

*Deberá contener información (en toda la extensión) sobre:*



Empresa u organismo: Subsecretaría de recursos hídricos de la Nación

País: Argentina

Identificación del Trabajo: **DISEÑO DE FRANJAS DE ATENUACIÓN DE CRECIDAS DINÁMICAS**

Lugar y Fecha de Elaboración del Documento: Buenos Aires, 19 de Octubre de 2009

## **DISEÑO DE FRANJAS DE ATENUACIÓN DE CRECIDAS DINÁMICAS**

Autor/es: (**Dr. Ing. OSCAR RAÚL DÖLLING, Ing. ROBERTO BERGMAN, Ing. GUSTAVO VILLAURÍA**)

Empresa u organismo: (**SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA NACIÓN**)

Cargo: Miembros asesores del Grupo de Optimización del Uso del Agua (GOA)-SSRH

### **DATOS DE LA EMPRESA**

Dirección: Paseo Colon 189 Piso 12

Localidad: CABA, Rep. Argentina.

Código Postal: C1086AAB

País: Argentina

Teléfono: 011-43497434 (part. Cel 0264-156716378)

Fax: 011-43497425

E-Mail: [odolling@gmail.com](mailto:odolling@gmail.com), [gustavovillauria@gmail.com](mailto:gustavovillauria@gmail.com), [roberto.bergman@gmail.com](mailto:roberto.bergman@gmail.com)

### **RESUMEN:**

Los escurrimientos entrantes a los sistemas y las variaciones en el clima enseñan que su variabilidad estacional es altamente no lineal, asimismo las transiciones entre estaciones y ocurrencia de eventos extremos. Es necesario, entonces, incorporar esta no linealidad y variabilidad a las reglas operativas reemplazando la visión estática lineal actual por normas de operación no lineales y con capacidad de adaptación dinámica continua. Este trabajo presenta un ejemplo de aplicación de reglas adaptativas no lineales al manejo del sistema hídrico del río Limay desarrollado por la SSRH.

## INTRODUCCIÓN

El mercado eléctrico mayorista argentino (MEM) protagonizó, sobre finales del año 2007, una crisis de almacenamiento en los embalses del Comahue y de la zona centro-oeste de Argentina. Este hecho evidenció la alta vulnerabilidad del sistema hidroeléctrico ante un escenario de alta demanda de energía y escasos caudales afluentes en las cuencas. A partir de febrero de 2008 se realizó un estudio, propiciado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, tendiente a determinar las causas principales que contribuyeron directa o indirectamente a la falta de agua en los embalses estacionales y mensuales de la Argentina durante el 2007. Para ello se conformó un grupo técnico, entre la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación y CAMMESA, destinado a descubrir las causas de los problemas detectados que fue denominado "Grupo de Optimización de los Usos del Agua" conocido hoy como grupo GOA.

Las conclusiones del estudio de situación arrojaron que las franjas de atenuación de crecidas (FAC) en los embalses del Comahue, al igual que en la mayoría de los embalses en operación, se establecieron a partir de estudios que analizan el tránsito de una crecida artificial máxima probable calculada por métodos estadísticos cuya forma sintética debería resultar compatible con el comportamiento físico de la cuenca. El cálculo de estas franjas requirió la determinación de los valores máximos admisibles de la cota de los embalses (piso de la FAC) para épocas de alta precipitación y escurrimiento abundante (invierno) y otro umbral distinto para épocas de escasa precipitación y bajos escurrimientos (verano). Entre ambas estaciones climáticas la franja fue completada uniendo estos puntos extremos con una recta para lograr la transición entre épocas de abundancia y de estiaje (estaciones de otoño y primavera).

Como conclusión, se puede decir también que, la falta de un estudio más profundo sobre la no linealidad de los volúmenes de escurrimiento originales inducen restricciones operativas que condicionan la erogación, lo que causa decisiones contradictorias al sentido común impidiendo, por ejemplo, disminuir los caudales erogados aguas abajo de los embalses a valores acordes, durante un escenario hidrológico de sequía, o mantener cotas elevadas en épocas de altos escurrimientos aprovechando el tiempo al pico del hidrograma típico de la cuenca que es mayor de 2 días.

La imposición de no sobrepasar ciertos valores de nivel de embalse, denominados umbrales de acumulación, restringe artificialmente la posibilidad de utilización plena de la capacidad de almacenamiento de los embalses. Estos umbrales serían aceptables si para su establecimiento, instante a instante, se tuvieran en cuenta variables hidrológicas como la humedad antecedente de la cuenca, los gradientes de aumento del caudal observados, la laminación de los picos de caudales aguas arriba según el estado de almacenamiento en lagos y lagunas, la distribución en área y en altura de la precipitación y el tipo de fuentes de escurrimiento en cada estación del año.

Derivado de problemas de almacenamiento de agua en los embalses del Comahue, la Secretaría de Energía realizó en 2007 y 2008 sucesivos acuerdos con AIC (Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas del Comahue) y con operadores de centrales para modificar el régimen de erogaciones de los embalses cuando estos ingresan a la FAC (Franja de Atenuación de Crecidas) y la FOE (Franja Operativa Extraordinaria) de tal manera de poder adaptarse a las condiciones variables del clima y a la severidad de escasez de agua y también a los regímenes de uso del agua acumulada en estas franjas. Incluso, de común acuerdo, se puso en práctica el criterio de sumar los volúmenes de reserva para laminación de crecidas en Piedra del Águila y en Chocón, espacio hoy reconocido como Franja de Atenuación Conjunta, lo que permitió flexibilizar los niveles umbrales en los embalses y reemplazarlos por un volumen conjunto equivalente destinado a laminación de crecidas. El grupo técnico GOA se reúne todos los lunes en CAMMESA para actualizar y modificar si es necesario el despacho semanal de tal manera de adaptarlo a los escenarios de oferta y de demanda de agua para los distintos usos en cada cuenca.

Para apoyar el trabajo del GOA, se encargó al programa PGICH (Programa de Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, Ingeniería Hidráulica y ambiental) de la Universidad de San Juan el desarrollo de modelos de simulación y optimización de los sistemas hídricos principales del país. Derivado de este trabajo se desarrolló, en ambiente Extend, el modelo SARH-SSRH (Sistema de Apoyo a la Gestión de los Recursos Hídricos, Dölling 2000) que incluye los embalses sobre el río Limay, Neuquén, Uruguay, Paraná y Futaleufú. El modelo está desarrollado en un ambiente de simulación continua que permite realizar estudios de tipo MonteCarlo y modelar cualquier configuración de embalses (en serie o paralelo). La programación de los módulos está desarrollada en lenguaje estructurado MODL. La incorporación de reglas operativas se puede realizar a partir del armado de una base de reglas lógicas secuenciales del tipo IF...THEN.

Subsecretaría de recursos hídricos de la Nación Argentina, Buenos Aires, 19 de Octubre de 2009,  
Dr. Ing. O. DÖLLING, Ing. R. BERGMAN, Ing. G. VILLAUURÍA

## OBJETIVO

El objetivo del trabajo fue desarrollar reglas operativas dinámicas de erogación de caudales capaces de adaptarse en forma automática a las condiciones de humedad antecedente de la cuenca, al nivel actual del embalse y a la forma de ascenso y descenso observado en los caudales de ingreso a los embalses de Piedra del Aguila y Chocón, considerando a los embalses de Alicurá, Pichi Picún Leufú y Arroyito como embalses de paso durante el manejo de la crecida. Una premisa para el desarrollo fue generar reglas lógicas de caudales a erogar que protejan en cada instante al embalse evitando en la medida de lo posible se alcancen niveles superiores a los umbrales físicos admisibles de retención de agua (592msnm en Piedra del Águila y 381msnm en Chocón) y proteger a las riberas aguas debajo de caudales superiores al máximo admisible para el tramo entre Piedra del Aguila y Pichi Picún Leufú (3500 m3/) y atenuar en lo posible por debajo de 2200 m3/s los caudales aguas debajo de Arroyito. Las reglas deben basarse fundamentalmente en variables observadas de tal forma de eliminar los errores de pronóstico de la toma de decisiones de protección, sin embargo a futuro se pretende avanzar en la incorporación de pronósticos dinámicos de caudales de ingreso que permitirán mejorar el cálculo de erogados al ser estas incorporadas.

Las variables disparadoras de protecciones (caudales erogados obligados), que han sido incorporadas a las consignas operativas son:

<b>Variables de decisión</b>	<b>Descripción de la variable</b>
$Q_{t-1}$	Caudal ingreso a Piedra del Aguila instante $t-1$
$Q_{t-2}$	Caudal ingreso a Piedra del Aguila instante $t-2$
$Q_{t-3}$	Caudal ingreso a Piedra del Aguila instante $t-3$
$Q_{eP}$	Caudal que se decide erogar de Piedra del Aguila instante $t$
<b>Cota P</b>	Cota del nivel del agua en el embalse piedra del Aguila instante $t-1$
<b>Qin PPL</b>	Caudal ingreso a Pichi Picun Leufú instante $t-1$
$Q_{base\ inicial}$	Caudal base del hidrograma que ingresa a Piedra del Aguila instante $t=0$
$Q_t$	Caudal ingreso a Piedra del Aguila instante $t$
$Q_{eCh}$	Caudal que se decide erogar de Chocón instante $t$
<b>CotaCh</b>	Cota del nivel del agua en el embalse Chocón instante $t-1$
<b>Qin Arr</b>	Caudal ingreso a Arroyito instante $t-1$

A continuación se describen las 19 reglas que permiten atenuar crecidas, incluso de volumen decamilenario, en el sistema del río Limay que verifican las condiciones de protección impuestas en los objetivos para cualquier cota de espera en Piedra del Águila y Chocón.

## REGLAS DE PROTECCIÓN ANTE CRECIDAS EN PIEDRA DEL AGUILA

Las reglas lógicas de operación desarrolladas incorporan como variable de decisión los gradientes de caudales hasta 3 días hacia atrás, el estado de acumulación de agua en los embalses en cada instante, el flujo base y los caudales decididos erogar en el día anterior. La ponderación de estos gradientes y su impacto en la decisión de descarga tienen en cuenta distintos estados por los que pasa el escurrimiento entrante a un embalse durante la evolución de la crecida que se va a atenuar que son: ascenso, cúspide, descenso y vuelta a ascender. Cada uno de estos estados debe indentificarse a fin de tomar una decisión de descarga.

### Reglas de Descarga

1) Rama ascendente del Hidrograma de crecida

if  $((Q_{t-1}-Q_{t-2})\geq 0$  and  $(Q_{t-2}-Q_{t-3})\geq 0$ )

$Q_{eP}=(Q_{t-1}-Q_{t-2})*(Cota\ P-586.)+(Q_{t-2}-Q_{t-3})*(Cota\ P-586)/2.+Qin\ PPL;$

2) Punto Cúspide del Hidrograma de crecida

if  $((Q_{t-1}-Q_{t-2})\leq 0$  and  $(Q_{t-2}-Q_{t-3})\geq 0$ )

$Q_{eP}=(Q_{t-2}-Q_{t-3})*(Cota\ P-586)/2.+Qin\ PPL;$

3) Rama descendente del Hidrograma de crecida

if  $((Q_{t-1}-Q_{t-2})\leq 0$  and  $(Q_{t-2}-Q_{t-3})\leq 0$ )

$Q_{eP}=(Q_{t-1}-Q_{t-2})+Qin\ PPL;$

4) Límites del gradiente de descenso de caudales erogados

Subsecretaría de recursos hídricos de la Nación Argentina, Buenos Aires, 19 de Octubre de 2009,  
Dr. Ing. O. DÖLLING, Ing. R. BERGMAN, Ing. G. VILLAUURÍA

4a)

if  $((Q_{t-1} - Q_{t-2}) \leq -100$  and  $(Var2 - Q_{t-3}) \leq -100$ )

$Q_{eP} = Q_{inPPL} - 100;$

4b)

if  $((Q_{t-1} - Q_{t-2}) \leq -100$  and  $(Q_{t-2} - Q_{t-3}) \leq -100$  and  $Q_{t-1} > Q_{inPPL} - 100$ )

$Q_{eP} = Q_{t-1} - 100;$

4c)

if  $(Q_{eP} - Q_{inPPL} \leq -200)$

$Q_{eP} = Q_{inPPL} - Realabs(Q_{eP} - Q_{inPPL})/3.;$

5) Punto de inicio de otra crecida

if  $((Q_{t-1} - Q_{t-2}) \geq 0$  and  $(Q_{t-2} - Q_{t-3}) \leq 0$ )

$Q_{eP} = (Q_{t-1} - Q_{t-2}) * (Cota\ P - 586.) + Q_{inPPL};$

6) Protección ecológica en caso de sequía severa

if  $(Q_{t-1} < 210)$

$Q_{eP} = 210;$

7) Mantenimiento de cota objetivo

if  $(Cota\ P < 588)$

$Q_{eP} = Q_{in\ PPL} - 50;$

8) Cálculo dinámico de  $Q_{base}$

if  $((Q_{t-2} - Q_{t-1}) < 0$  and  $(Q_{t-3} - Q_{t-2}) > 0$ )

$Q_{base} = Q_{t-2};$

else

$Q_{base} = Q_{base\ inicial};$

9) Cálculo de caudal de protección para crecidas con cuenca seca

if  $(Q_{base} < 1400$  and  $Qt < 2700$  and  $Q_{eP} > 1400$ )

$Q_{eP} = 1400;$

10) Cálculo del caudal de protección límite para crecidas con cuenca húmeda

if  $(Q_{eP} \geq 51.316 * CotaP - 26958)$

$Q_{eP} = 51.316 * CotaP - 26958;$

11) Restricción de erogación para embalse bajo

if  $(CotaP \leq 586$  and  $Q_{eP} \geq 1400$ )

$Q_{eP} = 1400;$

12) En caso de estabilidad de caudales de entrada se deja el embalse "de pasada"

if  $((Q_{t-2} - Q_{t-1}) = 0$  or  $(Q_{t-3} - Q_{t-2}) = 0$ )

$Q_{eP} = Qt;$

13) Caudal mínimo ecológico

if  $(Q_{eP} \leq 210)$

$Q_{eP} = 210;$

## REGLAS DE CHOCON

14) Rama ascendente del Hidrograma de crecida

if  $((Q_{t-1} - Q_{t-2}) \geq 0$  and  $(Q_{t-2} - Q_{t-3}) \geq 0$ )

$Q_{eCh} = Q_{eP};$

15) Caudal Ecológico

if  $(Q_{eCh} < 210)$

$Q_{eCh} = 210;$

16) Condición general de protección aguas abajo

if ( $Q_{eCh} > 1200$ )  
 $Q_{eCh} = Q_{eP} * 0.7;$

17) Límite de protección aguas abajo  
 if ( $Q_{eCh} \geq 2200$ )  
 $Q_{eCh} = 2200;$

18) Condición de recuperación de nivel  
 if ( $CotaCh < 375$ )  
 $Q_{eCh} = Q_{inArr} - 50;$

19) Control de ascenso de niveles en el embalse  
 if ( $Q_{eCh} < Q_{inArr} - 50$ )  
 $Q_{eCh} = Q_{inArr} - 20;$

### Conclusiones

Se aplicó esta base de reglas lógicas para controlar crecidas sintéticas de volumen Decamilenario para distintas cotas de espera de la crecida en Piedra del Águila y Chocón dando resultados satisfactorios en todos los casos. Estas crecidas sintéticas (Gustavo Devoto (CIER- 2006) han sido escaladas para conservar la forma de distribución temporal del escurrimiento del año 1915 y 1951. Las siguientes figuras resumen algunos de los resultados de las simulaciones realizadas.

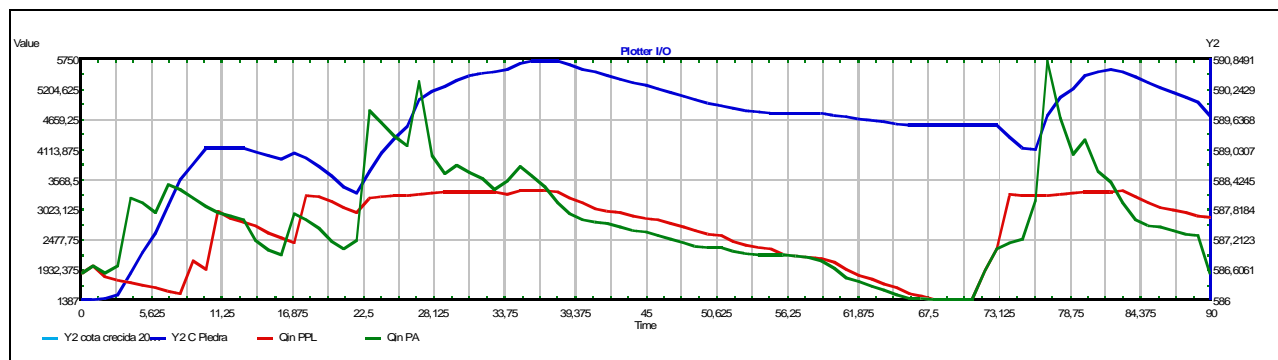


Figura 1: Crecida (Devoto tipo 1915) crecida de doble pico con pico máximo de 5570 m<sup>3</sup>/s. controlada con las reglas dinámicas desarrolladas. Cota inicio Piedra del Aguila 586 msnm. Cota máxima alcanzada en Piedra del Aguila: 590,84 msnm. Erogado máximo descargado aguas debajo de Piedra del Aguila: 3361 m<sup>3</sup>/s.

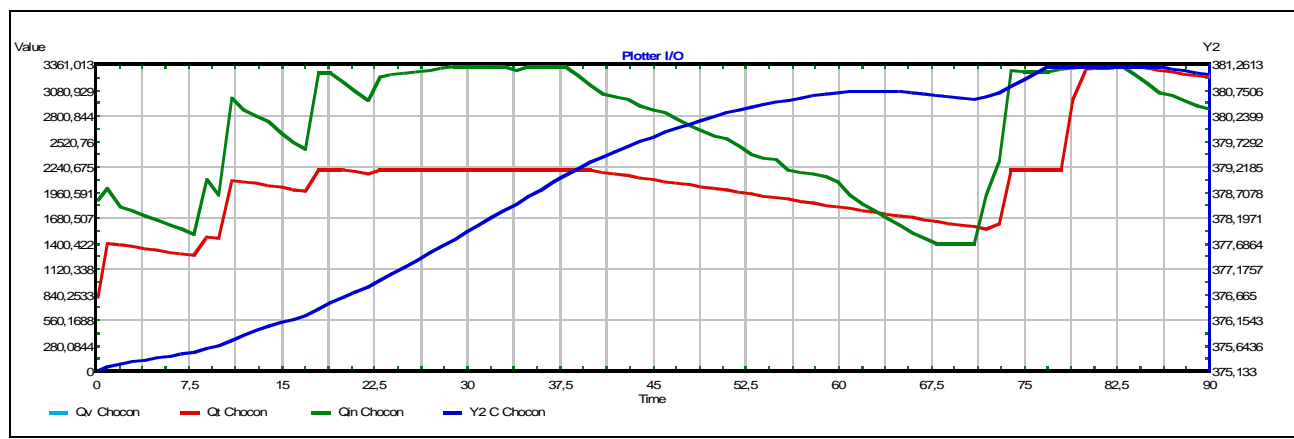


Figura 2: Crecida (Devoto tipo 1915) controlada con las reglas dinámicas desarrolladas. Cota inicio Chocón 375 msnm. Cota máxima alcanzada en Chocón: 381 msnm. Erogado máximo descargado aguas debajo de Chocón 3361 m<sup>3</sup>/s. Se observa que se logró el control de caudales por debajo de 2200 m<sup>3</sup>/s hasta el día 77 en que Chocón alcanza cota máxima.

Se sometió al simulador a situaciones más críticas en cuanto a cotas de espera tanto en Piedra del Águila como en Chocón obteniéndose los siguientes resultados.

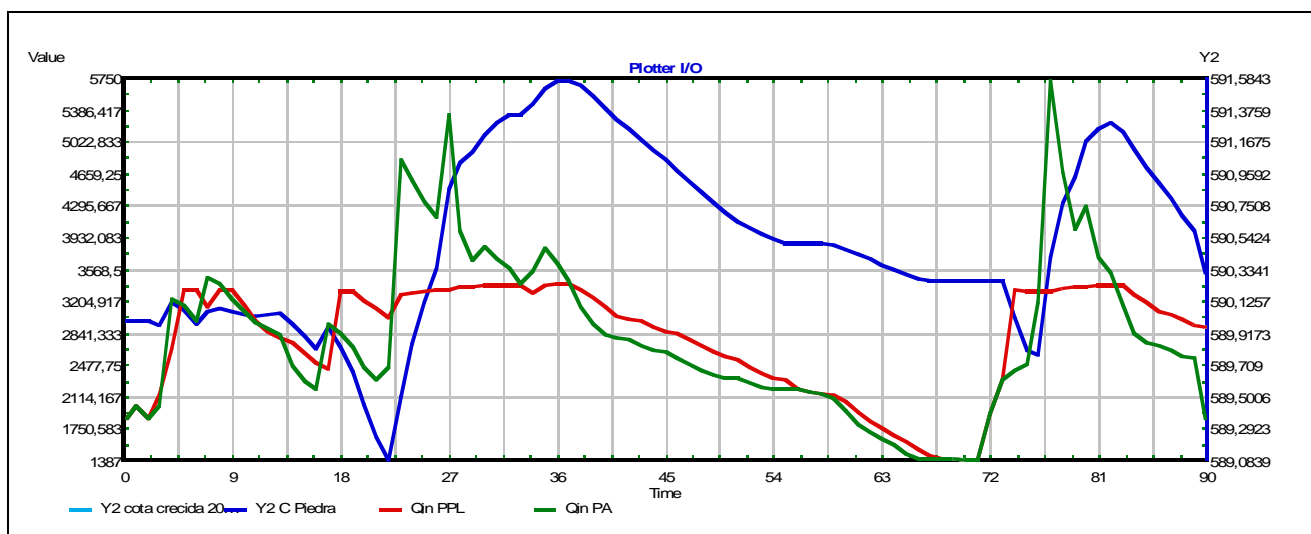


Figura 3: Crecida (Devoto tipo 1915) crecida de doble pico con pico máximo de 5570 m<sup>3</sup>/s. controlada con las reglas dinámicas desarrolladas. Cota inicio Piedra del Águila 590 msnm. Cota máxima alcanzada en Piedra del Águila: 591,58 msnm. Erogado máximo descargado aguas debajo de Piedra del Águila: 3399 m<sup>3</sup>/s.

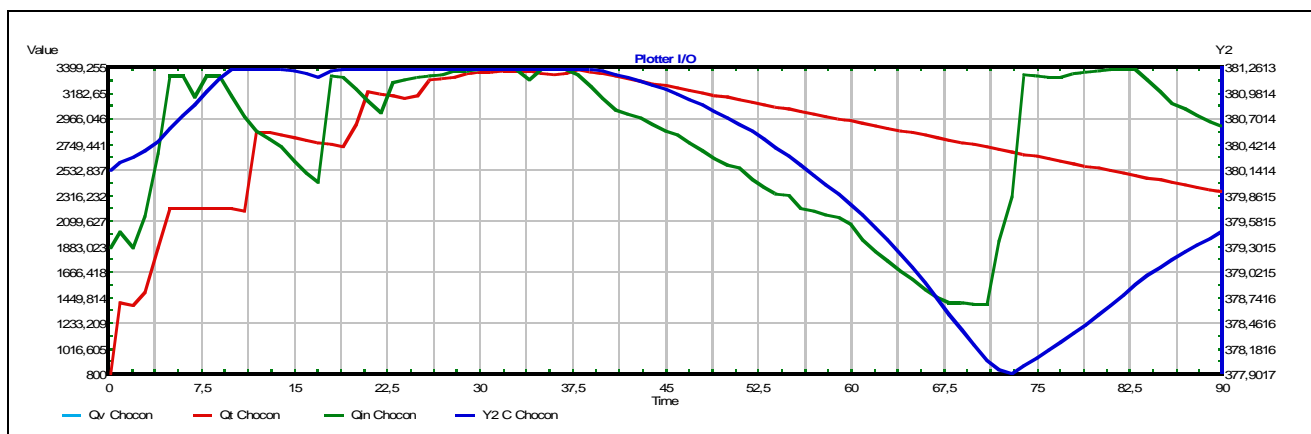


Figura 4: Crecida (Devoto tipo 1915) controlada con las reglas dinámicas desarrolladas. Cota inicio Chocón 380 msnm. Cota máxima alcanzada en Chocón: 381 msnm. Erogado máximo descargado aguas debajo de Chocón 3399. m<sup>3</sup>/s.

Como se observa las reglas dinámicas se adaptan al estado en que se encuentra el embalse de Piedra del Águila y de Chocón con el objetivo de evitar que los caudales aguas debajo de Arroyito superen valores de 3500 m<sup>3</sup>/s impuestos como límites de erogación.

Se concluye que esta base de reglas lógicas son valiosas herramientas para el apoyo preventivo al control de crecidas y se adaptan bien para solucionar situaciones críticas como las observadas.

### Lecciones Aprendidas

Se ha comprobado la bondad de la aplicación de estas reglas para distintas crecidas observadas. La aplicación práctica, durante mayo del año 2008, de maniobras de protección contra crecidas similares a las calculadas por las reglas desarrolladas (figura 5) permitió validar el buen comportamiento de las mismas como de segura aplicación al sistema modelado. La eficiencia de estas reglas conduce a la necesidad de revisar las normas de control de crecida actuales, en particular si estas se basan en criterios no dinámicos ni

adaptativos. Entendemos que estos conceptos son suficientemente generales para ser aplicados a todas las cuencas y presas existentes.

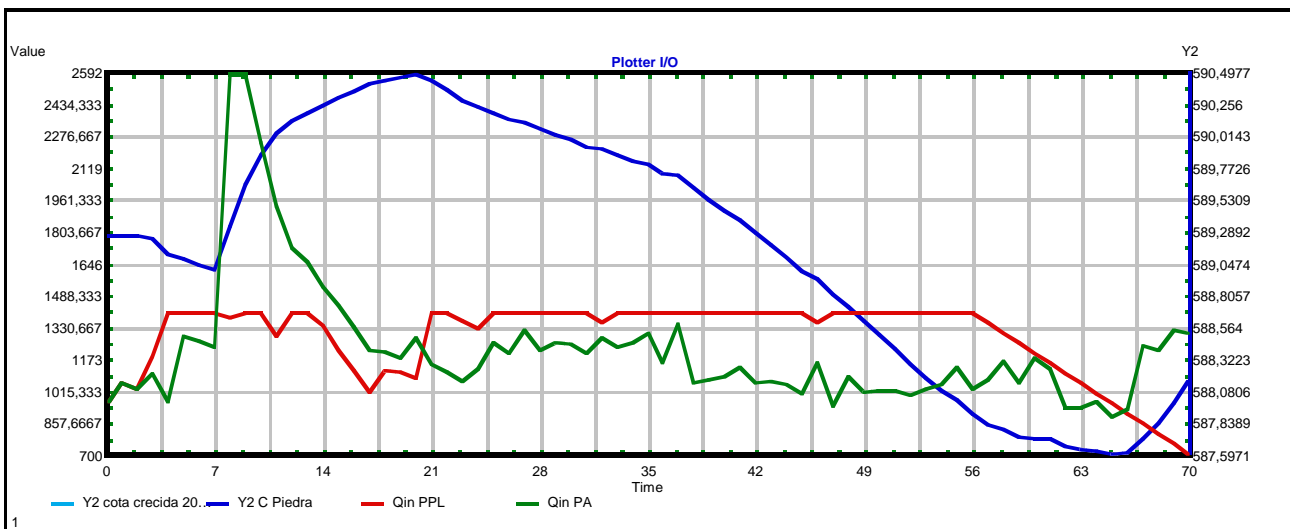


Figura 5: Crecida observada en 2008 controlada con las reglas dinámicas desarrolladas. Cota inicio Piedra del Águila 589,25 msnm. Cota máxima admisible de Piedra del Águila sin vertidos: 592msnm. Erogado máximo descargado aguas debajo de Piedra del Águila 1400 m3/s.

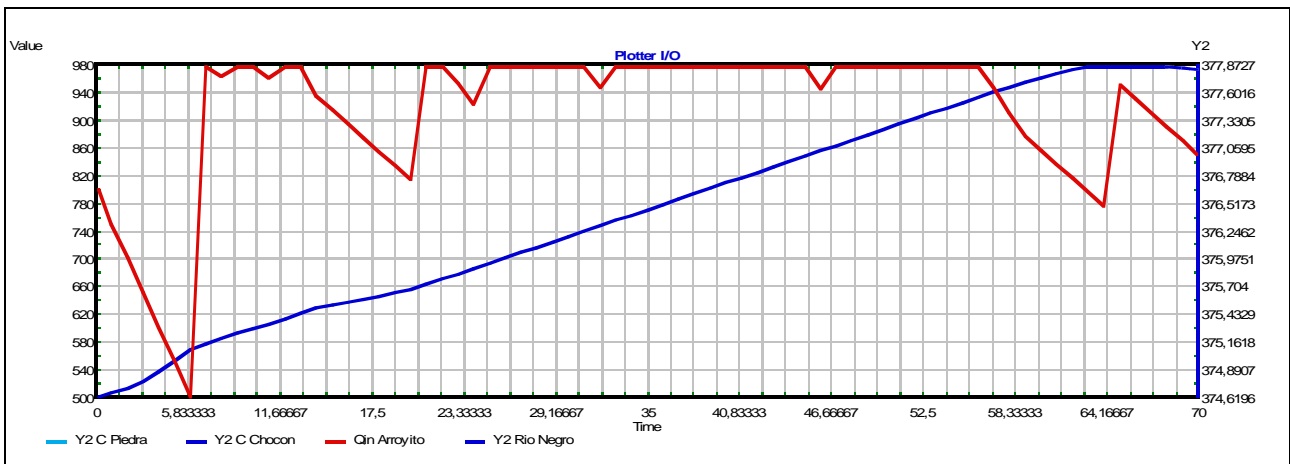


Figura 6: Crecida observada en 2008 controlada con las reglas desarrolladas. Cota inicio Chocón 374,6 msnm. Cota máxima admisible de Chocón sin vertidos: 380 msnm. Cota máxima alcanzada por Chocón 377,8msnm. Erogado máximo descargado aguas debajo de Chocón 980 m3/s.

## Recomendaciones.

En aquellos casos en que se posean normas de atenuación de crecidas rígidas y estáticas tales como franjas de atenuación de crecidas lineales, se recomienda su reemplazo por reglas de atenuación de crecidas del tipo dinámicas adaptativas como las técnicas basadas en gradientes de caudales entrantes aquí presentadas. Las ventajas de esta acción radica en que las reglas dinámicas de tipo adaptativas permiten trabajar con los embalses en niveles mas altos que aquellos que obligan las normas de atenuación de crecidas estáticas sin perder los niveles de seguridad fijados para la presa, los bienes y las personas aguas abajo.

## Bibliografía

Devoto, Gustavo Alberto.- REVISIÓN DE LA NORMA DE ATENUACIÓN DE CRECIDAS DEL SISTEMA DE EMBALSES EL CHOCÓN – PIEDRA DEL ÁGUILA - CIER- 2006.

Dölling Oscar Raúl y Varas C. Eduardo "OPERACIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS DE AGUA MULTIPROPÓSITO USANDO UN MODELO DE SIMULACIÓN DE PROCESOS". Revista Ingeniería Hidráulica en México, CONACYT. Vol. XV, Núm. 2, II Época . mayo-agosto de 2000.

Subsecretaría de recursos hídricos de la Nación Argentina, Buenos Aires, 19 de Octubre de 2009, Dr. Ing. O. DÖLLING, Ing. R. BERGMAN, Ing. G. VILLAUURÍA

Dölling Oscar Raúl "SISTEMAS DE APOYO A LA GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS", (2001). Tesis Doctoral. Editado por PHI- UNESCO- ISBN 92-9089-072-X.. UNESCO

Dölling Oscar Raúl y Varas C. Eduardo "Sistema de apoyo a la operación de sistemas hídricos con propósitos múltiples, SARH-2000" Revista Ingeniería Hidráulica en México y publicado en el Volumen XVIII, número 1, II Época (enero-marzo) de 2003. CONACYT.

Dölling Oscar Raúl y Varas C. Eduardo "Decision support model for operation of multi-purpose water resources systems" Journal of Hydraulic Research (2004), pp. 1–10, © 2004 International Association of Hydraulic Engineering and Research. 2629 HD Delft The Netherlands.