

# Relación entre la disponibilidad de agua superficial y el patrón de precipitaciones en una cuenca semiárida de las Sierras de Córdoba, Argentina.

*Nicolás Cavallera<sup>1</sup>, César Luis García<sup>2,3</sup>, Carlos Marcelo García<sup>4,3</sup> y Andrés Carlos Ravelo<sup>2</sup>.*

(1) Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) FCFEYN – UNC. (2) CONICET, Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN) FCA – UNC, (3) EHCPA, Facultad de Ingeniería – UCC. (4) CONICET, CETA, FCFEYN – UNC.

E-mail: nicocavallera@gmail.com

RESUMEN: En las Sierras Grandes de la Provincia de Córdoba nacen los ríos que proveen de agua al 80% de la provincia y a más de 3 millones de personas. En la actualidad, la cantidad de agua disponible para consumo humano se ve reducida por causas naturales y antrópicas, destacándose los efectos de cambios en el uso del suelo, los ciclos de sequía - humedad, el incremento de la población y la expansión urbana, combinados con una inadecuada gestión del recurso hídrico. Estos impactos son mayores en las localidades cuyo suministro de agua depende exclusivamente de la escorrentía superficial, como la mayoría de las localidades serranas de Córdoba, donde generan problemas económicos y conflictos sociales. Para poder mejorar el sistema de gestión y asistir a la toma de decisiones, es necesario saber cómo responden las cuencas de aporte ante distintos escenarios hidrometeorológicos. La estimación del flujo de base para los periodos de estiaje es crucial para inferir potenciales problemas de suministro, especialmente en sistemas que se abastecen directamente del curso de agua y no poseen reservorios. Se estudió esta problemática en la cuenca del río San Antonio, que abastece a Villa Carlos Paz y otras localidades del Sur del departamento Punilla. Se utilizó un modelo hidrológico, continuo y distribuido (JAMS), implementado y calibrado con datos hidrometeorológicos del CIRSA-INA (1992-2012). En este trabajo se analizó la evolución temporal del caudal de estiaje ante distintas condiciones hidrometeorológicas, utilizando precipitación real y distintos escenarios simulados. El modelo implementado permitió estimar caudales con precisión y determinar que el caudal de estiaje depende exclusivamente de las precipitaciones de ese año hidrológico, siendo nulo el efecto de sequías/excesos de años anteriores. Esta metodología demostró ser de gran ayuda para la gestión integrada del agua.

## INTRODUCCION

En las Sierras Grandes de la Provincia de Córdoba nacen los ríos que proveen de agua al 80% de la provincia y a más de 3 millones de personas. En la actualidad, la cantidad de agua disponible para consumo humano se ve reducida por causas naturales y antrópicas, destacándose los efectos de cambios en el uso del suelo, los ciclos de sequía - humedad, el incremento de la población y la expansión urbana, combinados con una inadecuada gestión del recurso hídrico. Estos impactos son mayores en las localidades cuyo suministro de agua depende exclusivamente de la escorrentía superficial, como la mayoría de las localidades serranas de Córdoba, y por ende se ven aumentados los problemas económicos y conflictos sociales. Para poder mejorar el sistema de gestión y asistir a la toma de decisiones, es necesario saber cómo responden las cuencas de aporte ante distintos escenarios hidrometeorológicos. La estimación del flujo de base para los periodos de estiaje es crucial para inferir potenciales problemas de suministro, especialmente en sistemas como los descriptos, dado que no poseen almacenamiento.

El río San Antonio es un afluente del lago San Roque, reservorio donde se capturan los excesos hídricos. Pero parte de su caudal es capturado aguas arriba de la desembocadura y abastece a más del 60% de la población del valle de Punilla, principal destino turístico de la provincia de Córdoba. Sequías recurrentes junto con los índices más elevados de expansión urbana, han llevado al borde de la crisis al sistema de distribución de agua. Sin embargo muy poco se sabe sobre cómo reacciona esta cuenca a distintos periodos de sequía/excesos y como estos afectan el crítico periodo de estiaje y los años sucesivos.

El objetivo de este trabajo es determinar los efectos que distintos escenarios de sequía/excesos tienen sobre la disponibilidad de agua en el periodo más desfavorable del año hidrológico (estiaje). Se busca además, aumentar la información disponible y explorar herramientas y métodos que puedan contribuir a mejorar la gestión. Para ello se utiliza un modelo distribuido y continuo que permite simular los caudales de varios años hidrológicos completos a partir de datos de precipitación, temperatura, tipo de suelo y cobertura vegetal.

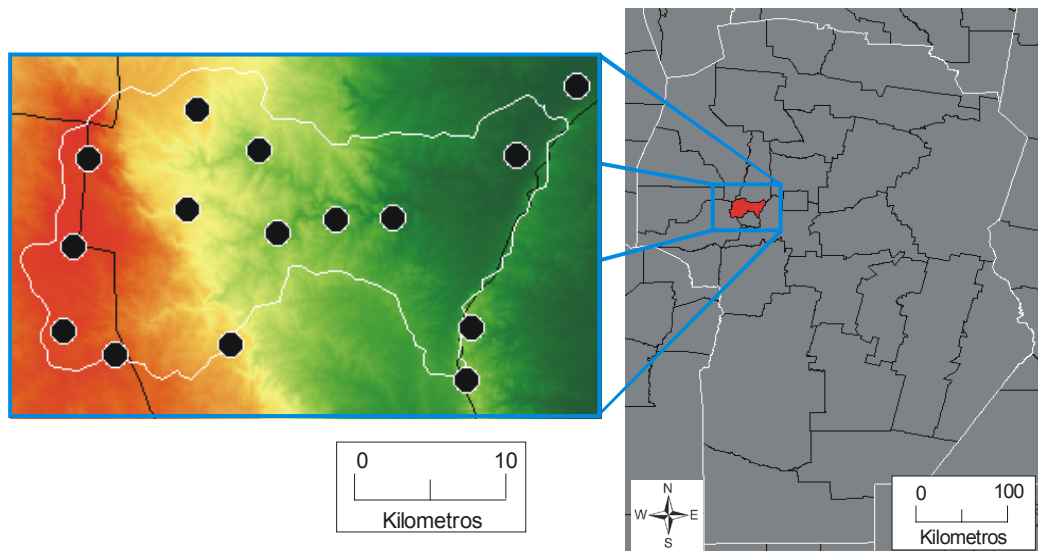
## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Área de estudio*

El área de estudio es la cuenca del Río San Antonio cuyo tamaño aproximado es de 52.000 ha. Su cabecera de halla en la Pampa de Achala, parte superior de las Sierras Grandes de Córdoba (aproximadamente 2200 m sobre el nivel del mar) y la dirección principal de drenaje es de Este a Oeste desembocando en el Lago San Roque (640 m sobre el nivel del mar). El desnivel entre la naciente y la desembocadura es de 1560m, en una distancia lineal de 30 km.

### *Obtención y sistematización de la información*

La información meteorológica disponible para el área de estudio proviene de la red telemétrica del CIRSA-INA, que cuenta en la actualidad con estaciones meteorológicas distribuidas en la cuenca (Figura 1). Las estaciones contienen distintos sensores que proveen datos sobre precipitación, temperatura y niveles del río. Los datos meteorológicos e hidrológicos provistos por la red telemétrica y del aforo de salida de la cuenca se sistematizaron en un sistema de información RBIS (García *et al.*, 2012) que permite la exportación de datos directamente en el formato necesario para el modelo hidrológico (Kralish *et al.*, 2009).



**Figura 1:** Área de Estudio y distribución de las estaciones de la Red Telemétrica del CIRSA-INA usadas en el modelo.

Para caracterizar la cobertura vegetal se utilizaron imágenes satelitales LANDSAT TM, con una resolución espacial de 30 m x 30 m. Para estimar pendientes y características geomorfológicas se utilizó el modelo de elevación digital del terreno del SRTM de libre acceso y de 90 m x 90 m de resolución espacial. La caracterización edáfica se obtuvo a partir del Atlas de suelos del INTA 1:500.000.

Combinando la geomorfología con los mapas de suelos y de vegetación se delimitaron Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU según su denominación en inglés; Flügel, 1995). En el modelo se asume que las HRU están compuestas por un área que tiene un comportamiento hidrológico homogéneo y se las utiliza como unidades de modelación. El tamaño de estas unidades puede ser desde 1 pixel hasta varios pixeles dependiendo de la metodología usada en su construcción. En este caso se utilizó la herramienta HRU Delineation Toolbox (Schwartz, 2008) y delinearon 4271 unidades de un tamaño mínimo de 6 ha y un área promedio de 11.6 ha.

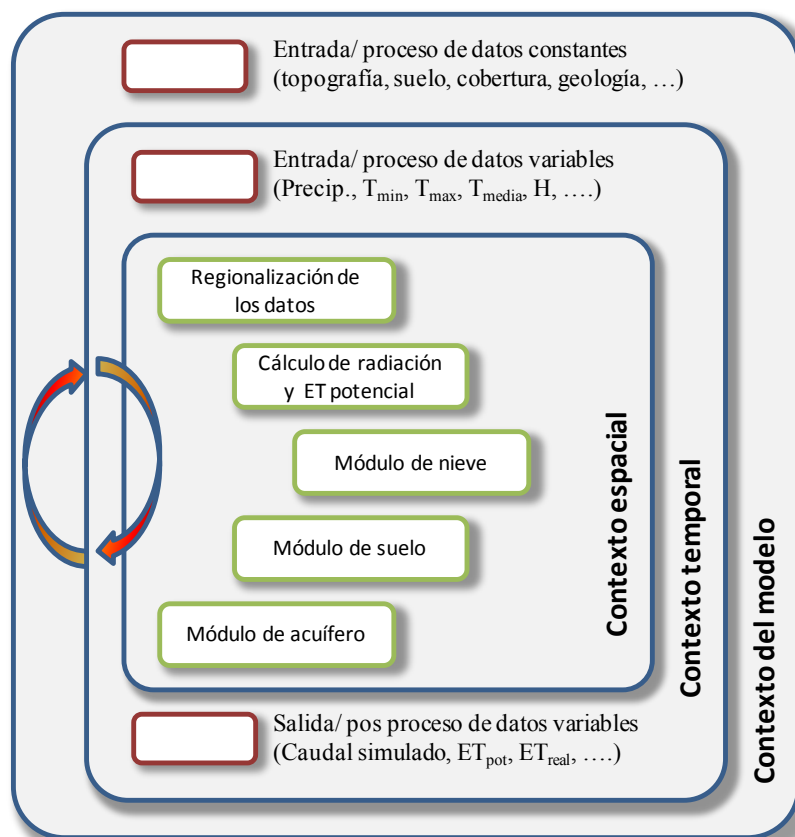
### *Implementación de JAMS (Jena Adaptable Modelling System)*

El sistema de modelación JAMS está siendo desarrollado por el Department of Geoinformatics, Hydrology and Modelling, School of Chemical and Earth Sciences, Friedrich-Schiller-University, Jena, Germany. Este paquete contiene a J2K (JAMS, 2012), que es un modelo distribuido y continuo que permite modelar años hidrológicos completos a distintas escala temporal.

La implementación del modelo requiere la preparación de un contexto sobre el cual realizar la modelación. Para esto se definen los parámetros de importancia hidrológica para los distintos suelos y tipos de vegetación. Los parámetros relacionados a los tipos de suelo están relacionados a su capacidad de almacenamiento de agua en una matriz porosa de distintos tamaños: grandes poros que no pueden sostener agua en contra de la gravedad y poros pequeños que conservan el agua y la hacen accesible a las plantas. Para la vegetación, los parámetros se basan en la interceptación de las precipitaciones y la evapotranspiración.

Dentro del contexto de modelación descrito anteriormente, que permanecen invariable durante toda la simulación, se ejecuta el contexto temporal. Dicho contexto es un ciclo, que en nuestro caso particular representa 1 día, constituyendo así un modelo continuo, diario. En la figura 2 puede observarse un esquema de la estructuración del modelo. Para cada día se leen las variables de entrada (climáticas) y se realiza la modelación en el contexto espacial (cuenca). La primera rutina dentro del contexto espacial es la regionalización de las variables, es decir, su distribución en los HRU que conforman la cuenca. De esta manera se obtienen las variables de respuesta para cada HRU, teniendo en cuenta el estado del mismo en el paso temporal anterior.

El periodo modelado incluye los años desde 1992 hasta fin de 2011. Se realizaron cálculos de la eficiencia del modelo analizando las diferencias entre caudales observados y simulados según distintos métodos descritos en Krause *et al.* (2005).



**Figura 2:** Estructura y anidamiento de los distintos contextos del modelo.

### *Simulación de escenarios y análisis estadístico.*

El modelo fue parametrizado y ajustado con los caudales registrados durante los años 1994 al 1997. Una vez lograda la máxima eficiencia, se simuló el periodo 1992 – 2011, que cuenta escasos mediciones de caudal, obteniéndose la simulación de control, utilizada más adelante para comprar los efectos de los escenarios creados.

Se generaron dos tipos de escenarios, con distintos objetivos, pero con una metodología similar que está basada en modificaciones de la lámina media de precipitaciones sin afectar patrón temporal de las lluvias reales.

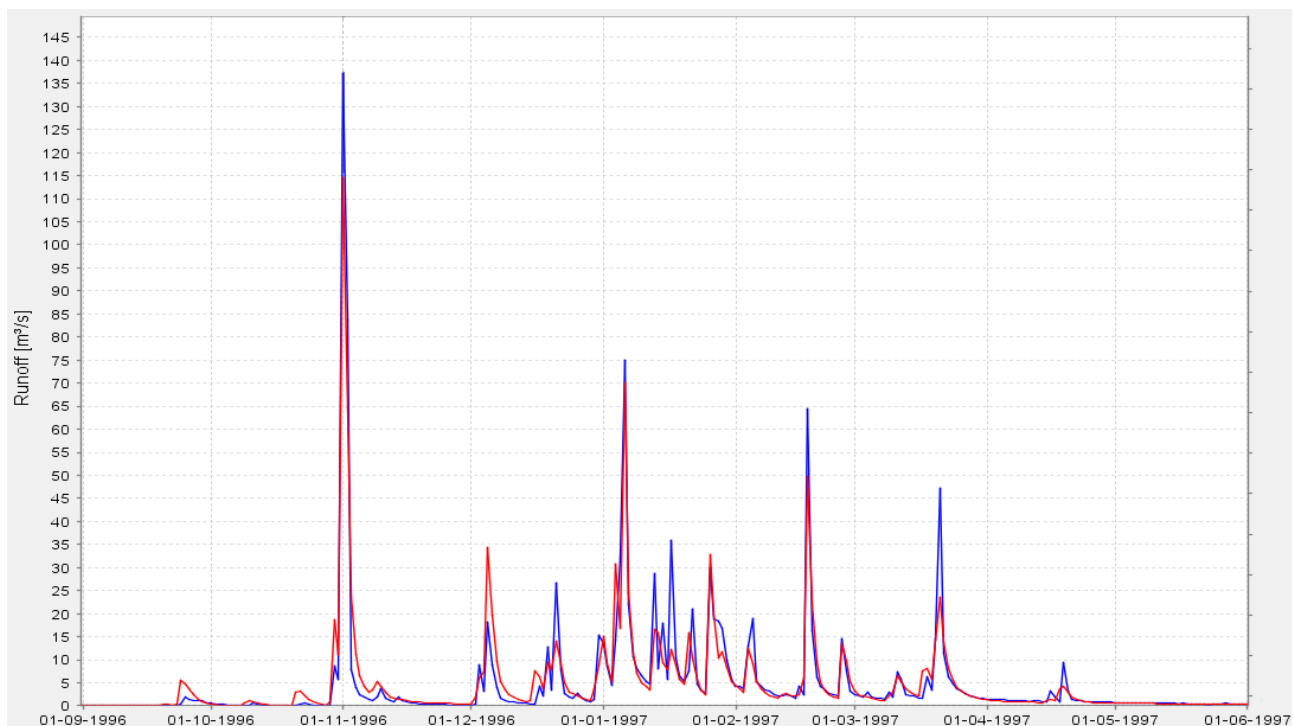
Escenarios anuales: su objetivo es determinar los efectos de periodos de sequías/excesos sobre los caudales de un año hidrológico particular. Para ello, se agregaron los datos en grupos de cuatro años hidrológicos, los tres primeros se utilizaron para que el modelo hidrológico entre en régimen, y las modificaciones se realizaron en los datos del cuarto año. A partir del 1° de Septiembre (inicio del año hidrológico) hasta el 30 de Noviembre del año siguiente, se escaló el valor de las lluvias a fin de que se vean disminuidas o aumentadas en un 10%, 20%, y 30% generando en total 6 escenarios por cada grupo de cuatro años. Se construyeron 19 grupos, lo cual produjo un total de 114 escenarios.

Escenarios de incidencia: su objetivo es cuantificar el efecto que los periodos de sequías/excesos tienen sobre los siguientes años hidrológicos. Para ello, se construyeron grupos de diez años, los primeros cinco se utilizaron para que el modelo entre en régimen, luego se realizó una variación desde el 1° de Septiembre del quinto año hasta el 30 de Agosto del año siguiente (año hidrológico afectado), dejando el resto de la serie con los valores originales. En este caso se escaló el valor de las lluvias a fin de que se vean disminuidas o aumentadas en un 10% y 30%, generando en total 4 escenarios por cada grupo de diez años. Se construyeron 10 grupos, lo cual produjo un total de 40 escenarios.

Los resultados obtenidos fueron sometidos a análisis estadísticos para la extracción de medidas de resumen, utilizando Infostat (Balzarini y Di Rienzo, 2004.)

## RESULTADOS

Los resultados de la simulación de control (simulación de mejor ajuste), pueden observarse en la Figura 3. El modelo presentó un ajuste preciso entre el caudal simulado y el aforado, según se observa en los valores de los criterios calculados: Nash-Sutcliffe = 0,91, Log\_Nash-Sutcliffe 0,85 y PBIAS = -1,3.



**Figura 3:** Caudales diarios simulados (Rojo) y medidos en el aforo de la estacion 600 (Azul).

El análisis histórico de la hidrografía no se pudo realizar con datos del aforo debido al alto grado de fragmentación de la serie. Sin embargo, otras series como precipitación y temperatura estan completas y permiten la modelación hidrológica de todo el periodo. Los caudales medios mensuales históricos obtenidos mediante la simulación de control para el período de 1992 a 2011 se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Caudales medios mensuales históricos (1992 a 2011, 19 Años)

Mes	Caudal m3/s
Septiembre	1.69
Octubre	3.55
Noviembre	7.24
Diciembre	9.07
Enero	8.67
Febrero	7.24
Marzo	8.84
Abril	4.86
Mayo	1.93
Junio	0.63
Julio	0.53
Agosto	0.44

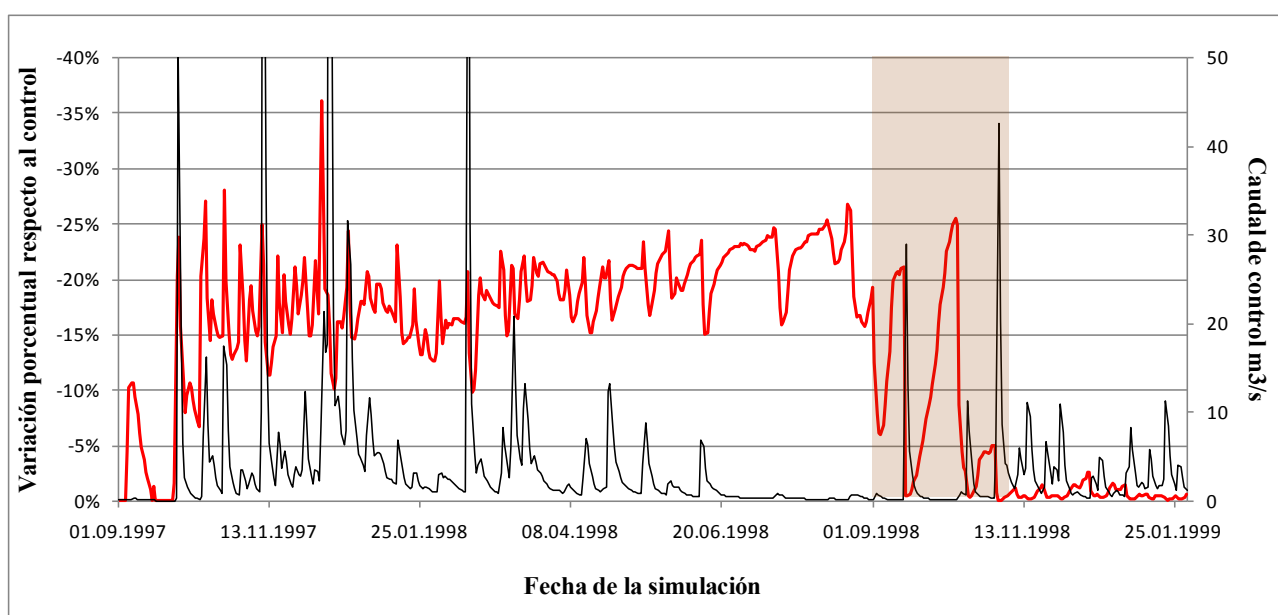
En la comparación entre la simulación de control y los distintos escenarios anuales, podemos observar que la variación de caudal con respecto a cambios en la precipitación no es lineal, pero si directa, con una leve diferencia entre la temporada seca y la temporada de lluvias (Tabla 2).

**Tabla 2:** Impacto de cambios anuales de la precipitación en los caudales de cuenca, respuesta promedio de los 19 años analizados.

Diferencia entre caudales observados y simulados	Magnitud del escenario anual					
	-30%	-20%	-10%	+10%	+20%	+30%
Variación de Q Temp. seca	49%	33%	20%	17%	35%	54%
Variación de Q Temp. lluvias	51%	34%	23%	22%	42%	67%

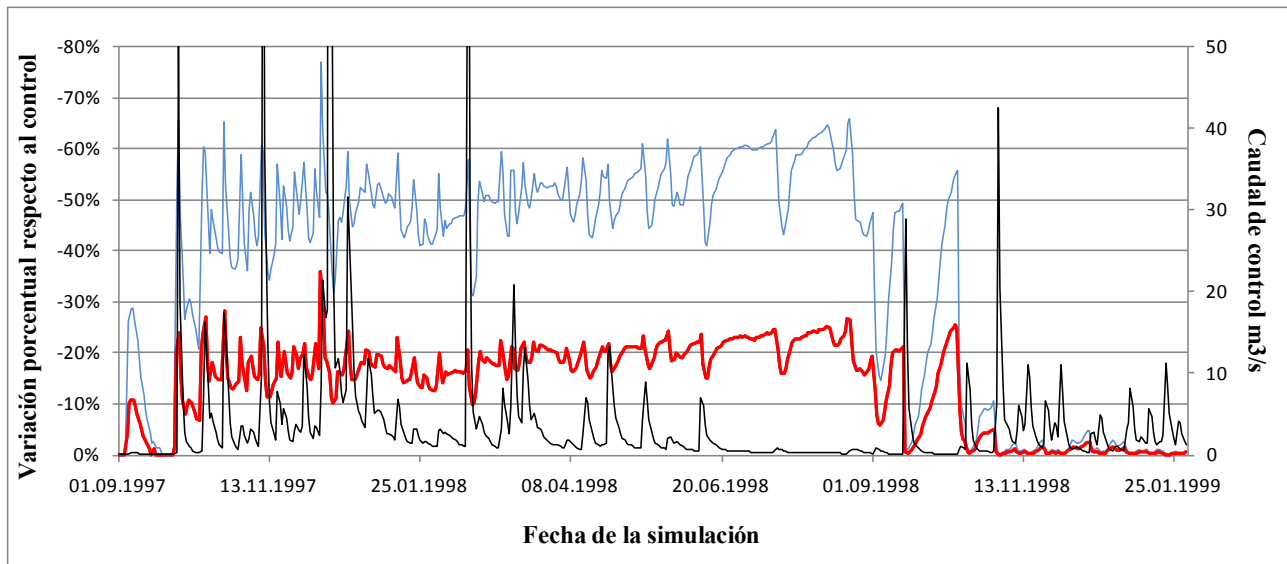
En la simulación de escenarios de incidencia, para valores de reducción de precipitación de un 10% se encontró un efecto sobre el año hidrológico siguiente al modificado (variaciones mayores al 5% con respecto al caudal de control) que se extendió en promedio hasta los 54 días y en ningún caso superó los 76 días, contando desde el fin de la intervención (30 de Agosto del año modificado). En cambio, si contamos a partir de la primera lluvia, inicio de la siguiente temporada de lluvia, estos efectos disminuyen hasta los 34 días en promedio y en ningún caso superan los 47 días (promedios de los 10 años analizados).

Analizando el patrón de variación en los caudales para el escenario de 10%, se puede observar que durante el año de la afectado el comportamiento es oscilatorio alrededor de la respuesta media hallada en los escenarios anuales (aprox. 22% para toda la temporada). En la Figura 4 se puede observar que el caudal de respuesta a un evento una vez finalizado el escenario de reducción de precipitación (01.09.1998) tiene una variación muy pequeña durante el pico. Sin embargo los periodos de recesión precedentes son afectados por la sequia inducida en el año anterior. Este es el comportamiento que se extiende para este caso graficado durante los 2 primeros meses del nuevo año hidrológico calendario y 43 días desde la primer lluvia (cuyo valor real no fue modificado).



**Figura 4:** Variación (Rojo, en porcentaje) entre el caudal de control (negro) y el caudal producto de una reducción del 10% de las precipitaciones para el año hidrológico 1997-1998. El área sombreada marca el periodo del año hidrológico 1998-1999 que es afectado por la sequía programada del año anterior.

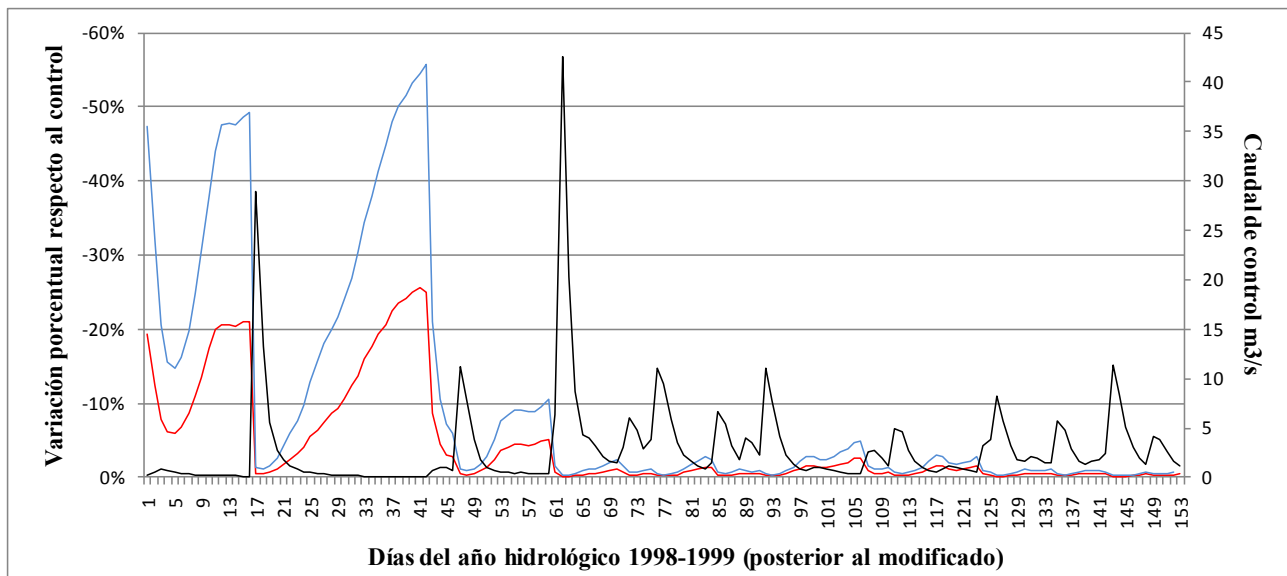
Para el escenario donde la precipitación se redujo un 30%, las variaciones (mayores al 5% con respecto al caudal de control) se extendieron en promedio hasta los 71 días y en ningún caso superan los 91 días, considerando esto desde el fin del año hidrológico modificado. Considerando la extensión de la variación a partir de la primera lluvia, vemos que en promedio se las detectan hasta los 51 días y en ningún caso superan los 85 días. El patrón observado para el escenario del año hidrológico 1997-1998 y su efecto en año posterior sigue el mismo comportamiento que el escenario del 10% pero con valores escalados (Figura 5).



**Figura 5:** Caudal de control (negro) variación del caudal producto de una reducción del 10% y un 30% de las lluvias (rojo, azul) para el año hidrológico 1997-1998.

Es importante notar que si bien en el escenario donde la disminución de lluvias fue del 30% los cambios originados son de mayor magnitud que en el de 10%, en ambos casos el efecto sobre el año hidrológico siguiente se extendieron hasta 60 días contando desde el comienzo y 43 días desde el primer evento. En la Figura 6 puede observarse como esta diferencia de magnitud es todavía importante en el periodo de recesión posterior al evento del día 17, pero luego del evento del día 47 ya reduce considerablemente el efecto del año anterior a pesar de la gran diferencia de magnitud en los escenarios planteados.





**Figura 6:** Caudal de control (negro) variación del caudal producto de una reducción del 10% y un 30% de las lluvias (rojo, azul) para el año hidrológico 1998-1999 posterior al año de la modificación.

Otros escenarios simulados fueron los de aumento de un 10% y 30% en las precipitaciones, en los cuales se encontró un efecto opuesto al de la disminución en el año de la modificación, pero un efecto similar para el año siguiente. Esto nos indica que tantos periodos más húmedos o secos de lo normal, tienen un mismo tiempo de impacto en los caudales del próximo año hidrológico.

## CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

El modelo hidrológico J2K ha demostrado un buen desempeño al alcanzar valores altos en los criterios de eficiencia. El uso de distintos índices para medir este grado de ajuste, que tienen sensibilidad diferencial a distintas porciones del hidrograma, nos permite realizar una mejor evaluación del desempeño a lo largo de todo el ciclo hidrológico (Krause *et al.*, 2005). Lamentablemente, no se han tenido datos confiables sobre caudales de los últimos años para evaluar que el desempeño se haya mantenido en los mismos valores durante los 19 años simulados. Este modelo fue lo suficientemente flexible y preciso para ejecutar los escenarios propuestos y generar una primera caracterización hidrológica de la cuenca. Esto nos permitió contar con caudales simulados a paso diario para el periodo 1992-2011.

Los escenarios anuales nos han permitido determinar el grado de afectación y sensibilidad de la cuenca a variaciones en la cantidad de agua precipitada durante un año hidrológico. Si bien solo se modificó la lluvia de manera escalonada, y no como en otros estudios, el patrón de distribución temporal de la lluvia (García *et al.*, 2011) se pueden apreciar las magnitudes y respuestas diferenciales en distintas regiones del hidrograma.

La conclusión más importante y relevante para el manejo, surge de asociar el escenario anual con lo encontrado en la simulación de incidencia. Las anomalías ya sean sequías y/o excesos hídricos no tienen ningún efecto sobre los estiajes de años hidrológicos posteriores al de su ocurrencia. Es así que incluso en casos extremos de variaciones del 30%, solo han perdurado efectos mínimos hasta un máximo de 90 días. Por lo cual, a la hora de proponer un plan de gestión del agua, se debe tener presente que el agua disponible durante el periodo de estiaje, solo depende de lo ocurrido en la temporada de lluvia de ese año hidrológico y que no existe efecto acumulativos con temporadas anteriores.

## REFERENCIAS

- Balzarini, M., y Di Rienzo, J., 2004. *Infostat, versión 2011*. Facultad de Ciencia Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Flügel, W-A., 1995, Delineating Hydrological Response Units (HRU's) by GIS analysis for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. - *Hydrological Processes*, 9, pp. 423-436.
- García, C.L., Krause, P., García, C.M., Ravelo, A.C., y Flügel, W-A., 2011. Water availability for a growing population in the face of climate and land use change. En: *Research Award for Young Scholars 2011-“Adaptative Water Management: looking to the future”*. da Rocha Sampaio, R.S., Monjardim Barbosa, M., Iglesias Peralta, A. Editores FGV Direito RIO, pp. 65-78, ISBN 978-85-63265-16-6.
- García, C.L., Zander, F., Kralisch, S., Ravelo, A.C., García, C.M., y Flügel, W-A., 2012. Importancia de los Sistemas de Información Integral para el manejo integrado de cuencas hidrológicas. *Trabajo presentado en este mismo evento, Primer encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, INA*. Buenos Aires, Argentina.
- JAMS, Jena Adaptable Modeling System. <http://www.geoinf.uni-jena.de/5231.0.html?&L=2>
- Kralisch, S., Zander, F., y Krause, P., 2009. Coupling the RBIS Environmental Information System and the JAMS Modelling Framework. *Proceedings of the 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation*. Cairns, Australia.
- Krause, P., Boyle, D.P., y Bäseler, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model. Assessment. *Advances in Geosciences*, 5, pp. 89–97.
- Schwartz, C., 2008. Deriving Hydrological Response Units (HRUs) using a Web Processing Service implementation based on GRASS GIS. *Proceedings of the workshop Geoinformatics FCE CTU 2008*. Prague, Czech Republic.