



HIDRÁULICA FLUVIAL: PROCESOS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN, OBRAS DE CONTROL Y GESTIÓN DE RÍOS
Hector Daniel Farias, José Daniel Brea, Carlos Marcelo García (Editores)

Memorias del Quinto Simposio Regional sobre HIDRÁULICA DE RÍOS
Santiago del Estero, Argentina. 2-4 Noviembre de 2011
ISBN 978-987-1780-05-1 (Libro + CD-ROM)

AVANCES EN LA HIDRÁULICA Y SEDIMENTOLOGÍA DE PUENTES: EL CASO DEL PUENTE SOBRE EL RÍO SANTA LUCIA (URUGUAY)

Guillermo López, Christian Chreties y Nicolás Failache

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay
Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. +598 2 711 33 86 (217)
E-mail glopez@fing.edu.uy; chreties@fing.edu.uy; nicofail@gmail.com

RESUMEN

En este artículo se presentan avances metodológicos en el diseño hidráulico y sedimentológico en el diseño de un puente y los resultados que surgen de un caso de estudio. La herramienta fundamental para determinar los distintos parámetros hidráulicos y fluviales utilizados en el diseño del puente es el desarrollado de un modelo hidrológico y un modelo hidrodinámico no estacionario del flujo a lo largo de un tramo de río (47 km de longitud) que incluye la zona de emplazamiento del nuevo puente proyectado. Entre los criterios de diseño se encuentran los resultados de profundidad de erosión por contracción y local en la sección del puente. El estudio de la socavación local se efectuó siguiendo la metodología clásica (HEC 18). A su vez se agregaron otras metodologías de cálculo de socavación local para tener más elementos que permitan interpretar los resultados. Entre las conclusiones se destaca que para el cálculo de la erosión local en las pilas es relevante la diferencia de considerar métodos de estimación de la evolución temporal bajo condiciones estacionarias y no estacionarias respecto a considerar la profundidad de erosión máxima final, obteniendo resultados acordes a la realidad de cuencas donde las variaciones temporales son relevantes.

ABSTRACT

In this paper, an integrated (hydraulic and sedimentologic) methodology approach in the bridge design and a study case are presented. The study is based on the development of a hydrological and hydrodynamic model of the river stream (47 km long) where the bridge is placed. The contractions and local scour are estimated and included in the bridge design criteria. The local scour estimation is based on the usual methodology proposed by HEC 18. However, other methodologies to estimates the local scour depth evolutions are included. In the conclusion is remarked that in local scour bridge foundation studies is important to consider mythologies of local scour depth evolution under steady an unsteady flow conditions in additions to estimation of maximum scour depth, particularly in cases where the basin conditions implies significant variations in time of hydraulic parameters.

INTRODUCCIÓN

La Ruta 11 forma parte de un importante corredor vial vertebral del Eje de Integración y Desarrollo MERCOSUR-Chile que en Uruguay lo integran las Rutas 1, 11, 8, 17, 18 y 26. En la órbita nacional la Ruta 11 es una carretera que sirve al tránsito transversal permitiendo la conectividad Oeste–Este, pero a su vez en lo referente al tránsito internacional permite la conexión de Argentina con Brasil mediante el denominado corredor Río Branco-Colonia-Fray Bentos. La actual ruta atraviesa la ciudad de Santa Lucía y cruza el río del mismo nombre mediante un puente proyectado como sumergible, del año 1955, con una estructura angosta y dimensionada para un tren de cargas inferior al actual. A esta problemática se le suma que estos tramos de accesos al río Santa Lucía incluyen dos cruces sobre la vía férrea, uno de los cuales es sumergible ante las crecidas de un afluente a dicho río.

Desde 1974 se encuentra planteada una variante de trazado a la Ruta 11 en las proximidades de la ciudad de Santa Lucía (proyecto de la consultora W. Hill y Asociados) que en 1986 fue actualizada por la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (en adelante DNV-MTOP) agregando un pasaje a desnivel sobre la vía férrea. Este nuevo trazado se sitúa al Norte de la ciudad de Santa Lucía incluyendo un puente sobre el río Santa Lucía de aproximadamente 750 m.

El presente artículo presenta la metodología y resultados obtenidos en el estudio hidrológico, hidráulico y sedimentológico del nuevo puente proyectado sobre el río Santa Lucía en la variante de trazado de la Ruta 11 en las proximidades de la ciudad de Santa Lucía. Como parte del estudio se pretendía confirmar el emplazamiento, esviaje y longitud del nuevo puente de la Ruta 11 sobre el Río Santa Lucía.

METODOLOGÍA

Como herramienta básica se han desarrollado un modelo hidrológico y un modelo hidrodinámico no estacionario del flujo a lo largo de un tramo de río de 47 km. que incluye la zona de emplazamiento del nuevo puente proyectado. Estos modelos han sido la herramienta fundamental para determinar los distintos parámetros hidráulicos y fluviales utilizados en el diseño del puente.

El esquema general de cuencas de aporte a los trechos de río modelados fue determinado utilizando el modelo numérico de terreno global SRTM con una resolución aproximada de 80 metros. En la Figura 1 se presenta dicho esquema y en la Tabla 1 se presentan los valores de área determinados para cada cuenca.

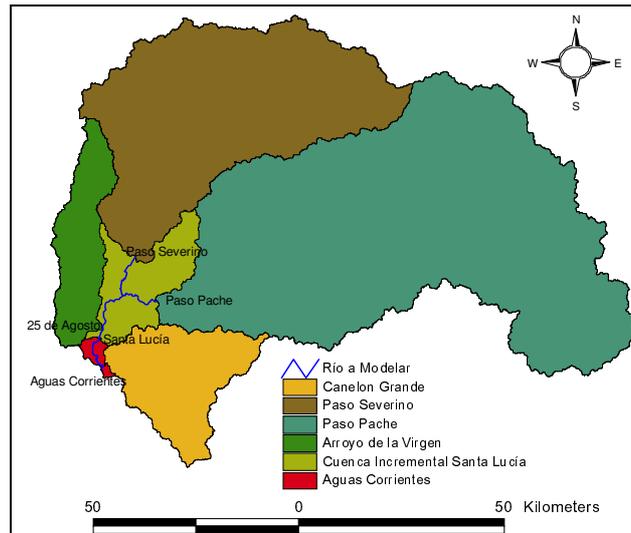


Figura 1.- Esquema de cuencas de aporte.

Tabla 1.- Área de las cuencas de aporte

Categoría	Área (km ²)
Paso Pache, Río Santa Lucía en Ruta 5	4919
Paso Severino, Río Santa Lucía Chico	2485
Arroyo de la Virgen	514
Cuenca incremental Santa Lucía	445
Arroyo Canelón Grande	724

Para la implementación de los modelos fueron recopilados datos hidrométricos de 6 estaciones existentes en los tramos modelados. Además, se realizó un relevamiento planialtimétrico de 13 secciones transversales en los ríos Santa Lucía, Santa Lucía Chico y arroyo de la Virgen para describir la topografía de los cauces en el modelo hidrodinámico y se realizaron cateos de suelo en el sitio del emplazamiento proyectado del nuevo puente de Ruta 11 para caracterizar la granulometría del material de fondo y planicie del río. En función de dicha clasificación granulométrica, y utilizando los resultados del modelo hidrodinámico, se realizó el estudio de la erosión por contracción en el cauce y socavación local de pilas y estribos para el puente proyectado.

Los caudales picos del hidrograma asociados a los distintos periodos de retorno se obtuvieron en base a un análisis estadísticos de los caudales máximos diarios anuales en la estación 133.0 en el puente actual de Ruta 11 sobre el Santa Lucía. El análisis estadístico se realizó en base al ajuste de la distribución de frecuencias de eventos extremos GEV (Generalized Extreme Values, Coles 2001) mediante el método de máxima verosimilitud. Para determinar la forma del hidrograma de diseño, asociado a determinado período de retorno en la zona donde se implantará el puente en cuestión, fueron analizados los hidrogramas de crecidas observados en la estación 133.0.

Para el modelo hidrodinámico no estacionario se utilizó el software libre HEC-RAS 3.1.3 del U.S. Army Corps of Engineering. Este software resuelve de las ecuaciones de flujo a superficie libre no estacionario unidireccional (Ecuaciones de Saint-Venant), mediante un esquema numérico de diferencias finitas.

Una vez implementado, calibrado y verificado el modelo hidrodinámico se analizaron las consecuencias hidráulicas de distintas alternativas de longitud de puente para diferentes

escenarios de crecidas. Los criterios de diseño se basan en: 1) el análisis de las afectaciones en los niveles de agua y consecuentemente en las áreas inundadas de la obra sobre las localidades aledañas, en particular sobre la localidad de 25 de Agosto; 2) el comportamiento de las velocidades del agua en el curso, y dentro del puente y 3) los resultados de erosión por contracción y local en la sección del puente. Complementariamente se presentan recomendaciones para la protección de la estructura frente a los efectos de erosión local en pilas y estribos del puente. En resumen, el criterio de diseño es evaluar para distintos eventos de crecida las distintas alternativas de puentes (longitud, esviaje y altura) comparando los distintos parámetros hidráulicos y fluviales.

Los cálculos de socavación tienen dos propósitos fundamentales: (1) incorporar a la profundidad de erosión por contracción como variable en la determinación del emplazamiento, esviaje y longitud del nuevo puente proyectado sobre el río Santa Lucía en la variante de trazado de la Ruta 11; (2) cuantificar el efecto de la socavación local y estudiar medidas preventivas frente a este fenómeno. Para el abordaje del primer propósito corresponde cuantificar la profundidad de erosión por contracción debido a que es esta componente de la erosión la que resulta más sensible a las distintas alternativas de puentes. En el segundo, es importante cuantificar la profundidad de erosión local tanto en los estribos como en las pilas del puente y eventualmente diseñar elementos de mitigación de la erosión local.

El estudio de la socavación y de las medidas contra la socavación local se efectuó siguiendo la metodología propuesta en el manual HEC 18. A su vez se agregaron otras metodologías de cálculo de socavación local para tener más elementos que permitan interpretar los resultados.

En función de que los hidrogramas de crecidas tiene un tiempo base limitado, se ajustó la estimación de la profundidad de la erosión local en pilas con dos metodologías de evolución temporal de profundidad de erosión local. En primer lugar se consideró la profundidad de erosión local que surge de la metodología de la evolución temporal bajo condiciones estacionarias propuesta por Oliveto y Hager (2002) durante un tiempo igual al tiempo pico del hidrograma. En segundo lugar, se consideró la profundidad de la erosión local que surge de la evolución temporal bajo hidrogramas escalonados propuesta por López et al (2006) y López et al (2010).

A partir del análisis de las tres metodologías de estimación de erosión local se realizan las recomendaciones en cuanto al diseño de la fundación del puente.

RESULTADOS

Modelación hidrológica y estadística

Los resultados del ajuste de la distribución de frecuencias de eventos extremos GEV para la serie de caudales máximos diarios anuales en la estación del puente actual de Ruta 11 sobre el río Santa Lucía se presentan en la Figura 2.

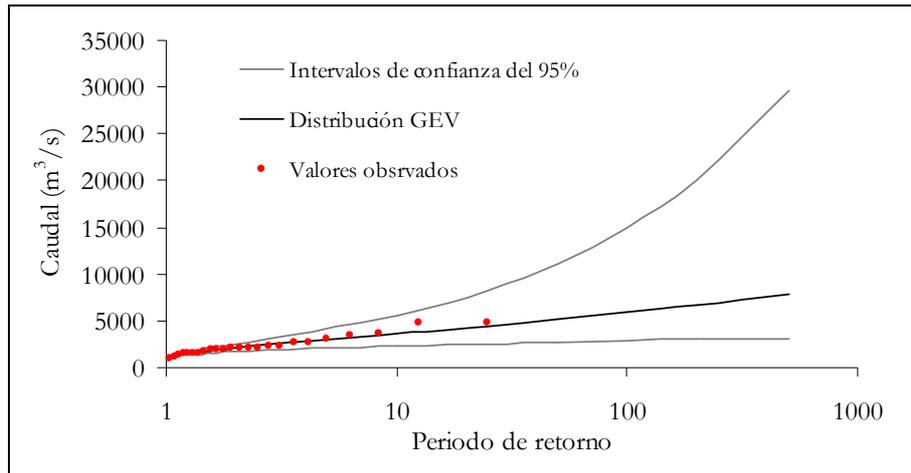


Figura 2.- Ajuste estadístico de los caudales máximos en la estación Ruta 11 código 133.0 de DINAGUA

La amplitud del intervalo de confianza de los caudales para períodos de retorno altos se debe, en gran medida, a que éstos son determinados a partir de solo 24 años de datos. Este error fue cuantificado con series de datos hidrométricos de mayor extensión donde se verificó que los caudales de este análisis son algo conservadores.

Los hidrogramas adimensionalizados por su caudal pico, centrados y graficados para observar las características principales de los eventos extremos, se presentan en la Figura 3, donde se puede observar la similitud entre los parámetros: tiempo base, tiempo al pico, pendiente de las ramas ascendentes y descendentes. A partir de este resultado se optó por tomar como hidrograma de diseño adimensional el de abril de 1990, individualizado en rojo en la Figura 3, ya que se considera como el que presenta el comportamiento promedio de todos los hidrogramas.

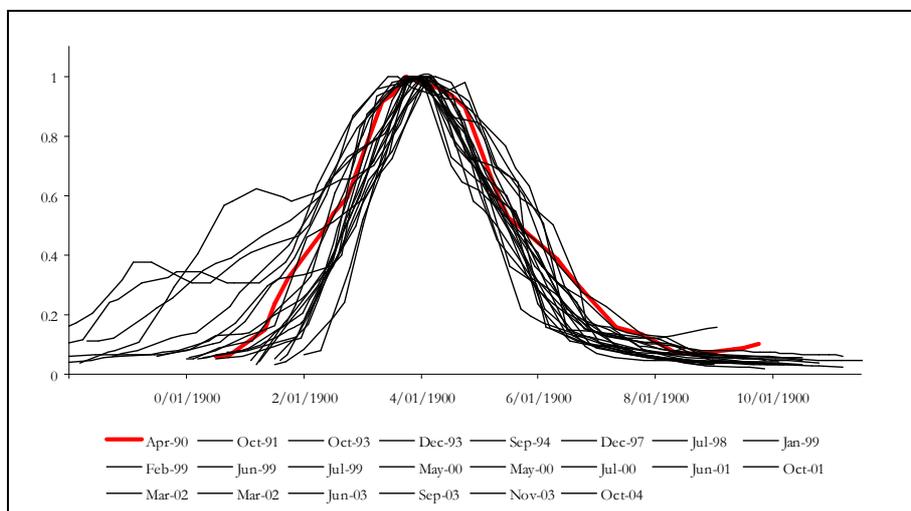


Figura 3.- Hidrogramas de crecidas, adimensionalizados por su caudal máximo, identificados en la estación 133.0

De esta manera, para obtener el hidrograma de diseño de cada período de retorno se multiplicó este hidrograma por el valor de caudal correspondiente. Los resultados se presentan en la Figura 4.

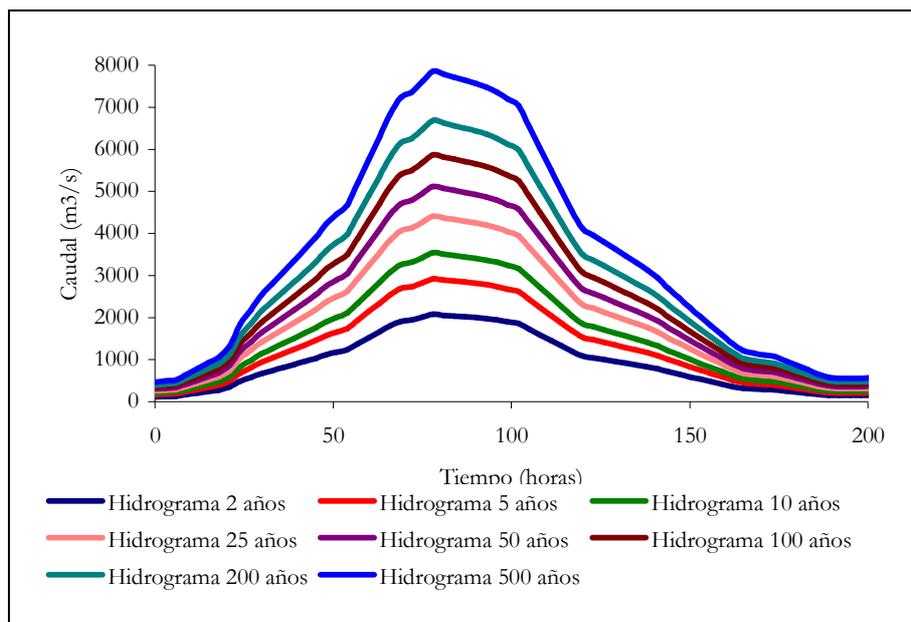


Figura 4.- Hidrogramas de diseño para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años

Modelación hidrodinámica

Una vez definida la geometría del modelo y establecidas sus condiciones de borde se calibró y verificó el mismo. Los parámetros del modelo hidrodinámico, a calibrar, son los coeficientes de rugosidad (número de Manning) del lecho y planicie de inundación en cada una de las secciones transversales incorporadas en el modelo.

Teniendo en cuenta que se busca emplear el modelo para eventos de crecida del río Santa Lucía, la calibración de los parámetros se realiza para esas condiciones.

En este sentido, a partir de los registros históricos recopilados y del periodo común de datos (1998 – 2005) en todas las estaciones hidrométricas, se seleccionó un conjunto de 4 eventos extremos (eventos de calibración). En la Tabla 2 se presentan los eventos y los resultados de calibración.

Tabla 2.- Resultados de la calibración del modelo

Evento identificado y duración (días)	Fecha	Números de Manning		Cota máxima (m)		Cota máxima con número de Manning de 0.11 en la planicie
		cauce	planicie	calculada	observada	
1 (40 d)	dic02_ene03	0.04	0.110	8.98	8.97	8.98
2 (60 d)	set04_nov04	0.04	0.090	9.83	9.82	9.96
3 (60 d)	jun98_ago98	0.04	0.170	10.00	10.01	9.74
4 (40 d)	mar02_abr02	0.04	0.115	11.62	11.62	11.55

Los coeficientes de rugosidad adoptados en la calibración son:

- Para el cauce, $n_{cauce} = 0.04$.
- Para la planicie de inundación, $n_{planicie} = 0.11$.

En la Figura 5, se presenta la comparación de niveles de agua medidos y calculados en la etapa de calibración para el evento 1.

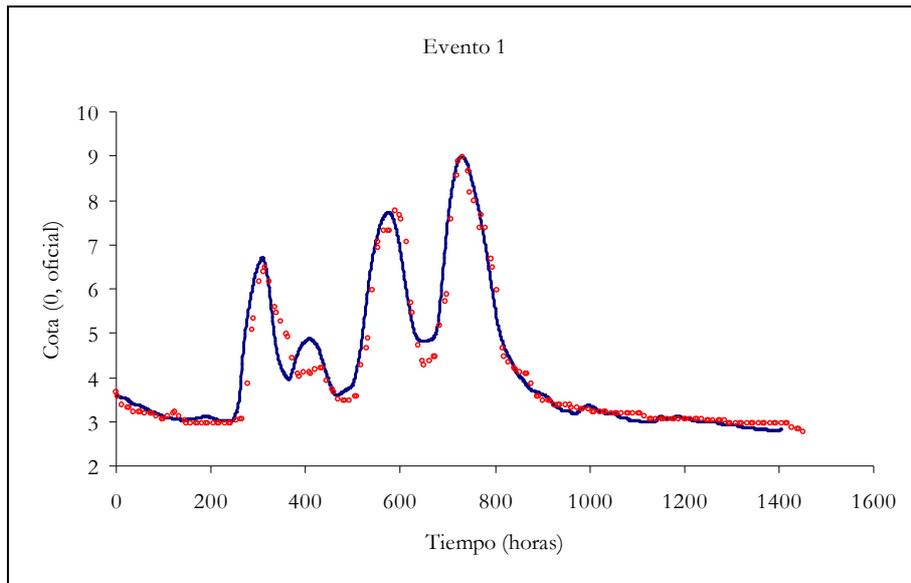


Figura 5.- Resultados de la calibración en el evento 1

A los efectos de verificar el adecuado funcionamiento del modelo, se incluye una última etapa en la modelación en la cual se analiza la bondad de la calibración alcanzada para un conjunto de eventos no incluidos en la etapa de calibración. En la Tabla 3 se presentan los dos eventos utilizados para la validación del modelo y los resultados obtenidos.

Tabla 3.- Resultados de la validación del modelo

Evento identificado y duración (días)	Fecha	Cota máxima calculada (m)	Cota máxima observada (m)
5 (60 d)	abr02 set02	9.18	9.12
6 (120 d)	jun99 set99	10.27	10.77

En las Figura 6, se observa una comparación de la serie de niveles observados y simulados para el evento de verificación 5.

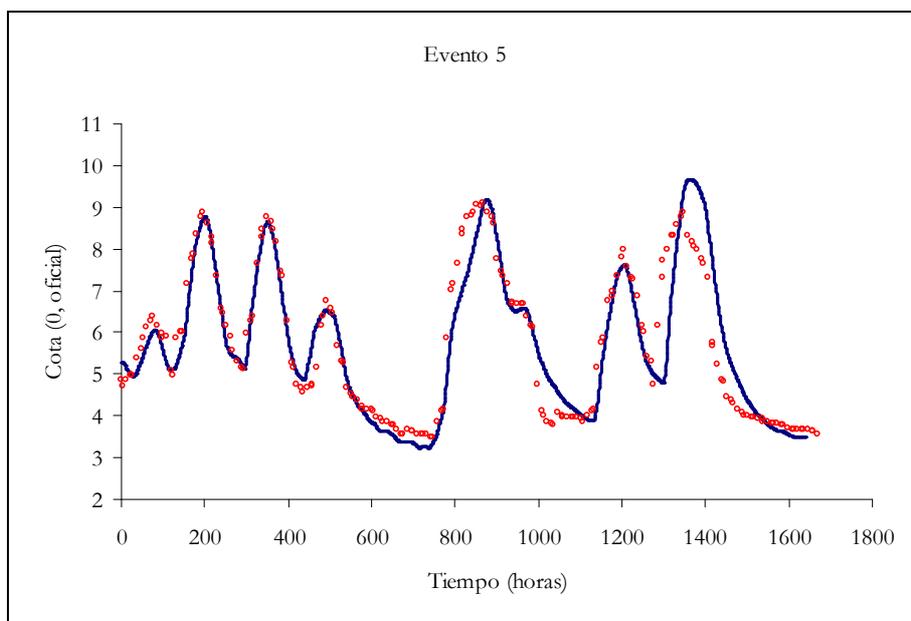


Figura 5.- Comparación de los resultados de la validación con los datos observados en el Evento 5

La diferencia entre los niveles de agua calculados con el modelo y los observados para los

eventos considerados en la validación del modelo se consideran admisibles en función de la cantidad y calidad de la información disponible y utilizada. Se debe considerar además la escasa relevancia de esta diferencia en comparación con los valores absolutos de las variables hidrodinámicas a observar. Por tanto el modelo es validado.

Diseño hidráulico del puente: evaluación de distintas alternativas

Una vez implementado, calibrado y validado el modelo hidrodinámico y a partir de los distintos escenarios hidrológicos de diseño considerados se analizaron las consecuencias e implicancias hidráulicas que provoca la implantación del puente a proyectar.

La longitud del puente se diseña tomando en cuenta el comportamiento frente a las distintas longitudes analizadas, para el hidrograma de 100 años de período de retorno, de los parámetros hidráulicos y fluviales. Se verificó también el comportamiento de estos parámetros hidráulicos y fluviales con eventos de crecidas más severos de 200 y 500 años de período de retorno, y menos severos de 2, 5, 10, 25 y 50 años de período de retorno. Las distintas longitudes de puentes analizadas fueron: 400, 500, 600 y 750 metros, estas fueron ubicadas dentro de la misma sección transversal de tal manera que proporcionen la mayor área de drenaje y por tanto la mayor eficiencia hidráulica de descarga.

Con el objetivo de comparar los eventos de diseño considerados se presentan en las Tablas 4, 5 y 6 los resultados de niveles máximos en el puente existente sobre Ruta 11 para las condiciones de diseño (Tr=100, 200 y 500 años), la máxima creciente registrada de acuerdo al proyecto de DNV (1986), los 9 niveles máximos anuales históricos registrados en el puente existente y los niveles máximos obtenidos del modelo en los eventos de calibración respectivamente.

Tabla 4.- Niveles de agua en el puente de Ruta 11 obtenidos del modelo hidrodinámico por los eventos de diseño considerados (TR = 100, 200 y 500 años) y evento considerado por el proyecto de 1986

Evento	Tr=100	Tr=200	Tr=500	Plano DNV
HR11(m)	15.29	15.38	16.44	14.50

Tabla 5.- Niveles de agua históricos registrados en el puente existente sobre Ruta 11. "Fuente: DINAGUA"

Evento	1900	1919	1955	1956	1967	1972	1977	1983	1986
HR11(m)	13.16	12.09	11.66	11.81	12.16	11.64	12.66	12.76	12.66

Tabla 6.- Niveles de agua históricos registrados en los últimos años en el puente existente sobre Ruta 11 según DINAGUA

Evento	Julio1998	Agosto1999	Marzo2002	Abril2002	Diciembre2002	Setiembre2004
HR11(m)	10.02	10.77	11.67	11.62	8.97	9.82

Este resultado es coherente con las consideraciones que surgen de la modelación estadística utilizando las medidas indirectas de Aguas Corrientes y pone de manifiesto la exigencia de los eventos de diseño utilizados.

Se presenta, a modo de ejemplo, en la Tablas 7, para longitudes de 600 y 750 m, los niveles máximos alcanzados, velocidades máximas y profundidades de socavación máximas para Tr= 100 años de recurrencia en el puente proyectado y otras secciones de interés.

Tabla 7.- Resumen de resultados para 100 años de período de retorno

Secciones	Actual		Longitud (m)							
			600				750			
	H(m)	v(m/s)	Cota (m)	DH (m)	v(m/s)	Erosión contracción (m)	Cota (m)	DH (m)	v(m/s)	Erosión contracción (m)
SL Puente			14.82		2.32	3.55	14.84		2.06	2.70
SL12550	14.84	1.22	14.88	0.04	1.51		14.87	0.03	1.51	
SL14602	14.98	2.70	15.03	0.05	2.86		15.02	0.04	2.87	
SL17492	15.66	1.46	15.72	0.06	1.44		15.71	0.05	1.44	
AV1002	14.91	0.49	14.98	0.07	0.49		14.97	0.06	0.49	
AV2200	14.95	0.24	15.01	0.06	0.28		15.00	0.05	0.28	

Como resumen de los resultados se puede indicar que para períodos de retorno menores a 200 años las variaciones de cota entre la situación actual y con las alternativas de puentes analizadas no supera en ningún caso los 0.20m. Este resultado se encuentra dentro del error del modelo. Esta situación se considera aceptable en cuanto las afectaciones que provoca la implantación del nuevo puente, en particular en la ciudad de 25 de Agosto. Para períodos de retorno mayores, aunque la cota absoluta de inundación sea mayor, las diferencias de niveles con y sin proyecto son menores.

Los resultados de erosión por contracción han sido utilizados junto con otras variables hidráulicas (velocidades y niveles) en la determinación de las características del nuevo puente. La variación de la profundidad de socavación por contracción con la longitud del puente tiene mayor sensibilidad que los otros parámetros de diseño. Para el período de retorno de diseño (100 años) la profundidad de erosión por contracción para puentes de longitudes menores a 500 metros no son aceptables ya que supera los 4 metros, descartando estas alternativas. Por otro lado, si bien para el puente de 600 metros de longitud se estima una erosión por contracción mayor para el de 750 metros, en ambos casos la erosión estimada es considerada aceptable si son tomados en cuenta dentro del diseño estructural del puente.

La implantación del puente nuevo provoca en secciones cercanas aguas abajo, en la Ciudad de Santa Lucía, un descenso del nivel máximo de crecida respecto a la situación actual de escasos centímetros. Esta afectación merece las mismas consideraciones anteriores.

La velocidad dentro del nuevo puente, y por tanto su capacidad erosiva, aumenta a medida que disminuye su longitud y aumenta el período de retorno. Para el mayor período de retorno (500 años) y la menor longitud de puente (400m) considerados la velocidad no supera los 3.5 m/s. Se observa que las velocidades en la sección SL 17492 (puente de AFE) son para un período de retorno dado, mayores a las obtenidas dentro del nuevo puente, excepción de la alternativa de 400m de longitud.

Para las diferentes alternativas de longitud de puentes consideradas, y para períodos de retorno bajos el comportamiento observado es similar en cuanto a niveles de agua y velocidades.

El análisis de esviate ha sido realizado para la situación extrema de 200 años de período de retorno, 20° de esviate y 400 metros de longitud de puente. Los resultados obtenidos muestran una diferencia en el nivel de agua entre la situación con y sin esviate de 3 cm., mientras que en las velocidades se observa una diferencia solamente en las secciones inmediatas al puente

de 0.22 m/s. Estas diferencias no son significativas.

Respecto a la altura del puente, el estudio hidrológico e hidráulico establece la máxima altura del nivel de agua dentro de la estructura de longitud ya determinada, y considerando determinada revancha o franquía puede fijarse la cota inferior del paquete estructural del tablero del puente (cota de la clave del puente). Esta cota inferior del paquete estructural ha sido determinada a partir de sumar a la cota del nivel de agua dentro del puente para un evento de 100 años de período de retorno y sumándole 0.70 metros de revancha o franquía. Una vez determinada esta cota inferior del paquete estructural, se determinó el período de retorno del evento que produce que el nivel de agua dentro del puente alcance esa cota que resulto ser de unos 180 años. A su vez, se verifico el comportamiento frente a eventos de 200 y 500 años de período de retorno.

Erosión local en la Fundación del Puente

Para las alternativas de longitud de puente de 600 metros se estiman los umbrales de las erosiones locales en estribos y pilas, con el objetivo de analizar medidas preventivas a considerar en el diseño del puente. Todas las estimaciones de erosión local son realizadas para el período de retorno de diseño igual a 100 años.

Los parámetros de diseño son:

- Diámetro de pila = 1.0 m
- Diámetro medio del sedimento = 1.0 mm
- Desviación estándar del sedimento = 3.5
- Profundidad del flujo en las proximidades de la fundación = 10.1 m
- Velocidad del flujo en las proximidades de la fundación = 1.1 m

Para las evoluciones temporales se considera la profundidad de erosión alcanzada al tiempo al pico del hidrograma, que en este caso es de 40 horas.

Se presentan en la Tabla 8 los resultados de erosión local en torno a los estribos izquierdo, derecho y a una pila tipo.

Tabla 8.- Profundidades máximas de erosión local en torno a estribos y a pila del puente para la alternativa de longitud del puente de 600 metros

Formulación	Estribo izquierdo (m)	Estribo derecho (m)	Pilas (metros)
CSU ds maxima	16.23	18.01	4.05
Oliveto y Hager 2002			3.24
López et al (2011)			2.49

Los resultados indican que la erosión local dada por el caudal pico del hidrograma persistiendo el tiempo base del mismo es el 70 % de la profundidad de erosión máxima de diseño. Incluso la erosión local al final del hidrograma calculada considerando flujo no estacionario es aproximadamente el 80 % de la profundidad de erosión calculada con evolución temporal bajo flujo estacionario.

En base a los resultados de la profundidad de erosión local obtenidos se propone, en el proyecto ejecutivo, incorporar medidas de control contra la erosión local en los estribos.

Se sugiere que esas medidas apunten a considerar la potencial erosión local que se produce en

los estribos en la determinación de las características de la fundación y a prestar particular atención en el plan de monitoreo y seguimiento de la obra al control de la erosión local en pilas y estribos del puente, en particular luego de cada creciente de importancia.

Además de las sugerencias realizadas, se presenta el diseño de un enrocado como medida estructural de control de la erosión local. El diseño se realizó en base a la metodología propuesta por el manual HEC 18, lo que fue complementado con resultados de otras formulaciones.

Como resultado para las pilas se obtiene:

- el material a ser utilizado es una roca granítica de diámetro medio mínimo igual a 0.35 m.,
- el manto de enrocado tendrá un espesor de al menos 1.00 m (aproximadamente 3 capas),
- la ubicación en torno a las pilas será formando un anillo de al menos 5 metros de diámetro exterior, esto es a una distancia de hasta al menos 2 metros del borde de la pila.

Como resultado para los estribos se obtiene:

- el material a ser utilizado es una roca granítica de diámetro medio mínimo igual a 0.25 m.,
- el manto de enrocado tendrá un espesor de al menos 0.75 m (aproximadamente 3 capas) en la planicie y 0.50 m (aproximadamente 2 capas) sobre el talud del terraplén,
- la ubicación sobre la planicie de inundación se extenderá hasta una distancia de al menos 15 metros del borde del estribo y de terraplén,
- la ubicación sobre el talud del estribo y del terraplén se extenderá hasta los 3 metros de altura,
- el manto del enrocado se extenderá por el terraplén hasta al menos 30 metros del estribo.

CONCLUSIONES

A partir de un modelo hidrodinámico calibrado y verificado de tramos de los cursos Río Santa Lucía, Río Santa Lucía Chico y Arroyo de la Virgen y de un análisis hidrológico y estadístico de las cuencas involucradas, se ha estudiado el comportamiento hidráulico y las afectaciones del nuevo puente proyectado sobre el río Santa Lucía en la variante de trazado de la Ruta 11, en las proximidades de las ciudades de Santa Lucía y 25 de Agosto.

Los resultados obtenidos muestran que la implantación del puente proyectado (incluso con esviaje), no produce impactos significativos en cuanto a los niveles máximos de crecida correspondientes a los eventos considerados en las ciudades de Santa Lucía y 25 de Agosto. El parámetro que condiciona la elección de la longitud del puente es la velocidad del flujo dentro de la obra, y consecuentemente los valores estimados de profundidad de erosión por contracción, ya que el canal principal es de lecho granular no cohesivo. La erosión local y por lo tanto la protección diseñada no varía con la longitud del puente; consecuentemente su costo es similar en cualquiera de las alternativas. La alternativa de puente considerada no presenta

esviaje respecto a la planicie de inundación. Si el proyecto vial considera modificar el esviaje del puente en valores menores a 10 grados, esto no tendrá consecuencias hidráulicas sobre él mismo.

Se ha considerado también que el comportamiento histórico del puente AFE en 25 de Agosto, de 600 metros de longitud, no ha presentado problemas hidráulicos ni de erosión. El área de aporte de este puente tiene unos 514 km² menos.

De acuerdo a lo antes expuesto, se considera razonable la alternativa de un puente de 600 metros de longitud. La cota del pelo de agua, para la condición de diseño, dentro del puente es de 14.88 metros, y tomando una revancha de 0.70m el paquete estructural del puente se sugiere que comience a los 15.58 metros (cota asociada a 180 años de período de retorno). En caso de optarse por una alternativa diferente se deberá asegurar: (1) al menos 600 metros de longitud, (2) área de desagüe no inferior a 4900 m², (3) distancia entre pilas (que deberán ser circulares) no inferior a 15 metros, (3) cota inferior del paquete estructural de al menos de 15.58 m (cero oficial), (4) esviaje podrá variar como máximo 10 ° en relación a la ubicación establecida en este trabajo.

La determinación de la magnitud de la socavación potencial es muy imprecisa debido a la naturaleza cíclica del proceso de socavación. Todas las ecuaciones para la estimación de la socavación por contracción y local son basadas en experiencia de laboratorio, con limitadas verificaciones de campo. Las condiciones en campo son diferentes que las de laboratorio, y en general las ecuaciones tienden a sobreestimar la magnitud de la socavación. Las ecuaciones utilizadas han sido consideradas por la bibliografía como las más adecuadas para la estimación de la profundidad potencial de socavación.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de estas ecuaciones deben ser por tanto empleados con precaución, debiendo siempre recurrirse al sentido ingenieril y a la experiencia acumulada sobre el comportamiento de otros puentes similares al proyectado, como lo son el puente actual de Ruta 11 y el puente ferroviario situado próximo a la localidad de 25 de Agosto.

Los resultados de erosión local en estribos indican la necesidad de tomar medidas de control frente a este fenómeno, por esto se sugiere incorporar en las inspecciones del puente un plan de monitoreo y seguimiento de la misma y de ser necesario un enrocado de protección. Además, el resultado obtenido sugiere no considerar los primeros 3.50 metros de la capa superior del suelo a la hora de evaluar el diseño estructural de la fundación.

Para el cálculo de la erosión local en las pilas es relevante la diferencia de considerar métodos de estimación de la evolución temporal bajo condiciones estacionaras y no estacionarias respecto a considerar la profundidad de erosión máxima final, obteniendo resultados acordes a la realidad de cuencas donde las variaciones temporales son relevantes. De esta manera, no se realizan diseños sobredimensionados, en particular de la cota de fundación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chow, V. T.; Maidment D. R., Mays L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Mc. Graw Hill,

Bogotá. ISBN 958-600-171-7

Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Editor Springer-Verlag, London. ISBN 1-85233-459-2

Lopez, G., Teixeira, L., Ortega-Sanchez, M. and Simarro G. (2006). “Discussion of “Further results to time-dependent local scour at bridge elements.”” *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 132, No. 9, 995-996

Melville, B. W.; Coleman, S. E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC, Colorado. ISBN 1-887-201-18-1

Oliveto, G. y Hager, W.H. (2002). “Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour”. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol 128, No 9, p 811-820.

Richardson, E. V.; Davis, S. R., (1995). *Hydraulic Engineering Circular N° 18; “Evaluating Scour at Bridges”*, 4° ed. U. S. Dept. of Transportation. Publication N° FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



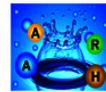
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

