

# LA SEGURIDAD DE LA CIUDAD DE CÓRDOBA: ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR FALLA DE LA PRESA SAN ROQUE <sup>1</sup>

María Lábaque<sup>2</sup>, Teresa Reyna<sup>3</sup> y Santiago Reyna<sup>4</sup>

Resumen: El nuevo Dique San Roque, se ubica en el Valle de Punilla de la provincia de Córdoba en Argentina sobre el curso del río Suquía. Aguas abajo de la presa, sobre las márgenes de este río, se encuentran grandes asentamientos urbanos como la Ciudad de Calera (a 13 km) y la Ciudad de Córdoba (a 42 km), esta última capital de la provincia con más de un millón trescientos mil habitantes. Además, una gran parte de la vida de esta ciudad está localizada en las márgenes del Suquía; en particular servicios fundamentales como el suministro de agua potable, electricidad, policía y hospitales. En este artículo se describen estudios y resultados obtenidos que son la base para la realización del Plan de Acción Durante Emergencias de la Presa San Roque. Se plantearon posibles escenarios de rotura, se estudió de manera particular la rotura por sobrepaso y la rotura por actos de vandalismo. Se confeccionó el mapa de inundación para un caso hipotético de rotura por vandalismo utilizando los valores obtenidos de la modelación con HEC-RAS en régimen no permanente. Se realiza también un primer análisis de la vulnerabilidad de la Ciudad a este tipo de eventos. Se recomienda realizar estudios del escenario posible de rotura por sismo.

**Palabras clave:** ciudad de Córdoba, HEC-RAS, presa San Roque, rotura de presa, seguridad.

## SAFETY OF THE CITY OF CÓRDOBA: FAILURE ANALYSIS OF SAN ROQUE DAM

Abstract: The new San Roque Dam is located in Punilla Valley in the Province of Córdoba, Argentina, on the course of the Suquía River. Downstream from the dam, on the banks of this river, there are large urban settlements such as the city of Calera (13 km) and the city of Córdoba (42 km), being the latter the provincial capital with more than one million three hundred thousand inhabitants, and the second city in Argentina. Besides, most of the activities of the city are located on the Suquía River's banks; particularly the main services as drinking water supply, electric power supply, the police station, and hospitals. This research work describes de studies and results obtained as the basis for the implementation of Emergency Action Plan of San Roque Dam. Possible breakage scenarios were considered; failure due to overtopping and breakage due to acts of vandalism were particularly studied. A flooding map for a hypothetical case of breakage due to vandalism was prepared using the values obtained from modeling with HEC-RAS in non-permanent regime. The first analysis for vulnerability of the City during this type of events was also conducted. It is recommended that studies on possible scenarios of breakage due to earthquake be carried out.

**Keywords:** Cordoba city, dam break, HEC-RAS, safety, San Roque dam.

### INTRODUCCIÓN

El nuevo Dique San Roque (1944), se ubica en el Valle de Punilla de la Provincia de Córdoba en la República Argentina (31° 22' Latitud Sur, y 64° 27' Longitud Oeste), sobre el curso del río Suquía. Este dique se encuentra ubicado

<sup>1</sup> Artículo recibido el 13 de julio de 2010 y aceptado el 15 de abril de 2011.

<sup>2</sup> Prof. Adjunto Obras Hidráulicas y de Mecánica de los Fluidos Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

<sup>3</sup> Prof. Adjunto de Hidrología y Procesos Hidráulicos y de Obras Hidráulicas, Director de Carrera Especialista en Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: [teresamaria.reyna@gmail.com](mailto:teresamaria.reyna@gmail.com)

<sup>4</sup> Prof. Titular Plenario de Obras Hidráulicas y de Ingeniería Ambiental. Director de Maestría en Recursos Hídricos y Maestría en Ambiente. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

aproximadamente 150 metros aguas abajo del viejo Dique San Roque (1884-1891). A sus orillas se encuentra la ciudad de Villa Carlos Paz (importante destino turístico argentino) y otras poblaciones menores, como Biale Massé, Villa Santa Cruz del Lago, San Roque y Villa Parque Siquiman, las cuales en conjunto tienen 64,235 habitantes. En la actualidad, la Ciudad de Carlos Paz es uno de los polos de atracción turística más importante de la provincia (Figura 1). También sobre las márgenes del río Suquía y aguas abajo de la presa, se encuentran grandes asentamientos urbanos como la Ciudad de Calera (13 km), y la Ciudad de Córdoba (42 km), esta última capital de la provincia con más de un millón trescientos mil habitantes y segunda ciudad de Argentina. Gran parte de la vida de esta ciudad está localizada en las márgenes del Suquía, incluyendo servicios fundamentales como el suministro de agua potable, electricidad, policía y hospitales.



**Figura 1: Ubicación de la Presa San Roque en la Provincia de Córdoba.**

Por sus características físicas y por la existencia de riesgo de pérdidas de vidas, pérdidas de servicios esenciales y pérdidas económicas en caso de falla, esta presa recibiría la clasificación de riesgo potencial más alta según la mayoría de las normas internacionales. (ver Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses de España, “Federal Guidelines for Dam Safety. Emergency Action Planning for Dam Owners” de Estados Unidos, “Dam-Break Flood Analysis del ICOLD, Dam Safety Guidelines of Canadian Dam Safety Association”).

Ocasionalmente, algunas presas construidas para almacenar agua han fallado en varias partes del mundo y descargado el agua almacenada, provocando daños incalculables en pérdidas de vida y grandes daños a la propiedad. Las fallas han involucrado presas construidas sin la aplicación de principios de ingeniería, pero también han ocurrido en presas construidas en tiempo y con diseños y métodos de construcción estándares en ingeniería. Esto enciende una señal de alerta para la situación existente en la Ciudad de Córdoba y plantea la necesidad de determinar el grado de afectación a la que serían sometidos sus habitantes y sus servicios básicos, y el planteo de alternativas (en caso de ser necesarios) para asegurar su funcionamiento en caso de emergencia.

La existencia de un plan bien diseñado e implementado ante una situación de emergencia, que plantee las acciones a seguir, proveyendo información detallada sobre qué hacer si un accidente o emergencia ocurre, reduce la severidad de la emergencia, las pérdidas humanas y económicas y el daño ambiental asociado. Un Plan de Acción Durante Emergencia (PADE) es un documento formal que identifica las condiciones de emergencia potencial en una presa y especifica acciones planeadas a ser seguidas para minimizar la pérdida de vida y el daño a la propiedad.

Para establecer el rol de los PADE dentro de la gestión del riesgo deben distinguirse primero algunos conceptos, que en ocasiones han sido equivocadamente considerados como sinónimos pero que son definitivamente diferentes tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo (UNDRO, 1979):

- a) Riesgo o daño, es la convolución de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos (Amenaza) y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas (Vulnerabilidad).
- b) Amenaza o Peligro, o factor de riesgo externo de un sujeto o sistema, representado por un peligro latente asociado

con un fenómeno físico de origen natural o antrópico.

- c) Vulnerabilidad puede entenderse, entonces, como la predisposición intrínseca de un sujeto o elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas, y por lo tanto su evaluación contribuye en forma fundamental al conocimiento del riesgo mediante interacciones del elemento susceptible con el ambiente peligroso.

Los PADE se ubican en la Etapa de Prevención y Mitigación. Son planes formales escritos que identifican los procedimientos y acciones que el operador de una presa debe seguir durante una emergencia de la misma para asegurar su integridad y dar la alerta a los organismos encargados de la seguridad civil para que movilicen sus planes de emergencia. Es decir no es un plan para el manejo de la evacuación, sino que provee información a los organismos que deben actuar en ella respecto de las características y dimensiones de la *Amenaza*.

En este artículo se presentan los estudios y resultados obtenidos para definir la *Amenaza: Falla de la Presa San Roque* y en segundo término, se estudia la *Vulnerabilidad* de la población y estructura en riesgo ante la ocurrencia de este evento. Ambos estudios son la base para la realización del PADE de la Presa San Roque.

En muchos países se han elaborado guías para la realización y aplicación de PADEs. Su adopción lisa y llana puede constituir una solución rápida a una demanda real. Sin embargo, deben respetarse las características propias de la idiosincrasia de cada pueblo y, antes de copiar fríamente, es más acertado comprender profundamente los motivos de las normas y adecuar los criterios a las condiciones locales.

En la actualidad, la mayoría de los países, así como Organismos Internacionales de Crédito y el Comité Internacional de Grandes Presas (International Commission of Large Dams, ICOLD, 2009), en sus recomendaciones sobre seguridad, exigen un plan de emergencia para cada presa en el que se definan las responsabilidades y acciones a realizar por cada uno de los organismos encargados de la operación de una presa vinculados al cuidado de la seguridad pública.

En Argentina hay alrededor de 105 presas que pueden definirse como grandes, con una amplia variedad en las dimensiones. La presa de Yacyretá tiene un volumen de 81,000,000 m<sup>3</sup>, longitud aproximada de 65 km, como se especifica en [www.yacyreta.org.ar](http://www.yacyreta.org.ar); la presa Los Cardones en Tucumán tiene 3,000 m<sup>3</sup> y 40 m, respectivamente. La presa de mayor altura en Argentina es Piedra del Aguila, en el Comahue, con 170 m ([www.orsep.gov.ar](http://www.orsep.gov.ar)). De este total, solo están controladas 33 presas que los estados, nacional y algunos provinciales, han concesionado, por un período de 30 años, obligando al organismo privado (Concesionario) a cumplir requisitos de mantenimiento y preservación de los bienes concesionados, mediante las reparaciones previstas (trabajos obligatorios) o que surgieran durante su explotación, vigilancia (con el control instrumental y diagnósticos estructurales respectivos) y alerta ante una emergencia, pautas de operación en la generación y control respectivo para la cual se establecen procedimientos en resguardo de la población. Las obligaciones sobre el mantenimiento y control en las obras Concesionadas sólo están incluidas dentro del Contrato de Concesión (Riavitz et al., 2004). El Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP) es el encargado del control y verificación de la seguridad, pero sólo de estas presas concesionadas. En Argentina aún no existen guías formales ni legislación al respecto. Tampoco existen actualmente, metodologías y procedimiento acordados a nivel nacional y federal para el proyecto, construcción y explotación de presas.

## **PRESA SAN ROQUE**

La presa San Roque es del tipo presa de gravedad de planta curva. La altura de su cierre es de 51.30 m, con una longitud de coronamiento de 145 m. El ancho de la presa en el coronamiento es de 5 m mientras que a nivel de fundaciones su ancho llega a los 43 m. En relación a su forma en planta la misma se diseñó con un radio de curvatura de 200 m.

El dique San Roque fue construido con el objeto de aprovechar y dominar las aguas de los ríos Cosquín y San Antonio en su confluencia que dan origen al actual Río Suquía. Los motivos principales que hicieron sentir la necesidad de esta obra y justificaron su construcción fueron:

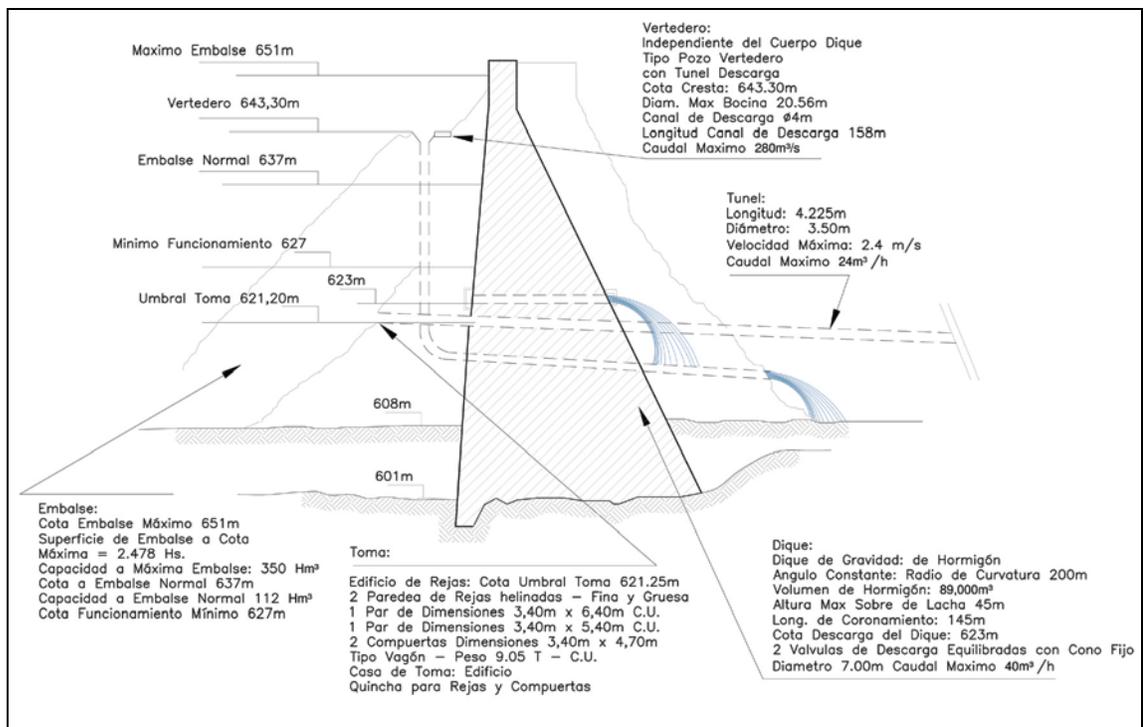
- Atenuación de las inundaciones sufridas por la Ciudad de Córdoba y alrededores (control de avenidas).
- Provisión de agua potable a la ciudad de Córdoba (segunda ciudad del país).
- Regadío en las épocas de sequía.
- Aprovechamiento hidroeléctrico para permitir el desarrollo de la Ciudad de Córdoba y sus alrededores (Central

San Roque).

Los proyectistas de este dique fueron los Ings. Ballester, Volpi y Suárez; la empresa constructora fue Enrique J. Bonneu. Su construcción comenzó en 1939 y finalizó en 1944. Esta presa se encuentra ubicada aguas abajo del viejo dique San Roque.

Algunas de sus principales características (ilustradas en la Figura 2) son las siguientes:

- cota de fundación: 601 msnm. (metros sobre el nivel del mar)
- cota fondo de cauce: 608 msnm.
- cota labio de vertedero: 643.30 msnm. – 35.30 m. s. cero local (D. P. H.).
- cota embalse máximo: 651 msnm - 43 m. s. cero local (D. P. H.).
- cota de coronamiento: 652.30 msnm.
- superficie lago cota labio vertedero: 1,501 Ha (hectáreas) .
- superficie lago cota embalse máximo: 2,478 Ha.
- volumen embalse cota labio vertedero: 201 Hm<sup>3</sup>. (hectómetros cúbicos)
- volumen embalse cota embalse máximo: 350 Hm<sup>3</sup>.
- El área de la cuenca de alimentación es de 1,750 km<sup>2</sup>.



**Figura 2: Corte esquemático del dique San Roque (Castelló et al., 2000).**

*Obras de Toma y Conducción:* Posee dos obras de toma y conducción que tienen como destino la central hidroeléctrica y una descarga al cauce del Río Suquia.

La toma para la usina funciona de manera permanente; el agua que aprovecha la usina es luego destinada a riego. La denominada toma para riego es en realidad toma de emergencia para caso de interrupciones en las válvulas, tuberías o máquinas de las usinas.

La toma de riego está compuesta por dos conductos metálicos de 1.30 m de diámetro alojados en el cuerpo de la

presa, con dos válvulas esclusas tipo chorro hueco de tándem cada una (Figura 3). La descarga de la toma es el cauce del Río Suquía aguas abajo del cierre.



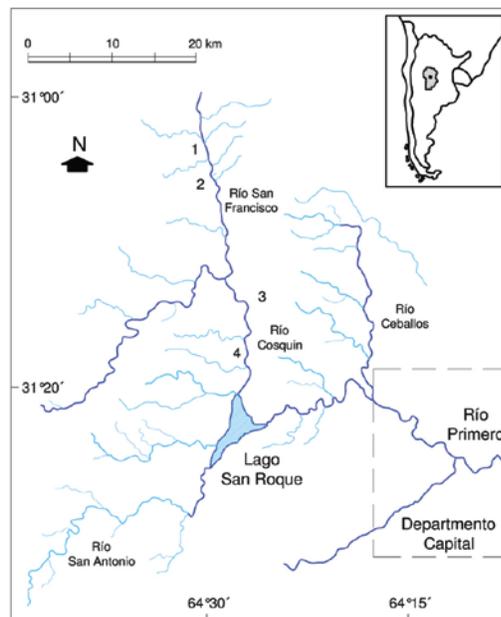
**Figura 3: Vista de la descarga y de las válvulas de descarga de la toma de riego.**

Las obras de riego propiamente dichas comienzan con el dique derivador de Mal Paso en Calera (aproximadamente 15 km aguas abajo) y dos canales maestros de conducción norte y sur que luego distribuyen agua a la red de canales secundarios.

*Obras de Evacuación de Crecidas:* Las obras de evacuación de crecidas están conformados por un vertedero tipo embudo ubicado sobre la ladera derecha aguas arriba del dique; el caudal máximo es de  $280 \text{ m}^3/\text{s}$  a la cota de 651 msnm (ORSEP 2005); el túnel pasante por el cuerpo de la presa descarga al río Primero o Suquía. La elección de este tipo de estructura de descarga obedeció a la necesidad de limitar la descarga por vertedero para no generar inconvenientes a la población de la Ciudad de Córdoba.

### Características Generales de la Cuenca

El Río Suquía o Primero nace de las confluencias de los ríos San Antonio y Cosquín a los que se les une el de Los Chorrillos y el Arroyo de Las Mojarras. En la actualidad sus aguas se encuentran represadas por el dique San Roque (Figura 4).



**Figura 4: Tributarios del lago San Roque (Vazquez et al., 1979).**

Su cuenca activa está limitada al Norte por el dorso de La Cumbre; al Sur, por la cresta de la Sierrita o Cordón de Santiago, que la separa de la cuenca del Río Anizacate; al Oeste, por las divisorias de las aguas del Río Pintos, de la Pampa de San Luis y de la Sierra Grande.

Antes de su paso por la ciudad de Córdoba se encuentra regulado aguas arriba con el embalse San Roque, además sufre varias obstrucciones a lo largo de su recorrido con el azud El Diquecito y diversos puentes fuera y dentro de la metrópolis.

Sus afluentes generan con sus crecidas problemas importantes aguas arriba del Dique San Roque y el mismo río los genera aguas abajo en su tramo por la ciudad.

Un resumen de las características de la cuenca se presenta a continuación:

*Superficie:* 1,750 km<sup>2</sup>. Longitud: 40 km. Altura: Variable entre los 600 m en el sitio de la presa, y 2,000 m en las altas cumbres de la sierra Los Gigantes.

*Régimen de lluvias:* Existen dos épocas de marcada diferencia en cuanto a la distribución de las precipitaciones: La época lluviosa, comienza en octubre y finaliza en mayo. En este período se produce la mayor parte de la precipitación total. Por su parte, la época de sequía transcurre entre los meses de junio a setiembre. El promedio anual varía en la región de 700 mm a 850 mm, con un máximo y un mínimo anuales de 1100 mm y 457 mm, respectivamente.

*Escurrencimiento:* El módulo del río Primero es de un valor de 10 m<sup>3</sup>/seg (ORSEP, 2005).

### **Hipótesis del proyecto**

Dentro de las hipótesis del proyecto se pueden citar dos que son de sumo interés para este estudio:

*Hidrológicas:* La capacidad de regulación del embalse fue determinada en función de los volúmenes de las mayores crecidas registradas y tomando algún margen de seguridad; mientras que la capacidad máxima del aliviadero se determinó en función de evitar daños en la ciudad de Córdoba, en aquella época (año 1928).

*Sísmicas:* Las obras fueron proyectadas entre 1928 y 1930, sin tener en cuenta acciones sísmicas. Aún hoy no existe un análisis del riesgo sísmico en el emplazamiento de las Obras que constituyen el Complejo de la Presa San Roque; pero este análisis resulta de capital importancia para la selección y aplicación de los parámetros sísmicos de verificación de estas estructuras civiles.

### **Conclusiones del estado de la obra**

Durante el año 2005 el Organismo Regulador de Seguridad de Presas mediante un convenio marco de Cooperación Interinstitucional y Asistencia Técnica firmado con Dirección Provincial de Agua y Saneamiento (actual Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba) realizó un relevamiento y diagnóstico primario de las condiciones de seguridad de la presa San Roque.

Algunas conclusiones arribadas de este relevamiento fueron:

- La presa fue construida con una calidad de construcción notable.
- El proyecto fue realizado con valores hidrológicos de crecientes medidas en el antiguo dique y sus hipótesis se han verificado hasta el día de hoy. Desde la fecha de elaboración del proyecto hasta a la actualidad han transcurrido más de 70 años. Es evidente que los datos hidrológicos registrados durante este período, tanto en la cuenca, como en el sitio de la presa, deben ser considerados para actualizar las determinaciones hidrológicas y verificar la seguridad hidrológica del dique.
- La configuración geométrica adoptada para el diseño de la Presa San Roque y los análisis estructurales realizados por los proyectistas, sumado a la comparación con presas similares, demuestran que la Presa San Roque satisface, con seguridad, los requerimientos establecidos para la estabilidad estructural desde el punto de vista estático, para la condición de embalse a cota máxima.

- En el diseño de la presa no se consideraron acciones sísmicas actuando sobre las instalaciones.

Además existe un conjunto de aspectos que han cambiado y evolucionado sustancialmente desde la concepción del nuevo dique San Roque:

- En el área de influencia de la presa, tanto aguas arriba como aguas abajo de la misma, existen zonas rurales, ciudades y obras de infraestructura potencialmente afectables por el tránsito de las crecidas y por incidentes (hasta la falla de la presa) que pudieran tener lugar en el dique San Roque.
- Los Municipios del perilago han autorizado la ocupación de tierras hasta cota 36 (644 m IGM), esto significa que el citado nivel está 0.70 m sobre el vertedero.
- La retención suplementaria prevista en el proyecto para absorber crecidas (150 Hm<sup>3</sup>) prevé un nivel de agua por sobre el vertedero de 7.70 m.

Es evidente la incompatibilidad operativa y la situación de riesgo que surge de las situaciones límites descritas en particular para la ciudad de Carlos Paz y las vías de comunicación ubicadas en el área de perilago.

### **DEFINICIÓN DE POSIBLES ESCENARIOS DE ESTUDIO**

La selección de escenarios deben ser analizados y seleccionados cuidadosamente teniendo en cuenta los estudios previos que se deben realizar. En este trabajo se estudiaron algunos posibles escenarios. Sin embargo, dada la importancia de este embalse, es necesario continuar con estudios a fin de determinar la existencia de otras posibles situaciones.

Los escenarios que surgen de manera directa son:

(1) Rotura por sobrepaso: este escenario, debe ser analizado con estudios de actualización hidrológica que contemplen las modificaciones ocurridas en la cuenca. Según los criterios actuales, el análisis debe considerar al embalse a nivel de vertedero y el ingreso del escurrimiento producido por una tormenta de Precipitación Máxima Probable (PMP) que cae sobre la cuenca de aporte al mismo. La modelación definirá la existencia o no de posibilidad de sobrepaso.

(2) Rotura por sismo: este escenario debe ser confirmado por estudios de estabilidad.

(3) Rotura por actos de sabotaje o conflictos internos. De la situación actual de la provincia y el país, este escenario no se presenta como inminente.

### **Modelación hidrológica de la Crecida producida por PMP**

El Organismo público encargado del monitoreo y manejo de la Presa es la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia (SSRH). Esta repartición durante el año 2000 estudió la cuenca de aporte al embalse para distintas recurrencias las cuales fueron modeladas con el programa HEC-1 (USACE, 1997). En dicho estudio, el modelo fue calibrado con mediciones de precipitación registradas en las cuencas altas y con los caudales ingresantes al embalse resultantes para diversos eventos de magnitud. En esa oportunidad no se realizaron modelaciones para la escorrentía producida por la PMP sobre la cuenca.

Los caudales ingresantes al embalse se obtuvieron por medio de modelos de transformación lluvia – caudal considerando la tasa de pérdida por el Método de SCS – CN y tránsito – caudal por el método de Muskingum – Cunge (Cunge, 1969; Cunge et al., 1980). El tránsito en el embalse se ejecutó con el modelo de Puls ingresando la curva volumen-cota del embalse (Figura 5) y caudales descargados-cota del embalse.

Partiendo de los archivos de ingreso del estudio ejecutado por SSRH se analizó la posibilidad de existencia de sobrepaso por el coronamiento del Dique San Roque. El análisis se ejecutó con el mismo programa que utilizara esta repartición pública (HEC-1) con el fin de que los cambios realizados en la actualización hidrológica fueran fáciles de considerar y de objetar por parte de la SSRH.

En la actualización hidrológica realizada se consideraron los cambios en los usos de suelo experimentados a lo largo

del tiempo y la instalación de infraestructura que generara modificación de los escurrimientos (en particular la modificación de los valores de CN).

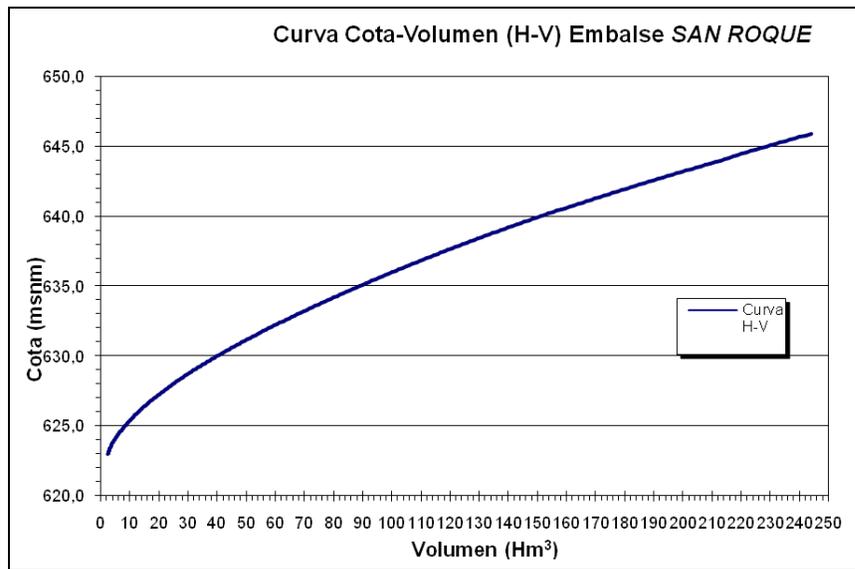


Figura 5: Curva Cota – Volumen del embalse San Roque.

La delimitación de la cuenca y subcuencas adoptadas se muestra en la Figura 6. Se trabajó con un total de 43 subcuencas las cuales conforman un área total de 1,616 km<sup>2</sup>. Las características de las cuencas utilizados en la modelación se muestran en la Tabla 1. Los valores de CN utilizados en la modelación correspondió a 75 en cuencas altas que se encuentran menos urbanizadas y 80 en cuencas bajas, con zonas de urbanización significativa.

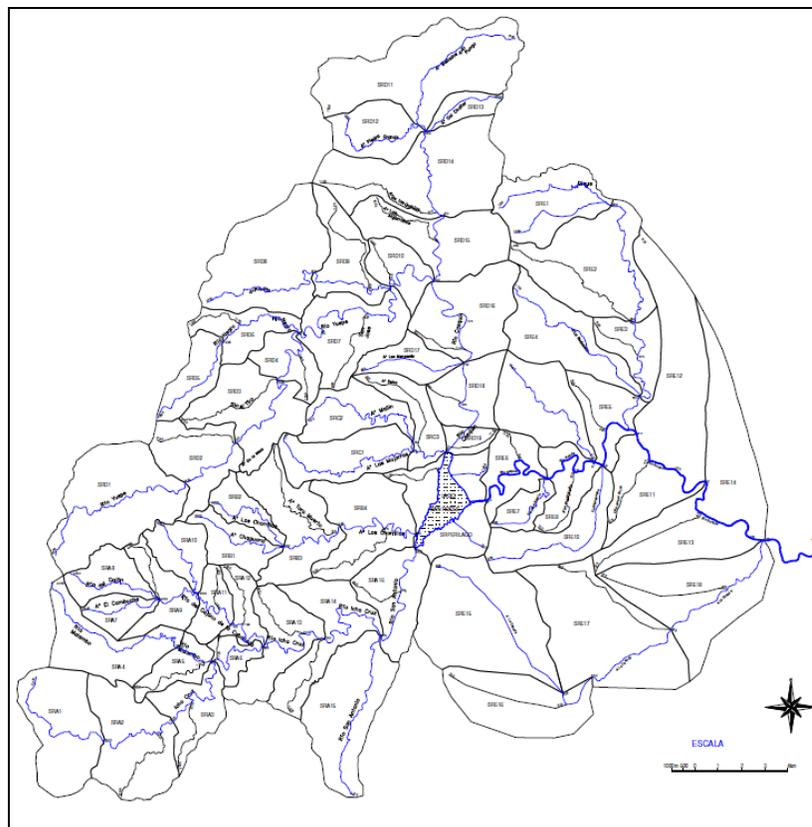


Figura 6: Distribución de las cuencas y subcuencas de aporte al embalse San Roque (Giménez, 2009).

**Tabla 1: Características de las subcuencas.**

Subcuencas	Área [km <sup>2</sup> ]	Longitud [m]	Desnivel [m]	Subcuencas	Área [km <sup>2</sup> ]	Longitud [m]	Desnivel [m]
SRA1	55.92	12540	300	SRC3	23.04	9840	225
SRA2	56.89	8480	650	SRD1	79.31	17980	850
SRA3	28.75	6960	450	SRD2	39.03	7570	550
SRA4	46.15	17480	1000	SRD3	52.7	10380	675
SRA5	18.14	8530	200	SRD4	21.01	4080	100
SRA6	11.35	1990	175	SRD5	21.94	10190	575
SRA7	15.07	7880	900	SRD6	24.75	4960	425
SRA8	22.78	9660	950	SRD7	50.07	7830	125
SRA9	24.66	6440	350	SRD8	78.98	13140	425
SRA10	21.4	8910	475	SRD9	31.84	10190	300
SRA11	16.53	3840	225	SRD10	21.4	3910	225
SRA12	15.51	5970	225	SRD11	93.26	15420	480
SRA13	38.72	6820	500	SRD12	30.34	11890	250
SRA14	45.31	8470	325	SRD13	11.66	7760	550
SRA15	64.53	16670	400	SRD14	85.96	11900	275
SRA16	32.3	4970	160	SRD15	53.08	8210	265
SRB1	23.09	10270	600	SRD16	54.22	4940	90
SRB2	16.48	10300	550	SRD17	21.17	9590	225
SRB3	49.19	12790	325	SRD18	29.99	3470	140
SRB4	52.23	9790	225	SRD19	8.95	4460	500
SRC1	40.19	17220	425	PERILAGO	55.66	5200	150
SRC2	32.79	17260	425	Total	1616.34		

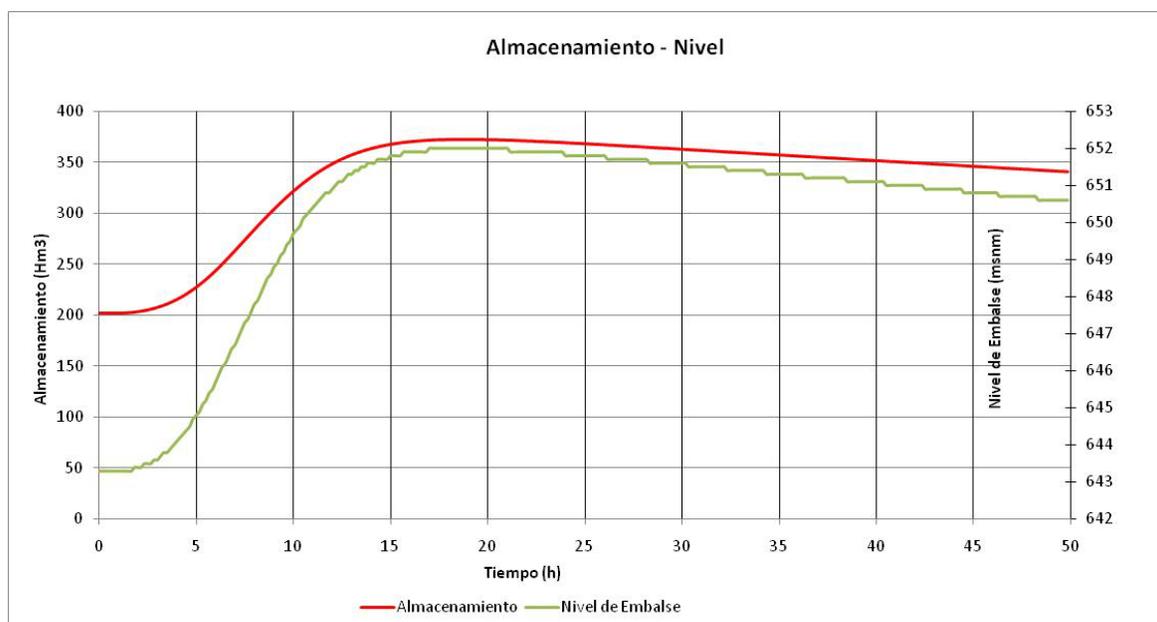
La Precipitación Máxima Probable adoptada fue de 230 mm y una duración de 6 horas (García, 2000). Los resultados obtenidos de la modelación se presentan en la Tabla 2 y la Figura 7 (Lábaque, 2010).

**Tabla 2: Resultados obtenidos de la modelación.**

Máxima elevación embalse (m)	Máximo almacenamiento al caudal pico (1000 m <sup>3</sup> )	Caudal pico Salida (m <sup>3</sup> /s)	Tiempo al pico (hs)
651.99	372350	318	18.83

Los estudios mostraron que la presa no presentaría inconvenientes frente a una crecida producto de una Precipitación Máxima Probable caída en la cuenca alta considerando el embalse a cota de vertedero, por lo que puede considerarse que su diseño cumple con las exigencias de criterios actuales y no existe la posibilidad de falla por rebasamiento; por lo que se descarta ese escenario.

Sin embargo se debe hacer notar que, para este escenario, la Ciudad de Carlos Paz se enfrentaría a serias consecuencias dado que su cota urbanizada es de 644 msnm (aproximadamente 8 metros por debajo del nivel que alcanzaría el embalse).



**Figura 7: Curva almacenamiento y de nivel del embalse obtenidos por HEC-1 considerando PMP sobre la cuenca.**

## ROTURA POR ACTOS EXTREMOS

En este trabajo se propuso considerar este escenario sólo a los fines de determinar la situación que se plantearía en un caso hipotético extremo. No se consideraron los beneficiosos efectos de la existencia del muro del viejo dique San Roque (a unos 130 m aguas arriba del cierre anterior) a fin de plantear un evento más catastrófico.

El análisis para determinar la onda de crecida y el daño potencial producido por una rotura de presa puede, en general, ser subdividido en tres partes: la predicción del hidrograma de rotura, el tránsito del hidrograma, a través del valle aguas abajo usando la correspondiente modelación y la predicción de daños y pérdida de vida durante la descarga peligrosa.

### Determinación del Hidrograma de Descarga por la Brecha

La predicción del hidrograma de descarga por una brecha puede dividirse en dos partes:

- Estimación de las características de las brechas (forma, profundidad, ancho, tasa de formación, etc.).
- Tránsito del agua almacenada en el embalse y que ingresa al cauce a través de la brecha.

El hidrograma de salida en una rotura de presa depende de numerosos factores. Los factores más importantes de los que depende son las características físicas de la presa, el volumen del embalse y el modo de falla.

Los parámetros que controlan la magnitud del pico de descarga y la forma del hidrograma de salida incluyen: las dimensiones de la brecha; la manera y el tiempo de desarrollo de la brecha, la profundidad y volumen de agua almacenada en el embalse, y el flujo de entrada en el momento de la rotura.

La forma y tamaño de la brecha y el tiempo transcurrido para el desarrollo de la misma son a su vez dependientes de la geometría de la presa, materiales de construcción y el agente causal de la rotura.

Dado que el cierre en estudio corresponde a una presa de gravedad, se utilizaron los valores de brecha recomendados por el Ministerio de Medio Ambiente de España (1996) y la propuesta por Departamento de Ecología del Estado de Washington (2007) para rotura de presas de hormigón.

- Forma de la brecha: rectangular
- Tiempo de formación: 0.25 horas
- Cota del fondo de la brecha: 608 msnm (fondo de la presa).
- Ancho de la brecha: 48 m (1/3 de la longitud del cierre).
- Nivel del pelo de agua al inicio de la rotura: 643.30 (a nivel del vertedero).

Estos valores se introdujeron en el modelo de rotura del National Weather Service (Fread, 1988) para determinar el hidrograma de descarga por brecha. La elección de este modelo de rotura se basó en que éste aplica una base física para la simulación de la rotura. Esta base utiliza los principios de la hidráulica y el transporte de sedimentos para simular el desarrollo de la brecha; además es ampliamente utilizado y está incorporado a los programas HEC-HMS (USACE, 2000), HEC-1 (USACE, 1997) y FLDWAV (Fread, 1993) entre otros.

Las ecuaciones del modelo son las siguientes:

$$Q_p = c_v k_s \left[ 3.1 B (h_w - h_b)^{1.5} + 2.45 z (h_w - h_b)^{2.5} \right] \quad (\text{en unidades inglesas}) \quad (1)$$

$$Q_p = c_v k_s \left[ 1.70 B (h_w - h_b)^{1.5} + 1.35 z (h_w - h_b)^{2.5} \right] \quad (\text{en unidades internacionales}) \quad (2)$$

donde  $c_v$  es el factor de corrección para la velocidad de aproximación,  $k_s$  es el factor de corrección por sumergencia debido a la elevación del agua en el pie de la presa,  $B$  es el ancho de la brecha,  $h_w$  es la elevación de la superficie de agua en el embalse,  $h_b$  es la elevación del fondo de la brecha,  $z$  son los taludes laterales de la brecha.

La primera parte de la ecuación es considerada como la ecuación de vertedero estándar con el ancho de la cresta de vertedero correspondiente al ancho promedio de brecha ( $B$ ) y la altura en el vertedero correspondiente a la profundidad del embalse ( $h_w$ ). Este término representa el pico de descarga para un embalse infinitamente grande donde no existiría una reducción del nivel del embalse durante la erosión de la brecha.

La segunda parte de la ecuación es un factor de reducción, que representa la reducción del nivel del embalse durante la erosión de la brecha. Para una presa alta con un embalse relativamente pequeño, puede existir un descenso significativo del nivel del embalse mientras el agua es vertida durante la formación de una brecha por erosión.

El caudal de descarga pico obtenido fue de 16,960 m<sup>3</sup>/s. Este resultado fue el adoptado para el tránsito aguas abajo.

### Descripción Física del cauce aguas abajo

En el primer tramo aguas abajo del dique, el río escurre por una quebrada profunda de grandes dimensiones que va perdiendo magnitud hacia aguas abajo. En su recorrido desde el cierre hasta la ciudad se encuentra interceptado por tres azudes, el Azud Nivelador a 1.7 km del cierre donde se instalaba la usina Molet (ahora Museo Molet), El Diquecito, donde se asienta la actual Central Hidroeléctrica de San Roque y desde donde se realiza la toma y derivación para la Central Hidroeléctrica La Calera. Aguas abajo de esta localidad se encuentra el Azud Mal Paso, desde donde se realiza la toma que alimentan los canales de riego del cinturón verde de la ciudad: Canal Maestro Norte y Canal Maestro Sur.

En su paso por la localidad de La Calera es posible observar dos puentes sobre el cauce, y la trama de la ciudad está desarrollada de manera importante sobre ambas márgenes del río.

A partir de Villa Warcalde, la masa de agua que baja por el Suquía es considerable y al no tener ningún tipo de regulación eficiente (adicional al Dique San Roque), entra a la Ciudad en forma incontrolada, provocando serios inconvenientes.

Pasado Saldán, el Río Suquía sale a la llanura en el lugar denominado Quitilipe y después de un recorrido de 17 km y por un cauce cortando capas de arcillas pampeanas, conglomerados y areniscas en dirección oeste-este, llega a la Ciudad de Córdoba.

El lecho de inundación del río Suquía, tiene un escaso desarrollo en la mayor parte de su recorrido por la ciudad de

Córdoba, siendo prácticamente inexistente desde su salida al piedemonte hasta los barrios Yapeyú y San Vicente (Barbeito y Quintana, 1998). Presenta una terraza baja inundable esporádicamente que en un principio fue su lecho de inundación.

Del estudio del ambiente fluvial ligado a la evolución del río en la planicie, se distinguen dos planos aluviales; un plano aluvial antiguo y un plano aluvial moderno. El plano antiguo presenta dos niveles de terrazas principales: un nivel alto y un nivel medio. El plano nuevo, define el nivel de terrazas bajas. En este nivel se concentra casi la totalidad de la zona céntrica de la Ciudad de Córdoba y los principales barrios de la ciudad (Alberdi, San Vicente y General Paz) (Barbeito y Quintana, 1998).

En su paso por la ciudad, el río es atravesado por numerosos puentes y vados (alrededor de 20). Posee además sus márgenes y una isla parquizadas; estos espacios son utilizados por los vecinos como lugar de recreación. En casi la totalidad de su recorrido por la ciudad (desde el Puente Sagrada Familia hasta su cruce con la Av. de Circunvalación) está acompañado por dos vías vehiculares costaneras, una en cada margen: Av. Intendente Mestre (es una vía alternativa que evita tener que ingresar al centro) y una vía peatonal: la ciclovía. En el primer tramo de su paso por la ciudad, el río escurre por su cauce natural.

En gran parte de su recorrido dentro de la ciudad, sus márgenes se encuentran revestidos y engavionados. Estos revestimientos son desplazados frecuentemente por las crecidas que transitan este cauce.

En pleno centro urbano incorpora, por el sur, al arroyo de La Cañada, que desagua el área de La Lagunilla, a veces con una violencia tal que obligó a la construcción de obras de defensa de Calicanto que lo encauza en todo su recorrido por la ciudad.

Luego el río continúa con su recorrido hacia el este con un lecho cada vez más angosto, meandriforme, con un caudal que disminuye progresivamente hasta desaparecer por infiltración durante gran parte del año.

En el paraje llamado El Salto, el río se dividía en varios brazos, hoy difícilmente perceptibles por estar cubiertos de vegetación. Más abajo, cerca de los Mistoles, el lecho vuelve a hacerse visible en forma de un surco bien marcado primero, de lagunas aisladas después y finalmente como un arroyo de 5 m de ancho con barrancas de 2 m de alto.

Así continúa en una extensión de 10 km desviado al este y sudeste y ya con aguas salobres hasta alcanzar la Mar Chiquita. Entra en esta depresión lacustre y se dispersa en varios brazos, todos secos, que ya no alcanzan el nivel de la Laguna, sino excepcionalmente con precipitaciones muy abundantes.

## **MODELACIÓN CON HEC-RAS**

Se realizó la modelación del cauce aguas abajo del dique utilizando HEC-RAS (USACE, 2008), desde su cierre hasta casi la salida de la zona altamente urbanizada de la ciudad de Córdoba.

HEC-RAS está incluido dentro de los modelos válidos para la rotura de presas según la ICOLD. El modelo es un programa del Hydrologic Engineering Center (HEC) del US Army Corps of Engineers. Tiene como predecesor al programa HEC-2, con varias mejoras respecto a éste, entre las que se destaca la interfase gráfica de usuario que facilita las labores de preproceso y postproceso.

La primera versión de HEC-RAS (1.0) fue presentada en Julio de 1995. Desde entonces, se han realizado diversos cambios y mejoras en el software, hasta la actual versión 4.1 publicada en Enero de 2010.

Las últimas versiones presentaban un importante avance sobre la versión 2.21 ya que permiten no solo una optimización sobre el cálculo del flujo permanente sino que también incorporan una nueva rutina que permite modelar flujo no permanente.

Entre sus principales características técnicas se tiene:

- Realiza cálculo hidráulico de estructuras (puentes, aliviaderos, alcantarillas, etc.)
- Permite la visualización gráfica de datos y resultados
- Permite la edición gráfica de secciones transversales.

El modelo numérico incluido en el programa permite realizar análisis del flujo permanente y no permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.

Para simular la rotura de una presa, HEC-RAS soluciona las ecuaciones de Saint-Venant completas en diferencias finitas implícitas con el esquemas de resolución de Preissmann.

Los problemas de estabilidad que presenta el esquema cuando el flujo es rápidamente variable se aborda por el método directo ("Local Partial Inertia", LPI), que añade un término a las ecuaciones para reducir los términos de inercia cuando el número de Froude se acerca a la unidad (por tanto habrá un cambio de régimen y una posible discontinuidad).

El uso de HEC-RAS en Argentina está muy extendido y existen numerosos ríos simulados con este programa (como es el caso del río en estudio), lo que permite incluir una presa y simular su rotura sin necesidad de crear un nuevo modelo.

En una primera etapa se procedió a recopilar y analizar diferentes estudios hidráulicos existentes del tramo de estudio. Se trabajó con los datos producidos por los siguientes estudios de referencia:

- Informe del Comportamiento Hidráulico del Río Suquía Tramo Puente Turín – Puente Sagrada Familia (Reyna et al., 1998).
- Estudio del Comportamiento Hidráulico del Río Suquia Tramo Puente Tablada – Puente Antártida (Reyna et al., 1996).
- Modelación Hidráulica del Río Suquía (Pozzi y Plencovich, 2002).

En los dos primeros trabajos se estudiaron en distintos tramos la modelación matemática del Río Suquía con el modelo HEC-2, con la finalidad de analizar y predecir el comportamiento hidráulico del río en su paso por la ciudad de Córdoba. Las secciones estudiadas fueron relevadas en trabajos de campo con teodolitos diferenciales.

El modelo numérico utilizado para realizar el estudio fue el de análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre; con capacidad de modelar flujo subcrítico, supercrítico y mixto, estimando los perfiles en base a estos estados de flujo. El modelo considera el efecto que provocan obstrucciones como puentes, alcantarillas y vertederos.

En el último trabajo se completó el relevamiento de las secciones faltantes entre el cierre y el puente Yapeyú y se modeló en régimen no permanente con HEC-RAS utilizando un esquema de diferencias finitas implícitas (en este caso el de Preissmann). Las corridas se calibraron con dos eventos registrados en el año 2002. En total se modelaron 52 kilómetros de cauce; se utilizaron 200 secciones del cauce y 24 puentes.

Las secciones de las modelaciones previas sólo abarcaban el cauce y las riberas más próximas que podían contener las crecidas estudiadas. Para la modelación de la rotura de la presa se hizo necesario ampliar estas secciones de manera de contener el caudal a transitar por este escenario. La metodología seguida para la generación de las secciones se presenta en el punto siguiente.

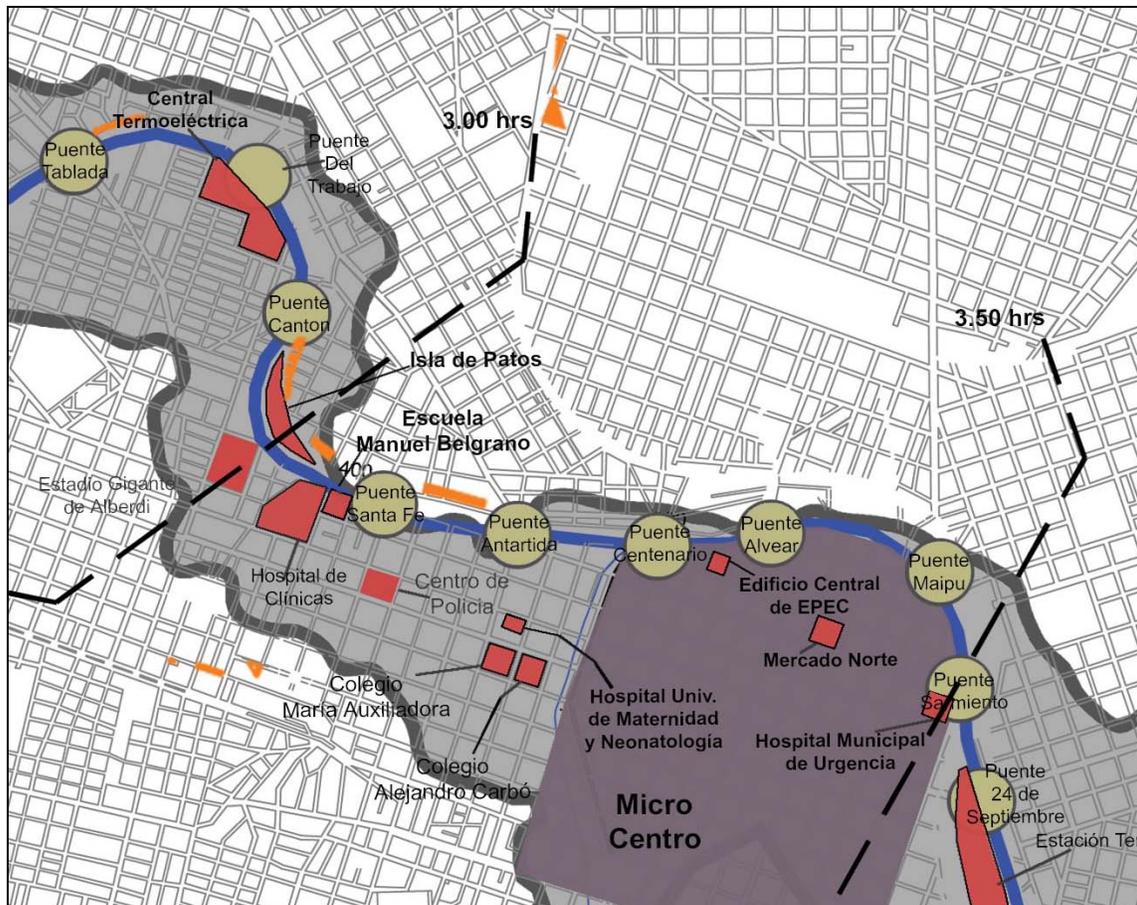
En total se consideraron tres zonas con valores de rugosidad diferentes: la zona alta (desde el cierre hasta Dique Mal Paso); la zona media (desde Dique Mal Paso hasta Puente Sagrada Familia) y la zona baja (coincidente con la zona urbanizada: Puente Sagrada Familia – Puente Yapeyú). Los valores representativos para cada tramo se muestran en la Tabla 3.

Las principales limitaciones que presentó la modelación de la rotura de la Presa San Roque con HEC-RAS se deben, en primer lugar, a que el modelo es unidimensional, por lo tanto los resultados obtenidos en zonas donde el flujo es marcadamente bidimensional (grandes llanuras de inundación) no son todo lo rigurosos que sería deseable. Además, los problemas de inestabilidad numéricas que se presentaron durante la modelación fue resuelta aplicando la técnica LPI, lo que resta precisión a la solución y los valores de rugosidad adoptados le agregó incertidumbre a los mismos.

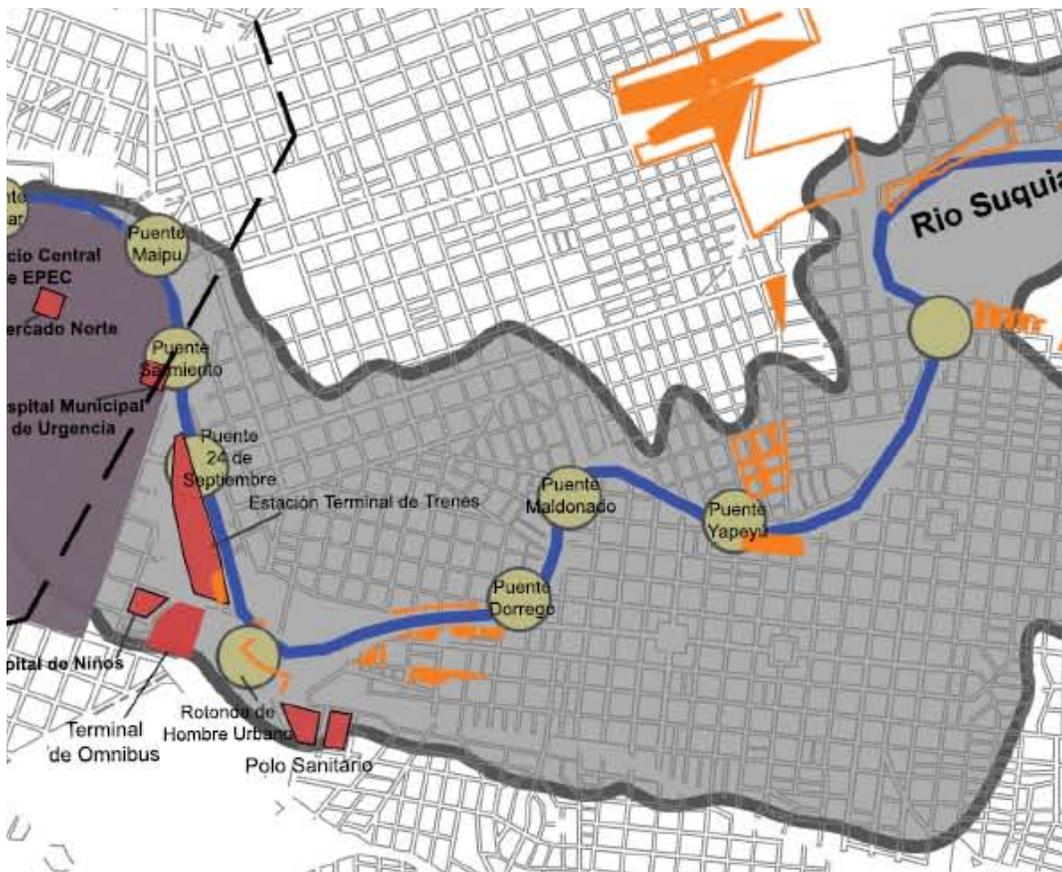
**Tabla 3: Valores de rugosidad de Manning utilizados en la modelación con HEC-2.**

	Cauce Principal	Riberas	Planicie de Inundación
zona alta	0.024	0.026	0.028
zona media	0.028	0.030	0.032
zona baja	0.030	0.032	0.035

El mapa generado para el caso analizado se presenta en la Figura 8.



**Figura 8a: Mapa de zona de inundación y tiempos de arribo del pico de la crecida por rotura de la presa San Roque (Lábaque, 2010).**



**Figura 8b: Mapa de zona de inundación y tiempos de arribo del pico de la crecida por rotura de la presa San Roque (Lábaque, 2010).**

### Metodología seguida para la ampliación de las secciones

Para generar las nuevas secciones cuantificando y visualizando las condiciones del terreno en tres dimensiones (3D) se generó una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la elevación de la superficie, es decir un modelo digital de elevación (MDE) a partir de una variedad de recursos que seguidamente se detallan. La unidad básica de información de un MDE es un valor de elevación Z, al que acompañan los valores correspondientes de X e Y, que expresados en un sistema de proyección geográfica permiten una precisa referenciación espacial.

Para la confección del MDE (o DEM, en inglés) se partió de la información topográfica de la zona de estudios obtenidas de levantamientos realizados por los estudios previos mencionados.

Se obtuvieron del catastro provincial las franjas de fotografías aéreas correspondientes a los vuelos realizados en los años 1970 y 1977. Con las mismas se identificaron puntos singulares del vaso (dorsales, líneas de vaguada, crestas, barrancas, etc.) priorizando las líneas de escurrimiento y accidentes significativos dentro del área de inundación.

Se obtuvieron las imágenes raster del proyecto SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) de NASA, que consiste en un sistema de radar especialmente modificado para adquirir los datos de elevación topográfica estereoscópica. La técnica empleada conjuga software interferométrico con SAR radares con anchos "sintéticos" en sus antenas reflectoras.

Se adquirieron imágenes ASTER (Satélite Avanzado de Emisiones Termales y Radiómetro de Reflexión) de NASA. El instrumento ASTER fue provisto por el Ministerio de Industria y Comercio de Japón y construido por NEC, Mitsubishi Electronics Company y Fujitsu, Ltd.; mide las propiedades de las nubes, cataloga los vegetales, la mineralogía de superficie, propiedades del suelo, temperatura del suelo, y topografía de superficie de regiones determinadas de la Tierra.

La alta resolución espacial de ASTER permite observar detalles con minuciosidad. Los principales accidentes,

estructuras y geofomas son marcadamente visibles. Por otro lado, y en lo que refiere a la generación de DEM, el tener dos sensores a ángulos distintos permite obtener, a tiempos muy próximos, imágenes diferentes del mismo sector aptas para reconstrucciones de estereoscopía. Esta habilidad es la que se aprovechó para completar los datos altimétricos de las demás fuentes, cartas, proyecto SRTM, imágenes de Google-Earth ([www.earth.google.es](http://www.earth.google.es)), etc. Se completó y contrastó el conjunto de información con datos extraídos de imágenes tomadas de Google Earth Pro.

Para la generación de la red de puntos se determinó la ubicación de diversos puntos fijos sobre cada elemento para posibilitar la vinculación de todos los recursos enunciados en el ítem precedente.

En primera instancia se verificó la correspondencia de la información existente en lo referente a sistema de proyección y datum (UTM, WGS 84).

El levantamiento topográfico del cauce y sus márgenes tras su correcta georreferenciación fue fusionado con los planos topográficos antecedentes. Con estos puntos, tras su triangulación y suavizado, se generó un primer plano de curvas de nivel. A partir de las fotografías aéreas por medio de estereografía se realizó una restitución que permitió identificar claramente las zonas singulares. Luego se superpusieron la restitución, las imágenes satelitales y las curvas de nivel lo que sirvió para evaluar e identificar la correcta coincidencia de la información procesada con la existente. Seguidamente se extendió el plano de curvas de nivel a la totalidad de la zona de estudio haciendo uso de las imágenes SRTM y ASTER. Mediante un muestreo digital de estas imágenes se generó una grilla de puntos cuya resolución es de 30m. Luego se combinó esta grilla con los puntos de los levantamientos de alta resolución y se realizó una nueva triangulación. Con este nuevo modelo se amplió a toda la cuenca las curvas de nivel.

La altimetría generada comprende el rango que va de 640 a 360 msnm.

### Estudio de la zona de afectación

La realización de un estudio de inundabilidad por rotura de una presa lleva consigo la necesidad de evaluar la afección que dicha rotura provoca a las diferentes zonas singulares (poblaciones, servicios, etc) existentes en el cauce o en las llanuras de inundación, para ello se identificaron núcleos urbanos, servicios esenciales y lugares de concurrencia masiva que se verían afectados. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4: Elementos de infraestructura y de servicios que se verían afectados por la rotura de la presa San Roque.**

Museo de la Usina Molet (EPEC, 2007)	Casa Bamba (Epec, 2007)
Central Hidráulica "San Roque"	Central Hidroeléctrica "La Calera"
Central Termoeléctrica Dean Funes	Suministro de Agua Para Riego
Planta Potabilizadora Suquía (suministra el agua potable al 70% de la población de Córdoba)	
Estadio Córdoba	Estadio de Belgrano
Zona del Mercado de Abasto	Hospital de Clínicas
Maternidad Nacional	Hospital de Urgencias
Parroquia y Colegio María Auxiliadora	Escuela Manuel Belgrano
Colegio Alejandro Carbó	Central de Policía
Subs. de Arquitectura de la Provincia	Subsec. de R H de la Prov.
Dirección Provincial de Vialidad	Terminal de Trenes
Terminal de Ómnibus	Hospital Rawson
Hospital de Niños	
Planta Bajo Grande (planta depuradora de líquidos cloacales de la ciudad de Córdoba)	

### CONCLUSIONES

Un Plan de Acción de Emergencia (PADE) es el documento formal que identifica las condiciones de emergencia potencial, y especifica acciones a ser seguidas por los operadores de la presa para minimizar la pérdida de vida y el daño a la propiedad. Es el instrumento diseñado como nexo entre el operador o dueño y todos los organismos de gobierno que deberían intervenir en la emergencia, describiendo cuales son los recursos humanos y logísticos necesarios, suficientes y oportunos para ser utilizados cuando la situación así lo requiera. Contiene procedimientos e información para asistir en la aplicación de alertas tempranas, así como en la comunicación a las autoridades encargadas del manejo de la

emergencia.

La situación en Argentina hace imprescindible que se generen Planes de Acción Durante la Emergencia (PADE) de todas las presas que se encuentran operando, en particular de aquellas en las que aguas abajo de las mismas se ubiquen grandes localidades y por ende los desastres que podrían ocurrir frente a un evento de rotura puedan afectar a poblaciones urbanas. La actualidad de la Provincia de Córdoba, no es distinta de la situación en el país. La provincia posee más de 20 presas. Las destinadas al suministro de agua potable y riego (la mayoría) aún se encuentran bajo su órbita, y encuentran concesionadas las presas destinadas a la producción de energía eléctrica. Sólo las presas concesionadas tienen planes de seguridad. Es decir, la gran mayoría de ellas no cuenta con un instrumento de manejo para situaciones de emergencia. Este es el caso de la presa San Roque, una estructura particularmente importante en la provincia y el sentir de sus pobladores. El análisis de la seguridad de esta presa estableció el estado de situación actual.

Del escenario estudiado, se estableció que la presa San Roque no presentaría inconvenientes si se enfrenta a una Precipitación Máxima Probable caída en la cuenca alta para las condiciones existentes actualmente de uso de suelo. Se debe hacer notar la importancia que presenta entonces el mantenimiento de las características de esta cuenca y el riesgo que involucraría la deforestación y urbanización sin el correcto control por parte de las autoridades competentes.

Los estudios presentados mostraron que la presa no presentaría inconvenientes frente a una crecida producto de una Precipitación Máxima Probable caída en la cuenca alta considerando el embalse a cota de vertedero, por lo que puede considerarse que su diseño cumple con las exigencias de criterios actuales y no existe la posibilidad de falla por rebasamiento; por lo que se descarta ese escenario. Sin embargo se debe hacer notar que, para este escenario, la Ciudad de Carlos Paz se enfrentaría a serias consecuencias dado que su urbanización ha avanzado en los últimos años hasta proximadamente 8 metros por debajo del nivel que alcanzaría el embalse ante este tipo de eventos.

Para el escenario de rotura por actos de vandalismo, al realizarse el estudio de la zona de afectación es posible observar que una gran parte de la vida de la ciudad está localizada en sus márgenes en particular servicios fundamentales. Muchas de las instituciones que deben dar respuesta en la emergencia verían sus instalaciones afectadas. (Central de Policía, Hospital de Urgencias, la Maternidad Provincial; la Maternidad Nacional y el Polo Sanitario de la Provincia). También se verían afectadas las empresas de suministro de agua potable (Aguas Cordobesas), energía eléctrica (EPEC) y la planta depuradora de líquidos cloacales de la ciudad (Planta Bajo Grande). Toda el área céntrica quedaría bajo agua. La población afectada estimada es de alrededor de 150,000 personas y un área de 29 km<sup>2</sup>.

De los resultados obtenidos en las modelaciones es posible estimar el tiempo de arribo del pico de la crecida a la zona urbanizada de la Ciudad de Córdoba, para este escenario, en dos horas y tendría una duración aproximada de 12 horas. Este es un tiempo escaso que debe ser bien aprovechado para poder activar sus mecanismos de emergencia. Además, como se observa en las figuras 8a y 8b, todos los puentes de la ciudad se verían afectados, dejando a la ciudad dividida en dos. Por lo que habría que considerar dos zonas de conflicto que deben atenderse por separado. Las estructuras básicas de servicios de suministro de electricidad, agua potable, riego y cloacas también se verían seriamente afectados.

Es importante reiterar que el escenario de rotura por actos de vandalismo considerado es sólo a los fines de determinar la situación que se plantearía en un caso hipotético extremo, no existiendo actualmente ningún parámetro de alerta. Además, no se consideraron los beneficiosos efectos de la existencia del viejo muro del San Roque con el único fin de plantear un evento más catastrófico aún que el esperable.

Por último se recomienda realizar estudios de estabilidad de la presa ante eventos sísmicos, seleccionando y aplicando los parámetros sísmicos regionales para la verificación de esta estructura. Este escenario no ha sido analizado aún.

Es de destacar finalmente que, los más avanzados y sofisticados sistemas de protección, los mejores planes de emergencia y evacuación, pueden resultar inoperantes si no existe una adecuada organización humana que los revise y conserve actualizados, los ponga en práctica cuando sean necesarios, controle su funcionamiento y los ponga nuevamente en servicio después de utilizarlos. Es decir, frente a una emergencia, el qué hacer y el cómo hacerlo debe estar internalizado en cada uno de los integrantes de los Cuerpos Policiales y de Salvamento y Rescate, a los efectos de que las decisiones que se tomen sean acertadas, adecuadas, racionales y oportunas.

Uno de los grandes desafíos a resolver es lograr transferencia de la información generada a las localidades en riesgo. También es necesaria además la colaboración concreta y efectiva por parte de los dueños u operadores de estas obras

para la confección y preparación de las acciones de emergencia a ser ejecutadas por las autoridades locales. Todo esto hace necesario incorporar a los encargados de la confección de un PADE no sólo la formación técnica necesaria para la confección de ciertos ítems, sino también el convencimiento respecto que estos documentos deben incluir la identidad única e irrepetible de la comunidad amenazada.

## REFERENCIAS

- Barbeito, O. L. y Quintana S. F. (1998). Carta Geológica Geomorfológica de la Ciudad de Córdoba y su Entorno. *Fotointerpretación*, Vol. 7, No. 1, pp. 324 - 339, Córdoba, Argentina.
- Canadian Dam Safety Association (CDSA). (2006). *Dam Safety Guidelines*. Guía Técnica. Canadá.
- Cunge, J. A., Holly, F. M., y Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Ed Pitman, London.
- Cunge, J. A. (1969). "On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method)", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 205-230.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2004). *Federal Guidelines for Dam Safety, Emergency Action Planning for Dam Owners*, U. S. Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency, U.S.A.
- Fread, D. L. y Jin, M. (1993). "Real-time Dynamic Flood Routing with NWS FLDWAV Model Using Kalman Filter Updating". *Proc. ASCE Int. Symposium on Engineering Hydrology*, San Francisco, California, pp. 946-951.
- García, C. M. (2000). *Lámina de Lluvia Puntual para Diseño Hidrológico*, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- ICOLD – International Committee on Large Dams (1998). "Dam-Break Flood Analysis", Bulletin 111, Review and recommendations, 306 pp. Paris, Francia.
- Lábaque, M. (2010). *Propuesta para la Confección de Planes de Emergencia por Rotura de Presa en la Provincia de Córdoba. Aplicación al Dique San Roque*, Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente de España. (1996). Reglamento Técnico Sobre Seguridad De Presas y Embalses. Orden. España.
- Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP): [www.orsep.gov.ar](http://www.orsep.gov.ar)
- Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP) (2005). "Relevamiento y Diagnóstico Primario de las Condiciones de Seguridad de la Presa San Roque", Convenio Marco de Cooperación Interinstitucional y Asistencia Técnica entre la Dirección Provincial de Agua y Saneamiento (hoy Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia) y el Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP), Córdoba, Argentina.
- Pozzi, C. y Plencovich, G. (2002). *Modelación Hidráulica del Río Suquía*, Trabajo final de grado, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Reyna, S., Reyna, T. y Reyna, E. (1998). "Estudios hidrológicos hidráulicos de la Obra Avenida Costanera Margen Sur, tramo: Puente Sagrada Familia – Puente Turín", Informe de Consultoría externa para la Municipalidad de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Reyna, S. y Tarditti, G. (1996). "Estudio del Comportamiento Hidráulico del Río Suquía Tramo Puente Tablada – Puente Antártida", II Jornadas de Saneamiento Pluvial Urbano, Córdoba, Argentina.
- Riavitz, L., Perrone, L. y Fassi, J. (2004). "La Problemática de los PADE en Argentina", Seminario Internacional sobre Represas y Operación de Embalses, Puerto Iguazú, Argentina.
- United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO) (1979). "Natural Disasters and Vulnerability Analysis", Report of Experts Group Meeting, Geneva, Italia.
- U. S Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2008). "HEC-RAS.4.0 User's Manual", U.S.A.
- U.S. Army Corps of Engineers (1997). "Manual. HEC-1. Simulación de Eventos Hidrológicos", Hydrologic Engineering Center, U.S.A.
- U.S. Army Corps of Engineers (1998, 2000). "HEC – HMS de Simulación de Eventos Hidrológicos", Hydrologic Engineering Center, U.S.A.
- Washington State: Department of Ecology (2007). "Dam Safety Guidelines -Technical Note 1 Dam Break Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification", Guía Técnica, U.S.A.