE MANEJO DE EMBALSE DE LARGO PLAZO

### 4.1 Introducción

A partir de la utilización de modelos climáticos globales, es posible pronosticar las precipitaciones esperadas en los próximos meses en una localización deseada. Contando con esta información, se puede aplicar un modelo hidrológico de transformación lluvia caudal para estimar los volúmenes que ingresarán a un embalse, y a partir de los mismos generar una serie de proyecciones de niveles esperados en un dique.

En este capítulo se desarrolla y se calibra este modelo con la información previamente sistematizada (Cap. 2). También el modelo es validado comparando la evolución del nivel del dique proyectada por el modelo con la finalmente ocurrida.

### 4.2 Sistema de pronóstico estacional Multi-Modelo NMME

#### 4.2.1 Descripción

NMME (North American Multi - Model Ensemble, Kirtman et. al, 2014) es un sistema de pronóstico estacional multi-modelo experimental que consiste en la agrupación de información, acoplada en centros de modelado de EE. UU., disponibles para su utilización vía web. Los modelos que agrupa NMME son:

- 1) Canadian Meteorological Center 1 (**cmc1**)
- 2) Canadian Meteorological Center 2 (**cmc2**)
- 3) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Forecast-oriented Low Ocean Resolution (**gfdl\_flor**)
- 4) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (**gfdl**)
- 5) National Aeronautics and Space Administration (**nasa**)
- 6) National Center for Atmospheric Research (**ncar**)
- 7) NCEP Coupled Forecast System Model - Version 2 (**cfsv2**)
- 8) North American Multi - Model Ensemble (**nmme**)

Estos 8 modelos climáticos globales, estiman condiciones climáticas mensuales esperadas para los próximos 6 meses en todo el mundo. Por ejemplo, en la Fig. 42 puede verse gráficamente la estimación de anomalías mensuales de precipitación para América del Sur, según cada pronóstico, partiendo en el período comprendido entre septiembre de 2019 y febrero del año 2020.

Si bien en este trabajo se trabajará con las precipitaciones pronosticadas por este conjunto de modelos climáticos globales, vale destacar que este es solo uno de múltiples parámetros que los mismos calculan (tales como la temperatura del aire, anomalías espaciales, etc.). Este enfoque multimodelo es la base de varios esfuerzos internacionales de investigación colaborativa de predicción.

Para obtener valores que sirvan al análisis particular de una zona en estudio, el sitio web del NMME actualiza mes a mes una serie de archivos que se pueden descargar; estos consisten en planillas dispuestas en filas y columnas correspondientes a la latitud y longitud de un punto específico en el mapa mundial. De esta manera, si se requiere conocer la estimación de precipitaciones de una cuenca dada, basta con descargar la información y utilizarla.

SOUTH AMERICA NMME MONTHLY PRECIPITATION ANOMALIES September2019 INITIAL CONDITIONS

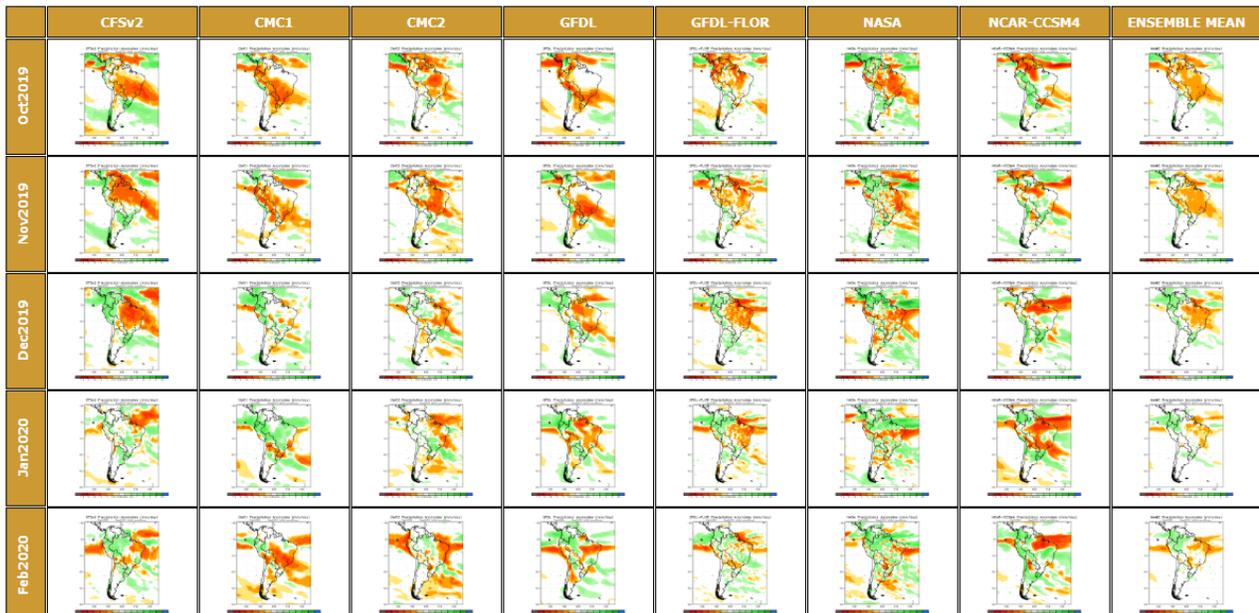


Fig. 42 - Anomalías mensuales de precipitación en América del Sur (NMME)

**4.2.2 Aplicación del NMME en la cuenca**

NMME permite estimar las precipitaciones mensuales esperadas en los próximos 6 meses en la cuenca del dique la Viña; y para cada uno de los meses esta herramienta estima 8 valores diferentes (es decir uno por cada modelo climático). Estas estimaciones serán aplicadas en el modelo de predicción del comportamiento del dique a largo plazo.

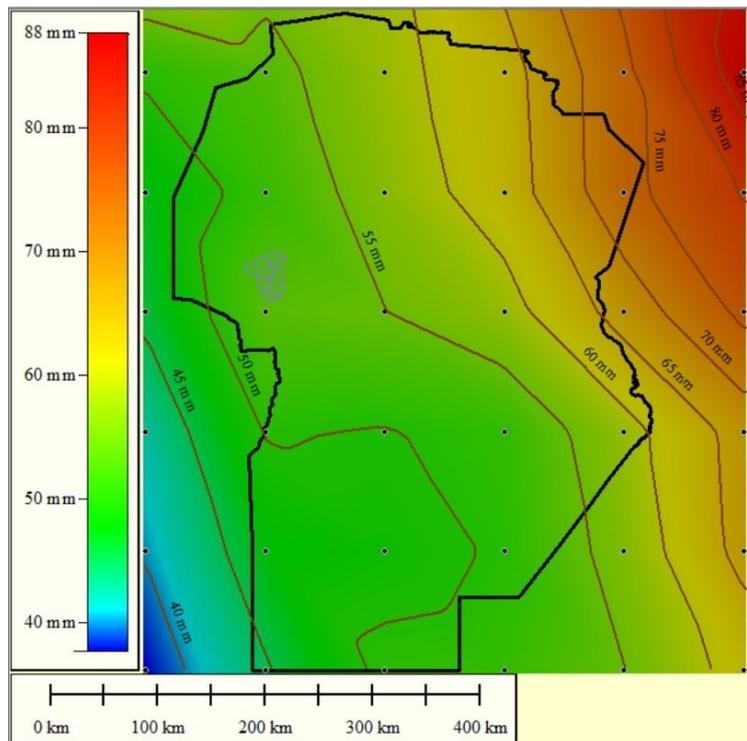
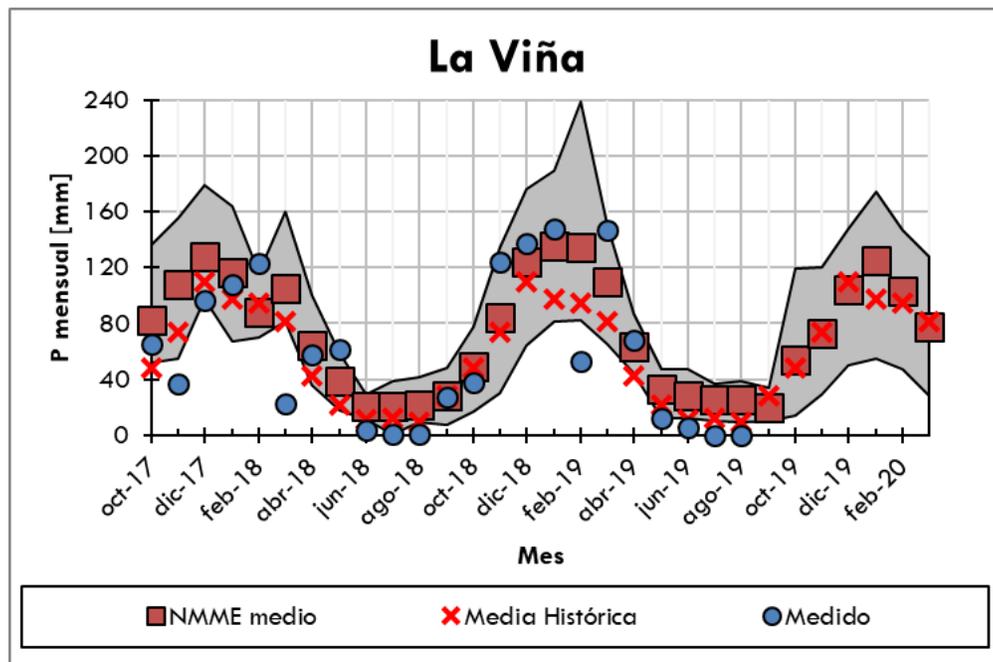


Fig. 43 - Precipitaciones medias pronosticadas para el mes de octubre de 2019 en la provincia de Córdoba

A modo de ejemplo, en la Fig. 43 se muestra el pronóstico de precipitaciones promedio esperado para el mes de octubre de 2019 en la provincia de Córdoba, con información extraída del sitio web del NMME. Cada punto de la matriz observada en el gráfico, corresponde a un valor de latitud y longitud, cuyos datos fueron introducidos al software Global Mapper. En esta gráfica, se puede ver que la cuenca de estudio está entre las curvas de isoprecipitación de 50 mm y 55 mm; que es el valor de lluvia media esperada para el mes de octubre de 2019.

En primer lugar, a modo de validación de la herramienta de pronóstico de precipitaciones NMME, se comparan los valores de precipitación pronosticados y los registrados los últimos meses en la cuenca de análisis. En la Fig. 44 se observa que en la última temporada de lluvia (entre fines de 2018 y los primeros meses de 2019) se superaron los valores mínimos pronosticados en la mayoría de los meses; mientras que por el contrario, desde mayo de 2019 la precipitación ocurrida se encuentra en valores cercanos a los mínimos esperados por los pronósticos NMME. Se espera que en los próximos meses las precipitaciones se incrementen paulatinamente y que se acerquen a los valores medios pronosticados.



**Fig. 44** - Comparación entre precipitaciones mensuales registradas (puntos azules) y pronosticadas en la cuenca del Dique La Viña. Se muestran los valores pronosticados medios (cuadrados rojos) y mínimos y máximos (zona de color gris).

La Fig. 45 muestra el hietograma de precipitaciones a partir de la aplicación del pronóstico mensual pronosticado por los diferentes modelos climáticos, mostrando la precipitación pronosticada máxima, la mínima y la estimada por el NMME (que es igual al promedio) para los próximos 6 meses, es decir en el periodo entre octubre de 2019 y marzo de 2020.

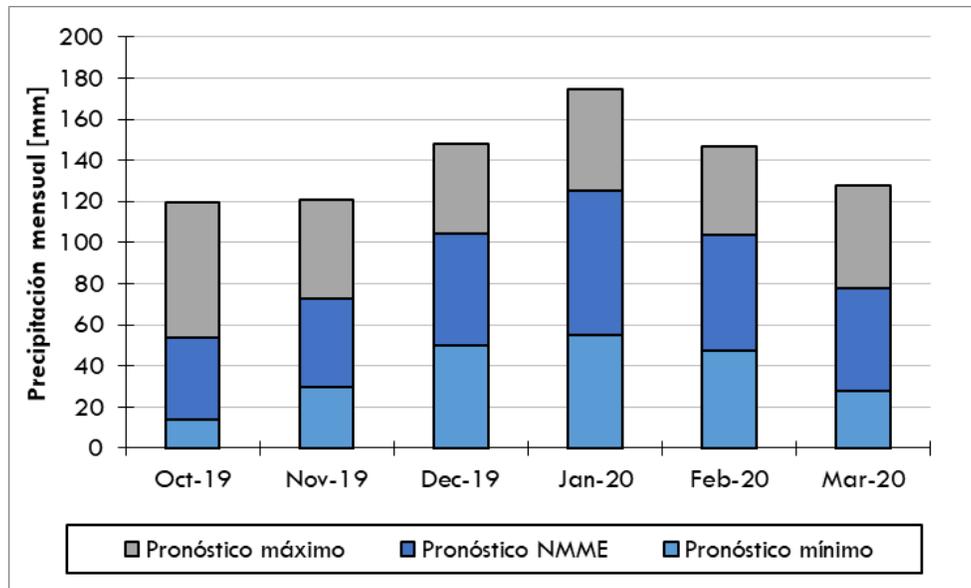


Fig. 45 - Hietograma de precipitación mensual pronosticada para el período octubre 2019 – Marzo 2020 en cuenca del Dique La Viña

#### 4.2.3 Aplicación de modelo hidrológico y análisis de resultados

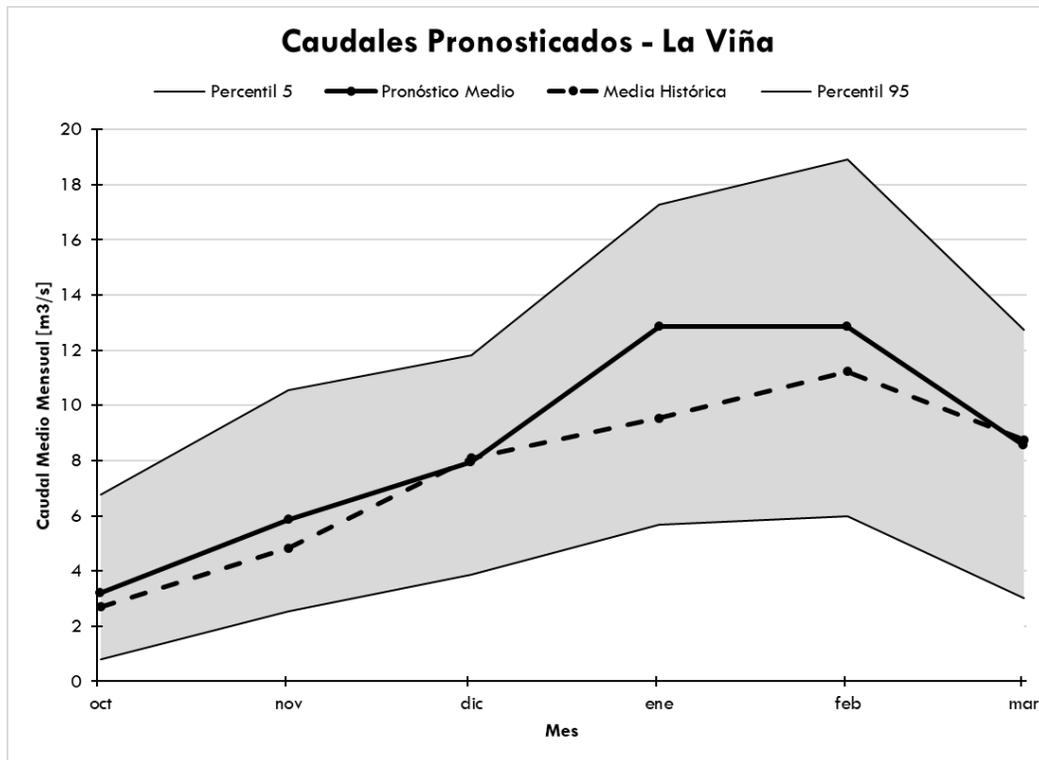
La modelación a largo plazo consiste en primer lugar en estimar los volúmenes o caudales  $Q$  que ingresarán en el Dique; y para ello se propone la aplicación del método racional para la transformación de la lluvia en caudal.

El procedimiento aplicado consiste en la estimación de los caudales medios mensuales y los volúmenes totales mensuales que ingresarán al embalse los próximos 6 meses; y para ello es necesario conocer:

- Los Coeficientes de escurrimiento  $C$  promedios y valores más probables (mediana) de la cuenca, calculados a partir de datos históricos.
- Intensidades de precipitación  $i$ , utilizando la información otorgada por el NMME.
- El área de la cuenca  $A$  de analisis.

Vale la pena aclarar que para aplicar este método se tomaron dos series de coeficientes de escurrimiento: los valores promedios mensuales históricos y los valores mensuales más probables (es decir las medianas históricas); estimando finalmente 16 valores de caudales medios mensuales para cada uno de los meses del periodo de análisis. A partir de las estimaciones de caudales realizadas, posteriormente se pronostican los niveles del embalse esperados en el caso que la erogación de los embalses en el periodo analizado sea constante en el Dique La Viña.

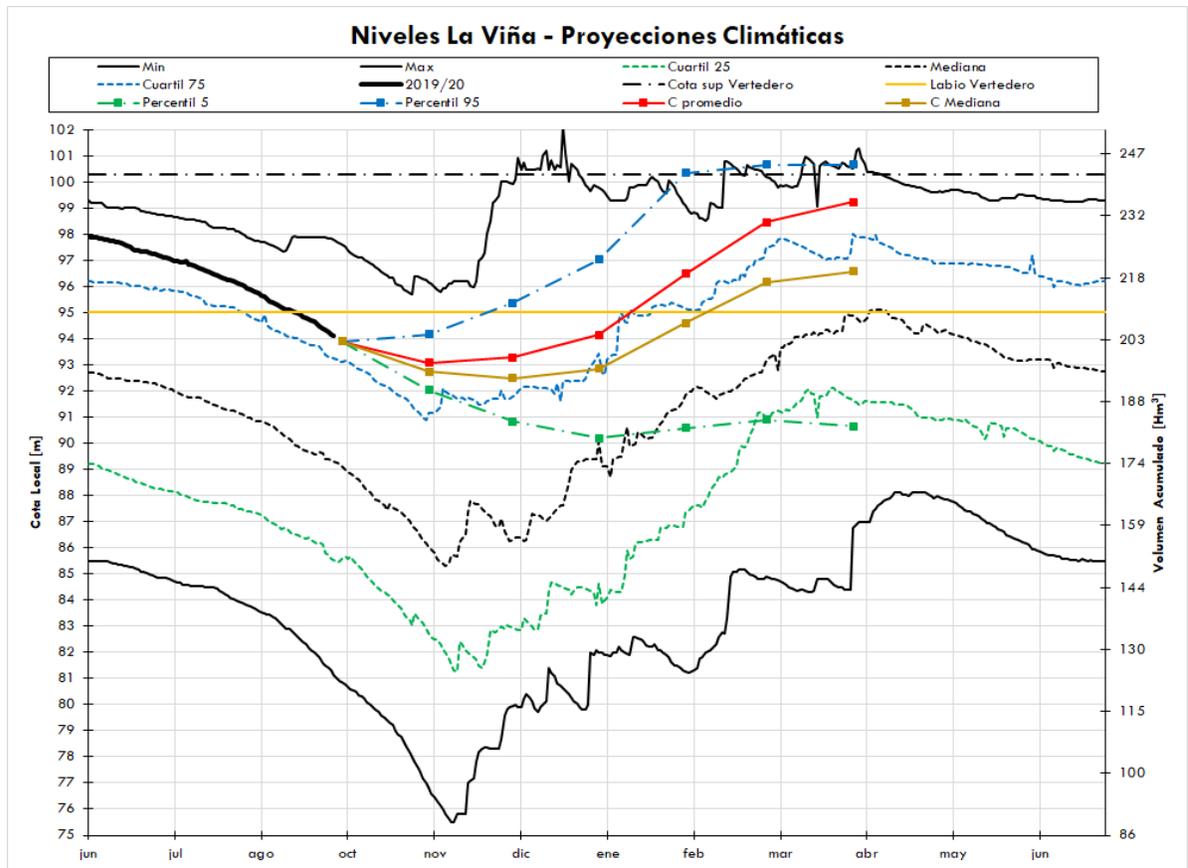
Con los datos de precipitación mensual pronosticada, los coeficientes de escorrentía medios y medianas mensuales y el área de la cuenca analizada, se procedió a estimar los caudales medios mensuales esperados durante los próximos 6 meses, los cuales se presentan en la Fig. 46 y se comparan con los valores medios históricos registrados en cada caso.



**Fig. 46** - Comparación entre caudales medios mensuales registrados (línea negra discontinua) y pronosticados en la cuenca del Dique La Viña. Se muestran los valores pronosticados medios (línea negra continua) y mínimos y máximos (zona de color gris)

En los meses próximos se espera un aumento significativo de caudales respecto a los de los últimos meses. A su vez, se espera que los caudales medios pronosticados sean cercanos a los valores medios históricos.

Finalmente, en la Fig. 47 se presentan los pronósticos de niveles del embalse generados para el período entre octubre de 2019 a abril de 2020: en línea negra fina se muestran los niveles máximos y mínimos registrados y en línea negra gruesa los del año 2019/2020; además en líneas punteadas se muestran los percentiles 25, 50 y 75 de la serie histórica de niveles; y en líneas de color se muestran los pronósticos mensuales desarrollados con sus respectivos intervalos de confianza. Se adoptaron los niveles iniciales de los embalses al 1/10/2019 iguales a 93,8 m.



**Fig. 47** - Comparación entre niveles percentiles 25, 50 y 75 (en líneas punteadas), máximos y mínimos históricos (línea negra fina) y los del año 2018/2019 (línea negra gruesa) respecto a los pronosticados en los próximos meses en la cuenca del Dique La Viña. Se muestran los valores pronosticados medios (línea de color) y percentiles 5 y 95 (líneas punteadas).

Se observa un rango de menor incertidumbre para los períodos próximos a la aplicación del método, el cual va creciendo a medida que se avanza en el tiempo. Al analizar cuándo se prevé alcanzar nivel de labio de vertedero (es decir cota local 95 m) en caso de permanecer la erogación constante e igual a  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ , se espera que ocurra entre los meses de enero y febrero según el caso simulado. Si las lluvias estuvieran cerca del máximo esperado, en noviembre ya se alcanzaría el nivel de vertedero; por el contrario, si las precipitaciones estuvieran cerca del mínimo, no se llegaría a al nivel de vertedero en el verano.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

### 5.1 Técnicas del trabajo realizado

En lo relacionado a la sistematización de la información histórica del embalse, se logró recopilar y actualizar información desde el año 1955, lo cual es fundamental para realizar cualquier estudio hidrológico ya que se necesita contar con abundante información de calidad. La recopilación y digitalización de los datos recabados es muy importante, ya que son el punto de partida para analizar la ocurrencia de eventos extremos, ya sean períodos de estiaje o crecidas sucedidos a lo largo de la historia en la cuenca. La aplicación de análisis estadísticos de la serie de datos, permite proyectar a futuro medidas estructurales y no estructurales en la cuenca y mejorar el plan de manejo y operación de los embalses ante potenciales eventos de sequía o inundación que pudieren ocurrir en adelante.

Al desarrollar un modelo hidrológico calibrado a corto plazo, a partir de ahora se puede estimar el comportamiento del nivel del dique frente a un evento que está ocurriendo o se espera en las próximas horas o días con gran nivel de certidumbre. Con esta información se pueden plantear escenarios que faciliten la toma de decisiones en el manejo de un embalse, como ser la apertura de válvulas, la utilización del vertedero, la prevención de inundaciones, el aviso a la población, etc.

Con el desarrollo de proyecciones a largo plazo de los niveles potenciales a alcanzar por un embalse se ha mejorado significativamente la planificación sustentable de los embalses y desembalses. El agua es un recurso muy valioso y es fundamental optimizar su uso y gestión sustentable. Es por esto que un adecuado manejo y gestión del recurso hídrico, es esencial para el desarrollo de las actividades del hombre: la agricultura, el aprovechamiento de la energía hidroeléctrica, la provisión de agua para grandes ciudades y la preservación del medio ambiente.

### 5.2 Personales de la Práctica Supervisada

Este trabajo me permitió conocer nuevas herramientas de gran utilidad para el análisis de una cuenca, partiendo de imágenes satelitales y la definición de cursos de agua para delimitar el área de estudio. Además, pude conocer distintos medios de información disponible en la web, los cuales a futuro me permitirán realizar trabajos y estudios similares, desconocidos hasta el momento. La sistematización de la información disponible y la búsqueda de nuevos datos, abrió un campo de organización personal para diferenciar fuentes, separar parámetros y valores según conveniencia y presentar gráficos que hagan visible la información.

El acercamiento a fuentes de información proveniente de entes como EPEC, APRHi, CETA y el INA CIRSA, los cuales tienen sede en la ciudad de Córdoba y están íntimamente vinculados a los recursos hídricos de la provincia, me permitió tener una visión global de las funciones de cada uno, las formas de trabajo, las posibilidades laborales vinculadas al tema, y la necesidad de contar con un aporte conjunto de las distintas organizaciones que contribuya al adecuado manejo de los embalses. Es responsabilidad de las instituciones y los profesionales afines al uso del agua garantizar una gestión sustentable de este recurso.

Por otro lado, con la aplicación de métodos y conceptos de materias de grado como “hidrología y procesos hidráulicos”, pude comprender la importancia de determinar el coeficiente de escurrimiento y su vinculación con las características propias de la cuenca. Si bien el método racional es simple y se utiliza en cuencas pequeñas, comprobé bajo el trabajo conjunto con mis tutores, que es muy útil para tener una estimación aproximada que describa el comportamiento de una cuenca frente a determinados eventos de lluvia.

La validación del recurso que permite estimar el comportamiento del dique a corto plazo, me permitió dimensionar las posibilidades de combinar conceptos, experiencia e información para

generar herramientas de esta magnitud. Tomando eventos que ocurrieron en el pasado y cargando sus características en el programa, comprobé la eficacia de un sistema programado y la importancia de poder validarlo con eventos concretos.

Por último, el conocimiento de sistemas extranjeros de pronóstico multi-modelo, proporciona una fuente de información disponible en forma gratuita para distintos propósitos de estudios a gran escala, relacionados al medio ambiente, al clima y a la hidrología. Su utilización para prever el comportamiento del recurso hídrico a largo plazo, motiva a utilizarlo como herramienta para perfeccionar las técnicas de medición y recopilación de información histórica de las cuencas, desde el área profesional que desarrolle en un futuro.

### **5.3 Trabajos futuros**

La disposición de nuevas estaciones de medición de precipitaciones repartidas en el área de estudio, permitiría mejorar la definición de parámetros de la cuenca. En el caso que se proporcione la información de los últimos años de todas las estaciones pluviométricas mencionadas en este trabajo, podría perfeccionarse la extrapolación realizada a partir de los datos de la estación que se tomó como base.

Por otro lado, si se contara con sensores de nivel en cada afluente del dique, podría conocerse en tiempo real cuánta agua está ingresando al mismo, con lo cual la metodología a corto plazo se independizaría de la precipitación, para obtener directamente el caudal ingresado al dique.

Si este procedimiento de modelación hidrológica se aplicara en todos los diques restantes de la provincia, e incluso del país, podría optimizarse la gestión de recursos hídricos con el consecuente beneficio ambiental y contar así con una adecuada cota todo el año para las actividades del hombre.

**BIBLIOGRAFÍA**

Bertoni Juan Carlos, Catalini Carlos (2006) “Flujo impermanente en canales abiertos. Propagación de crecidas” – Universidad Nacional de Córdoba

Empresa Provincial de Energía Córdoba EPEC “Dique La Viña”  
<https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/lavinia.pdf>

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba “Ordenamiento Ambiental del Territorio” [http://www.ciisa.inv.efn.uncor.edu/?page\\_id=77](http://www.ciisa.inv.efn.uncor.edu/?page_id=77)

Garlot Pablo “Mapas de ríos y cuencas de la provincia de Córdoba” Centro de Estudios y Tecnología del Agua CETA – Ordenamiento Territorial Córdoba  
<http://www.cazadoresdecrecidas.unc.edu.ar/mapa/>

Instituto Geográfico Nacional IGN “Mapas de modelo digital de elevaciones DEM”  
<http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>

Instituto Nacional del Agua / Subgerencia Centro de la Región Semiárida INA CIRSA “Sistema de Gestión de amenazas” <https://sgainacirsa.ddns.net/cirsa/>

Kirtman BP, Min D, Infanti JM et al (2014) The North American multi-model ensemble (NMME): phase-1 seasonal to interannual prediction, phase-2 toward developing intra-seasonal prediction. Bull Am Meteorol Soc 95:585–601. doi: 10.1175/BAMS-D-12-00050.1 CrossRefGoogle Scholar

Mijares Francisco J. Aparicio (1992) “Fundamentos de hidrología de superficie”– Limusa

North American Multi-Model Ensemble NMME “Climate prediction center”  
<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/>

Rojo Julián David “Relaciones lluvia-escorrentía”

Sánchez F. Javier “Hidrología superficial”– Universidad de Salamanca