

## OBRAS DE CANALIZACIÓN SOBRE EL RÍO SALADO INFERIOR: ESTUDIOS DE EROSIÓN EN CORRESPONDENCIA CON EL CRUCE DEL GASODUCTO

Espil Nosa, Francisco H., Beliera, Pablo, Puig, Nicolás y Bianchi, Guillermo J.

Grupo InfoMet, UIDET Hidrología, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP Calle 47 N° 200

[francisco.espil@ing.unlp.edu.ar](mailto:francisco.espil@ing.unlp.edu.ar); [guillermo.bianchi@ing.unlp.edu.ar](mailto:guillermo.bianchi@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

El río Salado de la provincia de Buenos Aires es un río de llanura, caracterizado por su muy baja energía morfogenética, que permite explicar la lentitud de los cambios observados en los procesos fluviales tendientes a adquirir una geometría compatible con su actual régimen de caudales. Las obras de readecuación de la sección del río ejecutadas a partir de 2005, implicaron modificaciones en la geometría fluvial del cauce principal, con un tratamiento especial sobre las planicies de inundación. La concepción de la obra estuvo sustentada sobre pautas básicas de preservación del ambiente fluvial en cuanto a las dimensiones del ancho, cotas de fondo y pendientes (Seglie et al, 2010).

Luego de 15 años de "vida operativa", el cauce readecuado ha manifestado tendencias interesantes a favor de su articulación con el paisaje fluvial. En ese sentido, las actividades de seguimiento de la evolución morfológica han sido fundamentales para verificar tendencias y comportamientos (Bianchi, 2015, Espil Nosa, 2021).

Uno de los aspectos más demandados de seguimiento comprende sitios donde se requiere gestionar y mantener las obras de cruce subterráneo preexistentes ya que deben adecuarse a la nueva cota del lecho. Específicamente, la traza del gasoducto General San Martín (T.G.S.S.A.) atraviesa el río en progresiva aproximada km. 216. Como aún no ha sido relocalizado a cotas compatibles con el nuevo lecho, existe un tramo no intervenido de 200m de longitud que funciona como un alto fondo, además de la contracción del ancho del cauce, donde las condiciones de escurrimiento, aun para crecidas ordinarias, resultarían potencialmente erosivas.

Tramo sin intervención (abr-2005)	Tramo intervenido (oct-2014)	Tramo intervenido (mar-2021)
		
Q=80m³/s	Q=250m³/s	Q=5m³/s

**Figura 1: Tramo km 216 en el tiempo, Río Salado.**

El trabajo aborda mediante estudios básicos y fluviales, la formulación de criterios para la evaluación de la potencialidad del proceso erosivo, con el objetivo de disponer de una herramienta de diagnóstico que interprete la tendencia evolutiva y consecuentemente permita establecer el nivel de prioridad requerido para la gestión de las obras de control definitivo.

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología de trabajo se estructuró a partir de la necesidad de caracterizar la dinámica fluvial del tramo no intervenido donde cruza el gasoducto enterrado. Para ello se abordaron dos líneas de trabajo: a) por un lado el análisis multitemporal comparado de imágenes satelitales y b) la evaluación del potencial proceso de erosión del sitio, sustentado en la modelación hidráulica del tramo dado por modelo matemático 1-D HEC-RAS.

#### Análisis multitemporal.

Las imágenes de interés disponibles en el programa Google Earth, abarcaron el período 2005-2022, en total se reconocieron 20 escenarios, en todos los casos asociadas a las

condiciones hidrológicas imperantes. A modo de síntesis, las 3 situaciones presentadas en la Figura 1 indican respectivamente, el estado previo a la obra (izquierda), el efecto de contracción inicial al no intervenir la zona de cruce y la evolución alcanzada a posteriori del período de crecidas extraordinarias (derecha).

El análisis más detallado permitió identificar:

- a) el cambio más significativo de la forma en planta del canal estrechado se observó luego de la crecida de 2017. Durante los eventos de 2014 y 2015, no se observaron efectos de ajuste relevantes.
- b1) Los eventos que inundaron la planicie aportaron significativos volúmenes de sedimentos. El espesor de los depósitos (limo y algo de arena muy fina) alcanzaron algunos centímetros, no obstante, registros de campo señalan en sectores cercanos una mayor acumulación.
- b2) El desagüe de las planicies inundadas a través de canales naturales o artificiales, ha generado incipientes fenómenos de erosión encauzada, observables en imágenes a partir de 2017, donde el mayor gradiente de la descarga hacia el río se pone en evidencia durante las bajantes.
- c) Los escenarios de sequía del período 2020-22, por su bajísimo escurrimiento han permitido identificar variaciones en la geometría de cauce y de la pendiente del fondo dentro del tramo (localización de rápidas, comparación de tendencias de corrimiento, etc.).

Como primera aproximación de lo analizado, surge la evidencia de un ajuste incipiente representado por el ensanche gradual en la embocadura y por un leve corrimiento del ancho del tramo hacia la salida. El lecho cohesivo más resistente parece mantener controlado el escurrimiento de la rápida a la salida del alto fondo. En el nivel de la planicie, sus depósitos superficiales reconocen mayor susceptibilidad a procesos fluviales, por ejemplo la erosión y depósito registrado por las imágenes, y la erosión en surco y cárcava de los desagües, también observable en las imágenes conformando un amplio desarrollo espacial adyacente al río donde se emplazan además los depósitos con sedimentos extraídos del río.

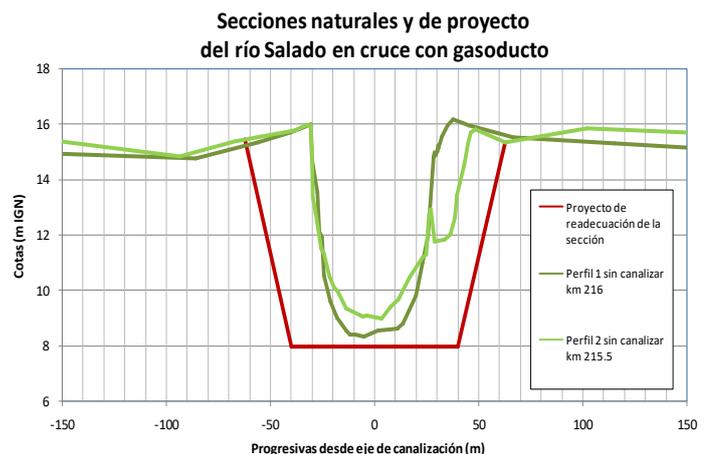
### **Modelación unidimensional HEC-RAS.**

El programa de investigación implementado por InfoMet y aplicado a los objetivos de la PPS, proponía el refinamiento del modelo HEC-RAS existente (Beliera y Puig, 2022), alrededor del tramo no canalizado a causa de la presencia del ducto que atraviesa el río Salado.

El tramo estudiado se encuentra alrededor de la progresiva 215600m del proyecto de canalización, en donde, por aproximadamente 200 m, no se canalizó el cauce. Como la sección original del río posee un ancho menor (en promedio  $B_s=65$  m), se presenta en este tramo una contracción del escurrimiento, dado que la sección readecuada genera una boca del orden de  $B_s=115$ m. (Figura 2)

La contracción (de ancho y de fondo) provoca condiciones de escurrimiento variado a lo largo del tramo con fuerte aceleración a la salida del estrechamiento, donde

las altas velocidades pueden propiciar fenómenos erosivos, con tendencia retrocedente, cuando la resistencia del lecho es insuficiente. Por otra parte, los efectos locales ejercidos por la contracción del ancho introducen condiciones de escurrimiento de carácter tridimensional con aparición de vórtices erosivos que dificultan aún más el análisis del fenómeno y su pronóstico.



**Figura 2 Secciones naturales y de proyecto del río Salado**

Como se mencionó anteriormente, se trabajó sobre el modelo unidimensional HEC-RAS preexistente. Se propuso correr el modelo para el rango de condiciones de escurrimiento preestablecidas, dadas por la ley de frecuencia de caudales máximos en R.P. N°41 (Espil Nosa, F.H., 2021), que proveyó los caudales para recurrencias de 2,33 (se adopta equivalente al caudal formativo), 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Se plantearon diferentes escenarios (y combinaciones de los mismos) para caracterizar los cambios que se producen en el escurrimiento a lo largo del tramo de estudio. En busca del mejor detalle de las variaciones longitudinales en cuanto a tirantes y velocidades (y una mejor definición de la curva de remanso), se añadieron secciones transversales alrededor de la sección de la progresiva 215600 (perfil sin canalizar), densificando la información topobatemétrica con secciones cada 50 m. (Figura 3)



Figura 3 Croquis de refinamiento del modelo

Adicionalmente, se planteó otro escenario en donde se modificó el coeficiente de Manning en las secciones sin canalizar, un aumento de manera subjetiva, a fin de estudiar la sensibilidad de la velocidad respecto de este parámetro.

Un parámetro que se refinó corresponde a los coeficientes de contracción y expansión del cauce. Se los aumentó en las secciones en las que la sección pasa de estar canalizada a no estarlo (y viceversa) de acuerdo a los valores sugeridos para transiciones abruptas ( $C_{cont}=0,6$  y  $C_{exp}=0,8$ ).

Es interesante atender al comportamiento de la contracción para caudales de distintas recurrencias. Los efectos locales inducidos por la contracción se observan claramente cuando el escurrimiento se produce mayormente dentro del cauce principal (el escurrimiento encauzado se verifica en las recurrencias bajas a medias). Sin embargo, bajo caudales con recurrencias mayores a 10-20 años se producen desbordes sobre las planicies adyacentes, en ese caso, el escurrimiento es controlado por el extenso remanso impuesto por las condiciones del tramo de aguas abajo.

### Resultados del modelo

Se realizaron corridas del modelo HEC-RAS para la gama de caudales especificada, pero se puso énfasis en el rango correspondiente a recurrencias bajas a medias. Se estudiaron escenarios incluyeron de coeficientes de Manning, y de contracción y expansión sin mayorar; coeficientes de Manning mayorados; y coeficientes de Manning, contracción y expansión mayorados. Se extrajeron valores de velocidad máxima en el cauce principal en el tramo sin canalizar y del cauce principal del tramo canalizado en secciones de aguas arriba (Tablas 1 y 2).

Tabla 1 - Velocidad media de cauce principal aguas arriba				
Parámetros	Caudal total (m <sup>3</sup> /s)			
	400	744	1012	1349
Secciones adicionales	0,9	1,1	1,25	1,35
Manning mayorados	0,87	0,87	1,25	1,38
Coef. C y E mayorados	0,87	1,1	1,26	1,39

Tabla 2 - Velocidad media de cauce principal en la contracción				
Parámetros	Caudal total(m <sup>3</sup> /s)			
	400	744	1012	1349
Secciones adicionales	2,02	2,22	1,81	1,56
Manning mayorados	1,97	1,97	1,79	1,56
Coef. C y E mayorados	1,97	2,17	1,8	1,56

### Estudios de erosión

La evaluación del proceso erosivo, sustentado en la modelación hidráulica del tramo, fue abordado mediante dos análisis independientes y preliminares: a) por un lado mediante

modelos que interpretan la erosión general del lecho y b) por formulas empíricas que interpretan los fenómenos locales inducidos por la contracción.

Se trata de una evaluación preliminar, que representa las condiciones potenciales, pero que podrá ayudar a dar luz sobre el fenómeno que, de hecho, resulta altamente complejo dada la simultaneidad de variables puestas en juego (variaciones hidrodinámicas, resistencia y heterogeneidad del lecho y márgenes, régimen de caudales, monitoreo y seguimiento de tendencias). Por lo expuesto se anticipa la necesidad de una discusión al final que confronte el conjunto de resultados obtenidos; sólo así se podrá encontrar respuestas más concluyentes.

### Erosión general

Debido al aumento de la capacidad de transporte del río se debe calcular el descenso general del lecho correspondiente. Este descenso es conocido como erosión general y para calcularlo se utilizan diferentes métodos que aproximan aceptablemente los resultados para suelos granulares y cohesivos. En este caso, los datos de geotecnia indican mayoritariamente estratos limo-arcillosos que presentan mayor resistencia a la erosión con la profundidad. Las distintas metodologías utilizadas para el cálculo fueron:

**Método de Lischtvan-Lebediev:** Este método se basa en el equilibrio entre la velocidad de la corriente y la velocidad media erosiva. El mismo consiste en dividir al cauce en varias franjas elementales y asignarle un caudal unitario a cada una. La expresión con la que se determina la profundidad incrementada por la erosión es

$$H_s = \left[ \frac{\alpha * H_0^{5/3}}{0.60 * \gamma_d^{1.18} * \beta} \right]^{1/x+1}$$

Una apreciación subjetiva pero consistente con resultados obtenidos en otras secciones del río Salado revelan que en este tipo de lechos los estratos más profundos son más resistentes a la erosión, en nuestro caso se adoptó un  $\gamma_d$  variable de 1.4 en superficie a 1.48 t/m<sup>3</sup> en profundidad. En la Tabla 3 adjuntan los resultados obtenidos.

**Criterio de Neill:** La expresión para el cálculo está dada por:

$$Socav. \text{ máx. (m)} = H_m [(V_{med}/V_{lim}) - 1]$$

Como se aprecia en la expresión, al aplicar esta metodología se compara la velocidad media de la corriente del flujo con la velocidad erosiva. Es lógico pensar que, si la velocidad media resultase mayor que la velocidad límite, se estaría en presencia de erosión. Las velocidades límites correspondientes al lecho fueron obtenidas a partir de las tablas de la UT4 de la cátedra de Hidráulica Fluvial, adaptadas a la experiencia del grupo en otras secciones del río Salado, resultando una velocidad límite de entre 1,10m/s en superficie a 1,30 m/s en estratos profundos. En la Tabla 3 adjuntan los resultados obtenidos.

**Criterio de régimen según Charlton & Farraday:** En este método se considera que el tirante de equilibrio de un curso se da cuando la tensión tractora sobre el lecho es igual a la tensión crítica del material del mismo. La expresión mediante la cual se obtiene la socavación máxima esperable es:  $H_{equil. (m)} = 51.4 * (n * q)^{0.86} * \tau_{crit}^{-0.43}$

Donde: n es el coeficiente de rugosidad de Manning (n=0,025); q el caudal por unidad de ancho; y  $\tau$  la tensión crítica (adoptado el valor de 10N/m<sup>2</sup>).

Se espera que la socavación máxima se encuentre entre 0.25 a 0.50\*Heq. Los resultados obtenidos para las diferentes recurrencias se adjuntan en la Tabla 3.

Tabla 3 Predicción de la erosión general

Predicción de la erosión general				
Caudal total (% efectivo en cauce)	Q <sub>25</sub> =400m <sup>3</sup> /s (100%)	Q <sub>5</sub> =744m <sup>3</sup> /s (100%)	Q <sub>10</sub> =1012m <sup>3</sup> /s (95%)	Q <sub>25</sub> =1349m <sup>3</sup> /s (85%)
Metodología	(m)	(m)	(m)	(m)
LISCHTVAN-LEBEDIEV	4.23	4.56	4.94	5.10
NEILL	2.50	3.89	3.53	4.34
CHARLTON-FARRADAY	1.82	2.88	2.90	3.37
Promedio	2.85	3.78	3.79	4.27

### Erosión local

Se utilizaron los métodos de Briaud (verificado en cohesivos) y de Artamonov.

**Método de Briaud:** Al utilizar este método se realiza una determinación de la erosión local máxima mediante la expresión propuesta por Briaud para estribos de puentes:

$$y_s \text{ max estibo} = y_{pic} K_1 K_2 K_L K_G 243 R_{cc}^{-0.28} (1.65 F_{pe} - F_{pec})$$

**Método de Artamonov:** Mediante este método se puede determinar la profundidad de socavación local en la contracción provocada por estribo y espigones. El mismo depende de los siguientes factores: Caudal que es interceptado por la estructura al meterse dentro de la corriente, talud que tienen los lados del estribo, ángulo entre el eje longitudinal de la obra y la corriente.

El cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\text{Socav. máx} = h_0 (Pq \cdot Pm \cdot P\alpha)$$

En la tabla 4 se presentan los resultados de los dos métodos propuestos.

**Tabla 4: Predicción de la erosión local**

Predicción de la erosión local por contracción (interpretada efecto de estribos)				
Caudal total	Q <sub>2,33</sub> =400m <sup>3</sup> /s	Q <sub>5</sub> =744m <sup>3</sup> /s	Q <sub>10</sub> =1012m <sup>3</sup> /s	Q <sub>25</sub> =1349m <sup>3</sup> /s
Metodología	(m)	(m)	(m)	(m)
Artamonov	1.04	1.66	1.96	2.24
Briaud	1.91	2.16	2.25	2.35

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El conjunto de herramientas generadas provee resultados y evidencias concretas para abordar la siguiente discusión. Se obtuvieron parámetros de verificación de variables hidrodinámicas y sedimentológicas para distintos caudales, que caracterizaron las variaciones longitudinales y con ello permitieron tipificar las tendencias erosivas, identificadas cualitativamente en el análisis multitemporal y posteriormente verificadas mediante fórmulas predictivas.

Sin embargo, aparecen entendibles discrepancias entre los valores potenciales dados por las fórmulas y los surgen del reconocimiento a campo y del seguimiento por imágenes.

A partir de analizar las imágenes se logró identificar, por ejemplo, los ajustes en el ancho. estos no siempre pueden ser interpretados mediante salidas de modelos 1-D ni por formulas empíricas.

- La embocadura evolucionó hacia un cambio gradual del ancho, incluso conformando una terraza; en todo caso, habría que discutir hasta qué punto la magnitud de la profundización esperable dada por las fórmulas que estiman la erosión local resultan indicadores indirectos del fenómeno observado.
- En el caso del ajuste del ancho del cauce (muy leve) en correspondencia con la rápida, esto podría advertir sobre la mayor resistencia de los estratos subyacentes que condicionan la profundización a expensas de un pequeño ajuste en el ancho.
- Sin embargo, los estudios de erosión realizados a lo largo del alto fondo y rápida, resultarían adecuados desde la perspectiva de la erosión retrocedente, sobre todo, si se combina con el monitoreo a tiempo real que permita su seguimiento y verificación. Un descenso medio del lecho de 3 m (Tabla 3) estaría comprometiendo la tapada del ducto seguramente.

El tratamiento de la problemática que requiere la gestión de este tipo de obra impone la necesidad de comprender el fenómeno y establecer la probabilidad de ocurrencia de eventos que evalúen el riesgo asociado. En este sentido es evidente que se necesita un programa de monitoreo sistemático como parte del plan de gestión ambiental de la obra.

El procedimiento adoptado en este trabajo, es tan sólo un camino entre otros posibles, que consiste en evaluar la ocurrencia de fenómenos de riesgo a partir de la serie cronológica de caudales, totalmente consistente con el análisis previo ya realizado.

### Cálculo de caudales erosivos

En esta sección se realiza el cálculo de caudales erosivos, su permanencia y el porcentaje del tiempo al que estaría sometido a acciones erosivas. A partir de datos de caudales cronológicos (2011-2022) se realizó la curva de duración que permite, en forma gráfica o analítica, establecer dicho porcentaje del tiempo. La forma gráfica se presenta en la Figura 4, correspondiendo el eje vertical a caudales en metros cúbicos por segundo y el eje horizontal a una duración en porcentaje.

Con la intención de evaluar los eventos erosivos reales acontecidos desde 2014 hasta el presente, la curva de duración aporta información asociada a los caudales para los cuales se calculó la erosión, asignándole las duraciones siguientes. a) un 12% del período superó

el caudal  $Q_{2,33}=400\text{m}^3/\text{s}$ ; b) un 3% adicional alcanzó el nivel  $Q_5=744\text{m}^3/\text{s}$ ; y c) un 1% más se presentaron caudales  $Q_{10}=1012\text{m}^3/\text{s}$ .

En consecuencia, los caudales mayores no alcanzan grandes permanencias, por lo que sus efectos erosivos no serán considerables. Durante el período de estudio se reconoce que los fenómenos erosivos fueron significativamente menores al valor calculado que toma como hipótesis el desarrollo completo de la erosión (el valor potencial dado por fórmulas), es decir, que requeriría una permanencia suficientemente elevada del caudal.

### CONCLUSIONES

En esta sección se compilan las conclusiones obtenidas en el desarrollo del trabajo y se realizan comentarios y propuestas para el mismo.

Los resultados proveen valores concretos de variables hidrodinámicas y sedimentológicas para distintos caudales, que permiten caracterizar las variaciones longitudinales, y la tipificación de las tendencias erosivas y su verificación con fórmulas predictivas.

Es probable que el RAS unidimensional no posea habilidad para representar fielmente la situación en la contracción del río ni una comprensión más acabada de la distribución de caudales entre encauzados y no encauzados.

Los modelos predictivos de erosión generalizada, advierten sobre valores potenciales muy altos para todo el rango de caudales, y en competencia con la tapada normal en un cruce subfluvial (mayores a 2m).

Es sabido que a lo largo de los años no se percibió una socavación significativa en campo, esto puede ser debido a la no permanencia de caudales erosivos.

La gestión de este tipo de obra impone la necesidad de comprender el fenómeno. Será imprescindible realizar relevamientos en el tramo sin canalizar, cada vez que ocurra una crecida, para observar cómo afectó al lecho del río.

Se analizó la evolución del tramo a la luz de los eventos acontecidos en los años posteriores a ejecución (monitoreo e imágenes) y por interpretación de escenarios hipotéticos. Los escenarios especiales corresponden a diferentes niveles de riesgo (caudales para recurrencias entre 2 y 100 años) con cuyos resultados pueda valorarse la prioridad de las soluciones de obra.

Este tipo de práctica ingenieril propone una metodología que provee información relevante para el diagnóstico del estado de evolución del tramo y con ello brinda un aporte a la gestión ambiental de la obra, en cuanto al grado de prioridad requerida.

### BIBLIOGRAFÍA

Beliera, P. y Puig, N., 2022, *Informe final de PPS, 2da parte*, realizado con el grupo InfoMet, Carrera de Ingeniería Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP.

Bianchi, G., 2015. *Avances del programa de investigaciones – estudios sobre la evolución morfológica del cauce del río Salado. Primeras observaciones y consideraciones*, Terceras Jornadas de Investigación y Transferencia, 1a ed. - La Plata, UNLP, Abril de 2015.

Espil Nosa, F.H., 2021. *Estudios hidráulicos fluviales en el río Salado: puente sobre ruta nacional N°3 y evaluación de los tramos adyacentes readecuados*, Cátedra de Proyecto Final, Facultad de ingeniería, UNLP, agosto de 2021

Seglie, J., Zombori, Z., Agabios, A. & Bianchi, G, 2010. *Nuevo Criterio de Diseño de Obras de Canalización en Ríos de Llanura - El Caso del Río Salado*, XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, Noviembre 2010.

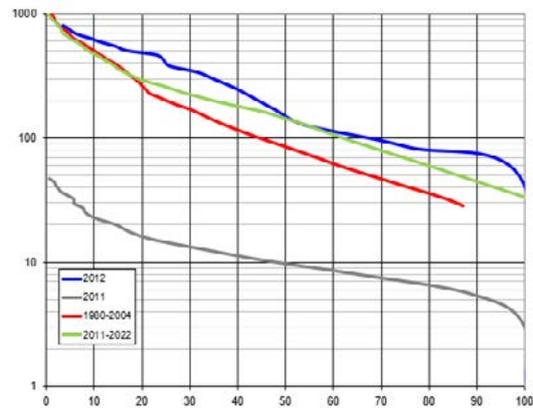


Figura 4 Curvas de duración de caudal