

Análisis hidrológico para el estudio hidrodinámico del río Salado aguas arriba del azud nivelador de Colonia Dora

Marcelo F. Miranda, Luis A. Olmos, María T. Pilan, Jesús A. Ibáñez, José M. Guzmán

Instituto de Recursos Hídricos, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

marcelomiranda88@gmail.com, laolmos@gmail.com, tpilan@unse.edu.ar,

RESUMEN: La zona del río Salado aguas arriba del azud de Colonia Dora presenta desbordes prácticamente para crecidas superiores a los 40 m³/s. Dentro de los requerimientos para abordar el análisis hidrodinámico del mismo, está el estudio hidrológico que permita definir diferentes escenarios de crecidas. Sin embargo, el análisis hidrológico del río Salado aguas arriba del azud nivelador de Colonia Dora es de suma complejidad ya que por un lado existe poca información histórica en la cuenca baja que atraviesa la provincia de Santiago del Estero y por otro lado el curso del río aguas arriba del embalse Figueroa, presenta una traza discontinua debido a la presencia de bañados y desvíos del mismo ante intervenciones antrópicas. En virtud de ello en este trabajo se pretende analizar los distintos aspectos que inciden sobre el proceso lluvia-escorrentía y el tránsito de los caudales máximos desde el embalse del Tunal hasta el cruce del río Salado en la localidad de Suncho Corral. Estos se encuentran ubicados aproximadamente a 600 Km y 90 Km aguas arriba de la zona de estudio respectivamente y este estudio servirá de base para la implementación del modelo hidrológico y el correspondiente hidrodinámico para evaluar y definir medidas de control de los desbordes.

1 CONSIDERACIONES ANTECEDENTES DE LA CUENCA DEL RÍO JURAMENTO – SALADO Y OBJETIVO DEL TRABAJO

El río Salado nace en el norte argentino y recorre varias provincias a lo largo de 1.500 km aproximadamente hasta desaguar entre las ciudades de Santa Fe y Santo Tomé en el sistema Paraná. La mayor parte del tramo medio (cuenca baja) discurre íntegramente en la provincia de Santiago del Estero con características de río de llanura, al entrar al territorio santiagueño recibe los aportes del Río Horcones de manera permanente y de manera temporal de los ríos Urueña y del canal de trasvase Jume Esquina desde el río Dulce.

El cauce del Salado se caracteriza por su tortuosidad y la presencia de albardones bien definidos. Los márgenes presentan cárcavas, zanjonés y canales que actúan como nexos entre el río y los numerosos bañados y meandros abandonados. Las planicies del tramo poseen abundante vegetación de diferentes alturas y densidad superficial, que para situaciones de desborde se convierten en elementos importantes para evaluar la distribución de caudales y el transporte de escalares en general. Es importante

considerar que esos cambios de la vegetación según la estación del año, inciden notablemente en la rugosidad superficial con la que se parametrizan las ecuaciones del escurrimiento medio (Bodoira et al., 2009).

La cuenca del Río Salado hasta la década del 60' contaba con una interesante cantidad de estaciones de aforos, que permitían conocer con cierto grado de confiabilidad los caudales escurridos en cada uno de los tramos de la cuenca y de esta manera poder determinar las pérdidas y/o aportes que pudieran generarse entre cada sección de control.

Desafortunadamente a partir de los años sesenta, mas específicamente en el año 1962, comenzaron a dejarse de operar algunas de las estaciones existentes, de manera tal que a la fecha no existe ninguna estación operando en la cuenca baja.

En efecto, si se observa la tabla siguiente se puede ver que los registros de datos tienen longitudes diferentes y que además no son coincidentes las fechas de implementación de cada una de las estaciones. (CFI, 2009)

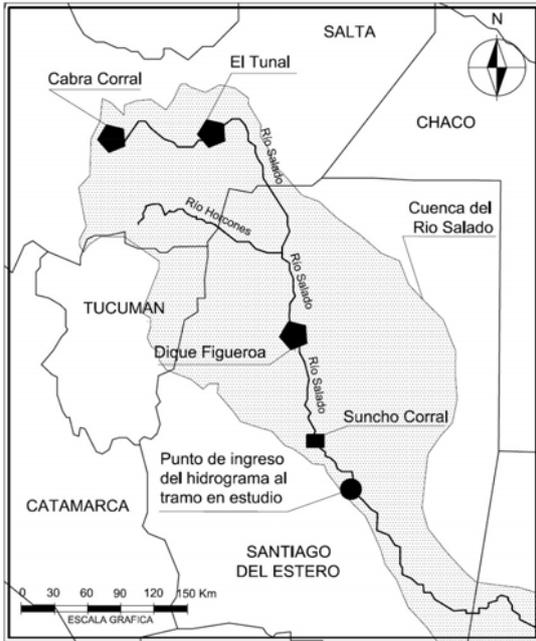


Figura 1.- Cuenca del Río Pasaje - Salado

Tabla 1.- Registros Hidrométricos Históricos

Río	Lugar	Período	Cuenca
Pasaje	Miraflores	1934-1995	Media
Pasaje	El Tunal	1941-1995	Media
Salado	El Arenal	1929-1985	Baja
Salado	Suncho Corral	1914-1962	Baja

De la tabla puede observarse que la estación de mayor interés para el estudio de referencia (Suncho Corral) fue levantada en la década del 60' con lo cual no solo no se dispone de datos actuales, sino que no pudo registrar un período húmedo que se dio entre 1980 y 2000.

Por otro lado, otro condicionamiento que tiene el análisis es que a partir del año 1974 se cierra la Presa General Belgrano (Cabra Corral) en la cuenca alta, posteriormente en el año 1990 se hace lo propio con la presa Martín de Guemes (El Tunal), ubicada en la cuenca media, ambas en la provincia de Salta y por último la reciente reconstrucción en 2010 de los embalses Figueroa y Néstor Kirchner en la cuenca baja en la provincia de Santiago del Estero.

Los dos embalses ubicados en Salta, produjeron una modificación del régimen natural de escurrimientos en la cuenca, ya que la capacidad de embalse de ambas presas (Cabra Corral: 3.130 Hm³ y El Tunal: 211 Hm³, superan ampliamente el derrame medio anual del sistema Pasaje-Juramento o Salado (1.306 Hm³), por lo que estas obras provocan la regulación hiperanual de los caudales generados en la cuenca. (Olmos, 2011)

En cuanto a los embalses de Figueroa y Kirchner (capacidad aproximada de 45 Hm³) cumplen una función de regulación estacional y una amortiguación de las crecidas. Con respecto a este último efecto, aguas arriba del embalse existe una zona importante de bañados en donde el río tiene una traza discontinua generándose un flujo mantiforme y bidimensional, con una atenuación del hidrograma de creciente.

En virtud de estos condicionantes, en este trabajo se lleva a cabo un análisis de la información disponible que permita realizar un estudio hidrológico ya sea mediante la implementación de un modelo o mediante procesos de correlación, según sea los resultados del mismo. A partir del mismo se podrá en estudios posteriores obtener caudales para diferentes recurrencia, de manera de evaluar el comportamiento hidrodinámico del tramo de interés, aguas arriba del azud nivelador de Colonia Dora.

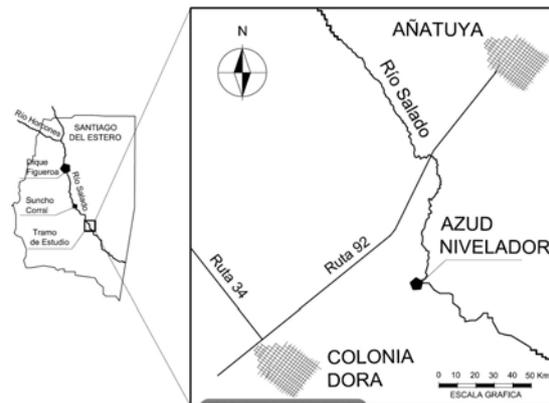


Figura 2.- Zona de Estudio

2 EVALUACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS REGISTRADOS

2.1 Análisis del Caudales Máximos en el Tunal

Como se dijo anteriormente la presa del Tunal se comienza a construir en el año 1990 y desde su habilitación en año 1992 el régimen del río Salado sufre aguas abajo una importante modificación en todo el rango de caudales. Lo que interesa desde el punto de vista del objetivo del trabajo son los caudales máximos y a los efectos se ha recopilado los caudales máximos medios diarios medidos en el Tunal para el período 1992-2013. Ver tabla 2.

Dicho caudales son los derivados desde el Tunal y son valores resultantes de una estimación basada en un balance a partir de las variaciones del nivel de aguas en el embalse y usando las

leyes hidráulicas de funcionamiento de las estructuras de descarga de la presa (descargador de fondo, válvulas, central hidroeléctrica y vertedero).

Tabla 2- Serie Histórica de QMD

Año	Caudal máximo medio diario
1992	115,23
1993	58,24
1994	56,33
1995	65,48
1996	57,75
1997	125,00
1998	84,17
1999	58,05
2000	282,69
2001	152,00
2002	59,84
2003	53,55
2004	54,44
2005	39,85
2006	117,11
2007	57,24
2008	244,55
2009	64,53
2010	192,77
2011	354,98
2012	152,43
2013	57,00

Esta serie de caudales fue proporcionada por la empresa AES Argentina Generación concesionaria de la operación y mantenimiento de dicha presa.

Para esta serie histórica (período 1992-2013) se realizó el análisis probabilístico mediante la aplicación de cuatro funciones teóricas de frecuencias que se consideraron apropiadas teniendo en cuenta las características climáticas de la región, cuyas expresiones se presentan a continuación (Olmos, 2006):

General de Valores Extremos (GEV)

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 - k\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)\right]^{1/k}\right\} \quad (1)$$

Log-Normal (LN3)

$$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_{\gamma}^x \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)} dx \quad (2)$$

Pearson III (P3)

$$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x \frac{1}{x} \left[\frac{\log(x)-\gamma}{\alpha}\right]^{\beta-1} e^{-\left\{\frac{\log(x)-\gamma}{\alpha}\right\}} dx \quad (3)$$

Log Pearson III (LP3)

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{\log(x-a) - \mu_y}{\sigma_y \sqrt{2}}\right] \quad (4)$$

Los parámetros de estas funciones analizadas fueron estimados en base a las metodologías que se indican en la tabla siguiente (Rao,2000):

Tabla 3.- Método de ajuste de parámetros

Nº	Distribución de Tres Parametros	Método de ajuste de parámetros
1	Gral de Val. Extremos GEV)	Momentos L (ML)
2	Log-Normal (LN3)	Máx. verosimilitud (MV)
3	Pearson III (P3)	Momentos (MC)
4	Log Pearson III (LP3)	Máx. verosimilitud (MV)

El resultado del ajuste de las funciones a los valores medidos se puede apreciar en la Figura 3.

De la observación de la figura se puede inferir como el efecto regulador de la presa genera prácticamente un comportamiento asintótico para caudales con recurrencia menor a 2 años, lo que se debe a que en esos años no se han producido crecidas importantes que no puedan ser controladas por el embalse.

Por otro lado se observa que para el rango de recurrencias de 3 a 25 años prácticamente todas las curvas tienden superponerse y la supremacía de alguna de ellas sobre la otra como mejor estimador resulta indistinguible.

Por otro último para recurrencias superiores a 25 años se puede apreciar, si se ajusta gráficamente la recta en color negro a partir de 3 años, que la función general de valores extremos (GEV) tiene un mejor comportamiento. Los resultados numéricos del ajuste se presentan en la Tabla 4.

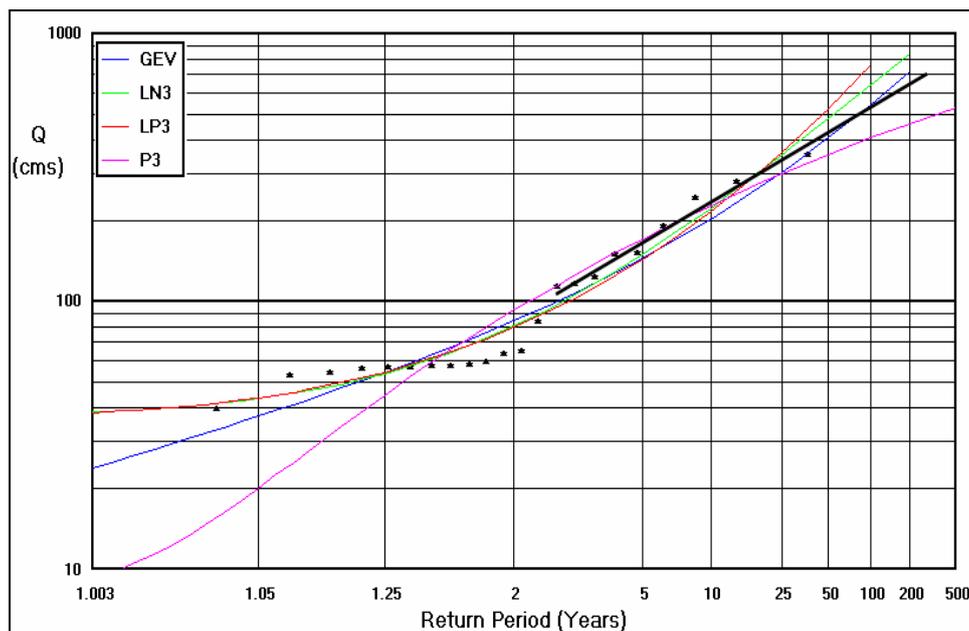


Figura 2.- Valores medidos y curvas de frecuencias para las 4 distribuciones de frecuencias (El Tunal)

Tabla 4.- Resultados del ajuste probabilístico

	Flows	Log of Flows	Hist	Wt. Flows
Mean	113,78	4,52		
St. Dev	85,45	0,63		
Skew	1,63	0,8		
RP	GEV	LN3	LP3	P3
2	84,3	80,5	79,73	92,36
5	144,25	149,82	143,66	170,55
10	201,48	222,48	215,17	226,01
20	274,76	316,48	317,48	280,38
25	302,7	351,92	359,13	297,8
50	406,35	480,18	524,66	351,59
100	541,89	639,54	763,53	405,36
200	719,56	835,07	1108,86	459,18
500	1042,26	1158,8	1813,53	530,41
Fit Method	L Moments	Max. Like	Max. Like	Moments
Location	69,98	3,78	3,63	113,78
Scale	36,33	1,13	0,46	85,45
Shape	-0,39	36,6	1,95	1,63

Como resultado de este análisis se obtiene que los eventos presentados durante 23 años de funcionamiento de la presa hasta la fecha no superan la recurrencia de 50 años, por lo que se considera apropiado trabajar como valor máximo con este evento a la hora de realizar los estudios hidrológicos hacia aguas abajo hasta la zona de estudio.

Por otro lado se ha editado en formato de tabla las crecientes del año 2010 y 2011 registradas en el Tunal de manera de poder tener los elementos necesarios para definir las características del tránsito en el tramo aguas abajo en el sitio de interés. Tabla 5.

2.2 Análisis de Caudales Máximos en el Horcones

La cuenca alta del río Rosario u Horcones está alimentada por una serie de subcuencas que cubren un área de importantes precipitaciones pluviales, las que se concentran fundamentalmente en los meses de verano. El gradiente pluviométrico es positivo, de Este a Oeste, hasta una altitud entre los 800 y 1000 msnm.

Las precipitaciones en la región son, en términos generales, de dos tipos: el primero y donde se producen los mayores registros es el orográfico, que tiene lugar en virtud de la influencia que induce la topografía en el movimiento de las masas de aire, que favorece las corrientes húmedas convectivas causantes de las precipitaciones homólogas. El segundo, es de tipo frontal, que se presentan como consecuencia del desplazamiento de las corrientes de aire provenientes del SO-SE del país, es decir de la vertiente Atlántica, las que en forma de frente frío avanzan hacia el Norte e interactúan con las masas más calientes y húmedas ubicadas en esta zona, en general inestables, provocando las precipitaciones.

La disponibilidad de datos de precipitación como de caudales es escasa en general y en particular en lo relativo a la distribución temporal y/o a la medición de valores instantáneos de las variables.

En consecuencia debe recurrirse al uso de la información disponible, principalmente de cuencas vecinas, y utilizar métodos y/o criterios asociados a este tipo de datos con el objeto de estimar los valores asociados a diferentes frecuencias. (CFI, 2002).

Las fuentes de datos disponibles en la región son las que se presentan en tabla 6.

Tabla 5.- Hidrogramas derivados desde el Tunal

2010		2011	
Día	QMD	Día	QMD
01-ene	68,15	28-ene	57,39
02-ene	93,69	29-ene	71,99
03-ene	186,26	30-ene	81,68
04-ene	183,45	31-ene	81,81
05-ene	185,86	01-feb	82,39
06-ene	184,47	02-feb	82,59
07-ene	192,77	03-feb	81,16
08-ene	182,77	04-feb	80,97
09-ene	186,03	05-feb	80,78
10-ene	170,03	06-feb	103,43
11-ene	144,95	07-feb	178,12
12-ene	91,22	08-feb	194,89
13-ene	91,01	09-feb	174,69
14-ene	50,95	10-feb	152,61
15/01 a 25/01	33,76	11-feb	121,49
26-ene	34,06	12-feb	94,16
27-ene	34,06	13-feb	121,75
28-ene	34,18	14-feb	142,39
29-ene	34,18	15-feb	137,28
30-ene	34,30	16-feb	144,71
31-ene	34,30	17-feb	148,27
01-feb	34,30	18-feb	141,60
02-feb	48,72	19-feb	141,85
03-feb	50,56	20-feb	138,63
04-feb	50,37	21-feb	91,10
05-feb	47,93	22-feb	93,47
06-feb	48,81	23-feb	110,48
07-feb	49,01	24-feb	137,58
08-feb	47,79	25-feb	150,59
09-feb	113,84	26-feb	137,08
10-feb	135,31	27-feb	112,26
11-feb	146,39	28-feb	112,71
12-feb	91,43	01-mar	111,52
13-feb	90,15	02-mar	111,49
14-feb	79,03	03-mar	112,49
15-feb	66,92	04-mar	117,47
16-feb	62,80	05-mar	141,36
17-feb	64,19	06-mar	211,37
18-feb	60,78	07-mar	241,67
19-feb	62,12	08-mar	260,71
20-feb	61,53	09-mar	287,71
21-feb	61,67	10-mar	340,29
22-feb	63,74	11-mar	345,97
23-feb	71,28	12-mar	352,09
24-feb	133,17	13-mar	354,98
25-feb	162,65	14-mar	304,84
26-feb	159,65	15-mar	239,43
27-feb	156,66	16-mar	228,94
28-feb	150,20	17-mar	205,83
01-mar	142,28	18-mar	198,71
02-mar	134,36	19-mar	198,61
03-mar	124,81	20-mar	158,16
04-mar	107,97	21-mar	83,94
05-mar	57,88	22-mar	57,18

Tabla 6.- Estaciones hidrométricas con datos

Cuenca	Río Horcones	Río Medina	Río Pasaje (Juramento)
Área de aporte	1700 Km ²	1.650 Km ²	38.000 Km ²
Lugar	Toma de Ovando	Desemb. al R. Pasaje	El Tunal
Latitud	25°48' S	25°20' S	25°14' S
Longitud	65° 04' W	64° 30' W	64° 28' W
Altitud	855 mns	470 mns	425 mns
Registro	1942-1967	1942-1986	1942-1995

El análisis de correlación y generación sintética de caudales entre la cuenca del Río Medina medido en la desembocadura al río Pasaje o Juramento aguas arriba del cierre actual del Tunal y el río Horcones en la toma de Ovando fue el que dio un mejor resultado. En consecuencia, a partir del mismo se arriba a los siguientes caudales máximos medios diarios.

Tabla 7.- Resultados del ajuste probabilístico de caudales máximos diarios para el R. Horcones

Periodo de Retorno [TR]	Función de Probabilidad de Gumbel
500	248,99
200	218,41
100	195,24
50	171,98
20	140,94
10	116,96
5	91,96

2.3 Análisis de Caudales Máximos en Suncho Corral

Tal cual se presentó en la tabla 1 la estación hidrométrica de Suncho Corral fue levantada en el año 1962 y por otro lado el dique Figueroa queda fuera de operación en los primeros años de la década del 70', por lo se generó una situación de déficit total de registros hidrométricos en la cuenca baja del río Salado sobre el territorio de Santiago del Estero.

Esta situación comenzó a modificarse a partir de la reconstrucción de dicho dique (presa), el cual fue inaugurado en Abril de 2011, pero esta operando desde fines de 2010.

La Presa de Figueroa (denominado ahora Néstor Kirchner) es una presa cuyo destino principal es regular los caudales estacionales para abastecer el sistema de riego del río Salado de aproximadamente 30.000 has.

En efecto desde que está en operación se registraron dos crecientes importantes las que fueron registradas aguas abajo de la presa en la

localidad de Suncho Corral ubicada aproximadamente a 100 Km aguas del cierre de de la misma. Esta escala hidrométrica fue colocada por Administración Provincial de Recursos Hídricos y dichos registros representan una información muy importante ya que está representando la situación actual de la cuenca aguas arriba de dicho sitio de medición.

Los datos de las dos crecientes se han superpuesto en un mismo gráfico en donde se aprecia el comportamiento de los caudales máximos instantáneos resultantes de la lectura del tirante para las 7, 12 y 19 hs, lo cual puede

observarse en la Figura 3. De la misma se puede observar que el evento del 2011 es de mayor magnitud en lo que se refiere a caudal pico y volumen, pero ya se aprecia el efecto laminador del embalse al producir una salida con menos fluctuación de picos. Es importante observar que la duración de los caudales por encima de los 40 m³/s para los dos eventos fue superior a los dos meses lo que indica que los volúmenes factible de desbordes son muy importantes del orden de 465 Hm³ (2010) y 653 Hm³ (2011).

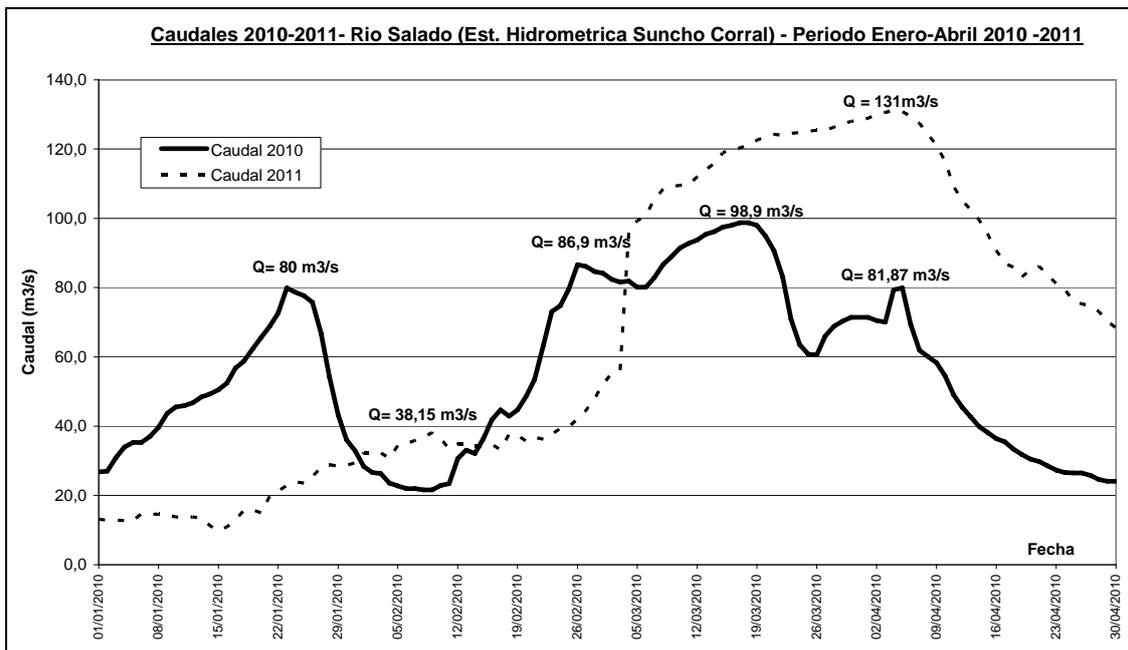


Figura 3.- Comportamiento de las crecientes en la estación hidrométrica de Suncho Corral

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En virtud de la información recopilada y procesada se pueden realizar los siguientes análisis y conclusiones en vista del objetivo previsto para el presente trabajo.

Si se tiene en cuenta los caudales máximos medios diarios del Tunal (Tabla 5) para 2010 de 192,77 m³/s y 2011 de 354,98 m³/s (difieren muy poco de los instantáneos) y se los compara con los mismos eventos de crecientes registrados en Suncho Corral de 98,9 y 131 m³/s, se presentan atenuaciones del orden del 49% y 63% respectivamente.

En función de la duración de los eventos, las posibles causas de atenuación de picos podrían en principio estar relacionadas con procesos de infiltración a través del lecho fluvial, evaporación desde la superficie libre del flujo y

almacenamiento temporal en cauce y planicie (tanto prismático como en cuña).

Para analizar la infiltración, debe tenerse en cuenta que la mayor parte de las crecidas importantes se presenta en el período de Enero a Abril. Habitualmente en esta época la cuenca se encuentra con una condición de humedad antecedente importante y el nivel de las napas en la vecindad de los cauces lo suficientemente altas como para asumir que los gradientes hidráulicos para favorecer la infiltración son mínimos, a lo que hay que agregarle que el suelo característico del lecho es un limo con algo de arenas finas. Si bien la distancia del tramo analizado es importante, se puede despreciar este efecto ya que no se comete un error de importancia. (IRHi-UNSE, 2007)

Por otro lado, también puede despreciarse el efecto de la evaporación durante los episodios

de crecidas de magnitud, ya que en esencia sus valores debido a las condiciones climáticas son de unos pocos milímetros siendo de tres órdenes de magnitud inferior al tirante de creciente.

El factor que tiene un efecto significativo en la atenuación es el almacenamiento temporal en cauce y planicie. De hecho la presencia de una zona de bañados aguas arriba de la presa de Figueroa, la presencia de la dicha presa, la fluctuación del ancho de cauce principal y por ende de su capacidad de conducción, hacen que este factor explique el comportamiento del tránsito de las crecientes.

Para la creciente del 2010 del Tunal el tiempo de manifestación del pico en Suncho Corral varía entre 16 días (primer pico) y 20 días (último y máximo pico) lo que indica claramente el proceso de detención por desborde y bañados dando velocidades de viaje del orden de 0,36 y 0,30 m/s, según sea el pico considerado. Para el 2011 el tiempo de viaje de la onda fue de (13/03 al 4/04) de 22 días, lo que puede estar asociado a la magnitud del evento (mayor al 2010) y del funcionamiento de la presa de Figueroa.

En cuanto al tiempo base para el 2010 la diferencia fue de 23 días, con 56 días en Suncho Corral y 23 días en el Tunal y para el 2011 de 30 días llegando el tiempo base a 84 días en Suncho Corral y 54 días en el Tunal.

En cuanto a los caudales instantáneos, tanto en el Tunal como en Suncho Corral, el hecho de tener una regulación aguas arriba del punto de medición hace que la diferencia de estos con los máximos medios diarios sea despreciable, por lo que trabajar con estos genera escenarios totalmente confiables.

4 REFERENCIAS

Bodoira, F., Graciani, S. y Trento, A. "Elaboración de cartas temáticas de la rugosidad superficial en planicies de inundación. Cuenca inferior del río Salado (Santa Fe)", Cuarto Congreso de la Ciencia Cartográfica, Bs. Aires, Argentina, Asociación Centro Argentino de Cartografía, 2008.

Consejo Federal de Inversiones (CFI). "Estudios Básicos del Río Horcones". Santiago del Estero, 2002.

Consejo Federal de Inversiones (CFI). "Estudio de Prefactibilidad de Provisión de Agua desde el Río Salado para Uso Doméstico y Consumo

Ganadero en el Depto. Juan F. Ibarra". Santiago del Estero, 2009.

IRHi-UNSE. "Estudios Hidráulicos y Fluviales del Río Dulce para Determinación de Línea de Ribera e Impactos de Obras". Consejo Federal de Inversiones. Contrato N°7808001. Pcia. de Sgo. del Estero, 2007.

Olmos L., Borsellino M. & M. Mattar. "Estudio de las Lluvias Máximas Diarias de la Pcia. de Jujuy". XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana, Venezuela, 2006.

Olmos L., Reuter F., Pilan M., Farías H., Acosta C., Miranda M. "Estudio Batimétrico de un Embalse de Montaña de Morfología Compleja. Cabra Corral, Salta." 5° Simposio Regional de Hidráulica de Ríos. Santiago del Estero, Argentina, 2011.