

CRUCES DE RÍOS: PONIENDO EL FOCO EN LAS MIGRACIONES LATERALES DE LOS CAUCES

Martín Carnicero, Transportadora de Gas del Norte, martin.carnicero@tgn.com.ar

Sinopsis

Debido a la gran cantidad de ductos construidos o por construir en los últimos años, se ha generalizado la realización de los estudios de riesgo hídrico, tanto para la traza en general de un ducto como para problemas puntuales en un cruce determinado. Existen un mínimo de siete riesgos hídricos consensuados en la literatura específica de riesgos naturales que afectan los ductos de transporte de fluidos. Sin embargo, la mayoría de los estudios se concentra, casi exclusivamente, en el tratamiento de la socavación vertical generalizada que ocurre en el lecho de un río. Si bien depende de la geografía en la cual se desarrolla la traza, luego de construídos y durante los años de operación, se tiene que una gran mayoría de los problemas a tratar se encuadran dentro de aquellas amenazas que se pueden caracterizar como corrimientos laterales de las márgenes de los ríos. El objetivo de este trabajo trata de concientizar a la industria sobre esta problemática que afecta la integridad de las cañerías. El análisis de la evolución cronológica de la alineación en planta de los cursos de agua da una herramienta poderosa que permite prever futuros problemas, tanto en el diseño como en las obras de protección a construir. En este trabajo, se plantean distintos casos, se muestran metodologías de relevamiento de campo, y cómo se integra dicha información con las características de la cañería obtenidas del navegador inercial y del diseño original de los cruces, de manera de poder evaluar la vulnerabilidad del ducto. Finalmente, se presentan casos de campo, ejemplos y recomendaciones de remediación.

Introducción

A lo largo de los años se han implementado mejoras en el tratamiento de los cruces de ríos y las amenazas hidrotécnicas que afectan la integridad de los ductos de transporte. Cada vez se realizan estudios más completos de riesgo hídrico, requeridos por los distintos organismos de aplicación a nivel nacional y provincial. El mismo progreso se ha vislumbrado en la normativa internacional [1] y bibliografía específica [2]. La consecuencia inmediata fue el desarrollo de una base de conocimiento para el caso de nuevos ductos que sirve para la identificación de aquellos problemas a tener durante la operación y que se pueden prever mediante un diseño adecuado de la traza y los cruces. Sin embargo, muchos estudios se enfocan principalmente en la socavación vertical en todos los cruces y no tanto en otras amenazas que surgen durante la operación.

Para tener una base común de entendimiento, se transcriben las principales amenazas hidrotécnicas que afectan a los ductos de transporte:

1. Flotación
2. Socavación vertical (generalizada y local)
3. Migración lateral
4. Avulsión o cambio de curso
5. Inundación
6. Drenaje rápido de lago (rotura de dique, colapso de diques de deslizamientos, etc.)
7. Tsunami

Para contrarrestar estas amenazas los cruces de ríos contemplan un diseño especial estipulados por norma que incluye:

1. Menor factor de diseño: 0.6 (0.5 en caso de río navegable [3])
2. Mayor espesor de pared de la cañería

3. Cuellos de cisne alejados del borde de la margen del río
4. Mayor tapada
5. Contrapesado para contrarrestar la flotación

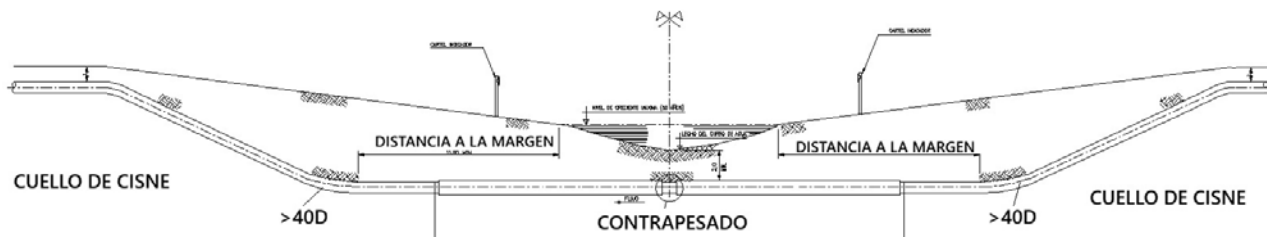


Figura 1. Esquema básico de un cruce de río

Estas consideraciones en el diseño permiten al ducto tener una mayor resistencia ante las tensiones inducidas por el agua (flotación, arrastre y fatiga) en caso de que quede expuesto a la corriente.

Es una práctica común para el diseño de cruces calcular la socavación vertical potencial, sumarle la socavación localizada, agregarle una profundidad adicional por seguridad y definir una cota de construcción del lomo del ducto. Independientemente de la fórmula de cálculo de la socavación usada, esta metodología conservadora se ha verificado cómo válida para evitar exposiciones de ductos luego del pasaje de crecidas.

Sin embargo, no es tan generalizado contemplar en el diseño los corrimientos laterales de las márgenes de los ríos por procesos erosivos. Usualmente durante la construcción, una vez encontrada la margen la cañería empieza a levantar su cota, sin que exista una distancia de seguridad adicional ante la posibilidad de corrimientos laterales del cauce a lo largo de la vida útil del ducto, que en casos excede los 60 años de operación. Como se mencionó en otros trabajos los problemas hidrotécnicos en ductos de transporte se pueden sintetizar como la interacción entre una estructura cuya posición es fija en el tiempo una vez construida (ducto) y un curso de agua que experimenta una potencial movilidad tanto en profundidad como en sentido lateral, propio de un proceso natural dinámico que se ve afectado también por intervenciones antrópicas.

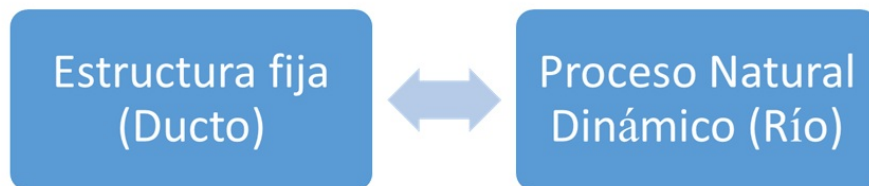


Figura 2. Interacción entre el ducto y el río como raíz de los problemas hidrotécnicos

Las recomendaciones en la etapa de diseño para definir la distancia desde la margen al inicio del cuello de cisne varían mucho; pueden ir desde un valor fijo, un factor de la altura de la barranca, o hasta un valor a determinar mediante un estudio de la estabilidad de la margen y el análisis cronológico de la evolución en planta del río (topografía, fotos aéreas geo-referenciadas e imágenes satelitales). También, la distancia puede estar determinada por factores distintos de la dinámica fluvial, siendo definidos por cuestiones constructivas de las curvas en frío o para disminuir el impacto de excavaciones muy profundas en barrancas muy altas en donde incluso, puede ser más conveniente construir una protección de margen a costa de una menor distancia al cuello de cisne. Un error común es construir los cruces en forma simétrica sin contemplar la curvatura del cauce.

Otra situación común se da durante los monitoreos de los cruces. Normalmente, se camina sobre los ríos vadeables con el medidor de tapada, que da la distancia vertical al eje del ducto a lo largo de todo el cruce. Sin embargo, estas mediciones por sí mismas no dan una idea acabada de la tapada lateral. La tapada lateral

se puede inferir y da una idea de cuánto se puede mover el cruce lateralmente antes de que se destape el cuello de cisne.

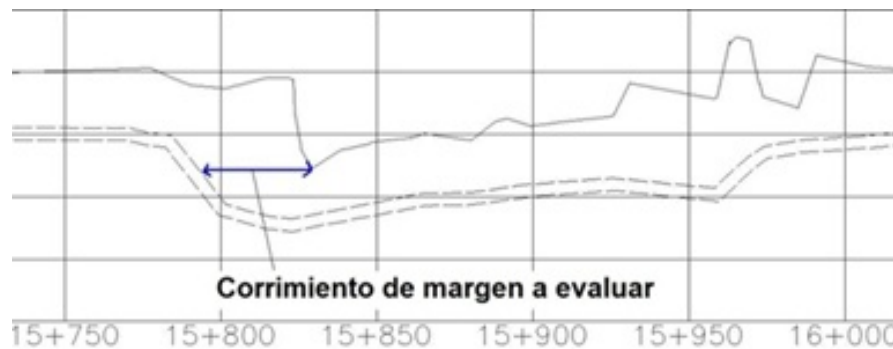


Figura 3. Tapada horizontal para el caso de un cruce de río obtenida de un relevamiento de tapadas georreferenciado en un cruce especial

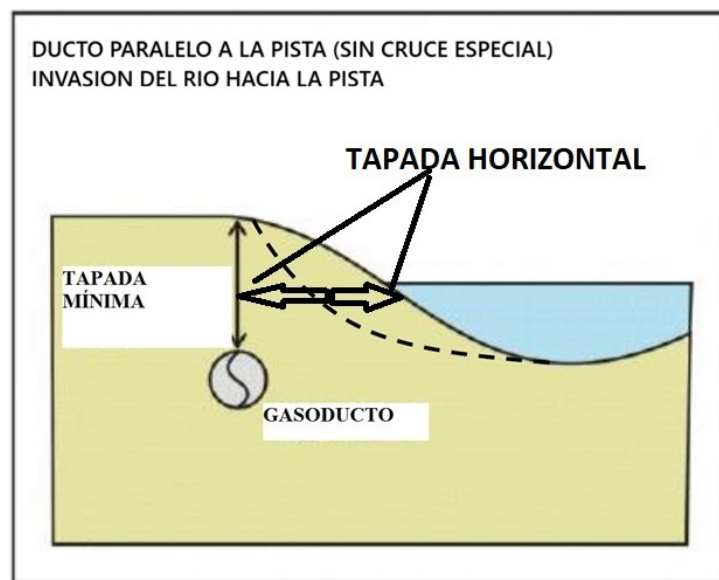


Figura 4. Tapada horizontal para el caso de invasión del río hacia la pista (sin cruce especial)

Ejemplos de erosiones por corrimientos laterales de márgenes

De las amenazas hidrotécnicas listadas, dentro de lo que se señaló como migración lateral se pueden enumerar varios procesos erosivos diferentes en cuanto a que pueden afectar a los cruces o a segmentos de la cañería que no tienen ninguna consideración especial en cuanto a la interacción de la corriente de agua con el ducto:

1. **Cruces de ríos - Cauces curvos:** en este caso, si bien el río es curvilíneo, el proceso erosivo se concentra a lo largo del tiempo en la margen externa (o cóncava). La curva es siempre la misma que avanza en el tiempo en el mismo sentido hasta destapar el cuello de cisne.
2. **Cruces de ríos y traza paralela al río- Cauces meandrosos:** en este caso los meandros evolucionan de manera tal que sus curvas no permanecen en el tiempo en el mismo lugar. Un año pueden afectar una margen y en el futuro, pueden afectar la opuesta. Es decir, son muy dinámicos y varían en el tiempo. Pueden avanzar en el mismo sentido de la corriente o pueden apilarse hacia atrás (hacia aguas arriba) en caso de que se vean restringidos (canalizaciones, puentes, vegetación, etc.).

Eventualmente pueden destapar los cuellos de cisne de los cruces originales o segmentos de la cañería que no formaban parte del cruce especial.

3. **Traza paralela al río (sin cruce especial) – Invasión del río hacia la traza:** en este caso el río se desplaza lateralmente, pero el ducto no lo cruza, es decir su traza va paralela al curso de agua. Al moverse lateralmente, eventualmente destapa segmentos de cañería que originalmente no estaban diseñados como parte de un cruce especial (menor factor de diseño, mayor espesor de pared, contrapesado).
4. **Fuga del río por el derecho de vía (sin cruce especial) – Avulsión:** en este caso, el río deja de escurrir por el cauce original y se desvía por la pista de mantenimiento o derecho de vía, que le ofrece una vía de escurrimiento preferencial ante procesos naturales de sedimentación o como consecuencia de la presencia de diques que cambian las condiciones de escurrimiento de los ríos disminuyendo las pendientes, las velocidades del agua y favoreciendo la colmatación de los cauces por efecto de la deposición de sedimentos y detritos acarreado por el agua.

Esta digresión es a veces confusa porque las cañerías aparecen expuestas en medio del cauce luego de una tormenta, y lo intuitivo sería pensar que el río socavó el lecho. Lo que pasa es que, al momento de detectar la novedad, la margen ya se corrió y no se puede saber cuál era la posición anterior fehacientemente. Otra manera de entender el problema de las migraciones laterales es identificar el contraste entre los distintos suelos que componen el lecho y las márgenes de un río. Por ejemplo, en los ríos de montaña o al pie de los cerros, la granulometría del lecho es más gruesa (piedras) que la de las márgenes (suelos no cohesivos) lo que se traduce en que al agua le sea más fácil erosionar lateralmente que en profundidad.



Figura 5. Contraste entre material de lecho y margen

A continuación, se mostrarán fotografías de cada uno de estos ejemplos, a los efectos de visualizar los conceptos enumerados en los párrafos anteriores.

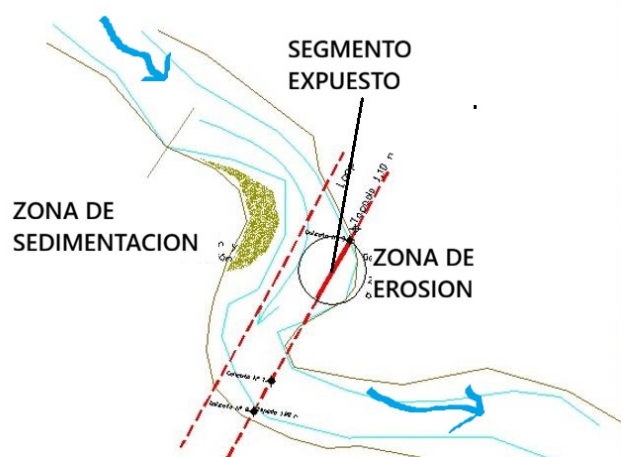


Figura 6. Caso 1 – Curva – Río Piquirenda Viejo, Salta



Figura 7. Caso 1 – Curva – Río de las Piedras, límite norte entre Salta y Jujuy



Figura 8. Caso 1 – Curva – Río Jesús María, Córdoba (la línea punteada es la nueva margen erosionada)



Figura 9. Caso 1 – Curva – Río Curi-Leuvú, Neuquén



Figura 10. Caso 1 – Curva – Río Lileo, Neuquén



Figura 11. Caso 2 – Meandros – Riacho Seco, Salta



Figura 12. Caso 2 – Meandros (apilamiento por obras de terceros) – Río Santa María, Salta



Figura 13. Caso 3 – Invasión del río hacia la pista – Río Lileo, Neuquén



Figura 14. Caso 3 – Invasión del río hacia la pista – Río Blanco, Salta



Figura 15. Caso 4 – Fuga del río por la pista – Bajo de Añelo, Neuquén

El valor del análisis cualitativo

En muchas instancias del análisis de la integridad de ductos ante amenazas hidrotécnicas, no se tiene toda la información disponible y ni con la misma calidad de datos. El error inherente a cada dato puede ser de unos pocos centímetros hasta 15 metros dependiendo del método de obtención. Sin embargo, este hecho no debe ser un obstáculo para el análisis. En muchas ocasiones, como especialistas, se nos pide que evaluemos el riesgo de una determinada situación, y esta tarea se debe hacer con los datos disponibles. De allí que tiene singular importancia el análisis cualitativo, en donde se usa toda la información disponible, se analizan las amenazas hidrotécnicas y se contemplan las distintas calidades de los datos en función de su método de obtención. Sin embargo, es en el resultado del análisis y no antes, en donde se evaluarán los errores y limitaciones, teniendo como objetivo en mente obtener valores referenciales que nos sirvan para decidir, sobre si seguir monitoreando o implementar una obra de adecuación, o en este último caso, realizar un estudio de integridad que nos dé más y mejor información para realizar una obra de mayor envergadura. En los párrafos siguientes se enumeran distintas herramientas para evaluar la tapada horizontal, cada una de ellas con un grado de complejidad distinto.

Estimación de la tapada lateral disponible

En el análisis de los corrimientos laterales de las márgenes de los ríos no siempre se tienen todos los elementos de juicio obtenidos de la mejor forma. Sin embargo, eso no debe ser un obstáculo para la tarea de estimar la distancia lateral de cobertura de suelo entre la línea de margen y el ducto. Existen distintas maneras de recolectar la información de campo y gabinete, cada una de ellas con su error, que será evaluado al final del proceso, dentro de un análisis cualitativo que no deja de ser valioso. A continuación, se enumerarán distintas metodologías para la evaluación de la tapada horizontal.

1. Medición de tapadas en forma georreferenciadas mediante relevamiento topográfico en ríos vadeables

Este relevamiento se aplica a ríos vadeables, es decir que se puede caminar sobre el lecho en períodos de estiaje. Normalmente se hace en forma conjunta con un relevamiento topográfico. El equipamiento necesario es un equipo de medición de tapadas y un equipo topográfico (GPS diferencial o estación total) de manera de medir para cada punto las coordenadas planas, la cota del terreno y el valor de la tapada vertical. El valor del display del medidor de tapada da la profundidad al eje, por ello para obtener la tapada al lomo del ducto se debe restar el radio del ducto. Como precaución, se debe estipular el valor del espaciamiento entre mediciones siendo necesario tener un mejor detalle en la zona próxima a los cuellos de cisne y uno menor en segmentos planos del cruce. A modo de referencia se pueden estipular a priori, algunos puntos de singulares

tales como los pies y los bordes superiores de cada una de las barrancas, el o los talwegs o puntos más profundos del río, entre otros.

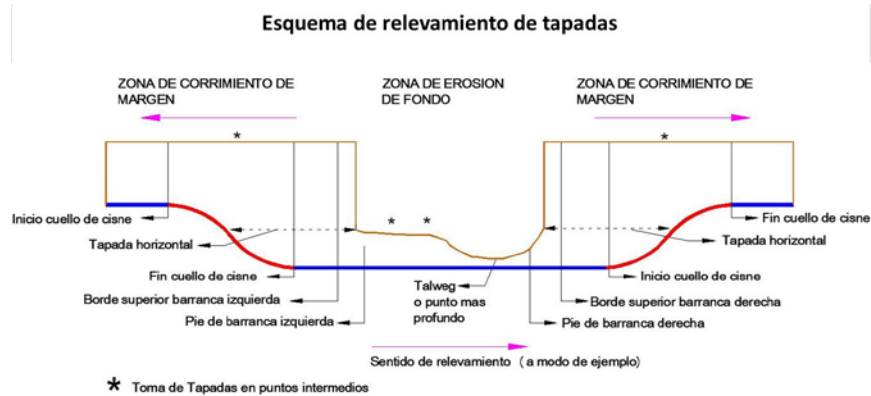


Figura 16. Diagrama con puntos característicos del relevamiento de tapadas

El resultado de este relevamiento tiene distintos formatos:

- Plano de planta con todos los puntos de medición y el valor de tapada vertical al lomo
- Perfil longitudinal del terreno en márgenes y lecho indicando los valores de la tapada vertical en un eje de progresivas. En este corte se mide la tapada horizontal disponible sobre el plano.
- Tabla con las coordenadas planas (latitud y longitud, o Este y Norte), la cota del terreno, la tapada al lomo y la cota del lomo. En este caso, es necesario definir el formato para luego poder cargarla en un Sistema de Información Geográfico (shape file o similar). El lomo del ducto es un dato fundamental para el diseño de cualquier obra de remediación.
- Este procedimiento se completa dejando puntos fijos de coordenadas y cotas conocidas en el terreno para vincularse en relevamientos futuros y poder comparar mediciones

Una vez obtenido el plano de tapadas sobre un perfil longitudinal sobre el gasoducto, se mide sobre el mismo la tapada horizontal desde cada margen a la cañería.

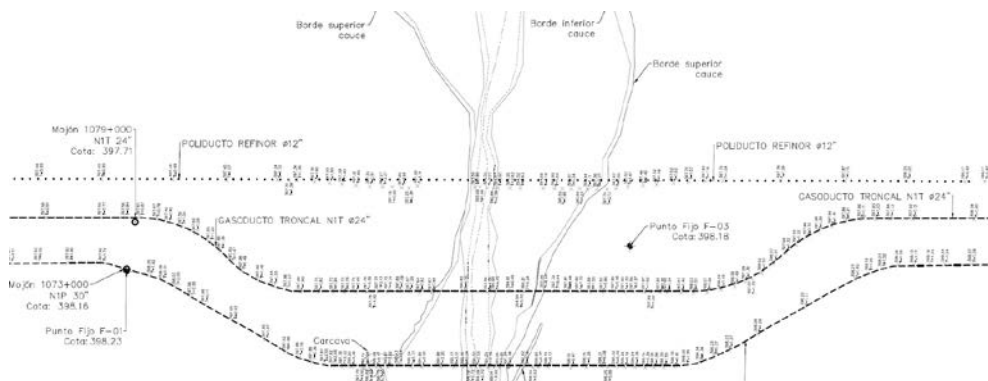


Figura 17. Plano de planta de los puntos de medición de tapadas verticales

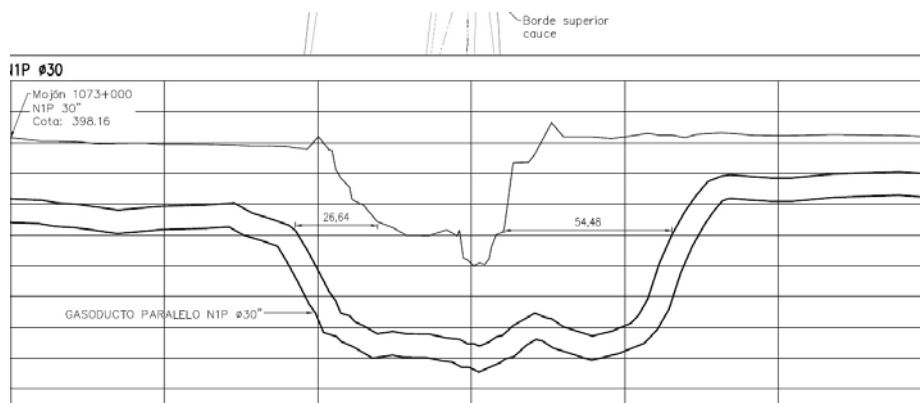


Figura 18. Tapadas horizontales medidas en el plano de corte longitudinal

TABLA DETECCIÓN DE TAPADAS

Proy. Gauss Kruger Sistema Posgar 2007		Coordenadas Geográficas		Cota Terreno	Conducto	Tapada al lomo	Cota lomo Gasoducto
X	Y	Latitud	Lognitud	(m IGN)		(m)	(m)
4407338.74	6558257.31	S31° 06' 40.30"	W63° 58' 16.82"	397.70	PARALELO 30"	T=1.84	395.86
4407339.04	6558239.08	S31° 06' 40.89"	W63° 58' 16.81"	397.84	PARALELO 30"	T=2.11	395.73
4407339.34	6558228.13	S31° 06' 41.25"	W63° 58' 16.81"	397.93	PARALELO 30"	T=2.02	395.91
4407339.78	6558215.35	S31° 06' 41.66"	W63° 58' 16.79"	397.92	PARALELO 30"	T=1.95	395.97
4407339.80	6558201.88	S31° 06' 42.10"	W63° 58' 16.80"	397.95	PARALELO 30"	T=1.74	396.21
4407335.37	6558182.07	S31° 06' 42.74"	W63° 58' 16.97"	398.05	PARALELO 30"	T=1.92	396.13
4407333.39	6558177.24	S31° 06' 42.90"	W63° 58' 17.05"	398.05	PARALELO 30"	T=2.01	396.04
4407330.46	6558171.84	S31° 06' 43.07"	W63° 58' 17.16"	398.03	PARALELO 30"	T=2.03	396.00
4407326.77	6558165.46	S31° 06' 43.28"	W63° 58' 17.30"	397.96	PARALELO 30"	T=2.06	395.90

Tabla 1. Tabla con las tapadas verticales, sus coordenadas y cotas del terreno y el lomo

2. Medición de tapadas en forma georreferenciadas en ríos no vadeables y ajuste en cota del ILI

Este caso el río no se puede vadear debido a que durante todo el año lleva un caudal significativo. Si bien existen instrumentos que miden tapada que son sumergibles que permiten replicar el procedimiento anterior, su uso no es común. Por tal motivo se describe un método alternativo. El primer inconveniente es conocer por dónde va el ducto el río ya que no se puede ver o detectar caminando. Por ello, se recurre a la información obtenida por el ILI (In-line inspection) que se corre periódicamente para conocer los defectos de la cañería y que puede incluir navegadores inerciales que dan las coordenadas planas y cotas del eje de la cañería. Teniendo la cota del caño, luego se realiza una batimetría para conocer la cota del pelo de agua y las profundidades del agua para finalmente obtener la cota del lecho del río. Finalmente restando la cota del lomo del caño a la cota del lecho se obtiene la tapada. En las márgenes, el procedimiento es el mismo que el descrito en el inciso anterior. La tapada horizontal se mide de plano de perfil longitudinal obtenido, en forma análoga al caso anterior.

$$\text{Cota del pelo de agua} - \text{profundidad del agua (batimetría)} = \text{cota del lecho}$$

$$\text{Cota del lecho} - \text{Cota del lomo} = \text{Tapada vertical}$$

Es usual que las cotas del ILI presenten un error considerable. Durante las corridas del ILI, normalmente se ponen imanes sobre la cañería cada cierta distancia (2 km, aproximadamente) con coordenadas y cotas conocidas para disminuir el error. Sin embargo, en tramos más cortos el error en cota es aún importante. Para tratar de disminuir ese error se hacen 2 cateos como parte del relevamiento terrestre se toman 2 coordenadas planas y cotas del lomo de la cañería. Luego se ajusta todo el perfil de la cañería dado por el ILI en cota usando los cateos y los valores de tapadas verticales en la parte terrestre. En síntesis, se ajusta (hacia arriba o hacia abajo) la traza dada por el ILI en los puntos con la cota conocidas dada por los cateos más el valor de la tapada del relevamiento terrestre

obtenidos por detección directa con el relevador de tapadas. Con esto ajustado, se puede pasar a inferir la tapada por diferencia de cotas entre el lecho y el lomo del caño dada por el ILI ajustado.

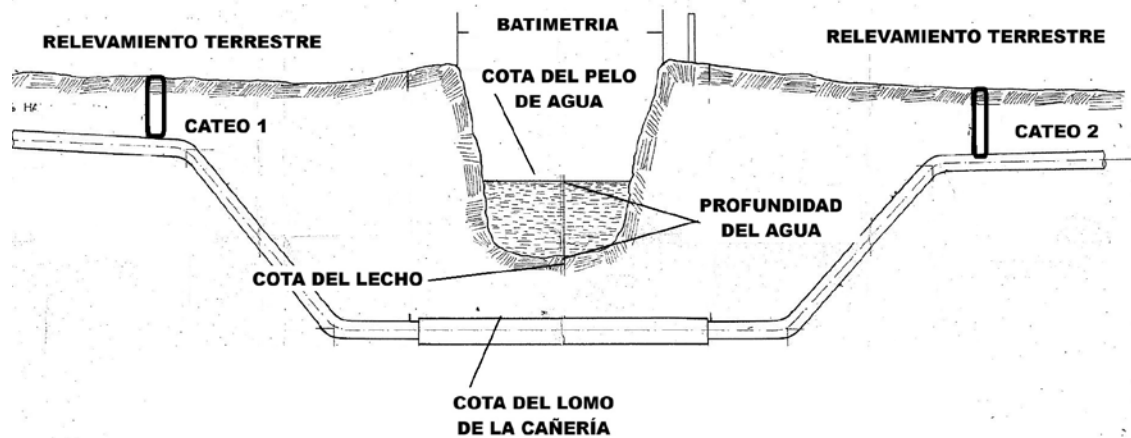


Figura 19. Esquema de relevamiento acuático y terrestre para ríos no vadeables

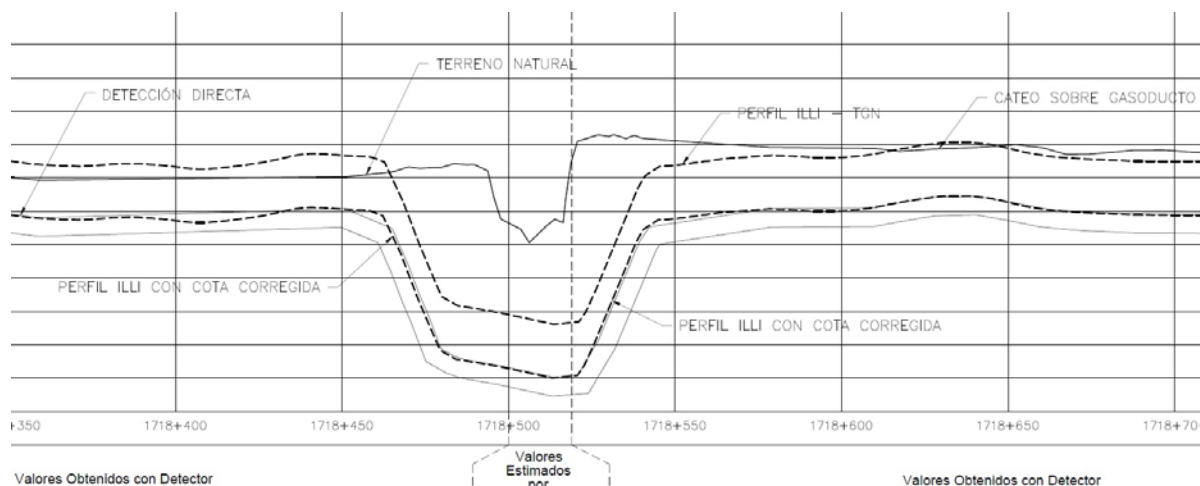


Figura 20. Ajuste en cota de la traza dada por el ILI

Además, el uso del ILI nos da una información muy valiosa en cuanto los puntos característicos de un cruce especial: inicio y fin del mayor espesor de pared, curvas y la forma general de cómo fue dejada la cañería en la zanja.

3. Medición de una nueva línea de margen con GPS manual y medición de tapadas verticales

Luego de un evento de crecida, en el caso de que no haya exposición de la cañería, es una práctica frecuente tratar de evaluar en forma expeditiva el corrimiento de margen sufrido y la tapada disponible. Si bien los navegadores manuales pueden llegar a tener un error de localización de hasta 15 m, esto no inhabilita el análisis. Con este instrumento y el medidor de tapadas y se procede a obtener dos tipos de datos fundamentales:

- Línea de margen erosionada: para ello se caminar lo más pegado a la línea de margen (puede ser al pie o en la barranca superior, según sea más accesible) y grabar el recorrido (track) en el GPS

manual. Luego este recorrido se procesa para luego superponerlo en la imagen satelital o fotografía aérea georreferenciada más reciente disponible, cuya fecha debe ser conocida. Luego sobre la imagen satelital se puede medir el corrimiento lateral de la margen del río entre las dos fechas.

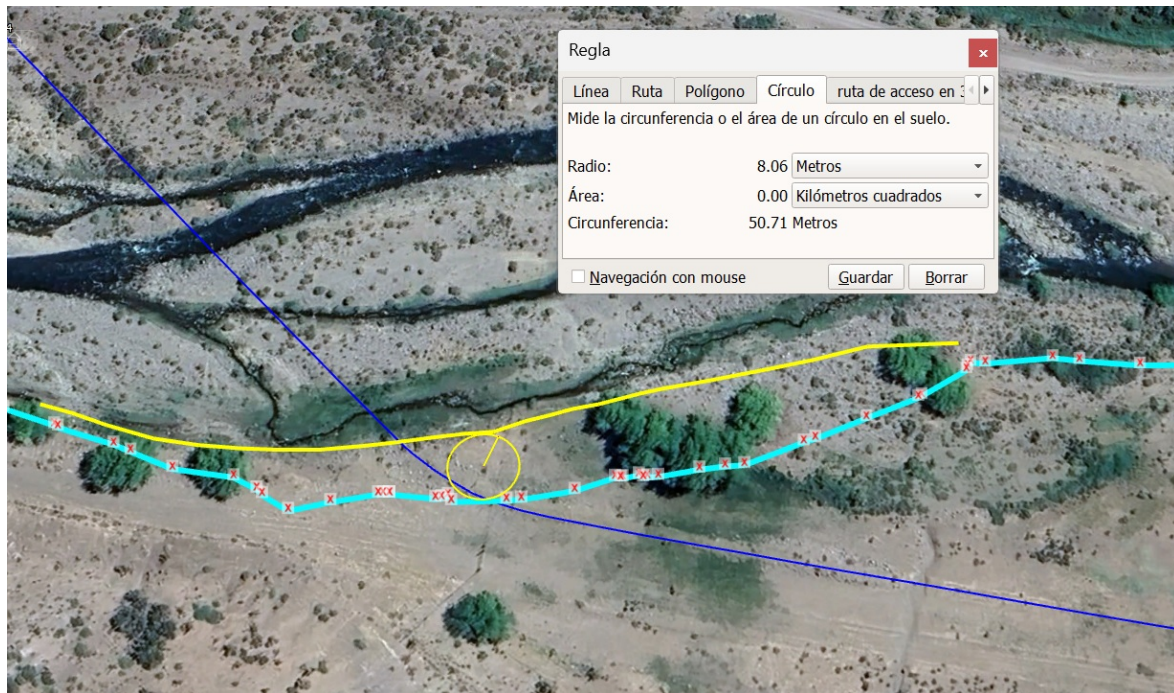


Figura 21. Cálculo del corrimiento medido entre la línea actual relevada con GPS manual (2024) luego de una crecida y la anterior obtenida de una imagen satelital anterior (2023)

- Se miden las tapadas a lo largo del cruce y se toma una coordenada plana del lugar de medición con el GPS manual.
- Se ubican los puntos de las mediciones de tapada en la traza dada por la corrida ILI tanto en planta como en corte longitudinal sobre el gasoducto. En planta se determina el progresivado del punto de medición de tapada. En corte, si bien las cotas de los navegadores manuales no son confiables, esto no es un impedimento ya que se no se tienen en cuenta. En la práctica se le suma al valor medido de la tapada a la cota del eje del ILI y se trabaja con cotas relativas.
- Finalmente, con el plano de corte longitudinal ya definido y con los puntos de medición de tapadas ubicados, se vuelve a medir en el gráfico las tapadas horizontales disponibles en cada margen.

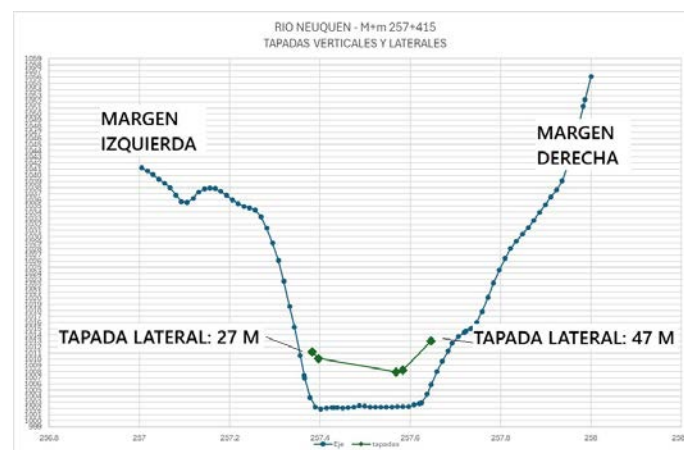


Figura 22. Cálculo de la tapada horizontal disponible mediante el ILI y tapadas verticales con coordenadas tomada con GPS manual o aplicación móvil

En la actualidad hay una tendencia a realizar los relevamientos de campo mediante colectoras de datos. Son aplicaciones desarrolladas para facilitar el trabajo de los ejecutores de campo y no tener que realizar informes luego de la visita de campo. Las aplicaciones usan el GPS que traen de fábrica los dispositivos móviles tales como celulares y tabletas. Luego se integran los relevamientos con el Sistema de Información Geográfica de las compañías, que permiten visualizar los resultados en forma georreferenciada.



Figura 23. Visualización en GIS de valores de tapadas medidas con el detector junto con la aplicación móvil

4. Medición de tapadas verticales y comparación con la altura de margen

Para un relevamiento de rutina, existe la posibilidad de estimar la tapada horizontal en forma expeditiva en el campo. La metodología a seguir consiste en:

- Para ello se debe contar con la medición de la altura de la barranca.
- Luego seguir midiendo tapada en la barranca superior en sentido contrario a la margen. Tener en cuenta que el ducto crece en elevación cuando se aleja del río por los cuellos de cisne,
- Finalmente, cuando el valor de la tapada medida iguala el valor de la altura de la barranca, se marca ese punto en la superficie,
- Luego se mide la distancia (con cinta métrica o pasos) entre ese punto y la medición de tapada en el pie de margen. Ese es el valor aproximado de la tapada horizontal en esa margen

Este procedimiento asume que el terreno permanece aproximadamente horizontal en entre la margen y el punto final donde la tapada iguala a la margen, lo cual es cierto en muchos casos. Si el terreno es empinado se deberá adicionar el desnivel entre los puntos final y el borde de la barranca.

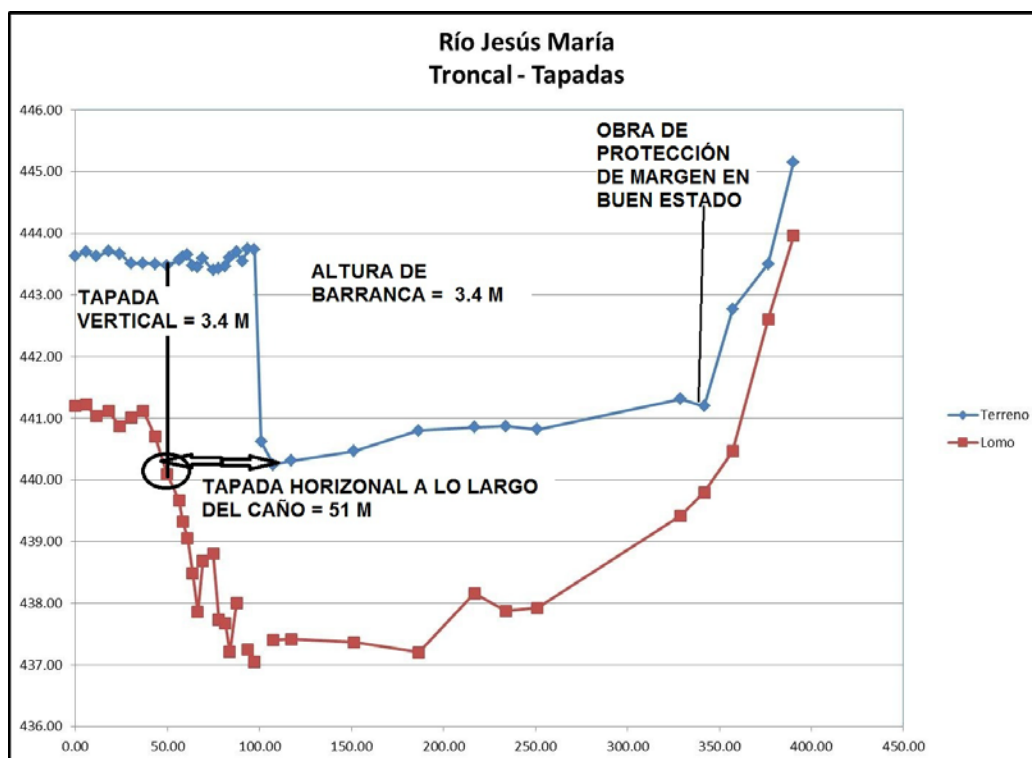


Figura 24. Medición de tapadas verticales y altura de margen



Figura 25. Medición de la distancia horizontal en donde la tapada vertical iguala a la altura de la barranca

Estimación del corrimiento lateral potencial

En los párrafos anteriores se pudo foco en conocer la tapada horizontal existente. Pero cabe preguntarse, ¿es suficiente para la movilidad de un determinado río? Para ello, se analizarán los antecedentes disponibles para evaluar los movimientos ocurridos en el pasado, definir una tendencia a futuro y decidir si se sigue monitoreando con una determinada frecuencia, se realizan estudios más detallados y se implementa o no una obra de protección.

Existen formas [prci, moness, ven te chow] de calcular la resistencia a las erosiones de márgenes de un río con un determinado material e inclinación de margen para una determinada velocidad del agua, y también fórmulas matemáticas para calcular un valor referencial del corrimiento. Sin embargo, en este trabajo la metodología consiste en el análisis cronológico de imágenes y sucesivos relevamientos topográficos georreferenciados. Las mismas pueden surgir de comparar imágenes disponibles tales como Google Earth o Sentinel, o las obtenidas de fotografías aéreas geo-referenciadas realizado para otros fines, tales como invasión del derecho de vía en un ancho más reducido. Los relevamientos topográficos están asociados a la construcción de los ductos o a proyectos de adecuación realizados en el pasado. A continuación, se muestran dos ejemplos: el análisis para el cruce del Río Carnero y para el Río San Andrés.

Ejemplo 1: Río Carnero, Córdoba

Este río tubo una exposición en el año 1999 en el gasoducto Troncal como consecuencia del corrimiento de la margen sur. Como consecuencia de ello, se construyó un cruce nuevo más profundo y cuyos cuellos de cisnes fueron separados de las barrancas una distancia generosa, para ambas márgenes. El proyecto se complementó con una protección de un muro de gaviones sobre dicha margen. Durante la construcción del gasoducto Paralelo, esa protección se extendió hacia aguas arriba sobre la misma margen.

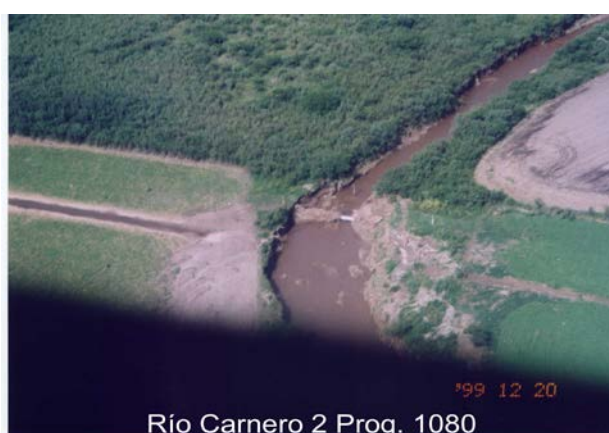


Figura 26. Vista hacia aguas arriba de la exposición del gasoducto Troncal en 1999



Figura 27. Protección de margen derecha construida sobre el Troncal junto con el cruce nuevo

Desde entonces este cruce ha experimentado cambios significativos en los últimos años, debido a la combinación de precipitaciones extremas y cambios en el uso del suelo.

Año	Material	Fuente
2000	Imagen Aérea	TGN
2006	Imagen Aérea	TGN
2013	Imagen Aérea	TGN
2018	Imagen Aérea	TGN
2025	Relevamiento Topográfico	BISA

Tabla 2. Información usada para el análisis cronológico de evolución lateral del río

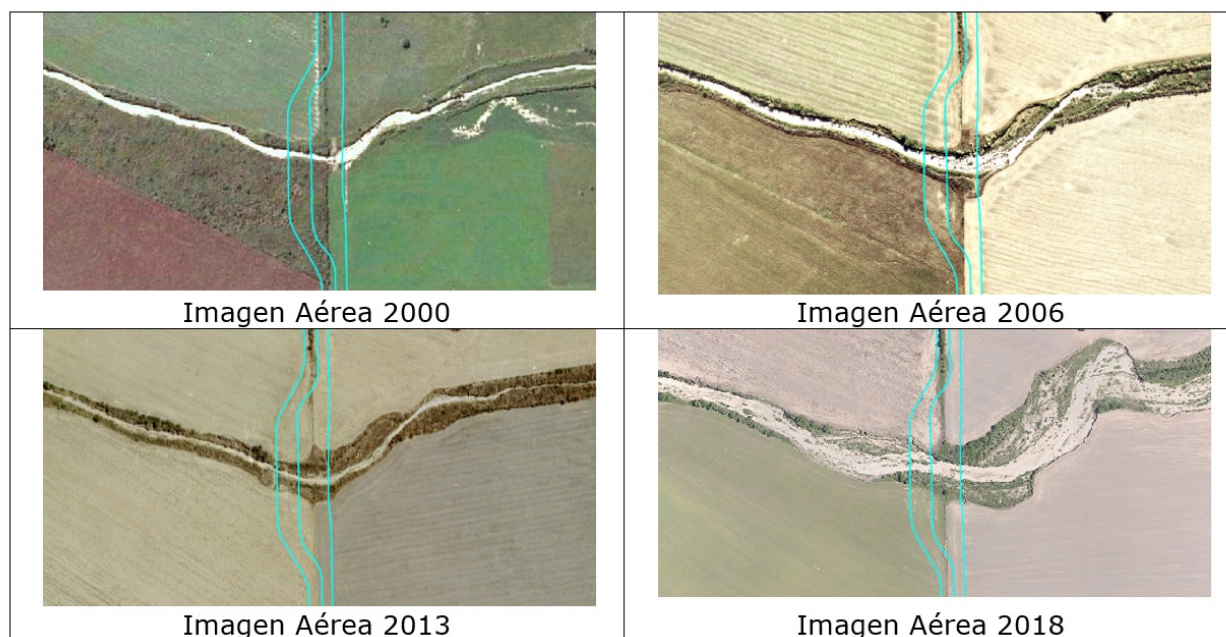


Figura 28. Imágenes aéreas georreferenciadas usadas

De una apreciación visual de estas imágenes se tiene que el mayor cambio el cauce del río sucedió entre 2013 y 2018. Este hecho se comprobó con la ocurrencia de un evento extremo de lluvia que tuvo lugar el 14 y 15 de febrero de 2015 con un acumulado de 197 milímetros.

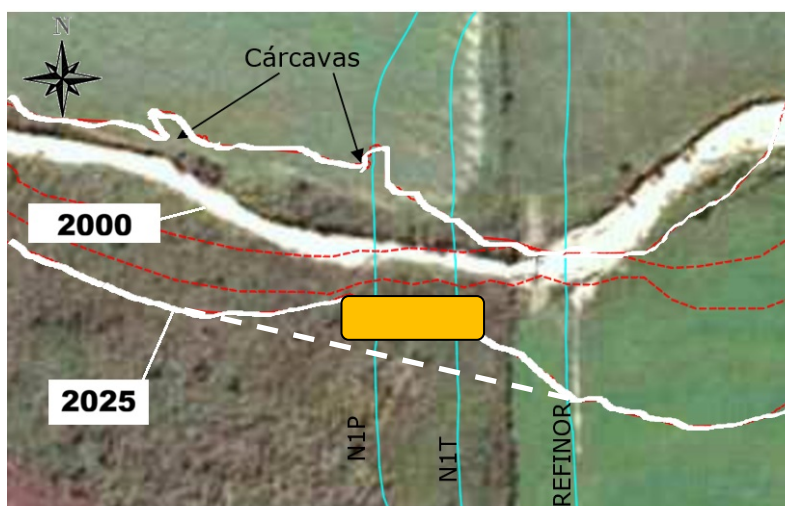


Figura 29. Corrimientos laterales de las márgenes entre el inicio y final del período de tiempo analizado y obras de protección de margen izquierda y posible evolución.

CORRIMIENTOS 2000-2025		
GASODUCTO	MARGEN IZQUIERDA [M]	MARGEN DERECHA [M]
PARALELO	35.43	13.36
TRONCAL	10.46	22.50

Tabla 3. Estimación de los corrimientos laterales máximo

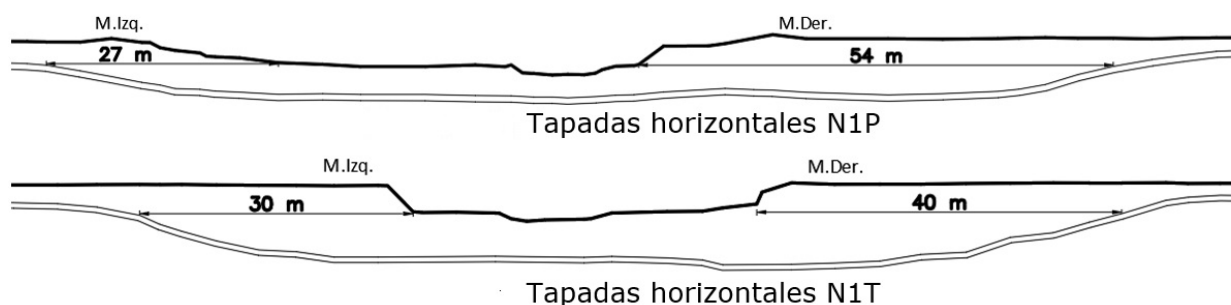


Figura 30. Tapadas horizontales disponibles

Comparando las tapadas disponibles con la tabla de corrimientos históricos se tiene que las tapadas horizontales disponibles son compatibles con los corrimientos de márgenes experimentados desde 1999. Esto saca a este cruce de una situación de riesgo inminente pudiendo planificar las obras de adecuación en el tiempo. Sin embargo, se observa que la obra de protección de margen derecha ha restringido el ancho disponible en la zona de los cruces, siendo evidente que no pudo conducir la crecida de 2015. La tendencia identificada es que, hacia aguas arriba de los cruces sobre margen derecha, existe la posibilidad de que el río se meta por detrás de la obra de protección reduciendo la tapada horizontal en forma brusca y significativa. Esta tendencia se verifica con los relevamientos de campo que indican el colapso parcial de las obras de protección. Se prevé eliminar la protección existente e implementar una nueva dándole mayor sección al río hacia al sur. También, se propone reemplazar el muro de gaviones por una protección de geotubos que tienen una mayor flexibilidad.



Figura 31. Obra de protección de margen desmoronada

PERFIL TIPO PROTECCIÓN CON GEOTUBOS RS
Esc. 1:100

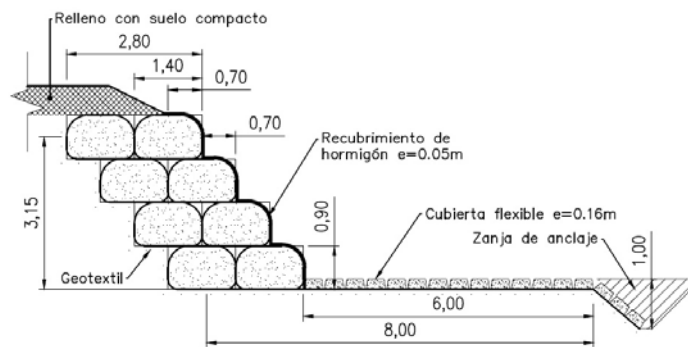


Figura 32. Esquema típico de protección de margen con geotubos a implementar en el futuro

Ejemplo 2: Río San Andrés, Salta

Este río tiene un cauce trenzado producto de su ubicación entre un ambiente de montaña y la zona más plana de pie de monte caracterizada por cultivo de caña de azúcar. Su traza es más bien rectilínea con un marcado contraste entre los materiales del lecho (gruesos) y las márgenes (finos sin cohesión). A lo largo de los años se identificó un proceso de corrimiento de margen derecha por lo cual se realizó el análisis que se desarrolla a continuación.

De una inspección visual de las líneas de márgenes derechas en el período 2013 a 2022, se observa que existe un corrimiento lateral de las márgenes en la zona de aguas arriba del cruce (el agua escurre de arriba hacia abajo de la imagen). La erosión máxima medida entre esos años fue de 130 metros.

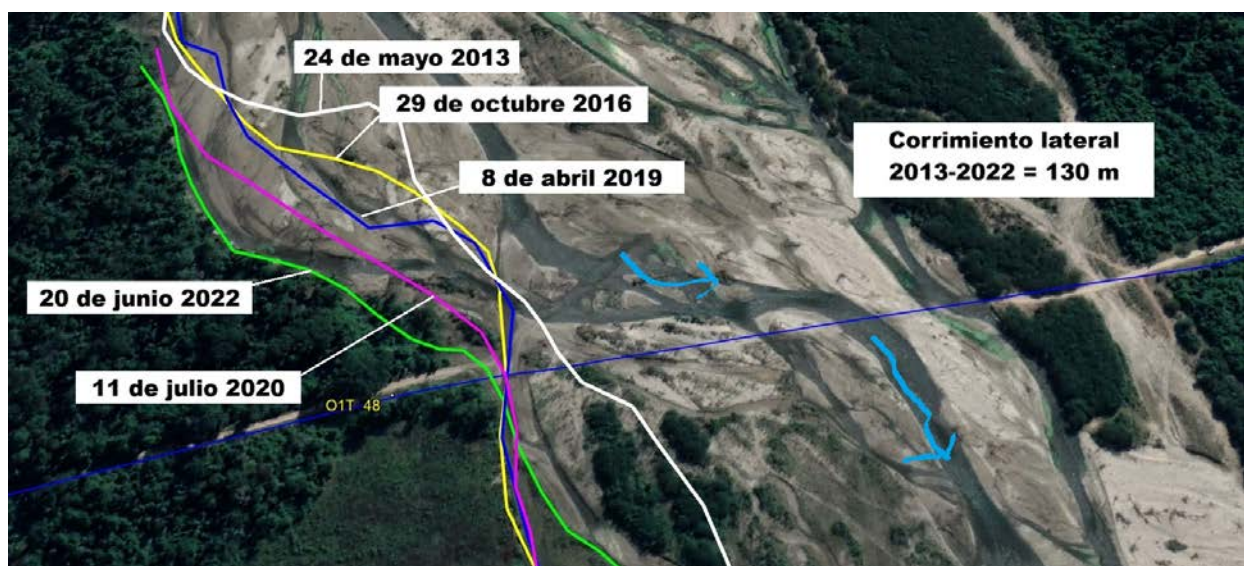


Figura 33. Evolución de las líneas de márgenes derecha a lo largo del tiempo

El próximo paso es verificar la posición de las curvas y los cambios de espesor de pared de la cañería en correspondencia con el diseño del cruce especial original. Esta información se extrae de las corridas ILI. El objetivo es identificar si el río puede exponer al ducto en un segmento en donde el espesor de pared de la cañería es menor (más allá del cambio de espesor), lo cual implica una menor resistencia de la cañería ante las tensiones transmitidas por la corriente de agua. A continuación, se muestra un extracto de la corrida ILI con navegador inercial y la ubicación de los puntos característicos (curvas y cambios de espesor) en una imagen satelital. De la Figura 34 se desprende que de seguir evolucionando la erosión de margen y destapar la cañería, el agua impactaría más allá del cambio de espesor (de mayor a menor) en una longitud de 130 metros, lo cual es desfavorable para la integridad del cruce.

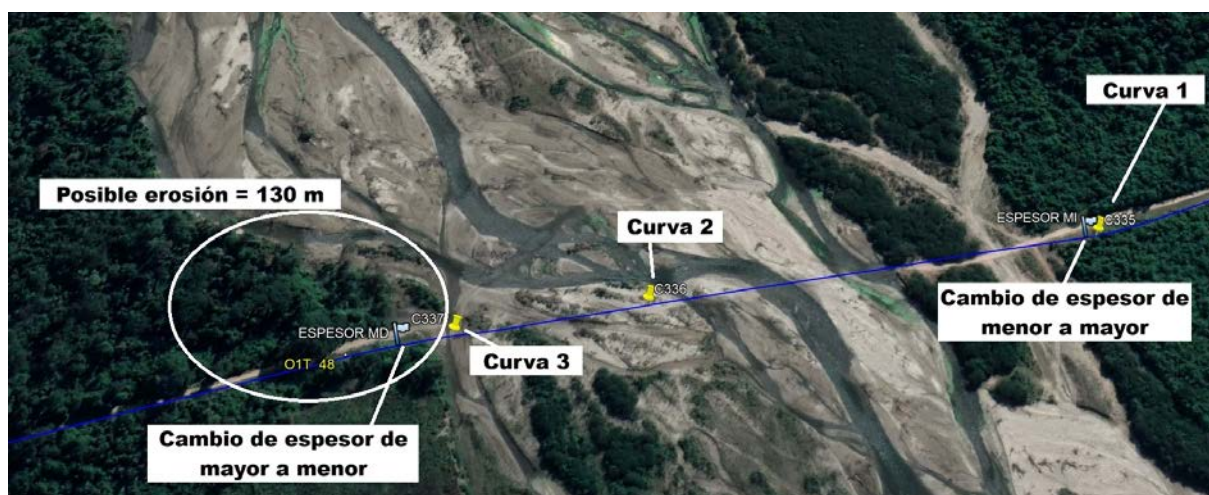


Figura 34. Ubicación de los cambios de espesor y curvas dados por el navegador inercial del ILI

Identificador	Distancia BJ (m)	NA501 Distancia (m)	Sold. A/ar mas cerca	Dist a Sold. A/ar (m)	Espesor de Pared (mm)	Descripción	Norte (m)	Este (m)	Altura (m)
GWD 39650	47905.321	47887.2	39640	13.02	7.1	10.006m Junta	7445338.5	3649464.771	524.659
BND 335	47910.703	47892.7	39650	5.382	7.1	80.4D Curva 2.6 Der. 4.7 Abajo	7445337.501	3649459.491	524.532
GWD 39660	47915.327	47897.4	39650	10.006	8.7	Esp.=8.7mm, 12.847m Junta	7445336.825	3649454.941	524.1
GWD 39670	47928.174	47910.5	39660	12.847	8.7	12.034m Junta	7445334.943	3649442.298	522.995
GWD 39910	48218.346	48205.5	39900	11.955	8.7	12.958m Junta	7445290.055	3649155.835	522.443
BND 336	48218.367	48205.5	39910	0.021	8.7	34.4D Curva 2.1 Abajo	7445290.052	3649155.814	522.443
GWD 39920	48231.304	48218.6	39910	12.958	8.7	13.382m Junta	7445287.816	3649143.085	522.051
GWD 40010	48340.958	48330.1	40000	12.79	8.7	12.856m Junta	7445270.675	3649034.888	523.387
BND 337	48345.561	48334.8	40010	4.604	8.7	75.4D Curva 3.0 Izq. 2.0 Arriba	7445270.251	3649030.31	523.595
BND 338	48349.818	48339.1	40010	8.861	8.7	91.8D Curva 3.7 Izq. 2.3 Arriba	7445269.63	3649026.116	523.947
GWD 40020	48353.814	48343.2	40010	12.856	8.7	12.352m Junta	7445268.853	3649022.226	524.405
GWD 40030	48366.166	48355.7	40020	12.352	8.7	12.124m Junta	7445266.427	3649010.234	526.062
GWD 40040	48378.29	48368.1	40030	12.124	7.1	Esp.=7.1mm, 13.148m Junta	7445264.099	3648998.459	527.718
GWD 40050	48391.439	48381.4	40040	13.148	7.1	12.828m Junta	7445261.526	3648985.665	529.279

Tabla 4. Extracto de la corrida ILI con las coordenadas del eje del gasoducto, las curvas y los cambios de espesor de pared de la cañería

Luego queda evaluar la tapada horizontal disponible y compararla con el segmento afectado por un eventual destape. Para ello se recurre a las mediciones de tapada vertical efectuadas con coordenadas obtenidas de un GPS manual o colectora de datos ubicadas en el espacio.



Figura 35. Ubicación de los valores de la tapada vertical

Cabe destacar que los valores de tapada vertical medidos en la zona próxima a la margen derecha eran todos buenos y mayores a 1.80 metros, lo cual puede resultar engañoso, porque la principal amenaza hidrotécnica es el corrimiento lateral y no la socavación vertical. Finalmente, se debe poner toda la información anterior junta en un gráfico de corte longitudinal a lo largo del ducto para estimar la tapada lateral disponible. Es importante ubicar los puntos de medición de tapada dentro del progresivado del ILI, haciendo uso de las coordenadas planas de dichos puntos y de las soldaduras.

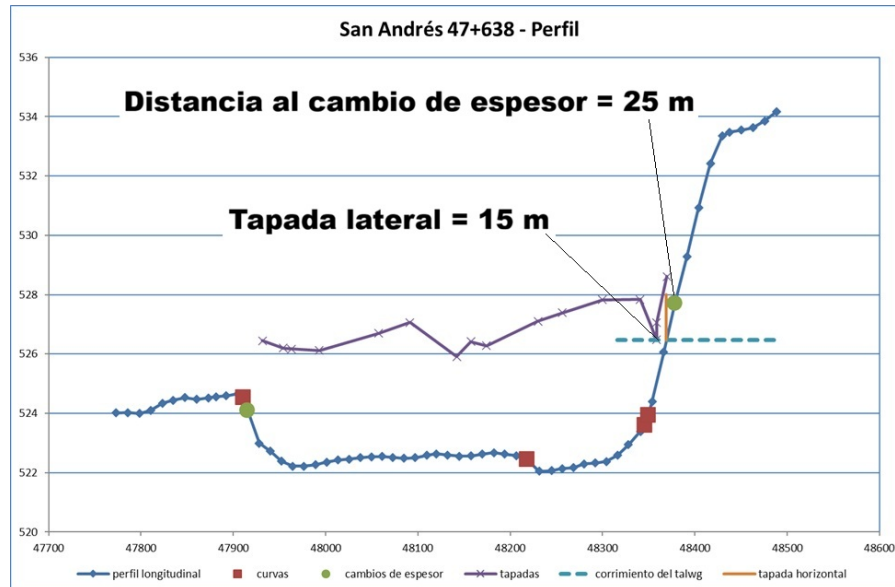


Figura 36. Corte longitudinal del cruce con toda la información necesaria para evaluar la tapada horizontal

Finalmente, la tapada lateral disponible es de 15 metros y la distancia al cambio de espesor de 25 metros son muy inferiores al corrimiento lateral potencial estimado en 130 m (Figura 33) a partir de las líneas de márgenes.

A partir de este análisis, se decidió implementar una obra de adecuación consistente en:

- Una serie de espigones aguas arriba del cruce que aleje el agua de la margen hacia el centro del río
- Protección con un muro de gaviones del cuello de cisne del ducto



Figura 37. Vista hacia aguas debajo de la obra de protección de la margen derecha

Conclusiones

- Los corrimientos de márgenes son una de las amenazas hidrotécnicas más comunes a la integridad de ductos de transporte. Una temprana caracterización ayuda a realizar un mejor diseño para cruces nuevos, prever destapes en ductos en operación y ayudar a diseñar obras de adecuación más apropiadas.
- Un listado parcial de corrimientos de márgenes incluye principalmente:
 - Erosión en una curva cuya ubicación permanece en el tiempo
 - Meandros que divagan lateralmente
 - Invasión del río hacia la traza del ducto cuando corren paralelos
 - Fuga del río por el derecho de vía, forzando el escurrimiento del agua paralelo al ducto
- Su evaluación es muchas veces ignorada frente a la socavación potencial vertical, que está más presente en las normativas emanadas por las Autoridades de Aplicación, de allí que su inclusión y visualización es algo que debe ser tenido en cuenta.
- La consideración de esta amenaza requiere simultáneamente de conocer la tapada horizontal disponible y la erosión potencial o tendencia erosiva de las márgenes en el futuro.
- Para ello existen muchas herramientas para estimar ambas magnitudes, todas ellas con un error inherente que hay que avaluar mediante un análisis cualitativo. Si bien los datos tienen distintas calidades, este hecho no impide realizar el análisis del riesgo correspondiente a esta amenaza.
- Entre las herramientas más comunes para evaluar el proceso erosivo se tiene:
 - Relevamientos topográficos geo-referenciados (especialmente si hay más de uno que se puedan comparar)
 - Batimetría en caso de ríos no vadeables con la cota del lecho
 - Medición de tapadas verticales georreferenciadas con cota y coordenadas planas de los puntos de medición
 - Fotos aéreas georreferenciadas (obtenidas por vuelos de aviones, drones, etc.)
 - Imágenes satelitales georreferenciadas
 - Corridas ILI con navegador inercial y su ajuste en cota
 - Líneas de márgenes obtenidas con un navegador manual GPS (camino o tracks)
 - Mediciones de tapadas con instrumento más coordenadas planas con navegador manual GPS
- Para estimar la tapada horizontal disponible, la información listada debe ser procesada con el objetivo final de obtener un perfil longitudinal del ducto que incluya:
 - Cambio de espesores de pared y curvas,
 - Tapadas verticales
 - Perfil del terreno
 - Toda esta información sobre un corte longitudinal del ducto. Con el perfil obtenido se estima la tapada horizontal disponible
- Mediante el estudio de las variaciones en la alineación en planta de los ríos a lo largo del tiempo, se puede estimar los desplazamientos máximos observados en un período de tiempo, que se toman como indicativos de la movilidad lateral potencial del río. Es importante correlacionar los cambios identificados con los registros disponibles de precipitaciones y caudales para identificar crecidas.
- También se puede definir una tendencia del proceso erosivo que se usa para proyectar hacia el futuro posibles cambios en las posiciones de las márgenes.
- Comparando la tapada horizontal disponible vs la máxima registrada o la proyectada se pueden tomar mejores decisiones con los siguientes fines:

- Para un cruce nuevo evaluar si es más conveniente realizar un diseño asimétrico alejando los cuellos de cisnes de las márgenes en función de la movilidad observada
- Para un cruce existente se pueden tomar las siguientes decisiones
 - Seguir monitoreando con la frecuencia original,
 - Aumentar la frecuencia de monitoreo como una herramienta de disminución del riesgo
 - Encargar un estudio más exhaustivo si se identifica un problema en donde se prevé realizar una obra de adecuación en el futuro,
 - Decidir la implementación de medidas inmediatas antes del comienzo de la próxima temporada de lluvias
- Una vez identificado y caracterizado una amenaza de este tipo a la integridad del ducto, las soluciones de adecuación más comunes son:
 - Protección de margen, en sus muchas variantes,
 - Restitución de la línea de margen anterior (previa a la crecida o incluso de años anteriores) mediante el uso de espigones
 - Bajadas de cañería por flexión o con corte
 - Cruce nuevo en cualquier modalidad (excavación a cielo abierto, perforación dirigida, etc.)