

# AVANCES EN LA HIDRÁULICA Y SEDIMENTOLOGÍA DE PUENTES: EL CASO DEL PUENTE SOBRE EL RÍO SANTA LUCÍA (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

E-mail: [glopez@fing.edu.uy](mailto:glopez@fing.edu.uy); [chreties@fing.edu.uy](mailto:chreties@fing.edu.uy); [nicofail@gmail.com](mailto:nicofail@gmail.com)

## Introducción

La Ruta 11 forma parte de un importante corredor vial vertebral del Eje de Integración y Desarrollo MERCOSUR-Chile. En la órbita uruguaya 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 Uruguay con Argentina y 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.

A raíz de esta problemática, se plantea una variante de trazado a la Ruta 11 en las proximidades de la ciudad de Santa Lucía que incluye un puente sobre el río Santa Lucía de entre 600 y 750 m que no sea inundable. Como parte del diseño de esta variante y su puente se realiza un estudio hidrológico, hidráulico y sedimentológico de manera de determinar las características del puente: emplazamiento, esviaje, longitud, cota de fundación, protección de la fundación, etc.

El objetivo del presente artículo es presentar los avances metodológicos en el diseño hidráulico y sedimentológico y los resultados que surgen de este caso de estudio.

## 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.

Para la implementación de los modelos fueron recopilados datos hidrométricos, existentes en la zona modelada. Además, se realizó un relevamiento plani-altimétrico 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.

Las áreas de las cuencas de aporte a los trechos de río modelados se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.-** Área de las cuencas de aporte

Categoría	Area (km <sup>2</sup> )
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

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.

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 base del hidrograma. En segundo lugar, se

consideró la profundidad de la erosión local que surge de la evolución temporal bajo hidrogramas escalonados propuesta por Lopez et al (2006).

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

Para períodos de retorno menores a 200 años la variación de nivel de agua entre la situación actual y con las alternativas de puentes analizadas no supera en ningún caso los 0.20m. 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.

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.

Los resultados presentados en el análisis de la longitud del puente han sido interpretados para determinar la cota del puente. La cota del nivel de agua admisible dentro del puente se ha determinado a partir de un evento de 100 años de período de retorno. Entre esta cota del nivel de agua y la cota inferior del paquete estructural se toma una revancha o franquía de 0,70 metros. El nivel de agua alcanza esta cota con período de retorno de 180 años.

El río en esa zona es de régimen fluvial con gran carga de sedimentos lo que hace que en la zona de implantación del puente exista material potencialmente transportable y zonas de deposición. El material presente en el lecho es de tipo granular no cohesivo, y puede caracterizarse por un diámetro medio de 1mm.

Los valores de socavación potencial proporcionados no tienen en cuenta la existencia de otro material que no sea granular no cohesivo y dan por tanto la máxima socavación que teóricamente podría producirse en el caso de que el perfil de suelo estuviera constituido por arena de diámetro medio 1 mm.

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 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.

El cálculo de erosión por contracción del puente

ferroviario existente, que resultó coherente con las observaciones en campo, verifica que el comportamiento es comparable con la alternativa del puente nuevo de 600 metros de longitud.

Los resultados indican que la erosión local dada por el caudal pico del hidrograma persistiendo el tiempo base del mismo es el 10 % 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.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que la implantación del puente proyectado, no produce impactos en los niveles de crecida en las ciudades de Santa Lucía y 25 de Agosto.

Se consideró 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 o franquía 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 m<sup>2</sup>, (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) esviate podrá variar como máximo 10 ° en relación a la ubicación establecida en este trabajo.

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 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. 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*. Editora Springer-Verlag, London. ISBN 1-85233-459-2
- 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.