

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS Y DE USOS DEL SUELO  
EN EL RÉGIMEN DE ESCURRIMIENTO DE UNA CUENCA AGRÍCOLA  
DE LLANURA**

**Carlos PAOLI<sup>(1,2)</sup>, Rosana HÄMMERLY<sup>(1)</sup> y Ricardo GIACOSA<sup>(1,2)</sup>**

*(1) Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina*

*(2) Centro Regional Litoral, Instituto Nacional del Agua, Santa Fe, Argentina*

*e-mail: [cpaoli@ciudad.com.ar](mailto:cpaoli@ciudad.com.ar), [rhammer@fich1.unl.edu.ar](mailto:rhammer@fich1.unl.edu.ar), [rgiacosa@arnet.com.ar](mailto:rgiacosa@arnet.com.ar)*

**RESUMEN:**

El incremento en la magnitud y frecuencia de crecidas en los últimos años que trajo aparejado mayores impactos por inundaciones rurales y urbanas, llevó a investigar las causas y la incidencia de distintos factores con la finalidad de reorientar las acciones futuras en distintas zonas y ajustar parámetros de diseño de obras y medidas no estructurales a implementar. En el trabajo se investiga la incidencia que han tenido: la persistencia de condiciones húmedas en la región, con incremento de la pluviometría media, los cambios en los usos de la tierra a partir de una intensificación de las actividades agrícolas y el incremento de las redes de canales de drenaje existentes. Se concluye que el cambio en el régimen pluviométrico, es el principal factor en el aumento de la escorrentía media de la cuenca y de la magnitud de las crecidas, mientras que los cambios en el uso del suelo en los últimos 20 a 30 años tiene una incidencia importante en las áreas de aporte directas en el tramo inferior y prácticamente despreciable en la parte superior de la cuenca. Las obras de canalizaciones y drenaje tienen también una incidencia diferente según las subcuencas que se analizan y sus características físicas y según la recurrencia de las tormentas. Con niveles freáticos altos, los canales drenan la capa freática dando lugar a una mayor permanencia de caudales bases. En años secos la freática se ubica por debajo de las cotas de fondo de los canales y por lo tanto no drena a los mismos.

**ABSTRACT:**

The increase in the magnitude and frequency of floods in the last years, brought greater impacts by rural and urban floods. It's took to investigate the causes and the incidence of different factors with the purpose of reorienting the future actions in different zones and the fitting to parameters of design. In this paper, is investigated the incidence about of the persistence of humid conditions in the region, with increase of the precipitation average, the changes in the land-uses from an intensification of the agricultural activities and the increase of the drainage networks. In conclusion, the change in the precipitation regime, is the main factor in the increase of the average run-off of the river basin and the magnitude of the floods, whereas the changes in the land-use in the last 20 to 30 years have an important incidence in the direct areas of contribution in the inferior part of the river basin. The drainage networks also have a different incidence according to the basins that analyze and their physical characteristics, and according to the recurrence of storms. With high levels of groundwater, the channels drain the water table. In dry years the levels of groundwater is located below the levels of bottom of the channels and it does not drain them.

**PALABRAS CLAVES:**

REGIMEN HIDROLÓGICO \* USO DE SUELO \* CAMBIO CLIMÁTICO

## **INTRODUCCIÓN**

A partir de 1971 se registra un importante incremento de los caudales medios del río Salado, con un incremento en su módulo de más del 100% en el período 1971-2004 respecto al período 1954-1970.

A la persistencia de condiciones húmedas en la región, con incremento de la pluviometría media, se le adiciona la ocurrencia de eventos lluviosos intensos, cuya frecuencia también se ha ido incrementando.

Sumado a esto, en las áreas del centro-sur de la cuenca se produjeron cambios en los usos de la tierra a partir de una intensificación de las actividades agrícolas en detrimento de las ganaderas.

Por otra parte, también se han incrementado las redes de canales de drenaje existentes, las cuales si bien contribuyen a disminuir las superficies anegadas, generan una concentración del escurrimiento y un incremento en caudales picos.

Todas estas situaciones anteriormente mencionadas, que están sucediendo actualmente en la cuenca inferior del río Salado (30.000 km<sup>2</sup>), conducen a revisar la respuesta de la cuenca ante nuevos escenarios.

En vistas de esta problemática el Ministerio de Asuntos Hídricos de la Provincia de Santa Fe le encomendó a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) que conjuntamente con el Instituto Nacional del Agua (INA) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), realizaran un estudio sobre "Influencia de los cambios físicos y climáticos en el régimen de escurrimiento del río Salado - Tramo inferior", cuyo informe final fue concluido en noviembre de 2007. El trabajo mencionado fue dirigido por el Ing. Ricardo Giacosa y del mismo participaron Hämmerly, R. (FICH), Zucarelli, V. (FICH); Morresi, M. del V. (FICH); Sosa, D. (INA); Bernal, G. (INA); Picatto, H. (INA); Paoli, C. (INA); Monteverde, C. (INA); Genesisio, M. (INA); Giorgi, R. (INTA); Tosoloni, R. (INTA); Sapino, V. (INTA); León, C. (INTA); Chiavassa, A. (INTA).

Asimismo y en la misma línea la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica ha subsidiado a través del PICTO 2004 - Código 22790 al Proyecto de "Influencia de los cambios físicos y climáticos sobre la escorrentía de la Cuenca Inferior del río Salado", que todavía se encuentra en ejecución por parte del Grupo de Investigación que dirige el Ing. Carlos Paoli y que componen los Ings Hämmerly, Rosana; Giacosa, Ricardo y Cacik, Pablo.

Parte de los resultados finales o parciales de ambos proyectos están volcados en el presente trabajo.

Utilizando herramientas de modelación hidrológica se ha investigado en la subcuenca del A° Cululú (9.636 km<sup>2</sup>) la incidencia que tiene cada uno de los factores mencionados comparando el escenario actual con el existente en los años 1970-1980 lo que permitirá inferir otros posibles cambios en el escurrimiento según los escenarios futuros que se planteen.

## **LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA SUBCUENCA DEL ARROYO CULULÚ**

Para el análisis de la composición actual de la red de canales, la superficie de aportes del A° Cululú fue subdividida en 15 cuencas, algunas de las cuales se subdividieron en subcuencas (Figura 1). Los puntos de salida de cada una de estas subcuencas se seleccionaron teniendo en cuenta que puedan ser considerados secciones de control para distintos estados hídricos en la modelación hidrológica. En La Figura 1 se presentan los principales afluentes al arroyo Cululú, con la ubicación de las localidades y rutas nacionales y provinciales más significativas. Con triángulos se han indicados los principales secciones de cálculo.

Se aplicó el modelo hidrológico HEC HMS, de acuerdo al esquema de modelación de la subcuencas del A° Cululú, que se observan en la Figura 2.

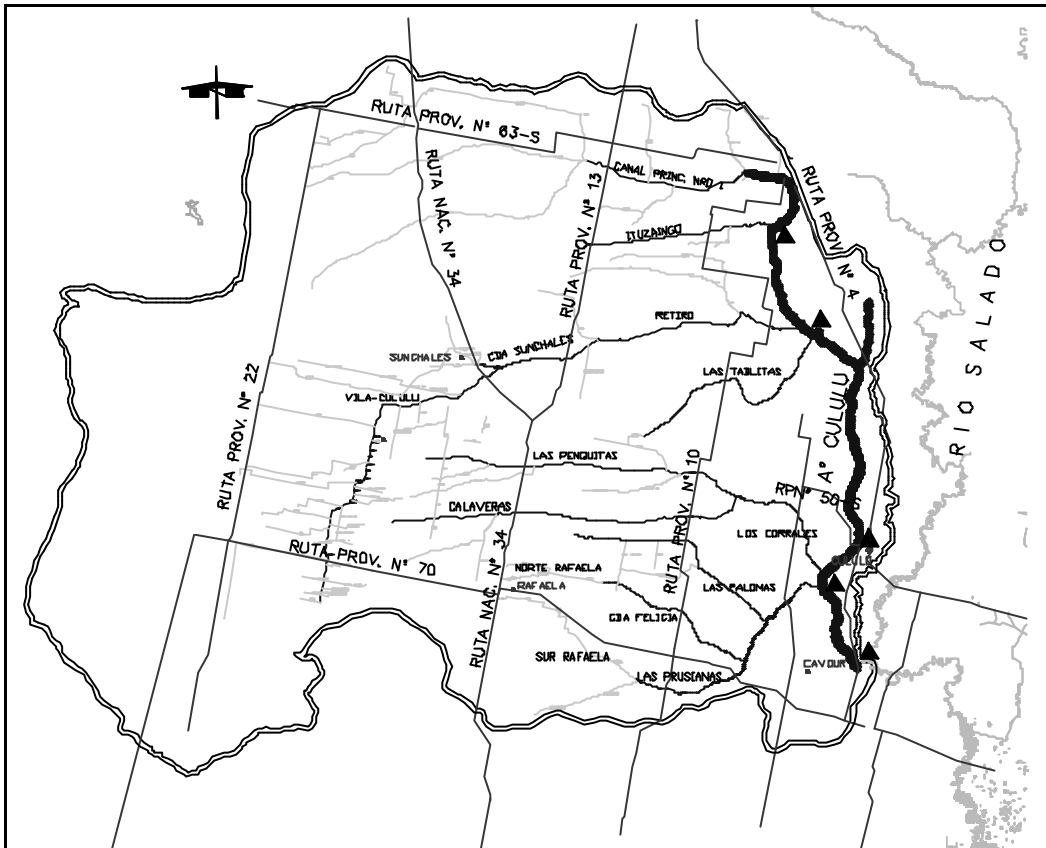


Figura 1.- Croquis de la cuenca del A° Cululú con secciones de cálculo de caudales.

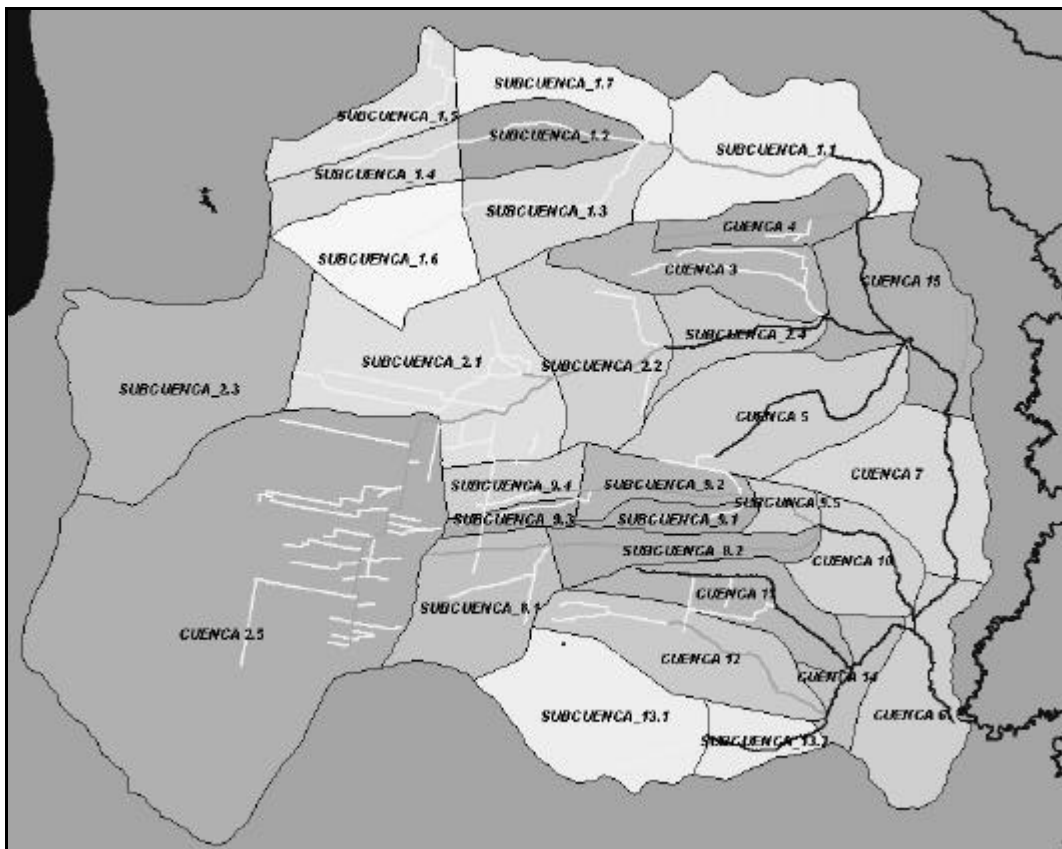


Figura 2.- Esquema de modelación de subcuencas del A° Cululú.

La cuenca presenta una superficie total de 9.636 km<sup>2</sup>, con áreas variando entre 53 y 2000 km<sup>2</sup>.

Para la modelación se utilizaron los siguientes métodos:

- (i) Método del SMA (Soil Moisture Account) para la determinación de las pérdidas en las subcuencas que presentan efecto de almacenamiento.
- (ii) Método de Curva Número CN para la determinación de las pérdidas en las áreas de aporte inmediato.
- (iii) Método del Hidrograma Sintético de Clark para la propagación en cuenca.
- (iv) Método de Muskingum-Cunge para la propagación en cauce.

El modelo fue calibrado para la crecida del año 2005, debido a que dicho evento está asociado a las condiciones de uso actual del suelo (periodo 2005-2007). La sección de control se encuentra en la intersección entre el arroyo Cululú y la ruta provincial N° 50-S (RP 50-S) cerca de la localidad de Cululú.

**Tabla 1.-** Resultados de la calibración. Arroyo Cululú en Cululú y RP 50-S.

	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>
<b>Qp (m<sup>3</sup>/s)</b>	674	620
<b>Fecha del Pico</b>	15 Marzo 2005	16 Marzo 2005
<b>Volumen (Hm<sup>3</sup>)</b>	240.5	309.5

Se observa una buena correspondencia entre los valores de caudales, con un error relativo del 8 %. Por su parte, el error en el volumen es aproximadamente del -29 %. La diferencia en los volúmenes puede deberse a la incertidumbre en la reconstrucción del hidrograma registrado.

Por su parte, la falta de conocimiento en la discretización temporal de la precipitación al disponer de datos diarios, introduce además, incertidumbres que se manifiestan en los resultados. A fin de obtener resultados más precisos, hubiera sido conveniente contar con información pluviográfica para desagregar el hietograma.

Finalmente, el hidrograma a la salida de la cuenca del A° Cululú, en Cavour y la RP 50-S, presenta para esta crecida, un caudal máximo de 1000 m<sup>3</sup>/s el 15 de marzo de 2005. En esta sección se recibe el aporte de toda la cuenca.

Los eventos de verificación seleccionados corresponden a las crecidas de Marzo-Junio de 2003 y Marzo-Abril de 2007. La Tabla 2 presenta los resultados de la modelación para la crecida de año 2007 en la sección de control.

**Tabla 2.-** Resultados de la verificación. Arroyo Cululú en RPN° 50-S (Cululú).

	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>
<b>Qp (m<sup>3</sup>/s)</b>	289.1	347.3
<b>Tp (días)</b>	30 de Marzo 2007	30 de Marzo 2007
<b>Volumen (hm<sup>3</sup>)</b>	319.4	268.8

Como se observa de los resultados, el error en el caudal es del orden de -20 %, mientras que el error en el volumen es del orden del 16 %.

Nuevamente es válido recordar que los datos empleados en la determinación del hietograma son diarios, lo cual genera gran incertidumbre, que posteriormente se traslada a los resultados.

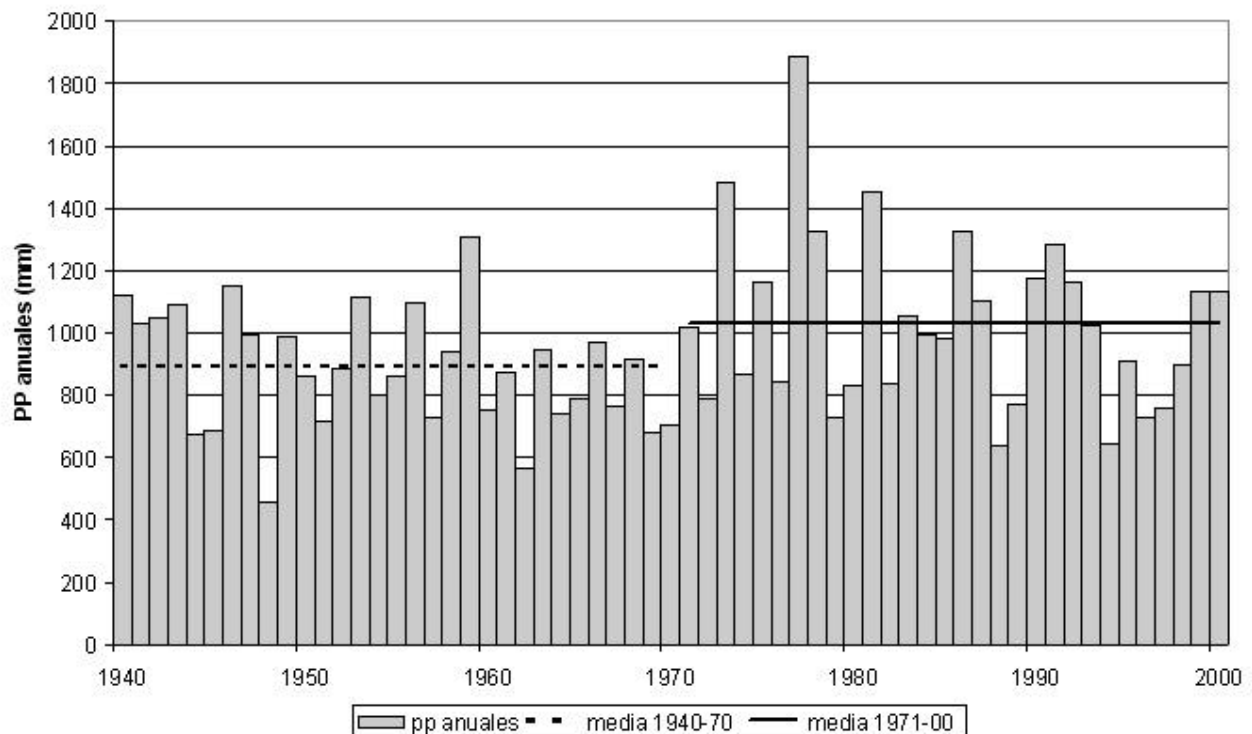
Se agruparon las subcuencas por sistemas de aportes, para analizar la influencia que posee cada sistema en el hidrograma de salida. Se presenta la Tabla 3., donde se muestran los caudales pico aportados por cada grupo de cuencas y porcentajes correspondiente respecto del caudal pico en la salida de la cuenca del arroyo Cululú.

**Tabla 3.-** Distribución de caudales por sistemas de aporte.

SISTEMA	Qpico (m <sup>3</sup> /s)	% influencia
Canal Principal N° 1	74.8	4.9
Sistema Canal Vila - Cañada Sunchales	26.5	1.7
Canal Ituzaingó	39.4	2.6
Canal Aristóbulo del Valle	40.8	2.6
Canal del arroyo Retiro	56.4	3.7
Canal del arroyo Las Tablitas	147.8	9.6
A° Calavera, A° Las Penquitas y A° Los Corrales	517.4	33.6
Canal Sur Rafaela, Cañada Felicia, A° Las Palomas y Aportes Directos	767.9	49.8
Cuenca 15 (de aportes directos)	84.5	5.5
Cuenca 7 (de aportes directos)	249.6	16.2
Cuenca 6 (de aportes directos)	317.9	20.6

Se observa en la tabla, que las cuencas de aporte directo (entre la sección Arroyo Cululú en Cululú y Cavou, ambas en RP 50-S) son las que proporcionan el mayor porcentaje de caudal.

### INCIDENCIA DEL CAMBIO DEL RÉGIMEN DE PRECIPITACIONES



**Figura 3.-** Rafaela. Precipitaciones anuales y medias para cada submuestra.

Este aumento en el régimen de precipitaciones en condiciones de balance hidrometeorológico equilibrado, significa duplicar los excesos de agua de un período a otro, lo cual se refleja a partir de 1971 en un importante incremento de los caudales medios del río Salado. Para el periodo 1954-1970 el módulo es de 70.8 m<sup>3</sup>/s, en tanto entre 1971-2002 es de 176.4 m<sup>3</sup>/s, lo que indica un incremento de más del 100% en términos anuales.

El incremento de los niveles freáticos con valores próximos a nivel de terreno en el sector oeste de la cuenca del A° Cululú es consecuencia de que a partir de una mayor disponibilidad de agua precipitada, y ante las restricciones físicas de estos sistemas de llanura (inexistencia de un sistema de escurrimiento definido y jerarquizado, baja permeabilidad de los suelos y escaso gradiente topográfico), el agua permanece prolongados periodos de tiempo sobre la superficie favoreciendo los procesos de infiltración y recarga. Para retrotraer estos valores a los correspondientes al período anterior a 1970, se requieren varios años con precipitaciones inferiores a la media histórica.

En cuanto a los eventos extremos, se analizaron los máximos de precipitación en 24, 48, 72 y 96 horas para el período 1930-2007 en dos subperíodos 1930-1970 y 1971-2007. Los valores de referencia para la estación Rafaela indican que la precipitación máxima en 96 hs de recurrencia T = 100 años, para el período 1971-2007 es un 20 % mayor que la del período 1930-1970. Esta incidencia es directa puesto que modifica las tormentas de diseño para las recurrencias que se adopten.

A efectos de determinar la incidencia global del aumento del régimen de precipitaciones que ha dado lugar a un aumento del nivel freático y de ocupación de los bajos de la cuenca, se modela representando dos escenarios hipotéticos diferentes del estado de los reservorios que utiliza el modelo.

Se consideraron tres eventos de precipitación maximizados, que son las precipitaciones para recurrencias entre 2 y 5 años; 10 y 50 años, tal como se observan en la Tabla 4.

Cada evento se modeló con una lluvia de 72 horas de duración distribuida arealmente en forma uniforme. Los valores se obtuvieron de un análisis estadístico de precipitaciones en la estación Rafaela para la serie 1930-2003 del INTA y fueron abatidos por un coeficiente 0.85.

**Tabla 4.-** Precipitaciones maximizadas estadísticamente. Estación Rafaela (INTA). Serie 1930-2003.

Duración (hs)	Tr (años)		
	2 - 5	10	50
72	137	186.1	248.1

Los escenarios hipotéticos adoptados considerando el estado de almacenamiento de los reservorios fueron:

- (i) Escenario 1: Reservorios vacíos, con un 5% de capacidad inicial (E1).
- (ii) Escenario 2: Reservorios llenos, con un 85% de capacidad inicial (E2).

Las Tablas 5 y 6 presentan un resumen de los escenarios analizados.

**Tabla 5.-** Resultados caudal máximo del A° Cululú en Cululú y RP 50-S (m<sup>3</sup>/s).

Escenario	Tr= 2-5 años	Tr= 10 años	Tr= 50 años
Escenario 1	166.5	331.2	563.6
Escenario 2	221.6	383.3	616.8

**Tabla 6.-** Resultados caudal máximo del A° Cululú en Cavour y RP 50-S (m<sup>3</sup>/s).

Escenario	Tr= 2-5 años	Tr= 10 años	Tr= 50 años
Escenario 1	312.4	585.5	976.2
Escenario 2	396.4	667.3	1051.9

La Tabla 7 presenta la relación entre el caudal máximo del arroyo Cululú en Cululú y RP 50-S y el caudal máximo del arroyo Cululú en Cavour y RP 50-S, expresados en porcentaje, para cada uno de los escenarios analizados.

**Tabla 7.-** Relación entre los caudales máximos (%).

Escenario	Tr= 2-5 años	Tr= 10 años	Tr= 50 años
Escenario 1	53	57	58
Escenario 2	56	57	59

De la observación de la Tabla 7 surge que, en todos los casos analizados, entre el 53% y el 59% proviene del arroyo Cululú en la sección ubicada en Cululú y RP 50-S, el resto es escurrimiento directo de las cuencas inmediatas a la desembocadura en Cavour y RP 50-S.

Al simular el Escenario 2, con niveles de reservorios llenos, se obtiene un caudal 33% mayor que en el Escenario 1 en la sección de Cululú y 27% mayor en Cavour.

La Tabla 8 presenta un resumen de los resultados obtenidos de la explotación del modelo, para los Escenarios E1 y E2 en los principales cierres del sistema. Se presentan además, la relación entre los caudales de ambos escenarios para un período de recurrencia de entre 2-5 años.

**Tabla 8.-** Resultados caudal máximo (m<sup>3</sup>/s) para Tr= 2-5 años.

Secciones de cálculo de Q	Nodo modelo	Área (km <sup>2</sup> )	Qp E1 (m <sup>3</sup> /s)	Qp E2 (m <sup>3</sup> /s)	QpE2/QpE1
Canal Ppal. N° 1 en RP. N° 10 (cerca Adolfo Alsina)	CP1	1740.5	53.8	77.7	1.4
Canal Vila-Cululú aguas abajo de RN. N° 34	R 13-Sunch	3240.7	4.4	14.3	3.2
Canal Vila-Cululú y Retiro aguas arriba RP. N° 10	Ruta 10	3994.8	51.4	68.5	1.3
A° Cululú cerca RP. N° 62 (Manucho)	VC	6687.9	166.8	214.3	1.3
Las Penquitas en RN. N° 34	R 34	165.7	0.5	2.5	5.0
Las Penquitas aguas arriba de RP. N° 10	R 10	373.0	1.8	7.7	4.4
Los Corrales aguas abajo de RP. N° 10	R 10 S9.5	889.1	4.5	18.7	4.2
A° Cululú aguas abajo RP. N° 50-S	AA 50-S	7954.4	166.2	237.7	1.4
A° Cululú en RP. N° 50-S, cerca Cavour	Cavour R50-S	9635.8	312.3	396.4	1.3

La relación entre los escenarios E2 y E1 es siempre mayor que 1. Esto es así debido a que el E2 considera reservorios llenos, lo que implica una disminución de la capacidad de almacenamiento y por consiguiente hay mayor escurrimiento.

De la observación de la Tabla surge que para una misma tormenta los caudales obtenidos considerando en la simulación reservorios llenos es entre 4 y 5 veces superior que considerándolos vacíos, para las secciones que se encuentran fundamentalmente al oeste, como las correspondientes a los nodos denominados R13-Sunch, Ruta 34, R 10 y R 10S9.5. Este comportamiento se debe a que en dichas subcuencas predomina el almacenamiento.

Cuando se le suma el aporte de la zona con pendiente y se alcanza el curso del arroyo Cululú, la relación entre los escenarios llenos y vacíos es entre 1.3 y 1.4. Es decir que es aproximadamente una tercera parte mayor el caudal cuando los escenarios están llenos. En estas cuencas predomina el escurrimiento superficial por sobre el efecto de almacenamiento, por eso la influencia es menor.

Se observa además que los principales aportes al pico del sistema en Cululú RP 50-S provienen del Canal Principal N° 1 (con un 32 % del caudal pico en Cululú) y del arroyo Retiro -Ruta 10 (con un 30 % del caudal pico en Cululú).

Entre Cululú y Cavour en RP 50-S el pico prácticamente se duplica con la incorporación de las cuencas Los Corrales, Las Palomas, Cañada Felicia, Las Prusianas y aportes directos.

El comportamiento del sistema para los diferentes períodos de retorno es similar, cambiando solamente las relaciones porcentuales entre los caudales de los diferentes escenarios.

Se observa además, que las variaciones de los caudales para los distintos escenarios tiene mayor incremento cuando se consideran los reservorios vacíos, y a medida que aumenta la recurrencia ese incremento es menor, por ejemplo para la sección en Cavour, el incremento es de 21% para recurrencia entre 2 y 5 años, 12% para Tr: 10 años y 7.6% considerando tormentas de 50 años de recurrencia.

Para cada uno de los escenarios planteados entre la sección en Cululú y la sección en Cavour en RP 50-S, el incremento de los caudales pico, es del orden del 72 – 87% para las distintas recurrencias.

## **INCIDENCIA DEL CAMBIO DEL USO DEL SUELO**

Se realizó la cartografía del uso de la tierra rural de un sector de la cuenca del río Salado para dos períodos, que corresponden a la situación actual (2005-2007) y a la existente en la década 1970-1980. El trabajo se realizó por interpretación visual de imágenes satelitales Landsat, con apoyo de datos de campo, clasificaciones disponibles y consultas a informantes calificados.

En un primer nivel, la clasificación se basa en la proporción de tierras dedicadas a agricultura y ganadería: tierras bajo uso predominantemente agrícola, ganadero o mixto. Mixto no implica necesariamente la existencia de empresas mixtas o de rotaciones, sino que, dentro de la unidad delimitada en el mapa no se observa un uso totalmente dominante.

Dentro de las tierras bajo uso agrícola no se hacen diferenciaciones.

Dentro de las tierras bajo uso ganadero, se discriminan las que presentan grandes restricciones (inundables), las que han sido poco alteradas (monte), moderadamente modificadas (pastizales) y muy alteradas (pasturas de alta producción).

En la actualidad las categorías que incluyen agricultura, presentan un predominio de los cultivos de verano, mayoritariamente soja, en parte en doble cultivo trigo/soja. En la década del '70 incluían

una mayor proporción de trigo y la casi inexistencia de la soja; los cultivos de verano dominantes eran girasol, maíz y sorgo.

Asimismo, han ocurrido cambios importantes en los sistemas de la labranza. En la década del '70 lo típico fue el arado de reja. Actualmente, gran parte de los cultivos agrícolas se realizan bajo siembra directa y los forrajeros con arado de disco.

Los cambios en las especies forrajeras y de cosecha, así como de los sistemas de labranza y utilización del alambrado eléctrico, cobraron intensidad a partir de mediados de la década del '80.

En forma resumida los cambios globales a nivel de toda la cuenca son los siguientes:

1.- Monte: En general, no se observan variaciones de importancia entre los períodos considerados. El desmonte generalizado es anterior a 1970.

2.- Agricultura: Se observa un gran aumento de la superficie ocupada. En general, esto ocurre sobre tierras de buena aptitud antes dedicadas a ganadería. Por las fechas de maduración y cosecha, las tierras quedan con escasa protección desde fines del verano, lo que puede ser de importancia en sectores en pendiente y con lluvias muy intensas como las ocurridas en abril de 2003 y fines de marzo de 2007.

3.- Ganadería sobre pasturas implantadas: En las tierras de buena aptitud se observa una disminución de la superficie, en tanto que han avanzado sobre tierras ocupadas por pastizales naturales o poco modificados en la década del '70. Asimismo, se ha incrementado la carga animal, que llega hasta duplicarse.

4.- Ganadería sobre pastizales asociados a planos de inundación de cursos de agua: No se observan cambios.

5.- Ganadería sobre pastizales hidro-halófilos asociados a planos extensos y levemente deprimidos: Se habría producido una disminución de la intensidad del uso, asociado a mayores excesos hídricos.

Estos cambios han sido modelados a partir de la cartografía de ambas situaciones que se traduce en cambios de CN para cada subcuenca considerada y los resultados fueron:

- Para las áreas de aporte directo al cauce del A° Cululú que son el 11% de la superficie total de la cuenca y contribuyen en un 40 % en la conformación del caudal pico en la desembocadura del Cululú, el incremento de caudales en la actualidad está en un rango de 12-24 % en relación al periodo 1970-1980.
- En las áreas de aportes localizadas al oeste de RN N° 34, los cambios de uso del suelo, no permiten detectar cambios significativos de caudales, debido a que la pendiente topográfica es muy baja.
- El área denominada C 2.5 donde se encuentra el canal Vila-Cululú, situada en el extremo suroeste de la cuenca del A° Cululú, es un área sustancialmente volcada a la actividad agrícola. No obstante dada su posición relativa en relación al punto de descarga en el A. Cululú y a las restricciones naturales dado por el umbral topográfico en las inmediaciones de Colonia Bigand, estos cambios en el uso de las tierras no se traducen en un incremento de la escorrentía en su punto de salida. La intensificación de la actividad agrícola genera un cambio en los límites de tolerancia respecto a la permanencia del agua, a partir del cual se generan reclamos de los productores, por daños debido a “excesos de agua”.

- La franja comprendida entre las rutas RP N°13 y RP N°10 es un área con restricciones naturales de uso y donde predomina la actividad ganadera. Al este y oeste de esta franja de transición, se produjeron cambios significativos en el uso de las tierras. La red de canales secundarios y terciarios y caminos con desarrollo oeste-este que actúan con mayor capacidad de conducción que los propios canales dan lugar a que esta zona que naturalmente fue de almacenamiento de los excedentes hídricos superficiales actualmente estén conectados a la red hídrica natural ( A° Las Prusianas, Cañada Felicia, A° Las Palomas, A° Los Corrales).

Este incremento de la escorrentía es gravitante para eventos de recurrencias menores a 10 años que son los que la red de caminos y canales puede conducir. Para situaciones extremas como la del año 2003, en que la capacidad de conducción de dichas obras es ampliamente sobrepasada, la franja entre ruta 10 y 13 actúa como un embalse retardador.

- Para un evento hidrológico con precipitaciones de 72 hs y Tr del orden 10 años, el contraste de los escenarios 1970-1980 con el escenario actual da como resultado que los caudales a la salida de la cuenca por cambios en el uso de los suelos, se incrementan de 760 a 850 m<sup>3</sup>/seg es decir un 11%.

## **5. INCIDENCIA DEL DESARROLLO DE LA RED DE CANALES DE DESAGUES**

A continuación se detallan los resultados de los análisis considerando la red de canales existente y la supuesta en la década 70-80, relacionados con el saneamiento agrícola, el incremento de la escorrentía y la influencia del flujo base.

### **El desarrollo de obras de canalización para saneamiento agrícola**

- La cuenca del A° Cululú no tiene un funcionamiento hidrológico uniforme. El relieve es heterogéneo, con pendientes comprendidas entre 0.20 a 2.35 m/km. Lo que implica que para un evento de lluvia de similares características, las respuestas hidrológicas sean muy disímiles.
- El desarrollo de obras de infraestructura tales como redes de caminos y parcelamiento de la tierra, ambas de tipo reticular y en sentido sur-norte y este-oeste, ha modificado sustancialmente el modelo de escurrimiento natural, por cuanto el trazado de la redes de canales acompaña en gran parte el trazado de caminos.
- Los canales principales fueron construidos con mucha anterioridad a la década del 80. La sucesión de periodos de excesos hídricos, generó un aumento de las áreas anegadas, razón por la cual la red de canales secundarios, terciarios y a nivel predial fue increciendo y en algunos casos en forma no organizada ni jerárquica. La incidencia de la red de canales es variable y está condicionada por las restricciones naturales de la topografía y tipos de suelos.
- La información disponible en el Ministerio de Asuntos Hídricos (MAH) acerca de los cambios en la red de drenaje mediante tareas de limpieza, aumento de secciones, modificaciones e incorporación de nuevas canales y obras de arte, no permitió desarrollar un contraste entre el estado de la red actual y la existente al periodo 1980. Solo en aquellas subcuencas en que se dispuso de dicha información se pudo realizar dicho contraste y cuantificar la incidencia de la misma.

## **Incremento de la escorrentía por efecto de las canalizaciones en la cuenca del arroyo Cululú**

- El escurrimiento superficial de las áreas localizadas al oeste de ruta nac. N° 34 está gobernado por la escasa pendiente del terreno, y tiene escasa incidencia en los empuntamientos de los hidrogramas a la salida de la cuenca.
- En la cuenca del A° Cululú, analizando la franja comprendida entre las rutas provinciales N° 10 y N° 13, y que es atravesada por los Canales Sur y Norte Rafaela, Las Palomas, Calaveras y Las Penquitas, antes de que dichas obras fueran ejecutadas los excedentes hídricos superficiales provenientes de las zonas rurales de Susana, Rafaela y Lehmann, eran retenidos en esta zona y laminarmente conducidos a los cursos de los A° Las Prusianas, Cda Felicia y A° Las Palomas. A partir de la construcción de los mencionados canales se adquiere una continuidad hidráulica con una incidencia de 40-50% en el incremento de los caudales para precipitaciones de 5 a 10 años de recurrencia. Para recurrencias de 50 ó más años, los volúmenes de agua superan ampliamente la capacidad de conducción de los canales por lo que la influencia de los canales pierde gravitancia. La mayor parte de los excesos hídricos escurren sobre el terreno en el sentido de la pendiente topográfica y por caminos con traza en el mismo sentido de la pendiente topográfica que actúan como verdaderos canales.
- Para precipitaciones extraordinarias como las registradas entre el 26 y 31 de marzo del 2007 con magnitudes de 480 mm en estación Rafaela, se produjeron excesos hídricos que superaron ampliamente la capacidad de conducción de los canales. La simulación hidrológica dio como resultado un caudal máximo de 1540 m<sup>3</sup>/seg en la desembocadura de la cuenca, de los cuales 770 m<sup>3</sup>/seg fueron aportados por las cuencas Canal Sur Rafaela, Cañada Felicia y Las Palomas. En ruta RP 50-S el máximo registrado fue de 289 m<sup>3</sup>/seg, Para este tipo de eventos que tuvo epicentro en una zona con pendiente como es la zona sureste de la cuenca, la contribución de los canales en la generación de caudales picos es de un 20-25% de los totales aportados por cada una de estas subáreas.
- Para el mismo evento de marzo del 2007 en la zona oeste de la cuenca (Subcuenca Vila) también se registraron precipitaciones extraordinarias del orden de 400 mm. Sin embargo dichos volúmenes no fueron transferidos hacia aguas abajo, debido a que el área tiene forma de cubeta. El agua permaneció por varios meses sobre el terreno, generando anegamientos superficiales en la zona. Estos volúmenes fueron drenados lentamente por el canal Vila-Cululú cuya capacidad de conducción no supera los 15 m<sup>3</sup>/seg.

## **Efecto de las canalizaciones sobre el flujo base**

- En períodos de excesos hídricos como el escenario registrado en el año 1981, a partir del censo de pozos se determinó que la freática drena en todos los cursos superficiales.
- Por el contrario al superponer la piezometría del censo del año 1971, correspondiente a una época con la freática profunda, con las cotas del canal, se observa que en general el sistema subterráneo se encontraba por debajo de las cotas de fondo de los canales. Ello implica que en períodos de sequía cuando la freática se encuentra por debajo de la rasante de los canales (3-4 metros de profundidad), estos no drenan el agua subterránea.
- Los canales en la zona oeste tienen menores valores de flujo base, encontrándose entre 1.12 a 1.32 l/s/km, lo que se atribuye a las bajas pendientes transversales.

- En la cuenca baja el aporte es mayor y va desde 2.46 l/s/km de canal a 5 l/s/km de canal. Lo que puede deberse a las pendientes piezométricas mayores hacia los cursos de agua.
- En el arroyo Cululú los aportes de flujo base medidos son más altos que los anteriores 8.5 l/s/km y puede atribuirse a la pendiente, constituyendo el arroyo en el nivel base de descarga de parte de las aguas subterráneas.

Todos estos valores se encuentran sobre estimados ya que la longitud de canales considerada para el cálculo es la correspondiente a los canales secundarios y primarios, existiendo aportes de agua subterránea de otros canales menores no considerados.

- Sobre la cuenca del arroyo las Prusianas, no fue posible realizar determinaciones de flujo base, debido a que en las observaciones realizadas en el campo se identificó que: a) escurre agua turbia, b) hay contaminación por efluentes industriales y c) existen aportes importantes de agua superficial.
- En las proximidades del canal monitoreado en la estación Sunchales, la mayor perturbación en los niveles se manifiestan dentro de un radio de 10 m desde la margen del canal.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El cambio en el régimen pluviométrico que se manifiesta por un aumento de los montos anuales precipitados con mayor incidencia en los meses más lluviosos y el aumento de la frecuencia de valores extremos, es el principal factor en el aumento de la escorrentía media de la cuenca y de la magnitud de las crecidas.

Además indirectamente se produce una elevación de los niveles freáticos que da lugar a una menor capacidad de almacenamiento. En situación de años húmedos y con el nivel freático alto, se favorecen los anegamientos subsuperficiales y superficiales, situaciones estas que conllevan luego un período estacional o años de recuperación.

Los cambios en el uso del suelo en los últimos 20 a 30 años tiene una incidencia diferente según la porción de la cuenca considerada y según las características físicas de las subcuencas, resultando de una incidencia importante los cambios producidos en las áreas de aporte directas en el tramo inferior y prácticamente despreciable en la parte superior de la cuenca.

Las obras de canalizaciones y drenaje tienen también una incidencia diferente según las subcuencas que se analizan y sus características físicas. Adicionalmente influye la recurrencia de las tormentas, puesto que por tratarse de canalizaciones para saneamiento agrícola dimensionadas para bajas recurrencias (5 a 10 años), cuando se dan tormentas de mayor recurrencia se desbordan impidiendo conducir todos los excesos y por lo tanto su incidencia sobre los caudales picos es menor que para las bajas recurrencias.

En las subcuencas del oeste con escasas pendientes, las canalizaciones tiene una baja incidencia. En las subcuencas con mayores pendientes el desarrollo de obras de caminos secundarios con sus cunetas tienen una incidencia importante en favorecer la captación y conducción de los excedentes hídricos hacia los puntos de salida.

Con niveles freáticos altos, los canales drenan la capa freática dando lugar a una mayor permanencia de caudales bases. En años secos la freática se ubica por debajo de las cotas de fondo de los canales y por lo tanto no drenan a los mismos.

Las recomendaciones para lograr un mejor seguimiento de estos procesos para la Cuenca del Cululú son: aumentar los puntos de control de caudales, introducir la desagregación temporal y areal de las tormentas, relevar con mayor detalle las pequeñas obras de conducción, modelar con modelos distribuidos.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Giorgi, R. y colaboradores** (2007). “*Uso de la tierra rural en la cuenca del río Salado. Situación actual (2005-2007) e histórica (1970-1980)*”. INTA, EEA Rafaela.

**Hämmerly, R.; Giacosa R. y Paoli, C.** (2006). “Influencia en el escurrimiento por cambios en el uso del suelo”. *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica y Simposio Internacional de Estructuras Hidráulicas*, Ciudad Guayana, Venezuela, 9 al 14 de Octubre de 2006. ISBN 980-12-2178-X.

**MAH, UNL, INA, INTA** (2007). “Influencia de los cambios físicos y climáticos en el régimen de escurrimiento del río Salado – Tramo inferior”. *Informe Final Convenio MAH con UNL-INA-INTA*. Noviembre 2007, Santa Fe, Argentina.